Institut für Technische Gebäudeausrüstung Dresden
Forschung und Anwendung GmbH
Prof. Oschatz - Dr. Hartmann - Dr. Werdin - Prof. Felsmann

Universität Kassel
Fachgebiet Bauphysik

Gesamtanalyse
Energieeffizienz von Hallengebäuden

Abschlussbericht

Auftraggeber:

FIGAWA
Bundesvereinigung der Firmen im Gas- und Wasserfach e.V.
Marienburger Straße 15

50968 Köln

Auftragnehmer:

ITG Institut für Technische Gebäudeausrüstung Dresden
Forschung und Anwendung GmbH
Bayreuther Str. 29 in 01187 Dresden

Dipl.-Ing. (FH) Jens Rosenkranz
Dipl.-Ing. Bettina Mailach
Dr.-Ing. Ralf Gritzki
Dipl.-Ing. Jens Kaiser
Dr.-Ing. Alf Perschk
Dr.-Ing. Markus Rösler
Dr.-Ing. habil. J. Seifert
Prof. Dr.-Ing. Bert Oschatz

Universität Kassel
Fachgebiet Bauphysik
Gottschalkstraße 28a in 34127 Kassel

Dr. Frank Otto

Dresden, 30. Juni 2011

Dieser Bericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert.
(Aktenzeichen: SF – 10.08.18.7 – 09.45 / II 3 – F20-09-047)
Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt beim Autor.

Inhalt

1 Vorbemerkung 7
2 Untersuchungsmethoden 8
2.1 Allgemeines 8
2.2 Untersuchung fiktiver Modellgebäude 8
2.2.1 Allgemeines 8
2.2.2 Energiebedarfsberechnungen nach DIN V 18599 8
2.2.3 Thermische Simulationsrechnungen 8
2.2.4 Simulationen mit Anlagentechnik 9
2.3 Auswertung realer Verbrauchsdaten 9
2.4 Statistische Untersuchung 10
2.5 Theoretische Betrachtungen 10
3 Gebäudekatalog (E, SG) 11
3.1 Allgemeines 11
3.2 Bauteilkennwerte 11
3.2.1 Allgemeine Kennwerte, Wärmeschutz 11
3.2.2 Wärmespeicherfähigkeit 13
3.3 Gebäudevarianten 14
3.4 Modellgebäude 15
3.4.1 Allgemeines 15
3.4.2 Werkstatt 15
3.4.3 Fertigungsbetrieb, Fensterflächenanteil Außenwand ca. 30% 15
3.4.4 Fertigungsbetrieb, Fensterflächenanteil Außenwand ca. 80% 15
3.4.5 Logistikhalle 16
3.4.6 Turnhalle 16
3.4.7 Baumarkt mit Gartenbereich 16
3.4.8 Lebensmittelmarkt 16
3.5 Heizlast 17
4 Nutzung (E, SG) 19
4.1 Allgemeines 19
4.2 Untersuchte Nutzungsmodifikationen und EnEV 19
4.3 Vorgriff: Vorschläge zur Überarbeitung 20
4.4 Energiebedarfsberechnungen DIN V 18599 21
4.5 Gebäudesimulationen 23
5 Anlagentechnik (E) 24

5.1 Allgemeines ... 24
5.2 Dezentrale Wärmeerzeugung ... 24
5.3 Zentrale Wärmeerzeugung ... 24
6 Berechnungsergebnisse (E, SG) ... 25
6.1 DIN V 18599 (E) ... 25
6.2 Anmerkungen zu den Berechnungsergebnissen (E) ... 27
6.3 Parametervariationen (E) ... 29
6.3.1 Wirksame Speicherfähigkeit ... 29
6.3.2 Luftwechsel ... 30
6.4 Simulationsergebnisse (SG) ... 32
6.4.1 Allgemeines ... 32
6.4.2 Jahresnutzwärmebedarf ... 32
6.4.3 Wirksame Speicherfähigkeit und Zeitkonstante ... 32
6.4.4 Luftwechsel ... 34
7 Vergleich von Bedarfs- und Verbrauchswerten ... 34
7.1 Qualität und Umfang der Daten ... 34
7.2 Vergleichbarmachung von Bedarfs- und Verbrauchswerten ... 35
7.2.1 Witterungsbereinigung ... 35
7.2.2 Heiz-/Brennwertbezug ... 35
7.2.3 Vergleich Bedarf/Verbrauch ... 35
7.3 Daten ... 36
7.4 Interpretation ... 36
8 Heizenergieverbrauch Hallengebäude ... 38
8.1 Vorbemerkung ... 38
8.2 Anzahl der Hallengebäude in Deutschland ... 38
8.2.1 Nichtwohngebäude (NWG), Gesamtbestand und Abgänge ... 38
8.2.2 Gebäudekategorien / Nutzungsarten ... 39
8.2.3 Beheizte Hallen ... 40
8.3 Nutzfläche ... 43
8.3.1 Allgemeines ... 43
8.3.2 Nichtwohngebäude (Hallen+Nichthallen) ... 44
8.3.3 Hallen Szenario 1 ... 45
8.3.4 Hallen Szenario 2 ... 45
8.3.5 Hallen Szenario 2 mit erweitertem Betrachtungszeitraum ... 46
8.4 Spezifischer Heizenergieverbrauch ... 47
8.4.1 Allgemeines ... 47

8.4.2 Gebäude ... 47
8.4.3 Baulicher Wärmeschutz ... 47
8.4.4 Ermittlung der Verbrauchswerte ... 48
8.5 Gesamtverbrauch und Einsparpotenzial ... 50
8.5.1 Szenario 1 ... 50
8.5.2 Szenario 2 ... 51
8.5.3 Szenario 2 mit erweitertem Betrachtungszeitraum ... 52
8.5.4 Erfassung energetischer Modernisierungen im Bestand ... 52
8.5.5 Bestandsmaßnahmen ↔ verschärftes Anforderungsniveau Neubau ... 53
8.6 Zusammenfassung und Fazit ... 55
9 Wirksame Wärmespeicherfähigkeit ... 57
9.1 Allgemeines ... 57
9.2 Besonderheit Hallengebäude ... 57
9.3 Außenbauteilen im Hallenbau ... 57
9.4 Nutzungsabhängige speicherwirksame Massen ... 58
9.5 Berechnungsansatz: Vereinfachte Berechnung in Anlehnung an DIN EN ISO 13768, Anhang A ... 58
9.6 Vorgriff und Fazit ... 59
10 Bilanzinnentemperatur ... 61
10.1 Vorbemerkung ... 61
10.2 Nachtabsenkung ... 61
10.3 Wochenend- und Urlaubsabsenkung ... 62
10.4 Vergleich der Berechnungsergebnisse: Simulation Monatsbilanzverfahren ... 62
11 Lüftungswärmeverluste ... 65
11.1 Allgemeines ... 65
11.2 Lüftungswärmeverluste durch Infiltration ... 65
11.2.1 Allgemeines ... 65
11.2.2 Derzeitiger Stand ... 65
11.2.3 Bemessungswert ohne Bezug auf Gebäudevolumen, Umrechnung ... 66
11.2.4 Bemessungswerte q_{50} ... 66
11.3 Nutzungsbedingte Lüftungswärmeverluste ... 68
11.3.1 Allgemeines ... 68
11.3.2 Außenluftvolumenstrom durch nutzungsbedingte Toröffnungen ... 69
11.3.3 Hygienische Anforderungen ... 73
11.4 Fazit ... 75
11.4.1 Infiltration ... 75

11.4.2 Torluftwechsel ... 76
11.4.3 Hygienische Anforderungen ... 76
12 Bewertung unterschiedlicher Heizungssysteme ... 77
12.1 Literaturanalyse ... 77
12.1.1 Vorbemerkung ... 77
12.1.2 Theoretische Untersuchungen ... 77
12.1.3 Experimentelle Untersuchungen ... 80
12.1.4 Numerische Untersuchungen ... 80
12.1.5 Normative Angaben ... 84
12.1.6 Weitere Untersuchungen ... 86
12.1.7 Fazit ... 86
12.2 Verluste der Wärmeübergabe ... 86
12.2.1 Derzeitiger Stand ... 86
12.2.2 Strahlungseinfluss ... 87
12.2.3 Einfluss des Lufttemperaturprofils ... 90
12.3 Verluste der Wärmeerzeugung (dezentrale Erzeuger) ... 101
12.3.1 Derzeitiger Stand DIN V 18599-5 ... 101
12.3.2 Überarbeitung des bestehenden Ansatzes ... 102
13 Simulationen mit Anlagentechnik (SGA) ... 108
13.1 Vorbemerkung ... 108
13.2 Simulationswerkzeug ... 108
13.3 Gebäude ... 110
13.3.1 Hohe Halle ... 110
13.3.2 Niedrige Halle ... 111
13.4 Nutzung ... 112
13.4.1 Reale Nutzung ... 112
13.4.2 Nutzungsrandbedingungen Simulation ... 112
13.4.3 Energiebedarfsberechnung nach DIN V 18599 ... 113
13.5 Heizlast ... 115
13.6 Anlagenvarianten – Auslegung und Simulationsmodelle ... 115
13.6.1 Warmwasser-Deckenstrahlplatten ... 115
13.6.2 Fußbodenheizung ... 116
13.6.3 Luftheizung ... 116
13.6.4 Dunkelstrahler ... 118
13.6.5 Hellstrahler ... 118
13.7 Ergebnisse ... 119
13.7.1 Simulationen ... 119

13.7.2 Angepasste Energiebedarfsberechnung ... 120
13.7.3 Vergleich: Simulation / DIN V 18599 „neu“ ... 121
14 Vorschläge zur Überarbeitung der DIN V 18599 ... 123
14.1 Vorbemerkung ... 123
14.2 Nutzungsprofile, Teil 10 ... 123
14.2.1 Vorbemerkung ... 123
14.2.2 Anpassung einzelner Parameter ... 123
14.2.3 Ergänzung/Ersetzung vorhandener Nutzungsprofile ... 126
14.3 Lüftungsverhalten und Gebäudedichtheit, Teil 2/10 ... 132
14.3.1 Allgemeines ... 132
14.3.2 Infiltration ... 132
14.3.3 Nutzungsbedingter Außenluftvolumenstrom ... 135
14.4 Bewertung verschiedener Wärmeübergabesysteme, Teil 5 ... 135
14.4.1 Strahlungseinfluss ... 135
14.4.2 Teilnutzungsgrade der Wärmeübergabe ... 139
14.5 Verluste der Wärmeerzeugung, Teil 5 ... 142
14.6 Hilfsenergie, Teil 5 ... 144
15 Projektresultate und weiterhin bestehende Probleme ... 146
15.1 Allgemeines ... 146
15.2 Untersuchte Teilprobleme ... 147
15.2.1 Gesamtsituation: Heizenergieverbrauch Hallen in Deutschland ... 147
15.2.2 Bedarf ↔ Verbrauch ... 147
15.2.3 Charakterisierung von Hallen / Standardnutzungsprofile ... 147
15.2.4 Wärmespeicherfähigkeiten von Hallengebäuden, Bilanzinnentemperatur ... 147
15.2.5 Lüftungswärmeverluste von Hallen ... 148
15.2.6 Anlagentechnik / Energieeffizienz verschiedener Hallenheizsysteme ... 148
15.3 Weiterhin bestehende Schwierigkeiten im Umgang mit der DIN V 18599 ... 149
15.3.1 Transmissionswärmeverluste an das Erdreich ... 149
15.3.2 Erfassung Dynamischer Betriebsweise auf Anlagenseite ... 150
15.3.3 Nicht plausible Effekte ... 151
16 Optimierungspotenzial, Anlage und Gebäude ... 153
17 Wechselwirkung EnEV ↔ EEWärmeG ... 156
17.1 EnEV 2009 und EEWärmeG 2008/2009: Situation und Vorschlag zur Fortschreibung ... 156
17.2 Situation 2011 ... 157
18 Anhang ... 158
A 1 Zu 3.4: Hüllflächen Gebäudekatalog ... 158

A 2 Zu 4.4: Nutzungsprofile DIN V 18599-10/-100 [1][2] ... 163
A 3 Zu 4.5: Randbedingungen der thermischen Gebäudesimulationen (SG) ... 169
A 4 Zu 6.1: Energiebedarfswerte DIN V 18599 [1][2] ... 171
A 5 Zu 6.3.1: Energiebedarfsberechnungen – Variation der wirksamen Speicherfähigkeit ... 178
A 6 Zu 6.3.2: Energiebedarfsberechnungen – Variation des Luftwechsels ... 185
A 7 Zu 6.4: Simulationsergebnisse (SG) ... 189
A 8 Zu 7.3: Bedarfs-Verbrauchs-Verhältnisse ... 215
A 9 Zusammenfassung der Simulationsrandbedingungen (SGA) ... 216
A 10 Simulationsbericht 17.12.2010, hohe Halle – Hellstrahler ... 222
A 11 Simulationsbericht 17.12.2010, hohe Halle – Fußbodenheizung ... 230
A 12 Simulationsbericht 17.12.2010, hohe Halle – Luftheizung (Decke) ... 238
A 13 Simulationsbericht 17.12.2010, hohe Halle – Luftheizung (Wand) ... 246
A 14 Simulationsbericht 17.12.2010, hohe Halle – Deckenstrahlplatten ... 254
A 15 Simulationsbericht 15.01.2011, hohe Halle – Hellstrahler ... 262
A 16 Simulationsbericht 15.01.2011, hohe Halle – Fußbodenheizung ... 271
A 17 Simulationsbericht 15.01.2011, hohe Halle – Luftheizung (Decke) ... 280
A 18 Simulationsbericht 15.01.2011, hohe Halle – Luftheizung (Wand) ... 288
A 19 Simulationsbericht 15.01.2011, hohe Halle – Deckenstrahlplatten ... 296
A 20 Simulationsbericht 24.01.2011, niedrige Halle – Hellstrahler ... 306
A 21 Simulationsbericht 24.01.2011, niedrige Halle – Fußbodenheizung ... 315
A 22 Simulationsbericht 24.01.2011, niedrige Halle – Luftheizung (Decke) ... 324
A 23 Simulationsbericht 24.01.2011, niedrige Halle – Luftheizung (Wand) ... 332
A 24 Simulationsbericht 24.01.2011, niedrige Halle – Deckenstrahlplatten ... 340
A 25 Zu 13.7.3: Anlagenvarianten DIN V 18599 neu, Zwischenstand ... 350
A 26 Zu 13.7.2, 13.7.3: Vergleich Simulationen / DIN V 18599 neu ... 351
19 Literatur/Quellen ... 354

1 Vorbemerkung

In der energetischen Bewertung von Gebäuden nach DIN V 18599 [1][2] im Zuge der Novellierung der Energieeinsparverordnung (EnEV) [7][8] tauchen bei der Anwendung auf den Bereich Hallengebäude diverse Probleme auf, da die Besonderheiten der baulichen und Nutzungsstruktur der Gebäude einerseits, der teilweise besonderen HLK-Anlagentechnik andererseits bisher nicht in allen Punkten adäquat in den Berechnungen und Bewertungen Ausdruck gefunden haben.

Durch das vorliegende Forschungsvorhaben sollen Grundlagen für eine Weiterentwicklung der DIN V 18599 in diesem Bereich geschaffen und Vorschläge zur Erschließung weiterer Energiesparpotenziale erarbeitet werden.

Unter Beachtung allgemeiner und hallenspezifischer Kritikpunkte an der DIN V 18599, wie z.B.

- Norm allgemein sehr umfangreich und komplex, Berechnungsverfahren teilweise schwer nachvollziehbar
- berechnete Energiebedarfswerte zu hoch
- energetisch differenzierende Abbildung üblicher zeitgemäßer und marktgängiger Hallenheizungssysteme nur bedingt, teilweise gar nicht, möglich
- Einsatz der DIN V 18599 als Berechnungswerkzeug im Rahmen von Energieberatungen, Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen etc. bei Hallen aus o.g. Gründen nur bedingt möglich

sind unter anderem die folgenden Teilprobleme zu untersuchen und ggf. Lösungsansätze zu erarbeiten:

- Charakterisierung von Hallengebäuden
- Standardnutzungsprofile von Hallengebäuden
- Bestimmung der wirksamen Wärmespeicherfähigkeiten von Hallengebäuden
- Zeitkonstanten von Hallengebäuden realer Nutzung
- Berechnungsansatz zur Ermittlung der Bilanzinnentemperatur von Hallengebäuden bei zeitlich eingeschränktem Heizbetrieb
- Analyse und differenzierte Betrachtung der Energieeffizienz verschiedener Hallenheizsysteme beim Teilsystem Wärmeübergabe
- Analyse des dynamischen Verhaltens von Hallenheizsystemen
- Gesamtanalyse Anlagensysteme in Hallengebäuden

Ziel dieser differenzierten Untersuchung im Bereich Hallengebäude ist die Schaffung von Grundlagen zur Weiterentwicklung der DIN V 18599 sowie zur Erschließung weiterer Energiesparpotenziale auf der gebäude- wie anlagentechnischen Seite von Hallengebäuden.

Ein kurzer Überblick zu wesentlichen untersuchten Teilproblemen bzw. Schwerpunkten sowie weiterhin bestehenden Schwierigkeiten ist Kapitel 15 zu entnehmen. Normänderungsvorschläge, welche im Rahmen der vorliegenden Arbeit erarbeitet wurden, werden in Kapitel 14 zusammengefasst.

2 Untersuchungsmethoden

2.1 Allgemeines

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden unterschiedliche Methoden eingesetzt um die gegebenen Fragestellungen und Probleme zu bearbeiten. Diese Methoden sollen nachfolgend kurz beschrieben werden.

2.2 Untersuchung fiktiver Modellgebäude

2.2.1 Allgemeines

Ausgewählte fiktive Gebäude (Modellgebäude), welche einen repräsentativen Querschnitt der Gesamtheit typischer Hallenbauwerke darstellen, werden nach verschiedenen Verfahren – unter anderem auch nach DIN V 18599 [1][2] – energetisch bewertet. Die dazu verwendeten Verfahren werden in den nachfolgenden Kapiteln kurz beschrieben.

Anhand geeigneter Vergleiche der Ergebnisse der verschiedenen Verfahren wird die Qualität der Bewertung nach DIN V 18599 [1][2] beurteilt. Neben verfahrensübergreifenden Ergebnisvergleichen erfolgen verfahrensinterne Parameterstudien. Ziel ist die Ableitung von Vorschlägen zur Überarbeitung der DIN V 18599.

2.2.2 Energiebedarfsberechnungen nach DIN V 18599

Es erfolgen Energiebedarfsberechnungen nach DIN V 18599, soweit möglich, vergleichend mit den folgenden 3 Programmen aus dem Bereich Energieberatung und Energieausweiserstellung.

- Heilmann IBP 18599 HighEnd 3.1 (IBP18955-Rechenkern)
- Hottgenroth Energieberater Plus 7 (IBP18599-Rechenkern)
- FIGAWA Energieausweis EnEV 2009 für Hallengebäude nach DIN V 18599 (Eigenentwicklung Figawa, Excel)

Kapitel, welche sich auf diese Energiebedarfsberechnungen beziehen, werden nachfolgend in der Kapitelüberschrift mit **E** gekennzeichnet.

2.2.3 Thermische Simulationsrechnungen

Für die Untersuchung wird ein thermisches Simulationsprogramm zur detaillierten Bewertung der Transportvorgänge in Bauteilen sowie dem konvektiven Luftaustausch zur Frischluftversorgung eingesetzten. Grundzüge des Programms sind in [25] bis [31] beschrieben. Das aktuell zur Verfügung stehende Simulationsprogramm entspricht dem Stand der Wissenschaft und erfüllt alle Anforderungen an Software für die thermische Simulation von Gebäuden.

Bei der Berechnung der Energieströme handelt es sich um ein Randwertproblem, bei dem sich der Energiebedarf infolge zeitlicher Änderungen der Außenlufttemperatur und der Solarstrahlung, der Wärmeabgabe der Geräte im Gebäude sowie den Anforderungen an das Raumklima errechnet. Die einzelnen Größen fließen als Stundenmittelwerte in die Berechnung ein. Aus numerischen Gründen erfolgt die Bestimmung der Heizleistung mit einem Zeitschritt von einer hundertstel Stunde.

Mit dem eingesetzten Simulationsprogramm können die instationären Temperaturverläufe für beliebige Randbedingungen ermittelt werden. Bei der Bestimmung der Temperaturen werden folgende Einflussgrößen detailliert erfasst:

- Außenlufttemperatur, Sonneneinstrahlung
- Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmespeicherkapazität opaker Baustoffe
- Absorptionsgrade der Bauteiloberflächen für kurz- und langwellige Strahlung
- Transmissions- und Absorptionsgrade transluzenter Baustoffe
- Wärmeabgabe von Geräten und Personen
- konvektiver Wärmeübergang innen und außen
- langwelliger Strahlungsaustausch innen und außen
- Infiltration und Frischluftversorgung über raumlufttechnische Anlagen
- Orientierung und Neigung der Bauteile
- Verschattung durch Nachbarbebauung und Vegetation
- Standorteinfluss auf den Heizwärmebedarf und die Heizleistung

Die Untersuchung gliedert sich in eine Serienuntersuchung und eine exemplarische Betrachtung einzelner Parameter.

Kapitel, welche sich auf die Simulationsrechnungen ohne Anlagentechnik beziehen, werden nachfolgend mit **SG** (Simulation Gebäude) gekennzeichnet.

2.2.4 Simulationen mit Anlagentechnik

Neben den zuvor erwähnten thermischen Simulationsrechnungen, welche das Gebäude ohne Heizungsanlage betrachten und somit in erster Linie systemunabhängige Wärmebilanzen darstellen, werden weitere Simulationen unter Einbeziehung hallentypischer Systeme der Wärmeübergabe durchgeführt.

Kapitel, welche sich auf die Simulationen unter Einbeziehung spezifischer Wärmeübergabesysteme beziehen, werden nachfolgend mit **SGA** (Simulation Gebäude-Anlagentechnik) gekennzeichnet.

Vorgriff: Bedingt durch eine sehr realitätsnahe Abbildung des Teilbereichs Wärmeübergabe gestalten sich diese Simulationen um ein Vielfaches zeitaufwendiger als die zuvor erwähnten thermischen Gebäudesimulationen ohne Anlagentechnik. Eine Abarbeitung aller Modellgebäude des Gebäudekatalogs hätte daher den zeitlichen Rahmen des Projektes gesprengt. Die Simulationen erfolgen für zwei Variationen eines Gebäudes, welches nicht im Modellgebäudekatalog enthalten ist (vgl. 13.3).

2.3 Auswertung realer Verbrauchsdaten

Anhand eines Vergleichs von Verbrauchsdaten realer Objekte mit korrespondierenden Energiebedarfswerten nach DIN V 18599 [1][2] wird gezeigt, inwiefern Berechnungen nach DIN V 18599 geeignet sind, reale Verhältnisse abzubilden bzw. in welcher Größenordnung sich Abweichungen zwischen Bedarfs- und Verbrauchswerten ergeben.

Im Weiteren wird versucht, auftretende Abweichungen zwischen Verbrauchs- und Bedarfswerten auszuwerten und ggf. qualitative oder quantitative Zusammenhänge abzuleiten.

2.4 Statistische Untersuchung

Auf Grundlage der Auswertung statistischer Daten zum Bauaufkommen vergangener Jahre wird der gesamtdeutsche auf Hallengebäude entfallende Jahresheizenergieverbrauch sowie das enthaltene Energiesparpotenzial ermittelt werden.

Mithilfe der hierbei verwendeten Modelle erfolgt im Weiteren eine größenordnungsmäßige Gegenüberstellung des Einsparpotenzials, welches sich durch Modernisierungsmaßnahmen am Gebäudebestand ergibt, mit dem Potenzial einer zukünftigen Verschärfung des Anforderungsniveaus für Neubauten. Die Bedeutung von Bestandsmaßnahmen beim Ausschöpfen energetischer Einsparpotenziale wird herausgearbeitet.

2.5 Theoretische Betrachtungen

Zu verschiedenen Teilproblemen, welche im Vorfeld des Projektes oder im Projektverlauf adressierte wurden, erfolgen theoretische Betrachtungen. Es werden bereits in der Norm [1][2] enthaltene Ansätze auf Konsistenz sowie Plausibilität hinsichtlich mathematischer und physikalischer Aspekte untersucht. Zur Veranschaulichung seien nachfolgend Fragestellungen formuliert, welchen hierbei nachgegangen werden muss.

- Ist ein Modell bzw. Berechnungsansatz innerhalb des gegebenen Kontextes anwendbar und zweckmäßig?
- Ist die erzielbare Genauigkeit ausreichend oder sind Verbesserungen notwendig?
- Ist der Anspruch an den Anwender gerechtfertigt oder kann der Ansatz sinnvoll vereinfacht werden?
- Kennt der Anwender zum Zeitpunkt der Anwendung bereits alle benötigten Eingangsgrößen?
- Lassen sich für den Fall unbekannter Eingangsgrößen sinnvolle Vorgabewerte formulieren?
- Sind bewirkte Ergebnisänderungen bei Änderungen von Eingangsgrößen plausibel?

3 Gebäudekatalog (E, SG)

3.1 Allgemeines

Die Basis für die wärmetechnische Bewertung von Gebäuden besteht in der Festlegung typischer Gebäudekubaturen sowie gängiger Bauteile bzw. Bauteilaufbauten. Sowohl für die Energiebedarfsberechnungen nach DIN V 18599 [1][2] als auch für die Simulationsrechnungen werden die im Folgenden hinsichtlich bauphysikalischer Kennwerte und Geometrie definierten Gebäude verwendet.

3.2 Bauteilkennwerte

3.2.1 Allgemeine Kennwerte, Wärmeschutz

Für die Berechnung der Wärmedurchgangskoeffizienten der Außenbauteile und der wirksamen Wärmespeicherfähigkeiten der betrachteten Modellgebäude wird von im Hallenbau üblichen Konstruktionen ausgegangen.

Im Rahmen der Untersuchung werden zwei Baualtersklassen betrachtet. Zunächst ist die aktuelle Energieeinsparverordnung einzuhalten. Zukünftig gewinnen aber auch Maßnahmen im Bestand mehr und mehr an Bedeutung. Aus diesem Grunde werden die baulichen Wärmeschutzniveaus *Altbau* und *Neubau* betrachtet.

Für im Folgenden durchgeführte Energiebedarfsberechnungen nach DIN V 18599 [1][2] findet eine Bewertung der komplexen Zusammenhänge der Wärmeverluste über die Bodenplatte mit dem im Nachweis nach EnEV [7][8] vorgesehenen Verfahren – Verwendung von Temperaturkorrekturfaktoren nach DIN V 18599-2 [1][2] , *Tabelle 3* – statt. Innerhalb der thermischen Gebäudesimulationen werden abweichend hierzu konkrete Erdreichschichten abgebildet. Zur Anpassung der thermischen Gebäudesimulationen an das vereinfachte Verfahren nach EnEV [7][8] und DIN V 18599 [1][2] werden die Erdreichschichten objektspezifisch angepasst.

Tabelle 1 Bauteilkennwerte der wärmeübertragenden Gebäudehülle, Altbau[1,2]

Bauteil	Baustoff	d	λ	c	ρ	U	ΔU_WB
		[mm]	[W/mK]	[Wh/kgK]	[kg/m³]	[W/m²K]	
Bodenplatte	Erdreich	-	-	-	-	3,56	0,10
	Beton	160,00	2,300	0,2778	2300		
	Anhydrid-Estrich	50,00	1,200	0,2778	2100		
Außenwand Leichtbau	Stahlblech	0,75	50,000	0,1250	7800	1,20	
	Dämmstoff	30,00	0,045	0,2861	100		
	Stahlblech	0,75	50,000	0,1250	7800		
Außenwand Massivbau	Kalkzementputz	25,00	1,000	0,2778	1800	1,18	
	Mauerwerk	365,00	0,580	0,2861	1400		
	Gipsputz	10,00	1,000	0,2778	1800		
Dach	Stahlblech	0,75	50,000	0,1250	7800	0,97	
	Dämmstoff	40,00	0,045	0,2861	100		
	Stahlblech	0,75	50,000	0,1250	7800		
Fenster, Lichtband	U_g= 3,00 W(m²K); g = 0,76; τ_D65 = 0,85						
Lichtkuppel, RWA	U_g= 3,30 W(m²K); g = 0,80; τ_D65 = 0,92						
Tor	U = 3,80 W(m²K)						

[1] Die angegebenen Kennwerte spiegeln ein im Hallenbau praxisübliches Niveau der späten 1970er- und frühen 1980er-Jahre wider. Für nachfolgende Betrachtungen, welche eine genaue zeitliche Zuordnung erfordern, werden die Kennwerte dem Jahr 1980 zugeordnet.

[2] Die dargestellten Bauteilaufbauten waren zu Beginn der Energiebedarfsberechnungen noch nicht vollständig definiert. Bei den Energiebedarfsberechnungen wurde daher teilweise mit geringfügig abweichenden U-Werten gearbeitet (vgl. Anhang A 1) – dies hat jedoch keinen Einfluss auf grundlegende Zusammenhänge und Tendenzen, welche im Weiteren aus den Ergebnissen abgeleitet werden.

Tabelle 2 Bauteilkennwerte der wärmeübertragenden Gebäudehülle, Neubau[3,4]

Bauteil	Baustoff	d	λ	c	ρ	U	ΔU_WB
		[mm]	[W/mK]	[Wh/kgK]	[kg/m³]	[W/m²K]	
Bodenplatte	Erdreich	-	-	-	-	3,56	0,05
	Beton	160,00	2,300	0,2778	2300		
	Anhydrid-Estrich	50,00	1,200	0,2778	2100		
Bodenplatte, gedämmt	Erdreich	-	-	-	-	0,78	
	Dämmung	40,00	0,04	0,2861	100		
	Beton	160,00	2,3	0,2778	2300		
	Anhydrid-Estrich	50,00	1,2	0,2778	2100		
Außenwand (Leichtbau)	Stahlblech	0,60	50,000	0,125	7800	0,24	
	Dämmstoff	100,00	0,025	0,2861	100		
	Stahlblech	0,60	50,000	0,125	7800		
Dach	Stahlblech	1,00	50,000	0,125	7800	0,32	
	Dämmstoff	120,00	0,040	0,2861	100		
	PVC	5,00	0,165	0,2778	1200		
Fenster, Lichtband	U_g= 1,70 W(m²K); g = 0,59; τ_D65 = 0,78						
Lichtkuppel, RWA	U_g= 2,10 W(m²K); g = 0,78; τ_D65 = 0,58						
Tor	U = 3,0 W(m²K)						

Die EnEV [7][8] fordert die Einhaltung bestimmter Bauteilkennwerte nicht nur in Hinblick auf Energieeffizienz, sondern auch vor dem Hintergrund bauphysikalischer Belange. So ist die Einhaltung des Bauteilmindestwärmeschutzes gemäß EnEV, §7 [7][8] nach anerkannten Regeln der Technik sicherzustellen. Mit dieser Formulierung wird implizit eine Einhaltung der Mindestwärmedurchlasswiderstände nach DIN 4108-2 [4] gefordert.

Tabelle 3 stellt die für diesen Gebäudekatalog verwendeten Wärmedurchlasswiderstände vergleichend den nach DIN 4108-2 [4] geforderten Mindestwerten gegenüber.

Tabelle 3 Wärmedurchlasswiderstände der betrachteten Bauteile und Anforderungswerte nach DIN 4108-2 [4] für die betrachteten Nutzungen

Bauteil			R [m²K/W]						
			Ist	Anforderungswert nach DIN 4108-2*, für Nutzung (DIN V 18599)					
				22.1	22.2	41	31	6	7
Boden*	ungedämmt		0,11	**0,90**		-		**0,90**	
	gedämmt		1,11	0,90		-		0,90	
Außenwand	Altbau	Leichtbau	0,72	**1,75**					
		Massivbau	0,65	0,55	**1,20**	0,55		**1,20**	
	Neubau (Leichtbau)		4,05	1,75					
Dach	Altbau		0,94	**1,75**		-		**1,75**	
	Neubau		3,03	1,75		-		1,75	
* Anforderungswert gilt nur für Aufenthaltsräume									

Es zeigt sich, dass die unterstellten Bauteilaufbauten für Altbauten die nach DIN 4108-2 [4] geforderten Mindest-Wärmedurchlasswiderstände in vielen Fällen nicht einhalten – dies überrascht nicht, da nicht davon ausgegangen werden kann, dass Altbauten nach heutzutage gültigen Normen errichtet worden sind.

[3] Die angegebenen Kennwerte sind nicht mit Referenzgebäude-Kennwerten nach EnEV 19[7]19[8] gleichzusetzen, vielmehr spiegeln sie ein heute im Hallenbereich praxisübliches Neubau-Niveau wider. Für nachfolgende Betrachtungen, welche eine genaue zeitliche Zuordnung erfordern, werden die Kennwerte dem Jahr 2009 zugeordnet.

[4] Die dargestellten Bauteilaufbauten waren zu Beginn der Energiebedarfsberechnungen noch nicht vollständig definiert. Bei den Energiebedarfsberechnungen wurde daher teilweise mit geringfügig abweichenden U-Werten gearbeitet (vgl. Anhang A 1) – dies hat jedoch keinen Einfluss auf grundlegende Zusammenhänge und Tendenzen, welche im Weiteren aus den Ergebnissen abgeleitet werden.

Jedoch ist ebenso zu erkennen, dass eine komplett oder weitgehend ungedämmte Bodenplatte, wie sie in der Praxis des Hallenbaus auch heute oft vorzufinden ist, die Mindestanforderung nicht erfüllt, falls es sich bei dem betrachteten Raum um einen Aufenthaltsraum handelt. Der Begriff des Aufenthaltsraums wird im Rahmen der DIN 4108 [4] allerdings nicht definiert. Werden die durch DIN 4108-2 [4] gestellten Forderungen nur im Zusammenhang mit den durch diese Norm gegebenen Definitionen gelesen, besteht bezüglich des *Aufenthaltsraums* durchaus Interpretationspotenzial, und es kann davon ausgegangen werden, dass dieses in der Praxis ausgeschöpft wird[5]. Legt man jedoch die ebenso einzuhaltenden Landesbauordnungen [6] zugrunde, sind Aufenthaltsräume solche *"Räume, die zum nicht nur vorübergehenden Aufenthalt von Menschen bestimmt […] sind"*. Dieser Definition folgend, können unter den betrachteten hallentypischen Gebäudenutzungen Lagerhallen als Nichtaufenthaltsraum verstanden werden. Für alle anderen Nutzungen scheint diese Auslegung jedoch sehr fraglich. Der Widerspruch zwischen der baulichen Praxis und den formal an sie gestellten Anforderungen kann an dieser Stelle nicht abschließend erklärt werden.

3.2.2 Wärmespeicherfähigkeit

Bei der Berechnung der wirksamen Wärmespeicherfähigkeit werden sowohl die Gebäude-Außenbauteile als auch innere speicherwirksame Massen, wie z.B. Lagergut, technische Ausstattung und Maschinen, einbezogen.

Innere speicherwirksame Massen vergrößern die Wärmespeicherfähigkeit, sind jedoch nicht fester Bestandteil des Gebäudes, sondern nutzungsabhängig. Für eine Überarbeitung der DIN V 18599 [1][2] kann daher in Betracht gezogen werden, die wirksame Wärmespeicherfähigkeit in Abhängigkeit von Gebäudebauart und Nutzung zu bestimmen. Ein entsprechender Berechnungsansatz wird im Rahmen dieser Studie erarbeitet – auf diesen wird in Kapitel 9 eingegangen. Parallel dazu wird der Einfluss der Wärmespeicherfähigkeit auf den Energiebedarf anhand von Parametervariationen, welche auf den Energiebedarfsberechnungen und Simulationsrechnungen aufbauen, untersucht. Auf diese wird in den Kapiteln 6.3.1 und 6.4 eingegangen.

Die gebäudeseitigen Wärmespeicherfähigkeiten werden nach DIN 13786 [9] berechnet. DIN 13786 [9] stellt ein vereinfachtes Verfahren (Anhang A) und ein analytisches Verfahren (Anhang B) zur Verfügung. Für Berechnungen nach DIN V 18599 [1][2] werden im Weiteren die Speicherfähigkeiten nach DIN 13786, Anhang A [9] verwendet. Innerhalb der Simulationsrechnungen findet das analytische Verfahren nach Anhang B Anwendung.

Tabelle 4 Flächenspezifische Bauteil-Wärmekapazitäten, ermittelt für typische Hallenkonstruktionen nach DIN EN ISO 13786 [9]

Bauteil		Vereinfachtes Verfahren: Anhang A		Analytisches Verfahren: Anhang B	
		X'_m [Wh/m²K]		X_{innen} [Wh/m²K]	
		Altbau	Neubau	Altbau	Neubau
Boden	ungedämmt	21,1	21,1	17,0	17,0
	gedämmt	-		-	17,5
Außenwand	Leichtbau	0,7	0,6	1,0	2,9
	Massivbau	23,6	-	16,2	-
Dach		0,7	1,7	1,2	3,2

[5] Vollflächige Bodendämmungen sind für Hallen wegen der vergleichsweise großen Grundflächen in der Regel sehr kostenintensiv und können sich im Einzelfall als unwirtschaftlich erweisen. Neben Aspekten der Wirtschaftlichkeit ist jedoch auch zu beachten, dass die Tragfähigkeit der Bodenplatte durch eine Dämmung nachteilig beeinflusst werden kann

3.3 Gebäudevarianten

Die betrachteten Modellgebäude werden hinsichtlich baulichen Wärmeschutzes und Bauschwere[6] in bis zu 4 Varianten unterschieden.

- Bestand 1 (Kennzeichnung B1)
    - Übliches Wärmeschutzniveau für Bestandsbauten (ca. 1980)
    - Außenwände in Leichtbauweise
- Bestand 2 (Kennzeichnung B2)
    - Abweichend zu ‚Bestand 1' werden die Außenwände in Massivbauweise ausgeführt
- Neubau 1 (Kennzeichnung N1)
    - Zeitgemäßes Wärmeschutzniveau (2010)
    - Boden komplett ungedämmt
- Neubau 2 (Kennzeichnung N2)
    - Abweichend zu ‚Neubau 1' erfolgt eine Dämmung des Bodens:
        - Industrielle Hallen, Einkaufsmärkte, Logistikhalle: nur Randdämmung (5m, waagerecht); restliche Bodenfläche ungedämmt
        - Turnhalle und Werkstatt: vollflächige Bodendämmung

Bestimmte Gebäudetypen, wie Baumärkte, große Einkaufszentren und Logistikhallen, waren 1980, verglichen mit heute, noch relativ ungewöhnlich und deswegen kaum verbreitet. Für die entsprechenden Modellgebäude werden daher nur die Neubau-Varianten untersucht.

[6] Im Figawa Berechnungsmodul ist hinsichtlich der wirksamen Speicherfähigkeit ausschließlich die Verwendung der Vorgabewerte nach DIN V 18599-2 vorgesehen. Es wird daher mit dem Pauschalwert nach DIN V 18599-2 für leichte Gebäude gerechnet.

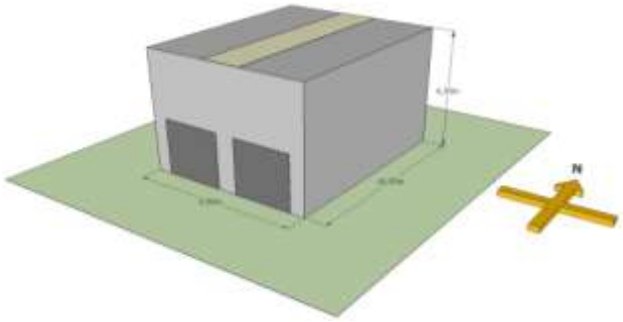
3.4 Modellgebäude

3.4.1 Allgemeines

Die verwendeten Modellgebäude sollen folgend kurz anhand markanter Eckdaten sowie je einer schematischen Abbildung beschrieben werden. Eine ausführliche Auflistung der Hüllflächen zu jedem Modellgebäude kann dem Anhang entnommen werden.

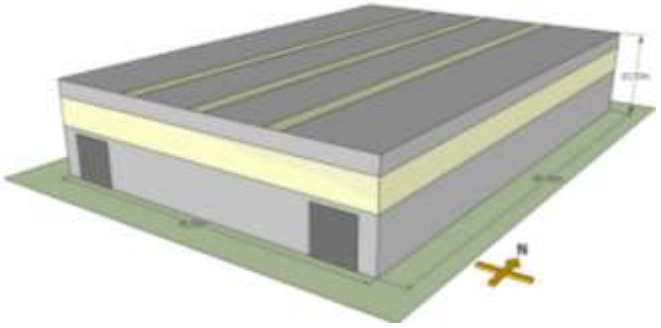
3.4.2 Werkstatt

	Gebäudevarianten			
	Bestand 1	Bestand 2	Neubau 1	Neubau 2
V_{Brutto} [m³]	580			
V_{Netto} [m³]	480			
A_{NGF} [m²]	80			
C_{wirk}[7] / A_{NGF} [Wh/m²K]	26,2	91,6	26,7	26,7



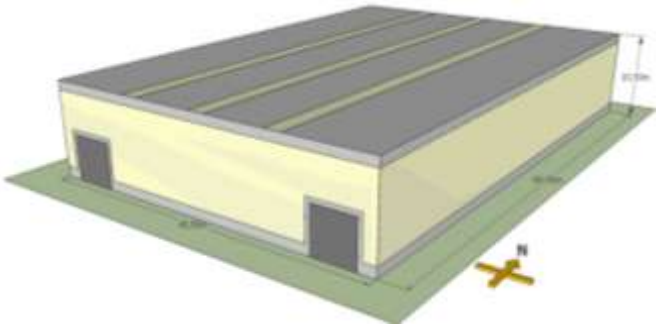
3.4.3 Fertigungsbetrieb, Fensterflächenanteil Außenwand ca. 30%

	Gebäudevarianten			
	Bestand 1	Bestand 2	Neubau 1	Neubau 2
V_{Brutto} [m³]	25.727,63			
V_{Netto} [m³]	24.000,00			
A_{NGF} [m²]	2.400,00			
C_{wirk}[7] / A_{NGF} [Wh/m²K]	22,6	36,3	23,5	23,5



3.4.4 Fertigungsbetrieb, Fensterflächenanteil Außenwand ca. 80%

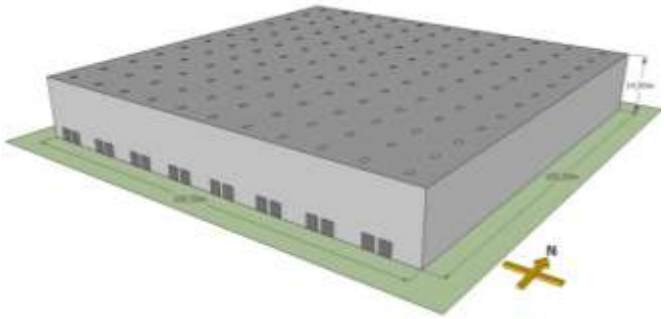
	Gebäudevarianten			
	Bestand 1	Bestand 2	Neubau 1	Neubau 2
V_{Brutto} [m³]	25.727,63			
V_{Netto} [m³]	24.000,00			
A_{NGF} [m²]	2.400,00			
C_{wirk}[7] / A_{NGF} [Wh/m²K]	22,3	25,9	23,2	23,2



[7] DIN EN ISO 13786, *Anhang A* (vereinfachtes Verfahren) [9]

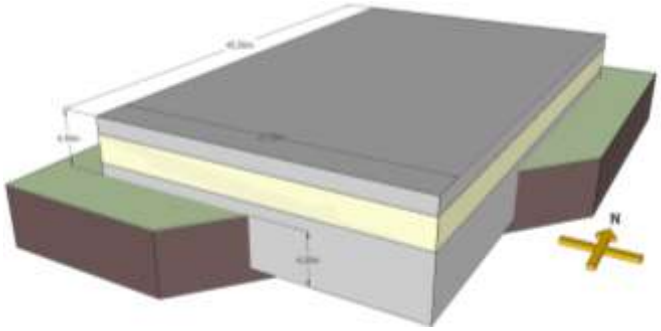
3.4.5 Logistikhalle

	Gebäudevarianten	
	Neubau 1	Neubau 2
V_{Brutto} [m³]	146.453,63	
V_{Netto} [m³]	140.000,00	
A_{NGF} [m²]	10.000,00	
C_{wirk}[8] / A_{NGF} [Wh/m²K]	23,4	23,4



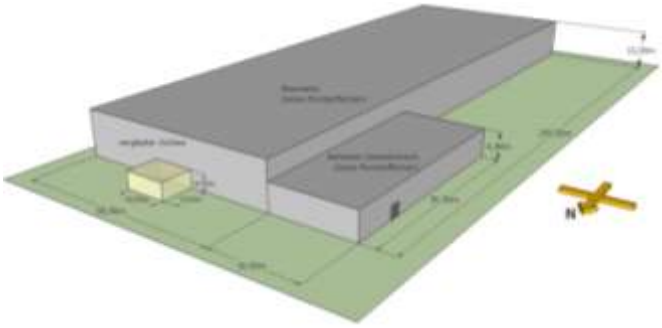
3.4.6 Turnhalle

	Gebäudevarianten			
	Bestand 1	Bestand 2	Neubau 1	Neubau 2
V_{Brutto} [m³]	10.635,63			
V_{Netto} [m³]	9.720,00			
A_{NGF} [m²]	1.215,00			
C_{wirk}[8] / A_{NGF} [Wh/m²K]	23,0	40,2	24,0	24,0



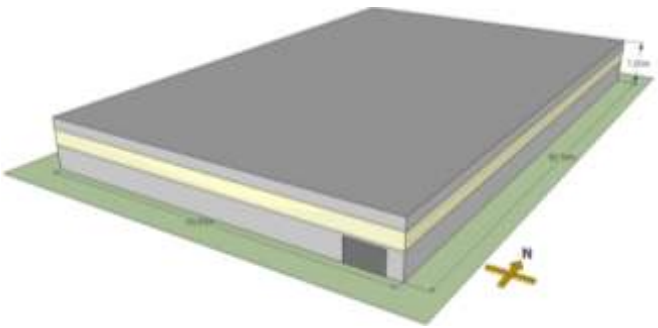
3.4.7 Baumarkt mit Gartenbereich

	Gebäudevarianten	
	Neubau 1	Neubau 2
V_{Brutto} [m³]	90.651,88	
V_{Netto} [m³]	84.999,38	
A_{NGF} [m²]	8.571,25	
C_{wirk}[8] / A_{NGF} [Wh/m²K]	23,3	23,3



3.4.8 Lebensmittelmarkt

	Gebäudevarianten	
	Neubau 1	Neubau 2
V_{Brutto} [m³]	28.456,75	
V_{Netto} [m³]	26.000,00	
A_{NGF} [m²]	4.000,00	
C_{wirk}[8] / A_{NGF} [Wh/m²K]	23,4	23,4



[8] DIN EN ISO 13786, *Anhang A* (vereinfachtes Verfahren) [9]

3.5 Heizlast

Für die geplanten Gebäudesimulationen unter Einbeziehung der Anlagentechnik sind exakte Anlagenparameter zu bestimmen. Die Auslegungsalgorithmen der teilnehmenden Heizungshersteller basieren auf einer Heizlastberechnung nach DIN EN 12831 [3]. In Hinblick auf die geplanten Gebäudesimulationen wurden daher die Heizlasten der betrachteten Modellgebäude nach DIN EN 12831 [3] bestimmt. Dabei wurde der für die Heizlastberechnung verwendete Luftwechsel, außer beim Gebäude Turnhalle[9], nach dem in Kapitel 11 beschriebenen Ansatz bestimmt.

Tabelle 5 Ergebnisse der Heizlastberechnungen nach DIN EN 12831 [3] für die untersuchten Modellgebäude

Gebäude	Nutzung nach DIN V 18599-10/100	Gebäudevariante		Wärmeverluste		Normheizlast	
				Transmission	Lüftung		
				Φ_T	Φ_V	Φ_HL	Φ_HL / A_Netto
				[kW]		[kW]	[W/m²]
Werkstatt	22.1 Gewerbliche und industrielle Hallen, grobe Arbeit	1980	Leichtbau	15,0	17,1	32,1	400,9
		1980	Massivbau	15,7	17,1	32,7	409,2
		2009	Boden ungedämmt	6,2	17,1	23,3	291,6
		2009	Boden gedämmt	5,7	17,1	22,8	285,3
Fertigungsbetrieb AF 30%	22.1 Gewerbliche und industrielle Hallen, grobe Arbeit	1980	Leichtbau	217,3	61,5	278,8	116,2
		1980	Massivbau	221,4	61,5	283,0	117,9
		2009	Boden ungedämmt	98,2	61,5	159,7	66,5
		2009	Boden gedämmt	98,2	61,5	159,7	66,5
Fertigungsbetrieb AF 30%	22.2 Gewerbliche und industrielle Hallen, feine Arbeit	1980	Leichtbau	233,8	70,8	304,6	126,9
		1980	Massivbau	238,2	70,8	309,1	128,8
		2009	Boden ungedämmt	106,5	70,8	177,3	73,9
		2009	Boden gedämmt	106,5	70,8	177,3	73,9
Fertigungsbetrieb AF 80%	22.1 Gewerbliche und industrielle Hallen, grobe Arbeit	1980	Leichtbau	287,0	61,5	348,5	145,2
		1980	Massivbau	291,2	61,5	352,7	147,0
		2009	Boden ungedämmt	144,8	61,5	206,3	86,0
		2009	Boden gedämmt	144,8	61,5	206,3	86,0
Fertigungsbetrieb AF 80%	22.2 Gewerbliche und industrielle Hallen, feine Arbeit	1980	Leichtbau	308,3	70,8	379,2	158,0
		1980	Massivbau	312,8	70,8	383,6	159,8
		2009	Boden ungedämmt	156,3	70,8	227,1	94,6
		2009	Boden gedämmt	156,3	70,8	227,1	94,6
Logistikhalle	41 Lagerhallen/Logistikhallen	2009	Boden ungedämmt	137,1	159,9	297,0	29,7
		2009	Boden gedämmt	137,1	159,9	297,0	29,7
Turnhalle	31 Sporthallen	1980	Leichtbau	101,3	41,4	142,7	117,5
		1980	Massivbau	102,7	41,4	144,2	118,7
		2009	Boden ungedämmt	44,5	41,4	86,0	70,8
		2009	Boden gedämmt	43,2	41,4	84,7	69,7
Baumarkt mit beheiztem Gartenbereich	6 Einzelhandel/Kaufhaus	2009	Boden ungedämmt	204,4	590,9	795,3	92,8
		2009	Boden gedämmt	204,4	590,9	795,3	92,8
Lebensmittelmarkt	7 Einzelhandel/Kaufhaus mit Kühlprodukten	2009	Boden ungedämmt	115,5	192,5	308,0	77,0
		2009	Boden gedämmt	115,5	192,5	308,0	77,0

Wie Tabelle 5 zeigt, streuen die spezifischen Heizlasten der untersuchten Modellgebäude mit Werten von ca. 30 bis 400 W/m² über einen sehr weiten Bereich. Diese Unterschiede

[9] Für das Gebäude Turnhalle sind hygienische Kriterien ausschlaggebend. Bei allen anderen Gebäuden wird an dieser Stelle davon ausgegangen, dass die hygienischen Anforderungen gering sind oder aber der Torluftwechsel den Luftwechsel aus etwaigen hygienischen Anforderungen überschreitet.

spiegeln die unterschiedlichen Gegebenheiten der betrachteten Gebäude und Gebäudevarianten wieder. Wesentliche Einflussgrößen sind dabei:

- Innentemperatur
- Luftwechsel
- Gebäudekompaktheit
- Baulicher Wärmeschutz

Des Weiteren ist zu beachten, dass Heizlastberechnungen nach DIN EN 12831 [3] für Wohngebäude und Gebäude mit wohnähnlicher Nutzung zwar gute Ergebnisse liefern, für die Abbildung von Hallengebäuden jedoch nur bedingt geeignet sind, da deren Besonderheiten, wie z.B. große Raumhöhen und heizsystemspezifische deutliche Unterschiede zwischen Lufttemperatur und operativer Temperatur, nicht in ausreichendem Maß erfasst werden[10]. Dennoch basieren Heizungsauslegungen auch im Hallenbau oft auf einer Heizlastberechnung nach DIN EN 12831 [3] – daher wurde im Rahmen dieser Studie auf dieses Verfahren zurückgegriffen.

Vorgriff (Stand Mai 2011, Untersuchungen weitestgehend abgeschlossen): Für die Gebäudesimulationen unter Einbeziehung der Anlagentechnik wurden aus zeitlichen Gründen andere Gebäude verwendet, als im Gebäudekatalog beschrieben. Die zuvor aufgelisteten Heizlasten finden deswegen hierfür keine Verwendung.

[10] Mit dem entsprechenden Normausschuss DIN NA 041-01-58 wurde Kontakt aufgenommen, um Besonderheiten von Hallengebäuden bei einer Überarbeitung der EN 12831 einfließen lassen zu können.

4 Nutzung (E, SG)

4.1 Allgemeines

Die in den Untersuchungen unterstellten Nutzungsparameter orientieren sich an den Nutzungsprofilen der DIN V 18599-10/-100 [1][2]. Nutzungen nach Beiblatt 100:2009-10 [2] einbezogen, stellt die DIN V 18599 [1] nach derzeitigem Kenntnisstand Nutzungsprofile für alle hallentypischen Nutzungen zur Verfügung.

Trinkwarmwasser

Es wird nur der Wärmebedarf für die Gebäudebeheizung betrachtet. Ein Energiebedarf für Trinkwassererwärmung geht nicht in die Betrachtungen ein.

Beleuchtung

Da die Beleuchtung nicht Gegenstand der Betrachtung sein soll, wird für alle untersuchten Modellgebäude und -varianten einheitlich von Beleuchtung mittels stabförmiger Leuchtstofflampen mit elektronischen Vorschaltgeräten ausgegangen.

In den thermischen Simulationen werden Lampen als Wärmequellen mit einer bestimmten Wärmeleistung abgebildet, wobei von einer Wärmeabgabe zu 50% mittels Konvektion und zu 50% in Form von Strahlung ausgegangen wird. Die Wärmeleistung wird hierbei aus dem Endenergiebedarf der Beleuchtung bestimmt, welcher mit dem Programm Heilmann IBP 18599 vorab ermittelt wurde – dieses berechnet den Beleuchtungsenergiebedarf nach DIN V 18599 [1][2] unter Beachtung eventuell einfallenden Tageslichts.

Tabelle 6 Vorab ermittelte Beleuchtungsenergiebedarfe (Heilmann IBP 18599) für Simulationsrechnungen

Gebäude	Nutzung	Varianten	Endenergiebedarf Beleuchtung [kWh/a]		
Werkstatt	22.1 Gewerbliche und industrielle Hallen, grobe Arbeit	-	457		
Fertigungsbetrieb AF 30%	22.1 Gewerbliche und industrielle Hallen, grobe Arbeit	1- / 2- / 3-Schicht	17.600	37.700	94.300
	22.2 Gewerbliche und industrielle Hallen, feine Arbeit	1- / 2- / 3-Schicht	35.300	73.000	178.200
Fertigungsbetrieb AF 80%	22.1 Gewerbliche und industrielle Hallen, grobe Arbeit	1- / 2- / 3-Schicht	14.400	33.500	87.900
	22.2 Gewerbliche und industrielle Hallen, feine Arbeit	1- / 2- / 3-Schicht	29.100	64.900	165.600
Logistikhalle	41 Lagerhallen/Logistikhallen	-	72.900		
Turnhalle	31 Sporthallen	8-16 / 8-23 Uhr	20.000	45.400	
Baumarkt mit beheiztem Gartenbereich	6 Einzelhandel/Kaufhaus	-	231.300		
Lebensmittelmarkt	7 Einzelhandel/Kaufhaus mit Kühlprodukten	8-20 Uhr / 8-24 Uhr	79.300	115.900	

4.2 Untersuchte Nutzungsmodifikationen und EnEV

Zusätzlich zu den Standardnutzungen werden praxisübliche Variationen der Betriebs-/Nutzungszeit untersucht, wie z.B. Schichtbetrieb in Fertigungshallen oder längere Öffnungszeiten im Handel.

Während die DIN V 18599 [1][2] die Nutzungsprofile in erster Linie als Vorgaben versteht, und die Änderung einzelner Nutzungsparameter bei der Gebäudeanalyse erlaubt, ist für Energiebedarfsberechnungen im Rahmen einer Energieausweiserstellung nach EnEV [8] vorrangig die Verwendung der Nutzungen nach DIN V 18599 [1][2] ohne Änderung einzelner Parameter vorgesehen. Dies betrifft auch die Betriebs-/Nutzungszeiten von Gebäuden. Aus derzeitiger Sicht scheint es aus folgenden Gründen dennoch nicht erforderlich,

Modifikationen der Betriebs-/Nutzungszeiten, wie z.B. Schichtbetrieb, auch im Rahmen einer Energiebedarfsberechnung nach den Richtlinien der EnEV [8] zu betrachten:

- Die Betriebsweise – Betriebszeiten/Schichtbetrieb – vieler Hallenbauten, speziell von Fertigungsbetrieben, ist stark an die Auslastung, beispielsweise in Abhängigkeit von der momentanen Auftragslage des Betriebes, geknüpft. Dadurch ist sie zum Zeitpunkt der Energieausweiserstellung nicht immer bekannt und kann sich im Laufe der Nutzung auch ändern.
- Bei der energetischen Bewertung eines Nichtwohngebäudes nach EnEV [7][8] spielt die Betriebsweise nur eine untergeordnete Rolle, da das zu errichtende Gebäude und das Referenzgebäude stets mit denselben Nutzungsparametern abgebildet werden.
- Weichen die realen Nutzungsparameter sehr stark von den in DIN V 18599 [1][2] tabellierten Nutzungsparametern ab, besteht immer noch die Möglichkeit, ein individuelles Nutzungsprofil zu erstellen, welches bei der Energieausweiserstellung verwendet werden kann.

Im Weiteren wird untersucht, ob die in den Nutzungsprofilen der DIN V 18599-10/-100 unterstellten Parameter repräsentativ für die jeweiligen Nutzungen sind und ein realistisches Bild wiedergeben.

4.3 Vorgriff: Vorschläge zur Überarbeitung

Nachfolgende Änderungsvorschläge, welche Nutzungsprofile nach DIN V 18599-10/-100 betreffen, wurden innerhalb der Projektbegleitgruppe vorgetragen:

- Nutzung 31 – Sporthallen
    - Die tabellierte jährliche Nutzungsdauer von 300 Tagen entspricht einem Betrieb von Montag bis Sonnabend. Für eine Vielzahl von Sporthallen kann wahrscheinlich davon ausgegangen werden, dass sie pro Woche wenigstens 2 Tage ungenutzt bleiben. Für diese Nutzung wird daher eine Verringerung der jährlichen Nutzungsdauer von 300 auf 250 Tage vorgeschlagen.
- Nutzung 22.1 und 22.2 – industrielle und gewerbliche Hallen
    - Die tabellierte jährliche Nutzungsdauer von 250 Tagen entspricht einem Betrieb von Montag bis Freitag. Vielfach werden in entsprechend genutzten Hallen jedoch Betriebspausen – zumeist über den Jahreswechsel – eingelegt. Es wird eine Verringerung der jährlichen Nutzungstage von 250 auf 230 Tage vorgeschlagen[11].
    - In der Praxis wird hinsichtlich körperlicher Aktivität und korrespondierend Temperatur- wie Lüftungsanforderungen ein breiteres Spektrum ausgereizt als mit den Profilen 22.1 und 22.2 erfasst wird. Es wird die Erweiterung um ein zusätzliches Profil für den Bereich *industrielle und gewerbliche Hallen* – und hierbei eine stärkere Spreizung der Nutzungsparameter – vorgeschlagen.
- Nutzungsbedingte Lüftungswärmeverluste

[11] Innerhalb der Projektgruppe wurde angemerkt, dass für industrielle/gewerbliche Hallen mitunter noch deutlich geringere jährliche Nutzungszeiten üblich seien. Für kommende Überarbeitungen von DIN V 18599-10 sollte daher eine genauere Untersuchung zu üblichen Nutzungszeiten von industriellen/gewerblichen Hallen in Betracht gezogen werden.

- Die Eignung der Bemessungswerte des nutzungsbedingten Mindestaußenluftvolumenstroms nach DIN V 18599-10/-100 [1][2] wird in Frage gestellt. Eine Anlehnung an die noch gültige Arbeitsstättenrichtlinie 5 (ASR5) wird vorgeschlagen.

4.4 Energiebedarfsberechnungen DIN V 18599

Im Rahmen der Energiebedarfsberechnungen werden hallenübliche Nutzungen gemäß DIN V 18599-10/-100 [1][2] und davon abgeleitete Varianten untersucht. Nachfolgend werden die verwendeten Nutzungsprofile sowie die hierin enthaltenen Parameter überblicksmäßig dargestellt. Die detaillierten Nutzungen nach DIN V 18599-10/-100 [1][2] sind dem Anhang zu entnehmen.

Tabelle 7 Modellgebäude und zugeordnete Nutzungen nach DIN V 18599-10/-100 [1][2]

Gebäude	untersuchte Nutzung und Varianten		
Werkstatt	22.1 Gewerbliche und industrielle Hallen, grobe Arbeit		-
Fertigungsbetrieb AF 30%	22.1 …grobe Arbeit	22.2 …feine Arbeit	jeweils 1-, 2- und 3-Schichtbetrieb
Fertigungsbetrieb AF 80%	22.1 …grobe Arbeit	22.2 …feine Arbeit	
Logistikhalle	41 Lagerhallen/Logistikhallen		-
Turnhalle	31 Sporthalle		Kurz- und Normalbetrieb: 8-16 / 8-23 Uhr
Baumarkt mit Gartenbereich	6 Einzelhandel/Kaufhaus		-
Lebensmittelmarkt	7 Einzelhandel/Kaufhaus mit Kühlprodukten		normale und lange Öffnungszeiten: 8-20 / 8-24 Uhr

Tabelle 8 Nutzungsparameter der betrachteten Nutzungen nach DIN V 18599-10/-100 [1][2] (Schrift schwarz) und abgeleiteten Varianten (Schrift grau)

Nutzung						22.1			22.2			41	31		6	7	
						...grobe Arbeit			...feine Arbeit			Lagerhallen	Sporthalle		Einzelhandel	Einzelhandel mit Kühlprodukten	
Variation						1 Schicht	2 Schicht	3 Schicht	1 Schicht	2 Schicht	3 Schicht	-	8-16 Uhr	8-23 Uhr	-	8-20 Uhr	8-24 Uhr
Nutzungszeiten	Nutzungszeit	täglich	-	[Uhr]		7	6	0	7	6	0	0	8	8	8	8	8
						16	22	24	16	22	24	24	16	23	20	20	24
			-	[h]		9	16	24	9	16	24	24	8	15	12	12	16
		jährlich	d_nutz,a	[d/a]		250	250	365	250	250	365	365	300	300	300	300	300
			t_Tag	[h/a]		2193	2857	4407	2193	2857	4407	4407	2397	3002	2999	2999	3002
			t_Nacht			58	1143	4353	58	1143	4353	4353	3	1498	601	601	1789
	Betriebszeit Heizung	täglich	-	[Uhr]		6	5	0	6	5	0	0	6	6	6	6	6
						16	22	24	16	22	24	24	16	23	20	20	24
		jährlich	d_op,a	[d/a]		250			250			365	300		300		
Raumkonditionen		Innenraumsolltemperatur	θ_i,h,soll	[°C]		17			19			12	21		21		
		Temperaturabsenkung reduzierter Betrieb	Δθ_i,NA	[K]		4			4			-	4		4		
		abgesenkte Temperatur	-	[°C]		13			15			12	17		17		
Mindestaußenluftvolumenstrom		personenbezogen	V'_a	[m³/(h*Person)]		-			-			-36	60		20		
		flächenbezogen		[m³/m²h]		10			10			1	-		-		
Beleuchtung		Beleuchtungsstärke	E'_m	[lx]		300			500			150	300		300		
		Höhe Nutzebene	h_Ne	[m]		0,8			0,8			0	1		0,8		
		Minderungsfaktor	k_a	-		0,85			0,85			1	1		0,93		
		relative Abwesenheit	C_a	-		0,1			0,1			0,6	0,3		0		
		Raumindex	k	-		2,9			2			2,4	2		2,5		
		Minderungsfaktor Gebäudebetriebszeit	F_t	-		0,9			0,9			0,4	1		1		
Personenbelegung		bei mittlerer Belegungsdichte	-	[m²/Person]		20			20			-	20		5		
Interne Wärmequellen	spezifische Leistung	Personen	-	[W/m²]		5			4			-	6		14	14	
		Arbeitshilfen	-			35			35			-	-		2	-10	
	Wärmezufuhr		q_l,p + q_l,fac	[Wh/m²d]		320	640	960	312	624	936	-	36	60	108	-86	-128
	ermittelt für Vollnutzungsstunden	Personen	-	[h]		8	16	24	8	16	24	-	6	10	6	6	8
		Arbeitshilfen	-										-	-	12	17	24

4.5 Gebäudesimulationen

Die Nutzungsprofile für die thermischen Gebäudesimulationen basieren auf Nutzungen nach DIN V 18599-10/-100 [1][2]. Der höhere Detaillierungsgrad der Simulationsrechnungen erfordert Stundenmittelwerte für den Sollwert der Raumtemperaturen, die internen Wärmequellen und den Luftaustausch für den Frischluftbedarf sowie die Infiltration.

