

Vorwort

Mit großer Freude wird hiermit der Bauphysik-Kalender 2025 vorgelegt, der auch in diesem Jahrgang die bedeutenden Entwicklungen und Herausforderungen im Bereich der Bauphysik in den Mittelpunkt stellt. In einer Zeit, in der der Klimawandel und begrenzte Ressourcen die Baubranche stetig fordern, bleibt nachhaltiges und energieeffizientes Bauen von zentraler Bedeutung. Der diesjährige Bauphysik-Kalender widmet sich aktuellen Themen, die sowohl für die Forschung als auch für die Praxis von höchster Relevanz sind.

Zu Beginn wird im Bauphysik-Kalender 2025 die Neuausgabe der DIN/TS 18599 zur energetischen Bewertung von Gebäuden vorgestellt. Ein weiterer Beitrag bietet eine Übersicht über Dämmstoffe im Bauwesen sowie deren praxisorientierte Anwendung.

Das Thema der integralen Bewertung des sommerlichen Wärmeverhaltens mit Fokus auf thermischen Komfort und energetische Performance wird im Abschnitt C des Bauphysik-Kalenders behandelt. Um den steigenden Anforderungen im Bereich Nachweisverfahren und Berechnungsmethoden gerecht zu werden, bieten drei Beiträge dieser Rubrik umfassende Einblicke in die hygrothermische Bauteilsimulation, die Stadtklimamodellierung und die Planung von Wärmepumpen auf Basis von Verbrauchsdaten. Zudem wird die Beleuchtung von Räumen mit Tageslicht in einem weiteren Beitrag thematisiert.

Im Bereich der Simulationen im Brandschutz widmen sich drei Beiträge diesem aktuellen Thema. Ein Beitrag behandelt den Einsatz von Brandsimulationsmodellen für die Berechnung der thermischen Einwirkungen im Brandfall und der Rauchableitung, ein zweiter die Simulation des Brandverlaufs in der Holzbauweise unter Berücksichtigung der strukturellen Brandlast, und ein dritter die Räumungssimulation und Personenstromberechnungen nach DIN 18009-2.

Die Themenfelder werden ergänzt durch Beiträge, in denen innovative Ansätze wie die Anwendung künstlicher Intelligenz in der Bauphysik und die Nutzung der Finite-Elemente-Methode für thermische Gebäudesimulationen vorgestellt werden. Auch der akustische Komfort wird durch einen Beitrag zur Bestimmung und Simulation von Geräuschen in gebäudetechnischen Anlagen adressiert.

Im Abschnitt D des Bauphysik-Kalenders werden neue Entwicklungen in der Konstruktion und bei Baustoffen, wie der Einsatz von Building Information Modeling (BIM) im Brandschutz und im Schallschutz, aufgezeigt. Weitere Beiträge thematisieren zukunftsfähige Ansätze zur urbanen Entwicklung durch großformatige Strukturen zur Stadtbegrünung und Kühlung sowie die regenerative Wärme- und Kälteversorgung von städtischen Quartieren durch innovative Systeme.

Die jährlich aktualisierten materialtechnischen Tabellen runden das Angebot des Bauphysik-Kalenders ab und sichern dessen Aktualität und Praxistauglichkeit. Der Bauphysik-Kalender 2025 spannt mit der dargestellten Beitragsvielfalt den Bogen von der Forschung zur Praxis und vom Planungsbüro zur ausführenden Firma und weist auf neue Entwicklungen und Tendenzen hin. Er stellt eine solide Arbeitsgrundlage sowie ein aktuelles Nachschlagewerk nicht nur für die Praxis, sondern auch für die Lehre und Forschung dar. Für kritische Anmerkungen sind die Autorinnen und Autoren, der Herausgeber und der Verlag dankbar.

Der Herausgeber möchte an dieser Stelle den Autorinnen und Autoren für ihre engagierte Mitarbeit sowie dem Verlag für die ausgezeichnete Zusammenarbeit danken.

Hannover, im Oktober 2024

Nabil A. Fouad

Inhaltsverzeichnis

Vorwort III

Autor:innenverzeichnis XIX

A Allgemeines und Normung

A 1 Neuausgabe der DIN/TS 18599 „Energetische Bewertung von Gebäuden“ 1

Hans Erhorn

- | | | | | | |
|-------|---|----|-------|--|----|
| 1 | Historie | 5 | 3.5 | DIN/TS 18599 – Teil 5: Endenergiebedarf von Heizsystemen und DIN/TS 18599 – Teil 8: Nutz- und Endenergiebedarf von Warmwasserbereitungssystemen | 12 |
| 2 | Status quo | 5 | 3.5.1 | Wärmepumpen | 12 |
| 3 | Die Neuerungen im Detail | 7 | 3.5.2 | Teildämmung von Hallengebäuden | 13 |
| 3.1 | DIN/TS 18599 – Teil 1: Allgemeine Bilanzierungsverfahren, Begriffe, Zonierung und Bewertung der Energieträger | 7 | 3.5.3 | Kalte Wärmenetze und Eisspeicher | 13 |
| 3.1.1 | Klarstellungen und Vereinfachungen bei der Zonierung | 7 | 3.5.4 | Solarthermie | 13 |
| 3.1.2 | Aktualisierte Primärenergiefaktoren und CO ₂ -Äquivalente | 7 | 3.5.5 | Deckenstrahlplatten | 13 |
| 3.1.3 | Informativer Anhang mit Begriffserläuterungen im Vergleich zu DIN EN ISO 52000-1 | 8 | 3.5.6 | Wärmeübergabe | 13 |
| 3.2 | DIN/TS 18599 – Teil 2: Nutzenergiebedarf für Heizen und Kühlen von Gebäudezonen | 8 | 3.5.7 | Wärme-Kälte-Kopplung | 13 |
| 3.2.1 | Bestimmung des Anteils der mitbeheizten Fläche an der Gesamtläche a_{tb} in Abhängigkeit von A_{NGF} | 8 | 3.5.8 | Bivalente Systeme aus Wärmepumpe und Brennwertkessel | 13 |
| 3.2.2 | Überarbeitung der Temperatur-Korrekturfaktoren von Bauteilen des unteren Gebäudeabschlusses | 9 | 3.5.9 | Nutzung von Strommengen, die sonst aberegelt werden würden | 13 |
| 3.2.3 | Berücksichtigung des Einflusses der Neigung von transparenten Bauteilen bei der Bestimmung des Wärmetransferkoeffizienten | 10 | 3.6 | DIN/TS 18599 – Teil 6: Endenergiebedarf von Wohnungslüftungsanlagen, Luftheizungsanlagen und Kühlsystemen für den Wohnungsbau | 13 |
| 3.2.4 | Überarbeitete sowie neu aufgenommene Kennwerte von Gläsern und Sonnenschutzvorrichtungen | 10 | 3.6.1 | Aktualisierung der Kennwerte für die Wärmerückgewinnung | 13 |
| 3.2.5 | Neu aufgenommene Bewertung der energetischen Qualität von Fenstern bzw. Verglasungen | 10 | 3.6.2 | Aktualisierung der Kennwerte für die Ventilatorleistung | 14 |
| 3.3 | DIN/TS 18599 – Teil 3: Nutzenergiebedarf für die energetische Luftaufbereitung | 10 | 3.6.3 | Aktualisierung der Kennwerte für die Bedarfsführung | 15 |
| 3.3.1 | Erweitertes Kennwerteverfahren | 10 | 3.6.4 | Erweiterung der Systeme zur Wohnungskühlung | 15 |
| 3.3.2 | Bonus für Qualitätssicherungsverfahren | 10 | 3.6.5 | Klarstellung Dauer Heizperiodenbetrieb | 15 |
| 3.4 | DIN/TS 18599 – Teil 4: Nutz- und Endenergiebedarf für Beleuchtung | 11 | 3.7 | DIN/TS 18599 – Teil 7: Endenergiebedarf von Raumlufttechnik- und Klimakältesystemen für den Nichtwohnungsbau | 15 |
| 3.4.1 | Aktualisierung LED-Daten | 11 | 3.7.1 | Neustrukturierung des Abschnittes zur Kaltwasserhydraulik | 15 |
| 3.4.2 | Kontextmodifikatoren für die Beleuchtungsstärke | 11 | 3.7.2 | Kälterzeugung | 15 |
| 3.4.3 | Dynamische Beleuchtung | 11 | 3.7.3 | Wärmeverschiebung | 15 |
| 3.4.4 | Lichttransmissionsgrade | 11 | 3.8 | DIN/TS 18599 – Teil 9: End- und primärenergetische Bewertung von Kraft-Wärme-Kopplungs-, Photovoltaik- und Windenergieanlagen im unmittelbaren räumlichen Zusammenhang mit dem Gebäude | 16 |
| 3.4.5 | Beleuchtungskontrolle | 11 | 3.8.1 | Standardwerte für Photovoltaik-Systeme | 16 |
| 3.4.6 | Umstellung Beispiele auf LED-Leuchten | 12 | 3.8.2 | Korrekturfaktor für Stromnutzung von Durchlauferhitzern | 16 |
| | | | 3.8.3 | Daten typischer Windenergieanlagen | 16 |
| | | | 3.8.4 | Brennstoffzellen in Nichtwohngebäuden | 16 |

3.9	DIN/TS 18599 – Teil 10: Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten	17	3.11	DIN/TS 18599 – Teil 12: Tabellenverfahren für Wohngebäude	19
3.9.1	Aufnahme der zusätzlichen Option eines nutzungsbedingten Mindestaußenluftwechsels	17	3.12	DIN/TS 18599 – Teil 13: Tabellenverfahren für Nichtwohngebäude	20
3.9.2	Anpassungen bezüglich der Wartungswerte der Beleuchtungsstärke bei Nichtwohngebäuden	17	3.13	DIN Media Kommentar: Berechnung der Anteile erneuerbarer Energien nach GEG 2024 – Anwendung von Kennwerten aus DIN V 18599	21
3.9.3	Neu aufgenommene Richtwerte für die Gebäudeautomation bei Nichtwohngebäuden	17	3.14	DIN V 18599 – Beiblatt 1: Bedarfs-Verbrauchs-Abgleich	21
3.9.4	Anpassungen der Werte für die Wärmezufuhr aus Arbeitshilfen bei Nichtwohngebäuden	17	3.15	DIN V 18599 – Beiblatt 2: Nachweisprozedur für die nach dem Gesetz zur Förderung Erneuerbarer Energien im Wärmebereich (EEWärmeG) geforderten Erneuerbare Energien Anteile (EE) für die Wärmezeugung	21
3.9.5	Überarbeitung der Richtwerte des Nutzenergiebedarfs Trinkwarmwasser für Nichtwohngebäude	18	3.16	DIN/TS 18599 – Beiblatt 3: Standardisiertes Ausgabeformat	21
3.10	DIN/TS 18599 – Teil 11: Gebäudeautomation	18	4	Ausblick	21
3.10.1	Rechnerischer Nachweis des Einflusses der Gebäudeautomation	18		Literatur	22
3.10.2	Automationsgrade	19			
3.10.3	Gebäudeautomationsfunktionen	19			
B	Dämmstoffe				
B 1	Dämmstoffe im Bauwesen	23			
	Wolfgang M. Willems, Kai Schild				
1	Physikalische Grundlagen	27	2	Dämmstoffe im Bauwesen	40
1.1	Wärmeschutz	27	2.1	Dämmstoffübersicht	40
1.1.1	Wärmeleitfähigkeit λ	27	2.2	Aspekte für die Auswahl von Dämmstoffen	40
1.1.2	Wärmedurchlasswiderstand R	30	2.2.1	Baukonstruktive Aspekte	40
1.1.3	Spezifische Wärmekapazität c	30	2.2.2	Bauphysikalische Aspekte	40
1.1.4	Temperaturleitzahl a	31	2.2.3	Ökologische Aspekte	40
1.1.5	Physik der Wärmedämmung	31	2.2.4	Ökonomische Aspekte	44
1.2	Feuchteschutz	32	2.3	Zusatzstoffe	44
1.2.1	Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl μ	32	2.3.1	Treibmittel	44
1.2.2	Wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke s_d	33	2.3.2	Bindemittel	45
1.2.3	Auswahl der Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl μ für den Nachweis nach Glaser	33	2.3.3	Stützfasern	45
1.3	Schallschutz	33	2.3.4	Zusätze für Brand- und Feuchteschutz	46
1.3.1	Schallabsorptionsgrad	33	2.4	Entwicklung der Dämmschichtdicken in Dach und Wand in den europäischen Ländern	46
1.3.2	Schallabsorptionsfläche A	34			
1.3.3	Längenbezogener Strömungswiderstand r	34	3	Beschreibung von Dämmstoffen	47
1.3.4	Dynamische Steifigkeit s'	35	3.1	Aerogel	47
1.3.5	Dynamischer Elastizitätsmodul E_{Dyn}	35	3.2	Baumwolle	48
1.4	Brandschutz	35	3.3	Blähglas	50
1.4.1	Baustoffklassen nach DIN 4102-1	35	3.4	Blähton	52
1.4.2	Benennung des Brandverhaltens nach DIN EN 13501-1	36	3.5	Flachs	53
1.5	Rohdichte	39	3.6	Getreidegranulat	54
			3.7	Hanf	56
			3.8	Holzfaser	57
			3.9	Holzwolle-Leichtbauplatten und Holzwolle-Mehrschichtplatten	59
			3.10	Kalziumsilikat	61
			3.11	Kokos	63

- 3.12 Kork 64
- 3.13 Melaminharzschaum 65
- 3.14 Mineralschaum 66
- 3.15 Mineralwolle 68
- 3.16 Perlite 70
- 3.17 Phenolharz 71
- 3.18 Polyesterfaser 72
- 3.19 Polystyrol, expandiert (EPS) 73
- 3.20 Polystyrol, extrudiert (XPS) 75
- 3.21 Polyurethan (PUR, Hartschaum und Ortschaum) 77
- 3.22 Pyrogene Kieselsäure 79
- 3.23 Schafwolle 80
- 3.24 Schaumglas 81
- 3.25 Schilfrohr 83
- 3.26 Seegras 84
- 3.27 Stroh 85
- 3.28 Transparente Wärmedämmung 86
- 3.29 Vacuum Insulating Sandwich (VIS) 87
- 3.30 Vakuuminisulationspaneele (VIP) 89
- 3.31 Vermiculite 92
- 3.32 Zellelastomere 93
- 3.33 Zellulose 94
- Literatur 96

C Nachweisverfahren und Berechnungsmethoden

C1 Integrale Bewertung des sommerlichen Wärmeverhaltens – thermischer Komfort und energetische Performance 101