Hallen brauchen aufgrund unterschiedlichster Nutzung mehr Flexibilität. Deshalb wird bei den Hallen von einem 1 bis 3 Schichtbetrieb an 5 bis 7 Tagen in der Woche ausgegangen. Nutzungsbedingt werden auch Heizungsunterbrechungen, wie bei Turnhallen zu erwarten, betrachtet.

Ein typisches Nutzungsprofil für die thermische Simulation mit Stundenmittelwerte ist in Tabelle 9 dokumentiert. Eine Zusammenstellung der mittleren Luftwechselraten sowie der mittleren und Tagessummenwerte der Wärmequellen findet sich im Anhang.

Tabelle 9 Beispiel-Nutzungsprofil für thermische Simulationsrechnungen, Werkstattgebäude

Zeit	Solltemperatur	Außenluftwechsel	Interne Wärmequellen (Leistung)		
			Personen	Arbeitshilfen	Kunstlicht
hh	°C	h-1	W	W	W
01-02	13	0,21	0	0	0
02-03	13	0,21	0	0	0
03-04	13	0,21	0	0	0
04-05	13	0,21	0	0	0
05-06	13	0,21	0	0	0
06-07	(Aufheizphase)	0,21	0	0	0
07-08	17	1,71	400	2.800	229
08-09	17	1,71	400	2.800	229
09-10	17	1,71	400	2.800	229
10-11	17	1,71	400	2.800	229
11-12	17	1,71	400	2.800	229
12-13	17	1,71	400	2.800	229
13-14	17	1,71	400	2.800	229
14-15	17	1,71	400	2.800	229
15-16	17	1,71	400	2.800	229
16-17	13	0,21	0	0	0
17-18	13	0,21	0	0	0
18-19	13	0,21	0	0	0
19-20	13	0,21	0	0	0
20-21	13	0,21	0	0	0
21-22	13	0,21	0	0	0
22-23	13	0,21	0	0	0
23-24	13	0,21	0	0	0

Konform mit den Temperaturrandbedingungen gemäß EnEV wird das Testreferenzjahr Würzburg, des Deutschen Wetterdienstes verwendet.

In Bezug auf die Luftdichtheit der Gebäude werden n_{50}-Werte von 1 h^{-1}, 3 h^{-1} und 7 h^{-1} betrachtet. Die Infiltration erreicht Werte von 0,07 h^{-1}, 0,21 h^{-1} und 0,5 h^{-1}.

5 Anlagentechnik (E)

5.1 Allgemeines

Im Rahmen der Energiebedarfsberechnungen werden für Hallen übliche Heizungssysteme betrachtet. Die folgenden Parameter gelten dabei für alle betrachteten Heizungssysteme.

- Energieträger: Erdgas
- Raumtemperaturregelung: P-Regler 1K

5.2 Dezentrale Wärmeerzeugung

Es werden die folgenden dezentralen Heizungssysteme untersucht.

- Dunkelstrahler
- Hellstrahler
- Dezentraler Warmlufterzeuger
    - Luftauslass seitlich, ohne Rezirkulation

5.3 Zentrale Wärmeerzeugung

Für die betrachteten Zentralheizungen gelten die folgenden Parameter.

- Wärmeerzeugung und Verteilleitungen innerhalb Zone
    - Altbau: NT-Kessel; ungeregelte, überdimensionierte Pumpe
    - Neubau: Brennwertkessel, verbesserte Ausführung; bedarfsausgelegte, leistungsgeregelte Pumpe, intermittierender Betrieb, hydraulischer Abgleich
    - Leitungslängen unbekannt → Schätzung gemäß DIN V 18599-5 [1][2][12]
- Betrachtete Wärmeübergabesysteme
    - Warmluftheizung
        - Systemtemperaturen 70/50°C
        - Luftauslass seitlich, ohne Rezirkulation
    - Warmwasser-Deckenstrahlplatten
        - Systemtemperaturen 70/50°C
    - Fußbodenheizung (Nur in Neubau-Varianten)
        - Systemtemperaturen 45/35°C
        - bauteilintegriert

[12] Für Hallengebäude ergeben sich mit den Berechnungsansätzen nach Normstand 2007-02 bzw. 2009-10 in der Regel deutlich zu hohe Leitungslängen. Die Verwendung dieser überschätzten Leitungslängen dürfte derzeit jedoch die gängige Praxis bei der Energieausweiserstellung darstellen. Die entsprechenden Berechnungsansätze werden im Rahmen eines anderen Projektes überarbeitet. Innerhalb der vorliegenden Arbeit wird daher nicht weiter hierauf eingegangen.

6 Berechnungsergebnisse (E, SG)

6.1 DIN V 18599 (E)

Nachfolgend werden einige Berechnungsergebnisse nach DIN V 18599 [1][2] auszugsweise dargestellt. Eine ausführliche Auflistung der Ergebnisse kann dem Anhang entnommen werden.

Die dargestellten Ergebnisse gehen aus Energiebedarfsberechnungen nach aktuellem Normstand hervor und stützen sich weitgehend auf normative Vorgabe- und Standardwerte. Sie dienen nicht der Bewertung unterschiedlicher Varianten des baulichen Wärmeschutzes und der Anlagentechnik, sondern veranschaulichen den momentanen Normstand, für welchen im Rahmen dieses Projektes Überarbeitungsvorschläge zu erbringen sind.

Bei dem Vergleich von Energiebedarfswerten zentral und dezentral beheizter Gebäude ist zu beachten, dass die nach DIN V 18599 vorgesehene Unterscheidung von Zentralheizungen hinsichtlich des Baujahres in die Berechnungen einging, während eine derartige Differenzierung für dezentrale Wärmeerzeuger derzeit nach Norm nicht vorgesehen ist. Aufgrund dieser Eigenart der DIN V 18599 bei der Abbildung dezentraler Wärmeerzeuger werden für das Wärmeschutzniveau „Altbau“ alte Zentralheizungen neuen dezentralen Wärmeerzeugern gegenübergestellt. Für direkte Vergleiche zwischen zentral und dezentral beheizten Anlagenvarianten – z.B. mit ähnlicher Wärmeübergabe in beiden Fällen – im „Altbau“ muss also einbezogen werden, dass sich auf Seite der Zentralheizungen geringere Energiebedarfe ergäben, wenn modernere Wärmeerzeuger unterstellt würden.

Tabelle 10 veranschaulicht die Tendenzen zwischen den Energiebedarfswerten unterschiedlicher Heizungssysteme nach Normstand 2007-02/2009-10 am Beispiel des Modellgebäudes *Werkstatt*.

Tabelle 10 Energiebedarfswerte Beispiel Werkstatt (Hottgenroth Energieberater)

Nutzungsvariante	Gebäudevariante		Endenergie [kWh/m²a]						
			Licht	Wärme, ohne Hilfsenergie (gemäß Norm brennwertbezogen)					
				Dezentrale Wärmeerzeugung			Zentrale Wärmeerzeugung		
				Dunkelstrahler	Hellstrahler	WL	WL, 70/50°C	Deckenstrahl-platten, 70/50°C	FBH, 45/35°C
-	Altbau	Leichtbau	7,0	369,4	354,5	459,3	540,3	438,4	-
		massiv	7,0	374,6	359,5	465,8	542,5	440,7	-
	Neubau	Boden ungedämmt	7,0	178,2	170,7	222,2	220,2	177,2	184,5
		Boden gedämmt	7,0	159,8	153,4	199,4	197,2	158,8	165,5

Ausgehend vom baulichen Wärmeschutzniveau *Altbau* ergeben sich für Hell- und Dunkelstrahler ähnliche Bedarfswerte. Für Deckenstrahlplatten ergibt sich ein höherer Energiebedarf. Die höchsten Energiebedarfswerte ergeben sich für Luftheizungen. Wird von einem baulichen Wärmeschutzes auf Neubauniveau ausgegangen, ist nur noch zwischen Luftheizungen und Systemen mit wesentlichem Strahlungsanteil ein deutlicher Unterschied zu erkennen. Luftheizungen schneiden hierbei schlechter ab. Diese Tendenzen lassen sich auf die anderen betrachteten Modellgebäude übertragen (vgl. A 4).

Für die Systeme Luft- und Fußbodenheizung besteht – über die hier untersuchten Anlagenvarianten hinaus – die Möglichkeit weiterer Differenzierung. Bei Fußbodenheizungen kann hinsichtlich des Wärmeschutzniveaus der Bodenplatte unterschieden werden. Mit

besser gedämmter Bodenplatte ergibt sich erwartungsgemäß ein geringerer Energiebedarf. Bei Luftheizungen findet eine Unterscheidung hinsichtlich der Ausblasrichtung und des Vorhandenseins von Deckenventilatoren statt. Hierbei sind zwischen den verwendeten Programmen jedoch unterschiedliche Abhängigkeiten zu beobachten. Gemäß DIN V 18599-5, *Tabelle 10 und 11* [1] ergibt sich vom energetisch besseren zum schlechteren System die folgende Reihenfolge:

- Luftauslass von oben, mit geregelter vertikaler Rezirkulation (Deckenventilatoren)
- Luftauslass seitlich, mit geregelter vertikaler Rezirkulation (Deckenventilatoren)
- Luftauslass von oben, ohne zusätzliche Rezirkulation (Deckenventilatoren)
- Luftauslass seitlich, ohne zusätzliche Rezirkulation (Deckenventilatoren).

Die Berechnungsergebnisse des figawa-Berechnungsmoduls geben diese Reihenfolge wieder. Mit den verwendeten kommerziellen Programmen mit IBP-Rechenkern ergeben sich jedoch andere Abhängigkeiten. Die Ursache hierfür ist unklar; nach flüchtiger Betrachtung scheint es sich um einen Fehler innerhalb des IBP-Rechenkerns zu handeln. Entsprechende Ergebnisse für das Modellgebäude *Fertigungsbetrieb, Fensterflächenanteil Außenwand ca. 30%* sind überblicksmäßig in Tabelle 11 dargestellt. Auf eine Ausweitung dieser Parametervariation auf die restlichen Modellgebäude wird an dieser Stelle verzichtet – es kann davon ausgegangen werden, dass sich die aus Tabelle 11 ersichtlichen Tendenzen auch für die anderen Modellgebäude einstellen.

Tabelle 11 Energiebedarfswerte, Beispiel Fertigungsbetrieb (30%, 1-Schicht-Betrieb); Variation Fußboden- und Luftheizung[13]

Gebäudevariante	Software	FBH, 45/35°C		WL, 70/50°C			
		bauteilintegriert	thermisch entkoppelt	LA seitlich	LA oben	LA seitlich	LA oben
				ohne Rezirkulation		mit Rezirkulation	
Altbau, leicht	Heilmann	-	-	433,6	469,9	433,6	433,6
	Hottgenroth	-	-	429,2	465,2	429,2	429,2
	Figawa	-	-	403,2	390,6	377,9	368,4
Neubau, Boden ungedämmt	Heilmann	182,1	174,2	236,2	257,0	236,2	236,2
	Hottgenroth	182,4	174,4	232,8	253,3	232,8	232,8
	Figawa	164,8	157,7	211,5	204,6	197,7	192,5

[13] Die dargestellten Energiebedarfswerte weichen mitunter von den im Anhang dargestellten Werten ab. Dies ist auf verschiedene Ursachen zurückzuführen:

Für die ausführlichen Ergebnistabellen des Anhangs wurden absolute Energiebedarfswerte anhand der jeweiligen Nettogrundflächen in spezifische Werte umgerechnet; für die Darstellung in Tabelle 11 wurden spezifische Werte teilweise unmittelbar abgelesen. Es ergeben sich unterschiedlich stark ausgeprägte Rundungsfehler.

Im Zeitraum der Projektbearbeitung erschienen wiederholt Software-Updates der kommerziellen IBP-Programme. Diese beinhalten oftmals auch Korrekturen, welche leichte Ergebnisverschiebungen zwischen unterschiedlichen Programmversionen bewirken.

Die unterstellten Bauteilaufbauten waren zu Projektbeginn noch nicht vollständig definiert. Somit mussten für eine U-Wert-Berechnung teilweise Annahmen getroffen werden. Die Konkretisierung der Bauteilaufbauten während der Projektbearbeitung führte zu in Einzelfällen zu leichten Änderungen der Bauteil-U-Werte. Hieraus ergeben sich geringfügige Ergebnisunterschiede zwischen früher und später durchgeführten Energiebedarfsberechnungen.

Referenzgebäude

Eine energetische Bewertung von Nichtwohngebäuden nach EnEV [7][8] sieht den Vergleich des Energiebedarfs des zu bewertenden Gebäudes mit dem Energiebedarf eines Referenzgebäudes gleicher Geometrie und Nutzung vor. Verglichen werden hierbei die Summen der Primärenergiebedarfswerte aller nach DIN V 18599 [1][2] erfassten Gewerke.

Informativ werden in den Ergebnisübersichten des Anhangs die Energiebedarfswerte der Referenzgebäude der untersuchten Modellgebäude angegeben. Im Rahmen der EnEV [7][8] sind Primärenergiewerte heranzuziehen, aus Gründen der Zweckmäßigkeit für diese Untersuchung werden hier jedoch Endenergiebedarfswerte dargestellt.

6.2 Anmerkungen zu den Berechnungsergebnissen (E)

Abweichungen zwischen Berechnungsprogrammen

Die Berechnungsergebnisse der verschiedenen Berechnungsprogramme weichen für identische Gebäude- und Anlagenvarianten teilweise deutlich voneinander ab. Dies kann auf verschiedene Ursachen zurückgeführt werden. Wesentliche Unterschiede lassen sich bei der Bestimmung des Beleuchtungsenergiebedarfs finden. So verwenden alle drei verwendeten Programme dasselbe Verfahren[14] zur Berechnung des Beleuchtungsenergiebedarfs. Die Einbeziehung einfallenden Tageslichts auf den Beleuchtungsenergiebedarf geschieht jedoch unterschiedlich.

Das Figawa-Berechnungsmodul berechnet den Beleuchtungsenergiebedarf ohne eine „Gutschrift“ durch einfallendes Tageslicht. Die beiden kommerziellen Berechnungsprogramme Hottgenroth Energieberater und Heilmann IBP beziehen einen Tageslichtanteil, so vorhanden, in die Berechnung ein. Jedoch geschieht die Beschreibung der Lichtsituation in beiden Programmen auf unterschiedliche Art und Weise, sodass sich auch hier Unterschiede bei der Ermittlung des Tageslichtanteils ergeben können.

Des Weiteren erlauben die kommerziellen Berechnungsprogramme die Berechnung in einem freien Energieberatungsmodus, welcher nicht an die Einschränkungen der EnEV [8] gebunden ist. Das Figawa-Berechnungsmodul ist hingegen auf eine schnelle Energieausweiserstellung ausgelegt und bietet daher weniger Optionen an – der nach DIN V 18599 berechnete Beleuchtungsenergiebedarf wird gemäß den Bestimmungen der EnEV 2009, *Anlage 2, Tabelle 3, Zeile 5* [8] umgerechnet.

Die hieraus resultierenden Unterschiede der Beleuchtungsenergiebedarfswerte zwischen den verwendeten Berechnungsprogrammen betragen in einigen Fällen über 100%. Vielfach wurden für identische Fälle bei höheren Beleuchtungsenergiebedarfswerten niedrigere Wärmeenergiebedarfswerte ermittelt und umgekehrt. Bedenkt man, dass die aufgebrachten Aufwendungen für Beleuchtung als Wärmegutschrift in die Wärmebilanz eingehen und somit den Heizenergiebedarf verringern, relativieren sich die Ergebnisunterschiede zwischen den Berechnungsprogrammen in vielen Fällen deutlich.

Weitere Unterschiede zwischen den Programmen bestehen in der Abbildung von Anlagentechnik und Nutzung. Jedoch sind auch unterschiedliche Berechnungsansätze für Teilprobleme sowie unterschiedliche Auslegungen von Normvorgaben nicht auszuschließen.

[14] DIN V 18599-4, *Tabellenverfahren (5.4.1)* 19[1]

Die aufgezeigten Berechnungs- bzw. Ergebnisunterschiede sind im Rahmen von Energiebedarfsberechnungen nach DIN V 18599 [1][2] nicht ungewöhnlich; vielmehr beschreiben sie die derzeitige Praxis auf diesem Gebiet recht gut.

Einfluss von Variationen der Betriebs-/Nutzungszeit

Für die untersuchten Gebäude und Nutzungen steigt der Energiebedarf bei steigenden Gebäudebetriebszeiten[15]. Jedoch ist hierbei zu beobachten, dass tendenzielle Verbrauchsunterschiede zwischen unterschiedlichen Anlagenvarianten, welche im Ausganszustand der Betriebszeit festgestellt werden können, nicht zwingend auch für Variationen der Betriebszeit gelten. So zeigt sich, dass Hellstrahler-Varianten tendenziell einen geringeren Energiebedarf aufweisen als Dunkelstrahler-Varianten. Bei Erhöhung der Gebäudebetriebszeit kippt diese Tendenz jedoch mitunter zugunsten der Dunkelstrahler-Variante. Dieses Phänomen ist nicht plausibel, tritt jedoch bei allen verwendeten Berechnungsprogrammen auf – daher liegt die Vermutung nahe, dass es sich um eine systematische Eigenart der Energiebedarfsberechnung nach DIN V 18599 [1][2] handelt.

Vorgriff: Die im Rahmen dieses Projektes vorgeschlagenen Änderungen beinhalten unter anderem eine Überarbeitung der Berechnung der Wärmeerzeugerverluste von Hellstrahlern. Ein Vergleich zwischen Ergebnisse nach aktuellem Normstand und Ergebnissen nach vorgeschlagener Überarbeitung lässt annehmen, dass das zuvor beschriebene „Kippen“ zwischen Hell- und Dunkelstrahlern auf die Verwendung ungeeigneter Eingangsgrößen bei der Bestimmung der Hellstrahler-Erzeugerverluste nach Normstand 2007-02/2009-10 zurückzuführen sind. Durch die angestrebten Normänderungen (vgl. 14.5) sollte dieses Problem zukünftig nicht mehr auftreten.

[15] Diese Tendenz entspricht zwar der Erwartungshaltung, muss sich jedoch nicht zwingend ergeben. Nach DIN V 18599 19[1]19[2] kann mit steigender Betriebszeit auch eine Stagnation oder gar Verringerung des Heizenergiebedarfs einhergehen. Maßgebliche Einflüsse sind hierbei die Struktur der Wärmeverluste (Lüftung/Transmission) und die nutzungsbedingten Wärmeeinträge.

6.3 Parametervariationen (E)

6.3.1 Wirksame Speicherfähigkeit

Als ein Teilproblem der Aufgabenstellung dieser Studie werden die wirksame Speicherfähigkeit von Hallenbauten und ihr Einfluss auf Energiebedarf und -verbrauch untersucht. An dieser Stelle wird anhand einer Variation der wirksamen Wärmespeicherfähigkeit ihr rechnerischer Einfluss auf den Energiebedarf beleuchtet.

Es werden die folgenden Szenarios betrachtet:

- Leeres Gebäude
  - Die Wärmespeicherfähigkeit des Gebäudes beruht allein auf dem speicherwirksamen Anteil der Bauwerksmasse.
- Gebäude mit Einrichtung
  - Da zum Zeitpunkt der Berechnungen noch keine Daten über konkrete innere speicherwirksame Massen vorlagen, wurde an dieser Stelle ersatzweise die Gebäudewärmespeicherfähigkeit um 50% und 100% erhöht[16].

Tabelle 12 stellt die durch eine Variation der wirksamen Wärmespeicherfähigkeit bewirkten Änderungen des Energiebedarfs beispielhaft für das Modellgebäude Werkstatt dar.

Tabelle 12 Variation der wirksamen Wärmespeicherfähigkeit, Modellgebäude Werkstatt

Gebäudevariante	Berechnungssoftware	Endenergie Wärme [kWh/a]				
		C_{wirk} * 1	C_{wirk} * 1,5		C_{wirk} * 2	
B1	Heilmann	-	-	-	-	-
	Hottgenroth	376,3	373,4	-0,76%	370,9	-1,44%
B2	Heilmann	-	-	-	-	-
	Hottgenroth	382,0	377,5	-1,16%	374,5	-1,95%
N1	Heilmann	-	-	-	-	-
	Hottgenroth	175,8	172,7	-1,72%	170,3	-3,10%
N2	Heilmann	-	-	-	-	-
	Hottgenroth	157,0	153,4	-2,25%	150,7	-3,97%

Für die anderen untersuchten Modellgebäude ergeben sich zumeist ähnliche Änderungen.

Mit einer Erhöhung der Wärmekapazität geht für alle untersuchten Gebäude eine Verringerung des Energiebedarfs nach DIN V 18599 [1][2] einher. Im untersuchten Bereich der Variation bis 2,0 * C_{wirk} werden Änderungen des Energiebedarfs bis zu 7,6% bewirkt. Werden alle untersuchten Gebäude einbezogen, sind die Änderungen der Energiebedarfswerte sind als gering einzustufen.

[16] Gemäß Annahmen zur Festlegung der Simulationsrandbedingungen ist für übliche Hallengrößen und -bauweisen davon auszugehen, dass sich die Gesamtwärmespeicherfähigkeit von Gebäude und Interieur im Bereich 1,2…2,7 * $C_{wirk,Gebäude}$ bewegt.

6.3.2 Luftwechsel

Eine wesentliche Einflussgröße sowohl auf den realen Energieverbrauch als auch auf den theoretischen Bedarf stellt der Luftwechsel dar. Im Rahmen dieser Studie wird unter anderem die Abbildung des nutzungsbedingten Luftwechsels bzw. Luftvolumenstroms im Rahmen der DIN V 18599, und somit sein Einfluss auf den Energiebedarf, untersucht. Dazu werden Energiebedarfsberechnungen für verschiedene Luftwechsel bzw. Luftvolumenströme durchgeführt.

Es werden Ergebnisse für folgenden beiden Szenarios gegenübergestellt:

- Standardwerte DIN V 18599
    - Der nutzungsbedingte Mindestaußenluftvolumenstrom wird mit den Standardwerten nach DIN V 18599-10 ermittelt.
- Torluftwechsel
    - Der nutzungsbedingte Mindestaußenluftvolumenstrom wird nach dem in Kapitel 11 vorgestellten Ansatz in Abhängigkeit von Toröffnungsvorgängen bestimmt. In diesem Szenario wird davon ausgegangen, dass ein hygienisch erforderlicher Außenluftvolumenstrom geringer als der Volumenstrom durch Toröffnungen ausfällt. Dieses Szenario ist keineswegs praxisfern, da besonders Hallen industrieller Nutzung sowie Logistikhallen oftmals über keine Lüftungsanlagen verfügen.

In Tabelle 13 sind entsprechende Ergebnisse auszugsweise für drei der betrachteten Modellgebäude dargestellt.

Tabelle 13 Einfluss des Luftwechsels, Wärmeschutzniveau Neubau mit voll- oder randgedämmter Bodenplatte (N2), Heilmann IBP 18599

Gebäude	Nutzung		Endenergie Wärme [kWh/a]	
			LW 18599	Tor-LW
Fertigungsbetrieb AF 30%	22.2	1 Schicht	148,0	112,7
	22.2	2 Schicht	166,8	103,8
	22.2	3 Schicht	233,2	93,8
Baumarkt mit beheiztem Gartenbereich	6	-	167,6	191,5
Lebensmittelmarkt	7	normale Öffnungszeiten: 8-20 Uhr	192,0	194,9

Eine vollständige Auflistung der Ergebnisse ist dem Anhang zu entnehmen.

Aus dem Vergleich der Berechnungsergebnisse beider Szenarios lässt sich folgendes ableiten:

- Speziell für industrielle und gewerbliche Nutzungen mit geringen Hygieneanforderungen kann davon ausgegangen werden, dass die flächenspezifischen Standardwerte nach DIN V 18599 den real auftretenden Luftwechsel in der Mehrzahl der Fälle deutlich überbewerten. Für einige Fälle ergeben sich Energiebedarfsunterschiede in der Größenordnung von 100% zwischen den beiden untersuchten Szenarios.
- Es ist anzunehmen, dass die derzeit nach DIN V 18599 verwendete Bestimmung des Luftwechsels die Praxis nur unzureichend genau abbildet und damit wesentlich zum Missverhältnis zwischen Energiebedarfs- und -verbrauchswerten beiträgt.

- In einigen Fällen sinkt der Energiebedarf für Szenarien mit geringem Luftwechsel bei steigender Nutzungszeit. Dieser Effekt ist rechnerisch plausibel[17], entspricht jedoch nicht der Erwartungshaltung. Den Autoren liegen diesbezüglich keine realen Verbrauchsdaten vor, welche be- oder widerlegen könnten, dass der erwähnte Effekt in der Praxis tatsächlich auftritt.

[17] Bei einer Erhöhung der Nutzungs-/Betriebszeiten steigt der Heizwärmebedarf nicht proportional zur Nutzungs-/Betriebszeit an, sondern in geringerem Maß. Die Zeitabhängigkeit von Lüftungswärmeverlusten ist hierbei stärker ausgeprägt, als die von Transmissionswärmeverlusten. Bei steigender Nutzungs-/Betriebszeit steigt der Gesamtwärmebedarf für Szenarien mit geringem Luftwechsel damit schwächer an als für solche mit großem Luftwechsel. Die inneren Wärmegewinne (Personen, Maschinen, teilweise Beleuchtung) steigen, im Gegensatz zu den Verlusten, proportional zur Nutzungszeit. In der Folge kann für Szenarien mit geringem Luftwechsel das Phänomen auftreten, dass mit steigender Nutzungs-/Betriebszeit der Heizwärmebedarf sinkt.

6.4 Simulationsergebnisse (SG)

6.4.1 Allgemeines

Mittels thermischer Gebäudesimulation werden die Jahresheizwärmebedarfswerte ermittelt. Diese Werte stellen lediglich den Wärmebedarf des Gebäudes unter den genannten Randbedingungen, z.B. hinsichtlich bauphysikalischer Kennwerte und Nutzung, dar. Sie sind somit als Vergleichsgröße zum Jahresnutzwärmebedarf gemäß DINV 18599-2 [1][2] zu betrachten. Verluste der Anlagentechnik werden an dieser Stelle nicht einbezogen. Analog zu den Parametervariationen der Energiebedarfsberechnungen werden auch in den Simulationsberechnungen Variationen die Parameter Wärmespeicherfähigkeit und Luftwechsel durchgeführt.

6.4.2 Jahresnutzwärmebedarf

Die Jahresnutzwärmebedarfswerte werden unter Einbeziehung der Nutzungsrandbedingungen gemäß DINV 18599-10/-100 ermittelt. Nachfolgend sind beispielhaft die Ergebnisse des Modellgebäudes Werkstatt für das bauliche Wärmeschutzniveau Altbau (leicht) dargestellt.

Tabelle 14 Jahresnutzwärmebedarfswerte Werkstatt (B1), Variation der Gebäudedichtheit sowie des Wärmespeichervermögens

Wärmeschutzniveau	Infiltration n_i	Interne Wärmequellen	Jahresnutzwärmebedarf			Abweichung	
		Qi	$C_{Wirk,Hülle}$	$C_{Wirk,Interieur}$	$C_{Wirk,Hülle}$ + 10*$C_{Wirk,Interieur}$	$C_{Wirk,Hülle}$	$C_{Wirk,Hülle}$ + 10*$C_{Wirk,Interieur}$
	[h^{-1}]	[kW/(m^2a)]	[kWh/(m^2a)]	[kWh/(m^2a)]	[kWh/(m^2a)]	[%]	[%]
Altbau, leicht	0,07	85,7	357,4	357,4	393,0	0,0	10,0
	0,21	85,7	368,9	368,7	404,5	0,1	9,7
	0,50	85,7	392,6	392,2	428,3	0,1	9,2

Eine ausführliche Auflistung der Ergebnisse ist dem Anhang zu entnehmen.

6.4.3 Wirksame Speicherfähigkeit und Zeitkonstante

Hinsichtlich der Wärmespeicherfähigkeit werden die beiden folgenden Zustände betrachtet:

- Leeres Gebäude
  - Die Wärmespeicherfähigkeit des Gebäudes beruht allein auf dem speicherwirksamen Anteil der Bauwerksmasse.
- Gebäude mit Einrichtung
  - In diesem Szenario wird zusätzliches Wärmespeichervermögen aus Gebäudeeinrichtung in die Berechnung einbezogen.

Der Handhabbarkeit wegen werden innere speicherwirksame Massen im Rahmen der Simulationen vereinfacht als innenliegende flächige Elemente modelliert. Dabei werden drei unterschiedliche Speichertypen (Materialien-Schichtdicken-Kombinationen) betrachtet. Abhängig von Art und Nutzung werden jedem Modellgebäude Flächen dieser Speichertypen von definierter Größe zugewiesen.

Tabelle 15 Speichertypen für thermische Simulationsrechnungen

			Speichertyp		
			hohe Leit- und Speicherfähigkeit	hohe Speicherfähigkeit	geringe Speicherfähigkeit
Leitfähigkeit	λ	[W/mK]	50,0	2,3	0,2
Spezifische Wärmekapazität	c	[J/kgK]	450	1.000	1.000
Rohdichte	ρ	[kg/m³]	7.800	2.000	600
Schichtdicke	d	[m]	0,05	0,10	0,20

Tabelle 16 Interieur-Wärmespeicherkapazitäten(Speicherelemente) für thermische Simulationsrechnungen, Modellgebäuden zugeordnet

Hallentyp	Anmerkungen zu den Speicherelementen	spezifische Wärmespeicherkapazität	Größe der Speicherelemente
		[Wh/(m²K)]	[m²]
Werkstatt	repräsentiert ein umlaufendes Metallregal mit Lagergut, eine Hebebühne und zwei PKW;	18,8	150
Fertigung	repräsentiert mehrere Metallhochregale mit Lagergut;	18,8	4.000
Logistik	repräsentiert 18 Metallregale mit Lagergut;	18,8	22.750
Turnhalle	Einbauten vernachlässigbar	-	-
Baumarkt	repräsentiert den Verkaufs- und Lagerbereich	18,8	12.850
Gartenmarkt	repräsentiert Nährböden und Pflanzen	21,0	345
Lebensmittel-markt	entspricht einem umlaufenden und 18 3-zügigen Metallregalen	21,0 9,9	417 1.251

Die vollständigen Ergebnisse sind dem Anhang zu entnehmen.

Ähnlich wie in den Energiebedarfsberechnungen zeigt sich bei einer Variation des Wärmespeichervermögens innerhalb eines realistischen Bereichs nur geringer Einfluss auf den Wärmebedarf.

Werden die bewirkten – geringen – Bedarfsänderungen betrachtet, fällt jedoch auf, dass sich in beiden Verfahren mitunter gegensätzliche Tendenzen bezüglich des Einflusses der Wärmekapazität zeigen.

Aufgrund der geringen Unterschiede bei den Jahresnutzwärmebedarfswerten in Abhängigkeit von typischen Speicherkapazitäten können modellbedingte Abweichungen zwischen DIN V 18599-2 und thermischer Simulation zu gegenläufigen Tendenzen beim Nutzwärmebedarf führen. Das Monatsbilanzverfahren gemäß DIN V 18599 basiert auf Tagesmittelwerten in Bezug auf die Wärmesenken, die Wärmequellen und somit auch für den Ausnutzungsgrad. Diese Tagesmittelwerte sind ihrerseits monatsrepräsentativ definiert – ein Tagesmittelwert steht für einen ganzen Monat. Beim Übergang auf die verwendeten Tagesmittelwerte gehen folglich Informationen über die Gleichzeitigkeit von Wärmesenken und Wärmequellen verloren. Der Ausnutzungsgrad nach Norm erfasst das Phänomen Gleichzeitigkeit somit nur näherungsweise und es kann deshalb zu einer Über- oder Unterbewertung des nutzbaren Anteils der Wärmequellen kommen.

Prinzipiell bewirkt eine Zunahme der Speicherkapazität in einem Gebäude einen höheren Ausnutzungsgrad interner Wärmequellen und somit für diesen Effekt eine Bedarfsminderung. Dem stehen aber höhere Wärmeverluste gegenüber, da sich außerhalb der Nutzung höhere Raumtemperaturen einstellen und somit die Transmissions- und Lüftungswärmesenken

entsprechend erhöhen[18]. Die Art der Hallennutzung bestimmt nun, welcher Effekt einen größeren Einfluss ausübt.

Anhand der Ergebnisse für die Fertigungsbetriebe können die unterschiedlichen Effekte aufgezeigt werden. Der Gebäudetyp wird mit zwei unterschiedlichen Temperaturniveaus, im Ein- bis Drei-Schicht-Betrieb sowie geringem und hohem Fensterflächenanteil untersucht. Zusätzlich wird der alleinige Temperatureinflusses auf das Gebäude betrachtet. Die Solarstrahlung und die internen Wärmequellen bleiben in diesem Fall unberücksichtigt.

Die Ergebnisse zeigen, dass bei höherer Solltemperatur auch der Einfluss der Speicherkapazität infolge der höheren Wärmeverluste zunimmt. Wird die Phase der Heizungsunterbrechung verkürzt, verringert sich ihr Einfluss entsprechend. Der bedarfsmindernde Einfluss der Sonnenenergie wird durch die unterschiedlichen Fensterflächenanteile von 30 % und 80 % deutlich. Hier wirkt sich eine höhere Speicherkapazität günstig aus. Typischerweise reicht der Verglasungsanteil bei Wohn- und Bürogebäuden aus, um bei steigender Speicherkapazität eine Abnahme des Jahresnutzwärmebedarfs bei der thermischen Simulation zu bewirken. Bei der Fertigungshalle ist dies jedoch nicht gegeben.

Abhilfe kann nur eine zusätzliche Information über die Gleichzeitigkeit von Bedarf und Quelle schaffen. An einem geeigneten mit der aktuellen DINV 18599-2 vereinbaren Ansatz wird zurzeit gearbeitet.

6.4.4 Luftwechsel

Hinsichtlich des Luftwechsels die folgenden Szenarien untersucht

- Nutzungsbedingter Außenluftwechsel gemäß DIN V 18599-10/-100
    - Variation der Gebäudedichtheit: n = 0,07 / 0,21 / 0,50 h^{-1}
- zusätzliche Einbeziehung von Toröffnungsvorgängen
    - Variation der Gebäudedichtheit: n = 0,07 / 0,21 / 0,50 h^{-1}

Erwartungsgemäß zeigt sich – analog zu den Energiebedarfsberechnungen nach DIN V 18599 – mit steigendem Luftwechsel auch ein steigender Energiebedarf.

7 Vergleich von Bedarfs- und Verbrauchswerten

7.1 Qualität und Umfang der Daten

Der Umfang der gemachten Angaben variiert zwischen den einzelnen Datensätzen. Teilweise liegen Ausdrucke der Energiebedarfsberechnung und Verbrauchsaufschlüsselungen vor. Teilweise sind die Angaben auf einen Bedarfs- und einen Verbrauchswert beschränkt. Speziell weniger detaillierte Ergebnisse können von Seiten der Autoren kaum auf Plausibilität geprüft werden.

Eventuell unterlaufene Fehler bei der Bedarfs- und Verbrauchsermittlung sind somit nicht sicher auszuschließen. Solche Fehler haben in der Regel keinen systematischen Charakter – es kann von einer zufälligen Verteilung ausgegangen werden. Bei ausreichend großen Stichproben werden sie für gewöhnlich recht gut durch zwei Effekte kompensiert:

[18] Durch die Wärme-Speicher-/-Entspeichervorgänge, welche in Abhängigkeit vom Wärmespeichervermögen mehr oder weniger stark ausgeprägte sind, ergibt sich ein Übertrag von Heizenergie aus der Nutzungszeit in die Nichtnutzungszeit.

- Einzelne Ausreißer verlieren an Einfluss, wenn ihnen eine ausreichende Menge an gering bis gar nicht fehlerbehafteten Daten gegenübersteht.
- Durch den Zufallscharakter der Fehler ergeben sich sowohl positive als auch negative Abweichungen vom Erwartungswert. Die fehlerbedingten Abweichungen gleichen sich teilweise gegenseitig aus.

Solche Kompensationseffekte sind bei kleinen Stichproben jedoch kaum ausgeprägt. Somit können auch durch zufällig verteilte Fehler Abweichungen einer bestimmten Tendenz hervorgerufen werden. Der Stichprobengröße kommt hierdurch umso mehr Bedeutung zu.

Der derzeitige Datenumfang von 15 Gebäuden ist verhältnismäßig gering und lässt somit nur bedingt belastbare Schlüsse zu.

7.2 Vergleichbarmachung von Bedarfs- und Verbrauchswerten

7.2.1 Witterungsbereinigung

Um Verbrauchsangaben unabhängig von Ort und Abrechnungszeitraum miteinander vergleichen zu können, wird eine Witterungsbereinigung mithilfe von Klimakorrekturfaktoren des Deutschen Wetterdienstes [43] durchgeführt. Diese Faktoren liegen seit 2002 monatsweise für Abrechnungszeiträume/Heizperioden von jeweils einem Jahr vor. Zu den angegebenen Verbrauchswerten liegen keine genauen Angaben bezüglich der Heizperiode vor, es ist im Allgemeinen nur das Jahr bekannt. Daher wird Heizperiode wird pauschal auf den Zeitraum zwischen dem 01.08. des Jahres vor Ablesung und dem 31.07. des Ablesejahres festgelegt – dieser Zeitraum entspricht einer typischen Heizperiode. Leichte zeitliche Verschiebungen dieses Zeitraums hätten nur geringe Auswirkungen auf den Klimakorrekturfaktor.

Zeitraum	von	01.01.2002	01.02.2002	01.03.2002	01.04.2002	01.05.2002	01.06.2002
	bis	31.12.2002	31.01.2003	28.02.2003	31.03.2003	30.04.2003	31.05.2003
Postleitzahl							
01067		1,17	1,16	1,09	1,08	1,09	1,09
01069		1,17	1,16	1,08	1,08	1,09	1,08
01097		1,16	1,15	1,08	1,07	1,08	1,08
01099		1,02	1,01	0,96	0,95	0,96	0,96
01108		1,06	1,05	0,99	0,98	0,99	0,99
01109		1,05	1,04	0,98	0,98	0,98	0,98
01127		1,17	1,16	1,09	1,08	1,09	1,09
01129		1,11	1,10	1,04	1,03	1,04	1,04
01139		1,15	1,13	1,06	1,06	1,07	1,06
01156		1,01	1,00	0,95	0,94	0,94	0,95
01157		1,12	1,11	1,04	1,04	1,05	1,04
01159		1,15	1,14	1,07	1,06	1,07	1,07

Abbildung 1 Klimakorrekturfakturen (Deutscher Wetterdienst [43]), Auszug

7.2.2 Heiz-/Brennwertbezug

Die äquivalente Bedarfsgröße zum Heizenergieverbrauch ist bei einer Energiebedarfsberechnung nach DIN V 18599 [1][2] der „Endenergiebedarf Wärme“. Zu beachten ist an dieser Stelle jedoch, dass Endenergieangaben nach DIN V 18599 [1][2] brennwertbezogen erfolgen, während die vorliegenden Verbrauchswerte heizwertbezogen angegeben sind. Um die vorliegenden Verbräuche mit den zugehörigen Bedarfswerten vergleichen zu können, werden letztere einer Brennwert-Heizwert-Korrektur nach DIN V 18599-1, *Kapitel 5.5.4* [1][2] unterzogen.

7.2.3 Vergleich Bedarf/Verbrauch

Die Ermittlung der Bedarfs-Verbrauchs-Verhältnisse ist beispielhaft in Tabelle 17 dargestellt. Eine vollständige Auflistung aller ausgewerteten Objekte ist dem Anhang zu entnehmen.

Tabelle 17 Bestimmung Bedarfs-Verbrauchs-Verhältnis; Beispiel

Nettogrundfläche	Energieträger	Energieverbauch, Ablesung	Jahr	Witterungsbereinigung		Bereinigter mittlerer Verbrauch		Endenergiebedarf Wärme nach DIN V 18599, brennwertbezogen	Brenn-Heizwert-Korrektur	Heizwertbezogener Endenergiebedarf Wärme (Vergleichswert zu Verbrauch)		Verhältnis Bedarf/ Verbrauch
				Klima-korrektur-faktor	Bereinigter Jahreswert							
m²		[kWh/a]			[kWh/a]	[kWh/a]	[kWh/m²a]	[kWh/a]	$f_{HS/HI}$	[kWh/a]	[kWh/m²a]	
18.948	Erdgas	1.211.267	2008	1,09	1.320.281	**1.400.404**	**73,9**	1.925.503	1,11	**1.734.687,39**	**91,55**	1,24
		1.410.025	2009	1,05	1.480.526							

7.3 Daten

Abbildung 2 vergleicht die Bedarfs-Verbrauchs-Verhältnisse der untersuchten Objekte grafisch nach eingesetzter Heizungsanlage.

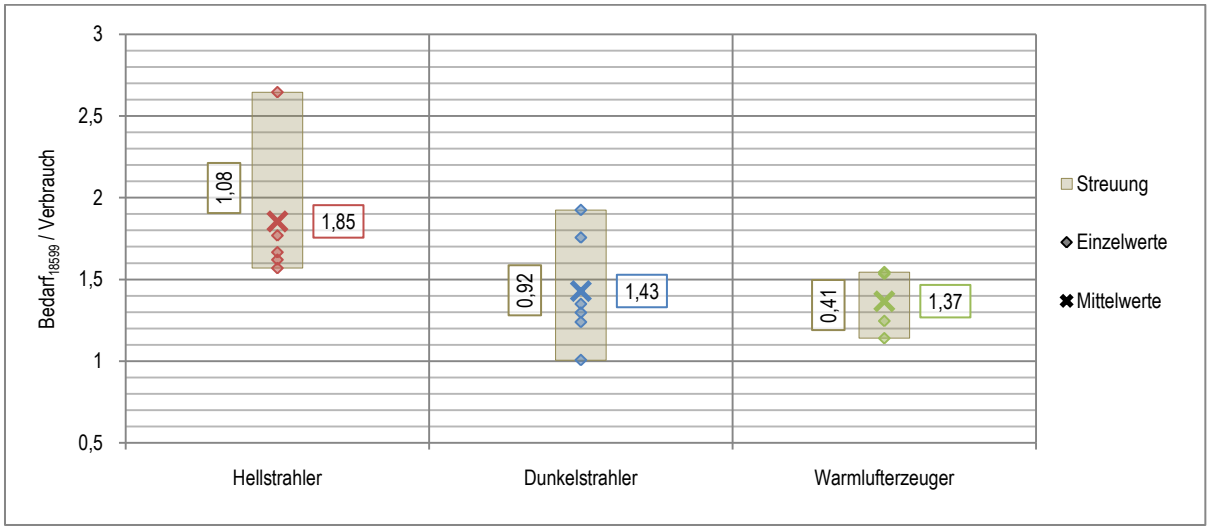


Abbildung 2 Bedarfs-Verbrauchs-Verhältnisse

Es ergeben sich die folgenden mittleren Bedarfs-Verbrauchs-Verhältnisse.

- Hellstrahler 1,85
- Dunkelstrahler 1,43
- Warmlufterzeuger 1,37

Hierbei zeigt sich für jedes System eine deutliche Streuung der Werte, wobei die Streuung bei Hellstrahlern am größten und bei Warmlufterzeugern am kleinsten ist. Von der Ableitung weiterer Abhängigkeiten der einzelnen Abweichungen – z.B. von Innentemperatur, Gebäudegröße oder Raumhöhe – wird aufgrund des geringen Stichprobenumfangs abgesehen.

7.4 Interpretation

Für alle betrachteten Fälle ergeben sich Bedarfs-Verbrauchs-Verhältnisse über Eins. Mit Energiebedarfsberechnungen nach DIN V 18599 wird der reale Verbrauch generell überschätzt.

Die **mittleren Bedarfs-Verbrauchs-Verhältnisse** deuten darauf hin, dass es anlagenspezifische Unterschiede bei der Abweichung zwischen Bedarf und Verbrauch gibt. So ergibt sich für Hellstrahler die größte mittlere Abweichung zwischen Bedarf und Verbrauch von 85%. Für Warmlufterzeuger beträgt sie dagegen nur 37%, für Dunkelstrahler 43%.

Das Ausmaß der **Streuung der Bedarfs-Verbrauchsverhältnisse** kann andeuten, dass im jeweiligen Berechnungsverfahren bzw. hier für die jeweilige Anlagenvariante nur ungenügend differenziert wird. Besonders für Strahlungsheizungen, welche große Streuungen aufweisen, ist daher anzunehmen, dass im Sinne einer exakteren Abbildung zukünftig stärker unterschieden werden müssen wird. Die hierbei verwendeten Unterscheidungskriterien können sowohl Gebäude- und Nutzungsparameter (z.B. Geometrische Verhältnisse, Innentemperatur) als auch Anlagenparameter (z.B. Aufteilung der Wärmeabgabe in Konvektion und Strahlung) sein.

8 Heizenergieverbrauch Hallengebäude

8.1 Vorbemerkung

Im Rahmen des vorliegenden Projektes soll der Energieverbauch, welcher in Deutschland auf die Beheizung von Hallen entfällt, bestimmt werden.

Als Datenbasis dienen vorwiegend Veröffentlichungen des statistischen Bundesamtes [15][16][17]. Zur Stützung von Annahmen zu Gebäudegrößen wird zusätzlich eine vom ZUB Kassel erarbeitete Modellgebäude-Datenbank [18] herangezogen.

Der Umfang und Detailgrad der vorliegenden Daten lässt weder zum Hallenbestand noch zum Heizenergieverbrauch desselben exakte Aussagen zu. Folgend sollen einige Schwierigkeiten bei der Bearbeitung dieses Teilproblems skizziert werden:

- Es gibt keine exakte Definition des Hallenbegriffs. Aufzeichnungen zum Gebäudebestand enthalten hierzu folglich auch keine Angaben und müssen durch die Autoren interpretiert werden.
- Für diese Betrachtung wesentliche Informationen sind innerhalb der vorliegenden Daten nicht verknüpft. So lässt sich beispielsweise die Anzahl beheizter Nichtwohngebäude über einen bestimmten Betrachtungszeitraum ermitteln – die Größe der hierbei beheizten Nutzfläche ist jedoch unbekannt. Gleichzeitig kann aus den vorliegenden Daten die Gesamtnutzfläche verschiedener Gebäude- bzw. Nutzungskategorien ermittelt werden – Angaben zur Beheizung fehlen jedoch.
- Zusätzlich zu den zuvor genannten Veröffentlichungen liegen Erhebungen zu einzelnen Hallenbetreibern, wie z.B. Supermarkt- oder Baumarktketten vor. Diese liefern jedoch immer nur Angaben zu einem kleinen Anteil des Hallenbestands und erlauben keine Hochrechnung auf einen Gesamtbestand.

Die umfassendsten Angaben zum Nichtwohngebäudebestand sind, aus Sicht der Autoren, in den genannten Publikationen des statistischen Bundesamtes zu finden. Bei fehlenden Angaben bzw. fehlenden Verknüpfungen von Informationen sind im Weiteren Annahmen zu treffen. Hierbei muss unweigerlich eine gewisse Unschärfe in Kauf genommen werden. Als Ergebnis der Betrachtung ist folglich kein exakter Wert des in Deutschland auf Hallen entfallenden Heizenergieverbrauchs zu erwarten. Das Ziel kann es an dieser Stelle nur sein, die Größenordnung dieses Wertes einzugrenzen und einen wahrscheinlichen Ergebnisbereich abzustecken.

8.2 Anzahl der Hallengebäude in Deutschland

8.2.1 Nichtwohngebäude (NWG), Gesamtbestand und Abgänge

Zwischen 1979 und 2009 wurden ca. 1,0 Mio. Nichtwohngebäude errichtet. Über diesen Zeitraum ist ein schwankender Verlauf der jährlichen Neuerrichtungen zu erkennen – ein überlagertes Absinken oder Ansteigen ist kaum ausgeprägt (vgl. Abbildung 3). Im Mittel wurden jährlich ca. 33.400 Nichtwohngebäude errichtet.

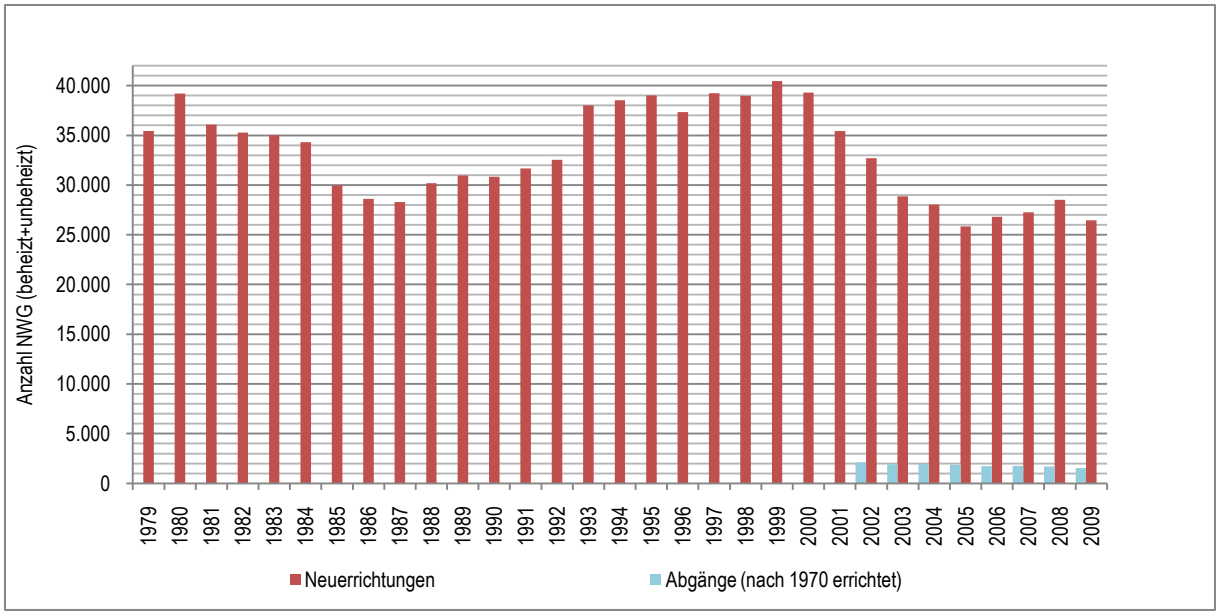


Abbildung 3 Neuerrichtungen NWG 1979-2009 ([15][16][17])

Für parallel dazu angefallene Gebäudeabgänge liegen erst ab 2002 Zahlen vor [17]. Im Zeitraum von 2002 bis 2009 wurden jährlich ca. 2.000 Abgänge von nach 1970 errichteten Gebäuden aufgenommen. Dies entspricht etwa 6% des jährlichen Bauaufkommens von ca. 33.400 Gebäuden. Aus Sicht der Autoren deutet nichts darauf hin, dass die auf das Bauaufkommen bezogenen Abgänge für Zeiträume vor 2002 deutlich höher ausfielen.

Da anzunehmen ist, dass Gebäudeabgänge vorwiegend die jeweils ältesten Gebäude betreffen, dürfte nur ein geringer Teil aller Abgänge des Zeitraums 1979-2009 nach 1979 errichtete Gebäude betreffen. Es scheint daher naheliegend, dass der Großteil aller zwischen 1979 und 2009 errichteten Nichtwohngebäude auch heute noch in Betrieb ist und Gebäudeabgänge in guter Näherung vernachlässigt werden können.

8.2.2 Gebäudekategorien / Nutzungsarten

Die Anzahlen jährlicher Neuerrichtungen sind in die folgenden Kategorien unterteilt [15]:

- Anstaltsgebäude
- Büro- und Verwaltungsgebäude
- Landwirtschaftliche Betriebsgebäude
- Nichtlandwirtschaftliche Betriebsgebäude
    - Fabrik- und Werkstattgebäude
    - Handels- und Lagergebäude
    - Hotels und Gaststätten
    - Sonstige Nichtwohngebäude

Die Quelle enthält keine Angaben dazu, ob es sich bei den Gebäuden um Hallen oder andere Nichtwohngebäude (im Folgenden „Nichthallen“) handelt. Ebenso sind den Daten keine Angaben zur Beheizung der erfassten Gebäude zu entnehmen. Zu beidem müssen im Weiteren Annahmen getroffen werden.

8.2.3 Beheizte Hallen

Für die Zeit vor 1979 liegen den Autoren keine Daten vor. Bekanntermaßen enthält der jetzige NWG-Bestand jedoch auch Gebäude, die vor 1979 errichtet wurden. Innerhalb der Projektbegleitgruppe wurde durch mehrere Mitglieder aus dem Bereich Hallenbeheizung angemerkt, dass auch heute noch wesentliche Hallenaufkommen aus den 1970ern, 1960ern und früheren Errichtungsjahren bestünden – diese sind jedoch nicht durch statistische Daten zum Bauaufkommen dokumentiert. Hinsichtlich der Gebäudeanzahl werden daher zwei Szenarios betrachtet.

- Betrachtungszeitraum 1980-2009
- Erweiterter Betrachtungszeitraum 1960-2009

Betrachtungszeitraum 1980-2009

In einer ersten Schätzung wird die Anzahl beheizter Hallen über einen Betrachtungszeitraum ermittelt, welcher durch statistische Daten zum Bauaufkommen gedeckt ist.

Hallen sind besonders unter den folgenden Kategorien zu vermuten:

- Landwirtschaftliche Betriebsgebäude
- Fabrik- und Werkstattgebäude
- Handels- und Lagerräume
- sonstige Nichtwohngebäude

Abbildung 4 zeigt die jährlichen Neuerrichtungen für Nichtwohngebäude insgesamt, sowie für die zuvor aufgeführten Kategorien, in welchen der Hallenbestand wahrscheinlich zum Großteil enthalten ist.

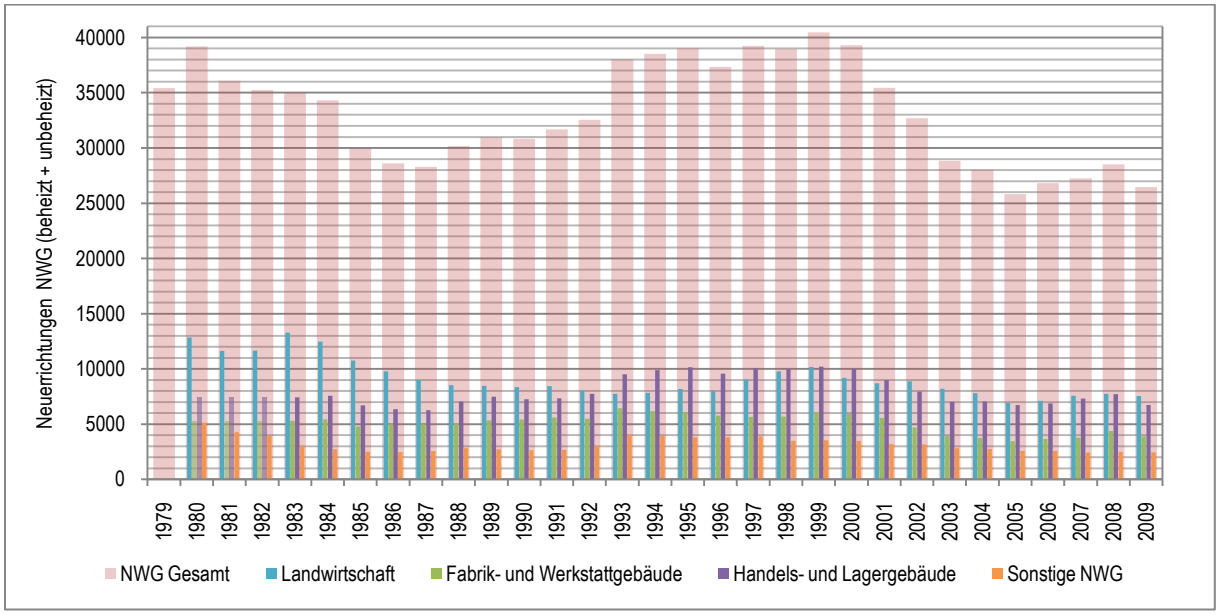


Abbildung 4 Neuerrichtungen NWG: Gesamt und hallentypische Nutzungen, aus [15] [19]

[19] In die Kategorien *Fabrik- und Werkstatt-* sowie *Handels- und Lagergebäude* beginnen die Aufzeichnungen erst 1983. Für den Zeitraum 1980-1982 wurde ersatzweise jeweils der Wert des Jahres 1983 eingetragen.

Lediglich für landwirtschaftliche Betriebsgebäude zeigt sich ein geringer Rückgang der Neuerrichtungen; bei den restlichen drei Kategorien deutet sich ein schwankender Verlauf um einen konstanten Mittelwert an.

Aus der DESTATIS-Veröffentlichung *Fachserie 5 Reihe 1* [17] können für den Zeitraum 2002-2009 die Anzahlen beheizter und unbeheizter Gebäude für die zuvor benannten hallentypischen Kategorien entnommen werden (vgl. Tabelle 18).

Tabelle 18 NWG-Bestand: hallentypische Nutzungen, Anteil beheizter Gebäude, aus [17]

Jahr	Landwirtschaft				Fabrik- und Werkstattgebäude				Handels- und Lagerräume				Sonstige NWG			
	Gesamt	unbeheizt	beheizt		Gesamt	unbeheizt	beheizt		Gesamt	unbeheizt	beheizt		Gesamt	unbeheizt	beheizt	
2002	8.868	7.974	894	10,08%	4.705	712	3.993	84,87%	7.933	3.290	4.643	58,53%	3.173	461	2.712	85,47%
2003	8.210	7.386	824	10,04%	3.923	713	3.210	81,83%	7.029	2.980	4.049	57,60%	2.809	434	2.375	84,55%
2004	7.809	7.038	771	9,87%	3.750	805	2.945	78,53%	7.047	3.017	4.030	57,19%	2.756	400	2.356	85,49%
2005	6.946	6.243	703	10,12%	3.463	783	2.680	77,39%	6.721	2.988	3.733	55,54%	2.573	346	2.227	86,55%
2006	7.100	6.368	732	10,31%	3.656	885	2.771	75,79%	6.875	3.057	3.818	55,53%	2.584	356	2.228	86,22%
2007	7.568	6.762	806	10,65%	3.779	893	2.886	76,37%	7.317	3.402	3.915	53,51%	2.447	379	2.068	84,51%
2008	7.749	6.949	800	10,32%	4.394	952	3.442	78,33%	7.710	3.592	4.118	53,41%	2.508	419	2.089	83,29%
2009	7.531	6.812	719	9,55%	3.888	917	2.971	76,41%	6.730	3.348	3.382	50,25%	2.444	376	2.068	84,62%
Mittel	7.723	6.942	781	10%	3.945	833	3.112	79%	7.170	3.209	3.961	55%	2.662	396	2.265	85%

Es lassen sich mittlere Anteile beheizter Gebäude am jeweiligen Bestand ermitteln. Diese betragen für

- Landwirtschaftliche Betriebsgebäude 10%
- Fabrik- und Werkstattgebäude 79%
- Handels- und Lagerräume 55%
- Sonstige Nichtwohngebäude 85%.

Da die Anteile beheizter Gebäude am jeweiligen Bestand im Zeitraum 2002-2009 nur in relativ geringem Maße schwanken, kann angenommen werden, dass sie in guter Näherung auch für Zeiträume vor 2002 gelten. Somit lassen sich für hallentypische Nutzungen die Anzahlen beheizter Gebäude über den gesamten Betrachtungszeitraum ermitteln. Eine entsprechende Darstellung liefert Abbildung 5 – es wurden alle Gebäude der entsprechenden Kategorien aufgetragen, Hallen und Nichthallen.

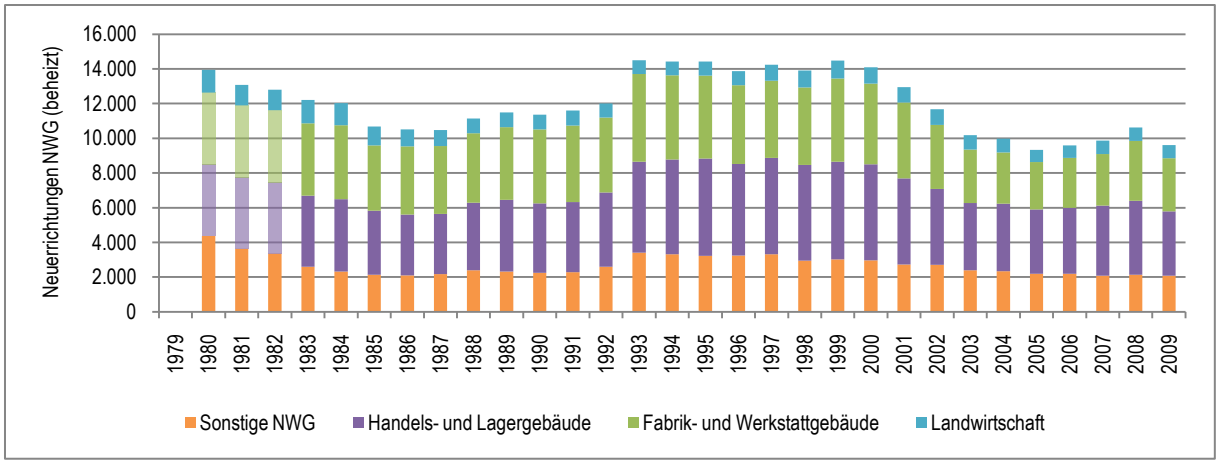


Abbildung 5 Neuerrichtungen beheizter NWG (hallentypische Kategorien)[20]

Der Anteil von Hallen unter diesen Gebäuden geht aus den vorliegenden Daten nicht hervor. Es werden daher Hallenanteile gemäß Tabelle 19 angenommen.

Tabelle 19 Unterstellte Anteile von Hallengebäuden am jeweiligen Bestand der betrachteten Gebäudearten, bezogen auf Gebäudeanzahl

Gebäudeart	Anteil Hallen
Landwirtschaftliche Betriebsgebäude	mittel (50 %)
Fabrik- und Werkstattgebäude	hoch (75 %)
Handels- und Lagerräume	hoch (75 %)
Sonstige NWG	gering bis sehr gering (15 %)

Unter diesen Annahmen ergibt sich eine Verteilung des Hallenbestands gemäß Abbildung 6.