Stephan Schlitzberger, Anton Maas

- 1 Einführung 103
 - 1.1 Hintergrund 103
 - 1.2 Zielsetzung 103
- 2 Randbedingungen der Bearbeitung 104
 - 2.1 Methodische Hinweise 104
 - 2.2 Erläuterungen zur öffentlich-rechtlichen Anforderungssystematik zum sommerlichen Wärmeschutz 104
 - 2.3 Erläuterungen zur Komfortbewertung nach DIN EN 16798 – Teil 1 105
 - 2.4 Parametrisierung 106
 - 2.4.1 Raummodell 106
 - 2.4.2 Fensterflächenanteil und Orientierung 106
 - 2.4.3 Klimadaten 106
 - 2.4.4 Nutzung 107
 - 2.4.5 Kennwerte Fenster und Sonnenschutz 107
 - 2.4.6 Steuerung Sonnenschutz 107
 - 2.4.7 Nachlüftung (Lüftung außerhalb der Nutzungs- bzw. Anwesenheitszeit) 107
- 3 Ergebnisse 107
 - 3.1 Klimawandel 108
 - 3.2 Künftige Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz 114
 - 3.2.1 Anwendungsfall Wohnnutzung 115
 - 3.2.2 Anwendungsfall Nichtwohnnutzung 118
 - 3.2.3 Zusammenfassung und Empfehlung zur Fortentwicklung der Anforderungssystematik 120
 - 3.2.3.1 Auswertungen für den Anwendungsfall Wohnnutzung für $n_{\text{Kat,II}} \leq 300$ h/a 121
 - 3.2.3.2 Auswertungen für den Anwendungsfall Nichtwohnnutzung für $n_{\text{Kat,II}} \leq 150$ h/a 122
 - 3.3 Auswertungen zum thermischen Komfort (Wohnnutzung) 124
 - 3.3.1 Einfluss des U_{W} -Wertes 124
 - 3.3.2 Einfluss des g -Wertes 126
 - 3.3.3 Einfluss Automation bei Sonnenschutz und Lüftung 127
 - 3.4 Auswertungen zum thermischen Komfort (Nichtwohnnutzung) 130
 - 3.4.1 Einfluss des U_{W} -Wertes 130
 - 3.4.2 Einfluss des g -Wertes 133
 - 3.4.3 Einfluss Automation bei Sonnenschutz und Lüftung 135
 - 3.5 Energiebedarf für Heizen und Kühlen 139
 - 3.5.1 Auswertungen für Wohnnutzung 140
 - 3.5.2 Auswertungen für Nichtwohnnutzung 143
 - 3.5.3 Zusammenfassung 147
- 4 Kernaussagen 147
- Literatur 149

C2 Einblicke in die hygrothermische Bauteilsimulation für die Praxis 151

Hartwig M. Künzel, Christian Bludau, Daniel Zirkelbach

- 1 Einleitung 153
 - 1.1 Erläuterung der Intention dieses Beitrags 153
 - 1.2 Vorstellung der Inhalte 153
- 2 Wärme- und Feuchteverhalten von Baustoffen und Bauteilen 153
 - 2.1 Verhalten von Baustoffen gegenüber Feuchte 154
 - 2.1.1 Hygroskopizität und Hydrophilie 154
 - 2.1.2 Feuchtetransport in porösen Medien 156
 - 2.1.3 Wärmetransport in feuchten Baustoffen 160

2.2	Außen- und raumklimatische Einflüsse	161	4.6	Entwicklung von Prüfmetho- den zur Beurteilung der Gebrauchstauglichkeit und Alterung von Bauteilen	184
2.2.1	Raumseitige Temperatur- und Feuchte- beanspruchungen	161	4.7	Anwendungsgrenzen der hygrothermischen Simulation	185
2.2.2	Außenseitige Temperatur- und Feuchte- beanspruchungen	161	5	Bewertung von Simulationsergebnissen	188
2.2.3	Temperatur- und Feuchtebeanspruchungen im Erdreich	162	5.1	Analyse der Wassergehaltsverläufe	188
2.2.4	Solare Einstrahlung	163	5.2	Beurteilung von Schadensrisiken	188
2.2.5	Niederschlag	164	5.2.1	Schimmel	188
2.2.6	Luftströmungen in und durch Außenbauteile mit Auswirkungen auf den Wärme- und Feuchtetransfer	166	5.2.2	Holzfäule	190
2.3	Anfangsfeuchte	168	5.2.3	Korrosion	191
3	Simulation des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports	169	5.2.4	Frost	192
3.1	Grundlagen	169	5.2.5	Tauwasser in hydrophoben Faserdämmungen	193
3.2	Klimatische Randbedingungen	170	5.3	Einfluss der Feuchte auf die Dämmwirkung	194
3.3	Durchführung der Simulation	170	6	Normen und Richtlinien zur Feuchte- schutzbemessung durch hygrothermische Simulation	195
4	Einsatzbereiche und Anwendungsgrenzen der hygrothermischen Simulation	173	6.1	Feuchteschutzbemessung mithilfe der hygrothermischen Simulation gemäß DIN EN 15026	195
4.1	Feuchteschutzbemessung für Neubau und Sanierung	173	6.2	Klimabedingter Feuchteschutz nach DIN 4108-3 (03-2024)	196
4.1.1	Bemessung von Dächern	174	6.3	Weitere europäische Normen und Richtlinien zum Feuchteschutz durch hygrothermische Simulation	197
4.1.2	Bemessung von Außenwänden	178	7	Schlussfolgerung	198
4.2	Prüfung wesentlicher oder unsicherer Einflussgrößen durch Parameter- variation	179	8	Ausblick	199
4.3	Zweidimensionale Beurteilung von Anschlussdetails	180		Literatur	200
4.4	Dämmung von Kaltwasserrohren und Kühlleitungen	181			
4.5	Bautrocknungsmaßnahmen	183			
C3	Stadtklimamodellierung – Grundlagen und praktische Anwendung	205			
	Simon Schmidt, Afshin Afshari				
1	Einleitung	207	3.2	Mesoskalige und mikroskalige Modelle, multiskalige gekoppelte Simulation	217
1.1	Erläuterung der Notwendigkeit	207	3.2.1	Vereinfachte Darstellung der Urban Canopy Layer (UCL)	217
1.2	Vorstellung der Inhalte	207	3.2.2	Urban Canopy Model (UCM) in mesoskaligen Modellen	218
2	Hintergrund		4	Praktische Anwendungen	221
2.1	Klimawandel, Klimaanpassung, Klimaresilienz	208	4.1	Simulationsbasierte Entscheidungs- unterstützung für die Stadtplanung	221
2.2	Aktive und passive Klimaanpassungs- technologien	210	4.1.1	Einflüsse auf Urbane Wärmeinsel [Urban Heat Island, UHI]	222
2.3	Energie- und Impulsflüsse auf (urbane) Oberflächen	211	4.1.2	Einflüsse auf Luftverschmutzungen	223
3	Einblicke in die Stadtklimamodellierung	213	4.1.3	Anwendung in bestehenden Simulationen	223
3.1	Numerische Fluidodynamik	213	5	Zusammenfassung und Ausblick	224
3.1.1	Navier-Stokes-Gleichungen	214		Literatur	225
3.1.2	Logarithmisches Gesetz	215			
3.1.3	Computational Fluid Dynamics	216			

C4 Wärmepumpenplanung auf Basis von Verbrauchsdaten mit einfachen Exceltools 227

Kati Jagnow, Dieter Wolff, Katharina Gebhardt

- 1 Einführung 229
 - 1.1 Ziel der Tools 229
 - 1.2 Beispielprojekt 230
- 2 Beratung mit der „Standardbilanz“ 230
 - 2.1 Hintergrund und Motivation 230
 - 2.2 Umfang des Tools 230
 - 2.3 Ein- und Ausgaben 231
 - 2.4 Anwendungsbeispiel 233
 - 2.5 Notwendigkeiten und Möglichkeiten von Modifikationen 235
 - 2.6 Updates und Bezugsquelle 236
- 3 Planung mit der „Energieanalyse“ 236
 - 3.1 Hintergrund und Motivation 236
 - 3.2 Umfang des Tools 236
 - 3.3 Ein- und Ausgaben 237
 - 3.4 Anwendungsbeispiel 242
 - 3.4.1 Randdaten der Wärmepumpe 242
 - 3.4.2 Planungsideen 244
 - 3.4.3 Bestand 244
 - 3.4.4 Vorlauftemperaturoptimierung 247
 - 3.4.5 Gebäudeverbesserung und Vorlauf-temperaturoptimierung 247
 - 3.4.6 Einsatz einer kleineren Wärmepumpe 249
 - 3.4.7 Minimale Außentemperatur und Auslegung des Heizstabes 252
 - 3.4.8 Bestandsauslegung mit Bruttoheizlast 252
- 3.5 Notwendigkeiten und Möglichkeiten von Modifikationen 254
- 3.6 Updates und Bezugsquelle 254
- 4 Optimierung mit „Optimus“ 254
 - 4.1 Hintergrund und Motivation 254
 - 4.2 Umfang des Tools 254
 - 4.3 Anwendungsbeispiel 255
 - 4.4 Notwendigkeiten und Möglichkeiten von Modifikationen 258
 - 4.5 Updates und Bezugsquelle 258
- 5 Hintergrundwissen 258
 - 5.1 Energieanalyse aus dem Verbrauch 258
 - 5.1.1 Daten aus Wärmemengenzählern 259
 - 5.1.2 Übergang zur Bedarfsanalyse 260
 - 5.1.3 Daten aus Endenergiezählern 261
 - 5.2 Fingerabdruck oder h-Wert und Heizgrenztemperatur 261
 - 5.3 Brutto- und Nettoheizlast 262
 - 5.4 Außentemperaturverlauf und Deckungsanteile 263
 - 5.5 Wärmepumpentheorie und -praxis 264
- 6 Fazit und Ausblick 265
 - Literatur 266

C5 Beleuchtung von Räumen mit Tageslicht – Anforderungen, Nachweise, Simulationen 267

Peter Schmidt, Saskia Windhausen

- 1 Einleitung 269
- 2 Regelwerke und Vorschriften 269
 - 2.1 Bauordnung 269
 - 2.2 DIN EN 17037 „Tageslicht in Gebäuden“ 269
 - 2.3 DIN 5034 „Tageslicht in Innenräumen“ 270
 - 2.4 DIN EN 12464 „Licht und Beleuchtung – Beleuchtung an Arbeitsstätten“ 270
 - 2.5 DIN EN 12665 „Licht und Beleuchtung – Grundlegende Begriffe und Kriterien für die Festlegung von Anforderungen an die Beleuchtung“ 271
- 3 Grundlagen 271
 - 3.1 Allgemeines 271
 - 3.2 Zusammenhang zwischen Tageslicht sowie Solar- und Globalstrahlung 271
 - 3.2.1 Solarstrahlung 271
 - 3.2.2 Globalstrahlung 272
 - 3.2.3 Sichtbares Licht und Tageslicht 273
 - 3.3 Begriffe 273
- 4 Anforderungen und Verfahren zur Beurteilung des Tageslichts in Innenräumen 275
 - 4.1 Fensterfläche 275
 - 4.2 Tageslichtversorgung bzw. Helligkeit 276
 - 4.2.1 Nachweis über Empfehlungsstufen für die Tageslichtversorgung nach DIN EN 17037 276
 - 4.2.2 Vereinfachter Nachweis der Helligkeit mithilfe des Tageslichtquotienten 276
 - 4.2.3 Unterschiede der Rechenverfahren nach DIN 5034 und DIN EN 17037 279
 - 4.3 Sichtverbindung nach außen 279
 - 4.3.1 Empfehlungen an die Sichtverbindung nach außen nach DIN 5034 279
 - 4.3.2 Regelungen zur Beurteilung der Aussicht nach DIN EN 17037 280
 - 4.4 Erfüllung der Sehaufgabe 281
 - 4.5 Besonnungsdauer 281
 - 4.5.1 Allgemeines 281
 - 4.5.2 Empfehlungen für die Besonnungsdauer 282
 - 4.5.3 Berechnung und Verifizierung der Besonnungsdauer 282

4.6 Blendungsschutz 282
 4.6.1 Allgemeines 282
 4.6.2 Empfehlungen für den Blendungsschutz 282
 4.6.3 Verifizierung für den Blendungsschutz 282
 5 Planungshinweise 282
 5.1 Allgemeines 282
 5.2 Sonnenschutz 283
 5.3 Schutz vor kurzweiliger Strahlung 283
 5.4 Anordnung von Tageslichtöffnungen 283
 5.4.1 Fenster 283
 5.4.2 Dachoberlichter 284

5.5 Planung und Gestaltung von Innenräumen 284
 6 Planung und Bewertung der Versorgung von Räumen mit Tageslicht mittels Simulationsverfahren 284
 7 Beispiel 286
 8 Zusammenfassung 289
 Literatur 289

C6 Anwendung von Brandsimulationsmodellen für die Berechnung der thermischen Einwirkungen im Brandfall und der Rauchableitung 291
 Jochen Zehfuß, Olaf Riese

1 Einführung 293
 1.1 Allgemeines 293
 1.2 Thermische Einwirkungen 293
 1.2.1 Eurocodes 293
 1.2.2 Bauaufsichtliche Einführung 293
 1.3 Rauchableitung 294
 2 Brandszenarien und Bemessungsbrände 294
 2.1 Bemessungs-Brandszenarien 294
 2.1.1 Allgemeines 294
 2.1.2 Bemessungs-Brandszenarien für die Bauteil- bzw. Tragwerksbemessung 296
 2.1.3 Bemessungs-Brandszenarien für die Gewährleistung der Personenrettung 296
 2.1.4 Weitere Bemessungs-Brandszenarien 296
 2.2 Bemessungsbrände 296
 2.2.1 Der Brandverlauf und Grundsätze seiner Modellierung 296
 2.2.2 Bemessungsbrände als Grundlage für die Brandsimulation 297
 2.2.2.1 t^2 -Modell für die Brandausbreitungsphase 297
 2.2.2.2 Beschreibung der Vollbrandphase 299
 2.2.2.3 Wärmefreisetzungsrate 300
 2.2.2.4 Flashover 300
 2.2.2.5 Berücksichtigung der strukturellen Brandlast bei Gebäuden in Holzbauweise 301
 3 Modelle 302
 3.1 Überblick 302
 3.2 Handrechenverfahren 302
 3.2.1 Allgemeines 302
 3.2.2 Parametrische Temperaturzeitkurven 302
 3.2.3 Plumemodelle 303
 3.2.3.1 Heskestad-Plume (EC 1-1-2 Anhang C) 303
 3.2.3.2 Zukoski-Plume 304
 3.2.3.3 McCaffrey-Plume 304
 3.2.3.4 Thomas/Hinkley-Plume 305

3.2.4 Ceiling Jet-Modelle 305
 3.2.4.1 Heißgasströmung an der Decke 305
 3.2.4.2 Rauchgasströmung an der Decke 305
 3.3 Zonen- und Mehrzonenmodelle 306
 3.3.1 Allgemeines 306
 3.3.2 Erhaltung der Masse 308
 3.3.3 Erhaltung der Spezies 309
 3.3.4 Erhaltung der Energie 309
 3.3.5 Mehrraum-Mehrzonenmodelle 309
 3.3.6 Allgemeine Beurteilung von Zonenmodellen 310
 3.4 Feldmodelle 310
 3.4.1 Allgemeines 310
 3.4.2 Erhaltungsgleichungen 310
 3.4.3 Weitere Annahmen und Vereinfachungen 311
 3.4.4 Turbulenzmodellierung 312
 3.4.5 Quellterme und Randbedingungen 312
 3.4.6 Pyrolysemodellierung 314
 3.4.7 Durchführung von CFD-Berechnungen 315
 4 Validierung 316
 4.1 Allgemeines 316
 4.2 Internationale Ansätze 316
 4.3 Methodik zur Analyse der Zeitreihen aus Versuchen und Simulation 317
 4.4 Beispiel Validierung PRISME DOOR 318
 4.4.1 Durchgeführte Versuche 318
 4.4.2 Durchgeführte Simulationen 319
 4.4.3 Modellaufbau 320
 4.4.4 Bewertungsgrundsätze 320
 4.4.5 Ergebnisse 320
 5 Anwendungsbeispiele 322
 5.1 Bürogebäude mit Atrium 322
 5.1.1 Gebäudebeschreibung 322
 5.1.2 Nachweis der Personensicherheit 323
 5.1.2.1 Bemessungsbrand Personensicherheit 323
 5.1.2.2 Berechnungsergebnisse Personensicherheit 324

- 5.1.3 Nachweis der Standsicherheit
im Brandfall 324
- 5.1.3.1 Konstruktion 324
- 5.1.3.2 Bemessungsbrand Standsicherheit
im Brandfall 325
- 5.1.3.3 Berechnungsergebnisse Standsicherheit
im Brandfall 326
- C7 Simulation des Brandverlaufs in Gebäuden in Holzbauweise unter Berücksichtigung
der strukturellen Brandlast 333**
Sven Brunkhorst, Jochen Zehfuß
- 1 Einleitung 335
- 2 Abbrandverhalten von Holz 336
- 2.1 Allgemeines 336
- 2.2 Thermische Zersetzung von Holz 336
- 2.2.1 Dehydratation 336
- 2.2.2 Pyrolyse 336
- 2.2.3 Oxidation 337
- 2.2.4 Kohleschicht 337
- 2.3 Entzündungstemperatur von Holz 338
- 2.4 Abbrandverhalten von Holz 338
- 2.5 Nachbrandverhalten von Holz 339
- 2.6 Thermische Materialeigenschaften
von Holz 339
- 3 Abbildung der strukturellen Brandlast
in einem vereinfachten Brandmodell 340
- 3.1 Allgemeines 340
- 3.2 Brandlastdichte 340
- 3.3 Wärmefreisetzungsrate 340
- 4 Abbildung der strukturellen Brandlast
in einem allgemeinen Brandmodell 341
- 4.1 Allgemeines 341
- 4.2 Modellierungsansätze für die strukturelle
Brandlast 341
- 4.3 Ansätze zur Modellierung der strukturellen
Brandlast 341
- 4.3.1 Allgemeines 341
- 4.3.2 Modellierung über vordefinierte flächen-
spezifische Massenverlustrate (Ansatz 1) 341
- 4.3.3 Modellierung über konstante flächen-
spezifische Massenverlustrate mit
Entzündungs- und Extinktionstemperatur
(Ansatz 2) 342
- 4.3.4 Modellierung über eindimensionales
Pyrolysemodell (Ansatz 3) 343
- 4.3.5 Pyrolyseschemata 343
- 4.3.6 Kinetische Reaktionsparameter 344
- 4.3.7 Reaktions- und Verbrennungswärme 345
- 4.4 Verbrennungsreaktion 346
- 5 Modellvalidierung 347
- 5.1 Allgemeines 347
- 5.2 Modellvalidierung anhand mittel-
maßstäblicher Brandversuche 349
- 5.3 Modellvalidierung anhand realmaßstäblicher
Brandversuche 351
- 5.4 Anwendungsgrenzen 354
- 6 Zusammenfassung 355
- Literatur 355
- C8 Räumungssimulation und Personenstromberechnungen nach DIN 18009-2 357**
Manuel Kitzlinger, Benjamin Schröder, Gregor Jäger
- 1 Einführung 359
- 1.1 Weg zur Norm 359
- 1.2 Zielstellung der Norm und
Anwendungsbereich 359
- 1.3 Einbettung in bestehende Normen 360
- 1.4 Grundvorstellung und Begriffe 361
- 2 Grundzüge der Nachweisführung 361
- 2.1 Ingenieurtechnische Nachweise 361
- 2.2 Nachweise zur Personensicherheit 362
- 3 Räumungsszenarien zum Nachweis
der Personensicherheit 365
- 3.1 Grundlegende Betrachtung
von Szenarien 365
- 3.2 Hinweise zur Entwicklung
von Räumungsszenarien 366
- 3.3 Auswahl von Räumungsszenarien 368
- 4 Funktionale Anforderungen und
Leistungskriterien 369
- 4.1 Verfügbare Räumungszeiten
aus Brandszenarien 370
- 4.2 Staumerkmale und Staukenngrößen 371
- 4.3 Weitere Anwendungsfälle 372
- 5 Modelle und Modellauswahl 372
- 5.1 Makroskopische Rechenmodelle 373
- 5.1.1 Grundlegende Modellannahmen 373
- 5.1.2 Kapazitätsanalyse 374
- 5.1.3 Vereinfachtes dynamisches
Strömungsmodell 375
- 5.1.4 Fundamentaldiagramme
und Rechenwerte 376
- 5.2 Mikroskopische Modelle 378

6	Sicherheitskonzept	378	8.2	Ermittlung der Fluchtzeit	385
6.1	Sicherheitskonzepte im Brandschutz- ingenieurwesen	378	8.2.1	Kapazitätsanalyse	385
6.2	Sicherheitskonzept für die Räumungs- simulation	379	8.2.2	Vereinfachtes dynamisches Strömungsmodell	387
7	Dokumentation und Prüfung	380	8.2.3	Mikroskopisches Modell	389
7.1	Mindestinhalte	381	8.2.4	Vergleich der Fluchtzeiten aus unterschiedlichen Modellen	390
7.2	4-Augen-Prinzip	381	8.3	Staubbewertung	390
8	Praxisbeispiel zur Modellanwendung	382	8.3.1	Makroskopische Betrachtung	390
8.1	Räumungsszenarien	384	8.3.2	Mikroskopische Betrachtung	391
8.1.1	Kategorie Gebäude	384	9	Zusammenfassung und Ausblick	391
8.1.2	Kategorie Nutzung und Nutzer	384		Literatur	392
8.1.3	Kategorie Räumungsanlass	385			
8.1.4	Kategorie Brandschutz- und Sicherheitsmaßnahmen	385			
C9	Künstliche Intelligenz in der Bauphysik – Hintergrund, Anwendungen und Potenziale				395
	Michael Anton Kraus, Christoph Waibel, Nadja Bishara, Danielle Griego				
1	Einleitung und Motivation	397	3.4	Solare Potenziale in der Stadt: Generative Berechnungsmodelle und Fassaden- segmentierung für gebäudeintegrierte Photovoltaik	416
2	Künstliche Intelligenz – Einführung und Grundlagen	397	3.5	Beschleunigte Strömungssimulationen	418
2.1	Grundlagen zu KI-Algorithmen, Modellen und Daten	397	3.6	Ausblick auf bildgenerative Verfahren und Large Language Models (LLM) im gesamtheitlichen Gebäudeentwurf	420
2.2	Machine Learning/Maschinelles Lernen	402	3.7	Energieflexibilität im Städtischen Quartier	422
2.3	Deep Learning/Tiefes Lernen	404	3.8	Sanierung auf Quartiersebene – Verknüpfung von Gebäudekonzepten im vernetzten Betrieb	424
2.4	Explainable Artificial Intelligence/Erklärbare Künstliche Intelligenz	407	3.9	Energiebilanzierung und -optimierung von Quartieren mit KI-Modellen	425
2.5	Physik-informierte/Domänen-informierte Künstliche Intelligenz	407	4	Zusammenfassung und Fazit	427
2.6	Digitaler Zwilling/Digital Twin und Bauen 4.0	408	4.1	Zusammenfassung	427
3	Anwendungsbeispiele zum Einsatz von Künstlicher Intelligenz in der Bauphysik	409	4.2	Fazit	427
3.1	Akustik und Schallschutz: SoundLab AI	410	5	Glossar	428
3.2	Hygrothermische Charakterisierung von Bauteilen	412		Literatur	431
3.3	KI-basierte Temperatur- und Energie- einsparprädiktion mit „Calculus®“	414			
C10	Thermische Gebäudesimulation: Aktuelle Anwendungen und Erweiterungen mittels der Finite-Elemente-Methode				435
	Thomas Mühlberger, Paul Dragos Schoplocher, Oliver Steffens				
1	Einführung: Von statischen Verfahren zur dynamischen Gebäudesimulation	437	2	Gebäudesimulationen mit Kompaktmodellen	438
1.1	Warum Gebäudesimulation?	437	2.1	Einfache Gebäudesimulation	439
1.2	Entwicklung der Gebäudesystem- simulation	437	2.2	Dynamische Simulationstechnologien	439
1.2.1	Die frühe Phase	437	2.2.1	Traditionelle Simulationstechnologien	439
1.2.2	Die zweite Generation	438	2.2.2	Gleichungsbasierte Simulationstechnologien	440
1.2.3	Thermische Netzwerk-Modelle und Co-Simulation	438	2.2.3	Detaillierte Gebäudesimulation	440

2.3	Der Weg zur Praxis	442	3.3.3	Elementmatrix und Globalmatrix	454
2.3.1	Validierung von Simulationstechnologien	442	3.3.4	Rechenzeit-Optimierung	455
2.3.2	Optimierungen in allen Planungsphasen	443	3.3.5	Post-processing und Validierung	456
2.4	Praxisbeispiele	444	3.4	Bauphysikalische Modellierung des Wärmetransports in der FEM	456
2.4.1	Sommerlicher Wärmeschutznachweis für ein Einfamilienhaus	444	3.4.1	Wärmetransport durch Wärmeleitung	456
2.4.2	Hybridlüftungskonzept eines Schulhauses	445	3.4.2	Wärmetransport durch Strahlung	458
2.4.3	Thermische Komfortanalysen für einen vollverglasten Büroturm	446	3.4.3	Wärmetransport durch Konvektion	458
2.4.4	Kalibrierung von Simulationsmodellen	447	3.5	Gebäudesimulation mittels FEM	459
2.4.5	Forschungsprojekt MAGGIE	448	3.5.1	Randbedingungen	460
3	Gebäudesimulationen auf Basis der Finite-Elemente-Methode	451	3.5.2	Vereinfachtes FEM-Modell (Quasi-LPM-Modell)	460
3.1	Einsatz der FEM im Bauwesen	451	3.5.3	Strahlung	460
3.2	Aufbau eines FEM-Modells	452	3.5.4	Inhomogene Wärmeströme und Wärmebrücken	461
3.3	Anwendung und Workflow der FEM in der Bauphysik	453	3.5.5	Wärmeübergang durch Konvektion	462
3.3.1	Modellierung	454	3.5.6	Diskussion	463
3.3.2	Diskretisierung	454	4	Ausblick: Erweiterung von BPS mithilfe der FEM	463
				Literatur	465
C 11	Geräusche gebäudetechnischer Anlagen – Bestimmung von Eingangsdaten und Berechnung der Schallübertragung im Gebäude	469			
	Fabian Schöpfer, Andreas Mayr, Ulrich Schanda, Sven Öhler, Jochen Scheck				
1	Einführung	471	5	Berechnung der Schallübertragung im Gebäude nach EN 12354-5	480
2	Aktuelle Situation in DIN 4109	471	5.1	Methodik der DIN EN 12354-5	481
2.1	Anforderungen	471	5.2	Luftschall	481
2.2	Stand der Nachweisführung	472	5.2.1	Quelle im Aufstellraum	482
2.3	Zukünftiges Verfahren	472	5.2.2	Quelle in entferntem Raum	482
3	Eingangsdaten für GTA	473	5.2.3	Vorsatzschalen und Einhausungen	483
3.1	Luftschallübertragung	473	5.3	Körperschall	483
3.2	Körperschallübertragung	474	5.3.1	Allgemeiner Fall	484
3.2.1	Allgemeines Modell und Kenngrößen zur Berechnung der Körperschallübertragung	474	5.3.1.1	Hintergrund, Einführung und Definition der Übertragungsfunktion	484
3.2.2	Freie Schnelle	475	5.3.1.2	Anwendung Übertragungsfunktionen	485
3.2.3	Admittanz der Quelle	475	5.3.1.3	Berechnung der Gesamtübertragung in Form von Übertragungsfunktionen	488
3.2.4	Admittanz der Empfangsstruktur	475	5.3.2	Kraftquellsituation – Prognose mit DIN EN ISO 12354-2	489
3.2.5	Blockierte Kraft der Quelle	475	5.3.3	Eingangsdaten für die Admittanz von GTA und Bauteilen im Gebäude	489
3.2.6	Empfangsplattenmethode zur Bestimmung der blockierten Kraft	476	6	Anwendungsbeispiele	490
3.2.7	Empfangsplattenmethode zur Bestimmung der freien Schnelle	477	6.1	Heiz- und Lüftungsgeräte	490
3.2.8	Two-stage Methode zur Bestimmung der Quellenadmittanz	478	6.1.1	Luftschallübertragung	490
3.2.9	Unsicherheiten aus europäischem Ringversuch	478	6.1.2	Körperschallübertragung	491
4	Eingangsdaten für Abwasserinstallationen nach DIN EN 14366-1	479	6.1.3	Gesamtpegel	492
4.1	Prüfeinrichtung und Messaufbau	479	6.1.4	Diskussion	492
4.2	Bestimmung der Eingangsdaten	480	6.2	Abwasserinstallationen	493
			6.2.1	Prognose von Abwassergeräuschen für die Kraftquellsituation	495
			6.2.2	Prognose von Abwassergeräuschen für den Allgemeinen Fall	495
			7	Zusammenfassung	496
				Literatur	498