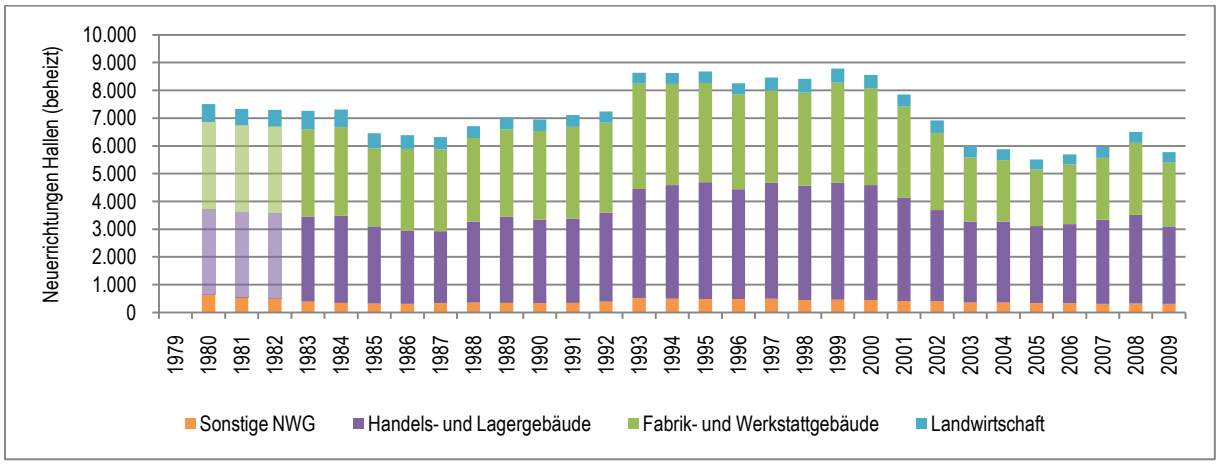


Abbildung 6 Neuerrichtungen beheizter Hallen[21]

Zwischen 1980 und 2009 wurden hiernach etwa 215.000 beheizte Hallen errichtet, welche den aktuellen Hallenbestand darstellen.

[20] In die Kategorien *Fabrik- und Werkstatt-* sowie *Handels- und Lagergebäude* beginnen die Aufzeichnungen erst 1983. Für den Zeitraum 1980-1982 wurde ersatzweise jeweils der Wert des Jahres 1983 eingetragen.

[21] In die Kategorien *Fabrik- und Werkstatt-* sowie *Handels- und Lagergebäude* beginnen die Aufzeichnungen erst 1983. Für den Zeitraum 1980-1982 wurde ersatzweise jeweils der Wert des Jahres 1983 eingetragen.

Erweiterter Betrachtungszeitraum 1960-2009

Innerhalb der Projektbegleitgruppe wird mehrheitlich die Meinung vertreten, dass der Betrachtungszeitraum 1980-2009 den genutzten Hallenbestand nur unzureichend erfasst. Projektbeteiligte aus dem Gebiet der Hallenbeheizung schätzen, dass wesentliche Anteile des heutigen Hallenbestands bereits in den 1970er- und 1960er-Jahren sowie noch weiter zurückliegenden Zeiträumen errichtet wurden.

Auf Grundlage der gewonnen Ergebnisse für den Betrachtungszeitraum 1980-2009 erfolgt eine weitere Schätzung zum Hallenbestand für den Zeitraum 1960-2009.

Vorgehen

Zwischen 1980 und 2009 wurden im Mittel ca. 7.200 beheizte Hallen pro Jahr errichtet (vgl. Abbildung 6). Dieser Wert gelte im Mittel auch für den Zeitraum vor 1980.

Ausgehend von einer Mindestnutzungsdauer im Bereich von 30 Jahren ergeben sich zwischen 1980 und 2009 keine Abgänge in wesentlichem Ausmaß. Für vor 1980 errichtete Hallen kann von statistisch relevanten Gebäudeabgängen ausgegangen werden. Es wird unterstellt, dass ein bestimmter Anteil der beheizten Hallen des Baujahres 1960 nach wie vor genutzt werden. Für diesen Anteil werden die beiden Grenzen 0% und 100% betrachtet. Der Hallenbestand der Baujahre 1960-1980 wird linear angenähert (vgl. Abbildung 7).

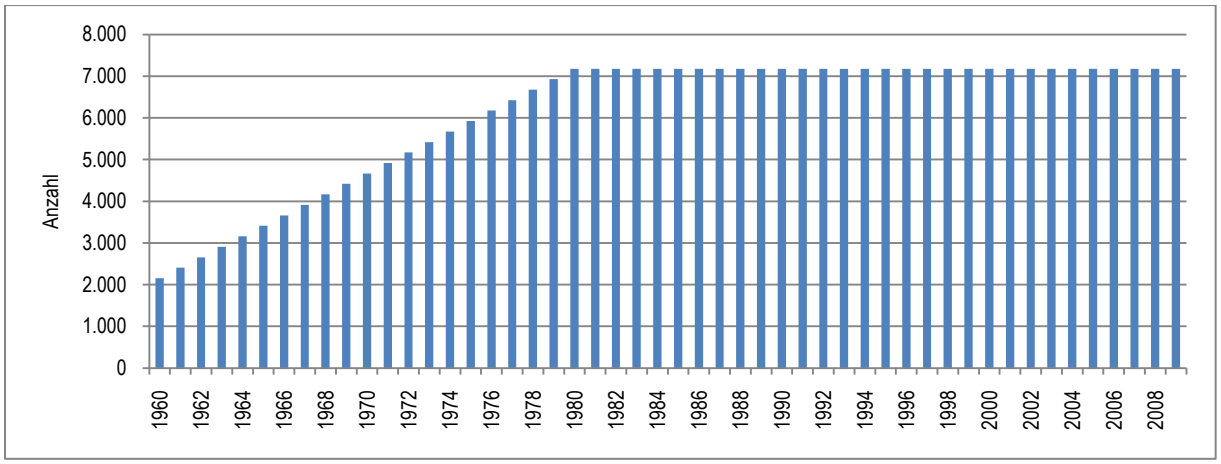


Abbildung 7 **Hallenbestand (synthetische Daten); Darstellung beispielhaft: 30% der 1960 errichteten Hallen heute noch in Betrieb**

Der Hallenbestand, welcher Gebäude der Baujahre von 1960 bis 2009 umfasst, beläuft sich hiernach auf 283.600 bis 359.000 Gebäude.

8.3 Nutzfläche

8.3.1 Allgemeines

Allein aus der Gebäudeanzahl lässt sich kaum auf einen Heizenergieverbrauch schließen, da Gebäudegrößen über einen sehr großen Bereich variieren. Die nach 8.2.2 bestimmten Anzahlen von Hallengebäuden sollen daher mit einer mittleren Hallengröße kombiniert werden, sodass sich eine zu beheizende Gesamthallenfläche bestimmen lässt.

8.3.2 Nichtwohngebäude (Hallen+Nichthallen)

Aus Gebäudeanzahlanzahl und Nutzfläche der jährlichen Neuerrichtungen [16] lässt sich die zeitliche Entwicklung der mittleren Gebäudegrößen für die in 8.2.3 benannten NWG-Kategorien ermitteln.

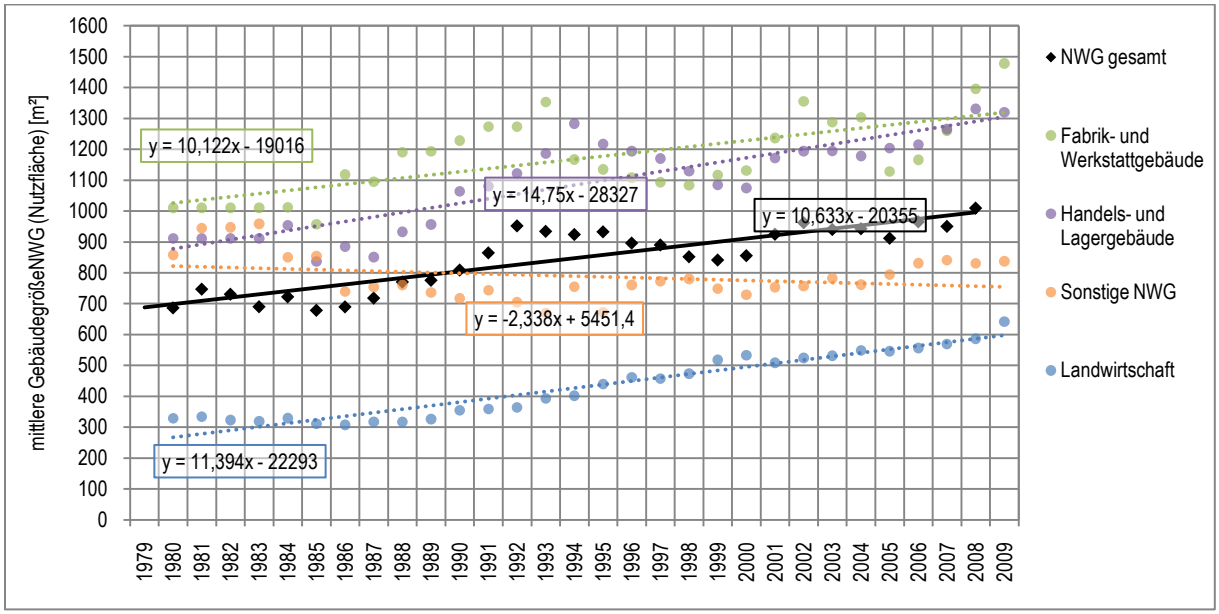


Abbildung 8 Entwicklung der mittleren Gebäudegrößen, nach [15]

Für die nicht näher beschriebenen *sonstigen Nichtwohngebäude* ist ein leichtes Absinken der mittleren Gebäudegröße zu erkennen. Für alle anderen aufgeführten Kategorien zeigt sich ein Anstieg der mittleren Gebäudegröße – dies entspricht der Erwartungshaltung: heute werden im Mittel größere Gebäude gebaut als 1980. Das Niveau der dargestellten Verläufe scheint für Hallengebäude jedoch zu niedrig (vgl. 3.4 und Tabelle 20).

Tabelle 20 Typische Hallengrößen nach Modellgebäudedatenbank ZUB Kassel [18]

Gebäude	Bruttogrundfläche[22] [m²]
Lebensmittelmarkt, klein	1.152
Lebensmittelmarkt, mittel	2.520
Lebensmittelmarkt, groß	6.900
Verbrauchermarkt Non-Food	672
Elektrofachmarkt	5.400
Baumarkt	5.850
Möbelhaus	30.060
Produktionshalle, klein	1.028
Produktionshalle, groß	7.951
Logistikhalle	11.208
Sporthalle, Einfeldhalle	1.261
Sporthalle, Dreifeldhalle	1.614

Dies legt den Schluss nahe, dass es unter Nichtwohngebäuden keine Gleichverteilung der Nutzfläche zwischen Hallen und Nichthallen gibt. Es kann angenommen werden, dass Hallen im Mittel tendenziell größere Nutzflächen aufweisen als Nichthallen.

[22] In der zitierten Publikation des ZUB Kassel werden Bruttogrundflächen angegeben. Die Angaben aus den zitierten DESTATIS-Veröffentlichungen beziehen sich auf Nutzflächen. Hallen sind in der Regel hauptsächlich eingeschossige Bauwerke, bei welchen vertikale Wandaufbauten nur einen sehr geringen Anteil der Grundfläche in Anspruch nehmen. Bruttogrund- und Nutzfläche liegen daher für gewöhnlich in derselben Größenordnung.

8.3.3 Hallen Szenario 1

Wird die mittlere Größe von Hallen der mittleren Größe von Nichtwohngebäuden gleichgesetzt, ergibt sich die in Abbildung 9 dargestellte Verteilung der gesamten beheizten Hallennutzfläche über dem Errichtungsjahr.

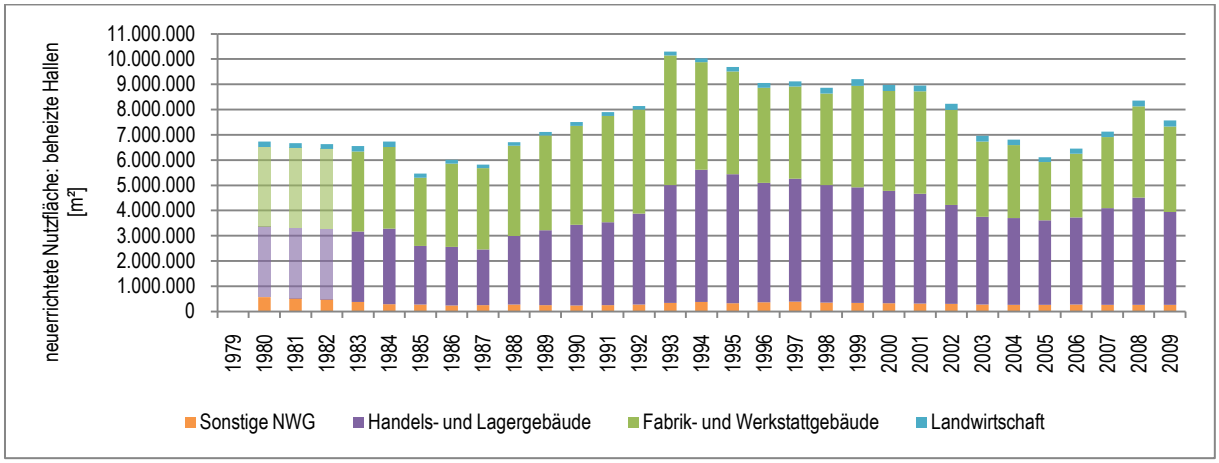


Abbildung 9 Verteilung der beheizten Hallennutzfläche über Errichtungsjahr; Szenario 1

Hiernach wurden zwischen 1980 und 2009 ca. 230 Mio. m² Hallennutzfläche errichtet, welche heute noch genutzt werden.

Innerhalb der Projektbegleitgruppe wird vermutet, dass mit der unterstellten Gleichverteilung der Nutzfläche zwischen Hallen und Nichthallen eine deutliche Unterschätzung der Hallennutzfläche einhergeht.

8.3.4 Hallen Szenario 2

Die in Abbildung 8 dargestellten mittleren Gebäudegrößen für Nichtwohngebäude scheinen aus heutiger Sicht für Hallen zu klein. Angesichts des weiten Variationsbereichs von Hallengrößen, ist es jedoch schwierig, eine mittlere Hallengröße festzulegen.

Innerhalb der Projektgruppe wurde mehrfach die Größenordnung 2.000 m² für eine mittelgroße „Durchschnittshalle“ genannt. Werden die Modellgebäude nach Tabelle 20 oder Kapitel 3.4 herangezogen, erscheint jedoch auch dieser Wert als sehr konservative Annahme.

Da diese Betrachtungen letztlich auf die Ermittlung eines Energieeinsparpotenzials abzielen, und eine Überschätzung desselben vermieden werden soll, wählen die Autoren als mittlere Hallengröße für Szenario 2 die innerhalb der Projektgruppe als Größenordnung genannten 2.000 m², auch wenn sich mit Sicht auf heute übliche Hallen ein größerer Wert vermuten ließe.

Vorgehen

Der Wert von 2.000 m² wird für Gebäude des Baujahres 2009 angesetzt. Für Ältere Gebäude wird die mittlere Größe mithilfe des in Abbildung 8 angegeben Anstiegs der mittleren Gebäudegröße (Kurve NWG Gesamt) bestimmt – auf eine Unterscheidung der Anstiege zwischen den Gebäudekategorien wird an dieser Stelle verzichtet.

Es ergibt sich eine Verteilung der beheizten Hallennutzfläche über dem Errichtungsjahr gemäß Abbildung 10.

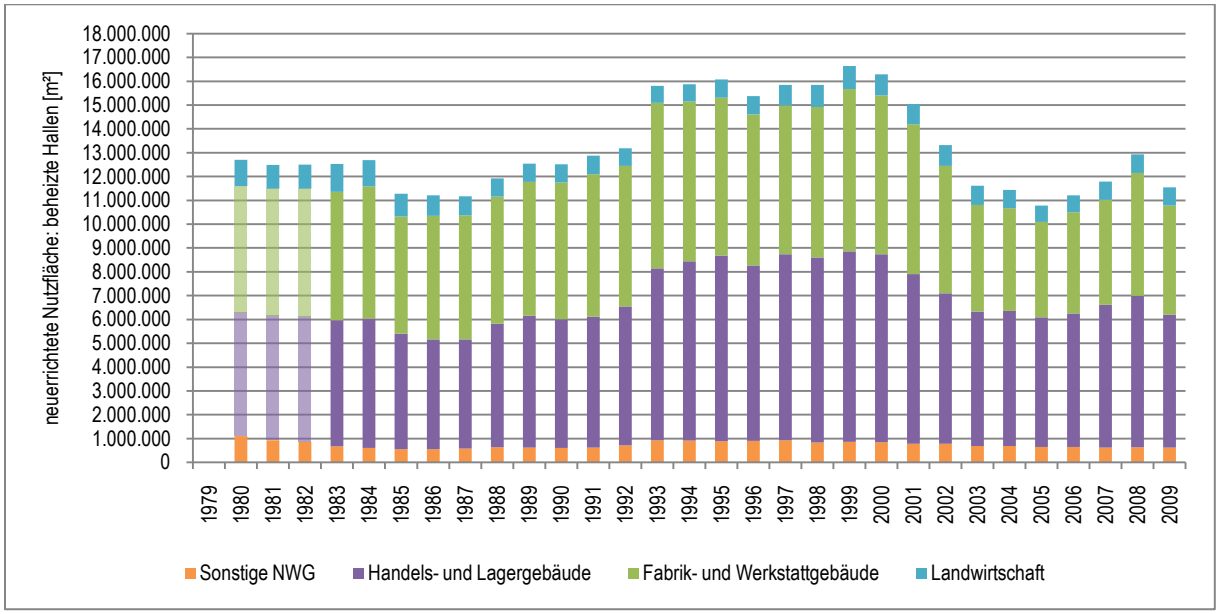


Abbildung 10 Verteilung der beheizten Hallennutzfläche über Errichtungsjahr; Szenario 2

Die zwischen 1980 und 2009 errichtete und heute noch genutzte Hallennutzfläche beträgt hiernach ca. 397 Mio. m².

8.3.5 Hallen Szenario 2 mit erweitertem Betrachtungszeitraum

Für einen erweiterten Betrachtungszeitraum, welcher weiter zurückreicht als die vorliegenden statistischen Daten, wurde in 8.2.3 eine Schätzung zur Anzahl beheizter Hallen vorgenommen. Auf Grundlage dieser synthetischen Daten und von Annahmen zur mittleren Hallengröße nach 8.3.4 ergibt sich eine Verteilung der beheizten Hallennutzfläche über dem Errichtungsjahr gemäß Abbildung 11.

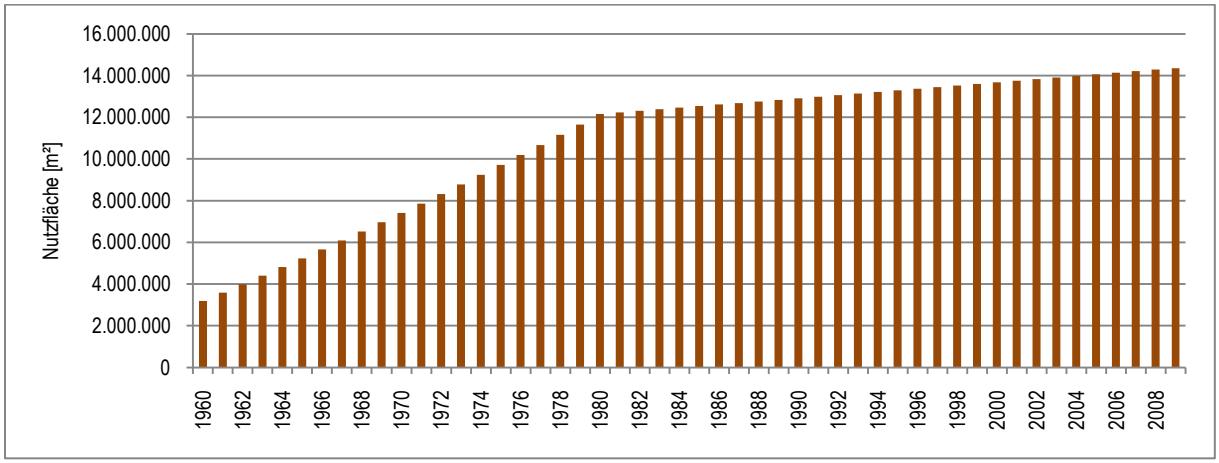


Abbildung 11 Verteilung der beheizten Hallennutzfläche über dem Errichtungsjahr; Darstellung beispielhaft: 30% der 1960 errichteten Hallen heute noch in Betrieb

Hiernach beträgt die zu beheizende Hallennutzfläche – errichtet von 1960 bis 2009 – zwischen 508 und 625 Mio. m².

8.4 Spezifischer Heizenergieverbrauch

8.4.1 Allgemeines

In 8.2 und 8.3 wurden Verteilungen des Gebäudebestands über dem Errichtungsjahr ermittelt. Korrespondierende Verbrauchsdaten liegen nicht vor. Im Rahmen dieser Studie sollen daher typische spezifische Verbräuche für repräsentative mittlere Randbedingungen berechnet und dem Gebäudebestand zugeordnet werden.

Hierfür wird eine Durchschnittshalle definiert. Für diese werden spezifische Heizenergiebedarfswerte für verschiedene Niveaus des baulichen Wärmeschutzes sowie der Anlagentechnik berechnet. Die Parameter des baulicher Wärmeschutzes, der Gebäudedichtheit und der Anlagentechnik werden dem Errichtungsjahr entsprechend festgelegt.

Es wird von einer gleichmäßigen und näherungsweise stetigen Verringerung des spezifischen Heizenergieverbrauchs von Jahr zu Jahr – bedingt durch Verbesserungen des baulichen Wärmeschutzes, der Anlagentechnik und der Gebäudedichtheit – ausgegangen. Die Abbildung der bedingten stetigen Verringerung des spezifischen Energieverbrauchs erfolgt als lineare Funktion über der Zeit.

8.4.2 Gebäude

Das betrachtete Gebäude soll hinsichtlich aller Parameter eine Durchschnittshalle darstellen. Für die Berechnungen wird eine modifizierte Version des Modellgebäudes *Fertigungsbetrieb* aus dem zuvor erstellten Gebäudekatalog herangezogen (vgl. 3.4.3, 3.4.4).

Tabelle 21 Hüllflächen Durchschnittshalle

Ausrichtung	Bauteil	Anzahl	Länge [m]	Breite [m]	A [m²]	
					Brutto	Netto
Nord	Außenwand	1	40,50	10,50	425,25	425,25
Süd	Außenwand	1	40,50	10,50	425,25	375,25
-	Tor	2	5,00	5,00	50,00	50,00
Ost	Außenwand	1	60,50	10,50	635,25	505,18
-	Fenster	1	60,50	2,15	130,08	130,08
West	Außenwand	1	60,50	10,50	635,25	505,18
-	Fenster	1	60,50	2,15	130,08	130,08
Oben	Dach	1	60,50	40,50	2.450,25	2.450,25
Unten	Bodenplatte	1	60,5 (50,5)	40,5 (30,5)	2450,25 (1540,25)	
-	gedämmter Randbereich	1	-	-	910,00	
V_{Brutto} [m³]		25.727,63				
V_{Netto} [m³]		24.000,00				
A_{NGF} [m²]		2.400,00				

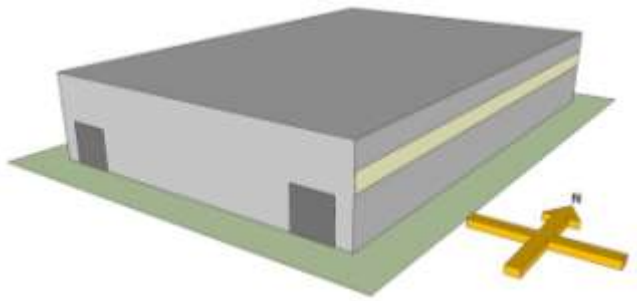


Abbildung 12 Durchschnittshalle

8.4.3 Baulicher Wärmeschutz

Es wird auf die bereits in Kapitel 3.2 definierten Bauteilkennwerte für Alt- und Neubau zurückgegriffen.

Tabelle 22 Bauteilkennwerte „Durchschnittshalle“

Bauteil		Kennwerte					
		Altbau (vgl. Tabelle 1)			Neubau (vgl. Tabelle 2)		
		U [W/m²K]	g	T_{D65}	U [W/m²K]	g	T_{D65}
Boden	ungedämmter Bereich	3,56	-	-	3,56	-	-
	gedämmter Bereich	-	-	-	0,78	-	-
Außenwand		1,22	-	-	0,24	-	-
Dach		0,93	-	-	0,31	-	-
Fenster		3,00	0,76	0,85	1,70	0,59	0,78
Tor		3,80	-	-	3,00	-	-
ΔU_{WB} [W/m²K]		0,10			0,05		

8.4.4 Ermittlung der Verbrauchswerte

Zur Ermittlung der fiktiven Energieverbrauchswerte werden zwei Ansätze verfolgt.

- Energiebedarfsberechnungen nach DIN V 18599
  - Es werden Energiebedarfswerte nach DIN V 18599:2007 berechnet. Hierbei werden die Eingangsgrößen der Berechnung entsprechend den bislang aus diesem Projekt gewonnenen Erkenntnissen angepasst (z.B. Lüftung/Gebäudedichtheit).
- Verbrauchsprognosen durch Anlagenhersteller
  - Einige der innerhalb der Projektgruppe vertretenen Anlagenhersteller erstellen für Ihre Kunden üblicherweise Verbrauchsprognosen für auszurüstende Objekte und sichern die Einhaltung (Nichtüberschreitung) der prognostizierten Verbrauchswerte innerhalb gewisser Grenzen bzw. Bedingungen zu. Die verwendeten Verfahren lehnen sich in der Regel an verknüpfte Heizlast- und Nutzungsstundenberechnung an [3][20]. Zusätzlich fließen herstellerinterne Verfahren und Ansätze ein, welche für gewöhnlich auf langjährigen Erfahrungen in der Anlagenauslegung beruhen.

Die bei der Energiebedarfsberechnung unterstellten Nutzungsparameter orientieren sich an der Nutzung 22.2 nach DIN V 18599-10/-100 [1][2], wobei die folgenden Änderungen vorgenommen werden:

- 2-Schichtbetrieb als Mittel über praktisch auftretende Nutzungs-/Betriebszeiten typischer Hallengebäude
- Nutzungsbedingter Luftwechsel in Anlehnung an Kapitel 11.3
  - Altbau 0,3 h^{-1}
  - Neubau 0,2 h^{-1}
- Gebäudedichtheit in Anlehnung an Kapitel 11.2
  - Altbau n_{50} = 2,5 h^{-1}
  - Neubau n_{50} = 0,6 h^{-1}
- größere Nachtabsenkung als nach DIN V 18599 [1][2] vorgesehen (7 K statt 4 K)

Altbau

Es wird von einer Heizungsanlage, wie folgt, ausgegangen:

- Erzeugung und Verteilung
    - DIN V 18599: Festbrennstoffkessel, außerhalb Zone (Heizhaus); realistische Leitungslängen[23]
    - Verbrauchsprognose: Dezentraler Erzeuger
- Übergabe mittels Warmluftgebläse

Somit lässt sich ein Verbrauch von ca. 240 kWh/m²a für den Zustand Altbau ermitteln. Dieser Verbrauchswert wird dem Baujahr 1980 zugeordnet.

Tabelle 23 Heizenergieverbrauch Durchschnittshalle Altbau

	kWh/m²
Berechnung DIN V 18599	237
Verbrauchsprognose	250
Mittelwert	243

Neubau

Für den Zustand Neubau wird der Bedarfswert als Mittelwert verschiedener Anlagenvarianten berechnet (vgl. Tabelle 24).

Tabelle 24 Heizenergieverbrauch Durchschnittshalle Neubau

		kWh/m²
Berechnung DIN V 18599	indirekte Luftheizung mit Rezirkulation, BW-Kessel	90
	Hellstrahler	69
Verbrauchsprognose	Hellstrahler (Premium-Segment)	46
	Dunkelstrahler (Premium-Segment)	55
Mittelwert		65

Für eine zeitgemäß gedämmte Halle mit moderner Anlagentechnik ergibt sich ein durchschnittlicher Verbrauch von etwa 65 kWh/m²a. Dieser Verbrauchswert wird dem Baujahr 2009 zugeordnet.

Entwicklung

Die zuvor berechneten fiktiven Energieverbrauchswerte stellen Anfangs- und Endwert des statistisch belegten Betrachtungszeitraums dar. Innerhalb dieses Zeitraums wird von einer linearen Entwicklung des spezifischen Verbrauchs ausgegangen; für Gebäude, welche vor 1980 errichtet wurden, wird von einer (Teil-)Modernisierung auf das Energieverbrauchsniveau des Baujahres 1980 ausgegangen. Es ergibt sich eine Verteilung über dem Betrachtungszeitraum gemäß Abbildung 13 [24].

[23] Für Hallenbauten werden mit dem Standardverfahren zur Bestimmung von Rohrleitungslängen nach DIN V 18599 bekanntermaßen deutlich zu hohe Werte berechnet. Die Rohrleitungslängen der „Durchschnittshalle“ werden anhand der Gebäudegeometrie geschätzt.

[24] Die dargestellten nutzflächenspezifischen Verbräuche ergeben sich für das zuvor definierte Gebäude. Dieses ist hinsichtlich aller Parameter als durchschnittlich zu bezeichnen und damit repräsentativer Vertreter eines Querschnitts durch die „Hallenlandschaft“. Für konkrete Hallen können sich in Abhängigkeit von Parametern der Nutzung, Anlagentechnik, Geometrie etc. auch höhere oder niedrigere Verbräuche ergeben; als eine Einflussgröße sei hier die Hallenhöhe genannt – sie kann sich wesentlich auf den Heizenergieverbrauch auswirken.

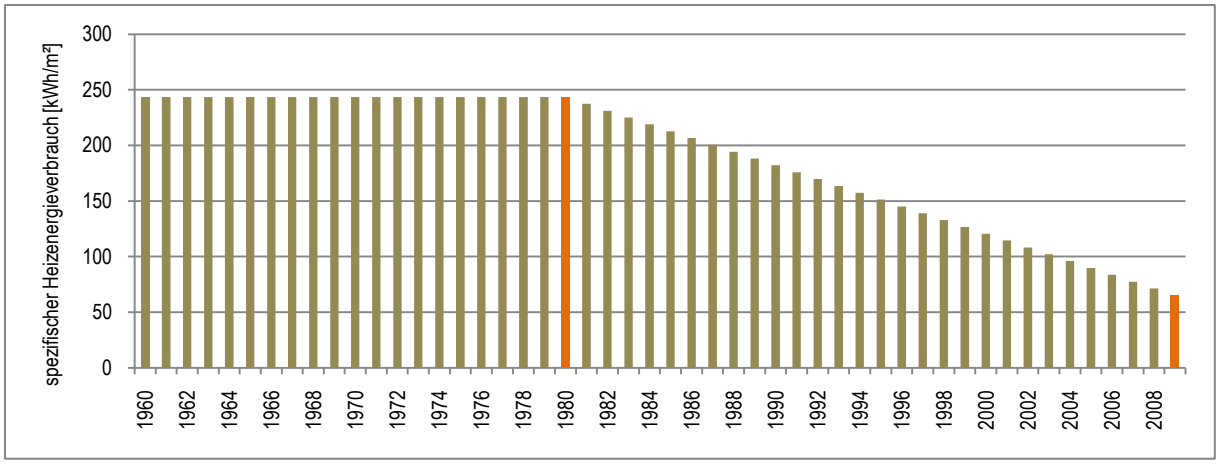


Abbildung 13 Entwicklung des spezifischen Heizenergieverbrauchs, Durchschnittshalle

8.5 Gesamtverbrauch und Einsparpotenzial

8.5.1 Szenario 1

Gemäß 8.3.3 wurden zwischen 1980 und 2009 ca. 230 Mio. m² Hallennutzfläche errichtet. Wird die Verteilung der errichteten Nutzfläche nach Abbildung 9 mit der Entwicklung des spezifischen Heizenergieverbrauchs nach Abbildung 13 überlagert, ergibt sich eine Verteilung des Jahresheizenergieverbrauchs über dem Errichtungsjahr gemäß Abbildung 14.

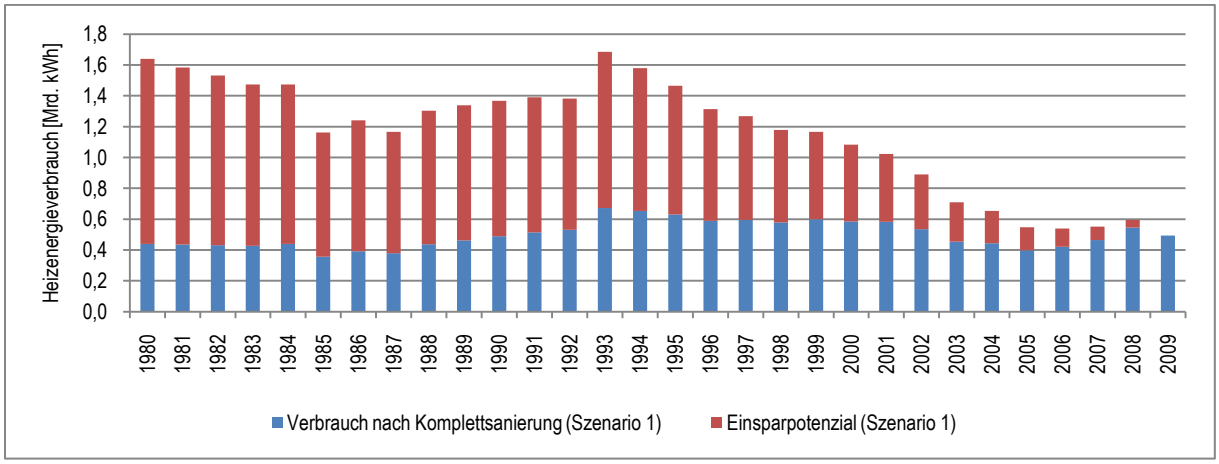


Abbildung 14 Heizenergieverbrauch über Errichtungsjahr, Szenario 1

Hiernach beträgt der in Deutschland auf Hallen entfallende Jahresheizenergieverbrauch ca. 35 Mrd. kWh. Bei kompletter energetischer Ertüchtigung auf aktuelles Neubauniveau ergibt sich ein Einsparpotenzial von etwa 20 Mrd. kWh/a. In erster Näherung kann davon ausgegangen werden, dass sich dieses Einsparpotenzial im Verhältnis 1:1 durch bauliche und anlagenseitige Maßnahmen ergibt.

Die zugrundeliegende Gesamthallennutzfläche wurde unter der Annahme, dass Hallen und Nichthallen gleich groß seien, ermittelt. Mit Blick auf die Größen sehr häufig vorkommender üblicher Hallenbauwerke (z.B. Supermärkte, Bau- und Möbelmärkte) kann angenommen werden, dass mit Szenario 1 eine tendenzielle Unterbewertung der realen Hallennutzfläche stattfindet. In der Folge kann auch von einer Unterbewertung des Gesamtverbrauchs sowie des energetischen Einsparpotenzials ausgegangen werden. Betrachtungen zu Szenario 1 haben daher nur informativen Charakter.

8.5.2 Szenario 2

Gemäß 8.3.4 wurden zwischen 1980 und 2009 ca. 397 Mio. m² Hallennutzfläche errichtet. Wird die Verteilung der errichteten Nutzfläche nach Abbildung 10 mit der Entwicklung des spezifischen Heizenergieverbrauchs nach Abbildung 13 überlagert, ergibt sich eine Verteilung des Jahresheizenergieverbrauchs über dem Errichtungsjahr gemäß Abbildung 15.

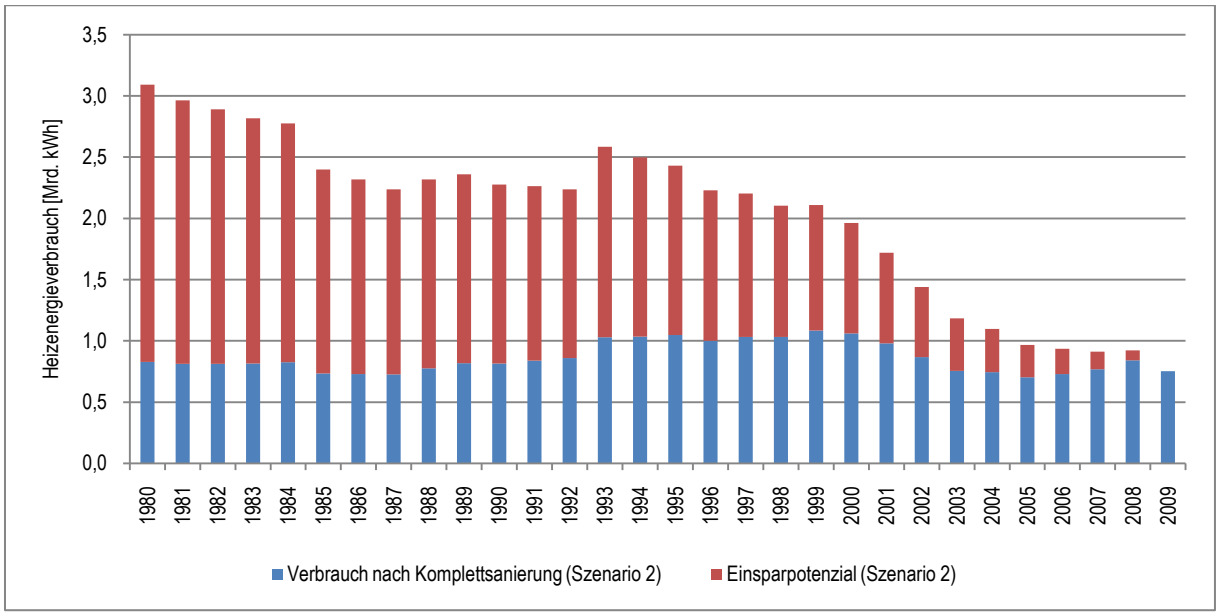


Abbildung 15 Heizenergieverbrauch über Errichtungsjahr, Szenario 1

Hiernach beträgt der in Deutschland auf Hallen entfallende Jahresheizenergieverbrauch ca. 61 Mrd. kWh – dies entspricht 10% des deutschen Gesamt-Jahresendenergieverbauchs Raumwärme und 31% des deutschen Jahresendenergieverbrauchs Raumwärme für Nichtwohngebäude[25].

Bei kompletter energetischer Ertüchtigung auf aktuelles Neubauniveau ergibt sich ein Einsparpotenzial von etwa 35 Mrd. kWh/a. In erster Näherung kann davon ausgegangen werden, dass sich dieses Einsparpotenzial im Verhältnis 1:1 durch bauliche und anlagenseitige Maßnahmen ergibt.

Die Annahmen zur bestehenden beheizten Hallennutzfläche wurden auch für dieses Szenario konservativ getroffen.

[25] Bezugsgröße ist der Jahresendenergiebedarf Raumwärme von ca. 625 Mrd. kWh für das Jahr 2007; auf Wohngebäude (Haushalte) entfallen hiervon etwa 68,5%, auf Nichtwohngebäude etwa 31,5% [19].

8.5.3 Szenario 2 mit erweitertem Betrachtungszeitraum

Eine Überlagerung des flächenmäßigen Hallenbestands nach 8.3.5 mit dem spezifischen Verbrauch gemäß Abbildung 13 ergibt eine Verteilung des Jahresheizenergieverbrauchs über dem Errichtungsjahr gemäß Abbildung 16.

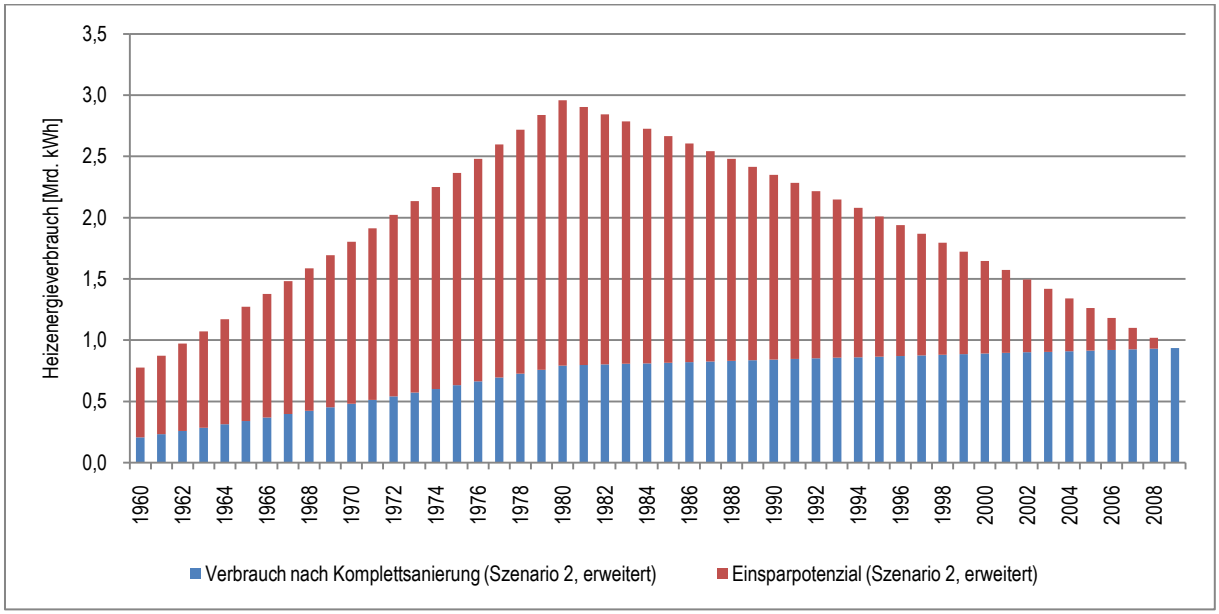


Abbildung 16 Heizenergieverbrauch[26] über Errichtungsjahr, Szenario 2 mit erweitertem Betrachtungszeitraum; Darstellung beispielhaft: 30% der 1960 errichteten Hallen heute noch in Betrieb

Hiernach beträgt der in Deutschland auf Hallen entfallende Jahresheizenergieverbrauch zwischen 87 und 116 Mrd. kWh – dies entspricht 14…19% des deutschen Gesamt-Jahresendenergieverbauchs Raumwärme und 44…59% des deutschen Jahresendenergieverbrauchs Raumwärme für Nichtwohngebäude[27].

Bei kompletter energetischer Ertüchtigung auf aktuelles Neubauniveau ergibt sich ein Einsparpotenzial zwischen 54 und 75 Mrd. kWh/a. In erster Näherung kann davon ausgegangen werden, dass sich dieses Einsparpotenzial im Verhältnis 1:1 durch bauliche und anlagenseitige Maßnahmen ergibt.

8.5.4 Erfassung energetischer Modernisierungen im Bestand

In 8.5.1 und 8.5.2 wurde der Gebäudebestand energetisch in Abhängigkeit vom jeweiligen Errichtungsjahr bewertet – eventuell durchgeführte Modernisierungen fanden keine Berücksichtigung.

Solche Maßnahmen würden sowohl den Gesamtverbrauch als auch das Einsparpotenzial verringern. Eine Betrachtung ohne Einbeziehung energetischer Modernisierungen würde demnach zu einer Überschätzung des Einsparpotenzials neigen. Jedoch ist aus Gesprächen mit Projektbeteiligten aus den Bereichen Hallenbau und Anlagentechnik bekannt, dass Heizkosten kommerziell betriebener Hallen – besonders im industriellen / produzierenden

[26] Die dargestellte Verteilung des Verbrauchs über dem Gebäudeerrichtungsjahr zeigt ein maximales Einsparpotenzial für Gebäude des Errichtungsjahres 1980. Dies ist zum Teil auf die synthetisch erzeugten Daten bzw. das zugrundeliegende Modell zurückzuführen. Dieses zielt auf die Ermittlung eines Gesamteinsparpotenzials ab – die konkrete Verteilung über dem Gebäudeerrichtungsjahr ist jedoch nur bedingt belastbar. Zudem wird nur eines von mehreren möglichen Szenarios dargestellt. Es sollte daher nicht geschlussfolgert werden, dass der wesentliche Anteil des Einsparpotenzials zwangsläufig auf Gebäude der Baujahre nahe 1980 entfällt.

[27] Bezugsgröße ist der Jahresendenergiebedarf Raumwärme von ca. 625 Mrd. kWh für das Jahr 2007; auf Wohngebäude (Haushalte) entfallen hiervon etwa 68,5%, auf Nichtwohngebäude etwa 31,5% [19].

Bereich – zumeist eine stark untergeordnete Rolle spielen. Getätigte Investitionen müssen sich schnell amortisieren und zielen in der Regel auf vordergründige Produktivitätssteigerung, durch neue Maschinen oder technische Ausstattung, ab. Investitionen in Bausubstanz oder Anlagentechnik werden hingegen auf ein Minimum beschränkt. Daher scheint ein Betrieb ohne wesentliche energetische Ertüchtigungsmaßnahmen über einen Zeitraum von 20…30 Jahren nicht abwegig.

Des Weiteren wurden die Annahmen zur beheizten Nutzfläche tendenziell konservativ getroffen (vgl. 8.3). Auch dies wirkt einer Überbewertung von Einspareffekten entgegen.

In der Verbrauchsschätzung zum Szenario mit erweitertem Betrachtungszeitraum 1960-2009 (8.5.3) wurde für Gebäude der Baujahre 1960-1979 von einer energetischen Ertüchtigung auf das Niveau „1980“ ausgegangen – hiermit wird unterstellt, dass Gebäude, welche nunmehr länger als 30 Jahre genutzt werden bzw. vor mehr als 30 Jahren gebaut wurden, in der Vergangenheit zumindest teilsaniert wurden.

8.5.5 Bestandsmaßnahmen ↔ verschärftes Anforderungsniveau Neubau

Nachfolgend werden Maßnahmen am Gebäudebestand und eine zukünftige Verschärfung des Anforderungsniveaus für Neubauten hinsichtlich der erzielbaren Energieeinsparung ausgewertet und miteinander verglichen. Die möglichen Einsparungen beider Konzepte werden getrennt voneinander berechnet und anschließend gegenübergestellt.

Die Berechnung des Einsparpotenzials für Bestandsmaßnahmen erfolgt gemäß 8.5.2 und 8.5.3. Vereinfachend wird für diese Betrachtung von einem konstanten jährlichen Bauaufkommen ausgegangen.

Die Einsparung, welche sich durch ein zukünftig verschärftes Anforderungsniveau für Neubauten ergeben kann, wird ähnlich ermittelt. Es wird – betragsmäßig – derselbe Betrachtungszeitraum wie bei der Bestandsbetrachtung herangezogen und „in die Zukunft gespiegelt“. Die Einsparung ergibt sich, analog der Betrachtung zum Potenzial von Bestandsmaßnahmen, aus der Summe der jährlichen Differenzen zwischen den Verbräuchen für das Neubauniveau 2009 und das Neubauniveau des jeweiligen Errichtungsjahres.

Es wird von folgenden Randbedingungen ausgegangen:

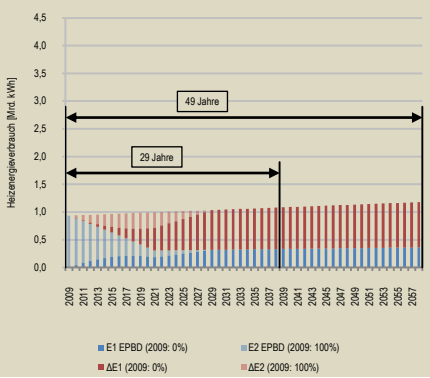
- Betrachtungszeiträume nach 8.2.3
    - statistische belegter Betrachtungszeitraum (29 Jahre)
        - 1980-2009
        - 2009-2038
    - erweiterter Betrachtungszeitraum (49 Jahre)
        - 1960-2009
        - 2009-2058
- Neuerrichtungen (ohne Abgänge)
    - statistisch belegter Betrachtungszeitraum (29 Jahre)
        - konstant 7.200 Hallen pro Jahr

- erweiterter Betrachtungszeitraum (49 Jahre)
  - innerhalb der jeweils letzten 29 Jahre des Betrachtungszeitraums konstant 7.200 Hallen pro Jahr
  - zwischen Jahr 1 und Jahr 29 erfolgt eine lineare Näherung analog 8.2.3 (vgl. Abbildung 7)

- mittlere Hallengröße nach 8.3.4 (vgl. auch Abbildung 8)
  - 2009: 2.000 m²
  - vor und nach 2009: lineare Näherung mit Anstieg 10,6 m²/a
- spezifischer Verbrauch (vgl. Abbildung 13)
  - 1960-1980: gemäß 8.5.4 konstant auf Niveau „1980“ (243 kWh/m²a)
  - 1980-2009: lineare Näherung gemäß 8.4 (1980: 243 kWh/m²a; 2009: 65 kWh/m²a)
  - 2009-2021: lineare Näherung, 65 bis 20 kWh/m²a (Umsetzung EPBD-Richtline [24] bis ca. 2020)[28]
  - ab 2021: Verharren bei 20 kWh/m²a

Die Ergebnisse sind überblicksmäßig in Tabelle 25 dargestellt.

Tabelle 25 Vergleich der Einsparpotenziale für zwei Ansätze zur Senkung des Heizenergieverbrauchs

Maßnahme		Energetische Ertüchtigung des derzeitigen Hallenbestands auf zeitgemäßes Neubauniveau	Zukünftig weitere Verschärfung des Anforderungsniveaus (Umsetzung EPBD-Richtlinie bis ca. 2020)
Verteilung des Jahresheizenergieverbrauchs über dem Gebäudeerrichtungsjahr rot: Einsparpotenzial vor Maßnahme blau: bleibender Verbrauch nach Maßnahme			
Einsparpotenzial bei einem Betrachtungs-zeitraum von…	29 Jahren	35 Mrd. kWh/a	17 Mrd. kWh/a
	49 Jahren	54…75 Mrd. kWh/a	29…32 Mrd. kWh/a

Für **Maßnahmen zur energetischen Ertüchtigung des derzeitigen Gebäudebestands** auf Neubauniveau 2009 ergibt sich mit den unterstellten Randbedingungen für einen Betrachtungszeitraum von 29 Jahren ein Energiesparpotenzial von ca. 35 Mrd. kWh/a.

Mit einer **zukünftigen Verschärfung des Anforderungsniveaus** gemäß den unterstellten Randbedingungen könnten im Jahr 2038 17 Mrd. kWh/a gegenüber einem Verharren auf Neubauniveau 2009 eingespart werden. Die Randbedingungen wurden hierbei optimistisch

[28] Es wird in grober Näherung eine Umsetzung der EPBD-Richtlinie 19[24] abgebildet, welche fordert, dass alle ab 2019/2021 errichteten Gebäude *Niedrigstenergiehäuser* sind. Für den Begriff des *Niedrigstenergiehauses* existiert noch keine konkrete Definition. Somit kann kein beispielhafter Energiebedarfswert anhand eines Modellgebäudes berechnet werden. Es wird ein mittlerer spezifischer Heizenergieverbrauch von 20 kWh/m²a für Hallen in *Niedrigstenergiehaus*-Bauweise unterstellt – mit Hinblick auf heute übliche Baustoffe, Bauweisen sowie Heizungsanlagen würde dieser Wert ein extrem ambitioniertes Ziel darstellen.

angesetzt. So ist beispielsweise fraglich, ob ab 2021 ausschließlich Niedrigstenergiehäuser gebaut werden – eine Differenzierung hinsichtlich Nutzung, Gebäudetyp etc., und folglich die Schaffung von Ausnahmen sind durchaus denkbar. Auch kann angenommen werden, dass der eingesetzte spezifische Heizenergiebedarfswert von 20 kWh/m²a eher unter einem zukünftigen Kennwert einer Durchschnittshalle in *Niedrigstenergiehaus*-Bauweise liegt, als darüber. Die Einsparung durch weitere Verschärfungen des Anforderungsniveaus Neubau wird damit tendenziell überschätzt.

Sowohl für den statistisch belegten als auch für den erweiterten Betrachtungszeitraum fällt das Einsparpotenzial durch Bestandsmaßnahmen etwa doppelt so hoch aus wie das Einsparpotenzial durch weitere Verschärfung des aktuellen Anforderungsniveaus. Mit der Näherung, dass sich das Einsparpotenzial durch Bestandsmaßnahmen etwa 1:1 durch anlagentechnische und bauseitige Maßnahmen ergibt, kann ein weiterer Schluss gezogen werden: Allein durch eine rein anlagenseitige Sanierung des aktuellen Hallenbestands auf zeitgemäßes Niveau lässt sich etwa so viel Energie einsparen, wie durch eine stetige Verbesserung von Anlagentechnik und Gebäudehülle auf *Niedrigstenergiehaus*-Niveau bis zum Jahr 2021.

8.6 Zusammenfassung und Fazit

Die Bestimmung des Gesamtheizenergieverbrauchs für Hallen gestaltet sich aufgrund der bestehenden Datenlage äußerst schwierig. Dies beginnt damit, dass es keinen klaren Hallenbegriff gibt und Aufzeichnungen bzw. statistische Erhebungen zum Gebäudebestand folglich auch keine exakte Aussage zum Hallenaufkommen zulassen. Weiterhin müssen vielfach Annahmen getroffen werden, da die in den Daten enthaltenen Informationen – wie z.B. Gebäudeanzahlen, Nutzflächen, Angaben zur Beheizung – nicht ausreichend verknüpft sind. Angaben zu realen Verbräuchen liegen, wenn überhaupt, nur für einzelne verhältnismäßig neue Objekte vor (vgl. 7.3). Angesichts dieser Schwierigkeiten, ergeben sich für die angestrebte Betrachtung zwangsläufig Unschärfen. Es kann kein exaktes Ergebnis ermittelt werden; stattdessen wird ein ungefährer Bereich abgesteckt, welcher zumindest eine grobe Orientierung erlaubt.

Unter sehr konservativen Annahmen hinsichtlich des Alters des Hallenbestands sowie der beheizten Hallennutzfläche lässt sich ein Gesamtverbrauch von 61 Mrd. kWh/a schätzen. Das Einsparpotenzial bei vollständiger energetischer Ertüchtigung liegt bei 57% (35 Mio. kWh/a). Näherungsweise entfällt hierbei auf bauliche und anlagenseitige Maßnahmen derselbe Anteil.

Für einen erweiterten Betrachtungszeitraum 1960-2009, welcher über den durch statistische Daten abgedeckten Zeitraum hinaus geht, ergibt sich ein Gesamtverbrauch in einer Größenordnung von 100 Mio. kWh/a (vgl. 8.5.3, Mittelwert). Das Einsparpotenzial beträgt ca. 64%.

Der aufgespannte Ergebnisbereich des Gesamtenergieverbrauchs verdeutlicht die Unschärfen, welche in Kauf genommen werden müssen. Trotz dieser Unschärfen zeigt sich jedoch deutlich, dass durch eine Modernisierung des Hallenbestands eine wesentliche Verringerung des Heizenergieverbrauchs bewirkt werden kann. Um dem Leser ein besseres Gefühl für die berechneten Werte zu geben, soll eine Größenordnung angedeutet werden:

Eine komplette energetische Ertüchtigung des Hallenbestands würde eine Verringerung des jährlichen Gesamtheizenergieverbrauchs in Deutschland zwischen 6% und 12% bewirken[29].

Ein modellhafter Vergleich des Einsparpotenzials, welches durch mögliche Maßnahmen am aktuellen Gebäudebestand gegeben ist, mit der Einsparung, welche sich zukünftig durch weitere Verschärfung des Anforderungsniveaus an Neubauten ergeben kann, zeigt, dass im Bestand wesentlich mehr „zu holen" ist. Das Einsparpotenzial von Maßnahmen am Bestand ist etwa doppelt so hoch wie die durch ein zukünftig verschärftes Anforderungsniveau an Neubauten erzielbare Einsparung. Gleichzeitig kann davon ausgegangen werden, dass eine energetische Ertüchtigung des Bestands in Richtung eines zeitgemäßen Neubauniveaus mit geringeren technischen und finanziellen Hürden verbunden ist, als die zukünftig angestrebte *Niedrigstenergiehaus*-Bauweise. Zudem fällt für das Anregen von Maßnahmen im Bereich des Hallenbestands eine Schwierigkeit weg, welche im Wohn- und Bürobereich generell besteht – in diesen Bereichen sind die Gebäudenutzer vielfach nicht Eigentümer der genutzten Gebäude. Bei Hallengebäuden hingegen kann für den überwiegenden Anteil des Bestands (Handel, Industrie, Lager/Logistik) davon ausgegangen werden, dass sich die entsprechenden Gebäude auch im Besitz der Nutzer befinden bzw. Nutzer und Besitzer wirtschaftlich eng verknüpft sind. Dies dürfte es – im Vergleich zum Wohn- und Bürobereich – deutlich vereinfachen, Maßnahmen am Bestand anzuregen.

Mit diesem Fazit soll nicht suggeriert werden, dass zukünftige Verschärfungen des Anforderungsniveaus unnötig seien – sie sind zweifelsohne notwendig. Jedoch sollte das Maß der Verschärfung unter wirtschaftlichen wie technischen Gesichtspunkten sinnvoll festgelegt werden. Des Weiteren darf nicht außer Acht gelassen werden, dass die energetische Ertüchtigung des Bestands ein wesentlich größeres Einsparpotenzial birgt. Bestandsmaßnahmen sind hierbei aus Sicht der Wirtschaftlichkeit und der technischen Machbarkeit attraktiver. Schon eine rein anlagenseitige Sanierung des aktuellen Bestands birgt etwa dasselbe Potenzial wie eine stetige Absenkung des spezifischen Heizenergieverbrauchs auf *Niedrigstenergiehaus*-Niveau bis zum Jahr 2021.

[29] Bezugsgröße ist der Jahresendenergiebedarf Raumwärme von ca. 625 Mrd. kWh für das Jahr 2007; auf Wohngebäude (Haushalte) entfallen hiervon etwa 68,5%, auf Nichtwohngebäude etwa 31,5% [19].

9 Wirksame Wärmespeicherfähigkeit

9.1 Allgemeines

Die wirksame Wärmespeicherfähigkeit eines Gebäudes kann gemäß DIN V 18599:2007-02 [1] auf zwei Arten ermittelt werden. Zum einen ist die Berechnung nach DIN EN ISO 13786:1999-12 [9] zugelassen; zum anderen kann vereinfachend auf grundflächenspezifische Pauschalwerte der wirksamen Speicherfähigkeit zurückgegriffen werden. Beide Verfahren liefern eine isolierte Bewertung des Baukörpers.

Vereinfacht dürfen folgende auf die Bezugsfläche A_B bezogene Pauschalwerte nach den Gleichungen (128) bis (130) verwendet werden. Dies ist im Bericht gesondert anzugeben.

Für leichte Gebäudezonen:

$$C_{wirk} = 50 \text{ Wh/(m}^2 \cdot \text{K)} \cdot A_B \quad (128)$$

Für mittelschwere Gebäudezonen:

$$C_{wirk} = 90 \text{ Wh/(m}^2 \cdot \text{K)} \cdot A_B \quad (129)$$

Für schwere Gebäudezonen:

$$C_{wirk} = 130 \text{ Wh/(m}^2 \cdot \text{K)} \cdot A_B \quad (130)$$

Abbildung 17 [DIN V 18599-2, 6.7.1, Ausschnitt]

Berechnungsprogramme mit dem IBP18599-Rechenkern bieten neben der Möglichkeit, mit den oben angesprochenen Pauschalwerten zu rechnen, in der Regel auch die Option einer genauen Eingabe der wirksamen Speicherfähigkeit. Eine Möglichkeit um diese anhand weniger Angaben programmintern zu ermitteln, besteht im Allgemeinen jedoch nicht. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass in der Praxis fast ausschließlich mit den grundflächenspezifischen Speicherfähigkeiten nach DIN V 18599 gerechnet wird.

9.2 Besonderheit Hallengebäude

Hallenbauten sind im Allgemeinen, im Vergleich zu anderen Gebäuden, sehr leichte Bauwerke. Jedoch besteht die Möglichkeit, dass große Massen, in Form von technischen Einbauten oder Lagergut, die tatsächliche Wärmespeicherfähigkeit wesentlich erhöhen[30]. Solche speicherwirksamen Massen können allerdings nicht pauschal dem Gebäude zugeschrieben werden, da sie ausschließlich von der Nutzung des Gebäudes und nicht vom Baukörper selbst abhängen. Hinsichtlich einer möglichst exakten Bestimmung der wirksamen Wärmespeicherfähigkeit, würde es sich für Hallenbauten daher anbieten, Gebäude und Nutzung getrennt zu bewerten.

9.3 Außenbauteilen im Hallenbau

Die Vielfalt der im Hallenbau üblicherweise verwendeten Baustoffe, Bauteile und Bauweisen kann durchaus als überschaubar bezeichnet werden. Für eine Bestimmung der speicherwirksamen Bauwerksmasse wäre eine grobe Einstufung von Bauteilen in Massiv- und Leichtbau ausreichend.

In Tabelle 26 wurden beispielhaft die flächenspezifischen wirksamen Speicherfähigkeiten für einige im Hallenbau übliche Aufbauten ermittelt.

[30] Im Beiblatt 100:2009-10 19[2] zur DIN V 18599 19[1] wurde versucht, auf diesen Umstand einzugehen, indem ein weiterer Pauschalwert der grundflächenspezifischen Speicherfähigkeit eingeführt wurde, welcher auf Hallenbauten unter *Berücksichtigung der Einrichtungsgegenstände* angewendet werden kann.

Tabelle 26 Wirksame Bauteilspeicherfähigkeiten hallentypischer Außenbauteile, ermittelt nach DIN EN ISO 13786, Anhang A – Beispiel

Bauteil	Speicherwirksame Schicht(en)	Speicherwirksame Dicke d [mm]	c [Wh/kgK]	ρ [kg/m³]	X'_m [Wh/m²K]
Bodenplatte	Estrich	50	0,2778	2100	21,1
	Stahlbeton	50	0,2778	2300	
Dach 1	PVC	5	0,2778	1200	1,7
Dach 2	Gipskarton	12,5	0,2667	900	3,0
Außenwand massiv 1	Stahlbeton	50	0,2778	2300	21,6
Außenwand massiv 2	Putzmörtel	10	0,2778	1800	23,9
	Mauerwerk	90	0,2861	1400	
Außenwand leicht	Gipskarton	12,5	0,2667	900	3,0
…	…	…	…	…	…

9.4 Nutzungsabhängige speicherwirksame Massen

In Hallen trägt die von der Nutzung abhängige Ausstattung wesentlich zur wirksamen Speicherfähigkeit bei. Für die untersuchten Modellgebäude wurden in 6.4.2 Speicherelemente definiert, welche übliche interne speicherwirksame Massen – Lagergut, Einbauten, Maschinen etc. – abbilden. Tabelle 27 enthält die hieraus berechneten grundflächenspezifischen Wärmekapazitäten.

Tabelle 27 Grundflächenspezifische Wärmekapazitäten des Interieurs

Gebäude	grundflächenspezifische Wärmespeicherkapazität
	Wh/(m²K)
Werkstatt	35
Fertigung	31
Logistik	43
Turnhalle	-
Baumarkt + Gartenmarkt	29
Lebensmittelmarkt	5

Für ein vereinfachtes Verfahren zur Anwendung in DIN V 18599 wäre die Formulierung grundflächenspezifischer Vorgabewerte der nutzungsgebundenen Wärmekapazität ähnlich Tabelle 27 denkbar.

9.5 Berechnungsansatz: Vereinfachte Berechnung in Anlehnung an DIN EN ISO 13768, Anhang A

Ein Kompromiss zwischen der ausführlichen Berechnung nach DIN EN ISO 13768 [9] und der stark vereinfachten, für Hallenbaukörper nur bedingt geeigneten Betrachtung nach DIN V 18599 [1][2] ist eine Berechnung der wirksamen Wärmespeicherfähigkeit von Gebäude und Interieur unter Verwendung flächenspezifischer Bauteilspeicherfähigkeiten, welche im Rahmen der DIN V 18599 vorgegeben werden könnten.