D Konstruktionen und Baustoffe**D1 BIM im Brandschutz 501**

Manuel Kitzlinger

- 1 Einleitung 503
 - 1.1 Einführung Digitalisierung 503
 - 1.2 Historie der Digitalisierung im Bauwesen 503
 - 1.3 Moderne IT 503
- 2 Allgemeine Fragen zu BIM 504
 - 2.1 Was ist BIM? 504
 - 2.2 Was sind BIM-Modelle? 504
 - 2.3 Wie erfolgt der Informationsaustausch mit BIM-Modellen? 505
 - 2.4 Welche Informationen müssen im BIM-Modell enthalten sein? 505
 - 2.5 Wie läuft die Planung in BIM ab? 506
- 3 Software und Technik 507
 - 3.1 Software 507
 - 3.1.1 Viewer 508
 - 3.1.2 Prüfsoftware 508
 - 3.1.3 Software zur Informationsmanipulation 508
 - 3.1.4 Autorensoftware 508
 - 3.1.5 CDE (Common Data Environment) 508
 - 3.2 Technik und Standards für openBIM 508
 - 3.2.1 IFC-Standard (Darstellung Modelle) 508
 - 3.2.2 BCF-Standard (Darstellung Kommunikation) 509
 - 3.2.3 MVD-Standard (Filter) 510
 - 3.2.4 IDS, technische Spezifikation der Information 510
 - 3.2.5 IDM, Information Delivery Manual 510
 - 3.3 Digitale Abbildung von Geometrie 510
 - 3.4 Hinweis auf weiterführende Information 511
- 4 Markt und Einführung von BIM 511
 - 4.1 Marktdurchdringung und Einführung von BIM 511
 - 4.2 Auswahl von Software 511
- 4.3 Öffentliche Verwaltung und BIM 512
 - 4.3.1 Öffentliche Bauherren 512
 - 4.3.2 Genehmigungsbehörden 512
 - 4.4 Besondere Marktbedingungen im Brandschutz 513
- 5 Vorbeugender Brandschutz mit BIM 513
 - 5.1 Vorbeugender Brandschutz 513
 - 5.2 Leistungen im Brandschutz als Ausgangspunkt für Anwendungsfälle 514
 - 5.3 Einbindung der Brandschutzplanung in den BIM-Gesamtprozess 515
 - 5.3.1 Prüfen von Brandschutzanforderungen im Objektmodell 516
 - 5.3.2 Annotieren von Brandschutzanforderungen im Objektmodell 516
 - 5.3.3 Übermittlung der Brandschutzanforderungen in eigenem Fachmodell 517
 - 5.4 Anwendungsfall: Brandschutzplanung zur Baugenehmigung 517
 - 5.4.1 DataDrops: Informationslieferungen im Brandschutz 517
 - 5.4.2 Merkmalkatalog 517
 - 5.4.2.1 Merkmale für die Vorplanung 517
 - 5.4.2.2 Merkmale für die Entwurfsplanung 518
 - 5.4.3 Übergang zum Fachmodell Brandschutz 518
 - 5.5 Weitere Anwendungsfälle im Brandschutz 522
 - 5.5.1 Brandsimulation 522
 - 5.5.2 Planung von Leitungsabschottungen 523
 - 5.5.3 Fachbauleitung Brandschutz 523
- 6 Digitalisierung in der Brandschutzbranche 523
 - Literatur 523

D2 BIM im Schallschutz 525

Camille Châteauvieux-Hellwig, Yvonne Weise

- 1 Einleitung 527
- 2 Digitale Planungsprozesse mit open BIM 527
- 3 Idealer Planungsprozess für den Schallschutz 529
- 4 Grundlagen der Schallschutzplanung 530
- 5 Informationen in IFC 531
 - 5.1 Aufbau einer IFC-Datei 531
 - 5.2 Gebäudehierarchie in IFC 533
 - 5.3 Räume und Raumbegrenzungen in IFC 533
 - 5.4 Bauteile und Material in IFC 534
 - 5.5 Zusammengesetzte Bauteile in IFC 535
 - 5.6 Vorsatzschalen in IFC 536
 - 5.7 Stoßstellen in IFC 537

6	Aktueller Stand im Schallschutz	539	7.2	IFC-basierte Ergebnisrückgabe	542
6.1	AcouBAT by CYPE	540	7.2.1	Eigenschaften in IFC	542
6.2	Schallschutz 3D PLUS von Hottgenroth	540	7.2.2	Erweiterung des IFC-Schemas um Stoßstelleninformationen	543
7	Fachmodell Akustik	541	8	Zukunftsvision Fachmodell Bauphysik	545
7.1	Fachmodell mit externen Dateien	541		Literatur	546
D 3	Smart and Urban Tree – großformatige Strukturen zur Stadtbegrünung und Kühlung				549
	Ulrich Pont, Magdalena Wölzl, Peter Schober, Sigrun Swoboda, Peter Bauer, Vera Stiegler, Rupert Wolffhardt, Isabel Auer				
1	Einführung	551	3.2	Grundlegender und Site-spezifischer Vergleich von Bäumen und Smart and Urban Trees sowie grundlegende Annäherungen	563
2	Methoden	554	3.3	Ergebnisse aus der Entwurfsübung	566
2.1	Grundlegender Methodenüberblick	554	3.4	Ergebnisse aus den Simulationsberechnungen	572
2.2	Standort der Fallstudie und grundlegende Festlegungen	556	3.5	Ergebnisse aus den Stakeholderbefragungen	575
2.3	Grundlegender Ansatz: Bäume versus Smart and Urban Trees?	557	4	Schlussfolgerungen	578
2.4	Research via Design?	557	4.1	Limitierung dieser Studie	578
2.5	Ansätze zur Performance-Bewertung via Simulation	557	4.2	Zukünftige Forschung	578
2.6	Stakeholder-Evaluation	557		Literatur	579
3	Resultate	558			
3.1	Referenzbeispiele	558			
D 4	Regenerative Wärme- und Kälteversorgung des städtischen Quartiers auf Basis eines neuartigen aktiven Dämm-, Heiz- und Kühlsystems				583
	Katja Tribulowski, Monika Wicke, Dirk Weiß, Torsten Schwan, John Grunewald				
1	Einleitung	585	6	Wirtschaftlichkeit und Kosteneffizienz	596
1.1	Motivation und Zielsetzung	585	6.1	Kostenanalyse der Sanierungsmaßnahmen	596
1.2	Hintergrund und Kontext des Projekts	585	6.2	Vergleich zu herkömmlichen Sanierungsmethoden	596
1.3	Bedeutung der regenerativen Wärme- und Kälteversorgung	586	6.3	Langfristige wirtschaftliche Vorteile	596
2	Projektübersicht	586	7	Umwelt- und Klimaschutzaspekte	596
2.1	Beschreibung des Quartiers Hosterwitz/Pillnitz	586	7.1	Reduktion von CO ₂ -Emissionen	596
2.2	Analyse des aktuellen Energieverbrauchs und -bedarfs	586	7.2	Verbesserung der Energieeffizienz	597
2.3	Herausforderungen bei der Bestandssanierung	588	7.3	Beitrag zur nachhaltigen Stadtentwicklung	597
3	Technologische Grundlagen	588	8	Monitoring und Evaluierung	597
3.1	Aktive Dämmtechnologien	589	8.1	Methoden der Erfolgskontrolle	597
3.2	Heiz- und Kühlsysteme	589	8.2	Optimierungspotenziale und Weiterentwicklung	597
3.3	Integration erneuerbarer Energien	590	9	Zusammenfassung	597
3.4	Aktivierung der Speichermasse	591	10	Ausblick	598
3.5	Innovative Planung mit Digital Twin und Gebäudesimulation	593		Literatur	598
3.6	SIM-VICUS	594			
4	Energiekonzept	594			
5	Implementierung im Quartier	595			

E Materialtechnische Tabellen

E 1 Materialtechnische Tabellen für den Brandschutz 599
 Nina Schjerve

- | | | | | | |
|-----|--|-----|-----|---|-----|
| 1 | Einleitung | 601 | 2.3 | Brandausbreitung | 609 |
| 1.1 | Relevanz von Materialdaten | 601 | 2.4 | Heizwerte | 610 |
| 1.2 | Prüfverfahren ausgewählter
Materialdaten | 601 | 2.5 | Lagerungsdichte und m-Faktoren | 617 |
| 1.3 | Einheiten und Einheiten-
Konvertierung | 602 | 2.6 | Luftbedarf | 620 |
| 2 | Stoffdaten | 602 | 2.7 | Verbrennungseffektivität und
Verbrennungsanteile | 621 |
| 2.1 | Zündtemperaturen und Entzündungs-
kriterien | 602 | 2.8 | Zusätzliche Stoffdaten für Kunststoffe | 625 |
| 2.2 | Abbrand | 607 | 2.9 | Flächenbezogene Brandleistung und
Brandentwicklung | 628 |
| | | | | Literatur | 634 |

E 2 Materialtechnische Tabellen 637
 Rainer Hohmann

- | | | | | | |
|---|---|-----|---|--|-----|
| 1 | Vorbemerkungen | 639 | 3 | Schallschutztechnische und akustische
Kennwerte | 679 |
| 2 | Wärme- und feuchtetechnische
Kennwerte | 641 | | Literatur | 691 |

Stichwortverzeichnis 693

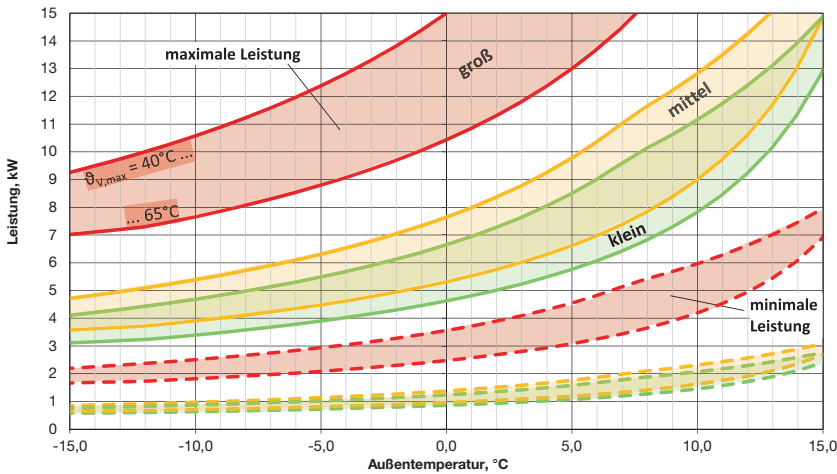


Bild 22. Vergleich der Leistungskennlinien verschiedener Wärmepumpen eines Herstellers

3.4.2 Planungsideen

Bevor die Ergebnisse für das Praxisprojekt vorgestellt werden, sollen allgemeine Planungsideen für Wärmepumpen kurz zusammengefasst vorgestellt und begründet werden. Sie haben auch Rückwirkungen auf die Programmierung der „Energieanalyse“.

1. In der Bestandsmodernisierung dürfen aus Investitionskosten Gründen häufiger Außenluft- als Erdreichwärmepumpen zum Einsatz kommen, vgl. auch [10]. Daher wurde zunächst dieses Marktsegment in dem Tool abgebildet, das sich – mit Verbrauchsdaten als Basis – an Bestandsplaner richtet.
2. Getrennte Wärmepumpen nur für die Raumheizung und für die Trinkwassererwärmung werden von den Autoren grundsätzlich empfohlen. Die Gesamteffizienz im Betrieb wird hierdurch wesentlich erhöht und die Gesamtinvestitionen sind in der Regel vergleichbar. In großen Gebäuden ist ohnehin von einer Aufteilung der Maximalleistung auf mehrere Geräte auszugehen, sodass sich kaum Mehraufwand ergibt. Die Entkopplung von Heizung und Trinkwarmwasser ist auch eine diskutabile Lösung, die wenig „Stress“ im Betrieb verspricht, vor allem bei weitgehendem Planungsverzicht. In der Programmierung ist zunächst nur die getrennte Ausstattung (bzw. nur die Auslegung der Heizungswärmepumpe) programmiert.
3. Allgemein gilt für Wärmepumpen wie für alle anderen Erzeuger, dass sie passend zu dimensionieren sind. Das heißt nach Ansicht der Autoren, dass die Nettoheizlast maßgeblich ist und die Bruttoheizlast allenfalls alternativ untersucht wird. Dies ist die Logik der Programmierung.
4. In Bestandsgebäuden, bei denen künftig noch weitere Leistungsminderungen zu erwarten sind, wie z. B. im Beispiel-MFH aufgrund der Dämmung des oberen und unteren Gebäudeabschlusses, muss auf je-

den Fall der künftige Zustand mit untersucht werden. Stehen in Kürze umfassende Verbesserungen an, ist gegebenenfalls die Wärmepumpe erst einmal zu unterdimensionieren, damit später das Takten geringer ausfällt. Es ist ggf. der alte Wärmeerzeuger bis dahin weiterzuverwenden. Im Falle von Großprojekten kann auch eine Kaskade von mehreren Wärmepumpen aufgebaut werden, sodass später ein Gerät entfernt werden kann. Eine Kaskadenlösung kann zurzeit in der Programmierung nicht untersucht werden.

5. Sofern ein Heizstab der Spitzenlasterzeuger ist, besteht bei ca. 9 kW vielfach eine derzeit praktische Grenze je Wärmepumpe. Größere Geräte benötigen eine andere Absicherung. Für größere Projekte ist eine getrennte und detaillierte Untersuchung erforderlich.
6. Es wird weiterhin empfohlen, die Hydraulik – soweit möglich – einfach zu halten. In kleinen und mittelgroßen Anlagen bis ca. 30 kW thermische Leistung im Auslegungsfall können einfache Raumheizkreise mit nur einer zentralen Heizkreispumpe versorgt werden. Die Heizkreispumpe ist meist im Außengerät monoenergetischer Luft-Wasser-Wärmepumpen integriert und sorgt über ein einstellbares Überströmventil für definierte Druckverhältnisse in den angeschlossenen Heizkreisen. Ein für das Abtauen und zur Begrenzung von zu häufigem Takten klein ausgelegter Reihenpufferspeicher wird üblicherweise im Wärmepumpenrücklauf eingebaut.

3.4.3 Bestand

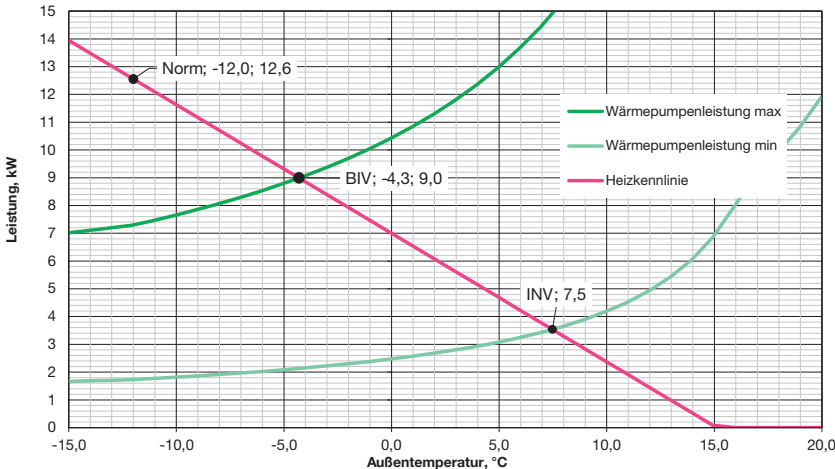
Für den Bestand sind noch Angaben zu tätigen, die den Heizkreis betreffen (Bild 23). Insbesondere ist die maximale Vorlauftemperatur am kältesten Tag (Auslegungsvorlauftemperatur) einzutragen. Im Projekt wird der Wert verwendet, den die Heizlastberechnung (Ab-

Daten des Heizkreises

Auslegungsvorlauftemperatur bei -12°C
 Auslegungsspreizung bei -12°C

65 $^{\circ}\text{C}$
 10 K

Heizflächenexponent
 1,3

Bild 23. Eingaben von Heizkreis- und Gebäudedaten in der „Energieanalyse“ – Version Bestand**Bild 24.** Ausgabe der Leistungskennlinien in der „Energieanalyse“ – Version Bestand

schnitt 4.3) liefert: 65°C . Er deckt sich auch mit der im Bestand – vor Ort an der jetzigen Kesselregelung – vorzufindenden Einstellung.

Die Auslegungsspreizung wird mit 10 K angesetzt (also: $65/55^{\circ}\text{C}$ bei der minimalen Außentemperatur von -12°C). Für die Abbildung des Jahresbetriebs mit Berechnung der Jahresarbeitszahl wird eine Regelung nach Heizkurve angenommen. Der Heizflächenexponent liegt dabei bei 1,3 (er beschreibt den nichtlinearen Zusammenhang zwischen der Wärmeabgabe einer Heizfläche von der Temperaturdifferenz der mittleren Heizwassertemperatur zum Raum, Vertiefung siehe [2]).

Das Gebäude wird durch seine Gebäudeheizkennlinie $H = h \cdot A_{\text{EB}}$ beschrieben. Sie ist in diesem Fall aus einer Wärmemengenmessung hinter dem Bestandskessel abgeleitet. Die zugehörige Grafik ist als Bild 19 in Abschnitt 3.3 zu finden. Die Steigung liegt bei $H = 0,463 \text{ kW/K}$ bei einer Heizgrenztemperatur von $\vartheta_{\text{HG}} = 15,1^{\circ}\text{C}$. Das Gebäude hat eine Heizlast von 12,6 kW (netto) und 14,8 kW (brutto) bei der minimalen Außentemperatur am Standort (-12°C).

Ein alternativer Ansatz zur Ermittlung dieser Größen wäre das Verfahren der „Standardbilanz“, siehe Abschnitt 2.4. Bild 24 zeigt das Ergebnis als Leistungsdiagramm. Für jede Außentemperatur, die in den Langzeitwetterdaten des Ortes anzutreffen sind, wird die Gebäudeheizkennlinie berechnet. Der Normpunkt ist markiert. Die Wärmepumpenleistung wird als Kenn-

feld abgebildet – zwischen der maximalen und minimalen Leistung und unter Berücksichtigung der Vorlauftemperatur, die sich bei der jeweiligen Außentemperatur ergibt.

Die obere Linie in Bild 24 ergibt sich bei maximaler Kompressorbelastung (hier angenommen mit 60 % der Kompressornennleistung von 8,0 kW). Auf ihr liegt der Bivalenzpunkt („BIV“) als Schnittpunkt mit der Gebäudeheizkennlinie. Ist es kälter, muss ein zweiter Erzeuger einspringen. Liegt der Bivalenzpunkt rechnerisch bei oder unterhalb der minimalen Außentemperatur, ist monovalenter Betrieb gegeben.

Die untere Linie in Bild 24 ergibt sich bei minimaler Kompressorbelastung. Auf ihr liegt der Inverterpunkt („INV“), ebenfalls als Schnittpunkt mit der Gebäudeheizkennlinie. Ist es wärmer, muss die Wärmepumpe takten, weil sie nicht tiefer modulieren kann (hier angenommen mit 10 % der Kompressornennleistung von 8,0 kW).

Bild 25 zeigt denselben Zusammenhang, jedoch unter Berücksichtigung der Häufigkeit des jeweiligen Vorkommens der Temperaturen, vgl. auch Abschnitt 5.4. Die sehr geringen Außentemperaturen sind selten. Unterhalb des Bivalenzpunktes bricht die Wärmepumpenleistung erkennbar ein – das ist zu tolerieren, weil es nicht häufig auftritt. Oberhalb (rechts) des Inverterpunktes ergibt sich Taktbetrieb (gestrichelte senkrechte Gerade).

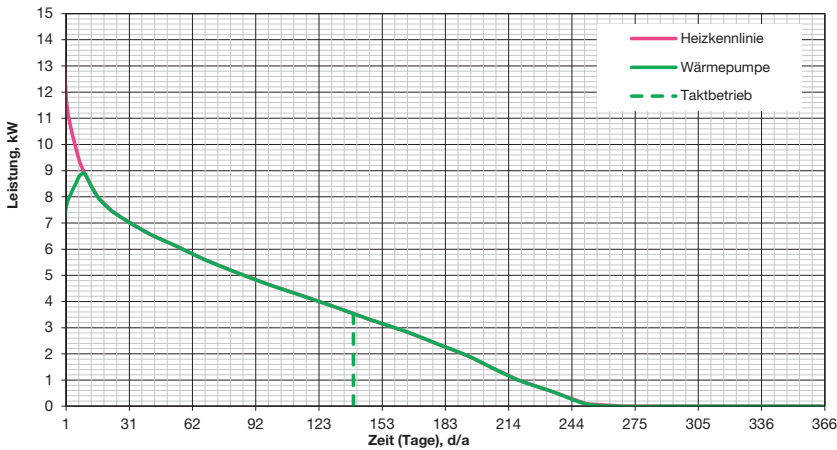


Bild 25. Ausgabe der Jahresdauerlinie in der „Energieanalyse“ – Version Bestand

Bivalenz- und Inverterpunkte			Deckungsanteile		
Bivalenzpunkt	-4,3	°C	Wärmepumpe	stetig	76,6%
	9,0	kW		taktend	21,7%
darunter	9	d/a		=	98,3%
Inverterpunkt	7,5	°C	Spitzenlast		1,7%
	3,54	kW			
darüber	115	d/a			
Heizstabelleistung bzw. Leistung Spitzenlasterzeuger			Heizzeit		
Leistung 2. Erzeuger	5,3	kW		255	d/a
Heizlast gesamt	12,6	kW			
			COPs		
				ideal	mit Betriebskorrekturen
			System gesamt	3,02	2,65
			Wärmepumpe gesamt	3,13	2,73
			Wärmepumpe - stetiger Betrieb	2,81	2,53
			Wärmepumpe - Taktbetrieb	5,20	3,74

Bild 26. Ergebnisse der Wärmepumpenplanung in der „Energieanalyse“ – Version Bestand

Bild 26 fasst die Erkenntnisse tabellarisch zusammen. Bivalenz- und Inverterpunkt werden aufgeführt. Für beide Punkte werden Zeitangaben gemacht, die über die Häufigkeit des Vorkommens informieren. So müsste, unter Verwendung des Klimas der letzten 15 Jahre, der 2. Erzeuger durchschnittlich nur an 9 Tagen pro Heizperiode eingesetzt werden. An 115 Tagen muss die Wärmepumpe takten. Die Länge der Heizzeit insgesamt beträgt 255 Tage pro Jahr. Der Heizstab für den Auslegungspunkt, das heißt die Fehlleistung bei minimal $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$, liegt bei 5,3 kW. Es kann selbstverständlich auch ein anderer Erzeuger zum Einsatz kommen. Der Leistungsanteil des Spitzenlasterzeugers beträgt 42% der Nettoheizlast (5,3 kW von 12,6 kW). Entsprechend hat die Wärmepumpe einen Leistungsanteil von 58% der Nettoheizlast. Wird das Flächenintegral unter der Kurve nach Bild 25 gebildet, ergeben sich die Deckungsanteile für die Wärmepumpe von 98,3% und für den Spitzenlasterzeuger

von 1,7%. Die Werte decken sich sehr gut mit denen aus der VDI 4650 [9]. Für einen parallelen Betrieb mit Luft als Wärmequelle und einem Leistungsanteil der Wärmepumpe von 60% werden 98% Deckungsanteil angegeben. Eine gewisse Unschärfe besteht allerdings durch die Brutto- und Nettoheizlastabweichung, siehe auch Abschnitt 5.3. Die Gesamteffizienz der Wärmepumpe wird mit einer Jahresarbeitszahl von 2,73 bestimmt. Dieser Wert enthält die Abschläge für den Realbetrieb und das Takten. Wird der Spitzenlasterzeuger als Heizstab mitbilanziert (mit einer Arbeitszahl von 1,0) ist das Gesamtsystem entsprechend schlechter. Es hat dann eine Systemarbeitszahl von 2,65.

Tabelle 2. Variantenvergleich Bestand – Bestand mit Temperaturoptimierung

	Variante „Bestand“	Variante „Bestand mit Vorlauftemperaturoptimierung“
Vorlauftemperatur (bei –12 °C)	65 °C	60 °C
Bivalenzpunkt	–4,3 °C	–5,0 °C
Leistung der Wärmepumpe (bei –12 °C)	7,3 kW	7,7 kW
Leistung des Heizstabes (bei –12 °C)	5,3 kW	4,9 kW
Deckungsanteil Spitzenlastzeuger	1,7 %	1,4 %
Inverterpunkt	7,5 °C	7,1 °C
Tage im Taktbetrieb	115 d/a	121 d/a
JAZ nur Wärmepumpe	2,73	2,92
JAZ gesamt	2,65	2,85

3.4.4 Vorlauftemperaturoptimierung

Wird die Vorlauftemperatur im Bestand um 5 K auf dann 60 °C abgesenkt, verbessert sich die Situation. Die Bedingungen für die Absenkung (Überprüfung der Heizflächen mit dem Tool „Optimus“) sind in Abschnitt 4.3 beschrieben.

Tabelle 2 zeigt die neuen Ergebnisse tabellarisch im Vergleich zu den alten. Da die Wärmepumpe aufgrund der geringeren Vorlauftemperatur auch am kältesten Tag eine höhere Effizienz aufweist, steigt ihre Leistung. Damit sinkt der Bivalenzpunkt und auch die erforderliche Heizstabelleistung.

Der Inverterpunkt verschiebt sich ebenfalls. Es fallen 6 Tage mehr im Taktbetrieb an. Das verschlechtert zwar die Betriebsbedingungen, aber insgesamt überwiegen die Vorteile. Die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe verbessert sich (günstigere Systemtemperatur), die des Systems auch (geringerer direkt elektrischer Nachheizbedarf).

3.4.5 Gebäudeverbesserung und Vorlauf-temperaturoptimierung

Werden die Verbesserungsmaßnahmen an der Gebäudehülle durchgeführt, verläuft die Leistungskennlinie des Gebäudes flacher. Da hierfür keine Messdaten verfügbar sind, muss an dieser Stelle auf eine andere Möglichkeit zurückgegriffen werden, den zukünftigen Kennwert H zu bestimmen. An dieser Stelle wird die „Standardbilanz“ des modernisierten Gebäudes genutzt (Abschnitt 2.4, Bild 7).

Der „Fingerabdruck“ des bilanzierten Standard-MFH liegt bei $h = 1,48 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ nach der Modernisierung und mit Qualitätssicherungsmaßnahmen. Dieser Wert wird auf das Beispiel-MFH in Braunschweig übertragen. Damit ergeben sich anhand der beheizten Fläche A_{EB} eine Steigung und eine Nettoheizlast von:

$$H = h \cdot A_{EB} = 1,48 \text{ W/m}^2 \text{ K} \cdot 241 \text{ m}^2 = 357 \text{ W/K} \\ = 0,357 \text{ kW/K}$$

$$\dot{Q}_{\text{netto}} = 0,357 \text{ kW/K} \cdot (15 - (-12)) \text{ K} = 9,6 \text{ kW}$$

Das Gebäude hat eine Heizlast von 9,6 kW (netto) bei der minimalen Außentemperatur am Standort (–12 °C). Darüber hinaus wird davon ausgegangen, dass die Vorlauftemperatur aufgrund der getätigten Dämmmaßnahmen auf dann 55 °C abgesenkt werden kann.

Bild 27 zeigt das neue Leistungsdiagramm mit der bisherigen Wärmepumpe. Sowohl der Bivalenzpunkt als auch der Inverterpunkt sinken. Das bedeutet, dass eine geringere Leistung für den Spitzenlastzeuger benötigt wird und dessen Deckungsanteil im Verlauf eines Jahres sinkt. Im Gegenzug steigt aber auch der Zeitanteil, in dem die Wärmepumpe im Taktbetrieb ist, was auch Bild 28 zeigt.

Tabelle 3 fasst die Ergebnisse zusammen. Nach der Gebäudemodernisierung ist die identische Wärmepumpe in Relation zum Gebäude größer dimensioniert.

Hinsichtlich der Effizienz treten mehrere Effekte gleichzeitig auf:

- der Zeitanteil mit Taktbetrieb nimmt deutlich zu und verschlechtert die Effizienz der Wärmepumpe in dieser Zeit,
- die abgesenkte Vortauftemperatur verbessert jedoch insgesamt die Wärmepumpeneffizienz,
- die geringere Gebäudeleistung verschiebt den Bivalenzpunkt nach unten und vermindert damit den Spitzenlastanteil fast auf null.

Die positiven Effekte überwiegen, sodass nach der Gebäudeverbesserung sich eine Jahresarbeitszahl des Systems inklusive einer elektrischen Nachheizung von etwa 3,2 einstellt.