Das Gesamtwärmespeichervermögen wäre hierbei als Summe der auf Bauhülle und Interieur entfallenden Anteile gemäß Gleichung (1) bis (3) in Verbindung mit den Tabellen 28 und 29 zu berechnen.

$$C_{wirk} = C_{Gebäude} + C_{Interieur} \quad (1)$$

$$C_{Gebäude} = \sum_i A_i * X'_{m,i} = A_{Boden} * X'_{m,Boden} + A_{Dach} * X'_{m,Dach} + A_{Wand} * X'_{m,Wand} + \ ... \quad (2)$$

$$C_{wirk,Interieur} = A_{NGF} * X'_{m,Nutz} \quad (3)$$

Tabelle 28 Flächenspezifische Speicherfähigkeiten des Bauwerks für eine vereinfachte Berechnung von C_{wirk} im Rahmender DIN V 18599 – Darstellung nur beispielhaft

Bauteil		X'_m [Wh/m²K]
Bodenplatte (ungedämmt oder Dämmung mindestens 100mm unter OK FF)		20
Außenwand	Massivbau	20
	Leichtbau	3,0
Dach (leicht)		2,0
…		…

Tabelle 29 Flächenspezifische Speicherfähigkeiten des Interieurs für eine vereinfachte Berechnung von C_{wirk} im Rahmen der DIN V 18599 – Darstellung nur beispielhaft

Nutzung	grundflächenspezifische Wärmespeicherkapazität
	Wh/(m²K)
Nutzung A	5
Nutzung B	30
Nutzung C	50
…	…

9.6 Vorgriff und Fazit

In den vorangegangenen Betrachtungen des Kapitels 9 wird ein Berechnungsansatz zur Bestimmung der wirksamen Wärmespeicherfähigkeit von Gebäuden hergeleitet. Dieser Berechnungsansatz erlaubt eine genauere Bestimmung der Wärmespeicherfähigkeit von Gebäuden als die durch DIN V 18599-2 genannten Werte der flächenbezogenen Wärmespeicherfähigkeit. Zudem ermöglicht der vorgestellte Berechnungsansatz eine Einbeziehung innerer speicherwirksamer Massen, welche der Gebäudenutzung zuzuschreiben sind.

Unter Einbeziehung innerer speicherwirksamer Massen ist bei Hallen üblicher Bauweisen und Nutzungen von spezifischen Speicherfähigkeiten C_{wirk}/A_{NGF} im Bereich 20…100 Wh/m²K auszugehen – in Einzelfällen können sich jedoch auch Werte außerhalb dieses Bereichs ergeben.

Teilweise in zeitlicher Überschneidung mit der Erstellung dieses Kapitels durchgeführte Untersuchungen und Berechnungen zeigen, dass der Einfluss der Wärmespeicherfähigkeit – innerhalb eines realistischen Variationsbereichs – sowohl auf den Energieverbrauch als auch auf den Energiebedarf verhältnismäßig gering ist (vgl. 6.3, 6.4).

Angesichts der Unschärfe des aktuell verwendeten Verfahrens kann eine Überarbeitung der Norm in diesem Punkt in Betracht durchaus gezogen werden. Durch den verhältnismäßig geringen Einfluss der untersuchten Größe ist dem vorliegenden Teilproblem jedoch untergeordnete Bedeutung beizumessen.

Auf tiefergehende Untersuchungen zu diesem Thema im Rahmen der vorliegenden Arbeit und entsprechende Überarbeitungsvorschläge für die Norm wird verzichtet. Bis zu einer

möglichen Überarbeitung im Rahmen eines anderen Projekts scheint die Verwendung der Vorgabewerte nach DIN V 18599-2 (vgl. Abbildung 17) trotz der hierbei in Kauf genommenen Ungenauigkeit zweckmäßig.

10 Bilanzinnentemperatur

10.1 Vorbemerkung

Die Bilanzinnentemperatur ist die bestimmende Größe für die Ermittlung der Transmissions- und Lüftungswärmeverluste. Zur Überprüfung der Normansätze werden Simulationsergebnisse den Ergebnissen nach DIN V 18599-2 [1][2] gegenübergestellt. Die Ermittlung der Bilanzinnentemperatur basiert auf den Sollwerten der Raum- und den Außentemperaturen. Sowohl die Solarstrahlung als auch die internen Wärmelasten bleiben hierbei unberücksichtigt.

Innerhalb der Projektgruppe wurde ein Ansatz zur Ermittlung der Bilanzinnentemperatur – im Weiteren mit *Genzel und Weber* gekennzeichnet – vorgeschlagen, welcher nachfolgend untersucht werden soll.

Die zeitliche Abhängigkeit der Innentemperatur eines Gebäudes bei reduziertem Heizbetrieb wird exakt durch Gleichung (4) bzw. (5) beschrieben.

$$\Delta\vartheta_i = \left(\vartheta_{i,h,soll} - \vartheta_e\right) * \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \tag{4}$$

$$\vartheta_{NA} = \vartheta_e + \left(\vartheta_{i,h,soll} - \vartheta_e\right) * e^{-\frac{t^*}{\tau}} \tag{5}$$

10.2 Nachtabsenkung

Fall A: $t^* \geq t_{NA}$ – die Absenktemperatur wird nicht erreicht

Die Bilanzinnentemperatur ergibt sich in diesem Fall als zeitlich gemittelte Innentemperatur während der Nutzungs- sowie der Nachtabsenkphase nach Gleichung (6).

$$\vartheta_{i,h} = \vartheta_{i,h,soll} - \frac{t_{NA}}{t_n - t_{NA}} * \left(\vartheta_{i,h,soll} - \vartheta_e\right) * K^* \tag{6}$$

$$K^* = 1 - \left(1 - e^{-\frac{t_{NA}}{\tau}}\right) * \frac{\tau}{t_{NA}} \tag{7}$$

Fall B: $t^* \leq t_{NA}$ – die Absenktemperatur wird erreicht

Die Bilanzinnentemperatur ergibt sich in diesem Fall als zeitlich gemittelte Innentemperatur über die Zustände Nutzungsphase, Nachtabsenkphase bei abgeschalteter Heizung und Nachheizbetrieb nach Gleichung (8).

$$\vartheta_{i,h} = \vartheta_{i,h,soll} - \frac{t_{NA}}{t_n - t_{NA}} * \left(\vartheta_{i,h,soll} - \vartheta_e\right) * K^{**} \tag{8}$$

$$K^{**} = \frac{\vartheta_{i,h,soll} - \vartheta_{NA}}{\vartheta_{i,h,soll} - \vartheta_e} + \frac{\vartheta_{NA} - \vartheta_e}{\vartheta_{i,h,soll} - \vartheta_e} * \frac{t^*}{t_{NA}} - \left(1 - e^{-\frac{t^*}{\tau}}\right) * \frac{\tau}{t_{NA}} \tag{9}$$

10.3 Wochenend- und Urlaubsabsenkung

Für den Fall Wochenend- bzw. Urlaubsabsenkung wird von einer vorgegebenen Absenktemperatur θ_{WE} ausgegangen, die sich im Allgemeinen von θ_{NA} unterscheiden kann.

Des Weiteren wird die am Ende des letzten Tages vor dem Wochenende/Urlaub herrschende Temperatur θ_{LT} benötigt.

Fall A*: $t^*_{WE} \geq t_{WE}$ – die Heizungsanlage bleibt über die ganze Periode abgeschaltet

Den Ausdruck für die Bilanzinnentemperatur erhält man aus Gleichung (6), wenn man berücksichtigt, dass $t_n = 0$ gilt.

$$\vartheta_{i,h} = \vartheta_{LT} - (\vartheta_{LT} - \vartheta_e) * K^*_{WE} \tag{10}$$

$$K^*_{WE} = 1 - \left(1 - e^{-\frac{t_{WE}}{\tau}}\right) * \frac{\tau}{t_{WE}} \tag{11}$$

Fall B*: $t^*_{WE} \leq t_{WE}$ – die Heizungsanlage bleibt in der Zeitspane 0 bis t^*_{WE} abgeschaltet; danach wird die Innentemperatur auf dem Niveau θ_{WE} gehalten

Den Ausdruck für die Bilanzinnentemperatur erhält man aus Gleichung (8), wenn man berücksichtigt, dass $t_n = 0$ gilt.

$$\vartheta_{i,h} = \vartheta_{LT} - (\vartheta_{LT} - \vartheta_e) * K^{**}_{WE} \tag{12}$$

$$K^*_{WE} = \frac{\vartheta_{LT} - \vartheta_{WE}}{\vartheta_{LT} - \vartheta_e} + \frac{\vartheta_{WE} - \vartheta_e}{\vartheta_{LT} - \vartheta_e} * \frac{t^*_{WE}}{t_{WE}} - \left(1 - e^{-\frac{t^*_{WE}}{\tau}}\right) * \frac{\tau}{t_{we}} \tag{13}$$

10.4 Vergleich der Berechnungsergebnisse: Simulation Monatsbilanzverfahren

Die Ergebnisse dieser Betrachtung sind nachfolgend dargestellt.

Abbildung 18 vergleicht Ergebnisse nach derzeitigem Normstand DIN V 18599 mit den Simulationsergebnissen für identische Randbedingungen; d.h. die Bilanzinnentemperatur wurde aus der Simulation bestimmt und als Monatsmittelwert in die Berechnung nach DIN V 18599 eingesetzt.

Die erkennbaren Abweichungen zwischen den Ergebnissen beider Verfahren ergeben sich somit allein durch die unterschiedlichen zeitlichen Auflösungen. Während nach DIN V 18599 in Monatsschritten, und dementsprechend mit monatsmittleren Werten, gerechnet wird, beträgt der Zeitschritt für die thermischen Simulationen 1/100 h.

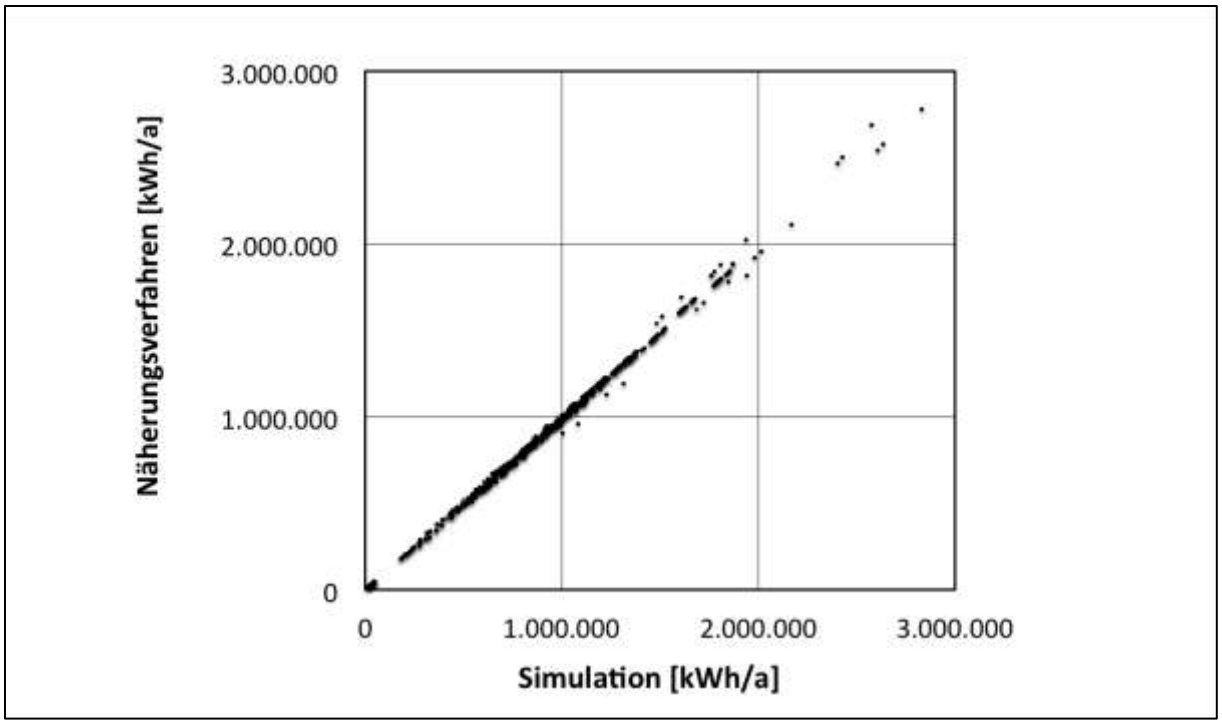


Abbildung 18 **Vergleich der Jahresnutzwärmebedarfswerte gemäß DINV 18599 und thermischer Simulation. Die Bilanzinnentemperaturen werden durch Mittelwertbildung der Raumlufttemperaturen bestimmt.**

Abbildung 19 zeigt den Vergleich zwischen Simulationsrechnungen und Berechnungsansatz gemäß DIN V 18599. Die Abweichungen zwischen Simulation und Monatsbilanzverfahren fallen im Vergleich zur bloßen Abstraktion des Monatsbilanzverfahrens (vgl. Abbildung 18) geringfügig höher aus. Der Fehler ist jedoch als gering einzustufen.

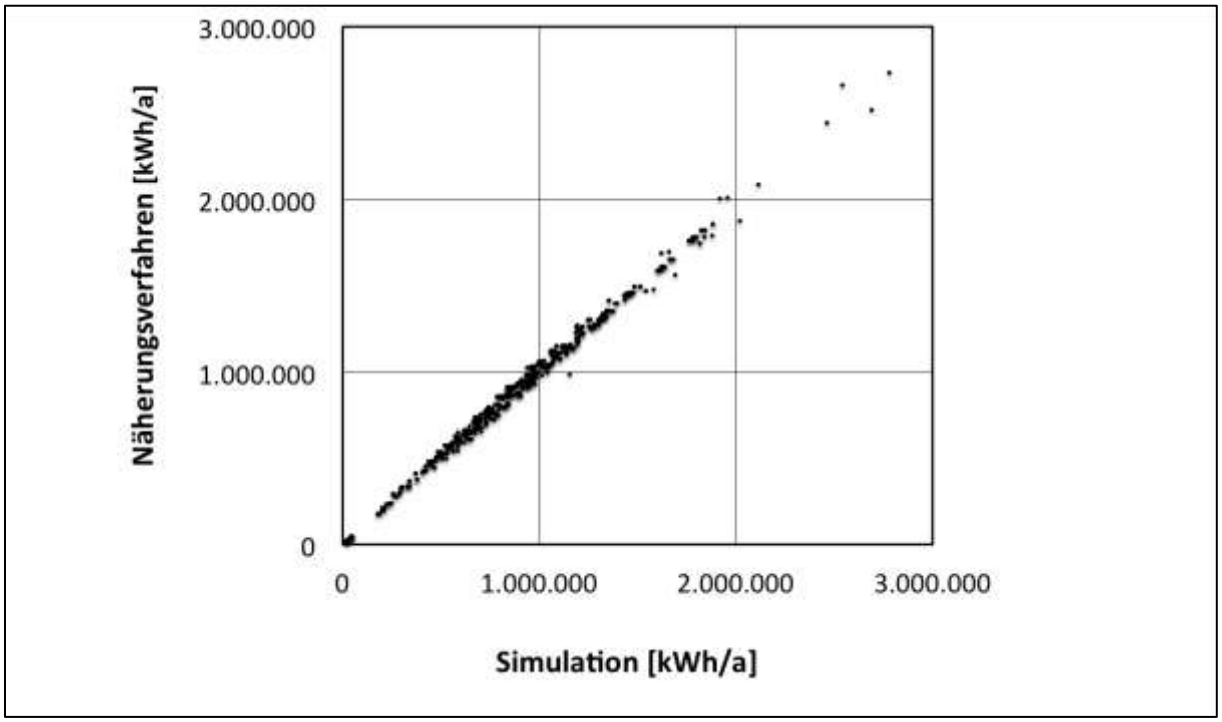


Abbildung 19 **Vergleich der Jahresnutzwärmebedarfswerte gemäß DINV 18599 und thermischer Simulation. Die Bilanzinnentemperaturen werden gemäß DINV 18599 für Nachtabschaltung bestimmt.**

Wird der eingangs beschriebene Berechnungsansatz nach *Genzel und Weber* im Rahmen des Monatsbilanzverfahrens verwendet, ergeben sich Abweichungen gemäß Abbildung 20. Mit dem Ansatz nach *Genzel und Weber* ergeben sich geringere Abweichungen als mit dem Ansatz nach DIN V 18599.

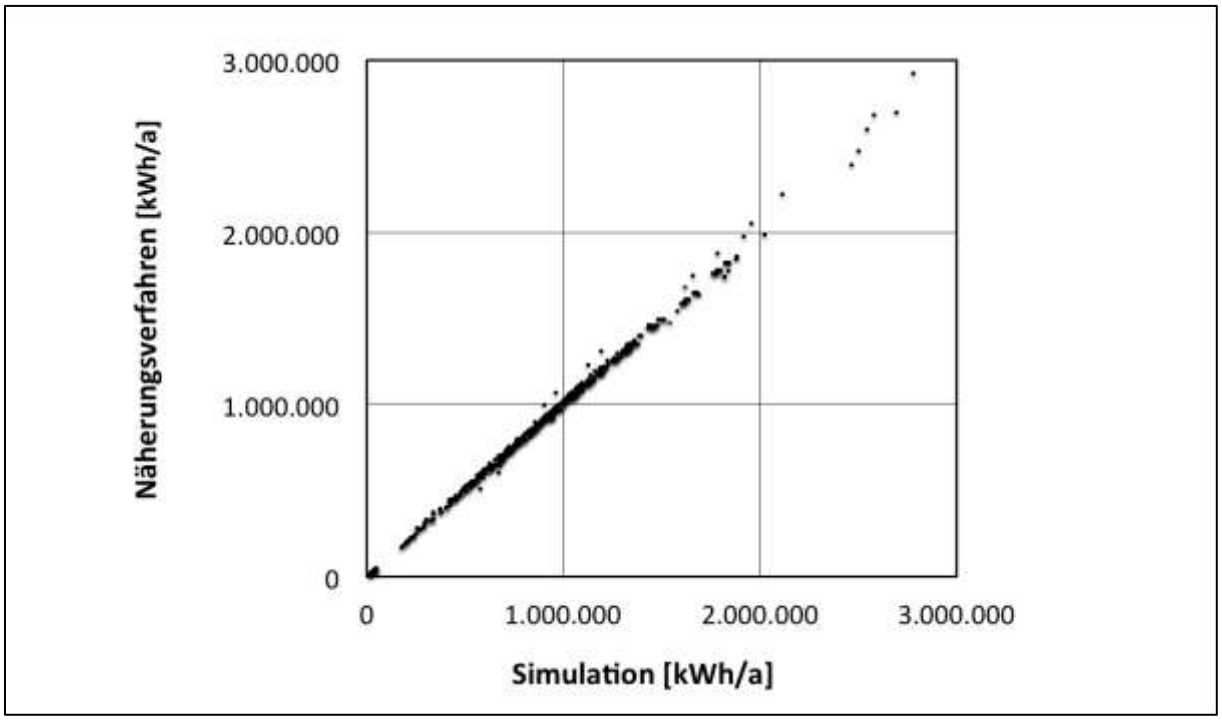


Abbildung 20 **Vergleich der Jahresnutzwärmebedarfswerte gemäß DINV 18599 und thermischer Simulation. Die Bilanzinnentemperaturen werden nach *Genzel und Weber* bestimmt.**

Kennzahlen zur Genauigkeit der untersuchten Berechnungsansätze für die Bilanzinnentemperatur sind in Tabelle 30 dargestellt.

Tabelle 30 **Vergleich von Simulationsergebnissen mit dem Monatsbilanzverfahren**

	Simulation	DINV 18599	Vorschlag Genzel/Weber
Korrelation	0,99980	0,99964	0,99977
Maximale Überschreitung	5 %	14 %	11 %
Maximale Unterschreitung	-11 %	-15 %	-12 %
Mittlere Abweichung	-1 %	2 %	1 %

Mit dem vorgeschlagenen Ansatz nach *Genzel und Weber* wird eine bessere Übereinstimmung zwischen Ergebnissen aus Simulation und Monatsbilanzverfahren erreicht, als mit dem derzeit in DIN V 18599 implementierten Berechnungsansatz. Vor diesem Hintergrund kann eine Übernahme des Ansatzes *Genzel und Weber* in die Norm in Betracht gezogen werden. Jedoch ist auch festzustellen, dass sich mit dem Berechnungsansatz nach aktuellem Normstand DIN V 18599 nur geringfügig höhere Abweichungen ergeben.

11 Lüftungswärmeverluste

11.1 Allgemeines

Wesentlicher Aufwand bei der Beheizung von Gebäuden entfällt auf Lüftungswärmeverluste. Diese entstehen durch in den zu beheizenden Raum eindringende kalte Außenluft, welche auf das Temperaturniveau des Raumes erwärmt werden muss.

Für eine energetische Bewertung gemäß DIN V 18599 werden bei der Bestimmung der Lüftungswärmeverluste der ungewollte Luftwechsel durch die Gebäudehülle (Infiltration) und der nutzungsbedingt notwendige Luftwechsel (Fensterluftwechsel) einbezogen.

11.2 Lüftungswärmeverluste durch Infiltration

11.2.1 Allgemeines

Aufgrund lokaler Druckunterschiede entsteht ein unkontrollierter Luftaustausch zwischen Raum- und Außenluft durch Undichtigkeiten der Gebäudehülle. Dieser wird wesentlich von Parametern der Gebäudedichtheit und der Lage beeinflusst.

11.2.2 Derzeitiger Stand

Im Rahmen der DIN V 18599 wird der Infiltrationsluftwechsel auf Grundlage tabellierter Bemessungswerte des Luftwechsels bei 50 Pa Druckdifferenz berechnet, sofern keine Luftdichtheitsmessung erfolgt ist. Energiebedarfsberechnungen erfolgen vielfach in einem Planungs- oder Bauabschnitt, in welchem eine Luftdichtheitsmessung noch nicht möglich ist. In der Praxis dürfte daher in der Regel mit den Bemessungswerten gemäß Abbildung 21 gearbeitet werden.

Tabelle 4 — n_{50}-Bemessungswerte (Standardwerte für ungeprüfte Gebäude)

Kategorien zur pauschalen Einschätzung der Gebäudedichtheit	Bemessungswerte n_{50} h^{-1}
I	a) 2; b) 1
II	4
III	6
IV	10

Abbildung 21 Standardwerte für n_{50} nach DIN V 18599-2

Die Verwendung der Größe n_{50} als Bemessungswert gemäß Abbildung 21 ist speziell für große Gebäude problematisch. Der Luftwechsel n_{50} ist eine volumenbezogene Größe. Die rechnerischen Lüftungswärmeverluste hängen somit sehr stark von der Gebäudegröße ab. Real auftretende Undichtigkeiten befinden sich jedoch in der Hüllfläche – z.B. in Form von Dichtungsfugen, Bauteilanschlüssen und Porositäten – und sind somit keine Funktion des Gebäudevolumens sondern der Gebäudeoberfläche. Es verwundert daher nicht, dass Messwerte dicht ausgeführter Hallen teilweise bis zu 2 Zehnerpotenzen unter dem Vorgabewert der DIN V 18599 für Gebäude mit vorgesehener Dichtheitsprüfung (Kategorie I) liegen – vgl. Abbildung 22. Aber auch für „normale“ Hallen dürften sich durch die in der Regel hohe Kompaktheit niedrigere Werte ergeben, als nach DIN V 18599-2 für die jeweiligen Dichtheitskategorien vorgegeben.

11.2.3 Bemessungswert ohne Bezug auf Gebäudevolumen, Umrechnung

Aus zuvor genannten Gründen erscheint es sinnvoll, einen Bemessungswert der Gebäudedichtheit heranzuziehen, welcher sich nicht auf das Gebäudevolumen, sondern auf die luftdurchlässigen Flächen des Gebäudes bezieht. Hierfür wird die hüllflächenbezogene Luftdurchlässigkeit q_{50} vorgeschlagen.

$$q_{50} = \frac{V'_{inf,50}}{A_{env}} = \frac{n_{50} * V_{Netto}}{A_{env}} \quad (14)$$

q_{50} hüllflächenbezogene Luftdurchlässigkeit
$V'_{inf,50}$ Luftvolumenstrom bei 50 Pa Druckdifferenz
A_{env} luftdurchlässige Hüllfläche (für nicht unterkellerte Gebäude: Außenwände und Dach)
V_{Netto} Nettoraumvolumen

Sie entspricht dem Quotienten aus dem Luftvolumenstrom bei 50 Pa Druckdifferenz und der luftdurchlässigen Gebäudehüllfläche. Liegen bereits gemessene n_{50}-Werte vor, so lassen sich diese über die Gebäudegeometrie der messtechnisch untersuchten Gebäude in q_{50}-Werte umrechnen.

Es ergäbe sich der Vorteil, dass Bemessungswerte für q_{50}, welche aus den Luftdichtheitsmessungen kleiner Gebäude ermittelt wurden, auch auf große Gebäude ähnlicher Bauweise und Ausführung hinsichtlich Gebäudedichtheit anwendbar sind. Bemessungswerte des Luftwechsels n_{50} sind hierfür in der Regel nicht geeignet.

Zur Verwendung innerhalb der DIN V 18599 kann ein q_{50}-Bemessungswert (Standardwert) anhand der bekannten Geometrie des Gebäudes, für welches die Infiltrationswärmeverluste zu bestimmen sind, in den n_{50}-Wert überführt werden. Damit steht n_{50} nach wie vor für alle Berechnungen innerhalb der DIN V 18599, welche sich auf diese Größe stützen, zur Verfügung – auf n_{50} verweisende Berechnungen müssten nicht angepasst werden.

$$n_{50} = \frac{q_{50} * A_{env}}{V_{Netto}} \quad (15)$$

11.2.4 Bemessungswerte q_{50}

Im Rahmen des Projektes wurden die Ergebnisse von Luftdichtheitsmessungen [21][22] an 36 Gebäuden aus dem Hallen- und Bürobereich ausgewertet. Die Messergebnisse sind als n_{50} und q_{50} geordnete Stichproben in Abbildung 22 dargestellt.

Es zeigt sich, dass für Gebäude ähnlicher hüllflächenbezogener Luftdurchlässigkeiten sehr unterschiedliche Luftwechsel ermittelt werden können. Erwartungsgemäß kann eine Dichtheitsbewertung auf Grundlage des ermittelten oder vorgegebenen Luftwechsels somit zu einem anderen Ergebnis führen als eine Bewertung auf Grundlage der hüllflächenbezogenen Luftdurchlässigkeit.

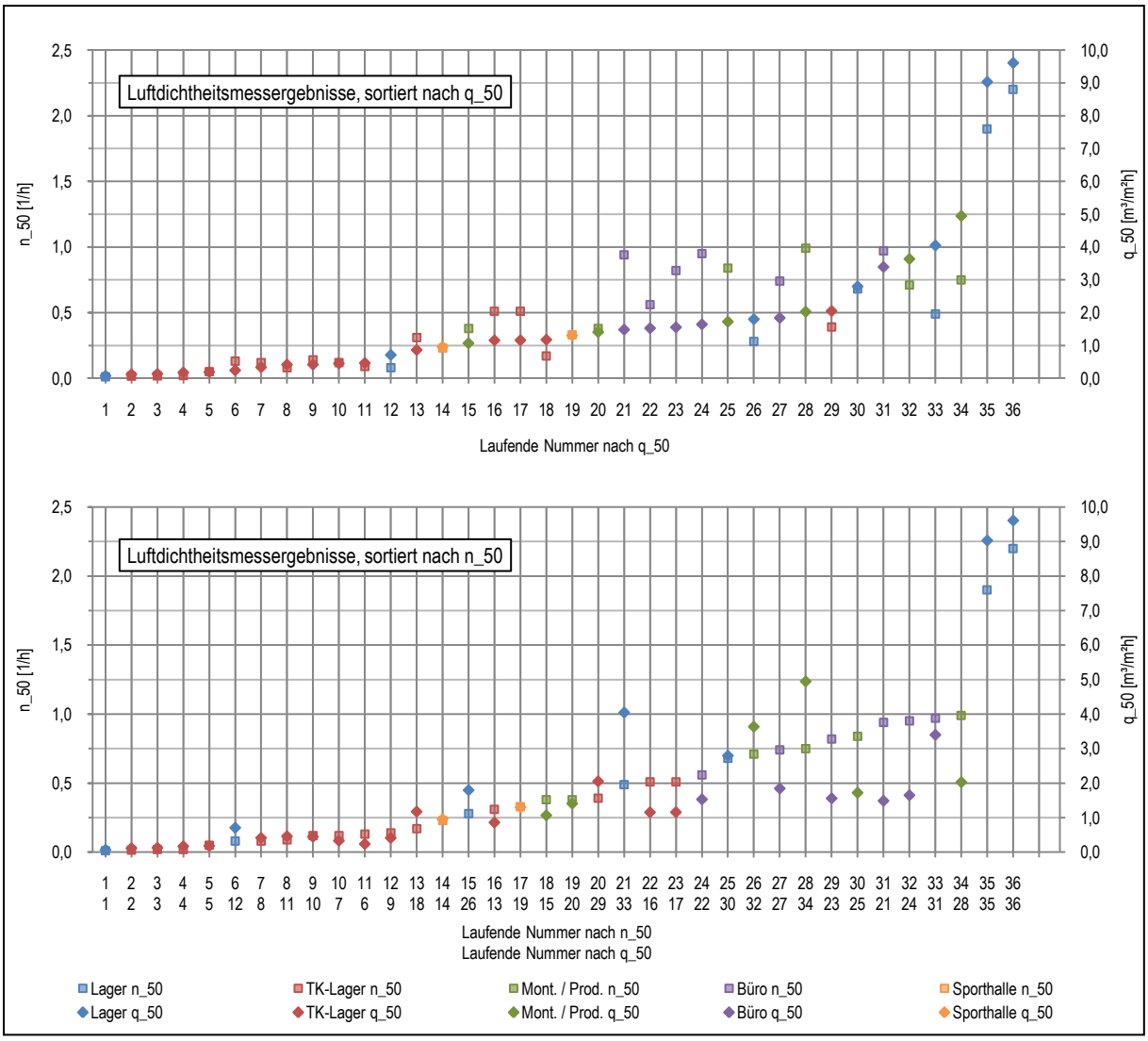


Abbildung 22 Luftdichtheitsmessergebnisse, aufsteigend sortierte Stichproben

Auf Grundlage der ausgewerteten Daten wurden im Rahmen dieses Projekts vorschlagsweise q_{50}-Bemessungswerte gemäß Tabelle 31 formuliert.

Tabelle 31 Vorschlag Kategorisierung und Bemessungswerte q_{50} für Hallengebäude

Kategorie	Dichtheitsprüfung	Einschätzung der Gebäudedichtheit	q_{50} [m³/m²h]
I	Eine Dichtheitsprüfung wird nach Fertigstellung durchgeführt.	Gehobene Anforderung an Luftdichtheit (z.B. Lüftungsanlage, Brandvermeidungsanlage)	1
II		Mittlere Anforderung (Regelfall)	3
III	Eine Dichtheitsprüfung wurde nicht durchgeführt und ihre Durchführung ist auch nicht vorgesehen.		6
IV		Geringe Anforderungen an Luftdichtheit (z.B. Gebäude mit niedriger Innentemperatur, unempfindliches Lagergut, kaum Personenaufenthalt); Vorhandensein offensichtlicher Undichtigkeiten in wesentlichem Ausmaß	12

Anhand dieser Bemessungswerte wurden die Infiltrationsluftwechsel der in Kapitel 3 definierten Modellgebäude nach Gleichung (16) mit einem Windschutzkoeffizienten e_{wind} von 0,07 bestimmt (vgl. DIN V 18599-2, 6.3.1.1).

$$n_{inf} = n_{50} * e_{wind} \quad (16)$$

Tabelle 32 Bestimmung des Infiltrationsluftwechsels im Vergleich, anhand zuvor definierter Modellgebäude (vgl. 3.4)

Gebäude	V_Netto	A_env	A_env / V_Netto	n_inf [1/h]							
				nach DIN V 18599-2, für Dichtheitskategorie (n_50 [1/h])				nach Vorschlag q_50, für Dichtheitskategorie (q_50 [m³/m²h])			
	[m³]	[m²]	1/m	Ia	II	III	IV	I*	II*	III*	IV*
				2	4	6	10	1	3	6	12
Werkstatt	480	336	0,70	0,14	0,28	0,42	0,70	0,049	0,147	0,294	0,588
Fertigungsbetrieb	24.000	4.571	0,19					0,013	0,040	0,080	0,160
Logistikhalle	140.000	15.929	0,11					0,008	0,024	0,048	0,096
Turnhalle	9.720	1.908	0,20					0,014	0,041	0,082	0,165
Baumarkt	85.000	13.836	0,16					0,011	0,034	0,068	0,137
Lebensmittelmarkt	26.000	5.899	0,23					0,016	0,048	0,095	0,191

Wie Tabelle 32 verdeutlicht, wird nach aktuell gültigem Verfahren ein pauschaler Infiltrationsluftwechsel ohne Unterscheidung nach Gebäudegröße oder Kompaktheit verwendet. Dagegen zeigt sich, dass der Infiltrationsluftwechsel nach vorgeschlagenem Ansatz eine Funktion der Gebäudekompaktheit ist – für Gebäude mit kleinerem A/V-Verhältnis ergeben sich, wie es auch die Anschauung nahelegt, kleinere Infiltrationsluftwechsel.

Der vorgeschlagene Ansatz bildet Gebäudeundichtigkeiten physikalisch besser ab, als die Verwendung von Bemessungswerten des Luftwechsels n_{50}. Aus Sicht der Autoren ist er daher deutlich besser zur Bestimmung des Infiltrationsluftwechsels geeignet, als der bislang verwendete Ansatz. Zudem sollte bedacht werden, dass Lüftungswärmeverluste bei einer Energiebedarfsberechnung nach DIN V 18599 erheblichen Einfluss haben können – aus Sicht der Autoren ist eine Überarbeitung der Norm in diesem Punkt unbedingt anzustreben.

11.3 Nutzungsbedingte Lüftungswärmeverluste

11.3.1 Allgemeines

Die Nutzung eines Gebäudes erfordert im Allgemeinen eine Frischluftzufuhr bestimmter Größe zur Einhaltung von behaglichkeitsrelevanten und/oder bauphysikalischen Anforderungen.

Da anzunehmen ist, dass eine nur bedingt geeignete Abbildung von Lüftungswärmeverlusten zum Missverhältnis zwischen theoretischen Energiebedarfswerten und realen Verbräuchen beiträgt, soll im Rahmen dieser Studie die Eignung der Standardwerte des *nutzungsbedingten Mindestaußenluftvolumenstroms* nach DIN V 18599-10 überprüft werden.

Tabelle 33 Nutzungsbedingte Mindestaußenluftvolumenströme nach [DIN V 18599-10/-100]

Nutzung nach DIN V 18599	Nutzungsbedingter Mindestaußenluftvolumenstrom, DIN V 18599-10		Belegungsdichte [m²/P]		
	flächenbezogen [m³/m²h]	personenbezogen [m³/hP]	gering	mittel	hoch
6 Einzelhandel/Kaufhaus	-	20	6	5	4
7 Einzelhandel/Kaufhaus mit Kühlprodukten	-	20	6	5	4
22.1 Gewerbliche und industrielle Hallen, grobe Arbeit	10	-	25	20	15
22.2 Gewerbliche und industrielle Hallen, feine Arbeit	10	-	25	20	15
31 Sporthallen	-	60	30	20	10
41 Lagerhallen/Logistikhallen	1 (Regelfall)	36 (bei Personenaufenthalt)	-	-	-

11.3.2 Außenluftvolumenstrom durch nutzungsbedingte Toröffnungen

Eine nutzungsbedingte Außenluftzufuhr ergibt sich unter anderem dann, wenn der Gebäudebetrieb häufiges Öffnen von Türen/Toren verlangt.

Der Luftwechsel von Hallengebäuden, speziell solchen mit geringen Hygieneanforderungen wegen geringer Belegungsdichte, kann maßgeblich durch Toröffnungsvorgänge bestimmt werden. Dieser Umstand wird bisher nicht in Betrachtungen nach DIN V 18599 einbezogen. Stattdessen wird ausschließlich mit personen- oder grundflächenspezifischen Pauschalwerten des *nutzungsbedingten Mindestaußenluftvolumenstroms* gearbeitet. Im Rahmen dieser Studie wird ein Berechnungsansatz zur Ermittlung des Torluftwechsels durch nutzungsbedingte Toröffnungen erarbeitet und anhand dessen untersucht, ob und ggf. inwieweit Toröffnungsvorgänge in die Bestimmung der Lüftungswärmeverluste im Rahmen einer Energiebedarfsberechnung nach DIN V 18599 einbezogen werden können.

Für die rechnerische Bestimmung des Außenluftvolumenstroms durch nutzungsbedingte Toröffnungen wird im Rahmen dieser Untersuchung folgender Ansatz verwendet:

$$\dot{V}_{Tor,nutz} = \dot{V}_{Tor} * f_{Tor} * t'_{Tor,nutz} \quad (17)$$

$V'_{Tor,nutz}$ *Außenluftvolumenstrom durch nutzungsbedingte Toröffnungen*
V'_{Tor} *Außenluftvolumenstrom durch das offene Tor*
$t'_{Tor,nutz}$ *gesamte auf die Nutzungszeit bezogene Toröffnungszeit*
f_{Tor} *Minderungsfaktor Torfläche; berücksichtigt Ungleichzeitigkeiten von Toröffnungen mehrerer Tore*

Dieser stützt sich auf den Außenluftvolumenstrom $V'_{Tor,nutz}$ welcher sich bei geöffnetem Tor ergäbe. Die Toröffnungscharakteristik wird anhand zweier Faktoren beschrieben, welche die Gleichzeitigkeit/Ungleichzeitigkeit von Toröffnungsvorgängen sowie die Zeit, in welcher Tore tatsächlich offenstehen, wiedergeben. Letztere wird auf die Nutzungszeit bezogen und damit dimensionslos. Der so ermittelte Torluftvolumenstrom $V'_{Tor,nutz}$ ist der Außenluftvolumenstrom welcher sich innerhalb der Nutzungszeit durch Toröffnungsvorgänge ergibt.

Für die Ermittlung des Außenluftvolumenstroms bei geöffneten Toren wird der folgende Ansatz verwendet:

$$m' = \rho_0 * \frac{A}{2} * C_d * \sqrt{\frac{g * H * \Delta\theta}{\theta_i}} \rightarrow V'_{Tor} \approx \frac{A_{Tor}}{2} * C_d * \sqrt{\frac{g * H_{Tor} * \Delta\theta}{\theta_i}} \quad (18)$$

mit

$$C_d = 0{,}4 + 0{,}0045 * |\Delta\theta| \quad (19)$$

m'	*Luftmassestrom*
ρ_0	*Dichte der Außenluft*
A, H	*Fläche und Höhe der durchströmten Öffnung*
g	*Fallbeschleunigung 9,81m/s²*
$\Delta\theta$	*Temperaturdifferenz innen/außen*
θ_i	*Innentemperatur*
C_d	*Widerstandsbeiwert der Öffnung als Funktion der Temperaturdifferenz innen/außen*

Dieser Berechnungsansatz beschreibt einen Strömungsvorgang, welcher durch den Temperaturunterschied innen/außen hervorgerufen wird. Der Widerstand, welchen die durchströmte Toröffnung der Strömung entgegenbringt, wird hierbei als Funktion der Temperaturdifferenz innen/außen abgebildet. Windeinflüsse werden nicht betrachtet.

Für den Minderungsfaktor Torfläche werden die folgenden Werte verwendet, welche in Verbindung mit der anteiligen Toröffnungszeit ein realistisches Toröffnungsverhalten abbilden sollen.

Tabelle 34 Minderungsfaktor Torfläche für hallentypische Nutzungen

Nutzung nach DIN V 18599	f_{Tor}	Kommentar
6 Einzelhandel/Kaufhaus	0,7	oft ein Ein- und ein Ausgang, Öffnungen überschneiden sich teilweise
7 Einzelhandel/Kaufhaus mit Kühlprodukten	0,7	
22.1 Gewerbliche und industrielle Hallen, grobe Arbeit	0,5	im Allgemeinen mehrere Tore, weitgehend gleichmäßige Aufteilung der Torflächen auf 2 Arten von Vorgängen (z.B. Anlieferung und Abholung, Ein- und Auslass, etc.), kaum Überschneidungen
22.2 Gewerbliche und industrielle Hallen, feine Arbeit	0,5	
31 Sporthallen	0,5	
41 Lagerhallen/Logistikhallen	0,5	

Die anteilige Toröffnungszeit wird dabei wie folgt definiert:

$$t'_{Tor,nutz} = t_{Tor} / t_{nutz} \quad (20)$$

$t'_{Tor,nutz}$	*gesamte auf die Nutzungszeit bezogene Toröffnungszeit*
t_{Tor}	*Toröffnungszeit*
t_{nutz}	*Nutzungszeit*

In Tabelle 35 werden Annahmen zur Ermittlung der anteiligen Toröffnungszeiten für die zuvor definierten Modellgebäude getroffen. Es zeigt sich, dass auch innerhalb einer Nutzung nach DIN V 18599 verschiedene Toröffnungszeiten denkbar sind.

Tabelle 35 Ermittlung der anteiligen Toröffnungszeit für verschiedene Nutzungssituationen, basierend auf Tageswerten

Gebäude	Nutzung nach DIN V 18599	Nutzungs-dauer	Tor-öffnungen	Zeit je Öffnung	Anteilige Toröffnungszeit $t'_{Tor,nutz}$		Kommentar
Werkstatt	22.1	9 h	6	6 min	4 min/h	0,067 h/h	Bsp.: Autowerkstatt oder Fertigung mit mittlerem Durchsatz (Halbzeuge/Waren außerhalb Gebäude), häufige kurze Toröffnungen
Fertigungsbetrieb	22.1, 22.2	9 h	2	15 min	3 min/h	0,056 h/h	Lagerung teilweise im Gebäude, Durchsatz auf wenige Toröffnungen konzentriert
Logistikhalle	41	24 h	24	5 min	5 min/h	0,083 h/h	hoher Durchsatz, viele kurze* Toröffnungen
Turnhalle	31	15 h	6	3 min	1 min/h	0,020 h/h	in der Regel nur sehr kurze Öffnungen für Personenein- und -auslass und kleine Tor-/Türflächen; nutzungsbedingter Frischluftbedarf maßgeblich für Luftwechsel; Toröffnungen für diese Nutzung wahrscheinlich vernachlässigbar
Baumarkt mit Gartenbereich	6	12 h	540	0,5 min	28 min/h	0,458 h/h	1-2 lange Öffnungen für Liefervorgänge + viele kurze Toröffnungen (Kundenverkehr, selbstöffnende/-schließende Türen)
Lebensmittelmarkt	7	12 h	540	0,5 min	28 min/h	0,458 h/h	
* Während Verladephase wahrscheinlich nur geringer LW durch Einsatz von Verladeschleusen							

Für die untersuchten Modellgebäude wurden auf Grundlage dieser Annahmen die Torluftwechsel und -volumenströme bestimmt.

Tabelle 36 Berechnung Torluftwechsel

Gebäude	Nutzung	$A_{Tor}/2$	H	θ_i	θ_e	$\Delta\theta$	C_d	g	V'_{Tor}	$t'_{Tor,nutz}$	f_{Tor}	$V'_{Tor,nutz}$	$LW_{Tor,nutz}$	$V'_{Tor,nutz,NGF}$ analog DIN V 18599-10
		[m²]	[m]	[°C]	[°C]	[K]		[m/s²]	[m³/h]	[h_{Tor}/h_{nutz}]		[m³/h]	[1/h]	[m³/m²h]
Werkstatt	22.1 Gewerbliche und industrielle Hallen, grobe Arbeit	9,0	3,0	17,0		9,1	0,441		56.705,6	0,061	0,5	1.732,7	3,61	21,66
Fertigungsbetrieb AF 30%	22.1 Gewerbliche und industrielle Hallen, grobe Arbeit	25,0	5,0	17,0		9,1	0,441		203.351,6	0,061	0,5	6.213,5	0,26	2,59
	22.2 Gewerbliche und industrielle Hallen, feine Arbeit	25,0	5,0	19,0		11,1	0,45		216.775,9	0,061	0,5	6.623,7	0,28	2,76
Fertigungsbetrieb AF 80%	22.1 Gewerbliche und industrielle Hallen, grobe Arbeit	25,0	5,0	17,0		9,1	0,441		203.351,6	0,061	0,5	6.213,5	0,26	2,59
	22.2 Gewerbliche und industrielle Hallen, feine Arbeit	25,0	5,0	19,0		11,1	0,45		216.775,9	0,061	0,5	6.623,7	0,28	2,76
Logistikhalle	41 Lagerhallen/Logistikhallen	60,0	5,0	12,0		4,1	0,418		370.014,0	0,083	0,5	15.417,2	0,11	1,54
Turnhalle	31 Sporthallen	6,0	2,2	21,0		13,1	0,459		36.374,0	0,020	0,5	363,7	0,04	0,30
Baumarkt mit beheiztem Gartenbereich	6 Einzelhandel/Kaufhaus	20,6	3,2	21,0		13,1	0,459		150.090,1	0,375	0,7	39.398,6	0,46	4,60
Lebensmittelmarkt	7 Einzelhandel/Kaufhaus mit Kühlprodukten	7,5	3,0	21,0		13,1	0,459		53.094,6	0,375	0,7	13.937,3	0,54	3,48

Bei diesen Berechnungen wurde davon ausgegangen, dass alle Torflächen hinsichtlich Öffnungsfrequenz/-dauer auf ähnliche Art und Weise genutzt werden. Sind jedoch unterschiedlich genutzte Torflächen vorhanden, kann eine zusammengefasste Bewertung aller Torflächen zu Fehlern führen. In der nachfolgend tabellarisch dargestellten Beispielrechnung für das Modellgebäude „Baumarkt“ tritt zwischen beiden

Berechnungsmöglichkeiten eine Abweichung von 39% auf. Für Gebäude, in denen die Lüftungswärmeverluste maßgeblich durch Toröffnungen bestimmt werden, hätte diese Abweichung erheblichen Einfluss auf den berechneten Energiebedarf.

Tabelle 37 Zusammengefasste und detaillierte Berechnung des Torluftwechsels im Vergleich am Beispiel „Baumarkt“

	$A_{Tor}/2$	H	θ_i	θ_e	$\Delta\theta$	C_d	g	V'_{Tor}	$t'_{Tor,nutz}$	f_{Tor}	$V'_{Tor,nutz}$	$LW_{Tor,nutz}$		$V'_{Tor,nutz,NGF}$ analog DIN V 18599-10	
	[m²]	[m]	[°C]	[°C]	[K]		[m/s²]	[m³/h]	[h_{Tor}/h_{nutz}]		[m³/h]	[1/h]		[m³/m²h]	
Zusammengefasste Betrachtung aller Torflächen	20,6	3,2	21,0	7,9	13,1	0,459	9,81	150.090,1	0,375	0,7	39.398,6	**0,46**		**4,60**	
Ein-/Ausgänge	13,1	2,5	21,0					84.819,9	0,375	0,7	22.265,2	0,26	**0,33**	2,60	**3,32**
Liefertore	7,5	3,0	21,0					53.094,6	0,167	0,7	6.194,4	0,07		0,72	

Durch weitere Variation der Annahmen ließe sich eine wesentlich größere Bandbreite an theoretischen Torluftwechseln für ein und dasselbe Gebäude erzeugen. Hier seien nur einige der möglichen Einflussgrößen aufgezählt:

- Abweichende Toröffnungscharakteristik hinsichtlich Öffnungsdauer und -frequenz innerhalb einer Nutzung
    - Fertigung: hoher Durchsatz von Halbzeugen/Produkten, Transport von und nach außen ↔ geringer Durchsatz und/oder Zwischenlagerung in räumlichem Verbund zur Fertigung
    - Sport- und Veranstaltungsräume: tendenziell geringerer Nutzer- und Publikumsverkehr bei Vereins- und Schulnutzung ↔ hoher Andrang bei öffentlich zugänglichen Gebäuden (Fitnesscenter, kommerziell genutzte Mehrzweckhallen etc.)
- Unterschiede bei der Abschirmung des geöffneten Tores
    - Lager/Logistik: Weitgehend dichte Verladeschleusen ↔ schlecht abgeschirmte Tore

Prinzipiell ist denkbar, die Toröffnungscharakteristik nicht der Nutzung zuzuschreiben, sondern sie stattdessen anhand vorzugebender Tortypen zu bestimmen. Dieser Ansatz könnte zwar vergleichsweise klare Randbedingungen für eine Berechnung des Torluftwechsels schaffen, würde jedoch die Eingabe weiterer Parameter in die Berechnung voraussetzen. Es kann davon ausgegangen werden, dass diese zum Zeitpunkt der Energieausweiserstellung in der Regel nicht in der notwendigen Detaillierung vorliegen. Auch dürfte eine klare Zuordnung aller vorhandenen Torflächen zu bestimmten „Norm-Toröffnungscharakteristiken“ mitunter schwierig fallen.

Der in Tabelle 38 dargestellte Vergleich zeigt zudem, dass sich der berechnete Volumenstrom durch Toröffnungen und der *nutzungsbedingte Mindestaußenluftvolumenstrom* nach DIN V 18599-10/-100 sowie in Anlehnung an ASR 5 zumindest in derselben Größenordnung bewegen. Ausnahmen bilden hier lediglich die Werte des Modellgebäudes *Werkstatt*. Dieses besitzt aufgrund seiner geringen Größe jedoch einen für Hallen ungewöhnlich hohen Torflächenanteil, welcher für den hohen Torluftvolumenstrom sorgt. So stellt es im Bereich der Hallenbauten einen durchaus betrachtenswerten Extremfall dar, anhand dessen beispielsweise Anwendungsgrenzen eins Berechnungserfahren ermittelt werden könnten – als repräsentative „Durchschnittshalle“ ist es allerdings nicht anzusehen.

Damit ergeben sich für den Torluftvolumenstrom in vielen Fällen Werte, welche unter dem *nutzungsbedingten Mindestaußenluftvolumenstrom* nach DIN V 18599-10/-100 liegen. Bei einem Bezug auf ASR 5 übersteigen die berechneten Torluftvolumenströme die Nutzungsanforderung nur in einigen Fällen. Hier ist zu bedenken, dass die Torluftvolumenströme auf Grundlage eines relativ einfachen Modells ermittelt wurden und die Randbedingungen geschätzt werden mussten, da hierzu kein Datenmaterial vorliegt. Eine leichte Variation der angesetzten Randbedingungen – innerhalb eines realistischen Bereichs – kann sowohl zu einer Erhöhung als auch zu einer Verringerung des berechneten Torluftvolumenstroms führen.

Angesichts der Größenordnung, in welcher sich der Torluftvolumenstrom bewegen dürfte, der bereits angesprochenen Schwierigkeiten bei der exakten Festlegung der Randbedingungen zu seiner Bestimmung und der hieraus resultierenden Berechnungsunsicherheit scheint es durchaus vertretbar, im Rahmen einer energetischen Bewertung verallgemeinernd zu unterstellen, dass durch Toröffnungsvorgänge kein zusätzlicher Luftwechsel zur Nutzungsanforderung entsteht. Anders ausgedrückt bedeutet dies, dass der Luftwechsel durch Toröffnungen in der Regel in der Nutzungsanforderung „untergehen“ dürfte oder diese zumindest nicht wesentlich übersteigt, auch wenn Einzelfälle hiervon sehr deutlich abweichen können.

Tabelle 38 Vergleich von Toraußenluftvolumenstrom und nutzungsbedingtem Mindestaußenluftvolumenstrom nach DIN V 18599-10/-100 und in Anlehnung an ASR 5 (personenbezogen angegebene Werte wurden anhand mittlerer Belegungsdichte in flächenbezogene umgerechnet)

Gebäude	Nutzung	$V'_{Tor,nutz,NGF}$	V'_A	
			nach DIN V 18599-10/-100	in Anlehnung an ASR 5
		[m³/m²h]		
Werkstatt	22.1 Gewerbliche und industrielle Hallen, grobe Arbeit	21,66	10,0	3,5
Fertigungsbetrieb AF 30%	22.1 Gewerbliche und industrielle Hallen, grobe Arbeit	2,59	10,0	3,5
	22.2 Gewerbliche und industrielle Hallen, feine Arbeit	2,76	10,0	1,5
Fertigungsbetrieb AF 80%	22.1 Gewerbliche und industrielle Hallen, grobe Arbeit	2,59	10,0	3,5
	22.2 Gewerbliche und industrielle Hallen, feine Arbeit	2,76	10,0	1,5
Logistikhalle	41 Lagerhallen/Logistikhallen	1,54	1,0	-
Turnhalle	31 Sporthallen	0,30	3,0	3,0…3,5
Baumarkt mit beheiztem Gartenbereich	6 Einzelhandel/Kaufhaus	4,60	4,0	4,0…8,0
Lebensmittelmarkt	7 Einzelhandel/Kaufhaus mit Kühlprodukten	3,48	4,0	4,0…8,0

11.3.3 Hygienische Anforderungen

Aus Gründen der Behaglichkeit und Gesundheit ist in Gebäuden eine bestimmte Raumluftqualität sicherzustellen. Die nach DIN V 18599-10 vorgegebenen flächen- oder personenbezogenen Standardwerte des *nutzungsbedingten Mindestaußenluftvolumenstroms* sollen diesen Umstand abbilden. Auf Grundlage dieser Standardwerte ergeben sich teilweise sehr hohe absolute Außenluftvolumenströme und in der Folge sehr hohe Lüftungswärmeverluste.

<u>Personenbezogen</u>

Personenbezogene Anforderungen an die Raumluftqualität werden von verschiedenen Normen behandelt. Nach der 2005 zurückgezogenen DIN 1946-2 sind Außenluftvolumenströme in Abhängigkeit von der körperlichen Belastung einzuhalten.

Tabelle 39 Außenluftvolumenströme nach ASR 5 und [DIN 1946-2]

Grad der körperlichen Belastung	[m³/hP]
gering	20…40
normal	40…60
hoch	> 65

Diese Werte finden sich analog in der noch gültigen Arbeitsstättenrichtlinie 5 [31] wieder.

Einen anderen Ansatz verfolgt die EN 13779, welche Volumenströme als Funktion der zu erzielenden Raumluftqualität definiert. Der Aktivitätsgrad der ggf. im Raum befindlichen Personen wird hierbei nicht einbezogen.

Tabelle 40 Außenluftvolumenströme nach [EN 13779:2007]

Personenaufenthalt / Raumluftqualität	nein	ja
	[m³/m²h]	[m³/hP]
hoch	-	72
mäßig	3	45
mittel	2	29
niedrig	1	18

Anforderungen für Sporthallen, welche sich hinsichtlich der Größenordnungen an der DIN 1946-2 bzw. an der ASR 5 orientieren, werden durch die DIN 18032-1 vorgegeben.

Tabelle 41 Außenluftvolumenströme für Sporthallen nach [DIN 18032-1]

	[m³/hP]
Zuschauer	20
Sportler	60

<u>Bedingt durch sonstige innere Lasten (Anlagenbetrieb, Tabakrauch, etc.)</u>

In ASR 5 wird die Kompensation innerer Lasten durch Mehraußenluftvolumenströme, welche den unteren Werten gemäß Tabelle 39 aufzuschlagen sind, gefordert. Beispielhaft werden Zahlenwerte für die Belastung durch *Tabakrauch* und eine *intensive Geruchsverschlechterung* angegeben. Auf weitere Detaillierung wird verzichtet.

Einen weiteren Anhalt zur Schätzung notwendiger Außenluftvolumenströme kann VDI 3802 entnommen werden.

Tabelle 42 Erfahrungswerte flächenbezogener Zuluftvolumenströme für verschiedene Produktionsbereiche nach [VDI 3802]

Produktionsbereich	[m³/m²h]
Gießerei	50…200
Mechanische Fertigung	20…75
Umformtechnik	20…50
Montage	20…30

Die in Tabelle 42 dargestellten Werte wurden aus Messwerten von ausgeführten raumlufttechnischen Anlagen ermittelt. Demnach ist davon auszugehen, dass hierbei sowohl

[31] Die genannten Volumenströme sind in der ASR 5 als Anforderungen an Lüftungsanlagen formuliert. Als Bemessungswerte zur Bestimmung des Außenluftwechsels im Rahmen einer energetischen Bewertung sollten sie sich jedoch auch bei freier Lüftung heranziehen lassen.

durch Anlagenbetrieb bedingte innere Lasten als auch ggf. vorhandene personenbezogene Anforderungen abgefangen werden.

Werden die zitierten Werte zugrundegelegt, lassen sich die nach DIN V 18599-10/-100 anzusetzenden Standardwerte des nutzungsbedingten Mindestaußenluftvolumenstroms für die Nutzungen 6, 7 und 31 nachvollziehen.

Für die Nutzung 41 kann davon ausgegangen werden, dass sich personenbezogene Anforderungen aufgrund der üblicherweise äußerst geringen Belegungsdichte kaum bemerkbar machen und bei Berechnungen nach DIN V 18599 in der Mehrzahl der Fälle mit dem flächenbezogenen Wert von 1 m³/m²h zu rechnen ist. An dieser Stelle ist nicht ersichtlich, ob dieser Wert aus einer Anforderung an die Luftqualität resultiert oder pauschal den nutzungsbedingten Eintritt von Außenluft abbilden soll. Speziell für letzteren Fall wäre der sich aus Toröffnungsvorgängen ergebende Luftwechsel maßgeblich für die Lüftungswärmeverluste.

Wie Tabelle 42 verdeutlicht, ist die Vorgabe eines pauschalen Standardwertes für die Profile 22.1 und 22.2 angesichts der möglichen Bandbreite tatsächlicher Nutzungen schwierig. Wird davon ausgegangen, dass keine nennenswerten technologisch bedingten inneren Lasten auftreten, und somit personenbezogene Anforderungen maßgeblich sein sollten, ergäbe sich nach den Tabellen 33 und 39 ein flächenbezogener Volumenstrom von 1,5…3,5 m³/m²h - der in beiden Profilen verwendete Standardwert von 10 m³/m²h wirkt im Vergleich dazu sehr hoch. Des Weiteren wäre weitere Unterscheidung hinsichtlich des geforderten nutzungsbedingten Mindestaußenluftvolumenstroms sinnvoll, da davon auszugehen ist, dass der körperliche Belastungsgrad bei *grober Arbeit* im Allgemeinen deutlich höher ist als bei *feiner Arbeit*. Werden hingegen die Werte nach Tabelle 42 zugrundegelegt, erscheint der angesetzte Standardwert niedrig. Allerdings ist den Autoren nichts über die Primärquellen der in VDI 3802 angegebenen Werte bekannt. Jedoch ist bekannt, dass industrielle Hallen vielfach ohne Lüftungsanlage betrieben werden, ohne dass sich kritische Schadstoffkonzentrationen im Aufenthaltsbereich ergäben[32]. Eine allgemeingültige Übertragbarkeit der in VDI 3802 aufgeführten Anlagen-Werte auf industrielle Hallen im Rahmen einer energetischen Bewertung scheint daher zumindest fraglich.

Für eine Überarbeitung der Nutzungsprofile nach DIN V 18599-10/-100 stellt sich aus Sicht der Autoren eine Festlegung des nutzungsbedingten Mindestaußenluftvolumenstroms in Anlehnung an die noch gültige Arbeitsstättenrichtlinie 5 als sinnvoll dar. Des Weiteren sollte – wie ohnehin schon – darauf hingewiesen werden, dass *bedarfsabhängige Lüftungsstrategien […] in Abhängigkeit von produktions- und sicherheitstechnischen Aspekten individuell zu planen und festzulegen [sind]*.

11.4 Fazit

11.4.1 Infiltration

Die Berechnungsgrundlage des Infiltrationsluftwechsels bilden derzeit Bemessungswerte des Luftwechsels bei 50 Pa Druckdifferenz. Diese n_{50}-Werte werden weder nach Gebäudegröße noch nach Gebäudekompaktheit unterschieden und können damit zwangsweise nur für einen stark eingeschränkten Bereich von Gebäuden gelten. Typische Hallenbauten fallen

[32] Dies wird auch durch Ergebnisse der ELVHIS-Messkampagne [Quelle…] belegt. Die untersuchten Hallen verfügen zwar teilweise über Abluftventilatoren; diese dienen jedoch lediglich der Abfuhr der Verbrennungsabgase der Heizungsanlage. Die hierbei verursachten Abluftvolumenströme werden von den in VDI 3802 angegebenen Werte etwa um das 10- bis 100fachen überstiegen.

aufgrund ihrer Größe nicht in diesen Bereich. Eine uneingeschränkte Anwendbarkeit dieser n_{50}-Bemessungswerte auf Geschossbauten darf zumindest hinterfragt werden – dies soll jedoch nicht Gegenstand der vorliegenden Untersuchung sein. Durch eine Umformulierung der Bemessungswerte auf eine hüllflächenbezogene Größe wäre eine weitgehende Unabhängigkeit von Gebäudegröße und -kompaktheit gegeben.

11.4.2 Torluftwechsel

Wegen der nicht gegebenen Pauschalisierbarkeit dieser Größe, wird davon abgesehen, den Torluftvolumenstrom als festen Anteil in die Definition der Nutzungsprofile einzubinden. Eine separate Berechnung des Torluftwechsels wird hingegen als prinzipiell möglich angesehen. Die hiermit verbundenen Anforderungen an den Anwender einer Berechnungssoftware nach DIN V 18599 und die sich ergebenden Unsicherheiten stellen den Nutzen dieser Berechnung jedoch in Frage. Zudem wurde gezeigt, dass Torluftvolumenströme für typische Hallengebäude unter typischen Randbedingungen in vielen Fällen nicht oder nicht wesentlich über der jeweiligen hygienischen Nutzungsanforderung liegen dürften. Aus Sicht der Autoren ist es daher zweckmäßiger, die Berechnung der Lüftungswärmeverluste in der Nutzungszeit auf hygienische Anforderungen zu stützen, da sich diese einer Nutzung besser zuordnen lassen, als eine Toröffnungscharakteristik.

11.4.3 Hygienische Anforderungen

Die nach DIN V 18599-10/-100 gegebenen Werte des nutzungsbedingten Mindestaußenluftvolumenstroms sind hinsichtlich ihrer Größe nur teilweise nachvollziehbar. Es wurde gezeigt, dass eine weitergehende Differenzierung, als bisher an dieser Stelle, durchaus sinnvoll sein kann, da der effektiv auftretende nutzungsbedingte Außenluftvolumenstrom einerseits sehr stark von den individuellen Gegebenheiten abhängt und andererseits wesentlichen Einfluss auf den Energiebedarf hat.

Den Autoren scheint bei der Formulierung neuer Werte des nutzungsbedingten Mindestaußenluftvolumenstroms eine Anlehnung an die noch gültige ASR 5 sinnvoll. Aus dieser lassen sich Bemessungswerte für Kaufhäuser/Markthallen, Sport- und Montage-/Fertigungshallen ableiten. Für Lager- und Logistikhallen können personenbezogene Anforderungen in der Regel als vernachlässigbar gelten – hier scheint der aktuell angesetzte flächenbezogene Wert von 1 m^3/m^2h in seiner Größenordnung sinnvoll gewählt (vgl. auch Tabelle 36).

12 Bewertung unterschiedlicher Heizungssysteme

12.1 Literaturanalyse

12.1.1 Vorbemerkung

In der Literatur sind zum gegenwärtigen Zeitpunkt nur sehr wenige belastbare Daten für die realistische Einschätzung von Heizsystemen in Gebäuden mit hohen Räumen zu finden. Auch ist anzumerken, dass die wenigen vorhandenen Daten mit unterschiedlichen Methoden ermittelt wurden. Genannt seien hier z.B. Messungen sowie numerische Simulationsrechnungen. In den nachfolgenden Abschnitten sollen daher überblicksartig die derzeit in der Literatur vorhandenen Daten systematisch dargestellt werden.

12.1.2 Theoretische Untersuchungen

Erste theoretische Untersuchungen zum Leistungsbedarf von Heizsystemen wurden von Macskàsy in [32] dokumentiert. Der Autor verwendet als charakteristischen Parameter für die Darstellung die Einstrahlzahl zwischen Decke und Boden.