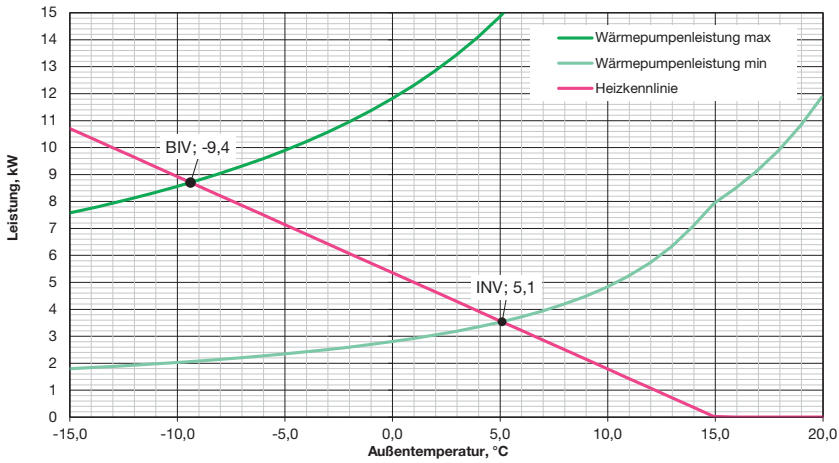


Bild 27. Ausgabe der Leistungskennlinien in der „Energieanalyse“ – Version Modernisierung

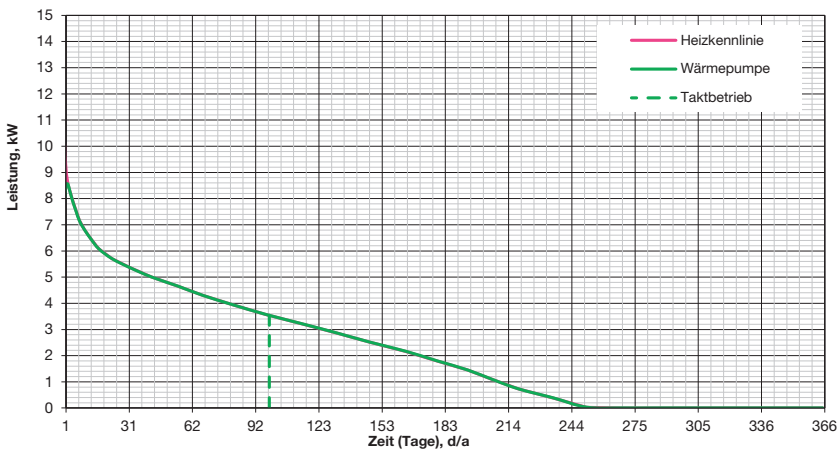


Bild 28. Ausgabe der Jahresdauerlinie in der „Energieanalyse“ – Version Modernisierung

Tabelle 3. Variantenvergleich Bestand – Modernisierung

	Variante „Bestand“	Variante „Modernisierung“
Steigung H	0,463 W/K	0,357 kW/K
Heizlast (bei -12 °C)	12,6 kW	9,6 kW
Vorlauftemperatur (bei -12 °C)	65 °C	55 °C
Bivalenzpunkt	-4,3 °C	-9,4 °C
Leistung der Wärmepumpe (bei -12 °C)	7,3 kW	8,2 kW
Leistung des Heizstabes (bei -12 °C)	5,3 kW	1,5 kW
Deckungsanteil Spitzenlasterzeuger	1,7 %	0,2 %
Inverterpunkt	7,5 °C	5,1 °C
Tage im Taktbetrieb	115 d/a	154 d/a
JAZ nur Wärmepumpe	2,73	3,18
JAZ gesamt	2,65	3,16

3.4.6 Einsatz einer kleineren Wärmepumpe

Eine nächstkleinere Wärmepumpe soll im Bestand und nach der Modernisierung gleichermaßen untersucht werden. Bei recht ähnlichen Effizienzen hat die kleinere Wärmepumpe nur eine maximale Kompressorleistung von 3,5 kW (statt 8 kW).

Die Bilder 29 und 30 zeigen die Leistungskennlinie und Jahresdauerlinie für den Bestand. Sie sind vergleichbar mit denen aus Abschnitt 3.4.3. Wegen der geringeren Leistung der Wärmepumpe als vorher verschieben sich sowohl Bivalenz- als auch Inverterpunkt zu höheren Temperaturen. Eine weitere Auswertung folgt mit Tabelle 4.

Die Bilder 31 und 32 (Kombination aus Gebäudeverbesserung und Wahl der kleineren Wärmepumpe) sind vergleichbar mit den Grafiken aus Abschnitt 3.4.5. Die Auswirkungen der geringeren Wärmepumpenleistung sind grundsätzlich vergleichbar mit denen im Bestand:

Bivalenz- und Inverterpunkt sind bei höheren Temperaturen zu finden als vorher. Einen Vergleich aller Varianten liefert Tabelle 4.

Die Verringerung der Wärmepumpenleistung führt zu den Auswirkungen, die bereits in Abschnitt 3.4.5 angeissen wurden. Sie sollen an dieser Stelle noch einmal aufgegriffen werden.

Bei ansonsten gleichen Randdaten verschiebt sich jeweils der Bivalenzpunkt zu höheren Außentemperaturen mit geringerer Wärmepumpenleistung. Gleichermaßen steigt die Leistungsanforderung an den zweiten Erzeuger (Heizstab) und sein Deckungsanteil nimmt zu. Zudem verschiebt sich aber auch der Inverterpunkt nach oben. Das Takten der kleineren Wärmepumpe im selben Gebäude beginnt später und der Zeitanteil im Taktbetrieb sinkt entsprechend. Das betrifft beide Gebäudeniveaus gleichermaßen.

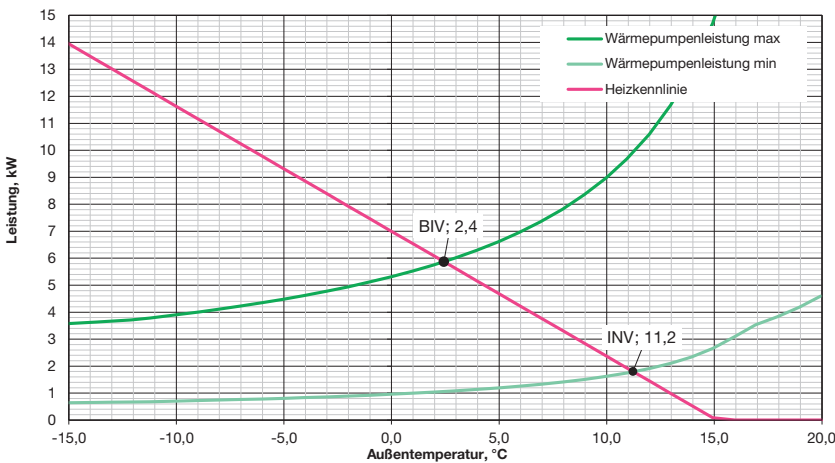


Bild 29. Ausgabe der Leistungskennlinien in der „Energieanalyse“ – Version Bestand mit kleinerer Wärmepumpe

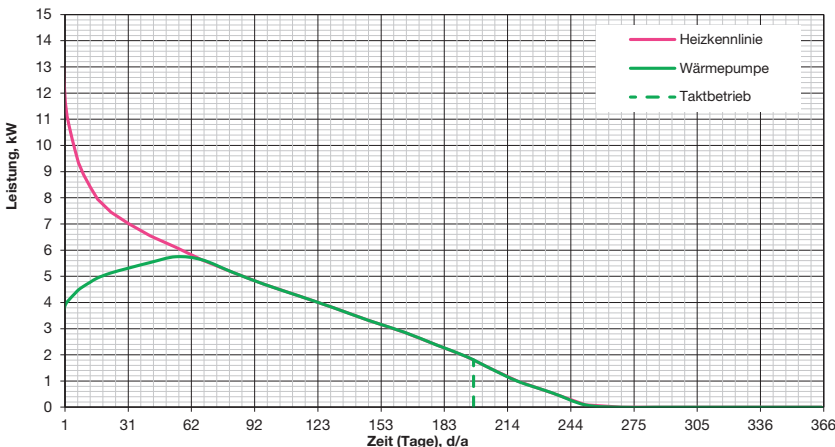


Bild 30. Ausgabe der Jahresdauerlinie in der „Energieanalyse“ – Version Bestand mit kleinerer Wärmepumpe

Die messtechnische Überprüfung der Einhaltung von Mindestanforderungen im Gebäude erfolgt nach DIN 4109-4 [8] die wiederum auf das „Kurzmessverfahren“ der DIN ISO 10052 [9] verweist. Das „Standardverfahren“ der DIN EN ISO 16032 [10], das auch in EN 12354-5 genannt wird, erscheint grundsätzlich besser geeignet, wird aber in DIN 4109 momentan nicht aufgeführt.

Sind verschiedene Betriebszustände einer GTA möglich (z. B. unterschiedliche Regelungsstufen bei einem Lüftungsgerät), ist grundsätzlich der lauteste Betriebszustand für die Beurteilung heranzuziehen.

2.2 Stand der Nachweisführung

Verfahren für rechnerische Nachweise zur Erfüllung der Anforderungen des Schallschutzes sind in der DIN 4109-2 [11] gegeben. Im Abschnitt 4.5 werden die von GTA in schutzbedürftige Räume übertragenen Geräusche behandelt.

Im ersten Abschnitt 4.5.1 Allgemeines der Fassung von Januar 2018 steht: *„Für die Berechnung der von gebäudetechnischen Anlagen in schutzbedürftige Räume übertragenen Geräusche liegen zurzeit noch keine normungsfähigen Verfahren vor. Mit DIN EN 12354-5 ist eine Grundlage gegeben, auf der die zukünftigen Berechnungsverfahren nach DIN 4109 entwickelt werden sollen. Die in DIN EN 12354-5 genannten Prognosemodelle können als Orientierung für die Beschaffung von Daten und für die grundsätzliche Vorgehensweise bei der Prognose von Schallpegeln herangezogen werden. Hinweise zur schalltechnischen Planung und Ausführung gebäudetechnischer Anlagen finden sich in DIN 4109-36:2016-07.“*

Nach DIN 4109 ist also ein rechnerischer Nachweis für GTA aktuell nicht möglich. Der Nachweis zur Einhaltung von Schallschutzanforderungen kann folglich nur durch (Abnahme-)Messungen nach DIN 4109-4 bzw. DIN ISO 10052 im bereits ausgeführten Zustand erbracht werden. Lediglich für „Sanitärtechnische Anlagen“ kann nach DIN 4109-36:2016-07 Abschnitt 6.4.4 [12] ein Nachweis ohne bauakustische Messungen durch Verwendung von sogenannten „Musterinstallationswänden“, die nicht direkt an schutzbedürftige Räume angrenzen (diagonale Übertragung), erbracht werden. Diese Möglichkeit steht im Widerspruch zu den Ausführungen in Abschnitt 6.1 Allgemeine Hinweise zur Durchführung von Nachweisen *„Sowohl bei der Planung und Ausführung als auch beim schalltechnischen Nachweis ist dabei stets das Zusammenwirken der Sanitärinstallation und der Installationswand zu berücksichtigen, da die resultierenden Installationsgeräusche von beiden Bereichen beeinflusst werden.“*

In DIN 4109-2, Abschnitt 4.5.3, wird in einer Anmerkung darauf hingewiesen, dass zwar aktuell keine Berechnungsverfahren eingeführt sind, mit den vorhandenen Verfahren zur Luftschalldämmung aber

der Schalldruck im Aufstellraum oder in einem fremden Raum „abgeschätzt“ werden kann. Voraussetzung ist, dass Angaben zum Luftschallleistungspegel der Anlage und zur äquivalenten Schallabsorptionsfläche im Aufstellraum vorhanden sind. In DIN 4109-36:2016-07, Anhang A, sind beispielhaft A-bewertete Schallleistungspegel verschiedener Gerätetypen (u. a. Wärmeversorgungsanlagen, Lüftungsanlagen) angegeben. Die „Abschätzung“ soll anhand „üblicher Berechnungsverfahren“ erfolgen, die jedoch nicht näher erläutert werden. In Abschnitt 5 dieses Beitrages wird ausgeführt, dass im Gegensatz zur Abschätzung mit Einzahlwerten entsprechend der DIN EN 12354-5 eine Berechnung der Luft- und Körperschallübertragung von GTA nur frequenzabhängig erfolgt.

Weiterhin wird in der DIN 4109-36 angemerkt: *„Durch Körperschallerzeugung der Anlagen verursachte Geräuscheinwirkungen werden dabei nicht berücksichtigt.“* Da die Körperschallübertragung häufig maßgeblich ist, wie später in Abschnitt 6 gezeigt wird, sind die aktuell verfügbaren Planungsmethoden der DIN 4109 somit unvollständig.

2.3 Zukünftiges Verfahren

Die DIN 4109 verweist also bereits in der aktuell gültigen Fassung von 2018 auf die Verfahren der DIN EN 12354 und explizit auf den Teil 5. Dieser behandelt unter dem Titel *„Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften – Teil 5: Installationsgeräusche“* die Schallübertragung im Gebäude bis zum resultierenden Schalldruckpegel im Empfangsraum. Für die Anwendung sind sowohl Eingangsdaten des Gebäudes als auch der GTA erforderlich.

Die DIN EN 12354-5:2009-10 [2] wurde in den vergangenen Jahren grundlegend überarbeitet und mittlerweile durch DIN EN 12354-5:2023-08 ersetzt. Teile der Fassung aus 2009 sind in die 2017 erschienene DIN EN 15657:2017-10 *„Akustische Eigenschaften von Bauteilen und von Gebäuden: Messung des Körperschalls von haustechnischen Anlagen im Prüfstand für alle Installationsbedingungen“* übernommen worden. DIN EN 15657:2017-10 war dann die Grundlage für die Überarbeitung der DIN EN 14366:2005-02 [13] *„Messung der Geräusche von Abwasserinstallationen im Prüfstand“*, die in der Neufassung DIN EN 14366-1:2023 [14] erschien.

So wurde zwischenzeitlich auf europäischer Ebene eine klare Trennung von

- 1) der Normen zur messtechnischen Charakterisierung von GTA als Luft- und Körperschallquellen und
- 2) der Norm zur Berechnung der Luft- und Körperschallübertragung im Gebäude durchgeführt.

Inhaltlich wurde EN 12354-5 diesbezüglich überarbeitet, sodass die Anwendung nun für alle Baukonstruktionen möglich und nicht mehr auf den „Massivbau“ beschränkt ist [15], wie in der Erstversion von 2009.

3 Eingangsdaten für GTA

Eingangsdaten für GTA zur Prognose der Luft- und Körperschallübertragung nach DIN EN 12354-5 werden nach DIN EN 15657:2017 bestimmt. Für Abwassersysteme steht DIN EN 14366-1:2023-09 [14] zur Verfügung (Abschnitt 4). Dabei wurde eine Nummerierung eingeführt, die es ermöglicht, Teile mit Anwendungsregeln für weitere spezifische Quellen anzuschließen. Aktuell wird an einem zweiten Teil gearbeitet, der den Bereich der Trinkwasserinstallationen umfasst. Darauf aufbauend soll das Prüfverfahren für Armaturen gemäß EN 3822 [16–18] überarbeitet werden, welches seit 1999 im Wesentlichen nicht verändert wurde und keine Eingangsdaten für Prognoserechnungen bereitstellt. Auch der Vergleich von Armaturen anhand von Geräuschklassen nach diesem Verfahren steht schon seit langem in der Kritik [6, 19].

Sowohl DIN EN 15657 als auch DIN EN 14366-1 sind aktuell noch auf stationäre, also zeitlich konstante Betriebsbedingungen beschränkt. In DIN EN 15657 Anhang B werden Anwendungsregeln für Whirlwanen spezifiziert, die zum Ziel haben, den ungünstigsten stationären Betriebszustand zu erfassen. Im Sinne der Einhaltung von Anforderungen nach DIN 4109-1 sollte grundsätzlich für alle GTA der ungünstigste stationäre Betriebszustand gewählt werden, der im Gebäude auftreten kann. In EN 14366-1 können Eingangsgrößen für unterschiedliche Durchflussraten bestimmt werden.