Die Einstrahlzahl $\Phi_{D\text{-}B}$ ist eine geometrische Verhältniszahl. Sie gibt an, welcher Anteil der gesamten von der Decke in den Raum abgegebenen Strahlung unmittelbar auf den Boden auftrifft. Je stärker „Störflächen“, wie z.B. senkrechte Wandbauteile, am Strahlungsaustausch innerhalb des Raumes beteiligt sind, desto kleiner fällt die Einstrahlzahl $\Phi_{D\text{-}B}$ aus. Andersherum nähert sich die Einstrahlzahl $\Phi_{D\text{-}B}$ ihrem Maximum von 1 wenn Decke und Boden den Strahlungsaustausch dominieren, und andere Flächen nur in geringem Maß beteiligt sind. Abbildung 23 zeigt den qualitativen Zusammenhang zwischen Gebäudegeometrie und der Einstrahlzahl Decke-Boden.

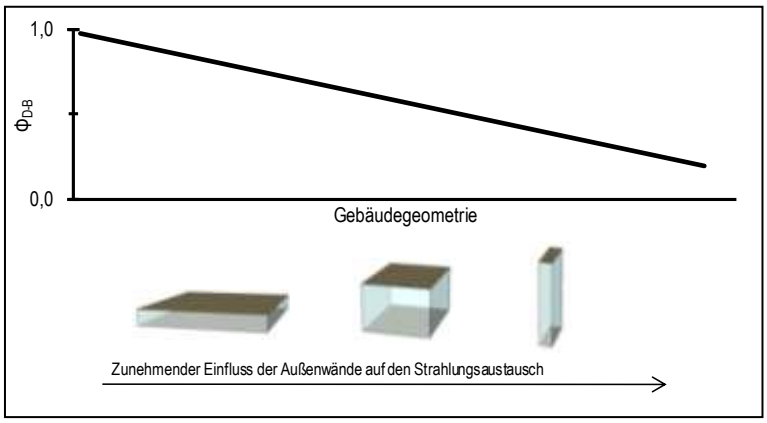


Abbildung 23 Einfluss der Gebäudegeometrie auf die Einstrahlzahl Decke-Boden, qualitativ

Über diesem Parameter wird der Quotient aus tatsächlicher und fiktiver[33] Heizlast – entsprechend Gleichung (21) – aufgetragen. Hierbei wird jedoch nur die Transmissionsheizlast betrachtet.

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}_{N,T,tats}}{\dot{Q}_{N,T,fikt}} \tag{21}$$

[33] Mit fiktiver Heizlast wird hier die Normheizlast bezeichnet.

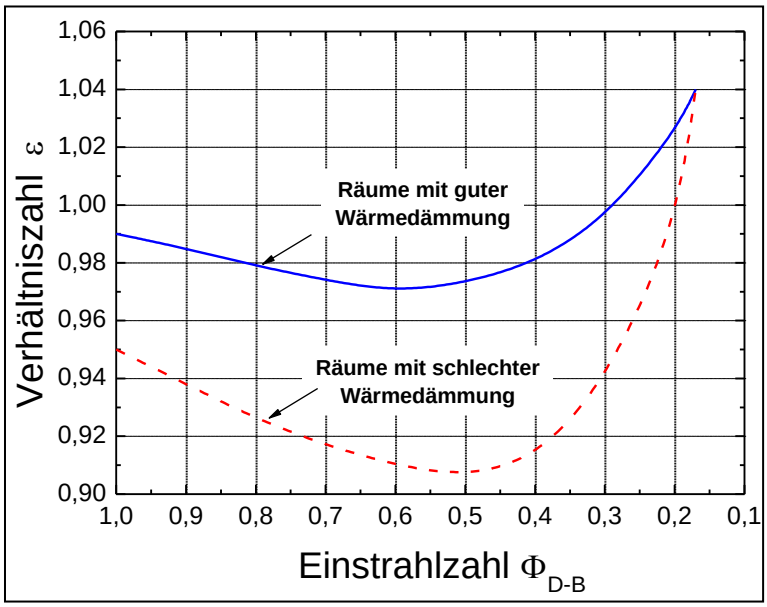


Abbildung 24 **Verhältnis ε als Funktion der Einstrahlzahl Decke-Boden bei Einsatz von Strahlplatten mit wärmegedämmter Oberseite nach Macskàsy [32]**

Abbildung 24 zeigt ausgewählte Ergebnisse der Arbeit von Macskàsy. Weitere Untersuchungen theoretischer Natur wurden von Kraft [33] vorgenommen. Die wichtigsten Ergebnisse dieser Arbeiten sind in den Abbildungen 25 bis 27 dargestellt

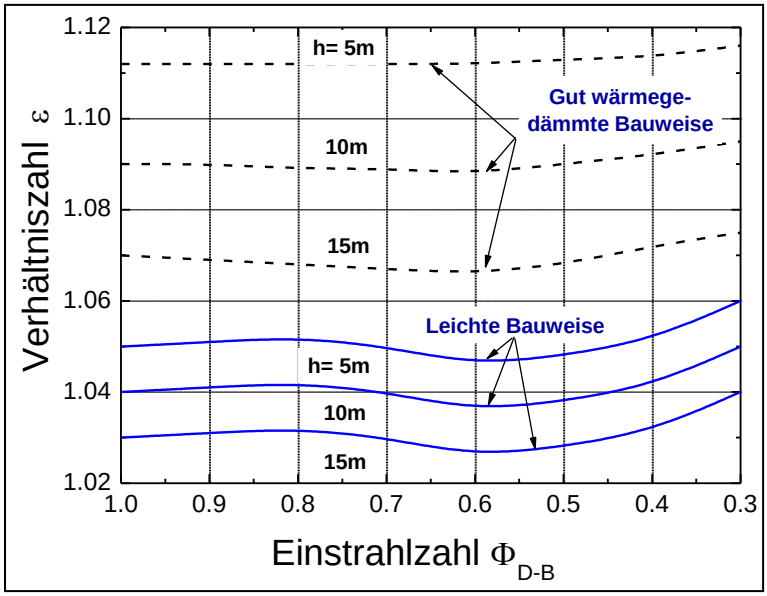


Abbildung 25 **Verhältnis ε als Funktion der Einstrahlzahl Decke-Boden und der Raumhöhe h bei Beheizung von Hallen mit Wandlufterhitzern nach Kraft [33]**

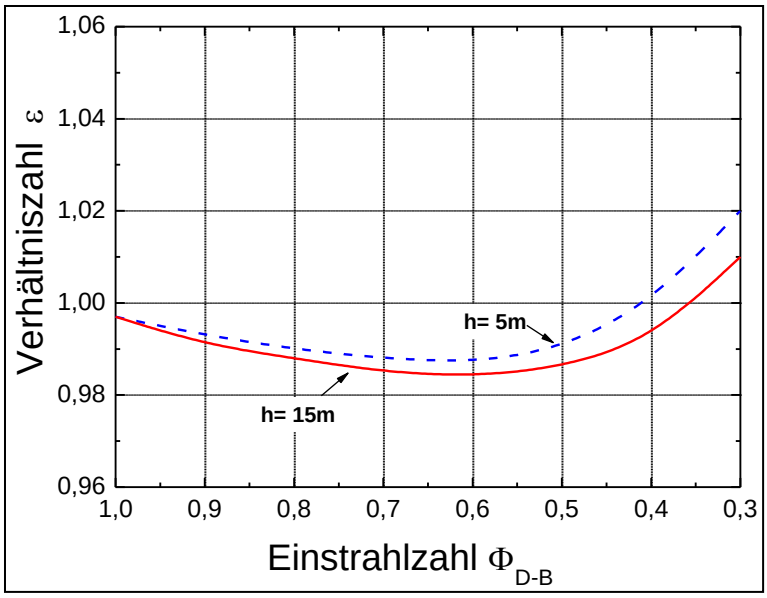


Abbildung 26 **Verhältnis ε als Funktion der Einstrahlzahl Decke-Boden und der Raumhöhe h bei der Beheizung von gut wärmegedämmten Hallen mit Strahlplatten nach Kraft [33]**

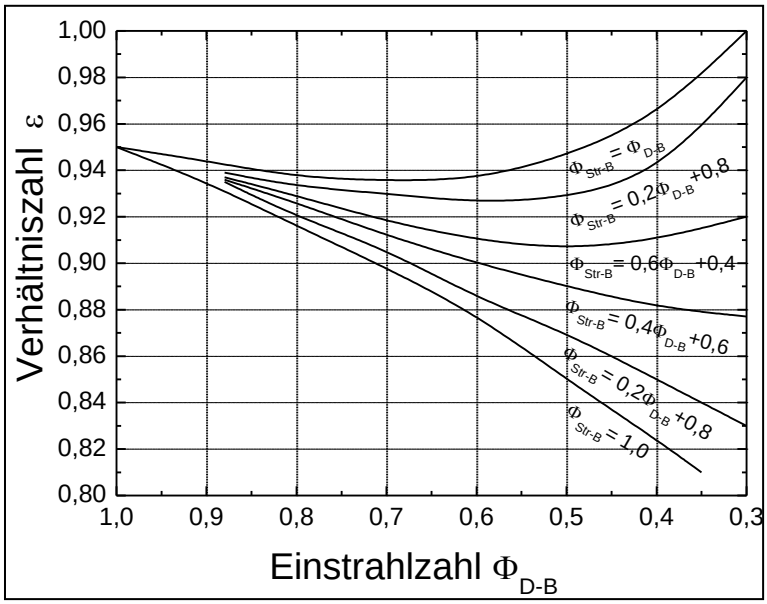


Abbildung 27 **Verhältnis ε als Funktion der Einstrahlzahl Decke-Boden bei der Beheizung von gut wärmegedämmten Hallen mit Infrarotstrahlern ohne konvektive Wärmeabgabe nach Macskàsy in [32]**

Die in den vorangegangenen Abbildungen dargestellten Zusammenhänge zeigen, dass bei den Systemen mit Strahlplatten minimale Heizlastverhältnisse bei Einstrahlzahlen zwischen 0,4 und 0,8 erreicht werden, wobei sich höhere Einsparpotentiale für Räume mit größeren Höhen ergeben, als für Räume mit geringeren Höhen.

Für Luftheizungen gibt Kraft [33] lediglich eine sehr geringe Abhängigkeit von der Einstrahlzahl Φ_{D-B} an. Interessant ist jedoch, dass die von Kraft [33] in Abbildung 2 dokumentierten Systeme hinsichtlich des Leistungsbedarfs günstiger werden, je größer die Raumhöhen sind.

Eine gewisse Sonderstellung in den Analysen nehmen Infrarotstrahler ein. Signifikant ist hier, dass sämtliche in der Literatur angegebenen Daten für diese Systeme ε-Werte aufweisen,

die kleiner als Eins sind. Einheitliche Abhängigkeiten wie sie bei der Luftheizung sowie den Strahlplattenheizungen von Macskàsy [32] und Kraft [33] angegeben werden, sind hier nicht zu ermitteln.

12.1.3 Experimentelle Untersuchungen

Experimentelle Untersuchungen liegen von van Weele [34] vor. Erkenntnisse hieraus sind in ISSO 57 E [35] eingeflossen. Mit dieser Publikation wird eine Methode der Heizlastberechnung für hohe Räume zur Verfügung gestellt. Abgebildet werden typische in Hallenbauten auftretende Heizungssysteme: Fußbodenheizung, Hellstrahler, Strahlplatten, Luftheizungssysteme (mit und ohne Deckenventilator). Für diese Systeme werden unter anderem typische vertikale Temperaturanstiege angegeben, welche in Tabelle 43 dokumentiert sind.

Tabelle 43 Temperaturgradienten für typische Heizsysteme in Hallenbauten nach van Weele [34]

Variante	Gerätetyp	Temperaturgradient [K/m]
Fußbodenheizungen		0,2
Strahlungsheizungen	Strahlplatten / Dunkelstrahler	0,5
	Infrarotstrahler	0,9
Luftheizung	ohne zusätzliches Gebläse	1,3
	mit zusätzlichem Gebläse	1,1

Auf Grundlage solcher systemspezifischen Einflussgrößen wird eine „Gebäude-System-Heizlast“ berechnet. Beispielhaft sie an dieser Stelle die Berechnung der Transmissionsheizlast für einen beheizten Raum (gegen Außenluft) genannt:

$$\dot{Q}_{T,ie} = (\theta_i - \theta_e) * \sum_k (U * A * f)_k \tag{22}$$

Der Korrekturfaktor f_k bildet den Einfluss des vertikalen Temperaturanstiegs ab. Er wird bauteilspezifisch – für Boden, Wände, Decken und Dächer – bestimmt.

12.1.4 Numerische Untersuchungen

Erste numerische Untersuchungen für Systeme zur Beheizung von hohen Räumen wurden von Glück [36] vorgestellt. Betrachtet wurden Luft-, Fußboden sowie Strahlplattenheizung. Untersuchungsobjekt war ein Gebäude mit den Abmessungen LxBxH = 90m x 30m x 12m. Die wichtigsten Ergebnisse dieser Untersuchung sind in Tabelle 44 zusammengestellt.

Tabelle 44 Heizlastvergleich von Heizsystemen nach Glück [36]

System	Bauhülle	Normheizlast	Simulierte Heizlast	Simulierte Heizlast / Norm-heizlast
	[W/m²K]	[kW]	[kW]	
Luftheizung	k_W=1,28	287,28	338,2	1,22
	k_D =0,92			
	k_B =1,05			
Fußbodenheizung	k_W=1,28	266,98	309,4	1,16
	k_D =0,92			
	k_B =0,52			
Strahlplattenheizung	k_W=1,28	287,28	310,7	1,08
	k_D =0,92			
	k_B =1,05			
Äußere Randbedingungen der Untersuchung: Θ_{op}=18°C; Θ_a=-15°C, Θ_{Erde}=8°C; n=0,2h^{-1}				

Betrachtet man Tabelle 44, so stellt die Strahlplattenheizung das günstigste System dar. Fußbodenheizung und Luftheizung weisen deutlich höhere Kennwerte auf. Interessant ist weiterhin, dass sämtliche Systeme die im Rahmen dieser Untersuchung betrachtet wurden eine Heizlast aufweisen, der größer als die Bezugsheizlast[34] nach DIN 4701 [5] ist.

Neben diesen wurden durch Glück neuere Untersuchungen zum Themenkomplex publiziert [37][38][39]. Das Hauptaugenmerk dieser Untersuchungen lag auf einem kritischen Vergleich der Systeme Strahlplatten-, Gasinfrarot- sowie Luftheizungen. Für unterschiedliche Wärmeschutzniveaus und Luftwechselraten bestimmte der Autor die Heizlasten. Die wichtigsten Ergebnisse dieser Arbeiten sind in Tabelle 45 zusammengefasst.

[34] In der DIN 4701-1:1983 wird fälschlich vom „Wärmebedarf" gesprochen – gemeint ist jedoch keine Energiemenge sondern eine Leistung. In der vorliegenden Arbeit wird im Falle von Leistungen von *Heizleistung* oder *Heizlast* gesprochen, *Wärme* wird hingegen als Energie/Energiemenge verstanden.

Tabelle 45 Heizlastvergleich von Heizsystemen nach Glück [37][38][39][35]

Bezeichnung	Bauhülle [W/m²K]	Normheizlast [W]	simulierte Heizlast [W]	simulierte Heizlast / Normheizlast	Bemerkung
System: Luftheizung					
LH-1a	k_W=2,0 k_D =2,0 k_B =0,9	87.893	98.458	1,12	
LH-1b	k_W=2,0 k_D =2,0 k_B =0,9	87.893	93.490	1,06	
LH-2	k_W=0,42 k_D =0,31 k_B =0,9	31.202	39.809	1,28	
System: Strahlplatte					
SP-1a	k_W=2,0 k_D =2,0 k_B =0,9	87.893	80.113	0,91	Verteilungsvariante 1
SP-2a	k_W=0,42 k_D =0,31 k_B =0,9	31.202	34.059	1,09	Verteilungsvariante 1
SP-1b	k_W=2,0 k_D =2,0 k_B =0,9	87.893	84.755	0,96	Verteilungsvariante 2
SP-2b	k_W=0,42 k_D =0,31 k_B =0,9	31.202	34.946	1,12	Verteilungsvariante 2
System: Hellstrahler					
HS-1a	k_W=2,0 k_D =2,0 k_B =0,9	87.893	87.293	0,99	
HS-1b	k_W=2,0 k_D =2,0 k_B =0,9	87.893	80.899	0,92	Veränderter h_s
HS-2	k_W=0,42 k_D =0,31 k_B =0,90	31.202	35.386	1,13	
System: Dunkelstrahler					
DS-1	k_W=2,0 k_D =2,0 k_B =0,9	87.893	82.391	0,94	
DS-2	k_W=0,42 k_D =0,31 k_B =0,90	31.202	34.817	1,12	
Äußere Randbedingungen der Untersuchung: Θ_{op}=18°C; Θ_a=-12°C, Θ_{Erde}=8°C; n=0,5h^{-1}					

Weitere umfangreiche numerische Untersuchungen liegen von Seifert et al. [40] zu Hallenheizungen vor. Die Autoren untersuchen für unterschiedliche Hallengeometrien und Randbedingungen die aufzubringende Heizleistung im stationären Zustand. Hervorzuheben ist bei den Untersuchungen, dass im Vergleich zu den Analysen von Glück die Betrachtungen unter Zuhilfenahme einer Strömungssimulation erfolgten. D.h., dass auch die

[35] Die Bezeichnung der Varianten orientiert sich an der Originalbezeichnung des Autors und spiegelt unterschiedliche geometrische Anordnungsvarianten wieder.

Transportvorgänge aufgrund von Luftbewegungen detailliert erfasst wurden. Gegenstand der Analysen bildeten Fußboden-, Luft- sowie Strahlplattenheizung bei verschiedenen Szenarien der Lüftung. Für die einzelnen Systeme sind die minimalen und maximalen Kennwerte in Tabelle 46 und 47 in Abhängigkeit der Raumhöhe dargestellt[36].

Tabelle 46 Energetische Kenndaten für Hallen bis 7 m Höhe nach Seifert et al. [40]

System	$f_{h;i}$	
	minimal	maximal
Fußbodenheizung	0,949	1,089
Luftheizung	1,116	1,139
Strahlplattenheizung	0,891	1,044

Tabelle 47 Energetische Kenndaten für Hallen bis 12 m Höhe nach Seifert et al. [40]

System	$f_{h;i}$	
	minimal	maximal
Fußbodenheizung	0,951	1,059
Strahlplattenheizung	1,141	1,161

Den Ergebnissen von Seifert et al. [40] ist dabei zu entnehmen, dass vorwiegend konvektiv wirkende Systeme eine energetisch ungünstigere Verteilung aufweisen als strahlungsdominante Systeme. Auffällig ist weiterhin, dass bei einem Vergleich der Strahlungssysteme die Fußbodenheizung kleinere energetische Kennwerte aufweist, als Systeme bei denen der Energieeintrag im Bereich der Decke erfolgt. Anzumerken ist zudem, dass in der genannten Veröffentlichung neben der rein energetischen Bewertung zusätzlich eine Beurteilung der wärmephysiologischen Verhältnisse erfolgt. An drei ausgewählten Beispielen sollen diese Daten auch im Rahmen dieser Literaturanalyse dokumentiert werden. Abbildungen 28, 29 und 30 zeigen hierzu die entsprechenden Daten.

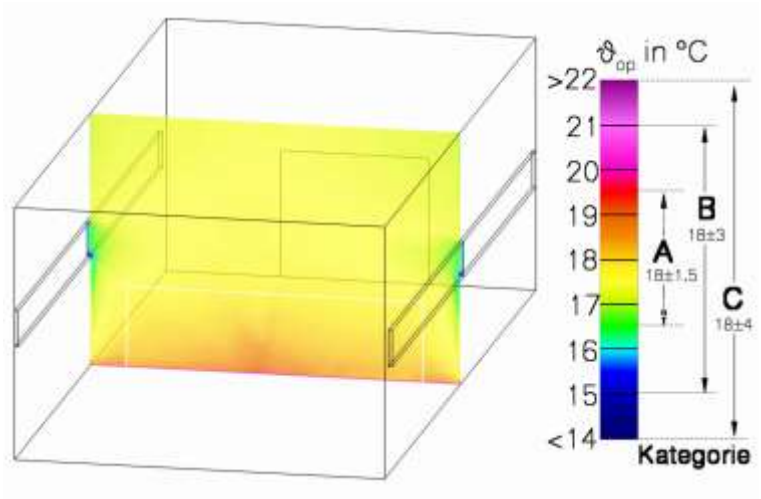


Abbildung 28 Operative Raumtemperaturen bei Einsatz einer Fußbodenheizung für eine Halle mit 7 m Höhe nach Seifert et al. [40]

[36] Der Bezug der berechneten Heizlast bei den unterschiedlichen Systemen erfolgt in 19[40] gleichfalls auf eine Normheizlast.

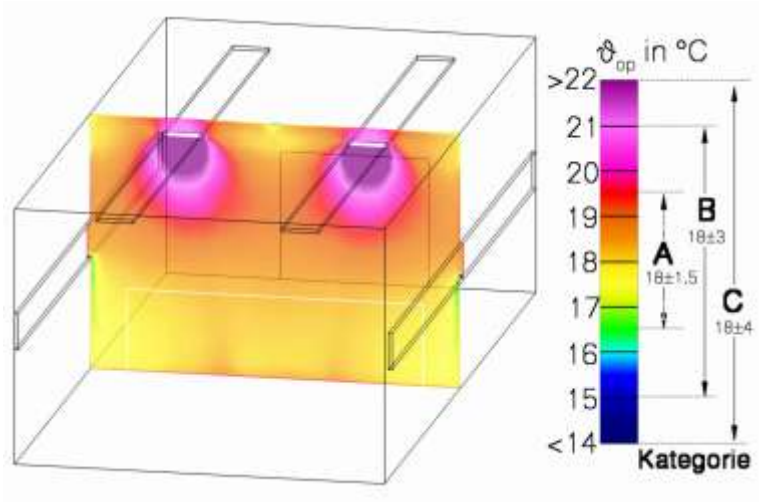


Abbildung 29 Operative Raumtemperaturen bei Einsatz einer Strahlplattenheizung für eine Halle mit 7 m Höhe nach Seifert et al. [40]

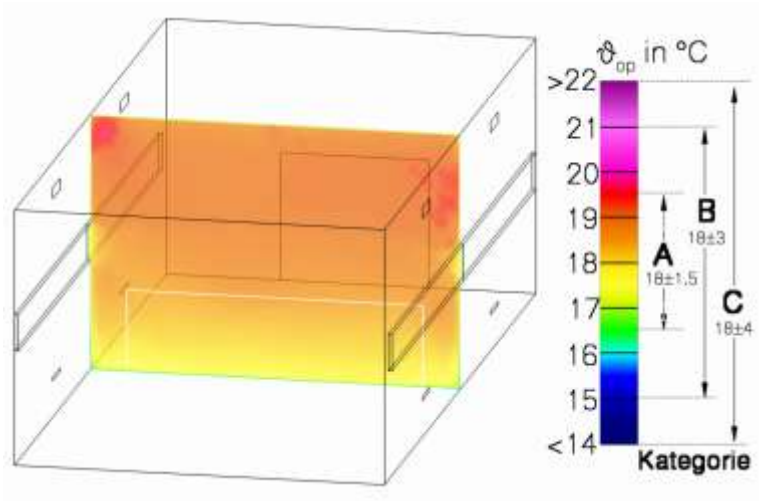


Abbildung 30 Operative Raumtemperaturen bei Einsatz einer Luftheizung für eine Halle mit 7 m Höhe nach Seifert et al. [40]

12.1.5 Normative Angaben

In den für das Fachgebiet zuständigen Normen sind lediglich pauschale Angaben zur leistungsmäßigen oder energetischen Bewertung von Heizanlagen für hohe Räume zu finden. Genannt sei hier die DIN EN 12831 [3]. Die verwendeten Zusammenhänge der Bilanzierung sind aus der folgenden Gleichung ersichtlich.

$$\dot{Q}_N = \left(\dot{Q}_{T,N} + \dot{Q}_{L,N}\right) * f_{h,i} \tag{23}$$

Für den Korrekturfaktor $f_{h,i}$ werden die in Tabelle 48 dargestellten Werte verwendet.

Tabelle 48 Raumhöhenkorrekturfaktor nach DIN EN 12831 [3]

Heizverfahren und Art oder Anordnung der Raumheizflächen	$f_{h,i}$	
	5 m bis 10 m	10 m bis 15 m
Überwiegend Strahlung		
Warmer Fußboden	1	1
Warme Decke (Temperaturniveau < 40°C)	1,15	nicht geeignet
Abwärts gerichtete Strahlung mittlerer und hoher Temperatur aus großen Höhen	1	1,15
Überwiegend Konvektion		
Natürliche Warmluftkonvektion	1,15	nicht geeignet
Zwangskonvektion Warmluft		
Querstrom aus niedriger Höhe	1,3	1,6
Abwärtsgerichtet aus großer Höhe	1,21	1,45
Querstrom mittlere und hoher Temperatur aus mittlerer Höhe	1,15	1,3

Bei Anwendung der Gleichung (23) bzw. der Faktoren nach Tabelle 48 ist jedoch zu beachten, dass diese Werte nur Gültigkeit besitzen, wenn die Norm-Heizlast unter 60 W/m² beheizter Nutzfläche liegt.

Angaben zur energetischen Einschätzung der genannten Systeme sind auch in DIN V 18599-5 [1] dokumentiert. Hierin wird ein Korrekturfaktor gegenüber dem berechenbaren Heizwärmebedarf von $f_{Radiant}$ = 0,85 angegeben, welcher für alle Heizsysteme mit wesentlicher Strahlungswirkung (Hellstrahler, Dunkelstrahler, Deckenstrahlplatten, Fußbodenheizungen) anzuwenden ist. Zudem werden Teilnutzungsgrade zur Abbildung der Einflüsse von Lufttemperaturprofil, Raumtemperaturregelung und Verlusten über Außenbauteile bei Flächenheizungen angegeben. Von diesen sollen nachfolgend einige beispielhaft aufgelistet werden. An dieser Stelle erfolgt keine Diskussion dieser Daten, da das Forschungsvorhaben unter anderem das Hinterfragen und ggf. eine Korrektur dieser Daten zum Inhalt hat. Dargestellt sind in Tabelle 49 und 50 die Teilnutzungsgrade zur Abbildung des Lufttemperaturgradienten.

Tabelle 49 η_L für Hallen bis 10 m Höhe nach DIN V 18599 [1]

System		4 m	6 m	8 m	10 m
Warmluftheizung (Luftverteilung mit normalem Induktionsverhältnis)	Luftauslass seitlich	0,98	0,94	0,88	0,83
	Luftauslass von oben	0,99	0,96	0,91	0,87
Warmluftheizung (Luftverteilung zusätzlich mit geregelter vertikaler Rezirkulation)	Luftauslass seitlich	0,99	0,97	0,94	0,91
	Luftauslass von oben	0,99	0,98	0,96	0,93
Warmwasser Deckenstrahlplatte		1	0,99	0,97	0,96
Dunkelstrahler (Strahlrohr)		1	0,99	0,97	0,96
Hellstrahler		1	0,99	0,97	0,96
Fußbodenheizung (hoher Wärmeschutz)		1	0,99	0,97	0,96

Tabelle 50 η_L für Hallen bis 20 m Höhe nach DIN V 18599 [1]

System		12 m	15 m	20 m
Warmluftheizung (Luftverteilung mit normalem Induktionsverhältnis)	Luftauslass seitlich	0,78	0,72	0,63
	Luftauslass von oben	0,84	0,78	0,71
Warmluftheizung (Luftverteilung zusätzlich mit geregelter vertikaler Rezirkulation)	Luftauslass seitlich	0,88	0,84	0,77
	Luftauslass von oben	0,91	0,88	0,83
Warmwasser Deckenstrahlplatte		0,94	0,92	0,89
Dunkelstrahler (Strahlrohr)		0,94	0,92	0,89
Hellstrahler		0,94	0,92	0,89
Fußbodenheizung (hoher Wärmeschutz)		0,94	0,92	0,89

12.1.6 Weitere Untersuchungen

Abschließend zu den Literaturanalysen sei an dieser Stelle noch auf eine Veröffentlichung von Weber [41] verwiesen, der überblicksartig Hallenheizungen und deren Charakteristik beschreibt. Der Autor analysiert verschiedene Technologien zur Beheizung von Industriehallen. Hervorzuheben ist, dass auch ein energetischer Vergleich der Systeme auf Basis der DIN V 18599 [1][2] erfolgt. Da die in der DIN V 18599 [1][2] beschriebenen Verfahren und die dabei verwendeten Faktoren jedoch in der vorliegenden Arbeit überprüft werden sollen, werden die Ergebnisse von Weber an dieser Stelle nicht diskutiert.

Weitere Untersuchungen zu großen Hallen sind in den Materialien zum IEA-ECBCS-Annex 26 dokumentiert (vgl. z.B. [42]). Allerdings galt die Aufmerksamkeit hier eher der Belüftung und weniger der Beheizung von Hallen. Da diese Untersuchungen keinen Beitrag zu der im Rahmen des Forschungsvorhabens anvisierten Zielsetzung leisten können, sei auf eine tiefergehende Dokumentation an dieser Stelle verzichtet.

12.1.7 Fazit

In der Literatur gibt es nur vereinzelt Ansätze zur Bewertung der Vorgänge bei der Beheizung von Hallen unter Einbeziehung hallenüblicher Heizungssysteme. Vielfach wird sich auf leistungsbezogene Betrachtungen (Heizlastberechnung) beschränkt. Diese – auszugsweise in 12.1.2 bis 12.1.5 dargestellten – Ansätze mögen im Rahmen einer Anlagendimensionierung durchaus anwendbar sein oder zumindest Hinweise geben. Für eine energetische Bewertung, welche das Augenmerk dieser Studie ist, sind solche Leistungsbetrachtungen jedoch nur wenig geeignet. Überdies lassen sich nur sehr vage Tendenzen ableiten, wie z.B.:

Konvektive Heizungen können mehr Leistung zur Herstellung ähnlicher raumklimatischer Bedingungen benötigen als strahlungsdominante Systeme.

Für Strahlungsheizungen kann sich ein Leistungsbedarf < Normheizlast ergeben.

12.2 Verluste der Wärmeübergabe

12.2.1 Derzeitiger Stand

Die Wärmebedarfsberechnung innerhalb der DIN V 18599 [1][2] ist hinsichtlich des Bilanzierungsrahmens und der -systematik in verschiedene Abschnitte unterteilt. Im Normteil 2 wird unter anderem der Nutzenergiebedarf der Heizung, der Heizwärmebedarf $Q_{h,b}$, ermittelt.

Dieser Wärmebedarf wird unter der idealisierten Annahme, dass Innenraumsolltemperatur, Lufttemperatur, Wand- und folglich auch Strahlungstemperatur identisch seien, berechnet. Folglich ist die Art und Weise der Wärmeübergabe nicht einbezogen. Abhängig von der Art der Wärmeübergabe an den Raum kann die Wärmemenge, welche der Wärmeübergabe bereitgestellt werden muss, jedoch größer oder kleiner ausfallen als der Bezugswärmebedarf $Q_{h,b}$. Dieser Umstand wird durch die nach DIN V 18599-5 [1] zu berechnenden Wärmeübergabeverluste $Q_{h,ce}$ berücksichtigt (vgl. Abbildung 31).

6.1 Wärmeübergabe

In diesem Abschnitt werden die energetischen Kennwerte vorgegeben, die für Heizungsanlagen zur Bestimmung der Verluste zur Wärmeübergabe im Raum erforderlich sind.

Die Berechnung von $Q_{h,ce}$ erfolgt monatlich nach Gleichung (27).

$$Q_{h,ce} = \left(\frac{f_{Radiant} f_{int} f_{hydr}}{\eta_{h,ce}} - 1 \right) Q_{h,b} \quad (27)$$

Abbildung 31 Berechnung der Wärmeübergabeverluste nach DIN V 18599-5 [1]

Hierbei sind

- $f_{Radiant}$ der Faktor zur Abbildung des Strahlungseinflusses,
- f_{int} der Faktor zur Erfassung intermittierender Betriebsweise,
- f_{hydr} der Faktor zur Erfassung des hydraulischen Abgleichs und
- $\eta_{h,ce}$ der Gesamtnutzungsgrad der Wärmeübergabe gemäß Abbildung 32.

Der Gesamtnutzungsgrad $\eta_{h,ce}$ berechnet sich grundsätzlich zu

$$\eta_{h,ce} = \frac{1}{(4 - (\eta_L + \eta_C + \eta_B))} \quad (28)$$

Dabei ist

η_L der Teilnutzungsgrad für vertikales Lufttemperaturprofil;

η_C der Teilnutzungsgrad für Raumtemperaturregelung;

η_B der Teilnutzungsgrad für spezifische Verluste der Außenbauteile.

Abbildung 32 Berechnung des Gesamtnutzungsgrades der Wärmeübergabe zur Bestimmung der Übergabeverluste

Im Rahmen des vorliegenden Projektes wird eine stärkere Differenzierung im Bereich der Wärmeübergabe zwischen verschiedenen Systemen einerseits und unterschiedlich effizienten Klassen oder Typen innerhalb der betrachteten Systeme andererseits angestrebt.

12.2.2 Strahlungseinfluss

Bei der Bestimmung des Bezugsheizwärmebedarfs $Q_{h,b}$ nach DIN V 18599-2 [1] wird implizit unterstellt, dass Strahlungs- und Lufttemperatur identisch sind. Bei strahlungsdominanten Übergabesystemen kann der Strahlungstemperatur jedoch merklich über der Lufttemperatur liegen. Hierdurch ist zur Gewährleistung einer bestimmten operativen Solltemperatur eine niedrigere Lufttemperatur notwendig, als bei der Berechnung von $Q_{h,b}$ unterstellt wird. Aus diesem Zusammenhang wird in DIN V 18599 [1][2] ein energetischer Vorteil strahlungsdominanter Wärmeübergabesysteme gegenüber vorwiegend konvektiven Systemen und ein Minderbedarf gegenüber dem Bezugswärmebedarf $Q_{h,b}$ abgeleitet.

Gemäß derzeitigem Normstand [1][2] wird pauschal zwischen Heizungssystemen mit wesentlichem Strahlungsanteil und sonstigen Systemen unterschieden. Für alle Systeme mit wesentlichem Strahlungsanteil gibt die Norm [1] $f_{Radiant}$ mit 0,85 vor, für alle anderen mit 1,0. Wird die Bewertung der Wärmeübergabe allein auf den Strahlungseinfluss $f_{Radiant}$ beschränkt, ergibt sich ein „negativer Übergabeverlust“ gemäß Gleichung (24).

$$Q_{h,ce} = -0{,}15 * Q_{h,b} \tag{24}$$

Ein strahlungsdominantes Übergabesystem hätte demnach pauschal nur 85 % des Bezugswärmebedarfs $Q_{h,b}$ an den Raum zu übergeben. Aus Sicht der Autoren ist sowohl die hierbei vorgenommene Pauschalisierung eines „Strahlungsbonus“ als auch dessen Größenordnung zu hinterfragen.

Bekanntermaßen unterscheiden sich auch strahlungsdominante Heizungssysteme hinsichtlich das Strahlungsanteils der Wärmeabgabe untereinander. Daher scheint es sinnvoll, den Faktor zur Abbildung des Strahlungseinflusses in Abhängigkeit des system- und gerätespezifischen Strahlungsanteils zu bestimmen.

Hell- und Dunkelstrahler

Für Hell- und Dunkelstrahler ist durch EN 416-2 [12] und 419-2 [13] jeweils ein normiertes Verfahren zur Bestimmung des Strahlungsfaktors (Strahlungswirkungsgrad) gegeben. Dieser ist als Verhältnis von Strahlungsleistung zu Wärmebelastung definiert.

$$R_f = \frac{Q_{(R)c}}{Q_M} \tag{25}$$

R_f	*Strahlungsfaktor [12][13]*
$Q_{(R)c}$	*Strahlungsleistung in W [12][13]*
Q_M	*gemessene Wärmebelastung bezogen auf den Heizwert des Prüfgases in W [12][13]*

Unter der Annahme, dass sich bei einer Strahlungsheizung lediglich der Strahlungsanteil der Heizleistung für die Raumbeheizung nutzen lässt, kann aus der Definition des Strahlungsfaktors (25) ein qualitative Abhängigkeit gemäß (26) abgeleitet werden.

$$\frac{P_{Aufwand}}{P_{Nutzen}} = \frac{1}{R_f} \tag{26}$$

Gleichung (26) sagt aus, dass das Verhältnis zwischen aufgewandter und nutzbarer Leistung gleich dem Kehrwert des Strahlungsfaktors ist. Instationäre Effekte vernachlässigt, lässt sich dieser Zusammenhang auch auf Wärmemengen anwenden. Es scheint daher naheliegend, dass der nach DINV 18599-5 [1] vorgesehene (Minderungs-)Faktor $f_{Radiant}$ ebenso vom Kehrwert des Strahlungsfaktors R_f abhängt. Gleichung (27) gibt einen allgemeinen Berechnungsansatz für $f_{Radiant}$ an.

$$f_{Radiant} = \frac{a}{R_f + b} + c \tag{27}$$

Seitens projektbeteiligter Herstellervertreter wurde eine Funktion zur Bestimmung des Faktors für den Strahlungseinfluss $f_{Radiant}$ formuliert, in welcher neben dem Strahlungsfaktor auch die spezifische Heizlast des Gebäudes einfließt. Hiermit wird erfasst, dass der

Strahlungsfaktor besonders bei großen Heizlasten zum Tragen kommen kann, bei kleinen hingegen schwächer ausgeprägt ist (vgl. hierzu auch 13.7.1).

$$f_{Radiant} = \frac{a}{R_F * \left(\left(\frac{\dot{Q}_{h,max}}{A_{NGF}} * \frac{Konversionsfaktor}{k_{G638}} \right)^{Exp} + add_Glied \right) + b} + c \quad (28)$$

$f_{Radiant}$	*Faktor zur Abbildung des Strahlungseinflusses [1]*
R_f	*Strahlungsfaktor [12][13]*
$Q'_{h,max}$	*maximale Heizleistung für den Auslegungstag nach DIN V 18599-2, Anhang B [1]*
a, b, etc.	*sonstige Parameter zur Anpassung der Funktion*

Vorgriff Simulationsergebnisse: Eine Auswertung der Ergebnisse der im Rahmen dieses Projektes durchgeführten Gebäudesimulationen unter Einbeziehung der Anlagentechnik lässt darauf schließen, dass Heizungssysteme mit einem sehr hohen Strahlungsanteil an der Wärmeabgabe tatsächlich energetische Vorteile gegenüber vorwiegend konvektiven Systemen haben können. Jedoch ist auf Grundlage dieser Ergebnisse ebenso anzunehmen, dass sowohl mit einem pauschalen $f_{Radiant}$ von 0,85 als auch mit dem vorgeschlagenen Ansatz gemäß Gleichung (28) eine deutliche Überbewertung dieses „Strahlungsvorteils“ vorgenommen wird.

Iterativ wurde der mit Gleichung (26) beschriebene Ansatz variiert und letztlich so angepasst, dass mit entsprechend modifizierten Berechnungen nach DIN V 18599 die in den Simulationen ermittelten Verhältnisse in guter Näherung wiedergegeben werden.

Der von der Mehrheit der Projektbegleitgruppe mitgetragene Berechnungsansatz hat folgende Form:

$$f_{Radiant} = \frac{0{,}36}{R_f - 0{,}20} + 0{,}37 * \left(\frac{70}{p_h} \right)^{0{,}12} * \left(\frac{10}{h_R} \right)^{0{,}15} + 0{,}10 \quad (29)$$

$f_{Radiant}$	*Faktor zur Abbildung des Strahlungseinflusses [1]*
R_f	*Strahlungsfaktor [12][13]*
p_h	*spezifische Leistung in W/m², ergibt sich spezifischer Heizlast und Wärmeeinträgen durch Beleuchtung+Nutzung nach DIN V 18599-2, Anhang B [1] sowie DIN V 18599-10/-100 [1][2]*
h_R	*Raumhöhe in m*

Wie schon in (28) findet sich ein Einflussglied für die Leistungsanforderung – hier jedoch mit deutlich größerem Einfluss. Zusätzlich wurde der Ansatz um ein Einflussglied für die Raumhöhe erweitert. Beide Einflussglieder bewirken bei Verringerung des jeweiligen Parameters eine Verringerung des Strahlungsvorteils:

- In hohen Räumen ist der Vorteil der Strahlungsheizung stärker ausgeprägt als in niedrigen.
- Bei hoher Leistungsanforderung ist der Vorteil der Strahlungsheizung stärker ausgeprägt als bei geringer.

Abbildung 33 können die Verläufe von $f_{Radiant}$ nach Gleichung (29) für beispielhafte Fälle entnommen werden.

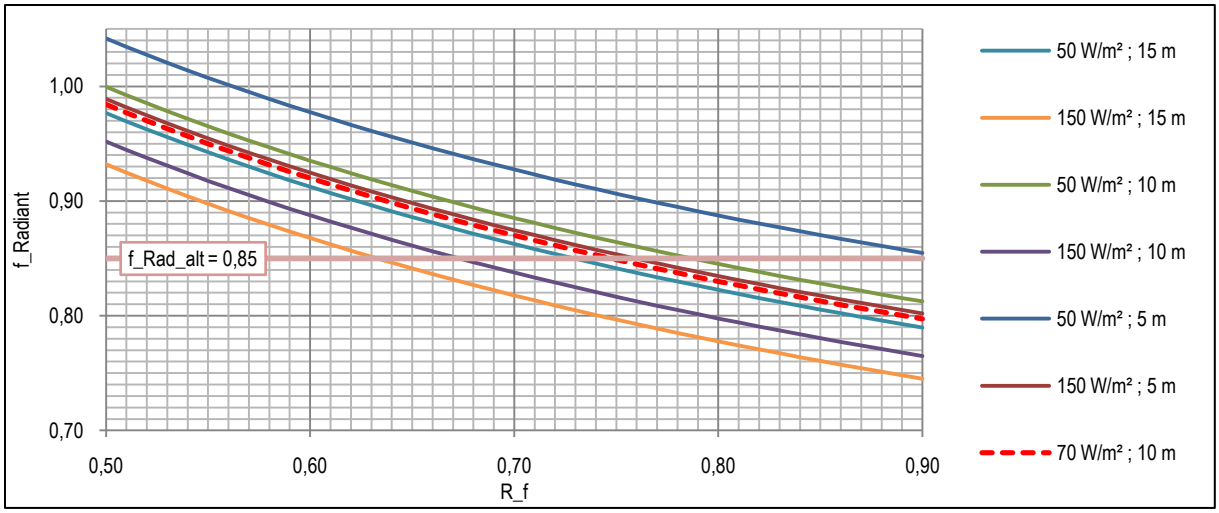


Abbildung 33 Zusammenhang zwischen Rf und fRadiant gemäß Gleichung (29)

Gemäß Gleichung (29) können sich bei niedrigen Gebäuden und/oder sehr kleine spezifische Leistungen für $f_{Radiant}$ auch Werte > 1 ergeben. Vor dem Hintergrund, dass mit $f_{Radiant}$ ursprünglich nur ein „Strahlungsvorteil“ abgebildet werden sollte, ist im Weiteren zu prüfen, ob Werte > 1 für $f_{Radiant}$ plausible Ergebnisse liefern[37].

12.2.3 Einfluss des Lufttemperaturprofils

Bei Räumen ab einer bestimmten Raumhöhe stellt sich im Heizbetrieb in der Regel eine Schichtung der Raumlufttemperatur über der Raumhöhe ein. Der vertikale Lufttemperaturanstieg ist hierbei von verschiedenen Randbedingungen abhängig. Beispielhaft seien genannt:

- Wärmeübergabesystem
  - Allgemeine Unterscheidung (Warmluftheizung, Fußbodenheizung, etc.)
  - Ggf. Unterscheidung hinsichtlich konkreter Ausführung; Bsp. Warmluftheizung
    - mit oder ohne Rezirkulationsgebläse
    - Ausblastemperatur
  - Strahlungsheizungen mit unterschiedlich hohen Strahlungsanteilen
- Unterschied zwischen Innen- und Außentemperatur sowie baulicher Wärmeschutz

Gemäß DIN V 18599 [1] wird, was naheliegt, für hohe Räume davon ausgegangen, dass durch diesen Lufttemperaturanstieg über der Raumhöhe im Vergleich zu einem Raum mit konstanter Innentemperatur (Sollwert) ein Mehrbedarf entsteht. Dieser Mehrbedarf wird über den Teilnutzungsgrad η_L erfasst.

Werden für eine isolierte Betrachtung von η_L alle anderen Einflüsse auf $\eta_{h,ce}$ außer Acht gelassen, ergibt sich ein Zusammenhang gemäß Gleichung (30).

[37] Das Niveau der Funktion wurde mithilfe eines Abgleichs zwischen Simulationsergebnissen und Berechnungsergebnissen nach DIN V 18599 angepasst. Der qualitative Verlauf von $f_{Radiant}$ ist an die Definition des Strahlungsfaktors R_f angelehnt, kann derzeit jedoch nicht empirisch belegt werden, da hierzu keine Mess- und nur in geringem Umfang Simulationsergebnisse vorliegen. Somit ist derzeit auch keine sichere Aussage dazu möglich, ob der Ergebnisbereich von $f_{Radiant}$ beschränkt werden muss.

$$2 - \eta_L = \frac{Q_{h,b} + Q_{h,ce}}{Q_{h,b}} \tag{30}$$

Dieser Zusammenhang lässt sich auch als (31) lesen.

$$2 - \eta_L = \frac{Q(\theta = \theta_{i,ist})}{Q(\theta = \theta_{ih,soll})} \leftrightarrow Q\left(\theta = \theta_{i,ist}\right) = (2 - \eta_L) * Q(\theta = \theta_{ih,soll}) \tag{31}$$

$Q(\theta = \theta_{i,ist})$ *Wärmebedarf, welcher zur Bereitstellung des realen geschichteten Innentemperaturzustands notwendig ist*
$Q(\theta = \theta_{ih,soll})$ *Wärmebedarf, welcher zur Bereitstellung der höhenkonstanten Innenraumsolltemperatur notwendig wäre; gleichbedeutend mit $Q_{h,b}$*

Hierdurch ist mit (2 - η_L) ein Faktor gegeben welcher den Bezugswärmebedarf, der sich bei einheitlicher Raumtemperatur ergäbe, erhöht. Der so erhöhte Wärmebedarf spiegelt wider, dass durch den Lufttemperaturanstieg über der Raumhöhe im Raum eine effektive (mittlere) Lufttemperatur herrscht, welcher über dem Sollwert liegt.

Die Angabe von η_L erfolgt nach aktuellem Normstand [1] tabelliert verschiedene Raumhöhen zwischen 4 m und 20 m (vgl. Abbildung 34).

Tabelle 10 — Nutzungsgrade für Räume mit Höhen 4 m bis 10 m

Einflussgrößen			Teilnutzungsgrade					
			η_L				η_C	η_B
			4 m	6 m	8 m	10 m		
Raum-tempe-ratur-regelung	Ungeregelt						0,80	
	Zweipunktregler						0,93	
	P-Regler (2 K)						0,93	
	P-Regler (1 K)						0,95	
	PI-Regler						0,97	
	PI-Regler mit Optimierung						0,99	
Heiz-systeme	Warmluftheizung	Luftauslass seitlich	0,98	0,94	0,88	0,83		1
	Luftverteilung mit normalem Induktionsverhältnis	Luftauslass von oben	0,99	0,96	0,91	0,87		1
	Warmluftheizung	Luftauslass seitlich	0,99	0,97	0,94	0,91		1
	Luftverteilung zusätzlich mit geregelter vertikaler Rezirkulation	Luftauslass von oben	0,99	0,98	0,96	0,93		1
	Warmwasser-Deckenstrahlplatten		1,00	0,99	0,97	0,96		1
	Dunkelstrahler (Strahlrohre)		1,00	0,99	0,97	0,96		1
	Hellstrahler		1,00	0,99	0,97	0,96		1
	Fußbodenheizung (hohes Wärmeschutzniveau)		1,00	0,99	0,97	0,96		
		FBH bauteilintegriert						0,95
		FBH thermisch entkoppelt						1

Abbildung 34 **DIN V 18599-5 [1]: η_L für Raumhöhen zwischen 4 und 10 m; analoge Angaben werden in einer weiteren Tabelle für die Raumhöhen 12, 15 und 20 m gemacht**

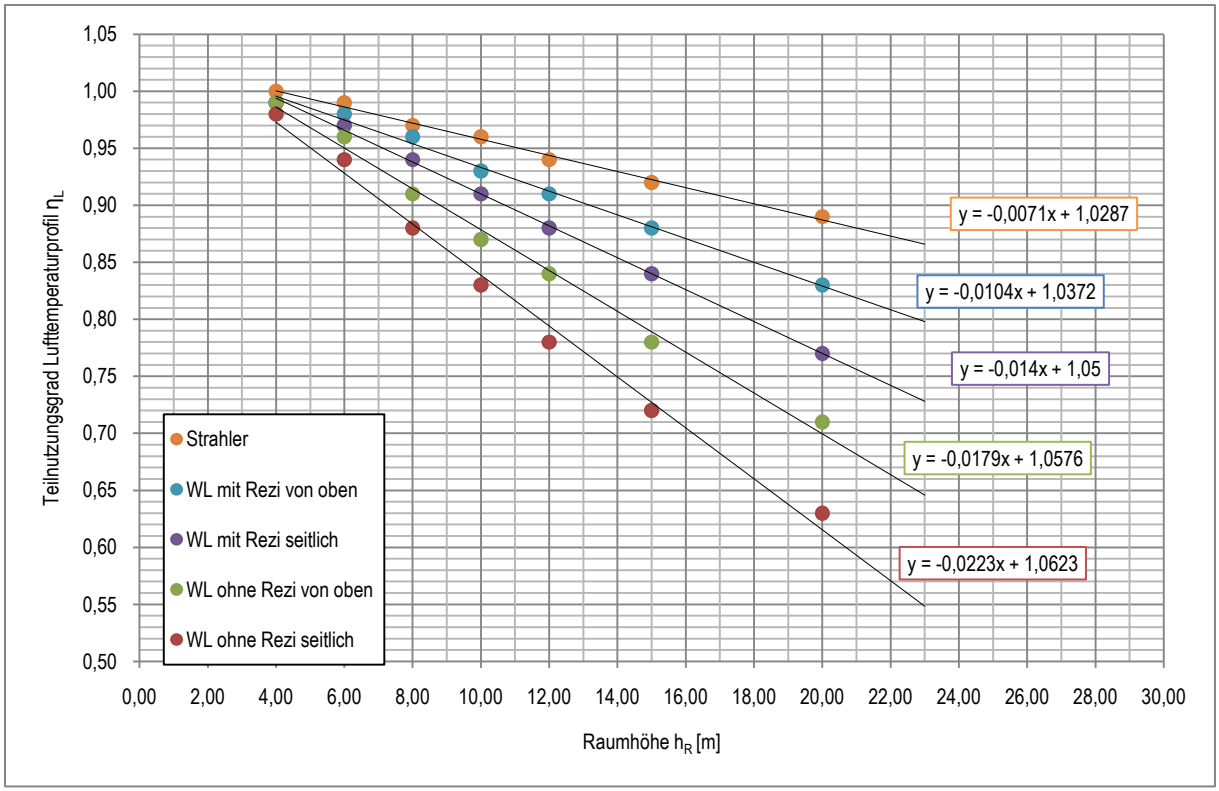


Abbildung 35 η_L gemäß DIN V 18599-5, aufgetragen über der Raumhöhen

Die nach DIN V 18599-5 für η_L vorgegebenen Werte lassen sich in guter Näherung als lineare Funktionen der Raumhöhe lesen (vgl. Abbildung 35).

Ein linearer Zusammenhang lässt sich auch auf theoretischer Ebene herleiten. Aus (31) ergibt sich mit (32) und (33) ein η_L gemäß Gleichung (34). Hierbei wird davon ausgegangen, dass die Solltemperatur in einer bestimmten Höhe h_{behagl} einzuhalten ist. Unter und über dieser Höhe darf die Temperatur vom Sollwert abweichen, also ggf. auch niedriger ausfallen.

$$Q = H_{gesamt} * t * (\theta_i - \theta_e) \tag{32}$$

$$\theta_{i,ist} = \theta_{i,m} = \theta_{ih,soll} + \theta' * \left(0{,}5 * h_{Raum} - h_{behagl}\right) \tag{33}$$

$$\eta_L = 1 - \frac{\bar{\theta}'_{Luft} * \left(0{,}5 * h_R - h_{behagl}\right)}{\theta_{ih,soll} - \theta_e} \tag{34}$$

Q	*Wärme, allgemein*
H_{gesamt}	*Gesamtwärmetransferkoeffizient*
$\theta_{i/e,ist/soll/m}$	*Innen-/Außentemperatur, Ist-/Soll-/Mittelwert*
$\bar{\theta}'_{Luft}$	*mittlerer Temperaturanstieg über der Raumhöhe*
h_{Raum}	*Raumhöhe*
h_{behagl}	*Behaglichkeitshöhe, Aufenthaltsebene (Höhe, in welcher $\theta_{ih,soll}$ einzuhalten ist)*

Werden die folgenden Randbedingungen unterstellt, ergeben sich in Abhängigkeit von Raumhöhe und Temperaturanstieg Werte für η_L gemäß Tabelle 51.

- $\theta_{ih,soll}$ = 20 °C
- θ_e = 4 °C (Annahme für mittlere Außentemperatur in Heizzeit)
- h_{behagl} = 1,1 m (Annahme für vorwiegend stehende Tätigkeit)

Tabelle 51 Teilnutzungsgrade η_L nach vorgeschlagenem Berechnungsansatz für verschiedene Raumhöhen und Lufttemperaturanstiege - Darstellung nur beispielhaft

	eta_L																				
theta' [K/m] / h_r [m]	0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00
0	1,00	1,00	1,01	1,01	1,01	1,02	1,02	1,02	1,03	1,03	1,03	1,04	1,04	1,04	1,05	1,05	1,06	1,06	1,06	1,07	1,07
1	1,00	1,00	1,00	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,04	1,04
2	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01
3	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
4	**1,00**	**1,00**	**0,99**	**0,99**	**0,99**	**0,99**	**0,98**	**0,98**	**0,98**	**0,97**	**0,97**	**0,97**	**0,97**	**0,96**	**0,96**	**0,96**	**0,96**	**0,95**	**0,95**	**0,95**	**0,94**
5	1,00	1,00	0,99	0,99	0,98	0,98	0,97	0,97	0,97	0,96	0,96	0,95	0,95	0,94	0,94	0,93	0,93	0,93	0,92	0,92	0,91
6	**1,00**	**0,99**	**0,99**	**0,98**	**0,98**	**0,97**	**0,96**	**0,96**	**0,95**	**0,95**	**0,94**	**0,93**	**0,93**	**0,92**	**0,92**	**0,91**	**0,91**	**0,90**	**0,89**	**0,89**	**0,88**
7	1,00	0,99	0,99	0,98	0,97	0,96	0,96	0,95	0,94	0,93	0,93	0,92	0,91	0,90	0,90	0,89	0,88	0,87	0,87	0,86	0,85
8	**1,00**	**0,99**	**0,98**	**0,97**	**0,96**	**0,95**	**0,95**	**0,94**	**0,93**	**0,92**	**0,91**	**0,90**	**0,89**	**0,88**	**0,87**	**0,86**	**0,86**	**0,85**	**0,84**	**0,83**	**0,82**
9	1,00	0,99	0,98	0,97	0,96	0,95	0,94	0,93	0,92	0,90	0,89	0,88	0,87	0,86	0,85	0,84	0,83	0,82	0,81	0,80	0,79
10	**1,00**	**0,99**	**0,98**	**0,96**	**0,95**	**0,94**	**0,93**	**0,91**	**0,90**	**0,89**	**0,88**	**0,87**	**0,85**	**0,84**	**0,83**	**0,82**	**0,81**	**0,79**	**0,78**	**0,77**	**0,76**
11	1,00	0,99	0,97	0,96	0,95	0,93	0,92	0,90	0,89	0,88	0,86	0,85	0,84	0,82	0,81	0,79	0,78	0,77	0,75	0,74	0,73
12	**1,00**	**0,98**	**0,97**	**0,95**	**0,94**	**0,92**	**0,91**	**0,89**	**0,88**	**0,86**	**0,85**	**0,83**	**0,82**	**0,80**	**0,79**	**0,77**	**0,76**	**0,74**	**0,72**	**0,71**	**0,69**
13	1,00	0,98	0,97	0,95	0,93	0,92	0,90	0,88	0,87	0,85	0,83	0,81	0,80	0,78	0,76	0,75	0,73	0,71	0,70	0,68	0,66
14	1,00	0,98	0,96	0,94	0,93	0,91	0,89	0,87	0,85	0,83	0,82	0,80	0,78	0,76	0,74	0,72	0,71	0,69	0,67	0,65	0,63
15	**1,00**	**0,98**	**0,96**	**0,94**	**0,92**	**0,90**	**0,88**	**0,86**	**0,84**	**0,82**	**0,80**	**0,78**	**0,76**	**0,74**	**0,72**	**0,70**	**0,68**	**0,66**	**0,64**	**0,62**	**0,60**
16	1,00	0,98	0,96	0,94	0,91	0,89	0,87	0,85	0,83	0,81	0,78	0,76	0,74	0,72	0,70	0,68	0,66	0,63	0,61	0,59	0,57
17	1,00	0,98	0,95	0,93	0,91	0,88	0,86	0,84	0,82	0,79	0,77	0,75	0,72	0,70	0,68	0,65	0,63	0,61	0,58	0,56	0,54
18	1,00	0,98	0,95	0,93	0,90	0,88	0,85	0,83	0,80	0,78	0,75	0,73	0,70	0,68	0,65	0,63	0,61	0,58	0,56	0,53	0,51
19	1,00	0,97	0,95	0,92	0,90	0,87	0,84	0,82	0,79	0,76	0,74	0,71	0,69	0,66	0,63	0,61	0,58	0,55	0,53	0,50	0,48
20	**1,00**	**0,97**	**0,94**	**0,92**	**0,89**	**0,86**	**0,83**	**0,81**	**0,78**	**0,75**	**0,72**	**0,69**	**0,67**	**0,64**	**0,61**	**0,58**	**0,56**	**0,53**	**0,50**	**0,47**	**0,44**
21	1,00	0,97	0,94	0,91	0,88	0,85	0,82	0,79	0,77	0,74	0,71	0,68	0,65	0,62	0,59	0,56	0,53	0,50	0,47	0,44	0,41
22	1,00	0,97	0,94	0,91	0,88	0,85	0,81	0,78	0,75	0,72	0,69	0,66	0,63	0,60	0,57	0,54	0,51	0,47	0,44	0,41	0,38
23	1,00	0,97	0,94	0,90	0,87	0,84	0,81	0,77	0,74	0,71	0,68	0,64	0,61	0,58	0,55	0,51	0,48	0,45	0,42	0,38	0,35
24	1,00	0,97	0,93	0,90	0,86	0,83	0,80	0,76	0,73	0,69	0,66	0,63	0,59	0,56	0,52	0,49	0,46	0,42	0,39	0,35	0,32
25	1,00	0,96	0,93	0,89	0,86	0,82	0,79	0,75	0,72	0,68	0,64	0,61	0,57	0,54	0,50	0,47	0,43	0,39	0,36	0,32	0,29
26	1,00	0,96	0,93	0,89	0,85	0,81	0,78	0,74	0,70	0,67	0,63	0,59	0,55	0,52	0,48	0,44	0,41	0,37	0,33	0,29	0,26
27	1,00	0,96	0,92	0,88	0,85	0,81	0,77	0,73	0,69	0,65	0,61	0,57	0,54	0,50	0,46	0,42	0,38	0,34	0,30	0,26	0,23
28	1,00	0,96	0,92	0,88	0,84	0,80	0,76	0,72	0,68	0,64	0,60	0,56	0,52	0,48	0,44	0,40	0,36	0,31	0,27	0,23	0,19
29	1,00	0,96	0,92	0,87	0,83	0,79	0,75	0,71	0,67	0,62	0,58	0,54	0,50	0,46	0,41	0,37	0,33	0,29	0,25	0,20	0,16
30	1,00	0,96	0,91	0,87	0,83	0,78	0,74	0,70	0,65	0,61	0,57	0,52	0,48	0,44	0,39	0,35	0,31	0,26	0,22	0,17	0,13

Hierbei muss beachtet werden, dass für eine Berechnung nach DIN V 18599 mit mittleren Verhältnissen zwischen Nichtnutzungs- und Nutzungszeit zu rechnen ist. So muss auch der Temperaturanstieg θ‘ als Mittelwert eingesetzt werden. Zweckmäßig erscheint hier eine zeitanteilige Wichtung für einen Tag mit 1- oder 1,5-Schicht-Betrieb.

Für die Berechnung der in Tabelle 51 beispielhaft dargestellten Werte von η_L wurde von konstanten Lufttemperaturanstiegen ausgegangen. Prinzipiell ist auch ein

raumhöhenabhängiger Lufttemperaturanstieg denkbar und ließe sich relativ unkompliziert in den Ansatz nach Gleichung (34) einbringen.

Bei sehr hohen Gebäuden und hohen Lufttemperaturanstiegen über der Höhe könnten sich nach Gleichung (34) auch negative Teilnutzungsgrade η_L ergeben. Für die Größe eines Nutzungsgrades scheinen solche Werte bei flüchtiger Betrachtung nicht sinnvoll. Jedoch geht der Lufttemperaturanstieg bei der Bestimmung des Wärmeaufwands $Q_{h,b} + Q_{h,ce}$ immer als Faktor in der Form 2 - η_L ein. Niedrige η_L bewirken somit rechnerisch hohe Verluste – dies behält auch für negative Werte von η_L Gültigkeit. Ein negativer Wert für η_L ist bei energetisch sehr ungünstigen Bedingungen damit sowohl mathematisch als auch in der Anschauung plausibel.

Für eine Verwendung innerhalb der DIN V 18599 scheint es zweckmäßig, anlagenspezifische Pauschalwerte des Lufttemperaturanstiegs θ' vorzugeben und den Teilnutzungsgrad η_L hieraus zu berechnen. Für die in der Berechnung verwendeten Größen

- $(\theta_{ih,soll} - \theta_e)$
- h_{behagl}

sollten aus Sicht der Autoren Pauschalwerte für mittlere Verhältnisse verwendet werden. Zwar erlaubt der Berechnungsansatz (34) eine Berechnung von η_L für beliebige Zeitschritte. Jedoch liegen den Autoren weder Daten in der notwendigen Detaillierung, wie beispielsweise systemspezifische monatsmittlere Lufttemperaturanstiege über einen ganzen Heizperiodenverlauf, vor noch wird angestrebt, das ohnehin sehr aufwendige Berechnungsverfahren nach DIN V 18599 [1] weiter zu verkomplizieren.

Ermittlung typischer Lufttemperaturgradienten

Für verschiedene Hallen liegen Messergebnisse der Lufttemperatur über der Höhe vor [45][46][47][48]. Zusätzlich sind für ein zwei Gebäude und verschiedene Heizungssysteme energetische Simulationen durchgeführt worden, aus welchen auch Lufttemperaturverläufe ersichtlich sind (vgl. Kapitel 13). Im Folgenden werden aus diesen Messwerten und Simulationsergebnissen anlagentypische mittlere Lufttemperaturanstiege abgeleitet.

Aus den Messungen ist bekannt, dass der Lufttemperaturanstieg im Gebäude nicht nur von der Art der Heizungsanlage sondern unter anderem auch von der Temperaturdifferenz innen/außen und dem baulichen Wärmeschutz, also von der Transmissionsheizlast der Außenbauteile, abhängt. Bei ansonsten gleichen Randbedingungen ergeben sich für große Temperaturdifferenzen – z.B. strenge Winter – tendenziell höhere Lufttemperaturanstiege als bei kleinen Temperaturdifferenzen. Soweit möglich, werden Messwerte bei einer Temperaturdifferenz innen/außen von ca. 16 K herangezogen. Bei deutlich abweichenden Temperaturdifferenzen müssen Annahmen zur Korrektur getroffen werden.