Generell sind bei der Bestimmung der Eingangsdaten für die Luft- und Körperschallübertragung jeweils identische Montage- und Betriebsbedingungen zu wählen. Die Eingangsdaten für die Luft- und Körperschallübertragung werden frequenzabhängig in Terzbandbreite bestimmt. Einzahlwerte, die von Herstellern bevorzugt zum Produktvergleich herangezogen werden, erfordern zumindest für die Körperschallübertragung Prognoserechnungen bis zum Schalldruckpegel im Gebäude nach EN 12354-5 (siehe Abschnitt 5 und Anwendungsbeispiele in Abschnitt 6). So kann der A-bewertete Schalldruckpegel als Einzahlwert gebildet werden, was nur anhand der Körperschalleingangsdaten nicht möglich wäre.

3.1 Luftschallübertragung

Zur Beschreibung der Luftschallemission von Geräten und Maschinen ist die übliche und etablierte Größe die Schallleistung, die auch die Kenngröße für die Körperschallemission nach EN 15657 und die Eingangsgröße für Berechnungen der Schallausbreitung im Gebäude nach EN 12354-5 ist. Die Luftschalleistung einer GTA ist im Wesentlichen unabhängig vom Aufstellungsort, sofern die Aufstell- bzw. Montagebedingungen an den Bauteilen gleich sind.

Zur Bestimmung der Luftschalleistung von GTA stehen eine Reihe von Messverfahren zur Verfügung. Auf der Grundlage von Schalldruckpegelmessungen sind Verfahren in den Normen ISO 3741 bis ISO 3747 [20–



Bild 2. Bestimmung der Luftschalleistung einer GTA nach DIN EN ISO 3744 im Halbfreiefeldraum

26] beschrieben und umfassen Messungen in Hallräumen, in Freifeld- oder Halbfreiefeldräumen oder im Feld (am Bau). Die Verfahren unterscheiden sich in zu erzielenden Genauigkeitsklassen.

Eine weitere Messmethode zur Bestimmung der Luftschalleistung sind Intensitätsmessungen, die in ISO 9614-1 bis -3 [27–29] geregelt sind. Auch hier werden Verfahren in unterschiedlichen Messumgebungen und für unterschiedliche Genauigkeitsklassen unterschieden.

In Bild 3 sind exemplarisch die Frequenzspektren der Luftschalleistung von acht Klimageräten dargestellt, die im Rahmen eines Forschungsprojektes im Halbfreiefeldraum nach DIN EN ISO 3744 [26] (Bild 2) bestimmt wurden. Ebenfalls angegeben sind die A-bewerteten Luftschalleistungspegel.

Die Frequenzverläufe sind konstruktionsbedingt sehr unterschiedlich. Neben der internen Körperschallerzeugung durch Komponenten wie Ventilatoren, Kompressoren, Verdichtern, Ventilen, Verdampfern, Entfeuchtern etc. wird die Körperschallabstrahlung maßgeblich durch die Beschaffenheit des Gehäuses bestimmt.

Da die Prognoserechnungen nach EN 12354-5 frequenzabhängig erfolgen (Abschnitt 5), ist eine individuelle messtechnische Charakterisierung zwingend erforderlich. Die bisherige Kategorisierung nach DIN 4109-36:2016-07, Anhang A in Gerätetypen und eine Charakterisierung durch den A-bewerteten Schalleistungspegel, sind für einen Schallschutznachweis mit EN 12354-5 unzureichend.

Aus den Messdaten dieser Geräte wurde eine „worst-case“-Luftschalleistung (graue Kurve) abgeleitet, welche als Eingangsgröße für die Rechenbeispiele in

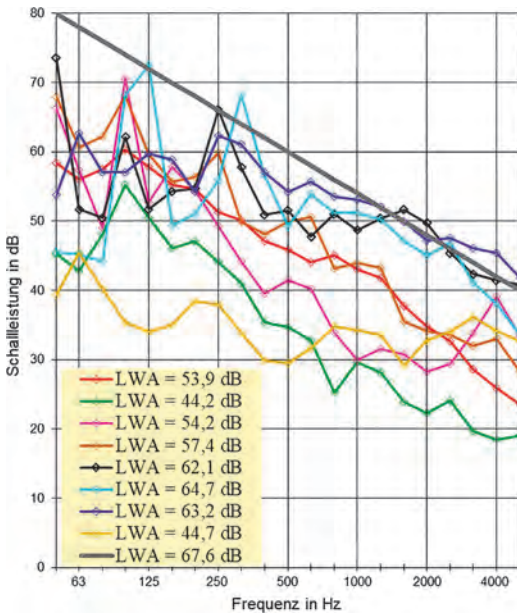


Bild 3. Luftschalleistung von acht Klimageräten und der Referenz-Luftschallquelle in [30]

EN 12354-5 dient. In Abschnitt 6 werden die Daten der acht Geräte in einem Anwendungsbeispiel ebenfalls wieder aufgegriffen.

3.2 Körperschallübertragung

Im Gegensatz zur Luftschallemission einer GTA ist die Körperschallemission abhängig vom Aufstellort, insbesondere von dem, oder den Bauteilen, an denen die Quelle montiert ist. Entkopplungsmaßnahmen zwischen Quelle und Struktur sind ein probates Mittel zur Reduzierung der Körperschallemission, die es bei der messtechnischen Charakterisierung der Quelle oder baukörperseitig bei der Prognose zu berücksichtigen gilt.

Die installierte Körperschalleistung, welche die Eingangsgröße für Prognoserechnungen nach DIN EN 12354-5 ist, wird sowohl von der Quelle als auch von der Empfangsstruktur bestimmt. Zur Berechnung werden komplexe Kenngrößen benötigt. Dies macht die Beschreibung von Körperschallquellen wesentlich aufwendiger und komplizierter als die von Luftschallquellen.

3.2.1 Allgemeines Modell und Kenngrößen zur Berechnung der Körperschallübertragung

Zur Berechnung der installierten Körperschalleistung werden (komplexe) Kenngrößen der Körperschallquelle (Index S für Source) und der Empfangsstruktur (Index R für Receiver) benötigt (Bild 4, [31]).

Maßgeblich für die Körperschallübertragung sind die dynamischen Eigenschaften von Quelle und Struktur an den Kontaktpunkten. Bei der messtechnischen Charakterisierung wird die Quelle als „black box“ betrachtet. Eine Analyse der „internen“ Geräuscherzeugungsmechanismen und der Schallübertragung bis zu den Kontaktpunkten ist somit für die Bestimmung von Eingangsdaten für die Prognose nicht erforderlich.

Zur Erläuterung der Kenngrößen wird im Folgenden eine Quelle betrachtet, die nur einen Kontaktpunkt mit der Empfangsstruktur aufweist und deren Übertragung nur durch die Vibration orthogonal zur Empfangsstruktur erfolgt. Diese Vereinfachung ist zugleich die Grundlage für die in EN 15657 beschriebenen Messverfahren und das Prognoseverfahren in EN 12354-5, bei der andere Freiheitsgrade und Wechselwirkungen zwischen den Kontaktpunkten vernachlässigt werden, was durch die Bezeichnungen „single-equivalent“ (free velocity, mobility, blocked force) und den Index „eq“ zum Ausdruck gebracht wird.

In Forschungsarbeiten konnte anhand von Fallbeispielen gezeigt werden, dass diese Vereinfachung für eine praktikable Anwendung nicht nur notwendig, sondern auch geeignet ist [31–37].

Die installierte Körperschalleistung W_s (Index s für structure-borne) ergibt sich für den allgemeinen Fall (beliebige Admittanzverhältnisse von Quelle und Struktur) nach Gl. (2) bei Formulierung mit der freien Schnelle v_f (Index f für free) und nach Gl. (3) bei Formulierung mit der blockierten Kraft F_b (Index b für blocked) der Quelle.

$$W_s = \frac{1}{2} |v_f|^2 \frac{1}{|Y_S + Y_R|^2} \text{Re}\{Y_R\} = v_{f,RMS}^2 \frac{1}{|Y_S + Y_R|^2} \text{Re}\{Y_R\} \tag{2}$$

$$W_s = \frac{1}{2} |F_b|^2 \frac{|Y_S|^2}{|Y_S + Y_R|^2} \text{Re}\{Y_R\} = F_{b,RMS}^2 \frac{|Y_S|^2}{|Y_S + Y_R|^2} \text{Re}\{Y_R\} \tag{3}$$

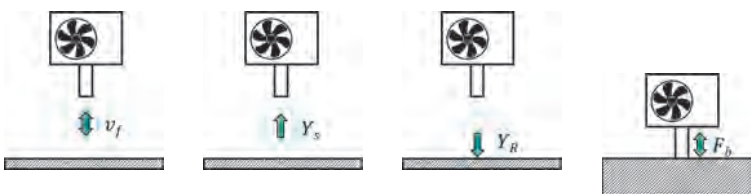


Bild 4. Kenngrößen zur Berechnung der installierten Körperschalleistung

Nachfolgend sind die in EN 15657 bzw. EN 12354-5 enthaltenen Formeln in Pegelschreibweise für Werte in Terzbändern angegeben, wobei der Index i für das Bauteil steht, mit dem die Quelle in Kontakt ist und der Index eq die Betrachtung eines einzelnen äquivalenten Kontaktpunktes bedeutet:

$$L_{W_s,i} \approx 10 \lg \left(\frac{\operatorname{Re}(Y_{R,eq,i})Y_0}{|Y_{S,eq}|^2 + |Y_{R,eq,i}|^2} \right) + L_{v_f,eq} - 60 \text{ dB} \quad (4)$$

$$L_{W_s,i} \approx 10 \lg \left(\frac{\operatorname{Re}(Y_{R,eq,i})Y_0}{1 + \frac{|Y_{R,eq,i}|^2}{|Y_{S,eq}|^2}} \right) + L_{F_b,eq} \quad (5)$$

Bezugsgröße für die Admittanz ist $Y_0 = 1m/(Ns)$.

Bei freier Schnelle und blockierter Kraft erfolgt zur Bestimmung der äquivalenten Werte eine Aufsummierung, bei den Admittanzen von Quelle und Empfänger jeweils eine Mittelung über die Kontaktpunkte. Anstelle der komplexen (Punkt-)Admittanzen von Quelle und Empfänger werden im Nenner der Gleichungen die Beträge verwendet. Die Auswirkung dieser Vereinfachungen wurden u. a. in [32–34] untersucht und sind in den Gln. (4) und (5) durch „≈“ gekennzeichnet.

3.2.2 Freie Schnelle

Die freie Schnelle v_f am Kontaktpunkt i (Index f für „free“) beschreibt die „Aktivität“ der Quelle im Betrieb, wenn diese ohne Kontakt zu einer Empfangsstruktur, also rückwirkungsfrei betrieben wird.

Bei der Bestimmung als äquivalente Größe erfolgt nach EN 15657 eine Aufsummierung der quadrierten Effektivwerte über die N Kontaktpunkte:

$$v_{f,RMS,eq}^2 = \sum_{i=1}^N v_{f,RMS,i}^2 \quad (6)$$

In Pegelschreibweise für ein Terzspektrum des Pegels der freien Schnelle nach EN 15657:

$$L_{v_f,eq} = 10 \lg \left(\sum_{i=1}^N 10^{L_{v_f,eq,i}/10} \right) \quad (7)$$

Für kompakte und leichte GTA kann die freie Schnelle messtechnisch bestimmt werden, indem die Quelle elastisch von z. B. einer schweren Decke abgehängt wird. Für schwere GTA ist eine entkoppelte Auflagerung auf einem schweren Fundament praktikabel [38]. In beiden Fällen muss die Entkopplung so tief abgestimmt werden, dass die Quelle im interessierenden Frequenzbereich rückwirkungsfrei schwingen bzw. betrieben werden kann [39].

Alternativ zur direkten Messung der freien Schnelle an den Kontaktpunkten kann die Empfangsplattenmethode mit einer leichten Empfangsplatte verwendet werden (Abschnitt 3.2.7). Dies ist insbesondere erforderlich, wenn eine direkte Messung an den Kontaktpunkten, z. B. bei Verwendung von Montageschienen oder Entkopplungselementen nicht möglich ist.

3.2.3 Admittanz der Quelle

Die Admittanz Y_s der Quelle am Kontaktpunkt i ist eine passive Größe, welche die Anregbarkeit der Quelle durch das Verhältnis von erzeugter Schnelle v_s zu anregender Kraft F_s beschreibt. Die Quelladmittanz kann mit der freien Schnelle und der blockierten Kraft beschrieben werden.

$$Y_S = \frac{v_S}{F_S} = \frac{v_f}{F_b} \quad (8)$$

Bei der Bestimmung als äquivalente Größe erfolgt nach EN 15657 eine Mittelung der Beträge über die N Kontaktpunkte:

$$|Y_{S,eq}| = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Y_{S,eq,i}| \quad (9)$$

Die messtechnische Bestimmung erfolgt im selben Zustand wie für die freie Schnelle, jedoch ohne dass die Quelle in Betrieb ist. Zur Messung wird üblicherweise ein Impulshammer oder ein elektrodynamischer Shaker mit Kraftsensor bzw. ein Impedanzmesskopf verwendet [40–42].

Alternativ zur direkten Messung der Admittanz an den Kontaktpunkten kann die Admittanz indirekt bestimmt werden. Hierfür sind die blockierte Kraft und die freie Schnelle durch individuelle Messungen zu bestimmen. Diese können wiederum direkt oder indirekt erfolgen. Bei der „two-stage method“ werden die freie Schnelle und die blockierte Kraft unabhängig voneinander mit einer leichten und einer schweren Empfangsplatte indirekt gemessen (Abschnitt 3.2.7).

3.2.4 Admittanz der Empfangsstruktur

Die Admittanz Y_R der Empfangsstruktur am Kontaktpunkt i (Index R für „Receiver“) ist eine passive Größe, welche die Anregbarkeit der Empfangsstruktur durch das Verhältnis von erzeugter Schnelle v_R zu anregender Kraft F_R beschreibt.

$$Y_R = \frac{v_R}{F_R} \quad (10)$$

Bei der Bestimmung als äquivalente Größe nach EN 15657 erfolgt eine Mittelung der Beträge bzw. der Realteile über die N Kontaktpunkte:

$$|Y_{R,eq}| = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Y_{R,i,eq}| \quad (11)$$

$$\operatorname{Re}(Y_{R,eq}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \operatorname{Re}(Y_{R,i,eq}) \quad (12)$$

Die messtechnische Bestimmung erfolgt, ohne dass die Quelle an die Empfangsstruktur angekoppelt ist, mit derselben Messtechnik wie für die Quellenadmittanz.