Abbildung 36 zeigt beispielhaft die Lufttemperaturschichtung in einer mit Warmluftheizung beheizten Halle bei einschichtigem Betrieb.

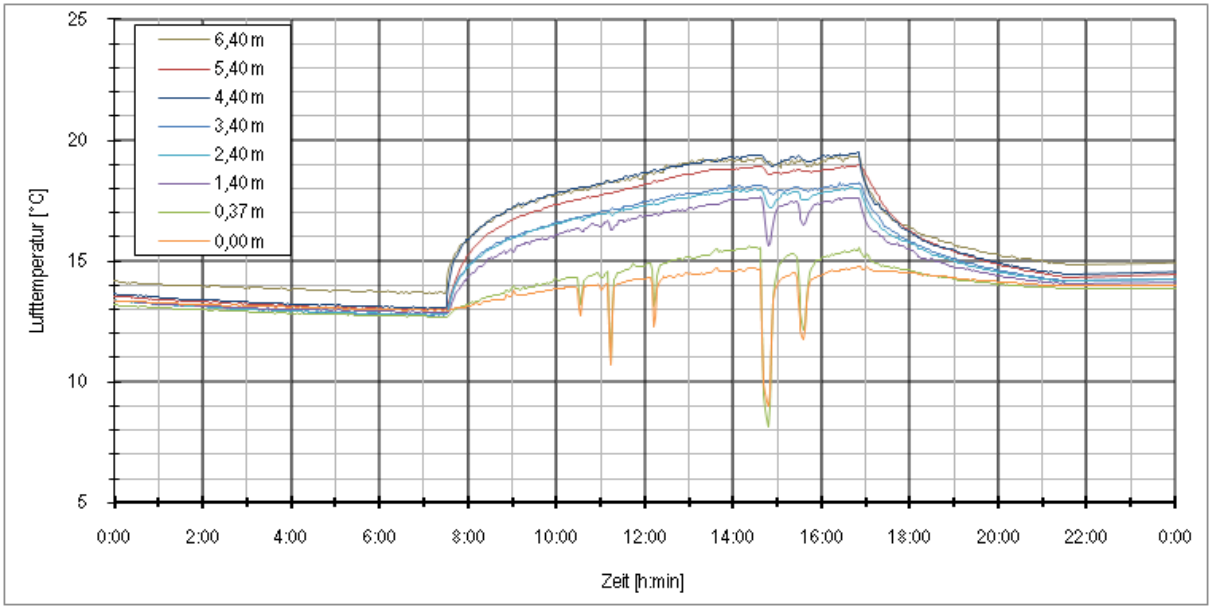


Abbildung 36 Bsp. Lufttemperaturschichtung: Hallenhöhe 6,5 m; Warmluftheizung mit Lufteinlass von oben, ohne zusätzliche Deckenventilatoren

Der Lufttemperaturgradient bzw. –anstieg, welcher zur Bestimmung des Teilnutzungsgrades η_L herangezogen werden soll, wird im Rahmen dieses Projekts als linear angenommene Erhöhung der Raumlufttemperatur über der Raumhöhe definiert. Da reale Lufttemperaturfunktionen mitunter deutlich von linearen abweichen, muss ein äquivalenter linearer Anstieg rechnerisch aus den vorhandenen Messwerten bestimmt werden.

Hierzu wird für jeden Datensatz folgendermaßen vorgegangen:

- Inter-/Extrapolation fehlender Werte

  Die vorliegenden Lufttemperatur-Messwerte werden nötigenfalls durch inter- und extrapolierte Werte ergänzt, sodass ein fein abgestufter Lufttemperaturverlauf über

die gesamte Raumhöhe, jedoch zumindest alle notwendigen Temperaturwerte vorliegen. Die Bestimmung der zusätzlichen Werte erfolgt über lineare Funktionen und/oder kubische Splines[38].

- Integration

  Es werden die Flächeninhalte zwischen Temperaturfunktion und der konstanten Solltemperatur berechnet. Die Solltemperatur sei hierbei die Temperatur, welche für eine Höhe von 1,10 m gemessen oder berechnet wurde. Flächen oberhalb der Solltemperaturlinie sind als Mehraufwand zu interpretieren, Flächen unterhalb als Minderaufwand.

- Berechnung des linearen Anstiegs

  Anschließend wird der lineare Lufttemperaturanstieg berechnet. Dabei ist die Forderung einzuhalten, dass sich für reale und lineare Temperaturfunktion je dasselbe Integral ergebe.

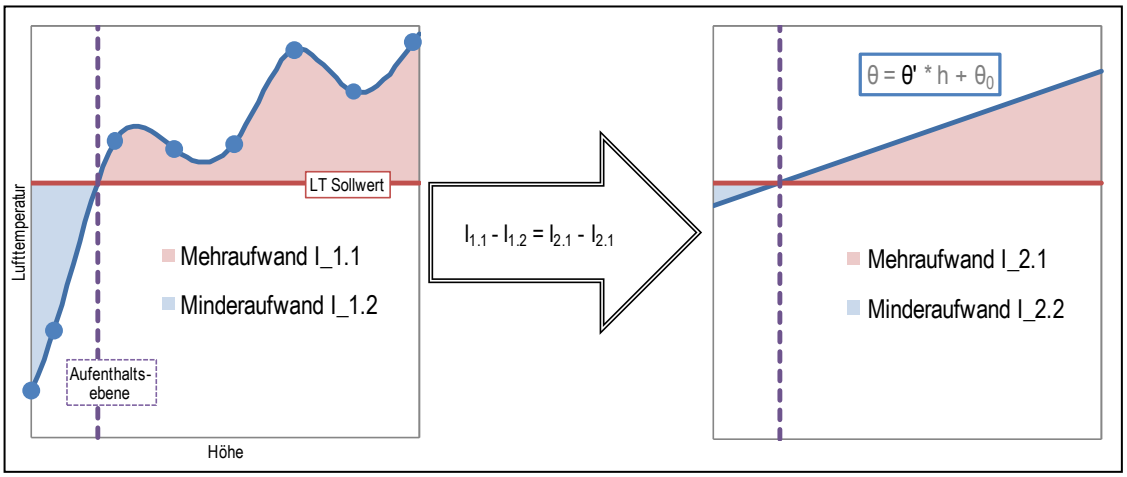


Abbildung 37 Ermittlung des linearen Lufttemperaturanstiegs über Integral der Lufttemperaturfunktion

Abschließend werden aus den linearen Lufttemperaturanstiegen, soweit möglich, Mittelwerte für die Zustände Nutzungszeit und Nichtnutzungszeit gebildet.

Der mittlere anlagenspezifische Lufttemperaturanstieg ergibt sich als Mittelwert der Werte für Nutzungs- und Nichtnutzungszeit. Die Wichtung zwischen Nutzungs- und Nichtnutzungszeit sei 1:1 – dies entspricht einem idealisierten 1,5-Schicht-Betrieb, kann jedoch auch als Betrieb mit geringerem Nutzungszeitanteil, Vorheizzeit und verzögerter Reaktion der Temperaturschichtung nach Nutzungszeitende verstanden werden.

[38] Hiermit lassen sich besonders glatte Funktionen inter- bzw. extrapolieren. Es wird unterstellt, dass die Lufttemperaturfunktion über der Höhe keine sprunghaften Änderungen oder scharfe Knicke aufweist.

Tabelle 52 Lufttemperaturanstiege, ermittelt aus Lufttemperaturmessungen

Objekt	Wärmeübergabe			Lufttemperaturanstieg [K/m]			Bemerkung
				Nutzungszeit	Nichtnutzungszeit	Mittel	
Wolf Schulungszentrum	indirekter Lufterhitzer	Luftauslass von oben	ohne WL-Rückführung	0,88	0,15	0,52	-
			mit WL-Rückführung	-0,03	-	-	mittlere Temperaturdifferenz innen/außen 14,4 K
J. Bolsius Messungen LH Halle A	direkter Warmlufterzeuger	Luftauslass von oben	mit WL-Rückführung	1,00	0,21	0,61	Messung bei sommerlichen Außentemperaturen, Anlage durchgehend im Volllastbetrieb (kein „Einschwingen“, sondern stetige Temperaturerhöhung); WL-Rückführung für vorliegende Bedingungen unterdimensioniert (Einflussbereich bis 7…8 m unter Decke)
J. Bolsius ELVHIS-Messkampagne Halle 1 (Düren)	Hellstrahler	Schrägmontage an Außenwänden (zweiseitig)		0,43	-0,03	0,20	Temperaturdifferenz innen/außen 20…22 K
J. Bolsius ELVHIS-Messkampagne Halle 4	Hellstrahler	Schrägmontage an Außenwänden (zweiseitig) und in Hallenmitte		0,09	0,05	0,07	Temperaturdifferenz innen/außen 13…19 K; nur 1 Std. Heizbetrieb, Ergebnisse daher nur bedingt belastbar
J. Bolsius ELVHIS-Messkampagne Halle 5	Hellstrahler	Schrägmontage an Außenwänden (zweiseitig) und in Hallenmitte		0,16	-0,07	0,05	Temperaturdifferenz innen/außen 14…18 K; nur 2 Std. Heizbetrieb dokumentiert
J. Bolsius ELVHIS-Messkampagne Halle 6	Hellstrahler	Schrägmontage an Außenwand (einseitig) + Deckenmontage		0,69	0,31	0,50	Temperaturdifferenz innen/außen 16,5…24 K; viele Toröffnungen; teilweise starke Verschattung durch Hochregale
J. Bolsius ELVHIS-Messkampagne Halle 7	Hellstrahler	Schrägmontage an Außenwänden (zweiseitig) und in Hallenmitte		0,41	-	-	Temperaturdifferenz innen/außen ca. 18 K
J. Bolsius ELVHIS-Messkampagne Halle 9	Hellstrahler	Schrägmontage in Hallenmitte (Längsachse)		0,49	0,23	0,36	Temperaturdifferenz innen/außen 4…8 K; Strahler teilweise händisch auf Volllastbetrieb gestellt
J. Bolsius ELVHIS-Messkampagne Halle 10	Hellstrahler	Schrägmontage an Hallendecke 35…40°		0,52	-	-	Temperaturdifferenz innen/außen 1…6 K; gemäß Messprotokoll Betrieb mit Nachtabsenkung – jedoch keine merkliche Temperaturabsenkung aus Messdaten ablesbar; evtl. Defekt der Strahler/Regelung
Messung durch Hallenbetreiber; Raupenkranhalle Ehingen	Hellstrahler	Wandmontage, zweiseitig und Hallenmitte		< 0,15	nahe 0	< 0,10	Temperaturdifferenz innen/außen 15…20 K; Messschriebe liegen nur in Diagrammform vor (keine exakte Ablesung möglich); keine LT-Messwerte unterhalb h = 3m, daher große Unsicherheit bei Bestimmung LT-Anstieg
Messungen in Strömungszelle FH Zwickau	Deckenstrahlplatten	Standardplatte		0,49	-	-	geringe Raumhöhe (4 m); verhältnismäßig wenige Messwerte über Höhe, hohe Unsicherheit bei Integralbildung
		strahlungsoptimierte Platte		0,12	-	-	

Tabelle 53 Lufttemperaturanstiege, ermittelt aus energetischen Simulationen

Objekt	Wärmeübergabe	Variante	Lufttemperaturanstieg							
			Freitag 05.04. (theta_e ≈ 4 °C)				Mittwoch 16.01. (theta_e ≈ -1 °C)			
			Nutzungszeit	Nichtnutzungszeit	Mittel		Nutzungszeit	Nichtnutzungszeit	Mittel	
Gebäudesimulation mit Anlagentechnik in Anlehnung an ELVHIS-Messkampagne Halle 1; jeweils Ausgangsvariante (Boden ungedämmt) Variante 24.01.2011: halbe Höhe (~7 m)	Hellstrahler	17.12.2010	0,33	0,06	0,20		0,42	0,07	0,25	
		15.01.2011	0,41	0,10	0,26	0,19	0,52	0,11	0,32	0,23
		24.01.2011	0,25	0,01	0,13		0,27	0,00	0,14	
	Fußbodenheizung	17.12.2010	0,00	-0,08	-0,04		-0,01	-0,10	-0,06	
		15.01.2011	0,24	0,02	0,13	0,05	0,17	-0,04	0,07	0,01
		24.01.2011	0,15	-0,04	0,06		0,10	-0,06	0,02	
	Luftheizung mit Warmluftrückführung	17.12.2010	0,25	0,03	0,14		0,29	0,03	0,16	
		15.01.2011	0,23	0,03	0,13	0,16	0,30	0,04	0,17	0,19
		24.01.2011	0,38	0,01	0,20		0,48	0,02	0,25	
	Deckenstrahlplatten	17.12.2010	0,31	0,07	0,19		0,37	0,08	0,23	
		15.01.2011	0,44	0,10	0,27	0,20	0,55	0,14	0,35	0,24
		24.01.2011	0,28	0,01	0,15		0,30	0,01	0,16	

Warmluftheizungen

Der Lufttemperaturanstieg hängt hier sehr stark von der (erzwungenen) Durchmischung der Raumluft ab. So lässt sich klar zeigen, dass die erhöhte Luftdurchmischung durch zusätzlich zur Luftheizung angebrachte Deckenventilatoren deutlich niedrigere Lufttemperaturanstiege bewirkt, als die Variante ohne Deckenventilatoren.

Die Temperaturdifferenzen innen/außen liegen für die ausgewählten Messwerte des Messobjektes *Wolf Schulungszentrum* in der Größenordnung 16 K [39]. Es wird davon ausgegangen, dass die Konfiguration der Anlage hier nah am Optimum hinsichtlich Luftdurchmischung lag. Auch verlangte der eigens für die Messung eingerichtete Aufbau eine Messung der Lufttemperaturen in relativer Nähe zu Lufterhitzer und ggf. Deckenventilatoren. Es ist anzunehmen, dass Werte in der Praxis daher auch ungünstiger ausfallen können. Für einen Normungsvorschlag wäre hier tendenziell „nach oben“ zu korrigieren. Diese Vermutung legen auch die Ergebnisse zu Messobjekt *Halle A* nahe, wobei die ungünstigen Messbedingungen von *Halle A* einbezogen werden müssen.

Beim Blick auf die Simulationsergebnisse – Tabelle 53 – müssen Eigenheiten des verwendeten Simulationswerkzeugs beachtet werden. Dieses erlaubt eine sehr detaillierte Abbildung von Strahlungsvorgängen. Strömungsvorgänge werden jedoch über ein vereinfachtes Zonenmodell abgebildet. Hieraus ergeben sich tendenziell geringere Lufttemperaturanstiege, als in der Praxis zu erwarten (vgl. Kapitel 13)

Hellstrahler

In den zugrundeliegenden Messungen wurde deutlich, dass das System Hellstrahler in der Praxis keine wesentlichen Luftströmungen erzeugt, und sich in der Regel eine sehr stabile Schichtung mit geringem Anstieg der Raumlufttemperatur einstellt. Dennoch zeigen sich deutliche Unterschiede der Lufttemperaturanstiege – wenn auch auf insgesamt verhältnismäßig niedrigem Niveau – zwischen verschiedenen Messobjekten. Es lassen sich Abhängigkeiten des Lufttemperaturanstiegs, u.a. von folgenden Parametern vermuten:

- Gleichmäßigkeit der Ausleuchtung (Strahleranzahl und –verteilung über der zu beheizenden Fläche)
- Verschattung (z.B. durch Hochregale, Kranbahnen, Kabeltrassen etc.)
- Störungen wie „Kaltluftseen“ durch häufige Toröffnungsvorgänge

Auf eine tiefergehende Untersuchung dieser Effekte wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit verzichtet.

Die Messungen wurden in real genutzten Hallengebäuden bei zumeist winterlichen Bedingungen durchgeführt. Die Temperaturdifferenzen innen/außen liegen in vielen Fällen im Bereich von 16 K oder darüber.

Es wird angenommen, dass sich für Dunkelstrahler ähnliche Verhältnisse einstellen.

[39] Im Rahmen der Auswertung wurden Lufttemperatur-Messwerte herangezogen, für welche sich Temperaturdifferenzen innen/außen in der Größenordnung von 16 K ergaben. Innerhalb des Messzeitraums ergaben sich jedoch auch wesentlich höhere Temperaturdifferenzen bis > 30 K. Bei höheren Temperaturdifferenzen waren tendenziell höhere Lufttemperaturanstiege zu beobachten.

Deckenstrahlplatten

Für Deckenstrahlplatten liegen bisher nur Messungen aus einem Testraum mit geringer Höhe (4 m) vor. Aufgrund der geringen Raumhöhe und der Kühlung der Umfassungsflächen auf eine konstante Innen-Oberflächentemperatur fällt ein direkter Vergleich mit Messungen unter realen Heizbedingungen schwer. Es wird jedoch angenommen, dass sich für übliche Hallenhöhen unter realen Heizbedingungen tendenziell höhere Lufttemperaturanstiege ergeben können.

Vorgriff: Die Simulationsergebnisse zeigen, dass die relativ ungerichtete Strahlungsabgabe bei Deckenstrahlplatten eine deutliche Erwärmung der Außenwände im oberen Hallenbereich bewirkt. Die im Vergleich zu anderen Systemen stärker erwärmten Bauteile der Umfassungskonstruktion erhöhen einerseits den Lufttemperaturanstieg im oberen Hallenbereich und sorgen andererseits für erhöhte Transmissionswärmeverluste nach außen. Die Erhöhung des Lufttemperaturanstiegs im oberen Hallenbereich hat in den untersuchten Fällen auf den integral gemittelten Lufttemperaturanstieg über die Gesamthöhe nur relativ geringen Einfluss. Die Erwärmung der Umfassungskonstruktion scheint jedoch energetisch relevant zu sein (vgl. Kapitel 13). Diese wäre nach DIN V 18599 mit dem Teilnutzungsgrad η_B zu erfassen. Im Falle von Deckenstrahlplatten müsste η_B jedoch als eine Funktion der Gebäudegeometrie, zumindest von der Raumhöhe, formuliert werden. Zur Abbildung dieser Zusammenhänge scheint es den Autoren zweckmäßig, η_B auch weiterhin konstant zu belegen, und ersatzweise den Lufttemperaturanstieg etwas höher anzusetzen, als nach Simulationsergebnis zu vermuten.

Fußbodenheizung

Messergebnisse zu Hallen mit Fußbodenheizungen liegen bislang nicht vor. In den durchgeführten Gebäudesimulationen war praktisch kein Lufttemperaturanstieg über der Höhe zu erkennen.

Vorschlag Normwerte

Tabelle 54 gibt Größenordnungen mittlerer Lufttemperaturanstiege an, welche aus Sicht der Autoren für eine energetische Bewertung nach DIN V 18599 unter Verwendung des vorgeschlagenen Ansatzes zur Berechnung von η_L geeignet sind.

Tabelle 54 typische mittlere Lufttemperaturgradienten für Normung, Vorschlag

Wärmeübergabe			Lufttemperaturanstieg [K/m]
Warmluftheizung	ohne Warmluftrückführung (Deckenventilatoren)	seitlicher Luftauslass	1
		Luftauslass von oben	0,6
	mit Warmluftrückführung (Deckenventilatoren)		0,20…0,40
Dunkelstrahler			0,20
Hellstrahler			0,20
Deckenstrahlplatten			0,20…0,30
Fußbodenheizung			0,10

12.3 Verluste der Wärmeerzeugung (dezentrale Erzeuger)

12.3.1 Derzeitiger Stand DIN V 18599-5

Gegenwärtig erfolgt die Berechnung der Erzeugerverluste dezentraler Wärmeerzeuger in hohen Räumen gemäß Abbildung 38.

6.4.3.4.5 Hallenheizung

Dunkelstrahler (Art C), dezentraler Warmlufterzeuger (Art C)

Der Verlust der Wärmeerzeugung für Dunkelstrahler und dezentrale Warmlufterzeuger ergibt sich zu:

$$Q_{h,g} = f \cdot Q_{h,outg} \quad \text{in kWh je Monat} \qquad (131)$$

Dabei ergeben sich folgende Nutzungsgrade (siehe Tabelle 36).

Tabelle 36 — Nutzungsfaktor

Nennwärmeleistung kW	Faktor f
> 4 bis 25	0,111
> 25 bis 50	0,099
> 50	0,087

Dabei ist davon auszugehen, dass diese Wärmeerzeuger im Nutzraum raumluftunabhängig aufgestellt sind und an einer konzentrischen Luft-/Abgasleitung angeschlossen sind.

Hellstrahler (Art A)

Die Heizungsanlage besteht in der Regel aus mehreren Hellstrahlern. Der Verlust der Wärmeerzeugung für Hellstrahler-Anlagen ergibt sich zu:

$$Q_{h,g} = V_{Abluft,spez} \cdot c_{p,Abluft} \cdot (\vartheta_{Abluft} - \vartheta_{Außen}) \cdot t_{h,rL} \qquad (132)$$

Dabei ist

$V_{Abluft,spez}$ der spezifische Verbrennungsluftbedarf = 10 m³/(h · kW Heizlast);

$c_{p,Abluft}$ die spezifische Wärmekapazität = 0,361 Wh/(m³ · K);

ϑ_{Abluft} die Ablufttemperatur = 18 °C;

ϑ_{e} die mittlere monatliche Außenlufttemperatur (siehe 4.1), in (°C);

$t_{h,rL}$ die monatliche rechnerische Laufzeit (siehe 5.4.1), in h.

Dabei ist davon auszugehen, dass diese Wärmeerzeuger im Nutzraum aufgestellt sind und eine indirekte Abgasführung nach DIN EN 13410 besitzen.

Abbildung 38 Berechnung der Verluste der Wärmeerzeugung dezentraler Hallenheizungen nach DIN V 18599-5

Hierbei wird der Erzeugerverlust für Geräte mit direkter Abgasführung mithilfe eines Verlustfaktors auf Grundlage der Erzeugernutzwärmeabgabe bestimmt. Der verwendete Verlustfaktor ist ein Ausdruck der Geräteeffizienz hinsichtlich der Wärmeerzeugung.

Für Hellstrahler mit indirekter Abgasführung, für welche der Wirkungsgrad – bezogen auf die Gesamtwärmeabgabe – in der Regel nicht bekannt ist, werden die Verluste der Erzeugung als Lüftungswärmeverluste definiert, welche sich durch die Abfuhr des Abgas-Luft-Gemischs aus dem Gebäude ergeben.

Diese Ansätze sind prinzipiell zweckmäßig, jedoch in zweierlei Hinsicht überarbeitungsbedürftig. Zum einen werden nach *DIN V 18599-5/-100, Gl. 131/132* heizwertbezogene Wärmeerzeugerverluste berechnet, während die Norm jedoch Brennwertbezug verlangt; zum anderen scheint angesichts wachsender Vielfalt der

verwendeten Geräte weitere Differenzierung zwischen unterschiedlichen Gerätevarianten angebracht.

12.3.2 Überarbeitung des bestehenden Ansatzes

Der in DIN V 18599-5:2007-02 [1] verwendete Berechnungsansatz für Systeme mit direkter Abgasführung ist mit Gleichung (35) gegeben.

$$Q_{h,g} = f_{h,g} * Q_{h,outg} \tag{35}$$

Der Verlustfaktor $f_{h,g}$ beschreibt hierbei die Effizienz des Wärmeerzeugers. Führt man sich die Definition des Erzeugernutzungsgrades – Gleichung (36) – vor Augen, lässt sich der Erzeugerverlustfaktor mit Gleichung (37) beschreiben. Gemäß der Forderung, die Wärmeerzeugerverluste brennwertbezogen[40] zu berechnen, ist der hierbei verwendete Nutzungsgrad brennwertbezogen definiert.

$$\frac{nutzbare\ Waerme}{zugefuehrte\ Energie} = \eta_{h,g(HS)} = \frac{Q_{h,outg}}{Q_{h,outg} + Q_{h,g}} \tag{36}$$

$$f_{h,g} = \frac{1}{\eta_{h,g(HS)}} - 1 \tag{37}$$

Bei der Verwendung heizwertbezogener Wirkungsgrade, wie sie in der Regel von Herstellern angegeben werden, ist der Verlustfaktor $f_{h,g}$ nach Gleichung (38) zu bestimmen. Der brennstoffspezifische Umrechnungsfaktor $f_{HS/HI}$ ist DIN V 18599-1, *Anhang B* [1] zu entnehmen. Somit ergibt sich der Erzeugerverlust $Q_{h,g}$ gemäß Gleichung (39).

$$f_{h,g} = \frac{f_{HS/HI}}{\eta_{h,g}} - 1 \tag{38}$$

$$Q_{h,g} = \left(\frac{f_{HS/HI}}{\eta_{h,g}} - 1\right) * Q_{h,outg} \tag{39}$$

Die Berechnung der Erzeugerverluste nach Gleichung (39) ist prinzipiell auf alle betrachteten dezentralen Heizungssysteme anwendbar, sofern für diese Erzeugernutzungsgrade bekannt sind.

Sonderfall Hellstrahler mit indirekter Abgasführung

Bei Hellstrahlern ohne Abgasanlage erfolgt die Abgasführung indirekt, in der Regel über decken- oder wandmontierte Abluftventilatoren. Für diese Geräte liegen normalerweise keine Wärmeerzeugungsnutzungsgrade vor. Den Autoren ist auch kein Normiertes Verfahren zur Bestimmung dieser Größe bekannt.

[40] Endenergiemengen von Wärmeerzeugern sind nach DIN V 18599 19[1] brennwertbezogen anzugeben. Folglich sind die hierin enthaltenen Erzeugerverluste auch in Bezug auf den Brennwert des verwendeten Energieträgers zu berechnen.

Die heizwertbezogenen Verluste der Wärmeerzeugung lassen sich hier jedoch als Lüftungswärmeverluste, welche durch das aus dem Gebäude austretende Abgas-Luft-Gemisch verursacht wird, nach den Gleichungen (40) und (41) bestimmen. Ein ähnlicher Ansatz wurde in leicht vereinfachter Form mit DIN V 18599-5/-100, *Gleichung 132* [1][2] bereits verfolgt.

$$Q_{h,g(HI)} = \dot{Q}_{Abgas(HI)} * t_{Betrieb} \tag{40}$$

$$\dot{Q}_{Abgas(HI)} = \dot{V}_{Abluft,spez} * \dot{Q}_{Nenn} * c_p * (\theta_{Abluft} - \theta_e) \tag{41}$$

$Q_{h,g}$	*Verluste der Wärmeerzeugung*
Q'_{Abgas}	*Lüftungsverlustleistung durch Abfuhr des Abgas-Luftgemischs*
$t_{Betrieb}$	*tatsächliche Betriebszeit der Heizung*
$V'_{Abluft,spez}$	*spezifischer Verbrennungsluftbedarf nach EN 13410*
Q'_{Nenn}	*Gesamt-Nennfeuerungswärmeleistung des Erzeugersystems*
c_p	*spezifische Wärmekapazität des aus dem Gebäude austretenden Abgas-Luft-Gemischs*
θ_{exh}	*durchschnittliche Temperatur der aus dem Gebäude austretenden Abluft*
θ_e	*mittlere monatliche Außentemperatur nach DIN V 18599-10*

Die hierbei verwendete tatsächliche Betriebszeit der Heizung $t_{Betrieb}$ („Brennerstunden“) wird im Rahmen einer Energiebedarfsberechnung nach DIN V 18599 nicht ermittelt und steht somit nicht zur Verfügung. Auch dürfte die Leistung der Hellstrahler-Anlage zum Zeitpunkt einer Energiebedarfsberechnung in vielen Fällen unbekannt sein. Die Gleichungen (40) und (41) werden daher über den Zusammenhang (42) in (43) überführt, sodass die *tatsächliche Betriebszeit der Heizung* und die *Nennleistung* als Eingangsgrößen entfallen. An ihrer Stelle ist nunmehr eine Energie einzubringen.

$$Q = \dot{Q} * t \tag{42}$$

$$Q_{h,g(HI)} = \dot{V}_{Abluft,spez} * Q_{h,f(HI)} * c_p * (\theta_{Abluft} - \theta_e) \tag{43}$$

Der Anschauung nach ist hierfür die Endenergie Wärme $Q_{h,f}$ zu verwenden, da diese Größe die energetische Entsprechung des verbrannten Brennstoffs ist und die gesamte bei der Verbrennung entstandene Abgasmenge abgeführt werden muss. Der Bezug auf die Endenergie ist jedoch problematisch, da sie an dieser Stelle des Berechnungsablaufs noch nicht bestimmt wurde. Über den Zusammenhang (44) lässt sich jedoch ein Bezug der Erzeugerverluste auf die Erzeugernutzwärmeabgabe $Q_{h,outg}$ herstellen.

$$Q_{h,f(HI)} = Q_{h,outg} + Q_{h,g(HI)} \tag{44}$$

$$Q_{h,g(HI)} = Q_{h,outg} * \left(\frac{1}{1 - \dot{V}_{Abluft,spez} * c_p * (\theta_{Abluft} - \theta_e)} - 1 \right) \tag{45}$$

$\theta_{ih,soll,Luft}$	*Lufttemperaturkomponente der Innenraumsolltemperatur [°C]*

h_{Abluft} *Höhe der Öffnung zur Abgasabführung*
h_{behagl} *Behaglichkeitshöhe, Aufenthaltshöhe, in welcher die Innenraumsolltemperatur $\theta_{ih,soll}$ einzuhalten ist [m]*

Somit kann auch für Hellstrahler ein Verlustfaktor formuliert werden, welcher in seiner Struktur dem Verlustfaktor nach (37) entspricht. Aus diesem kann die Definition eines rechnerischen Wärmeerzeugernutzungsgrades für Hellstrahler mit indirekter Abgasführung abgeleitet werden.

$$f_{h,g(HI)} = \frac{1}{1 - \dot{V}_{Abluft,spez} * c_p * (\theta_{Abluft} - \theta_e)} - 1 \quad (46)$$

$$\eta_{h,g} = 1 - \dot{V}_{Abluft,spez} * c_p * \left(\theta_{Abluft} - \theta_e\right) \quad (47)$$

Der nach Gleichung (47) bestimmte Nutzungsgrad ist heizwertbezogen definiert. Für die Verwendung in DIN V 18599-5 muss eine Heizwert-Brennwert-Korrektur nach (38) erfolgen. Im Rahmen des Monatsbilanzverfahrens [1] bietet es sich an, den Nutzungsgrad nach (47) monatsweise mit der jeweiligen monatsmittleren Außentemperatur zu berechnen. Des Weiteren ist zu beachten, dass sich bei niedrigen Gebäuden und geringen Temperaturdifferenzen innen/außen zu Anfang/Ende der Heizperiode rechnerische Wirkungsgrade > 1 ergeben können. Das Ergebnis ist daher auf einen Maximalwert von 1 zu begrenzen.

Als unbekannte Größe ist nun nur noch die Ablufttemperatur enthalten. Sie kann in guter Näherung mithilfe eines linear angenommenen Lufttemperaturanstiegs und der Gebäudehöhe bestimmt werden. Als Stützwert dient hierbei der Sollwert der Lufttemperatur. Dieser kann aus der Innenraumsolltemperatur $\theta_{ih,soll}$, welche als operative Temperatur aufzufassen ist, bestimmt werden.

$$\theta_{Abluft} = \theta'_{Luft} * \left(h_{Abluft} - h_{behagl}\right) + \theta_{ih,soll,Luft} \quad (48)$$

Für eine Verwendung im Rahmen der Norm bietet es sich an, bestimmte Größen als Pauschalwerte vorzugeben und ggf. Vereinfachungen zu treffen.

- Spezifischer Verbrennungsluftbedarf nach DIN EN 13410 $V_{Abluft,spez}$ = 10 m²/(h*kW_{HI})
- Spezifische Wärmekapazität des aus dem Gebäude austretenden Abgas-Luft-Gemischs c_p = 0,34 * 10^{-3} kWh/m³K
- Lufttemperaturanstieg θ'_{Luft} = 0,25 K/m
- Höhe der Öffnung zur Abführung des Abgas-Luft-Gemischs: vereinfachend kann die Raumhöhe eingesetzt werden $h_{Abluft} = h_R$
- Aufenthaltshöhe: vereinfachend kann h_{behagl} = 0 m angenommen werden
- Differenz zwischen operativer Temperatur und Lufttemperatur: 2 K

Mit diesen Pauschalwerten und Vereinfachungen ergibt sich der Erzeugernutzungsgrad gemäß Gleichung (49).

$$\eta_{h,g} = min\left(1 - \dot{V}_{ABL,spez} * c_{p,ABL} * \left(0{,}25\frac{K}{m} * h_R + \theta_{ih,soll} - 2K - \theta_e\right); 1\right) \quad (49)$$

Ein Vergleich von Erzeugernutzungsgraden nach Gleichung (49) mit Werten, welche aus Simulationsergebnissen ermittelt wurden, soll zeigen, ob mit Gleichung (49) plausible Ergebnisse berechnet werden. Entsprechende Darstellungen sind den Abbildungen 39 und 40 zu entnehmen.

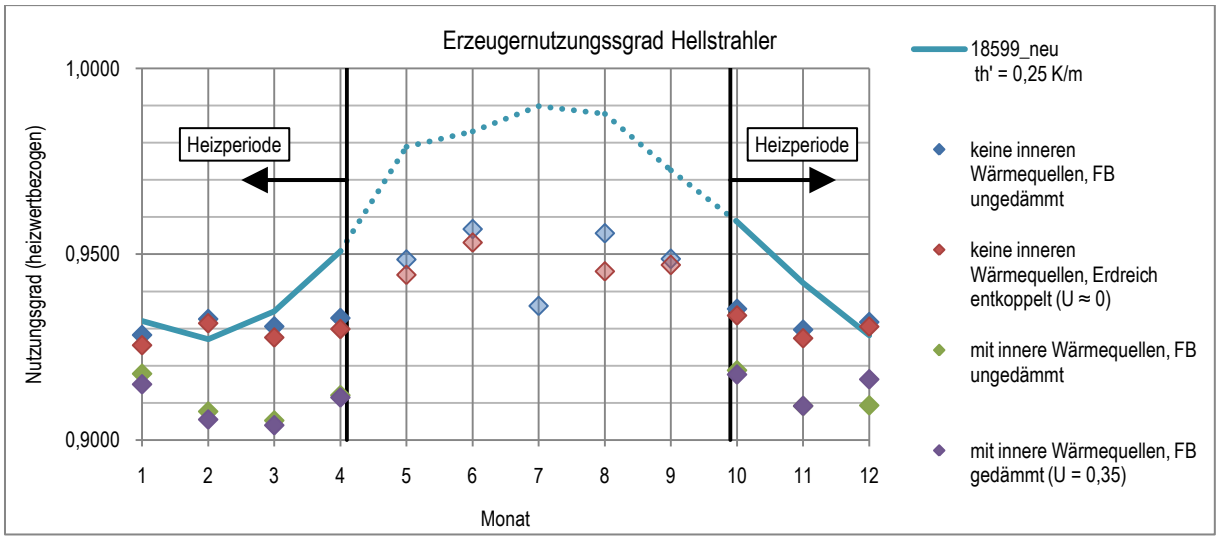


Abbildung 39 Vergleich Erzeugernutzungsgrade Hellstrahler (Halle 16 m): Gleichung (49) ↔ Simulation

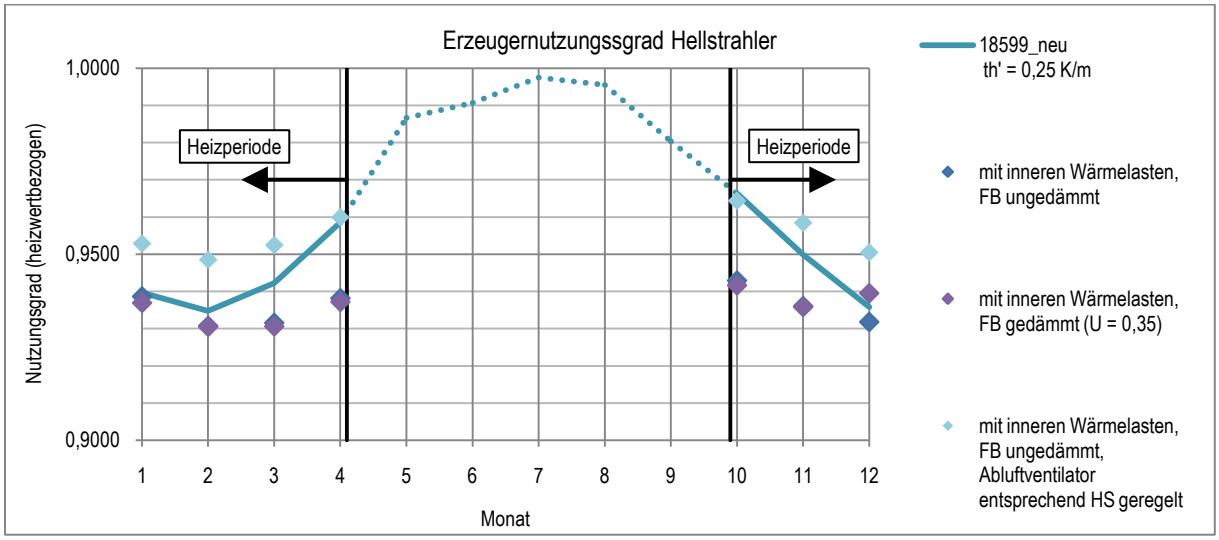


Abbildung 40 Vergleich Erzeugernutzungsgrade Hellstrahler (Halle 7 m): Gleichung (49) ↔ Simulation

Für beide Verfahren wurden Außentemperaturen nach demselben Wetterdatensatz[41] unterstellt. Während das verwendete Simulationsmodell durch seine hohe zeitliche Auflösung die hinterlegten Stundenmittelwerte des Wetterdatensatzes nutzen kann, müssen die Daten zur Verwendung innerhalb der DIN V 18599 auf Monatswerte gemittelt werden. Somit ergibt sich geringes Fehlerpotenzial, welches allein auf die Verringerung der zeitlichen Auflösung zurückzuführen ist.

[41] Testreferenzjahr 04 (Standort Potsdam)

Wie sich zeigt, ergeben der vorgeschlagene Berechnungsansatz und die Gebäudesimulationen ähnliche Jahresverläufe der Erzeugerwirkungsgrade.

Größere Abweichungen sind lediglich zur Jahresmitte hin zu erkennen. In dieser Zeit ist jedoch nur ein sehr geringer Anteil des Jahreswärmebedarfs zu erbringen. Fehler bei der Bestimmung der Wirkungsgrade für diese Monate haben daher nur geringe Auswirkungen.

Neben den angesprochenen, zeitlich unterschiedlich ausfallenden Abweichungen, ist zu beobachten, dass die nach Gleichung (49) berechneten Werte tendenziell über den Simulationswerten liegen. Dies lässt sich phänomenologisch mit einem Blick auf das Simulationsmodell erklären: Über Dach wird – wie in der Realität – ein definierter Luftvolumenstrom abgeführt (indirekte Abgasabfuhr bei Hellstrahlern). Der hiermit verbundene Enthalpiestrom ist aus der Simulation bekannt. Ebenso liefert die Simulation den Energiebedarf der Hellstrahler als ein Ergebnis. Werden der Enthalpiestrom über Dach als Verlust und der Energiebedarf der Hellstrahler als Gesamtaufwand betrachtet, lässt sich ein Erzeugernutzungsgrad gemäß Gleichung (50) ermitteln.

$$\eta_{h,g} = \frac{E_{gesamt} - E_{Dach}}{E_{gesamt}} \tag{50}$$

Dieser Ansatz liegt den in Abbildung 39 und 40 dargestellten Simulations-Nutzungsgraden zugrunde. Bei der Auswertung muss jedoch beachtet werden, dass der über Dach abgeführte Enthalpiestrom nicht allein durch die Heizung sondern auch durch innere Wärmequellen (Beleuchtung, Personen, technologische Wärme) „gespeist“ wird. Das Verlustglied E_{Dach} wird somit durch konvektive Anteile der inneren Wärmequellen verfälscht und fällt tendenziell zu hoch aus. Die Größe dieses Fehlers hängt davon ab, zu welchem Anteil die Heizaufgabe durch innere Wärmequellen erfüllt wird. Je höher dieser Anteil ist, desto größer wird der Fehler. Eine Quantifizierung ist an dieser Stelle nicht möglich, da die einzelnen Anteile – Heizung, innere Wärmequellen – des Enthalpiestroms über Dach nicht aus den Simulationsergebnissen hervorgehen.

In Anbetracht dieser Zusammenhänge scheinen die nach Gleichung (49) berechneten Nutzungsgrade durchaus plausibel.

Optimierungspotenzial Abluftventilator

Die Auslegung von Abluftventilatoren für Hellstrahleranlagen erfolgt gemäß DIN EN 13410 [14] so, dass bei Strahlerbetrieb ein spezifischer Abluftvolumenstrom von mindestens 10 m³/h je kW betriebener Leistung (Nennwärmebelastung) sichergestellt ist. Derzeit übliche Anlagen arbeiten mit Ventilatoren, welche in Abhängigkeit vom Zustand der zugewiesenen Strahler nur ein-/ausgeschaltet werden. Für mehrstufige oder modulierende Strahler lassen sich die betriebsbedingten Lüftungswärmeverluste verringern, indem die Abluftventilatoren entsprechend dem Reglungsregime des Strahlers mehrstufig oder stetig geregelt werden[42].

Abbildung 40 enthält vergleichend Nutzungsgrade für eine Hellstrahleranlage mit zweistufig (An/Aus) und dreistufig (100% / 60% / Aus)[43] geregeltem Abluftvolumenstrom (hellblau und

[42] Hierbei ist zu klären, ob eine entsprechende Regelung des Abluftvolumenstroms gemäß dem einschlägigen Regelwerk zum Betrieb von Hellstrahlern zulässig ist. Eine entsprechende ausführliche Prüfung/Recherche wurde durch die Autoren im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht durchgeführt.

[43] Die Teillaststufe der Abluftanlage entspricht der Teillaststufe der modellierten Hellstrahler.

lila dargestellt). Die sonstigen Randbedingungen sind in beiden Szenarios identisch. Für das vorliegende Beispiel ergibt sich im Heizperiodenmittel eine Erhöhung des Nutzungsgrades um 1,9 % zugunsten der dreistufigen Regelung. Durch eine feinere Abstufung bzw. stetig modulierende Regelung und Teillastbetrieb auf niedrigerem Niveau können sich auch höhere Effizienzsteigerungen ergeben.

13 Simulationen mit Anlagentechnik (SGA)

13.1 Vorbemerkung

Gemäß dem ursprünglich geplanten Projektablauf war vorgesehen, thermische Simulationen unter Einbeziehung der Anlagentechnik für die Modellgebäude des zuvor erstellten Gebäudekatalogs durchzuführen (vgl. 3.4). Während des Projektverlaufs zeichnete sich jedoch ab, dass dies im zeitlich engen Rahmen des Projektes, als eines vieler parallel zu bearbeitender Teilprobleme, nicht machbar sein würde. Daher wird ersatzweise ein Gebäude verwendet, welches im Rahmen der ELVHIS-Messkampagne [45] messtechnisch und in Form von Simulationen untersucht wurde. Somit kann auf ein bereits erstelltes Simulationsmodell zurückgegriffen werden, welches die *ELVHIS-Halle 1* mit der tatsächlich eingebauten Heizungsanlage abbildet. Basierend auf diesem Modell werden weitere anlagentechnische Varianten untersucht, sodass der im Rahmen der vorliegenden Arbeit angestrebte Systemvergleich auch anhand von Simulationsergebnissen nachvollzogen werden kann. Zusätzlich wird eine Variation dieser Halle mit geringerer Höhe simulationstechnisch untersucht.

Diese im Rahmen der vorliegenden Studie genutzten Simulationsdurchläufe werden im Weiteren mithilfe von Datumsangaben gekennzeichnet. Hierbei bedeuten:

- **17.12.2010**
  - Hohe Halle, keine technologischen Wärmeeinträge
  - je ein Berechnungssatz mit
    - ungedämmter Bodenplatte
    - entkoppeltem Erdreich (ideale Isolierung)
- **15.01.2011**
  - Hohe Halle, Wärmeeinträge in Anlehnung an DIN V 18599
  - leichte Modifikationen der Reglungsregime
  - je ein Berechnungssatz mit
    - ungedämmter Bodenplatte
    - gedämmter Bodenplatte ($U \approx 0{,}3$ W/m²K)
- **24.01.2011**
  - Niedrige Halle
  - Randbedingungen weitgehend analog Berechnungssatz *15.01.2011*

13.2 Simulationswerkzeug

Es findet eine umfassend erweiterte Version der kommerziellen Gebäudesimulationssoftware TRNSYS Anwendung (siehe. z.B. [49][50]). Hiermit sind knotenmodellbasierte thermische Gebäude- und Anlagensimulationen über lange Zeiträume möglich – im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden Jahres- bzw. Heizperiodenverläufe simuliert.

Um detaillierte Aussagen zum sich einstellenden Temperaturfeld zu bekommen, wäre eine Kopplung mit der Raumluftströmungssimulation notwendig, was im Rahmen des zur Verfügung stehenden Programmpaketes prinzipiell möglich ist. Bei der Orientierung auf

Jahres- oder Heizperioden entstünde durch die angekoppelte Strömungssimulation jedoch ein nicht vertretbarer rechenzeitlicher Aufwand. Deshalb wird zur angenäherten Berechnung von Strömungsvorgängen und Tempertaturverteilung ein Strömungsnetzwerk in die instationäre Gebäudesimulation eingekoppelt (vgl. [51]). Der Luftraum wird hierin in mehrere Zonen unterteilt zwischen denen Austauschvorgänge modelliert werden. Auf diese Weise können Lufttemperaturgradienten über der Höhe, lokale Besonderheiten von Lüftungs- und Heizelementen – bis hin zu Auswirkungen von Systemen zur Warmluftrückführung – approximiert werden. Die Genauigkeit und Detailtiefe von Raumluftströmungssimulationen kann hierbei jedoch nicht erreicht werden[44].

Die Autoren weisen darauf hin, dass mit den im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten instationären energetischen Gebäudesimulationen für Hallengebäude unter Einbeziehung hallenspezifischer Wärmeübergabesysteme Neuland betreten wird. Derart detaillierte Simulationen über Jahres- bzw. Heizperiodenverläufe sind sowohl fachlich als auch hinsichtlich Bearbeitungs- und Rechenzeit sowie Auswertungsaufwand äußerst anspruchsvoll. Den Autoren sind keine anderen derartigen simulationstechnischen Untersuchungen, bei welchen auch nur annähernd ähnlich hoher Aufwand betrieben wird/wurde, im Bereich von Hallengebäuden und hallentypischen Wärmeübergabesystemen bekannt.

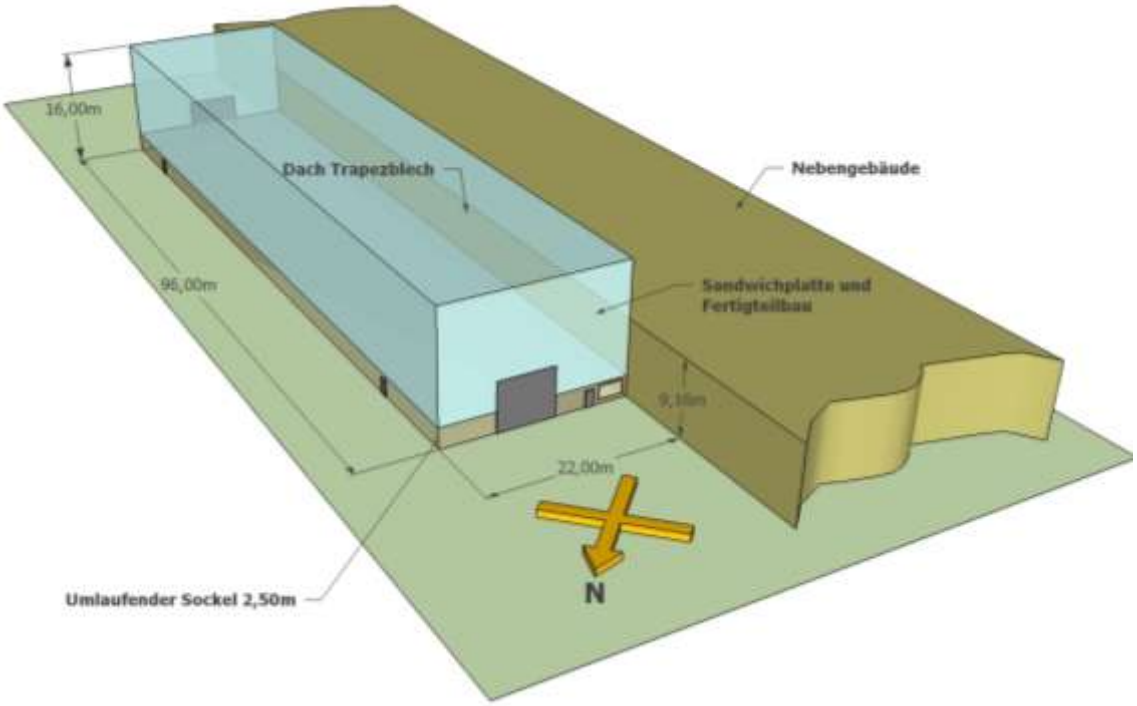
Die verwendeten Simulationsmodelle wurden aufwendig kontrolliert und validiert. Hierbei konnte unter anderem auf Ergebnisse aus Messungen und qualitativen Untersuchungen am realen Objekt zurückgegriffen werden, wie z.B.:

- Lufttemperaturmessungen über der Höhe
- Messungen der Strahlungstemperatur und der operativen Temperatur
- Thermografieaufnahmen
- Strömungsvisualisierungen

[44] Selbst unter Verwendung des vereinfachten Strömungsmodells benötigen einige der betrachteten Varianten für einen Berechnungsdurchlauf mehrere Tage an bloßer Rechenzeit – sonstiger zeitlicher Aufwand, z.B. für Dateneingabe, Vorarbeiten, Recherchen zur Festlegung von Randbedingungen etc. sowie Ergebnisauswertung nicht eingerechnet.

13.3 Gebäude

13.3.1 Hohe Halle



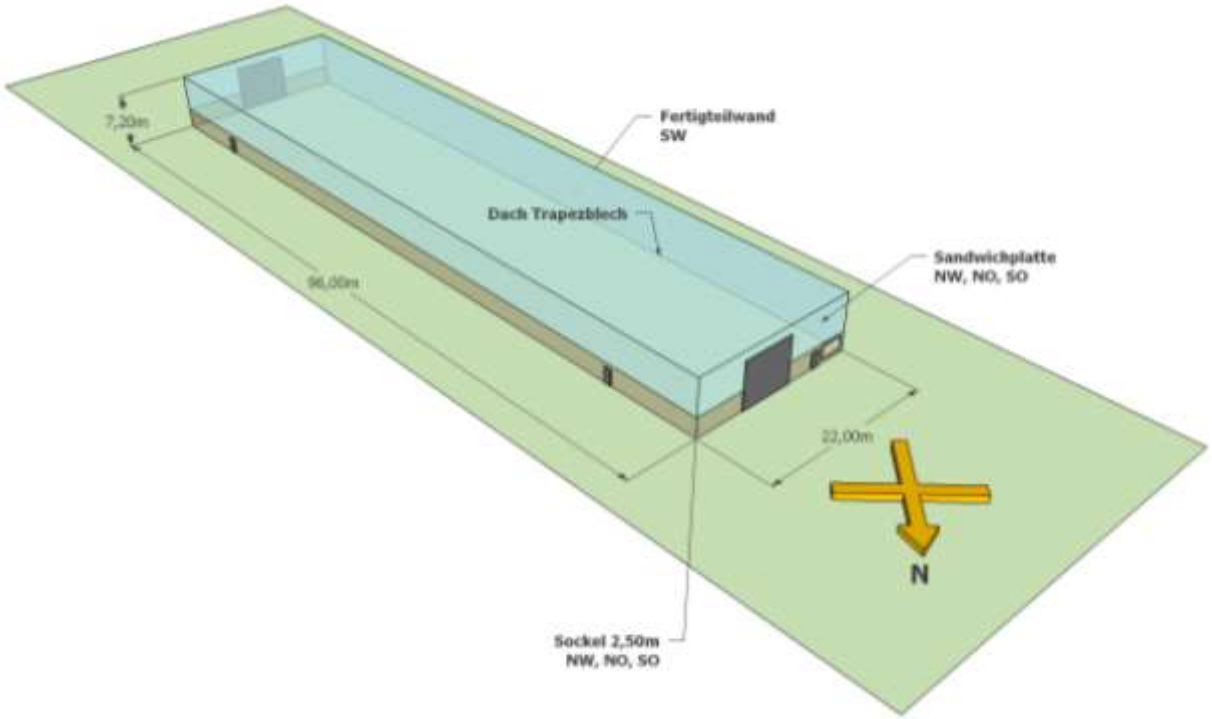
Das betrachtete Gebäude ist eine Werk-/Montagehalle. An der südwestlichen Längswand befindet sich ein Nachbargebäude mit geringerer Höhe. Beide Gebäude sind über Tore miteinander verbunden, welche im Allgemeinen offen stehen. Folgend wird davon ausgegangen, dass in beiden Gebäuden ähnliche Temperaturen herrschen. Das Nachbargebäude wird für energetische Betrachtungen vernachlässigt – über den Wandbereich, den sich beide Gebäude teilen, werden keine Wärmeverluste oder -einträge unterstellt.

Die Bauteilkennwerte, welche dem Wärmeschutznachweis des tatsächlichen Objekts entnommen wurden, sind in Tabelle 55 dargestellt.

Tabelle 55 Hüllflächen, Hohe Halle

Orientierung	Bauteil	Nettofläche außen	U
		m²	W/m²K
Horizontal	Boden	2112,0	2,00
	Dach	2112,0	0,47
Nord-Ost	Sockel	236,0	0,36
	└ Außentür	4,0	3,00
	Isowelle 104	1270,0	0,27
	Fertigteilwand	26,0	0,65
Süd-West	Fertigteilwand	650,0	0,65
	Trapezblech	7,0	0,46
Nord-West	Sockel	40,0	0,36
	└ Tor Sockelbereich	15,0	3,00
	Fertigteilwand	75,0	0,65
	└ Tor	25,0	3,00
	Isowelle 104	197,0	0,27
Süd-Ost	Sockel	33,4	0,36
	├ Tor Sockelbereich	15,0	3,00
	├ Außentür	2,0	3,00
	└ Außenfenster	4,6	3,00
	Fertigteilwand	75,0	0,65
	└ Tor	25,0	3,00
	Isowelle 104	197,0	0,27

13.3.2 Niedrige Halle



Zusätzlich wird eine Variation von Halle 1 mit geringerer Raumhöhe untersucht. Dieses Gebäude wurde hinsichtlich der Außenbauteile geringfügig vereinfacht. Zudem wurde das Nachbargebäude weggelassen – über die komplette südwestliche Außenwand fallen nunmehr Wärmeverluste an.

Tabelle 56 Hüllflächen, Niedrige Halle

Orientierung	Bauteil	Nettofläche außen	U
		m²	W/m²K
Horizontal	Boden	2112,0	2,00
	Dach	2112,0	0,47
Nord-Ost	Sockel	236,0	0,36
	└ Außentür	4,0	3,00
	Isowelle 104	451,2	0,27
Süd-West	Fertigteilwand	691,2	0,65
Süd-Ost	Sockel	33,4	0,36
	├ Tor Sockelbereich	15,0	3,00
	├ Außentür	2,0	3,00
	└ Außenfenster	4,6	3,00
	Isowelle 104	78,4	0,27
	└ Tor	25,0	3,00
Nord-West	Sockel	40,0	0,36
	└ Tor Sockelbereich	15,0	3,00
	Isowelle 104	78,4	0,27
	└ Tor	25,0	3,00

13.4 Nutzung

13.4.1 Reale Nutzung

Die untersuchte Halle wird wie folgt genutzt.

- Nutzungszeit
  - Mo-Fr 5:30 – 16:30 Uhr
  - Sa 5:30 – 12:00 Uhr
- Temperaturen
  - Nutzungszeit 20 °C
  - Nichtnutzungszeit 12 °C
- Lüftung
  - Abluftventilatoren für Hellstrahleranlage: 3300 m³/h Nennluftvolumenstrom; keine zusätzlichen anlagentechnischen Maßnahmen
- Beleuchtung
  - installierte Leistung: 24 kW; keine nennenswerte Tageslichtnutzung
- Interne Wärmequellen
  - keine wesentlichen Wärmeeinträge durch Arbeitshilfen
  - geringe Wärmeeinträge durch Personen: ca. 30 Personen, leichte Arbeit im Stehen

13.4.2 Nutzungsrandbedingungen Simulation

Die Nutzungsrandbedingungen der Simulationen werden weitgehend entsprechend den realen Bedingungen festgelegt.

- Nutzungszeit
    - Mo-Fr 5:30 – 16:30 Uhr
    - Sa 5:30 – 12:00 Uhr
    - Die Betriebszeiten der Heizungsanlage weichen systemspezifisch von der Nutzungszeit ab – es werden individuelle Regelkonzepte nach Herstellervorgabe umgesetzt.
- Temperaturen (Sollwerte)
    - Nutzungszeit: 20 °C
    - Nichtnutzungszeit: Temperaturabsenkung bis auf 12 °C zugelassen (systemspezifische Regelkonzepte)
- Lüftung
    - Durch Fugen/Öffnungen im Torbereich der modellierten Gebäudehülle wurden folgende Luftwechselraten eingestellt:
        - Nichtnutzungszeit ca. 0,05 h^{-1}
        - Nutzungszeit ca. 0,1 h^{-1}
        - Anlagenvariante Hellstrahler, bei Strahlerbetrieb zusätzlich ca. 0,1 h^{-1} (insgesamt ca. 0,3 h^{-1} – entspricht bei gegebener Gebäudegröße etwa Nennvolumenstrom der real installierten Abluftanlage)
- Beleuchtung
    - installierte Leistung: 24 kW
    - Wärmeeintrag in Deckennähe (Konvektion 60%, Strahlung 40%)
- Interne Wärmequellen
    - Wärmeeinträge durch Personen: 30 Personen, leichte Arbeit im Stehen nach VDI2078:1996
    - in späteren Simulationsdurchläufen Einbeziehung innerer Wärmelasten durch Arbeitshilfen in Anlehnung an DIN V 18599-10/-100 [1][2]

13.4.3 Energiebedarfsberechnung nach DIN V 18599

Zu den Simulationsergebnissen werden korrespondierende Energiebedarfswerte nach DIN V 18599 berechnet. Hierbei werden alle bisher im Rahmen des Projektes erarbeiteten Änderungsvorschläge für die Norm einbezogen. Es wird eine individuelle Nutzung gemäß Tabelle 57 unterstellt.

Tabelle 57 Nutzungsprofil für Energiebedarfsberechnung

Fertigungshalle

Fertigung, Produktion, Montage

Nutzungszeiten			von	bis
tägliche Nutzungszeit		Uhr	6:00	16:00
jährliche Nutzungstage	d_nutz,a	d/a	300	
jährliche Nutzungsstunden zur Tagzeit	t_Tag	h/a	- (keine Tageslichtnutzung)	
jährliche Nutzungsstunden zur Nachtzeit	t_Nacht	h/a		
tägliche Betriebszeit RLT und Kühlung		Uhr	-	-
tägliche Betriebstage für jeweils RLT, Kühlung und Heizung	d_op,a	d/a	300	
tägliche Betriebszeit Heizung		Uhr	5:30	16:00

Raumkonditionen (sofern Konditionierung vorgesehen)			
Raum-Solltemperatur Heizung	theta_i,h,soll	°C	20
Raum-Solltemperatur Kühlung	theta_i,c,soll	°C	-
Minimaltemperatur Auslegung Heizung	theta_i,h,min	°C	18
Maximaltemperatur Auslegung Kühlung	theta_i,c,max	°C	-
Temperaturabsenkung reduzierter Betrieb	delta-theta_i,NA	K	8
Feuchteanforderung		-	keine

Mindestaußenluftvolumenstrom	V'_A		
personenbezogen[a]		m³ je Stunde und Person	individuell angepasst (vgl. 13.4.2)
flächenbezogen		m³/(m²h)	
Mindestaußenluftvolumenstrom für Gebäude	V'_A,Geb	m³/(m²h)	-
Relative Abwesenheit RLT	C_RLT		[a]
Teilbetriebsfaktor der Gebäudebetriebszeit	F_RLT		[a]

mechanischer Außenluftvolumenstrom (Praxis)		von	bis
Luftwechsel (allgemein)	1/h	-	-
	1/h	-	-

Beleuchtung				
Wartungswert der Beleuchtungsstärke	E-quer_m	lx	400	**angepasst auf installierte Leistung von 12 W/m²**
Höhe der Nutzungsebene	h_Ne	m	1,1	
Minderungsfaktor	k_A	-	0,85	
relative Abwesenheit	C_A	-	0,1	
Raumindex	k	-	2,5	
Minderungsfaktor Gebäudebetriebszeit	F_t	-	0,9	

Personenbelegung		gering	mittel	hoch
maximale Belegungsdichte	m² je Person	-	-	-

Interne Wärmequellen		Vollnutzungs-stunden (h/d)	max. spezifische Leistung (W/m²)		
			tief	mittel	hoch
Personen (100 W je Person)		-	-	-	-
Arbeitshilfen		-	-	-	-
Wärmezufuhr je Tag	q_I,p + q_I,fac Wh/(m²d)		-	20 (17.12.2010) 170 (24.01.2011) 370 (15.01.2011)	-

13.5 Heizlast

Für die Heizlastberechnung wird den Bauteil-U-Werten (vgl. 13.3) ein pauschaler Wärmebrückenzuschlag von 0,10 W/m²K aufgeschlagen. Es wird ein Außenluftwechsel für das gesamte Gebäude von 0,25 h^{-1} unterstellt.

Unter diesen Annahmen ergibt sich für die hohe Halle eine Heizlast nach DIN EN 12831 von ca. 190 kW bzw. 95 W/m². Für die niedrige Halle ergibt sich eine Heizlast nach DIN EN 12831 von ca. 126 kW bzw. 63 W/m².

Die Wärmeleistung der im zugrundeliegenden realen Gebäude installierten Hellstrahler beträgt in Summe 246 kW bzw. 123,2 W/m² und liegt damit deutlich höher als die hier ermittelte Heizlast von 190 kW bzw. 95 W/m². Nach Kenntnisstand der Autoren wurde bei Auslegung der installierten Anlage ein Luftwechsel von 0,5 h^{-1} unterstellt – unter dieser Annahme ergäbe sich eine Heizlast von etwa 276 kW bzw. 138 W/m², also in ähnlicher Größenordnung wie die Leistung der installierten Anlage.

Die so berechneten Heizlasten nach DIN EN 12831 bilden die Grundlage der vorwiegend herstellerintern vorgenommenen Anlagendimensionierungen durch die projektbeteiligten Hersteller. Hierbei verfahren verschiedene Hersteller unterschiedlich; so waren einerseits systemspezifische Unterschiede[45] zu erkennen, andererseits wurden jedoch auch verschiedene Philosophien von verschiedenen Herstellern eines Systems vertreten[46].

13.6 Anlagenvarianten – Auslegung und Simulationsmodelle

13.6.1 Warmwasser-Deckenstrahlplatten

Deckenstrahlplatten werden in den Simulationen als waagerechte Platten, bestehend aus einer beheizten Schicht und der darüber befindlichen Dämmschicht, abgebildet. Durch Vorgabe eines festen Konvektions-Wärmeübergangskoeffizienten werden Strahlungsanteile der Wärmeabgabe gemäß Herstellerangaben eingestellt – für die Simulationen wurden Strahlungsanteile im Bereich von 77…80% unterstellt.

Für Deckenstrahlplatten wurde durch die beteiligten Hersteller keine Anlagendimensionierung vorgelegt. Es fand daher eine überschlägige Auslegung nach Herstellertabellen statt. In Abhängigkeit von den verwendeten Fabrikaten/Modellen, der Einbausituation und der ggf. gewünschten Überdeckung der rechnerischen Heizlast kommen verschiedene Kombinationen von Gesamtplattenflächen und spezifischer Leistung in Frage.

Für die thermischen Simulationen werden die folgend tabellarisch dargestellten, teilweise gerundeten Werte verwendet.

Tabelle 58 Auslegung Deckenstrahlplatten

	Hohe Halle	Niedrige Halle
Anzahl Geräte	5 x 4 Elemente zu je: L = 21 m, B = 1,3 m	4 x 3 Elemente zu je: L = 26 m, B = 1,3 m
Einbau	Abhänghöhe 15 m (Unterkante)	Abhänghöhe 6 m (Unterkante)
Leistung	370 W/m², 202 kW gesamt (17.12.2010) 333 W/m² (15.01.2011)	300 W/m², 122 kW gesamt
Reglungsregime	ca. 20 min Vorheizzeit (außentemperaturabhängig), Stütztemperatur 12 °C	

[45] Nach Aussage mehrerer am Projekt beteiligter Hersteller von Infrarotstrahlungsheizungen werden Hell- und Dunkelstrahleranlagen – bezogen auf die Heizlast nach DIN EN 12831 – in der Regel merklich unterdimensioniert. Die beteiligten Hersteller von zentralen und dezentralen Luftheizungen gaben an, für gewöhnlich nach Heizlastberechnung DIN EN 12831 auszulegen oder leicht überzudimensionieren.

[46] Von den beteiligten Herstellern von Deckenstrahlplatten wurden teils gegensätzliche Ansichten zu Auslegung und Optimierung von Heizungsanlagen mit Deckenstrahlplatten vertreten.

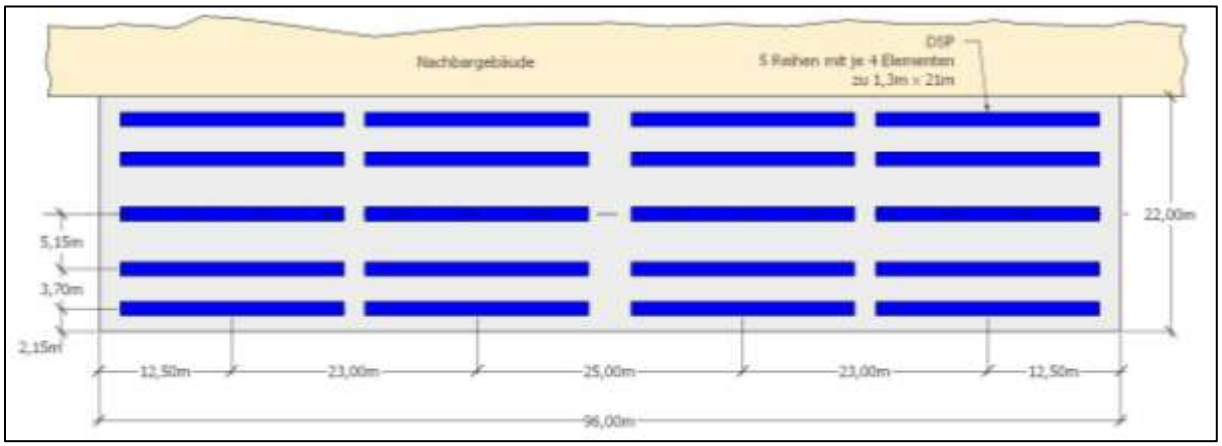


Abbildung 41 Schema Deckenstrahlplatten, Hohe Halle

13.6.2 Fußbodenheizung

Die Fußbodenheizung wird im Rahmen der Simulationen als durchgehende beheizte Schicht im Fußbodenaufbau abgebildet. Als wesentliche Parameter sind lediglich die flächenspezifische Höchstleistung sowie die Einbauhöhe der beheizten Schicht bzw. ihre Überdeckung vorzugeben. Sonstige Auslegungsparameter, wie z.B. Verlegeabstand oder Rohrdurchmesser gehen nicht in die Simulationen ein.

Wärmetransportvorgänge im Erdreich unter Bodenplatten beheizter Hallen sind bislang kaum untersucht. In der Folge herrscht Unsicherheit bezüglich der resultierenden Erdreichtemperatur und der anfallenden Wärmeverluste. Ebenso erschwert die mögliche Bandbreite an Szenarien aus Erdreichbeschaffenheit und Grundwassersituation die Definition „allgemeingültiger“ Randbedingungen – da sich hier erheblicher Einfluss auf die Transmissionswärmeverluste an das Erdreich ergeben kann.

Im Rahmen der Simulationen wurde unterhalb der Bodenplatte eine Kiesschicht der Dicke 1 m angenommen und unter dieser eine konstante Erdreichtemperatur von 15°C unterstellt[47].

Tabelle 59 Auslegung Fußbodenheizung

	Hohe Halle	Niedrige Halle
Einbau	Überdeckung 16 cm zusätzliche Variante: 10 cm im Kern- und 5 cm im Randbereich	Überdeckung 16 cm
Leistung	ca. 100 W/m²	ca. 65 W/m²
Reglungsregime	Nachtabsenkung 2K, Heizungsbeginn und -ende mit je 2 h Vorlauf Aufheizen aus WE-Abschaltung mit $t_{Aufheiz} = -15\left[\frac{h}{K}\right] * \bar{\theta}_{Außen}[°C] + 3{,}5[h]$	Nachtabsenkung 2K, Heizungsbeginn und -ende mit je 4 h Vorlauf Aufheizen aus WE-Abschaltung mit $t_{Aufheiz} = -15\left[\frac{h}{K}\right] * \bar{\theta}_{Außen}[°C] + 5{,}5[h]$

13.6.3 Luftheizung

In den Simulationen wird eine Luftheizung mit Warmluftrückführung abgebildet.

Es wird ein Knotenmodell verwendet. Hierbei ist das Innenvolumen in Zonen – vorstellbar als waagerechte Scheiben – unterteilt. Der erhöhte Luftaustausch durch Warmluftrückführung

[47] Dies stellt sich nach Rücksprache mit führenden Experten aus den Bereichen Bauphysik und Gebäudesimulation als eine gängige Annahme dar.

wird mithilfe von senkrechten Zonen erfasst, welche die waagerechten Zonen untereinander verbinden. Je Zone herrscht ein und dieselbe Lufttemperatur. Transportvorgänge an Zonengrenzen werden zwar physikalisch korrekt erfasst, jedoch kann nicht die Genauigkeit einer Strömungssimulation erwartet werden. Diese Vereinfachungen sind zwingend notwendig um mit derzeit üblicher Hardware Simulationen über verhältnismäßig lange Zeiträume – z.B. komplette Heizperiode – zu erstellen.

In der Folge sind großräumige Strömungsstrukturen, welche besonders bei Luftheizungen von Bedeutung sein können, mit diesem Modell nicht exakt abbildbar. Mit der angenäherten Modellierung der Raumluftströmung durch Kamine/Schächte (Warmlufteinbringung bzw. -rückführung) werden energetisch idealisierte Annahmen getroffen.

Hinsichtlich Modellierung der Wärmeübergabe wird sich an den technischen Daten der Beispielauslegungen zu dezentralen Warmlufterzeugern orientiert.

Tabelle 60 Beispielauslegung indirekte Lufterhitzer (Fa. Wolf)

	Hohe Halle	Niedrige Halle
Anzahl Geräte	16 x Lufterhitzer Wolf LH 40-2, Induktionsjalousie 8 x Deckenventilator Fenne 03.288	16 x Lufterhitzer Wolf LH 40-3 (brennwertgerechte Auslegung), Induktionsjalousie 9 x Deckenventilator Wolf LD15
Einbau	Lufterhitzer: 2,50 m (Wand) Deckenventilatoren: 15 m	Lufterhitzer: 2,50 m (Wand) Deckenventilatoren: 6 m
Leistung	ca. 240 kW	ca. 200 kW
Reglungsregime	ca. 20 min Vorheizzeit (außentemperaturabhängig), Stütztemperatur 12 °C	

Tabelle 61 Beispielauslegung direktbefeuerte Warmlufterzeuger (Fa. LK-Metall)

	Hohe Halle	Niedrige Halle
Anzahl Geräte	2 x Warmlufterzeuger LK RE 125 SH 8 x Deckenventilator Fenne 03.288	1 x Warmlufterzeuger LK RE 125 11 x Deckenventilator (z.B. Fenne 03.210)
Einbau	ca. 15 m	Lufterhitzer: 2,50 m (Wand) Deckenventilatoren: 6 m
Leistung	ca. 250 kW	ca. 200 kW
Reglungsregime	ca. 20 min Vorheizzeit (außentemperaturabhängig), Stütztemperatur 12 °C	

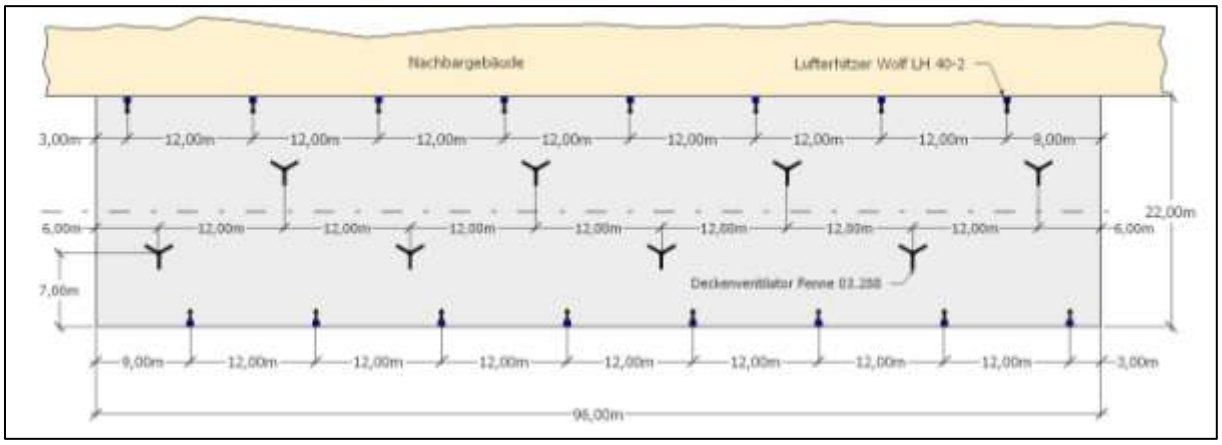


Abbildung 42 Schema Indirekte Lufterhitzer (Wandmontage) mit Deckenventilatoren, Hohe Halle

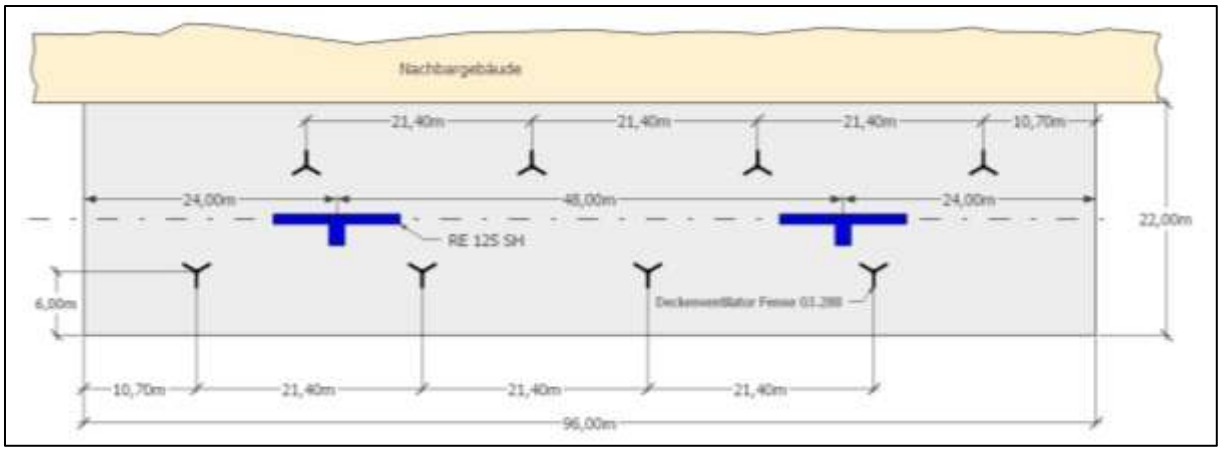


Abbildung 43 Schema direkt befeuerte Warmlufterzeuger (Deckenmontage) mit Deckenventilatoren, Hohe Halle

13.6.4 Dunkelstrahler

Auf die Abbildung von Dunkelstrahlern im Rahmen der Simulationen musste wegen des zeitlich engen Rahmens und der verhältnismäßig komplizierten Gerätegeometrie verzichtet werden. Es wird jedoch angenommen, dass sich aufgrund des hohen Temperaturniveaus und der relativ kleinen beheizten Flächen (Strahlrohre) ähnliche Verhältnisse wie bei Hellstrahlern einstellen. Die nachfolgend dargestellte Beispielauslegung hat somit nur informativen Charakter.

Tabelle 62 Beispielauslegung Dunkelstrahler (Fa. Schwank)

	Hohe Halle	Niedrige Halle
Anzahl Geräte	2 x Dunkelstrahler Calor 40U 3 x Dunkelstrahler Calor 30U	-
Einbau	15 m	-
Leistung	ca. 154 kW	-
Reglungsregime	keine Vorheizzeit, Stütztemperatur 12 °C	-

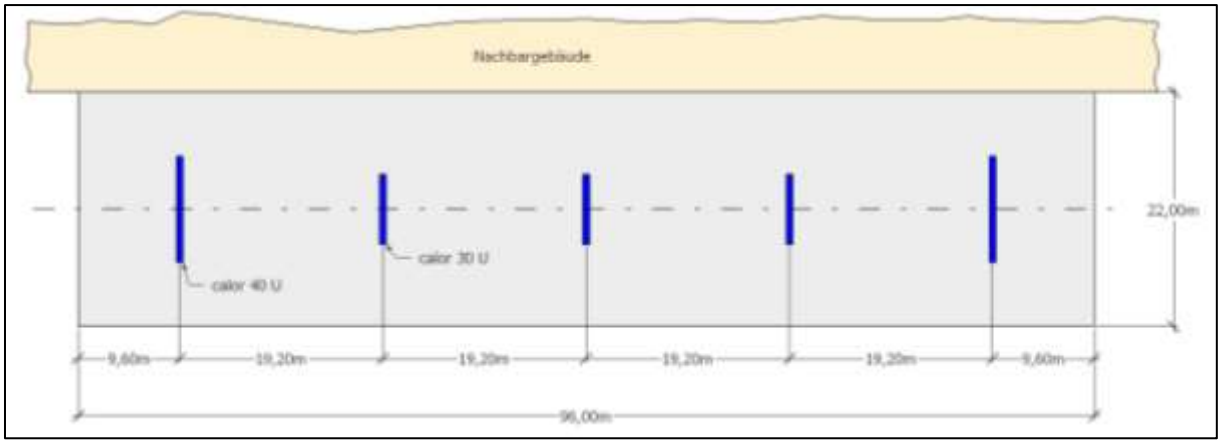


Abbildung 44 Schema Dunkelstrahler, Hohe Halle

13.6.5 Hellstrahler

Hellstrahler werden im Rahmen der Simulationen geometrisch weitgehend exakt nachgebildet. Für die hohe Halle wird, abweichend von der Auslegung, die Geometrie von

Hellstrahlern des Typs Schwank Supra 20 verwendet[48]. Die Leistungsanpassung auf die Strahler gemäß Auslegung (Supra 10/15) geschieht durch entsprechende Anpassung der Temperatur der Brennerplatte. Für den Simulationsdurchlauf der kleinen Halle wurden Strahler des Typs Supra 10 nachgebildet.

Der durch die Hellstrahler verursachte Abgasvolumenstrom wird als konvektiver Wärmestrom nach oben – durch kaminartige Strukturen oberhalb der Strahler – abgebildet. Der notwendige zusätzliche Abluftvolumenstrom zur Abführung des Abgas-Luft-Gemischs wird ebenfalls erfasst[49].

Die in den Simulationen abgebildeten Hellstrahler weisen mittlere Strahlungsfaktoren von 0,74 (Supra 15) bzw. 0,79 (Supra 10) auf[50].

	Hohe Halle	Niedrige Halle
Anzahl Geräte	8 x Hellstrahler Schwank Supra 10 8 x Hellstrahler Schwank Supra 15	16 x Hellstrahler Schwank Supra 10
Einbau	10 m, 35°	6 m , 45°
Leistung	ca. 154 kW	ca. 123 kW
Reglungsregime	keine Vorheizzeit, Stütztemperatur 12 °C (17.12.2010) ca. 20 min Vorheizzeit (außentemperaturabhängig), Stütztemperatur 12 °C (15. und 24.01.2011)	

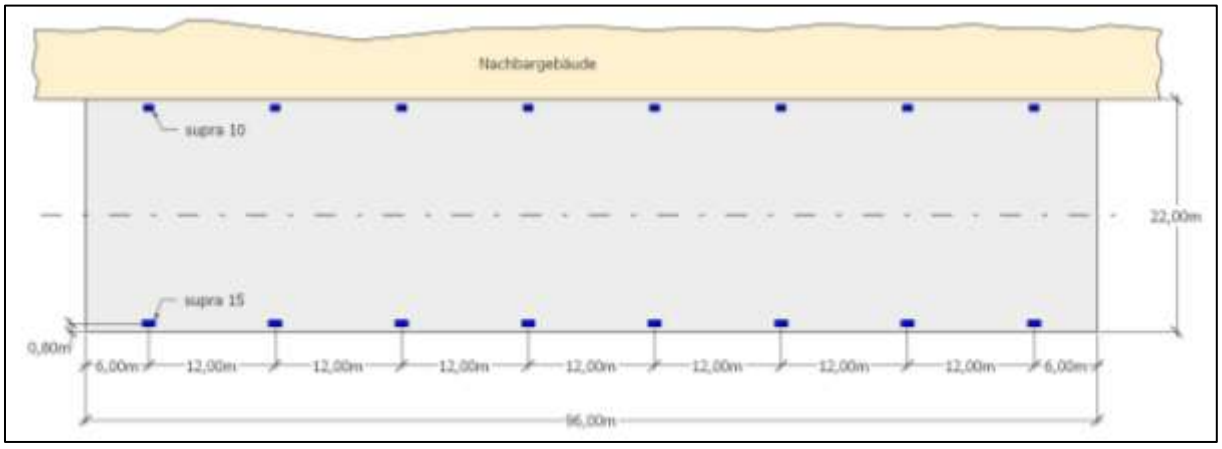


Abbildung 45 Schema Hellstrahler, Hohe Halle

13.7 Ergebnisse

13.7.1 Simulationen

Die wesentlichen Simulationsergebnisse sind in Tabelle 63 zusammengestellt. Es handelt sich bei den dargestellten Werten um die dem Teilabschnitt *Wärmeübergabe im Nutzraum* jährlich zuzuführende Wärmemengen. Die Teilabschnitte Wärmeerzeugung und -verteilung werden nicht erfasst.

[48] In einer ersten Auslegung wurden Strahler des Typs Schwank Supra 20 vorgesehen und auch entsprechend modelliert – hierbei bestanden jedoch noch Unsicherheiten bezüglich der zugrundezulegenden Heizlast. Im weiteren Verlauf wurde, mit Konkretisierung der Randbedingungen, auf Strahler des Typs Supra 10 und Supra 15 ausgelegt. Um die bereits erstellten geometrischen Modelle und die hieran geknüpften sehr zeitaufwendigen Berechnungen zum Strahlungsaustausch dennoch verwenden zu können, wurde eine Leistungsanpassung durch Änderung der Strahlertemperatur vorgenommen.

[49] Es wird unterstellt, dass der zusätzliche Abluftvolumenstrom bei Strahlerbetrieb zur Hälfte aus der natürlichen Infiltration gespeist wird. Die zweite Hälfte wird der natürlichen Infiltration aufgeschlagen, sodass sich für die simulierten Hellstrahler-Varianten ein höherer effektiver Infiltrationsvolumenstrom ergibt als für die anderen untersuchten Anlagenvarianten.

[50] Für die modellieren Hellstrahler ergeben sich im Teil- und Volllastbetrieb geringfügig unterschiedliche Strahlungsfaktoren. Dies wurde in den Simulationen exakt umgesetzt. Die hier und im Anhang angegebenen Strahlungsfaktoren sind als Mittelwerte zwischen Voll- und Teillastbetrieb zu verstehen.

Bei einer Betrachtung analog DIN V 18599 entsprechen die aufgeführten Werte, unter Vernachlässigung eventuell anfallender Verteil- und Speicherverluste, in guter Näherung der Erzeugernutzwärmeabgabe $Q_{h,outg}$.

Das System Hellstrahler stellt hierbei eine Ausnahme dar. Durch die Modellierung realer Abgasströme als konvektiv wirksame Wärmeströme und die Einbeziehung der zusätzlichen Lüftungswärmeverluste (Abluft) in die Wärmebilanz werden auch Erzeugerverluste erfasst. Für Hellstrahler ist das Simulationsergebnis somit dem Endenergiebedarf Wärme gleichzusetzen; entgegen DIN V 18599 [1][2] besteht jedoch kein Brennwert- sondern Heizwertbezug.

Tabelle 63 Zusammenstellung Energiebedarfswerte [kWh/m²a], Gebäudesimulationen mit Anlagentechnik

Wärmeübergabe	17.12.2010		15.01.2011		24.01.2011		Vergleichsgröße aus Energiebedarfsberechnung
	FB ungedämmt	FB ideal isoliert	FB ungedämmt	FB gedämmt (0,35)	FB ungedämmt	FB gedämmt (0,35)	
Hellstrahler	128,01	117,86	82,61	78,70	60,77	57,19	$Q_{h,f(HI)}$
Fußbodenheizung	158,13	130,25	103,33	90,61	80,35	69,73	$Q_{h,outg}$
Luftheizung 1	137,36	127,52	83,51	80,11	59,57	57,24	$Q_{h,outg}$
Luftheizung 2	135,32	125,46	82,08	78,63	58,99	56,52	$Q_{h,outg}$
Luftheizung Mittel	136,34	126,49	82,79	79,37	59,28	56,88	$Q_{h,outg}$
Deckenstrahlplatten	144,16	129,62	88,96	83,05	62,46	57,90	$Q_{h,outg}$

In den Ergebnissen sind folgende Tendenzen zu erkennen:

- Je geringer die Leistungs- und Wärmeanforderungen an das Heizsystem werden, desto weniger fallen systemspezifische Unterschiede energetisch ins Gewicht.
- Der bauliche Wärmeschutz der Bodenplatte und die Erdreichbeschaffenheit (ggf. Grundwassersituation) haben bei Fußbodenheizungen signifikant größeren Einfluss auf den Energiebedarf als bei den anderen untersuchten Systeme.
- Bei großen Raumhöhen und hohen Heizlasten können sich energetische Vorteile von Strahlungsheizungen mit gut richtbarer Strahlungsabgabe ergeben. Bei kleinen Raumhöhen und geringen Heizlasten lassen sich solche Tendenzen nicht feststellen.
- Energetische Vor- oder Nachteile lassen sich nicht allein aus der Art der Wärmeabgabe – vorwiegend Konvektion oder Strahlung – ableiten. Ein pauschaler „Strahlungsbonus“, wie in DIN V 18599:2007-02/2009-10 [1][2] implementiert, ist mit Blick auf die Simulationsergebnisse nicht zu rechtfertigen.

Ausführliche Ergebnisse sind den Simulationskurzberichten[51] im Anhang zu entnehmen.

13.7.2 Angepasste Energiebedarfsberechnung

Um die im Rahmen dieser Forschungsarbeit erbrachten Überarbeitungsvorschläge für die DIN V 18599 quantitativ einordnen zu können, werden analog zu den zuvor beschriebenen Simulationen (SGA) Energiebedarfsberechnungen nach DIN V 18599 [1][2] unter Einbeziehung aller Überarbeitungsvorschläge durchgeführt.

[51] Teilergebnisse der Simulationen – teilweise grafisch in den angehängten Kurzberichten dargestellt – fanden in mehreren im Rahmen dieser Studie bearbeiteten Teilproblemen Verwendung; so z.B.:

- quantitative Auswertung der Lufttemperaturschichtungen und hieraus Berechnung linearer Lufttemperaturanstiege (vgl. 12.2.3, insbesondere Tabelle 53)
- qualitative Auswertung des systemspezifischen Aufheizverhaltens (Flinkheit/Trägheit) – Überarbeitung von Kennwerten zur Verwendung nach DIN V 18599-5 für Industrie-Fußbodenheizungen, um systemspezifische Trägheit erfassen zu können

Vorgriff: Zum Abgleich zwischen Simulationen und Energiebedarfsberechnungen wurden Berechnungsparameter für DIN V 18599 teilweise iterativ angepasst. Im Rahmen dieses Berichts wird lediglich auf den abschließenden Stand dieses iterativen Prozesses eingegangen. Die in Kapitel 14 aufgeführten Überarbeitungsvorschläge zu DIN V 18599 sind dementsprechend als abschließender und von der Mehrheit der Projektgruppe getragener Konsens zu verstehen.

Entsprechende Berechnungsergebnisse sind beispielhaft in Tabelle 64 dargestellt – eine vollständige Auflistung der Ergebnisse ist dem Anhang zu entnehmen.

Tabelle 64 Energiebedarfswerte DIN V 18599 unter Einbeziehung Überarbeitungsvorschläge (Hohe Halle, Boden ungedämmt, Simulationsdurchlauf 17.12.2010)

		Wärmeübergabe	Endenergie Wärme [kWh/m²a] heizwertbezogen			
			DIN V 18599 neu		DIN V 18599 neu	
			zentral	dezentral	zentral	dezentral
			NT-Kessel	nicht kondensierend	BW-Kessel	kondensierend
17.12.2010	FB ungedämmt	Hellstrahler ohne Abgasanlage, wie in Simulation; R_F = 0,74	-	174,56	-	174,56
		Hellstrahler wie zuvor, jedoch R_F = 0,60	-	188,80	-	188,80
		Dunkelstrahler, nicht kondensierend; R_F = 0,74	-	183,15	-	183,15
		Fußbodenheizung	247,11	-	219,55	-
		Luftheizung mit Warmluftrückführung	223,99…232,31	219,22…233,62	201,59…209,38	196,39…210,49
		Referenz EnEV 2009 (dez. LH, seitlich)	-	288,40	-	288,40
		Deckenstrahlplatten	227,21	-	204,50	-

13.7.3 Vergleich: Simulation / DIN V 18599 „neu“

Um die Ergebnisse der Energiebedarfsberechnungen anhand der Simulationsergebnisse bewerten zu können, müssen die jeweiligen Ergebnisse vergleichbar gemacht werden.

Den Simulationsergebnissen wird dazu ein fiktiver Wärmeerzeuger vorgeschaltet. Die Berechnungen nach DIN V 18599 finden entgegen Normvorgaben unter Heizwertbezug statt. Somit sind Energiebedarfswerte beider Verfahren prinzipiell vergleichbar. Da sich die absoluten Niveaus der jeweiligen Energiebedarfswerte jedoch signifikant unterscheiden, wird mit Verhältniszahlen gearbeitet – hierfür werden alle Energiebedarfswerte auf das jeweilige Ergebnis der Anlagenvariante Hellstrahler normiert. Entsprechende Ergebnisse sind beispielhaft in Tabelle 65 dargestellt – eine vollständige Übersicht der Ergebnisse ist dem Anhang zu entnehmen.

Tabelle 65 Vergleich Simulation / DIN V 18599 neu

		Wärmeübergabe	Endenergiebedarf Wärme (heizwertbezogen), normiert auf Hellstrahler mit indirekter Abgasführung			
			aus Simulationsergebnissen	DIN V 18599 neu	aus Simulationsergebnissen	DIN V 18599 neu
			mit eta_HI = 0,92	NT / nicht kondensierend	mit eta_HI = 1,03	BW / kondensierend
17.12.2010	FB ungedämmt	Hellstrahler ohne Abgasanlage, wie in Simulation; R_F = 0,74	1,00	1,00	1,00	1,00
		Hellstrahler wie zuvor, jedoch R_F = 0,60	-	1,08	-	-
		Dunkelstrahler, nicht kondensierend; R_F = 0,74	-	1,05	-	-
		Fußbodenheizung	1,34	1,42	1,21	1,26
		Luftheizung mit Warmluftrückführung	1,16	1,28 (WLR PI-geregelt) 1,32 (WLR 2-Punkt-geregelt)	1,04	1,15 (WLR PI-geregelt) 1,19 (WLR 2-Punkt-geregelt)
		Referenz EnEV 2009 (dez. LH, seitlich)	-	1,65	-	1,65
		Deckenstrahlplatten	1,22	1,30	1,10	1,17

14 Vorschläge zur Überarbeitung der DIN V 18599

14.1 Vorbemerkung

Die folgenden Vorschläge basieren auf dem derzeitigen Bearbeitungsstand des Projektes.

Bei Änderungsvorschlägen werden Texte, Abbildungen oder Tabellen zur leichteren Zuordnung farbig eingerahmt. Es korrespondieren dann jeweils ein Ist-Stand und ein Änderungsvorschlag. Passagen nach aktuellem Normstand werden rot eingerahmt, Änderungsvorschläge blau.

Gelb hinterlegte Passagen oder Werte sind als vorläufig zu verstehen. Diese befinden sich in Bearbeitung bzw. stehen noch zur Diskussion.

14.2 Nutzungsprofile, Teil 10

14.2.1 Vorbemerkung

Im Folgenden werden Änderungen an Nutzungsprofilen nach *DIN V 18599-10/-100/Anhang A* vorgeschlagen. Hierbei werden lediglich die detaillierten Nutzungsprofile – aktueller Normstand sowie Änderungsvorschlag – abgebildet. Die Änderungen sind jedoch auch die zusammenfassenden Tabellen einzuarbeiten (derzeit *DIN V 18599-10/-100, Tabelle 4*).

14.2.2 Anpassung einzelner Parameter

Änderungsbedarf ergibt sich nach derzeitigem Kenntnisstand hinsichtlich der Abbildung der Lüftungscharakteristik für den Bereich **Fertigung, Montage und Produktion**. Hierauf wird näher in 14.2.3 eingegangen.

Für **Turnhallen** kann in der Regel davon ausgegangen werden, dass pro Woche wenigstens zwei Nichtnutzungstage anfallen – nach derzeitigem Normstand wird jedoch nur ein wöchentlicher Nichtnutzungstag unterstellt. Daher wird eine Verringerung der jährlichen Nutzungsdauer $d_{op,a}$ von 300 Tagen auf 250 Tage vorgeschlagen (vgl. Tabellen 66 und 67)

Tabelle 66 Nutzungsprofil 31, aktueller Stand DIN V 18599-10

Turnhallen (ohne Zuschauerbereich) — Nr. 31

Nutzungszeiten			von	bis
tägliche Nutzungszeit		Uhr	8:00	23:00
jährliche Nutzungstage	d_nutz,a	d/a	300	
jährliche Nutzungsstunden zur Tagzeit	t_Tag	h/a	3002[52]	
jährliche Nutzungsstunden zur Nachtzeit	t_Nacht	h/a	1.498	
tägliche Betriebszeit RLT und Kühlung		Uhr	6:00	23:00
jährliche Betriebstage für jeweils RLT, Kühlung und Heizung	d_op,a	d/a	300	
tägliche Betriebszeit Heizung		Uhr	6:00	23:00

Raumkonditionen (sofern Konditionierung vorgesehen)			
Raum-Solltemperatur Heizung	theta_i,h,soll	°C	21
Raum-Solltemperatur Kühlung	theta_i,c,soll	°C	24
Minimaltemperatur Auslegung Heizung	theta_i,h,min	°C	20
Maximaltemperatur Auslegung Kühlung	theta_i,c,max	°C	26
Temperaturabsenkung reduzierter Betrieb	delta-theta_i,NA	K	4
Feuchteanforderung		-	keine

Mindestaußenluftvolumenstrom	V'_A		
personenbezogen[a]		m³ je Stunde und Person	60
flächenbezogen		m³/(m²h)	-

mechanischer Außenluftvolumenstrom (Praxis)		von	bis
Luftwechsel (allgemein)	1/h	-	6
	1/h	-	-

Beleuchtung			
Wartungswert der Beleuchtungsstärke	E-quer_m	lx	300
Höhe der Nutzungsebene	h_Ne	m	1
Minderungsfaktor	k_A	-	1
relative Abwesenheit	C_A	-	0,3
Raumindex	k	-	2
Minderungsfaktor Gebäudebetriebszeit	F_t	-	1

Personenbelegung		gering	mittel	hoch
maximale Belegungsdichte	m² je Person	30	20	10

Interne Wärmequellen		Vollnutzungs-stunden (h/d)	max. spezifische Leistung (W/m²)		
			tief	mittel	hoch
Personen (125 W je Person)		10	4	6	13
Arbeitshilfen		0	0	0	0
Wärmezufuhr je Tag	q_I,p + q_I,fac Wh/(m²d)		40	60	130

[a] Bedarfsabhängige Lüftungsstrategien sind in Abhängigkeit von produktions- und sicherheitstechnischen Aspekten individuell zu planen und festzulegen.

[52] In DIN V 18599-10:2007-02, Anhang A, Tabelle A.31 wird für die täglichen Nutzungsstunden zur Tagzeit ein Wert von 302 h angegeben – dieser Wert ist falsch. In DIN V 18599-10, Tabelle 4 wird der korrekte Wert von 3002 h angegeben.

Tabelle 67 Nutzung Vorschlag Nutzungsprofil 31

Turnhallen (ohne Zuschauerbereich)

Nr. 31

Nutzungszeiten			von	bis
tägliche Nutzungszeit		Uhr	8:00	23:00
jährliche Nutzungstage	d_nutz,a	d/a	250	
jährliche Nutzungsstunden zur Tagzeit	t_Tag	h/a	2509	
jährliche Nutzungsstunden zur Nachtzeit	t_Nacht	h/a	1.248	
tägliche Betriebszeit RLT und Kühlung		Uhr	6:00	23:00
jährliche Betriebstage für jeweils RLT, Kühlung und Heizung	d_op,a	d/a	250	
tägliche Betriebszeit Heizung		Uhr	6:00	23:00

Raumkonditionen (sofern Konditionierung vorgesehen)			
Raum-Solltemperatur Heizung	theta_i,h,soll	°C	21
Raum-Solltemperatur Kühlung	theta_i,c,soll	°C	24
Minimaltemperatur Auslegung Heizung	theta_i,h,min	°C	20
Maximaltemperatur Auslegung Kühlung	theta_i,c,max	°C	26
Temperaturabsenkung reduzierter Betrieb	delta-theta_i,NA	K	4
Feuchteanforderung		-	keine

Mindestaußenluftvolumenstrom	V'_A		
personenbezogen[a]		m³ je Stunde und Person	60
flächenbezogen		m³/(m²h)	-

mechanischer Außenluftvolumenstrom (Praxis)		von	bis
Luftwechsel (allgemein)	1/h	-	6
	1/h	-	-

Beleuchtung			
Wartungswert der Beleuchtungsstärke	E-quer_m	lx	300
Höhe der Nutzungsebene	h_Ne	m	1
Minderungsfaktor	k_A	-	1
relative Abwesenheit	C_A	-	0,3
Raumindex	k	-	2
Minderungsfaktor Gebäudebetriebszeit	F_t	-	1

Personenbelegung		gering	mittel	hoch
maximale Belegungsdichte	m² je Person	30	20	10

Interne Wärmequellen		Vollnutzungs-stunden (h/d)	max. spezifische Leistung (W/m²)		
			tief	mittel	hoch
Personen (125 W je Person)		10	4	6	13
Arbeitshilfen		0	0	0	0
Wärmezufuhr je Tag	q_I,p + q_I,fac Wh/(m²d)		40	60	130

[a] Bedarfsabhängige Lüftungsstrategien sind in Abhängigkeit von produktions- und sicherheitstechnischen Aspekten individuell zu planen und festzulegen.

14.2.3 Ergänzung/Ersetzung vorhandener Nutzungsprofile

Wie sich gezeigt hat, bilden die derzeit in DIN V 18599-10/-100 vorhandenen Nutzungsprofile typische für Hallen relevante reale Nutzungen ab. Im Rahmen der Untersuchung und der Projektbesprechungen wurde jedoch deutlich, dass im Bereich der Montage- und Fertigungshallen wegen der Vielfalt real auftretender Nutzungen weitere Differenzierung innerhalb der Nutzungsprofile nach Teil 10 wünschenswert ist. Des Weiteren soll mit einer Verringerung der jährlichen Nutzungstage erfasst werden, dass in Industriehallen für gewöhnlich eine Betriebspause – normalerweise zur Weihnachtszeit/Jahreswende – eingelegt wird[53].

Daher wird vorgeschlagen, die derzeit vorhandenen Profile für Fertigungs- und Montagehallen

- 22.1 Gewerbliche und industrielle Hallen – grobe Arbeit (vgl. Tabelle 68)
- 22.2 Gewerbliche und industrielle Hallen – feine Arbeit (vgl. Tabelle 69)

durch die drei folgenden Profile zu ersetzen:

- 22.1 Gewerbliche und industrielle Hallen – schwere Arbeit, stehende Tätigkeit (vgl. Tabelle 70)
- 22.2 Gewerbliche und industrielle Hallen – mittelschwere Arbeit, überwiegend stehende Tätigkeit (vgl. Tabelle 71)
- 22.3 Gewerbliche und industrielle Hallen – leichte Arbeit, überwiegend sitzende Tätigkeit (vgl. Tabelle 72)

Hierbei sollen die folgenden Parameter angepasst bzw. geändert werden:

- jährliche Nutzungstage
- Temperatur (größere Bandbreite[54], Vermeidung eines Vorgabewertes „19 °C“[55])
- Mindestaußenluftvolumenstrom (Anlehnung an ASR 5)
- Beleuchtung (Unterstellung einheitlicher Raumgeometrie)
- Wärmeeinträge durch Personen

[53] Nach DIN V 18599 wird von einer gleichmäßigen Verteilung der jährlichen Nutzungstage über das gesamte Jahr ausgegangen. Soll eine real auftretende Nichtnutzungsphase in eine Anzahl von Nichtnutzungstagen gemäß DIN V 18599 „übersetzt“ werden, muss daher eine Wichtung erfolgen – heizintensive Tage haben mehr Gewicht als „heizschwache“ Tage. Es wird eine Verkürzung von 250 auf 230 Nutzungstage vorgeschlagen. Betriebsferien zum Jahreswechsel sind üblicherweise zwar kürzer als 20 Tage, fallen jedoch in die kälteste Zeit der Heizperiode.

[54] Durch die im Vergleich zu DIN V 18599:2007/2009 größere Bandbreite bei des energetisch bedeutsamen Parameters Innenraumsolltemperatur dürfte es dem Anwender leichter fallen, einer realen bzw. zu errichtenden Industriehalle ein Nutzungsprofil zuzuordnen.

[55] In der DIN V 18599 sowie in der EnEV wird eine Innentemperatur von 19 °C mehrfach als Grenze zwischen verschiedenen Anforderungsniveaus herangezogen. Die Zugehörigkeit von „19 °C“ zu einem Anforderungsniveau ist jedoch nicht in jedem Fall klar definiert. Wird für eine Nutzung eine Innentemperatur von 19 °C unterstellt, kann sich hieraus ungewollter Interpretationsspielraum ergeben.

Tabelle 68 Nutzungsprofil 22.1, aktueller Stand DIN V 18599-10/-100

Gewerbliche und industrielle Hallen - grobe Arbeit

Fertigung, Produktion, Montage

Nr. 22.1

Nutzungszeiten			von	bis
tägliche Nutzungszeit		Uhr	7:00	16:00
jährliche Nutzungstage	d_nutz,a	d/a	250	
jährliche Nutzungsstunden zur Tagzeit	t_Tag	h/a	2.193	
jährliche Nutzungsstunden zur Nachtzeit	t_Nacht	h/a	58	
tägliche Betriebszeit RLT und Kühlung		Uhr	6:00	16:00
jährliche Betriebstage für jeweils RLT, Kühlung und Heizung	d_op,a	d/a	250	
tägliche Betriebszeit Heizung		Uhr	6:00	16:00

Raumkonditionen (sofern Konditionierung vorgesehen)			
Raum-Solltemperatur Heizung	theta_i,h,soll	°C	17
Raum-Solltemperatur Kühlung	theta_i,c,soll	°C	28
Minimaltemperatur Auslegung Heizung	theta_i,h,min	°C	15
Maximaltemperatur Auslegung Kühlung	theta_i,c,max	°C	30
Temperaturabsenkung reduzierter Betrieb	delta-theta_i,NA	K	4
Feuchteanforderung		-	keine

Mindestaußenluftvolumenstrom	V'_A		
personenbezogen		m³ je Stunde und Person	-
flächenbezogen[a]		m³/(m²h)	10
Mindestaußenluftvolumenstrom für Gebäude	V'_A,Geb	m³/(m²h)	-
Relative Abwesenheit RLT	C_RLT		[a]
Teilbetriebsfaktor der Gebäudebetriebszeit	F_RLT		[a]

mechanischer Außenluftvolumenstrom (Praxis)		von	bis
Luftwechsel (allgemein)	h-1	-	-
	h-1	-	-

Beleuchtung			
Wartungswert der Beleuchtungsstärke	E-quer_m	lx	300
Höhe der Nutzungsebene	h_Ne	m	0,8
Minderungsfaktor	k_A	-	0,85
relative Abwesenheit	C_A	-	0,1
Raumindex	k	-	2,9
Minderungsfaktor Gebäudebetriebszeit	F_t	-	0,9

Personenbelegung			gering	mittel	hoch
maximale Belegungsdichte		m² je Person	25	20	15

Interne Wärmequellen			Vollnutzungs-stunden (h/d)	max. spezifische Leistung (W/m²)		
				tief	mittel	hoch
Personen (100 W je Person)			8	4	5	7
Arbeitshilfen			8	25	35	45
Wärmezufuhr je Tag	q_l,p + q_l,fac	Wh/(m²d)		232	320	416

[a] Bedarfsabhängige Lüftungsstrategien sind in Abhängigkeit von produktions- und sicherheitstechnischen Aspekten individuell zu planen und festzulegen.

Tabelle 69 Nutzungsprofil 22.2, aktueller Stand DIN V 18599-10/-100

Gewerbliche und industrielle Hallen - feine Arbeit

Fertigung, Produktion, Montage

Nr. 22.2

Nutzungszeiten			von	bis
tägliche Nutzungszeit		Uhr	7:00	16:00
jährliche Nutzungstage	d_nutz,a	d/a	250	
jährliche Nutzungsstunden zur Tagzeit	t_Tag	h/a	2.193	
jährliche Nutzungsstunden zur Nachtzeit	t_Nacht	h/a	58	
tägliche Betriebszeit RLT und Kühlung		Uhr	6:00	16:00
jährliche Betriebstage für jeweils RLT, Kühlung und Heizung	d_op,a	d/a	250	
tägliche Betriebszeit Heizung		Uhr	6:00	16:00

Raumkonditionen (sofern Konditionierung vorgesehen)			
Raum-Solltemperatur Heizung	theta_i,h,soll	°C	19
Raum-Solltemperatur Kühlung	theta_i,c,soll	°C	24
Minimaltemperatur Auslegung Heizung	theta_i,h,min	°C	17
Maximaltemperatur Auslegung Kühlung	theta_i,c,max	°C	26
Temperaturabsenkung reduzierter Betrieb	delta-theta_i,NA	K	4
Feuchteanforderung		-	keine

Mindestaußenluftvolumenstrom	V'_A		
personenbezogen		m³ je Stunde und Person	-
flächenbezogen[a]		m³/(m²h)	10
Mindestaußenluftvolumenstrom für Gebäude	V'_A,Geb	m³/(m²h)	-
Relative Abwesenheit RLT	C_RLT		[a]
Teilbetriebsfaktor der Gebäudebetriebszeit	F_RLT		[a]

mechanischer Außenluftvolumenstrom (Praxis)		von	bis
Luftwechsel (allgemein)	h-1	-	-
	h-1	-	-

Beleuchtung			
Wartungswert der Beleuchtungsstärke	E-quer_m	lx	500
Höhe der Nutzungsebene	h_Ne	m	0,8
Minderungsfaktor	k_A	-	0,85
relative Abwesenheit	C_A	-	0,1
Raumindex	k	-	2,0
Minderungsfaktor Gebäudebetriebszeit	F_t	-	0,9

Personenbelegung			gering	mittel	hoch
maximale Belegungsdichte		m² je Person	25	20	15

Interne Wärmequellen			Vollnutzungs-stunden (h/d)	max. spezifische Leistung (W/m²)		
				tief	mittel	hoch
Personen (80 W je Person)			8	3	4	5,5
Arbeitshilfen			8	25	35	45
Wärmezufuhr je Tag	q_I,p + q_I,fac	Wh/(m²d)		224	312	404

[a] Bedarfsabhängige Lüftungsstrategien sind in Abhängigkeit von produktions- und sicherheitstechnischen Aspekten individuell zu planen und festzulegen.

Tabelle 70 Vorschlag Nutzungsprofil 22.1

Gewerbliche und industrielle Hallen - schwere Arbeit, stehende Tätigkeit

Fertigung, Produktion, Montage

Nr. 22.1

Nutzungszeiten			von	bis
tägliche Nutzungszeit		Uhr	7:00	16:00
jährliche Nutzungstage	d_nutz,a	d/a	230	
jährliche Nutzungsstunden zur Tagzeit	t_Tag	h/a	2.018	
jährliche Nutzungsstunden zur Nachtzeit	t_Nacht	h/a	52	
tägliche Betriebszeit RLT und Kühlung		Uhr	6:00	16:00
jährliche Betriebstage für jeweils RLT, Kühlung und Heizung	d_op,a	d/a	230	
tägliche Betriebszeit Heizung		Uhr	6:00	16:00

Raumkonditionen (sofern Konditionierung vorgesehen)			
Raum-Solltemperatur Heizung	theta_i,h,soll	°C	15
Raum-Solltemperatur Kühlung	theta_i,c,soll	°C	28
Minimaltemperatur Auslegung Heizung	theta_i,h,min	°C	15
Maximaltemperatur Auslegung Kühlung	theta_i,c,max	°C	30
Temperaturabsenkung reduzierter Betrieb	delta-theta_i,NA	K	4
Feuchteanforderung		-	keine

Mindestaußenluftvolumenstrom	V'_A		
personenbezogen[a]		m³ je Stunde und Person	70
flächenbezogen		m³/(m²h)	-
Mindestaußenluftvolumenstrom für Gebäude	V'_A,Geb	m³/(m²h)	-
Relative Abwesenheit RLT	C_RLT		[a]
Teilbetriebsfaktor der Gebäudebetriebszeit	F_RLT		[a]

mechanischer Außenluftvolumenstrom (Praxis)		von	bis
Luftwechsel (allgemein)	1/h	-	-
	1/h	-	-

Beleuchtung			
Wartungswert der Beleuchtungsstärke	E-quer_m	lx	300
Höhe der Nutzungsebene	h_Ne	m	0,8
Minderungsfaktor	k_A	-	0,85
relative Abwesenheit	C_A	-	0,1
Raumindex	k	-	2,5
Minderungsfaktor Gebäudebetriebszeit	F_t	-	0,9

Personenbelegung

		gering	mittel	hoch
maximale Belegungsdichte	m² je Person	25	20	15

Interne Wärmequellen

		Vollnutzungs-stunden (h/d)	max. spezifische Leistung (W/m²)		
			tief	mittel	hoch
Personen	(120 W je Person)	8	5	6	8
Arbeitshilfen		8	25	35	45
Wärmezufuhr je Tag	q_I,p + q_I,fac Wh/(m²d)		240	328	424

[a] Bedarfsabhängige Lüftungsstrategien sind in Abhängigkeit von produktions- und sicherheitstechnischen Aspekten individuell zu planen und festzulegen.

Tabelle 71 Vorschlag Nutzungsprofil 22.2

Gewerbliche und industrielle Hallen - mittelschwere Arbeit, überwiegend stehende Tätigkeit

Fertigung, Produktion, Montage

Nr. 22.2

Nutzungszeiten			von	bis
tägliche Nutzungszeit		Uhr	7:00	16:00
jährliche Nutzungstage	d_nutz,a	d/a	230	
jährliche Nutzungsstunden zur Tagzeit	t_Tag	h/a	2.018	
jährliche Nutzungsstunden zur Nachtzeit	t_Nacht	h/a	52	
tägliche Betriebszeit RLT und Kühlung		Uhr	6:00	16:00
jährliche Betriebstage für jeweils RLT, Kühlung und Heizung	d_op,a	d/a	230	
tägliche Betriebszeit Heizung		Uhr	6:00	16:00

Raumkonditionen (sofern Konditionierung vorgesehen)			
Raum-Solltemperatur Heizung	theta_i,h,soll	°C	17
Raum-Solltemperatur Kühlung	theta_i,c,soll	°C	26
Minimaltemperatur Auslegung Heizung	theta_i,h,min	°C	15
Maximaltemperatur Auslegung Kühlung	theta_i,c,max	°C	28
Temperaturabsenkung reduzierter Betrieb	delta-theta_i,NA	K	4
Feuchteanforderung		-	keine

Mindestaußenluftvolumenstrom	V'_A		
personenbezogen[a]		m³ je Stunde und Person	50
flächenbezogen		m³/(m²h)	-
Mindestaußenluftvolumenstrom für Gebäude	V'_A,Geb	m³/(m²h)	-
Relative Abwesenheit RLT	C_RLT		[a]
Teilbetriebsfaktor der Gebäudebetriebszeit	F_RLT		[a]

mechanischer Außenluftvolumenstrom (Praxis)		von	bis
Luftwechsel (allgemein)	1/h	-	-
	1/h	-	-

Beleuchtung			
Wartungswert der Beleuchtungsstärke	E-quer_m	lx	400
Höhe der Nutzungsebene	h_Ne	m	0,8
Minderungsfaktor	k_A	-	0,85
relative Abwesenheit	C_A	-	0,1
Raumindex	k	-	2,5
Minderungsfaktor Gebäudebetriebszeit	F_t	-	0,9

Personenbelegung		gering	mittel	hoch
maximale Belegungsdichte	m² je Person	25	20	15

Interne Wärmequellen			Vollnutzungs-stunden (h/d)	max. spezifische Leistung (W/m²)		
				tief	mittel	hoch
Personen	(100 W je Person)		8	4	5	7
Arbeitshilfen			8	25	35	45
Wärmezufuhr je Tag	q_I,p + q_I,fac	Wh/(m²d)		232	320	416

[a] Bedarfsabhängige Lüftungsstrategien sind in Abhängigkeit von produktions- und sicherheitstechnischen Aspekten individuell zu planen und festzulegen.

Tabelle 72 Vorschlag Nutzungsprofil 22.3

Gewerbliche und industrielle Hallen - leichte Arbeit, überwiegend sitzende Tätigkeit

Fertigung, Produktion, Montage

Nr. 22.3

Nutzungszeiten			von	bis
tägliche Nutzungszeit		Uhr	7:00	16:00
jährliche Nutzungstage	d_nutz,a	d/a	230	
jährliche Nutzungsstunden zur Tagzeit	t_Tag	h/a	2.018	
jährliche Nutzungsstunden zur Nachtzeit	t_Nacht	h/a	52	
tägliche Betriebszeit RLT und Kühlung		Uhr	6:00	16:00
jährliche Betriebstage für jeweils RLT, Kühlung und Heizung	d_op,a	d/a	230	
tägliche Betriebszeit Heizung		Uhr	6:00	16:00

Raumkonditionen (sofern Konditionierung vorgesehen)			
Raum-Solltemperatur Heizung	theta_i,h,soll	°C	20
Raum-Solltemperatur Kühlung	theta_i,c,soll	°C	24
Minimaltemperatur Auslegung Heizung	theta_i,h,min	°C	18
Maximaltemperatur Auslegung Kühlung	theta_i,c,max	°C	26
Temperaturabsenkung reduzierter Betrieb	delta-theta_i,NA	K	4
Feuchteanforderung		-	keine

Mindestaußenluftvolumenstrom	V'_A		
personenbezogen[a]		m³ je Stunde und Person	30
flächenbezogen		m³/(m²h)	-
Mindestaußenluftvolumenstrom für Gebäude	V'_A,Geb	m³/(m²h)	-
Relative Abwesenheit RLT	C_RLT		[a]
Teilbetriebsfaktor der Gebäudebetriebszeit	F_RLT		[a]

mechanischer Außenluftvolumenstrom (Praxis)		von	bis
Luftwechsel (allgemein)	1/h	-	-
	1/h	-	-

Beleuchtung			
Wartungswert der Beleuchtungsstärke	E-quer_m	lx	500
Höhe der Nutzungsebene	h_Ne	m	0,8
Minderungsfaktor	k_A	-	0,85
relative Abwesenheit	C_A	-	0,1
Raumindex	k	-	2,5
Minderungsfaktor Gebäudebetriebszeit	F_t	-	0,9

Personenbelegung		gering	mittel	hoch
maximale Belegungsdichte	m² je Person	25	20	15

Interne Wärmequellen			Vollnutzungs-stunden (h/d)	max. spezifische Leistung (W/m²)		
				tief	mittel	hoch
Personen	(80 W je Person)		8	3	4	5
Arbeitshilfen			8	25	35	45
Wärmezufuhr je Tag	q_I,p + q_I,fac	Wh/(m²d)		224	312	400

[a] Bedarfsabhängige Lüftungsstrategien sind in Abhängigkeit von produktions- und sicherheitstechnischen Aspekten individuell zu planen und festzulegen.

14.3 Lüftungsverhalten und Gebäudedichtheit, Teil 2/10

14.3.1 Allgemeines

Es ist davon auszugehen, dass die Energiebedarfsberechnungen nach DIN V 18599 tendenziell zu einer Überbewertung der Energieverluste durch Lüftungsvorgänge für Hallengebäude neigen.

14.3.2 Infiltration

In Kapitel 11.2 wurde bereits auf die nur bedingt gegebene Eignung der Bemessungswerte n_{50} nach DIN V 18599-2 für die Bewertung von Hallengebäuden eingegangen. Der aktuelle Stand der Norm ist Abbildung 46 zu entnehmen. Es wird eine Änderung der in Abbildung 46 rot markierten Passagen entsprechend Abbildungen 47 und 48 vorgeschlagen. Diese Änderung beinhaltet:

- Formulierung der Bemessungswerte der Luftdurchlässigkeit als hüllflächenbezogene Werte, welche in n_{50}-Werte umgerechnet werden können – so bleiben Berechnungsschritte, welche sich auf die Größe n_{50} stützen, unberührt.
- Formel zur Umrechnung der Bemessungswerte in n_{50}-Werte
- Überarbeitung der Kategorisierung zur Einschätzung der Luftdichtheit

— Mit mechanischer Lüftung erhöht bzw. vermindert sich der mittlere tägliche Infiltrationsluftwechsel entsprechend Gleichung (60):

$$n_{inf} = n_{50}\, e_{wind} \left(1 + f_{V,mech} \frac{t_{V,mech}}{24\,h}\right) \quad (60)$$

Dabei ist

n_{50} der Luftwechsel bei 50 Pa Druckdifferenz
- — nach erfolgter Dichtheitsprüfung: gemessener Wert,
- — ohne erfolgte bzw. beabsichtigte Dichtheitsprüfung: Standardwerte, vorgegeben nach Tabelle 4;

e_{wind} der Windschutzkoeffizient, als Standardwert gilt: $e_{wind} = 0{,}07$ (entspricht Windschutzkoeffizient nach DIN EN ISO 13790 bei halbfreier Lage, mehr als eine Fassade dem Wind ausgesetzt);

$t_{V,mech}$ die tägliche Betriebsdauer der Lüftungsanlage (siehe DIN V 18599-10);

$f_{V,mech}$ ein Faktor zur Bewertung der durch die mechanische Lüftungsanlage vermehrten oder verminderten Infiltration nach den Gleichungen (61) bis (63).

Tabelle 4 — n_{50}-Bemessungswerte (Standardwerte für ungeprüfte Gebäude)

Kategorien zur pauschalen Einschätzung der Gebäudedichtheit	Bemessungswerte n_{50} h^{-1}
I	a) 2; b) 1
II	4
III	6
IV	10

Die Einstufung der Gebäudedichtheit der Gebäudezone ist in Tabelle 4 festgelegt:

— Kategorie I: Einhaltung der Anforderung an die Gebäudedichtheit nach DIN 4108-7:2001-08, 4.4 (d. h., die Dichtheitsprüfung wird nach Fertigstellung durchgeführt):

a) Gebäude ohne raumlufttechnische Anlage (Anforderung an die Gebäudedichtheit: $n_{50} \leq 3\ h^{-1}$),

b) Gebäude mit raumlufttechnischer Anlage (auch Wohnungslüftungsanlagen) (Anforderung an die Gebäudedichtheit: $n_{50} \leq 1{,}5\ h^{-1}$);

— Kategorie II: zu errichtende Gebäude oder Gebäudeteile, bei denen keine Dichtheitsprüfung vorgesehen ist;

— Kategorie III: Fälle, die nicht den Kategorien I, II oder IV entsprechen;

— Kategorie IV: Vorhandensein offensichtlicher Undichtheiten, wie z. B. offene Fugen in der Luftdichtheitsschicht der wärmeübertragenden Umfassungsfläche.

Abbildung 46 Bemessungswerte des Infiltrationsluftwechsels nach DIN V 18599-2

n_{50} der Luftwechsel bei 50 Pa Druckdifferenz

- nach erfolgter Dichtheitsprüfung: gemessener bzw. aus Messung berechneter Wert,
- ohne erfolgte bzw. bei geplanter, aber noch ausstehender Dichtheitsprüfung: nach Gleichung (61) in Verbindung mit Tabelle 4 berechneter Wert

Abbildung 47 Änderungsvorschlag Bestimmung von n_{50} (1/2), vgl. Abbildung 46

$$n_{50} = \frac{q_{50} * A_{env}}{V_{Netto}} \quad (61)$$

Dabei ist

q_{50} *hüllflächenbezogene Luftdurchlässigkeit nach Tabelle 4*

A_{env} *luftdurchlässige Hüllfläche (Außenflächen abzüglich erdreichberührender Flächen)*

V_{Netto} *Nettoraumvolumen*

Tabelle 4 – q_{50}-Bemessungswerte (Standardwerte für ungeprüfte Gebäude)

Kategorie	Kriterien zur Kategorisierung der Gebäudedichtheit		q_{50} [m³/m²h]
	Dichtheitsprüfung	Anforderung an die Gebäudedichtheit	
I	Eine Dichtheitsprüfung wird nach Fertigstellung durchgeführt.	Hohe Anforderung (z.B. Brandvermeidungsanlage, Kühlhaus, Passiv- und Nullenergiehaus…)	3
II		Mittlere Anforderung	6
III			9
IV	Eine Dichtheitsprüfung wurde nicht durchgeführt und ihre Durchführung ist auch nicht vorgesehen.	Geringe Anforderung (z.B. Gebäude mit niedriger Innentemperatur, unempfindliches Lagergut, kaum Personenaufenthalt); Vorhandensein offensichtlicher Undichtigkeiten in wesentlichem Ausmaß	15

ANMERKUNG: Liegen keine Informationen vor, die Rückschlüsse auf das Anforderungsniveau an die Gebäudedichtheit zulassen, ist von einem mittleren Anforderungsniveau auszugehen.

Abbildung 48 Änderungsvorschlag Bestimmung von n_{50} (2/2), vgl. Abbildung 46

Die vorgeschlagenen Bemessungswerte wurden durch Auswertung von Luftdichtheitsmessungen an verschiedenen Hallen- und Bürogebäuden gewonnen. Unterstellt man typische Wohngebäudeabmessungen, liegen die vorgeschlagenen Bemessungswerte auf geringfügig höherem, aber ähnlichem Niveau wie die derzeit gültigen n_{50}-Bemessungswerte.

Für den Anwender einer Berechnungssoftware nach DIN V 18599 würde die Kategorisierung der Luftdichtheit anhand der beiden Kriterien *Dichtheitsprüfung* und *Anforderung an die Gebäudedichtheit* erfolgen.

Dichtheitsprüfung durchgeführt oder geplant?			
Ja		**Nein**	
Anforderung an Dichtheit		**Anforderung an Dichtheit**	
Hoch	**Mittel**	**Mittel**	**Gering**
3	**6**	**9**	**15**

Abbildung 49 Struktogramm – Auswahl der Gebäudedichtheitskategorie anhand zweier Kriterien

14.3.3 Nutzungsbedingter Außenluftvolumenstrom

Im Rahmen einer Energiebedarfsberechnung nach DIN V 18599 sind für die Berechnung der Lüftungswärmeverluste innerhalb der Nutzungszeit die folgenden Vorgänge und Anforderungen von Bedeutung.

- Toröffnungsvorgänge
- Hygienische Anforderungen
    - Personenbezogene Anforderungen
    - Kompensation innerer Lasten

Toröffnungsvorgänge

Die aus Toröffnungsvorgängen resultierenden Außenlufteinträge können von wesentlicher Bedeutung für den Energiebedarf und -verbrauch von Hallenbauten[56] sein. Gleichzeitig wurde im Rahmen der Untersuchungen deutlich, dass die Bestimmung des Torluftwechsels eine Energiebedarfsberechnung nach DIN V 18599 aus Anwendersicht in jedem Fall verkomplizieren würde. Das hierdurch zusätzlich entstehende Fehlerpotenzial ist nicht unerheblich. Eine Pauschalisierbarkeit des Torluftwechsels oder -volumenstroms ist aufgrund der Variationsmöglichkeiten der zugrundeliegenden Randbedingungen nicht gegeben.

Eine Variation der Randbedingungen innerhalb eines realistischen Bereichs zeigt jedoch, dass der Torluftwechsel sich prinzipiell in der Größenordnung der Nutzungsanforderung des Luftwechsels befinden kann. Für eine energetische Bewertung scheint es daher vertretbar, zu unterstellen, dass ein eventueller Torluftwechsel den effektiven Luftwechsel, welcher sich aus der Nutzungsanforderung ergibt, nicht erhöht. Auf einen Überarbeitungsvorschlag zu diesem Teilproblem wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit verzichtet.

Hygienische Anforderungen

Für die **Profile 22.1 und 22.2** wird vorgeschlagen, Werte in Anlehnung an die noch gültige Arbeitsstättenrichtlinie 5 (ASR 5) festzulegen. Die geänderten Werte wurden bereits in die in 14.2.3 vorgeschlagenen Nutzungsprofile eingearbeitet.

14.4 Bewertung verschiedener Wärmeübergabesysteme, Teil 5

14.4.1 Strahlungseinfluss

Nach DIN V 18599-5 werden die Wärmeverluste der Übergabe unter anderem in Abhängigkeit eines Faktors zur Abbildung des Strahlungseinflusses berechnet.

[56] Hallen stellen Nichtgeschossbauwerke dar. Das Innenvolumen wird im Allgemeinen nicht durch Geschossdecken oder Innenwände von Toröffnungsvorgängen abgeschirmt.

6.1 Wärmeübergabe

In diesem Abschnitt werden die energetischen Kennwerte vorgegeben, die für Heizungsanlagen zur Bestimmung der Verluste zur Wärmeübergabe im Raum erforderlich sind.

Die Berechnung von $Q_{h,ce}$ erfolgt monatlich nach Gleichung (27).

$$Q_{h,ce} = \left(\frac{f_{Radiant} f_{int} f_{hydr}}{\eta_{h,ce}} - 1 \right) Q_{h,b} \qquad (27)$$

Abbildung 50 Berechnung der Wärmeübergabeverluste $Q_{h,ce}$ nach DIN V 18599-5

Nach derzeitigem Stand der Norm wird hinsichtlich des Strahlungsfaktors nur pauschal zwischen Heizungssystemen mit wesentlichem Strahlungsanteil und den restlichen Systemen unterschieden. Für alle Systeme mit wesentlichem Strahlungsanteil gibt die Norm den Faktor $f_{Radiant}$ mit 0,85 vor, für alle anderen mit 1,0. Es wurde gezeigt, dass diese Pauschalisierung nicht gerechtfertigt ist. Es wird eine Änderung der in Abbildung 51 rot markierten Passage gemäß Abbildung 52 vorgeschlagen.

$\eta_{ges} = 1/(4 - (0{,}91 + 0{,}95 + 1)) = 0{,}88$

Faktor für Strahlungseinfluss: $f_{Radiant} = 0{,}85$ für Deckenstrahlplatten, Hellstrahler, Dunkelstrahler und Fußbodenheizung.

Die energetischen Kennwerte der Nutzungsgrade von Heizsystemen in Hallen und der Faktor $f_{Radiant}$ stellen Durchschnittswerte der Heizsysteme bzw. Produktarten dar, die näherungsweise auch für davon abweichende Ausführungen zu verwenden sind.

6.1.7 Nutzungsgrade für Räume mit Höhen > 10 m

In Tabelle 11 werden die Nutzungsgrade für Räume > 10 m angegeben.

Tabelle 11 — Nutzungsgrade für Räume mit Höhen > 10 m

Einflussgrößen			Teilnutzungsgrade				
			η_L			η_C	η_B
			12 m	15 m	20 m		
Raum-tempe-ratur-regelung	Ungeregelt					0,80	
	Zwei-Punkt-Regler					0,93	
	P-Regler (2 K)					0,93	
	P-Regler (1 K)					0,95	
	PI-Regler					0,97	
	PI-Regler mit Optimierung					0,99	
Heiz-systeme	Warmluftheizung	Luftauslass seitlich	0,78	0,72	0,63		1
	Luftverteilung mit normalem Induktionsverhältnis	Luftauslass von oben	0,84	0,78	0,71		1
	Warmluftheizung	Luftauslass seitlich	0,88	0,84	0,77		1
	Luftverteilung zusätzlich mit geregelter vertikaler Rezirkulation	Luftauslass von oben	0,91	0,88	0,83		1
	Warmwasser-Deckenstrahlplatten		0,94	0,92	0,89		1
	Dunkelstrahler (Strahlrohre)		0,94	0,92	0,89		1
	Hellstrahler		0,94	0,92	0,89		1
	Fußbodenheizung (hohes Wärmeschutzniveau)		0,94	0,92	0,89		
		FBH bauteilintegriert					0,95
		FBH thermisch entkoppelt					1

Warmluftheizungen mit erhöhtem Induktionsverhältnis der Luftverteilung:

Die Kennwerte werden durch arithmetische Mittelung der Kennwerte der Systeme mit Luftauslass seitlich und von oben bestimmt.

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

BEISPIEL Raumhöhe 12 m, Dunkelstrahler, P-Regler (2 K)

$\eta_L = 0{,}94$

NormCD - Stand 2007-03

Abbildung 51 Strahlungseinfluss $f_{Radiant}$, aktueller Stand DIN V 18599-5

Strahlungseinfluss $f_{Radiant}$

Der Faktor zur Abbildung des Strahlungseinflusses $f_{Radiant}$ für Heizsysteme in hohen Räumen (Hallen) ist nach Tabelle ### bzw. nach Gleichung ### zu bestimmen.

Tabelle ### - $f_{Radiant}$ für Heizsysteme in hohen Räumen

Wärmeübergabe	$f_{Radiant}$
Warmluftheizung, Heizkörper	1,00
Dunkelstrahler	Berechnung nach Gleichung ###
Hellstrahler	
Deckenstrahlplatten	0,97
Fußbodenheizung	1,00

Für Hell- und Dunkelstrahler ergibt sich $f_{Radiant}$ zu:

$$f'_{Radiant} = \frac{0{,}36}{R_F - 0{,}2} + 0{,}37 * \left(\frac{70}{p_h}\right)^{0{,}12} * \left(\frac{10}{h_R}\right)^{0{,}15} + 0{,}1 \qquad (###)$$

Dabei ist

R_F … der Strahlungsfaktor des Hell-/Dunkelstrahlers nach EN 416-2 bzw. EN 419-2; liegen keine Produktkennwerte vor, ist mit Standardwerten nach Tabelle ### zu rechnen
Ggf. Ergebnisbereich beschränken

p_h … die spezifische Leistung nach Gleichung ###, in W/m²
Ggf. Wertebereich beschränken

h_R … die lichte Raumhöhe, in m
Ggf. Wertebereich beschränken

$$p_h = \frac{P_{h,max}}{A_{NGF}} - \left(p_{I,p} + p_{I,fac}\right) \qquad (###)$$

$P_{h,max}$ … die maximale Heizlast für den Auslegungstag nach DIN V 18599-2 Anhang B, in W

A_{NGF} … die Nettogrundfläche; hierbei ist nur die Fläche des strahlerbeheizten Bereichs anzusetzen

$p_{I,p}$ … die spezifische Wärmeleistung durch Personen nach DIN V 18599-10 Anhang A, in W/m²

$p_{I,fac}$ … die spezifische Wärmeleistung durch Arbeitshilfen nach DIN V 18599-10 Anhang A, in W/m²

Tabelle ### – Standardwerte Strahlungsfaktor R_F für Hell-/Dunkelstrahler

Typ Heizstrahler	Klassifizierung	R_F
Dunkelstrahler	Standard	0,55
	verbessert[a] **Merkmal: Isolierte Reflektoren**	0,68
Hellstrahler	Standard	0,55
	verbessert[a] **Merkmale: Isolierter Kombistrahler**[b]	0,70

[a] Wenn zur Berechnung der Standardwert „verbessert“ eingesetzt wird, muss der Strahlungsfaktor (Produktkennwert) des eingebauten Heizstrahlers mindestens den oben angegebenen Wert aufweisen.

[b] Bei Kombistrahlern wird durch abgasüberströmte Reflektoren zusätzliche Strahlungsleistung erzeugt.

Abbildung 52 Änderungsvorschlag: Bestimmung des Faktors für den Strahlungseinfluss

14.4.2 Teilnutzungsgrade der Wärmeübergabe

Der Energieeffizienz des Teilabschnitts Wärmeübergabe wird mit dem Nutzungsgrad $\eta_{h,ce}$ bewertet (vgl. Abbildung 53).

Konkrete Werte für der Teilnutzungsgrade η_L, η_C, η_B für hohe Räume werden in DIN V 18599-5, Tabelle 10 und 11 angegeben (vgl. Abbildung 54) – zwischen diesen beiden Tabellen ist nur in Bezug auf die Gebäudehöhe zu unterscheiden.

Der Gesamtnutzungsgrad $\eta_{h,ce}$ berechnet sich grundsätzlich zu

$$\eta_{h,ce} = \frac{1}{(4-(\eta_L+\eta_C+\eta_B))} \quad (28)$$

Dabei ist

η_L der Teilnutzungsgrad für vertikales Lufttemperaturprofil;

η_C der Teilnutzungsgrad für Raumtemperaturregelung;

η_B der Teilnutzungsgrad für spezifische Verluste der Außenbauteile.

Abbildung 53 Berechnung des Gesamtnutzungsgrades der Wärmeübergabe nach DIN V 18599-5

Temperaturgradient

Bei der Beheizung hoher Gebäude stellt sich in Abhängigkeit von verschiedenen Gegebenheiten, unter anderem auch von der Art der Wärmeübergabe, ein Lufttemperaturverlauf über der Gebäudehöhe ein. Der energetische Einfluss dieses Temperaturverlaufs wird in DIN V 18599-5 über den Teilnutzungsgrad für das vertikale Lufttemperaturprofil abgebildet.

Im Rahmen der Untersuchungen wurde gezeigt, dass sich η_L prinzipiell als lineare Funktion der Raumhöhe bestimmen lässt (vgl. 12.2.3). Als anlagenspezifische Eingangsgröße ist dann der Lufttemperaturanstieg θ‘ vorzugeben.

Raumtemperaturregelung

Da sich der Teilnutzungsgrad der Raumtemperaturregelung η_C hinsichtlich Kategorisierung deutlich von den anderen beiden Teilnutzungsgraden unterscheidet, sollte er getrennt von den anderen Teilnutzungsgraden dargestellt werden.

Spezifische Bauteilverluste

Anlagenspezifische Wärmeverluste über Außenbauteile, welche entstehen, wenn das verwendete Heizungssystem die Umfassungskonstruktion deutlich erwärmt, werden über den Teilnutzungsgrad für spezifische Bauteilverluste η_B erfasst. Für die Systeme Fußbodenheizung und Deckenstrahlplatten wurden im Rahmen des Projekts überarbeitete Werte vorgeschlagen.

Es wird eine Änderung der in Abbildung 54 rot markierten Passage gemäß Abbildung 55 vorgeschlagen.

6.1.6 Nutzungsgrade für Räume mit Höhen ≥ 4 m (Hallenbauten)

In Tabelle 10 sind die Nutzungsgrade für Räume mit Höhen 4 m bis 10 m angegeben.

Tabelle 10 — Nutzungsgrade für Räume mit Höhen 4 m bis 10 m

Einflussgrößen			Teilnutzungsgrade					
			η_L				η_C	η_B
			4 m	6 m	8 m	10 m		
Raum-tempe-ratur-regelung	Ungeregelt						0,80	
	Zweipunktregler						0,93	
	P-Regler (2 K)						0,93	
	P-Regler (1 K)						0,95	
	PI-Regler						0,97	
	PI-Regler mit Optimierung						0,99	
Heiz-systeme	Warmluftheizung	Luftauslass seitlich	0,98	0,94	0,88	0,83		1
	Luftverteilung mit normalem Induktionsverhältnis	Luftauslass von oben	0,99	0,96	0,91	0,87		1
	Warmluftheizung	Luftauslass seitlich	0,99	0,97	0,94	0,91		1
	Luftverteilung zusätzlich mit geregelter vertikaler Rezirkulation	Luftauslass von oben	0,99	0,98	0,96	0,93		1
	Warmwasser-Deckenstrahlplatten		1,00	0,99	0,97	0,96		1
	Dunkelstrahler (Strahlrohre)		1,00	0,99	0,97	0,96		1
	Hellstrahler		1,00	0,99	0,97	0,96		1
	Fußbodenheizung (hohes Wärmeschutzniveau)	FBH bauteilintegriert	1,00	0,99	0,97	0,96		0,95
		FBH thermisch entkoppelt						1

Abbildung 54 Teilnutzungsgrade für Räume zwischen 4 und 10 m Raumhöhe nach DIN V 18599-5:2007-02

6.1.6 Nutzungsgrade für Heizsysteme in Räumen mit Höhen ≥ 4 m (Hallenbauten)

Tabelle XX[57] – Teilnutzungsgrade der Raumtemperaturregelung η_C für hohe Räume ($h_R \geq 4$ m)

Raumtemperaturregelung	η_C
Ungeregelt	0,80
Zweipunktregler	0,93
P-Regler	0,95
PI-Regler	0,97
PI-Regler mit Optimierung	0,99

Bestimmung von η_L für hohe Räume ($h_R \geq 4$ m):

$$\eta_L = 1 - \frac{\overline{\theta'}_L}{16K} * (0{,}5 * h_R - 1{,}1\ m) \qquad (XX)^{57}$$

$\overline{\theta'}_L$ *Lufttemperaturanstieg über der Raumhöhe [K/m]*
h_R *Raumhöhe [m]*

Tabelle 10 – vertikale Lufttemperaturgradienten und Teilnutzungsgrade der spezifischen Außenbauteilverluste für hohe Räume ($h_R \geq 4$ m)

Wärmeübergabe			θ'_L [K/m]	η_B
Warmluftheizung	ohne Warmluftrückführung (Deckenventilatoren)	seitlicher Luftauslass (Wandgerät)	1,00	1,00
		Luftauslass von oben (Deckengerät)	0,60	
		seitlicher Luftauslass (Wandgerät) – System mit geringer Ausblastemperatur [a]	0,35	
		Luftauslass von oben (Deckengerät) – System mit geringer Ausblastemperatur [a]		
	mit Warmluftrückführung (Deckenventilatoren)	2-Punkt-geregelte Warmluftrückführung	0,35	
		PI-geregelte Warmluftrückführung	0,25	
Dunkelstrahler			0,20	1,00
Hellstrahler			0,20	1,00
Deckenstrahlplatten	Standardfall		0,30	0,97
	Einhaltung Außenwandabstand: $A \geq 0{,}5 * (h_{DSP} - 1{,}1\ m)$ A … Abstand zwischen Außenwand und Längsachse der wandnächsten Deckenstrahlplatte h_{DSP} … Montagehöhe der Deckenstrahlplatten		0,30	1,00
Fußbodenheizung	ohne Dämmung	Rohrüberdeckung ≤ 10 cm	0,10	0,86*
		Rohrüberdeckung > 10 cm [b]		0,81
	bauteilintegriert mit Mindestdämmung nach DIN 4108-2	Rohrüberdeckung ≤ 10 cm		0,90*
		Rohrüberdeckung > 10 cm [b]		0,85
	bauteilintegriert mit Mindestdämmung nach DIN EN 1264	Rohrüberdeckung ≤ 10 cm		0,95
		Rohrüberdeckung > 10 cm [b]		0,90
	thermisch entkoppelt			1,00

[a]) Die Ausblastemperatur darf höchstens 15 K über der Innenraumsolltemperatur liegen. Der angegebene Lufttemperaturanstieg von 0,35 K/m darf nur für Räume mit einer Raumhöhe ≤ 6 m verwendet werden. Bei größerer Raumhöhe ist, ungeachtet der Ausblastemperatur, mit dem Wert nach Zeile 1 (1,00 K/m) oder Zeile 2 (0,60 K/m) zu rechnen.

[b]) Die angegebenen Werte für η_B bei einer Rohrüberdeckung > 10 cm berücksichtigen energetische Effekte, welche sich durch die systembedingte Trägheit bei Nutzung mit Nutzungsunterbrechungen (z.B. Nachtabsenkung/-abschaltung) ergeben; bei vorwiegend 24-stündiger Nutzung ist, unabhängig von der tatsächlichen Rohrüberdeckung, mit den Werten für *Rohrüberdeckung ≤ 10 cm* zu rechnen.

ANMERKUNG: Die in Tabelle ### genannten Werte vertikaler Lufttemperaturanstiege wurden empirisch als **Mittelwerte** über die Zustände Nutzungszeit (Anlagenbetrieb) und Nichtnutzungszeit (Abschaltung bzw. Absenkbetrieb) ermittelt.

Abbildung 55 Änderungsvorschlag Teilnutzungsgrade Wärmeübergabe

[57] Die Nummerierung ist bei Einbringung in DIN V 18599-2 entsprechend der vorhandenen Nummerierung der Norm anzupassen.

14.5 Verluste der Wärmeerzeugung, Teil 5

Gegenwärtig werden Wärmeerzeugerverluste für dezentrale Hallenheizungen gemäß Abbildung 56 berechnet.

6.4.3.4.5 Hallenheizung

Dunkelstrahler (Art C), dezentraler Warmlufterzeuger (Art C)

Der Verlust der Wärmeerzeugung für Dunkelstrahler und dezentrale Warmlufterzeuger ergibt sich zu:

$$Q_{h,g} = f \cdot Q_{h,out} \quad \text{in kWh je Monat} \qquad (131)$$

Dabei ergeben sich folgende Nutzungsgrade (siehe Tabelle 36).

Tabelle 36 — Nutzungsfaktor

Nennwärmeleistung kW	Faktor f
> 4 bis 25	0,111
> 25 bis 50	0,099
> 50	0,087

Dabei ist davon auszugehen, dass diese Wärmeerzeuger im Nutzraum raumluftunabhängig aufgestellt sind und an einer konzentrischen Luft-/Abgasleitung angeschlossen sind.

Hellstrahler (Art A)

Die Heizungsanlage besteht in der Regel aus mehreren Hellstrahlern. Der Verlust der Wärmeerzeugung für Hellstrahler-Anlagen ergibt sich zu:

$$Q_{h,g} = V_{Abluft,spez} \cdot c_{p,Abluft} \cdot (\vartheta_{Abluft} - \vartheta_{Außen}) \cdot t_{h,rL} \qquad (132)$$

Dabei ist

$V_{Abluft,spez}$ der spezifische Verbrennungsluftbedarf = 10 m³/(h · kW Heizlast);

$c_{p,Abluft}$ die spezifische Wärmekapazität = 0,361 Wh/(m³ · K);

ϑ_{Abluft} die Ablufttemperatur = 18 °C;

ϑ_e die mittlere monatliche Außenlufttemperatur (siehe 4.1), in (°C);

$t_{h,rL}$ die monatliche rechnerische Laufzeit (siehe 5.4.1), in h.

Dabei ist davon auszugehen, dass diese Wärmeerzeuger im Nutzraum aufgestellt sind und eine indirekte Abgasführung nach DIN EN 13410 besitzen.

Hilfsenergie für Hellstrahler

Hilfsenergie für Wand- oder Deckenventilatoren, bezogen auf den Nutzwärmebedarf der Halle, beheizt mit Hellstrahler-Anlage

$$Q_{h,g,ms} = 0{,}000\,6 \cdot Q_{h,b} \quad \text{in kWh je Monat} \qquad (133)$$

Abbildung 56 Berechnung der Wärmeerzeugerverluste dezentraler Hallenheizungen nach DIN V 18599-5

Es wird eine Änderung der in Abbildung 56 rot markierten Passage gemäß Abbildung 57 vorgeschlagen. Der Absatz *Hilfsenergie für Hellstrahler* entfällt an dieser Stelle.

#.#.#.#.# Dezentrale Systeme der Hallenheizung

Der Verlust der Wärmeerzeugung für dezentrale Hallenheizsysteme ist nicht rückgewinnbar. Er ergibt sich zu:

$$Q_{h,g} = \left(\frac{f_{HS/HI}}{\eta_{h,g}} - 1\right) * Q_{h,outg} \qquad (###)$$

Dabei ist

$Q_{h,g}$ … der monatliche Verlust der Wärmeerzeugung des dezentralen Hallenheizsystems, in kWh

$f_{HS/HI}$ … das Brennwert-Heizwert-Verhältnis nach DIN V 18599-1, Anhang B

$\eta_{h,g}$ … der heizwertbezogene Erzeugerwirkungsgrad des jeweiligen Systems gemäß Gleichung ### bzw. Tabelle ###

$Q_{h,outg}$ … die monatliche Erzeugernutzwärmeabgabe nach 4.2.1, in kWh

Hellstrahler mit indirekter Abgasabfuhr (Art A)

Der heizwertbezogene Wirkungsgrad der Wärmeerzeugung für Hellstrahler-Anlagen mit indirekter Abgasabfuhr mit der Hallenluft gemäß DIN EN 13410 ergibt sich monatsweise zu:

$$\eta_{h,g} = min\left(1 - \dot{V}_{ABL,spez} * c_{p,ABL} * \left(0{,}25\frac{K}{m} * h_R + \theta_{ih,soll} - 2K - \theta_e\right); 1\right) \qquad (###)$$

Dabei ist

$V'_{ABL,spez}$ … der spezifische Abluftbedarf (indirekte Abgasabfuhr) = 10 m³/(h*kW)

$c_{p,ABL}$ … die spezifische Wärmekapazität der Abluft = 0,34 * 10^{-3} kWh

h_R … die lichte Raumhöhe, in m

$\theta_{ih,soll}$ … die Innenraumsolltemperatur gemäß Nutzung (DIN V 18599-10), in °C

θ_e … die monatsmittlere Außentemperatur nach DIN V 18599-10, in °C

Systeme mit direkter Abgasführung

Der heizwertbezogene Erzeugerwirkungsgrad für dezentrale Hallenheizsysteme mit direkter Abgasführung ist nach Tabelle ### zu wählen. Für dezentrale Luftheizungen können alternativ produktspezifische Kennwerte nach EN 13842 oder FprEN 1196:2011 eingesetzt werden.

Tabelle ### – Wärmeerzeugerwirkungsgrade dezentraler Hallenheizsysteme mit direkter Abgasabführung

Wärmeerzeugersystem	Abgassystem		Leistungsregelung[a]	$\eta_{h,g}$[b]
Warmlufterzeuger	Abgasabfuhr mit erzwungenem Zug	nicht kondensierend	1	0,91
			2	0,93
		kondensierend	1	1,01
			2	1,04
Dunkelstrahler (einschließlich rezirkulierender Systeme)	Abgasanlage ohne Abgaswärmeübertrager	nicht kondensierend	1	0,91
			2	0,93
	Abgasanlage mit Abgaswärmeübertrager	kondensierend	1	1,01
			2	1,04
Hellstrahler	Abgasanlage mit Abgaswärmeübertrager	kondensierend	1	1,01
			2	1,04

[a] 1: einstufig oder mehrstufig/modulierend ohne Anpassung der Verbrennungsluftmenge; 2: mehrstufig/modulierend mit Anpassung der Verbrennungsluftmenge

[b] Die angegebenen Wirkungsgrade $\eta_{h,g}$ gelten für einen Leistungsbereich von 25-50 kW/Gerät. Ferner sind sie anzuwenden, falls die Geräteleistung nicht bekannt ist. Bei bekannter Geräteleistung ist der Wirkungsgrad für Geräte mit mehr als 50 kW/Gerät um 0,01 zu erhöhen und für Geräte mit weniger als 25 kW/Gerät um 0,01 zu verringern.

Abbildung 57 Vorschlag zur Bestimmung der Erzeugerverluste dezentraler Hallenheizungen

14.6 Hilfsenergie, Teil 5

Zur Ermittlung der Hilfsenergie bietet sich ein Ansatz analog der Berechnung der Erzeugerverluste an.

Es wird eine Änderung der in Abbildung 58 rot markierten Passage gemäß Abbildung 59 und 60 vorgeschlagen.

Hilfsenergie in Hallenbauten (h > 4 m) – Systeme mit direkter Beheizung

Speziell in Hallenbauten kommen u. a. Heizgeräte zum Einsatz, deren Wirkungsweise nicht sinnvoll in die Teilsysteme Wärmeerzeugung und Wärmeübergabe differenziert werden kann und die gleichzeitig im Nutzraum aufgestellt sind (z. B. Gas- Infrarotstrahler). Die gesamte Hilfsenergie dieser Systeme kommt dem Wärmebedarf des Aufstellraumes zugute (siehe Tabelle 14, oberer Bereich).

$$Q_{h,ce,aux} = \frac{P_{h,aux} \cdot t_{h,rL}}{1000} \quad (36)$$

Hilfsenergie in Hallenbauten (h > 4 m) – Systeme ohne direkte Beheizung

Bei Hallenheizsystemen mit zentralem Wärmeerzeuger und separatem Aggregat zur Wärmeübergabe im Nutzraum kommt nur die Hilfsenergie für die Wärmeübergabe dieser Systeme dem Raumwärmebedarf zugute (siehe Tabelle 14, unterer Bereich).

$$Q_{h,ce,aux} = \frac{P_{h,ce,aux} \cdot t_{h,rL}}{1000} \quad (37)$$

Dabei ist (für Gleichungen (36) und (37))

$Q_{h,ce,aux}$ die monatliche Hilfsenergie (Wärmeübergabe und gegebenenfalls Wärmeerzeugung nach Gleichung (36)), in kWh;

$P_{h,aux}$ die Nennleistungsaufnahme des Gerätes nach Tabelle 14 oder Herstellerangaben (Wärmeerzeugung und Wärmeübergabe), in W;

$P_{h,ce,aux}$ die Nennleistungsaufnahme des Gerätes nach Tabelle 14 oder Herstellerangaben (Wärmeübergabe), in W;

$t_{h,rL}$ die monatliche rechnerische Laufzeit (siehe 5.4.1), in h.

Die Betriebsdauer des Ventilators/Gebläses einschließlich Regelung wird der Betriebszeit der Heizung gleichgesetzt.

In Tabelle 14 werden die Standardwerte für die Hilfsenergie von Gebläsen und zur Regelung in Räumen h > 4 m Höhe (Hallenbauten) angegeben.

Abbildung 58 Hilfsenergie von dezentralen Hallenheizungen, aktueller Stand DIN V 18599-5

Hilfsenergie von Heizsystemen in Hallenbauten (h > 4 m) – Dezentrale Systeme

Speziell in Hallenbauten kommen teilweise dezentrale Heizsysteme zum Einsatz, die die Teilsysteme Wärmeerzeugung und Wärmeübergabe in einer Baueinheit vereinen, und die im zu beheizenden Raum aufgestellt sind (z. B. Gas-Infrarotstrahler). Die **gesamte Hilfsenergie** dieser Systeme ist nach Gleichung 36 zu berechnen. Sie kommt dem Wärmebedarf des Aufstellraumes zu Gute.

$$W_{h,ce} = f_{h,ce,aux} * Q_{h,outg} \quad (36)$$

Dabei ist

$W_{h,ce}$ … die monatliche Hilfsenergie für den Betrieb des dezentralen Wärmeerzeugers bzw. einer Anlage gleichartiger dezentraler Wärmeerzeuger, in kWh

$f_{h,ce,aux}$ … der Hilfsenergiefaktor des jeweiligen Systems gemäß Tabelle ###

$Q_{h,outg}$ … die monatliche Erzeugernutzwärmeabgabe nach 4.2.1, in kWh

Tabelle ### – Hilfsenergiefaktoren dezentraler Hallenheizsysteme

Wärmeerzeugung und -übergabe (dezentrale Systeme)			$f_{h,ce,aux}$
direkter Warmlufterzeuger	ohne Warmluftrückführung	Axialventilator	0,012
		Radialventilator	0,018
	mit Warmluftrückführung	Axialventilator	0,013
		Radialventilator	0,019
		Radialventilator, mehrstufige/modulierende Anlage (Leistungsreglung 2), kondensierend[a]	0,017
Dunkelstrahler			0,004
Hellstrahler	indirekte Abgasführung		0,0025
	Abgasanlage mit Abgaswärmeübertrager (kondensierend)		0,0083
[a]) Variante korrespondiert mit Tabelle ### (Erzeugernutzungsgrade), Zeile 2: Warmlufterzeuger, Abgasanlage mit erzwungenem Zug, kondensierend, Leistungsreglung 2			

ANMERKUNG: Der in Tabelle ### (Zeile 8) angegebene Hilfsenergiefaktor für Heizungssysteme mit Hellstrahlern umfasst auch die Hilfsenergie für Ventilatoren im Decken- oder oberen Wandbereich zur indirekten Abfuhr der Abgase aus dem Aufstellraum gemäß DIN EN 13410.

Abbildung 59 Vorschlag Bestimmung der Hilfsenergie dezentraler Hallenheizungen

Hilfsenergie von Heizsystemen in Hallenbauten (h > 4 m) – Systeme mit zentralem Wärmeerzeuger

Bei Hallenheizsystemen mit zentralem Wärmeerzeuger und separatem Aggregat zur Wärmeübergabe im Nutzraum (indirekter Lufterhitzer) kommt nur die Hilfsenergie für die Wärmeübergabe dieser Systeme dem Raumwärmebedarf zu Gute. Sie ergibt sich nach Gleichung 37.

$$W_{h,ce} = f_{h,ce,aux} * Q_{hb} \quad (37)$$

Dabei ist

$W_{h,ce}$ … die monatliche Hilfsenergie der Wärmeübergabe, in kWh

$f_{h,ce,aux}$ … der Hilfsenergiefaktor des jeweiligen Systems gemäß Tabelle ###

$Q_{h,b}$ … der monatliche Nutzwärmebedaf nach DIN V 18599-2, in kWh

Tabelle ### – Hilfsenergiefaktoren der Wärmeübergabe, Hallenheizungen mit zentraler Wärmeerzeugung

Wärmeübergabe (Systeme mit zentralem Wärmeerzeuger)			$f_{h,ce,aux}$
indirekter Lufterhitzer bei Raumhöhe ≤ 8 m	ohne Warmluftrückführung	Systemgebläse mit Asynchronmotor	0,008
		Systemgebläse mit geregeltem EC-Motor	0,004
	mit Warmluftrückführung	Systemgebläse mit Asynchronmotor	0,009
		Systemgebläse mit geregeltem EC-Motor	0,005
indirekter Lufterhitzer b i Raumhöhe > 8 m	ohne Warmluftrückführung	Systemgebläse mit Asynchronmotor	0,012
		Systemgebläse mit geregeltem EC-Motor	0,006
	mit Warmluftrückführung	Systemgebläse mit Asynchronmotor	0,013
		Systemgebläse mit geregeltem EC-Motor	0,007

Abbildung 60 Vorschlag Bestimmung Hilfsenergie der Wärmeübergabe bei Hallenheizungen mit zentraler Wärmeerzeugung

15 Projektresultate und weiterhin bestehende Probleme

15.1 Allgemeines

Im Rahmen des vorliegenden Projektes wurden vorwiegend hallenbezogene Teilprobleme des Berechnungsverfahrens nach DIN V 18599 untersucht.

Dabei wurde sich an wesentlichen Hauptschwerpunkten orientiert, welche gleichzeitig als Kritikpunkte an der DIN V 18599 zu verstehen sind.

- Mit Energiebedarfsberechnungen nach DIN V 18599 erfolgen fast immer deutliche Überschätzungen realer Verbräuche (betrifft vorwiegend DIN V 18599-2 und -10) – das Niveau der berechneten Energiebedarfswerte ist zu hoch.
- Vor dem Hintergrund der Energieausweiserstellung einerseits sowie der Energieberatung andererseits ist eine sinnvoll differenzierte Abbildung üblicher zeitgemäßer und marktgängiger Hallenheizungssysteme notwendig. Mit DIN V 18599:2007/2009 ist eine solche Abbildung nur bedingt, teilweise gar nicht, möglich.
- Der Einsatz der DIN V 18599:2007/2009 als Berechnungswerkzeug im Rahmen von Energieberatungen, Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen etc. ist aus o.g. Gründen nur bedingt möglich. Ein entsprechendes ingenieurmäßig anwendbares Berechnungswerkzeug ist jedoch zwingende Voraussetzung zur Ausschöpfung energetischer Potenziale im Hallenbestand und -neubau.

In einer Reihe von Untersuchungen wurden in mehreren Bereichen der DIN V 18599 Unzulänglichkeiten hinsichtlich Abbildung von Hallengebäuden und der hierin verwendeten Heizungssysteme aufgezeigt und Überarbeitungsvorschläge erbracht.

Im Folgenden wird kurz und auszugsweise auf wesentliche der untersuchten Teilprobleme und hieraus hervorgegangene Ergebnisse eingegangen; zudem werden weiterhin bestehende Probleme, welche aus Sicht der Autoren in einem oder mehreren gesonderten Projekt(en) untersucht werden sollten, genannt.

15.2 Untersuchte Teilprobleme

15.2.1 Gesamtsituation: Heizenergieverbrauch Hallen in Deutschland

Auf Grundlage einer Auswertung von statistischen Daten zum Bauaufkommen konnte der Gesamtheizenergieverbrauch für Hallen in Deutschland qualifiziert geschätzt werden. Es wurde gezeigt, dass ein wesentlicher Anteil Heizenergie auf die Beheizung von Hallengebäuden entfällt und hier erhebliches Einsparpotenzial vorhanden ist. Zudem wurde, basierend auf aktuellen Daten, der zukünftige Heizenergieverbrauch für Hallengebäude prognostiziert. Es konnte gezeigt werden, dass eine energetische Ertüchtigung des Hallenbestands ein merklich größeres Einsparpotenzial birgt als eine zukünftige Verschärfung des Neubau-Anforderungsniveaus (vgl. 8, insbesondere 8.5.2/8.5.3 und 8.5.5).

15.2.2 Bedarf ↔ Verbrauch

Energieverbrauchswerte realer Hallen sowie korrespondierende Energiebedarfswerte nach DIN V 18599 (Energieausweise) wurden vergleichend ausgewertet. Hierbei bestätigte sich die aus anderen Untersuchungen bekannte Tendenz, dass mit Energiebedarfsberechnungen nach DIN V 18599 in der Regel eine deutliche Überbewertung realer Energieverbräuche erfolgt. So weit wie es Datenumfang erlaubt, wurden Einflüsse auf die Abweichung zwischen Bedarf und Verbrauch analysiert und Schlussfolgerungen gezogen (vgl. 7, insbesondere 7.3, 7.4).

15.2.3 Charakterisierung von Hallen / Standardnutzungsprofile

In Absprache mit der Projektbegleitgruppe wurde ein Gebäudekatalog erstellt, welcher typische Hallen bzw. Anwendungsfälle für Hallengebäude enthält[58] (vgl. 3, insbesondere 3.4). Diese von allen Projektbeteiligten als typische Anwendungsfälle betrachteten Modellgebäude/-nutzungen lassen sich weitestgehend mit den in DIN V 18599-10/-100 dargestellten Nutzungsprofilen abbilden. Im Rahmen des Projektes wurden vereinzelte Anpassungen bzw. die Neugestaltung von Nutzungsprofilen vorgeschlagen (vgl. 14.2.3).

Der erstellte Gebäudekatalog bildet die Grundlage von mehreren im Rahmen des Projektes durchgeführten Untersuchungen (vgl. 6).

15.2.4 Wärmespeicherfähigkeiten von Hallengebäuden, Bilanzinnentemperatur

Exemplarisch wurden Wärmespeicherfähigkeiten typischer Hallennutzungen – Gebäudebauteile und Ausstattung – ermittelt und festgestellte, wie stark sich Variationen

[58] Bewusst wurde auf hierbei auf Mischgebäude – wie z.B. Werk- oder Lagerhalle mit angeschlossenem Büro-/Sanitärtrakt etc. – verzichtet. Solche Mischgebäude sind in der Praxis häufig anzutreffen und stellen für viele Nutzungen sogar den Regelfall dar. Jedoch ist ihre Abbildung, sowohl mit Berechnungsprogrammen für Energiebedarfsberechnungen nach DIN V 18599 als auch mit Simulationssoftware um ein Vielfaches aufwendiger als die Abbildung von hinsichtlich Nutzung einzonigen Gebäuden. Für die untersuchten Teilprobleme wäre hieraus jedoch kein zusätzlicher Erkenntnisgewinn zu erwarten.

energetisch auswirken. Thematisch eng verknüpft sind die Bestimmung der Zeitkonstante sowie die resultierende Bilanzinnentemperatur.

Für die untersuchten Teilprobleme konnten teilweise Unzulänglichkeiten im Berechnungsverfahren nach DIN V 18599 aufgezeigt und überarbeitete Berechnungsansätze vorgelegt werden. Da die aufgezeigten Ungenauigkeiten bzw. ihr Einfluss auf das Gesamtergebnis jedoch als geringfügig einzustufen sind, wurde auf die Formulierung konkreter Überarbeitungsvorschläge verzichtet (vgl. 9, 10).

15.2.5 Lüftungswärmeverluste von Hallen

Die Erfassung von Infiltrations-Lüftungswärmeverlusten geschieht gemäß DIN V 18599:2007/2009 nach einem Verfahren, welches nur auf einen eingeschränkten Bereich von Gebäudegrößen bzw. -kompaktheiten sinnvoll anwendbar ist. Für große Gebäude, wie z.B. Hallen, ergeben sich hiermit in der Regel deutlich zu hohe rechnerische Infiltrations-Lüftungswärmeverluste. Im Rahmen der vorliegenden Studie wurde ein alternativer Berechnungsansatz erarbeitet, welcher unabhängig von der Gebäudegröße anwendbar ist. Parallel wurden Luftdichtheitsmessergebnisse von Hallen- und Bürogebäuden ausgewertet – auf Grundlage dieser Auswertung wurden in Rücksprache mit Experten aus dem Bereich Lüftung/Luftdichtheitsmessung Bemessungswerte zur Verwendung in dem vorgeschlagenen Ansatz formuliert (vgl. 11.2, 11.4).

Des Weiteren wurden die Angaben von nutzungsbedingten Mindestaußenluftvolumenströmen gemäß DIN V 18599-10/-100 anhand einschlägiger Literatur/Normwerke auf Nachvollziehbarkeit geprüft. Für den Bereich Industrie/Fertigung wurden Änderungen vorgeschlagen (vgl. 11.3, 11.4).

Entsprechende Normänderungsvorschläge wurden erarbeitet und in den Normentwurf DIN V 18599:2011 eingebracht (vgl. 14.3). Die vorgeschlagenen Änderungen wirken sich in vielen Fällen wesentlich auf das Energiebedarfsniveau von Hallen bei Energiebedarfsberechnungen nach DIN V 18599 aus – für große Gebäude ergeben sich deutlich geringere Lüftungswärmeverluste.

Wechselwirkungen der vorgeschlagenen Änderungen, welche DIN V 18599-2 und -10 betreffen, mit DIN V 18599-5 – derart, dass sich z.B. unplausible Änderungen der energetischen Verhältnisse zwischen unterschiedlichen Anlagenvarianten ergeben – sind nicht zu erwarten, da die Bewertung der Anlageneffizienz von Hallenheizungen gemäß DIN V 18599-5 weitgehend unabhängig vom der gebäude-/nutzungsseitigen Bewertung nach DIN V 18599-2 geschieht[59].

15.2.6 Anlagentechnik / Energieeffizienz verschiedener Hallenheizsysteme

Besonderes Augenmerk galt der Bewertung von typischen Systemen zur Hallenbeheizung. In DIN V 18599-5 bereits vorhandene Ansätze zur Bewertung der anlagenspezifischen Teilprobleme

- Wärmeübergabeverluste
- Wärmeerzeugerverluste
- Hilfsenergie

[59] Lediglich bei der Berechnung von $f_{Radiant}$ für Hell- und Dunkelstrahler ergibt sich ein Einfluss durch die Einbeziehung der *maximalen Heizleistung am Auslegungstag* nach DIN V 18599-2. Dieser Einfluss ist jedoch gewollt und auch plausibel (vgl. 12.2.2).

von Systemen zur Hallenbeheizung wurden aufgegriffen, untersucht und umfangreich überarbeitet.

Hierbei wurden fehlerhafte Passagen des aktuellen Normstands 2007/2009 korrigiert sowie Überarbeitungen von Normtext, Berechnungsverfahren/-schritten und verwendeten Parametern vorgenommen um die Norm einerseits nachvollziehbarer zu gestalten und andererseits hallentypische Anlagensysteme exakter und energetisch stärker differenziert als bisher abbilden zu können.

Für ausgewählte Fälle wurden aufwendige energetische Gebäudesimulationen durchgeführt (vgl. 13). Zur Verifizierung der eingebrachten Änderungsvorschläge (DIN V 18599-5) bzw. zur Anpassung von enthaltenen Berechnungsparametern fand ein iterativer Abgleich zwischen den Simulationsergebnissen und Berechnungsergebnissen nach DIN V 18599 – unter Berücksichtigung der eingebrachten Änderungsvorschläge – statt (vgl. 13, insbesondere 13.7).

Entsprechende umfangreiche Änderungen zu den o.g. Schwerpunkten wurden in den Normentwurf DIN V 18599:2011 eingebracht (vgl. 12.2, 12.3, 14.4, 14.5, 14.6).

15.3 Weiterhin bestehende Schwierigkeiten im Umgang mit der DIN V 18599

15.3.1 Transmissionswärmeverluste an das Erdreich

Transmissionswärmeverluste an das Erdreich können gemäß DIN V 18599 [1][2] über ein vereinfachtes Verfahren mit Temperaturkorrekturfaktoren oder mithilfe des stationären Wärmetransferkoeffizienten nach DIN EN ISO 13370 bestimmt werden. Bei großen Wärmeverlusten über das Erdreich ist auch eine detaillierte Berechnung nach DIN EN ISO 13370, *Anhang B.1* zulässig. Für nur beheizte Gebäudezonen ist eine Berechnung nach dem vereinfachten Verfahren mit Temperaturkorrekturfaktoren festgelegt. Dementsprechend findet dieses Verfahren in der täglichen Praxis der Energieausweiserstellung in einer Vielzahl der Fälle Anwendung.

Besonders bei der Abbildung von Gebäuden mit verhältnismäßig großer Bodenfläche, wie z.B. Hallen[60], ergeben sich hierbei Schwierigkeiten in der Anwendung von Norm bzw. einer entsprechenden Berechnungssoftware.

- Es ergeben sich in der Regel deutlich höhere rechnerische Wärmeverluste an das Erdreich als mit einer Berechnung nach DIN EN ISO 13370 (stationärer Wärmetransferkoeffizient). Die Größenordnung dieser Verluste ist folglich zu hinterfragen.
- Aus Sicht eines Norm-Anwenders fällt es mitunter schwer, den richtigen Korrekturfaktor für einen konkreten Fall zu ermitteln. In der Folge wird dieses Teilproblem in verschiedenen Software-Lösungen auch unterschiedlich gehandhabt – teilweise werden von der Software falsche Korrekturfaktoren ausgewählt, teilweise wird die Auswahl nicht vom Programm getroffen sondern gänzlich dem Software-Anwender überlassen.

[60] Im Vergleich zu üblichen Wohn-/Geschossbauten besitzen Hallen oftmals sowohl absolut als auch anteilig (bezogen auf Gesamthüllfläche) deutlich größere Berührungsflächen zum Erdreich (Bodenplatte).

Eine umfangreiche Untersuchung der Wärmetransportvorgänge in das und im Erdreich unter Bodenplatten von großen Gebäude und Hallen ist aus Sicht der Autoren erstrebenswert. Dem Anwendungsfall Hallengebäude wäre hierbei aufgrund seiner Besonderheiten – vollflächige Bodendämmung in vielen Fällen unwirtschaftlich; Einsatz hallenspezifischer Wärmeübergabesysteme; teilweise ausgedehnte Nutzungspausen, teilweise durchgehender Betrieb etc. – besondere Aufmerksamkeit zu schenken.

Unter Variation aller relevanten Einflussgrößen, wie z.B.

- Erdreichbeschaffenheit, Grundwassersituation
- Geometrie und baulicher Wärmeschutz der Bodenplatte
- Betriebsweise (dynamischer oder durchgehender Heizbetrieb)
- Wärmeübergabesystem
- …

sollten die energetisch bedeutsamsten Parameter herausgearbeitet werden. Das Ziel der Untersuchung muss die Erarbeitung eines mit überschaubarem Aufwand ingenieurmäßig anwendbaren und nachvollziehbaren Verfahrens zur Bestimmung der Transmissionswärmeverluste an/über das Erdreich sein, welches dann beispielsweise das in DIN V 18599:2007 implementierte *vereinfachte Verfahren mit Temperaturkorrekturfaktoren* ersetzen könnte.

15.3.2 Erfassung Dynamischer Betriebsweise auf Anlagenseite

In Abhängigkeit von der systemspezifischen Flinkheit/Trägheit der Heizungsanlage können sich bei dynamischer Nutzung – Betrieb mit ausgeprägten Betriebspausen, z.B. 1-Schicht-Betrieb – energetische Effekte ergeben. So kann sich ein sehr flinkes System besser an den wechselnden Wärmebedarf anpassen als ein sehr träges System. Ein trägeres System neigt – bei gleicher geforderter Mindestbehaglichkeit – tendenziell stärker zum Überheizen[61]. In der Folge kann das flinke System bei dynamischer Betriebsweise effizienter arbeiten als das träge System. Bei überwiegend durchgehender Nutzung ist die Trägheit oder Flinkheit hingegen kaum von Bedeutung.

Nach Normstand 2007/2009 gibt es keine Möglichkeit, anlagenspezifische Aufheiz-/Abkühlcharakteristiken zu erfassen. Der Berechungsansatz zur Bilanzinnentemperatur nach DIN V 18599-2 erfasst eine dynamische Betriebsweise – durch Einbeziehung von Nachtabschaltung/-absenkung – zumindest gebäudeseitig. Von einer Überarbeitung dieses Ansatzes sowie einer möglichen Einbeziehung anlagenspezifischer Parameter wurde jedoch abgesehen.

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurden für die energetische Bewertung von Industrie-Fußbodenheizungen, welche sich als sehr träge Systeme erwiesen haben, die Unterscheidungskriterien *Überdeckung*[62] und *Betriebsweise*[63] eingeführt und in den Normentwurf DIN V 18599:2011 eingebracht. Hierdurch lassen sich energetische Effekte, welche durch die Systemträgheit bedingt werden, näherungsweise erfassen (vgl. 14.4.2).

[61] Gemeint sind hier sowohl das Überschreiten der Solltemperatur innerhalb der Nutzungszeit als auch Wärmeüberträge in die Nichtnutzungszeit (z.B. durch Speicher-/Entspeichervorgänge der Bodenplatte bei Fußbodenheizungen).

[62] Gemeint ist die Schichtdicke des Fußbodenaufbaus über den Heizrohren.

[63] Der eingebrachte Normänderungsvorschlag sieht derzeit nur eine grobe Unterscheidung – in durchgehenden und nicht durchgehenden Betrieb – vor.

Aus Sicht der Autoren sollte zu diesem Teilproblem jedoch eine ausgedehnte Untersuchung im Rahmen eines weiteren Forschungsprojektes erfolgen, sodass ein allgemeines Einflussglied zur Erfassung der anlagenspezifischen Flinkheit/Trägheit formuliert werden kann.

15.3.3 Nicht plausible Effekte

Die nachfolgend aufgeführten Phänomene sind nicht auf die im Rahmen der vorliegenden Arbeit erbrachten Änderungsvorschläge zur DIN V 18599 zurückzuführen. Sie lassen sich auch in einer Energiebedarfsberechnung nach Normstand 2007/2009 durch Variation der entsprechenden Parameter provozieren. Die im Rahmen des Projekts erbrachten Normänderungsvorschläge bewirken unter anderem ein Absinken des rechnerischen Heizenergiebedarfs in vielen Fällen – da die nachfolgend aufgeführten Effekte anscheinend an das Verhältnis von Wärmequellen zu -senken gekoppelt sind, treten sie nunmehr deutlicher in Erscheinung.

Einfluss der täglichen Nutzungsstunden

Bei Variationen des Parameters *tägliche Nutzungsstunden* zeigten sich in einigen Fällen Ergebnisänderungen, welche zu hinterfragen sind.

Erwartungsgemäß sollte sich mit einem Anstieg der täglichen Nutzungsstunden auch eine Erhöhung des Heizenergiebedarfs ergeben. In einigen Fällen war jedoch eine entgegengesetzte Tendenz zu beobachten: bei steigender täglicher Nutzungszeit sank der Heizenergiebedarfs.

Dieses Verhalten zeigte sich bei hohen inneren Wärmelasten und mag der Anschauung nach nicht plausibel erscheinen, ist jedoch zumindest erklärbar:

- Auch wenn innere Wärmequellen nicht einbezogen werden, bewirkt die Erhöhung der täglichen Nutzungszeit nur einen geringfügigen Anstieg der Bilanzinnentemperatur und damit keine proportionale Änderung des Heizenergiebedarfs.
- Für innere Wärmequellen ergibt sich in der Regel eine proportionale Abhängigkeit von der Nutzungszeit, da sie genau in dieser Zeit wirksam sind – bei einer Verdopplung der täglichen Nutzungszeit verdoppeln sich auch die Wärmeeinträge durch innere Wärmequellen.

In der Folge kann sich, in Fällen hoher innerer Wärmequellen und verhältnismäßig geringer Wärmebedarfswerte, mit steigender täglicher Nutzungszeit eine Verringerung des Heizenergiebedarfs ergeben.

Innerhalb der Projektbegleitgruppe wurde angemerkt, dass so ein Verhalten praktisch kaum auftrete. Bei einer Erhöhung der täglichen Nutzungszeit – z.B. Umstellung von 1- auf 2-Schicht-Betrieb – sei stets auch eine Erhöhung des Heizenergieverbrauchs zu erwarten. Aus Sicht der Autoren muss hier ein umfangreicher Abgleich mit Daten aus der Praxis erfolgen, welcher Bedarfs- und Verbrauchswerte einerseits sowie theoretische und praktische innere Wärmequellen andererseits gegenüberstellt. Entsprechendes Datenmaterial liegt den Autoren nicht vor.

Einfluss der jährlichen Nutzungstage

Bei Variationen des Parameters *jährliche Nutzungstage* zeigten sich in einigen Fällen nicht plausible Ergebnisänderungen.

Mit einer Erhöhung der Anzahl der jährlichen Nutzungstage sollte sich aus Sicht der Autoren in jedem Fall auch ein Anstieg des Heizenergiebedarfs ergeben. Jedoch zeigt sich in Fällen mit sehr hohen inneren Wärmelasten hier ebenso, wie auch bei Variationen der *täglichen Nutzungsstunden*, ein entgegengesetztes Verhalten.

Der beschriebene Effekt trat mit verschiedenen Software-Lösungen für Energiebedarfsberechnungen nach DIN V 18599 – mit und ohne IBP18599-Rechenkern – auf. Somit kann angenommen werden, dass es sich um ein Phänomen des Berechnungsverfahrens und nicht um Software-Fehler handelt. Die Autoren gehen davon aus, dass sich der besagte Effekt für bestimmte Fälle (Verhältnis von Wärmequellen zu -senken) im Zusammenwirken von DIN V 18599-2 und -10 ergibt.

16 Optimierungspotenzial, Anlage und Gebäude

Im Laufe der Projektbearbeitung und in Gesprächen mit Projektbeteiligung aus den Bereichen des Hallenbaus sowie der anlagentechnischen Ausstattung von Hallen wurde deutlich, dass – ausgehend von einem heute marktüblichen technischen Niveau – durchaus Potenzial zur Steigerung der Energieeffizienz besteht.

Nachfolgend werden mögliche normative, technische und planerische Maßnahmen zur Ausnutzung des gegebenen gebäude- und anlagenseitigen Optimierungspotenzials stichpunktartig aufgelistet. Diese Auflistung ist nicht als Vorschlag für eine kommende Verschärfungen des Anforderungsniveaus – z.B. im Rahmen der Fortschreibung der Energieeinsparverordnung – zu verstehen; es sollen lediglich Anregungen und Tendenzen für eine Entwicklung in Richtung einer energieeffizienteren Beheizung von Hallen angeboten werden.

Nicht alle der aufgelisteten Maßnahmen wurden im Rahmen dieser Studie detailliert untersucht. Auf Quantifizierungen wird an dieser Stelle verzichtet[64].

[64] Zahlenmäßige Schätzungen zum Einsparpotenzial des jährlichen Hallen-Heizenergieverbrauchs sind Kapitel 8 zu entnehmen. In diesem wird sowohl auf Bestandsmaßnahmen als auch auf eine hypothetische Verschärfung des zukünftigen Anforderungsniveaus eingegangen.

Tabelle 73 Maßnahmen zur Verringerung des Heizenergieverbrauchs von Hallengebäuden 1/2

Bereich	Maßnahme(n)	Bemerkungen/Hinweise
Gebäude	Verbesserung des baulichen Wärmeschutzes der Fassade - Wärmeschutzniveau der Fassadenkonstruktion, von Fenstern, Türen/Toren… - bauliche Ausführung (z.B. Vermeidung von Wärmebrücken)	Detaillierte Untersuchungen zum Einfluss des baulichen Wärmeschutzes sind nicht Bestandteil der vorliegenden Arbeit
	Dämmung Bodenplatte	Differenzierung hinsichtlich Erdreichbeschaffenheit, Grundwasser und Heizungssystem sinnvoll Das Teilproblem Bodendämmung wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht im Detail untersucht, jedoch zeigte sich im Laufe der Simulationsrechnungen wesentlicher Einfluss (speziell FBH) bei gleichzeitig hoher Unsicherheit – sehr komplexes Teilproblem, weiterer Untersuchungsbedarf
	Verbesserung der Luftdichtheit - bauliche Ausführung (z.B. Dichtungsmaßnahmen) - konstruktive Vermeidung offener Stoßfugen an Bauteilanschlüssen	Besonderheit Hallengebäude (und teilweise andere NWG): Konstruktion aus großflächigen Fassadenelementen oftmals ohne Abdichtung der Stöße; keine durchgehende Luftdichtheitsebene
	Minimierung der Lüftungswärmeverluste durch Toröffnungen - Einsatz von Verladeschleusen, Torluftschleiern etc. - automatischer Torbetrieb	Lüftungswärmeverluste (Infiltration, Toröffnungsvorgänge) können wesentlichen Anteil an den gebäudeseitigen Wärmeverlusten haben (vgl. 6.3, 6.4, 11.3.2)
Gebäude und Heizsystem	Qualifizierte Auswahl eines geeigneten Heizsystems abhängig von: - spezifischer Gebäudestruktur - Nutzung, Betriebsweise	Je nach Gebäude, Nutzung und Betriebsweise (z.B.: 1-Schicht ↔ „24/7“) können sich unterschiedliche Anforderungen an das Heizsystem sowie energetische Vorzugskriterien für Heizsysteme ergeben; Empfehlung eines geeigneten Heizungskonzepts ist Planungsaufgabe; hierfür sind jedoch Voraussetzungen zu schaffen:
	Optimierte Zonierung - räumliche und zeitliche Differenzierung hinsichtlich Nutzungsanforderungen - ggf. unterschiedliche Temperaturzonen in Großräumen (Teilbereichs-/Arbeitsplatzbeheizung)	- Typologie von Hallengebäuden/-nutzungen (vgl. z.B. Modellgebäudedatenbank ZUB-Kassel [18]) - Charakterisierung von Heizsystemen → Definition von Zuordnungskriterien zwischen Heizungssystemen und Gebäudetypen/-nutzungen, Betriebsweisen, sodass qualifizierte Empfehlungen möglich werden
	Optimierter Anlagenbetrieb - Gebäudeleittechnik, Automation	In Hallen für gewöhnlich feste Nutzungsrhythmen über lange Zeiträume - hoher Grad an Automatisierbarkeit → bedarfsgerechte Reglung/Steuerung mit hohem Optimierungspotenzial - Voraussetzung: exakte Dokumentation des Heizbetriebs Im Rahmen der vorliegenden Arbeit erfolgten keine Untersuchungen zum energetischen Einsparpotenzial durch regelungstechnische Optimierung
	Ausnutzung von Wärmepotenzialen und Wärmerückgewinnung - Abgas - Abluft - Prozesse etc.	besonders bei industrieller Nutzung teilweise hohe energetische Potenziale (Wärmelasten, Kältelasten) vorhanden
	Koppelprozesse - Kraft/Wärme - Wärme/Kälte etc.	Analysen zu real auftretenden Wärme-/Kältepotenzialen und ihrer Nutzbarkeit sind nicht Bestandteil der vorliegenden Arbeit
	Nutzung regenerativer Energien; z.B. - Wärmepumpensysteme - biogene Brennstoffe - Solarthermie	Machbarkeit individuell in Verbindung mit Nutzungsrandbedingungen und nutzungsgerechtem Heizsystem zu überprüfen; Solarthermie i.d.R. nur bei nennenswertem Warmwasserbedarf sinnvoll Nutzung regenerativer Energien wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht untersucht

Tabelle 74 Maßnahmen zur Verringerung des Heizenergieverbrauchs von Hallengebäuden 2/2

Bereich		Maßnahme(n)	Bemerkungen/Hinweise

Heizsystem	Warmluftsysteme	Definition, Normierung und Prüfung von Effizienzkriterien der Wärmeübergabe im Nutzraum, wie z.B.
		- Einfluss der Ausblastemperatur (Brennwertnutzung)
		- Wirksamkeit der Warmluftrückführung
		  o Dimensionierung
		  o Messung Lufttemperaturdifferenz
			Bisher keine allgemeingültig definierten Kriterien für Effizienz der Wärmeübergabe; Bewertung anhand Herstellerangaben daher schwierig
			
			Für Anwendung innerhalb DIN V 18599 im Rahmen des vorliegenden Projekts Einführung der Größe *vertikaler Lufttemperaturanstieg*; jedoch auch hier kein normiertes Messverfahren vorhanden, daher nur Anwendung der empirisch ermittelten Vorgabewerte vorgesehen

	Hell- und Dunkelstrahler	- Weitere Erhöhung des Strahlungsfaktors - Modulierende Leistungsregelung, größerer Regelbereich - Kombination mit Abwärmenutzung (Kombi-/Hybridsysteme)	Produktentwicklung - einige heute noch marktübliche Hell-/Dunkelstrahler besitzen Strahlungsfaktoren im Bereich 0,45…0,60 – jedoch sind bereits Geräte im Bereich >0,7 erhältlich (Wettbewerbssituation zugunsten technisch/energetisch besserer Geräte schaffen bzw. anregen) - auch Premium-Geräte oftmals nur mit 1-/2-stufiger Regelung: durch feinere Leistungsregelung und größere Regelbereiche wird eine bessere Anpassung von Leistungsabgabe auf -anforderung möglich
	Hellstrahler	Anpassung der Förderleistung der Abluftventilatoren an Leistungsregelung der Hellstrahler	energetisch sinnvoll, Machbarkeit jedoch anhand des einschlägigen Regelwerks zu klären (DVGW G 638-1)
	Deckenstrahlplatten	Definition, Normierung und Prüfung von Effizienzkriterien der Wärmeübergabe - Einfluss niedriger Systemtemperaturen (Brennwertnutzung) - empirische Messung der Strahlungsleistung (Vergleichbarkeit mit anderen Strahlungsheizungen)	objektive energetische Bewertung sowie Vergleich mit anderen Strahlungsheizungen derzeit schwierig
		Maßnahmen zur besser gerichteten Strahlungsabgabe - Geometrie/Formgebung der Platten - Reflektoren, Abschirmung, oberseitige Dämmung - Abstände zu Wandbauteilen (Planung)	durch besser gerichtete Strahlungsabgabe wird ein größerer Anteil der abgegebenen Wärme zur Erwärmung des Aufenthaltsbereichs nutzbar
Beleuchtung		- Tageslichtnutzung durch transparente und transluzente Bauteile - bedarfsabhängige Steuerung der Beleuchtung (Präsenzkontrolle, Zeit- und/oder Tageslichtabhängigkeit)	Machbarkeit individuell zu prüfen (Fensterflächenanteil, typische Arbeitszeiten…)

17 Wechselwirkung EnEV ↔ EEWärmeG

17.1 EnEV 2009 und EEWärmeG 2008/2009: Situation und Vorschlag zur Fortschreibung

Zusätzlich zu den Anforderungen der EnEV [8] ist auch das Erneuerbare-Energien-Wärmegesetzes (EEWärmeG) [9] einzuhalten. In Tabelle 75 sind die Anforderungen bzw. Erfüllungsoptionen des EEWärmeG überblicksmäßig aufgelistet.

Tabelle 75 Überblick: Möglichkeiten zur Einhaltung des EEWärmeG 2008/2009 [9]

Erfüllung EEWärmeG zu 100%				Einschränkungen / zusätzliche Anforderungen
Nutzung emeuerbarer Energien	Solare Strahlungsenergie	15%	Deckung der Erzeugernutzwärmeabgabe (Übergabe, Verteilung, Speicherung)	• Zertifizierung der Kollektoren: "Solar Keymark"
	feste Biomasse	50%		• Einhaltung der Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen • Mindestwert Kesselwirkungsgrad
	flüssige Biomasse	50%		• Erfüllung Nachhaltigkeitsverordnung • Einsatz mit Brennwertkessel
	gasförmige Biomasse in KWK	30%		• Nutzung nur in KWK-Anlagen (+ Anforderungen KWK) • Einhaltung von Nachhaltigkeitsforderungen
	Geothermie und Umweltwärme	50%		• Wärmemengen- und "Stromzähler" • Mindestwerte JAZ
Ersatzmaßnahmen	Anlagen zur Nutzung von Abwärme	50%	Deckung der Erzeugernutzwärmeabgabe (Übergabe, Verteilung, Speicherung)	• Nutzung durch Wärmepunpen: Anforderungen wie bei Geothermie und Umweltwärme
				• Nutzung mit Wärmeübertrager in zentraler Lüftungsanlage: WRG-Grad ≥ 70%
				• Nutzung hocheffizienter Anlagen: Primärenergieeinsparung gegenüber getrennter Erzeugung von Wärme und Elektroenergie
	KWK-Anlagen	50%		
	Maßnahmen zur Einsparung von Energie	**-15%**	**bezogen auf Anforderungen EnEV**	• $q_P \leq 0{,}85 * q_{p,Ref}$ • $\underline{U} \leq 0{,}85 * \underline{U}_{max}$ **bzw.** $H'_T \leq 0{,}85 * H'_{T,max}$
	Nah-/Fernwärme, anteilig aus erneuerbaren Energien	Nah-/Fernwärmeerzeugung gemäß oben stehender Maßnahmen und Anforderungen		

Es ist davon auszugehen, dass die besonderen Aspekte von Hallengebäuden und der hierin üblicherweise verwendeten Anlagentechnik bei der Gestaltung des EEWärmeG [9] nicht berücksichtigt wurden. So ist eine unmittelbare Erfüllung des EEWärmeG für zentral beheizte Hallen zwar prinzipiel möglich, bei dezentral beheizten Hallen existiert hierfür jedoch keine Möglichkeit. Die Einhaltung des EEWärmeG muss in solchen Fällen durch Ersatzmaßnahmen erfolgen. Anwendbar ist für gewöhnlich nur die nach EEWärmeG gegebene Möglichkeit einer 15%-igen Unterschreitung der EnEV-Anforderungen.

Aus Sicht der Autoren bestehen damit zwei grundlegende Probleme in Anwendung und Zusammenwirken von EnEV und EEWärmeG bei dezentral beheizten Hallenbauten.

- Die Anforderungen der EnEV, welche unter anderem den Einsatz energieeffizienter Anlagentechnik forcieren sollte, an das Heizungssystem sind bisher relativ gering und nicht mehr zeitgemäß. Zwang zu darüber hinausgehender Energieeinsparung geht stattdessen vom EEWärmeG aus.
- Das EEWärmeG formuliert seine Anforderungen an Neubauten bisher unterschiedslos für Wohngebäude und Nichtwohngebäude, dazu zählen in der Regel auch Hallengebäude. Eine Möglichkeit, das EEWärmeG unmittelbar, also durch

tatsächliche Nutzung erneuerbare Energien, zu erfüllen, ist für Hallen oftmals nicht gegeben.

Für dezentral beheizte Hallengebäude sollten Möglichkeiten geschaffen werden, das EEWärmeG unmittelbar durch Nutzung erneuerbarer Energien zu erfüllen. Eine Möglichkeit besteht in der – bislang nicht gegebenen – Anrechenbarkeit von Bio-Erdgas bzw. Bio-Heizöl beim Einsatz in dezentralen Wärmeerzeugern[65].

Eine solche Änderung des EEWärmeG vorausgesetzt, erscheint es den Autoren zweckmäßig, die Anforderungen der EnEV an die Anlagentechnik zeitgemäßer als in EnEV 2009 festgehalten zu gestalten. Zweckmäßig scheint aus Sicht der Autoren der Einsatz eines Brennwert-Erzeugers, die EnEV-Referenzheizung könnte dann beispielsweise wie folgt formuliert werden:

- Warmluftheizung
- Dezentraler Warmlufterzeuger ohne Warmluftrückführung, 25-50kW, Erdgas, kondensierender Betrieb, Leistungsregelung 1 (einstufig oder mehrstufig/modulierend ohne Anpassung der Verbrennungsluftmenge), Axialventilator
- Luftauslass seitlich, normales Induktionsverhältnis
- Raumtemperaturregelung: P-Regler

Dieser Vorschlag wird – eine Änderung des EEWärmeG wie zuvor beschrieben vorausgesetzt – von der Projektgruppe mitgetragen.

17.2 Situation 2011

Ein Vorschlag, biogene Brennstroffe bei Verwendung in dezentralen Hallenheizungen als direkte Maßnahme gemäß EEWärmeG anzurechnen, wurde durch ITG im Rahmen einer Telefonkonferenz mit zur Evaluierung des EEWärmeG beauftragten Gutachtern eingebracht, fand jedoch keine Berücksichtigung bei der Gestaltung des EEWärmeG 2011 [10].

Somit ergibt sich durch die Wechselwirkung zwischen EEWärmeG [10] und EnEV [8] für dezentral beheizte Hallen vorerst weiterhin der Zwang zu einer 15%-igen Übererfüllung der EnEV-Anforderungen. Vor diesem Hintergrund lehnen die figawa-Arbeitskreise *Direktbeheizte Lüftungssysteme* und *Gas-Infrarotstrahlungsheizung* eine Verschärfung der Anforderungen des Referenzgebäudes für Hallen (h > 4m) gemäß Vorschlag aus 17.1 ab.

Die Überarbeitung des EEWärmeG ist nicht als abgeschlossen zu betrachten. Für 2012 ist eine Neufassung des EEWärmeG geplant. Die Einarbeitung des im Rahmen der vorliegenden Studie erbrachten Vorschlags – Anrechnung biogener Brennstoffe für dezentrale Hallenheizsysteme – ist somit prinzipiell noch möglich.

[65] Ein entsprechender Vorschlag wurde den von der Bundesregierung mit der Evaluierung des EEWärmeG beauftragten Gutachtern durch ITG übermittelt.