3.2.5 Blockierte Kraft der Quelle

Die blockierte Kraft F_b der Quelle am Kontaktpunkt i beschreibt analog zur freien Schnelle die Aktivität der Quelle. Nach Gl. (8) stehen die beiden Größen in direktem Zusammenhang. Um GTA hinsichtlich der Quellenstärke zu beurteilen, ist die blockierte Kraft die bes-

sere Größe als die freie Schnelle [34]. Die messtechnische Bestimmung kann aus freier Schnelle und Admittanz der frei aufgehängten Quelle durch Umstellen von Gl. (8) erfolgen.

Bei der Bestimmung als äquivalente Größe erfolgt nach EN 15657 eine Aufsummierung der quadrierten Effektivwerte über die N Kontaktpunkte:

$$F_{b,RMS,eq}^2 = \sum_{i=1}^N F_{b,RMS,i}^2 \quad (13)$$

In Pegelschreibweise für ein Terzspektrum des Pegels der blockierten Kraft nach EN 15657:

$$L_{Fb,eq} = L_{vf,eq} - \left(10 \lg \left(\frac{|Y_{S,eq}|^2}{Y_0^2} \right) \right) \text{dB} - 60 \text{dB} \quad (14)$$

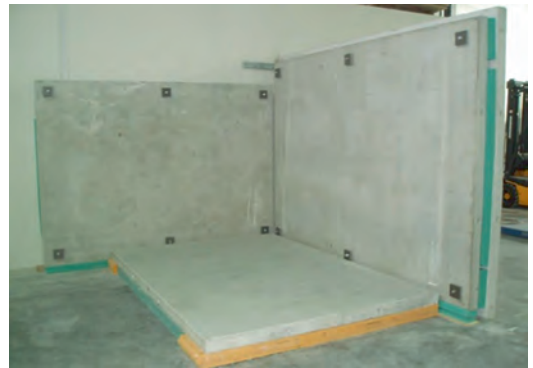
Eine Messung im installierten Zustand mit Kraftaufnehmer zwischen Quelle und einer ausreichend schweren und biegesteifen Empfangsstruktur (in einer Kraftquellensituation, Abschnitt 3.2.6) ist möglich, aber insofern problematisch, dass der Kraftaufnehmer die Kopplungsbedingungen ändert. Als Alternative hierzu kann auch für die blockierte Kraft die Empfangsplattenmethode verwendet werden, die nachfolgend ausführlich erläutert wird.

3.2.6 Empfangsplattenmethode zur Bestimmung der blockierten Kraft

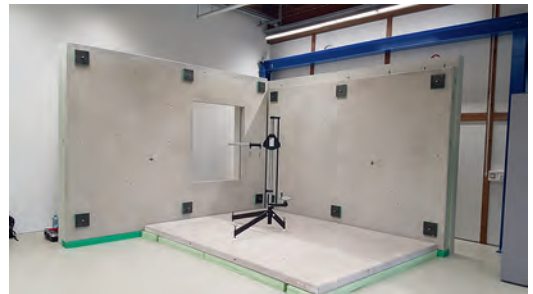
Die Empfangsplattenmethode hat sich als zuverlässiges Messverfahren zur Bestimmung der äquivalenten blockierten Kraft von Körperschallquellen etabliert [34]. Die relativ kompakten Empfangsplattenprüfstände (Bild 5) werden mittlerweile von zahlreichen Forschungseinrichtungen und auch von Herstellern genutzt. Üblicherweise bestehen diese aus bewehrten Stahlbetonplatten mit einer Dicke von 10 cm, die jeweils von der Umgebung und voneinander entkoppelt sind und eine Raumecke ausbilden. Diese Anordnung ist erforderlich um den Körperschalleintrag von Quellen, die gleichzeitig an zwei Wänden und einer Decke angekoppelt sind (z. B. einer Badewanne oder Vorwandinstallationen), voneinander trennen zu können. Diese Trennung ist bei einer In-situ-Charakterisierung von GTA im Gebäude bzw. gebäudeähnlichen Prüfständen, z. B. nach EN 14366-1 für Abwassersysteme mit Wandkontakten und Deckendurchbrüchen mit Brandschutzmanschetten, nicht ohne Weiteres möglich.

Der große Vorteil der Empfangsplattenmethode ist, dass die Messung entsprechend der üblichen Montage realitätsgetreu erfolgt, wie es bei einer freien Aufhängung oder bei der zusätzlichen Installation von Kraftaufnehmern nicht möglich ist. Zudem werden Schwierigkeiten bei der Bestimmung der blockierten Kraft aus freier Schnelle und Admittanz (Abschnitt 3.2.5) an entkoppelten Kontaktpunkten (z. B. einer Waschmaschine auf Gummifüßen) vermieden.

Die Empfangsplattenmethode ist ein indirektes Verfahren, das eine sogenannte Kraftquellensituation vor-



a)



b)

Bild 5. Beispiele für Empfangsplattenprüfstände nach EN 15657 an der HFT Stuttgart (a) und der TH Rosenheim (b)

aussetzt. Kraftquellensituation bedeutet, dass die eingeleitete Kraft unabhängig von der Empfangsstruktur und somit eine reine Kenngröße der Quelle ist. Eine Kraftquellensituation liegt dann vor, wenn die Admittanz der Quelle viel größer ist als die Admittanz der Empfangsstruktur, also $Y_S \gg Y_R$. Für diesen Fall vereinfacht sich Gl. (2) zu:

$$W_s \approx \frac{1}{2} \frac{|v_f|^2}{|Y_S|^2} \text{Re}(Y_R) = \frac{1}{2} |F_b|^2 \text{Re}(Y_R) = F_{b,RMS}^2 \text{Re}(Y_R) \quad (15)$$

Aus der Leistungsbilanz im stationären Zustand mit der Quelle im Betrieb ergibt sich die übertragene Körperschalleistung in eine vollständig von der Umgebung entkoppelte Empfangsplatte:

$$W_s = \omega m v_{RMS}^2 \eta \quad (16)$$

wobei ω die Kreisfrequenz, m die Masse, v_{RMS}^2 die mittlere Plattenschnelle und η der Gesamt-Verlustfaktor der Empfangsplatte ist.

Durch Gleichsetzen der Gln. (15) und (16) erhält man die Bestimmungsgleichung für die blockierte Kraft:

$$F_{b,RMS}^2 = \frac{W_s}{\text{Re}(Y_R)} \quad (17)$$

Bei Quellen mit mehreren Kontaktpunkten erhält man die äquivalente blockierte Kraft durch Normierung

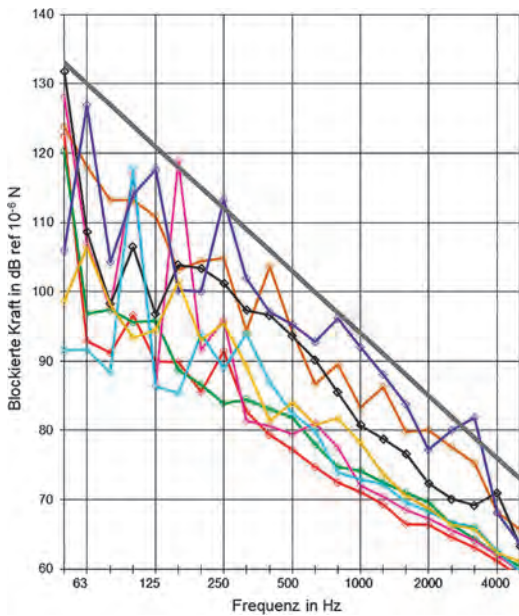


Bild 6. Blockierte Kraft von acht Klimageräten und der Referenz-Körperschallquelle in [30]

auf die mittlere Admittanz der Empfangsplatte an den N Kontaktpunkten $Y_{R,eq}$ nach Gl. (12):

$$F_{b,RMS,eq}^2 = \frac{W_s}{\operatorname{Re}(Y_{R,eq})} \quad (18)$$

In Pegelschreibweise nach EN 15657 (Index low für „low mobility plate“):

$$L_{Fb,eq} \approx L_{Ws,low} - \left(10 \lg \left(\frac{\operatorname{Re}(Y_{R,low,eq})}{Y_0} \right) \right) \text{ dB} \quad (19)$$

In Bild 6 sind die Frequenzspektren der blockierten Kraft von acht Klimageräten dargestellt, die im Rahmen des o. g. Forschungsprojektes nach DIN EN 15657 [3] am Empfangsplattenprüfstand bestimmt wurden und deren Luftschalleistung ebenfalls bestimmt wurde (Abschnitt 3.1).

Bei allen Geräten treten infolge des Betriebs (Drehzahl von Ventilatoren, Kompressoren etc.) markante Spitzen in den Frequenzverläufen auf. Wie bei der Bestimmung der Luftschalleistung ist eine individuelle messtechnische Charakterisierung zwingend erforderlich, um genaue Prognoserechnungen durchführen zu können.

Im Vergleich mit der Luftschalleistung ergibt sich eine andere Hierarchie der Geräte, da die Körperschallübertragung neben der internen Vibrationserzeugung maßgeblich von der Beschaffenheit der Kontaktpunkte abhängt, für die Luftschallabstrahlung ist in erster Linie die Beschaffenheit des Gehäuses maßgeblich. Charakteristisch für alle Geräte ist eine deutliche Abnahme der blockierten Kraft zu hohen Frequenzen. Aus den Messdaten dieser Geräte wurde eine „worst

case“-blockierte Kraft (graue Kurve) abgeleitet, welche als Eingangsgröße für die Rechenbeispiele in EN 12354-5 dient. In Abschnitt 6 werden die Körperschalldaten dieser acht Quellen in einem Anwendungsbeispiel aufgegriffen.

Die indirekte Messung kann auch in-situ, d. h. an ausreichend schweren und biegesteifen Decken und Wänden (Voraussetzung: Kraftquellsituation) in gebäudeähnlichen Prüfständen oder in Gebäuden angewendet werden. Jedoch ist hier eine „Kalibrierung“ der Bauteile erforderlich. Dies ist ähnlich dem Schalleistungsersatzverfahren bei der Bestimmung der Luftschalleistung mit einer Referenzschallquelle. Bei dieser „power substitution method“, die in EN 15657 Anhang C beschrieben ist, wird dem Bauteil zunächst mit einem elektrodynamischen Shaker oder Impulshammer eine Körperschalleistung zugeführt, die direkt gemessen wird und somit bekannt ist. Gleichzeitig wird die dadurch erzeugte mittlere Schnelle auf dem Bauteil gemessen. Unter der Annahme, dass das Verhältnis von erzeugter Schnelle zu eingeleiteter Schalleistung für die reale Quelle dasselbe ist, kann auf die installierte Schalleistung der Quelle zurückgerechnet werden. Die Bestimmung der äquivalenten blockierten Kraft erfolgt dann nach Gl. (15).

Dieses Verfahren wurde zur Charakterisierung von Leichtbautreppen als Körperschallquellen im Treppenprüfstand entwickelt [36] und ist die Grundlage für die Prüfung von Abwassersystemen nach EN 14366-1 (Abschnitt 4) im Installationsprüfstand. Unlängst wurde es zur In-situ-Charakterisierung eines Aufzuges verwendet [43].

3.2.7 Empfangsplattenmethode zur Bestimmung der freien Schnelle

Die Empfangsplattenmethode nach Abschnitt 3.2.6 kann auch zur Bestimmung der freien Schnelle der Quelle verwendet werden. Hierfür wird an die elastisch von einer schweren Decke (genauer: eine Decke mit geringer Admittanz) abgehängte Quelle eine leichte und biegeweiche Empfangsplatte aus Stahl mit ausreichend hoher Admittanz an die Kontaktpunkte angekoppelt. Voraussetzung ist, dass dabei eine Schnellequellsituation vorliegt, was dann der Fall ist, wenn die Admittanz der Quelle viel kleiner ist, als die Admittanz der Empfangsstruktur also $Y_S \ll Y_R$.

Dadurch, dass die von der Quelle erzeugte Schnelle nicht direkt an den Kontaktpunkten, sondern als örtlich gemittelte Schnelle auf der leichten Empfangsplatte gemessen wird, werden messtechnische Probleme bei entkoppelten Kontaktpunkten reduziert. Andererseits hat sich bei bisherigen Anwendungen [44–48] gezeigt, dass die Realisierung einer Schnellequellsituation schwierig sein kann und somit größere Unsicherheiten bestehen als bei der Bestimmung der blockierten Kraft an einer schweren Empfangsplatte nach Abschnitt 3.2.6.

Die Nutzung von Geothermie zur Raumheizung und -kühlung bietet mehrere Vorteile. Erstens ermöglicht sie eine nachhaltige Nutzung der Ressource Erdwärme, da nicht nur Energie entzogen, sondern auch über die Kühlung Wärme zurückgeführt wird. Dies trägt zu einer stabilen und langfristigen Nutzung der geothermischen Ressourcen bei. Zweitens verbessert die zusätzliche Kühlfunktion die Behaglichkeit in den Räumen erheblich, insbesondere in den wärmeren Monaten. Drittens kann durch die Rückspeisung von Energie, also das „Wiederaufladen der Erdatterie“, die geothermische Quelle kleiner dimensioniert werden. Dies führt zu Kosteneinsparungen bei der Erschließung der Quellen, da weniger geothermische Bohrungen oder kleinere Kollektoren benötigt werden.

Insgesamt zeigt sich, dass ein integrativer Ansatz, der sowohl das Heizen als auch das Kühlen berücksichtigt, zahlreiche Vorteile bietet. Dieser Ansatz trägt nicht nur zur Verbesserung des Raumklimas bei, sondern optimiert auch die Nutzung von Ressourcen und reduziert die Investitionskosten. In Anbetracht des Klimawandels und der damit verbundenen Herausforderungen ist es daher essenziell, Energiekonzepte zu entwickeln, die beide Aspekte gleichermaßen in den Fokus rücken.

3.3 Integration erneuerbarer Energien

Die Implementierung und Verbreitung erneuerbarer Energien muss innerhalb wirtschaftlicher Budgetgrenzen ermöglicht werden. Diese Systeme müssen wirtschaftliche Vorteile bieten, um den Markt zu erobern. Es ist entscheidend zu erkennen, dass die bisherigen Planungsmethoden, die aus Zeiten einer dauerhaft verfügbaren und kostengünstigen fossilen Energieversorgung stammen, nicht mehr zeitgemäß sind. Diese Planungsmethoden führten aufgrund der damaligen Umstände zu konstanten und jahrzehntelangen Überbestimmungen von Energiesystemen, sowohl hinsichtlich der Energiequellen als auch der Übergabesysteme und Speicher.

Wendet man diese traditionellen Methoden auf volatile und kostenintensive regenerative Energiequellen an, sind diese nicht wirtschaftlich konkurrenzfähig gegenüber fossilen Energieträgern, trotz deren steigender Preise. Es gilt, die Systeme auf die Realität auszulegen – auf den tatsächlichen dynamischen Jahreslastgang – und keine bilanzielle Plusenergie anzustreben, sondern eine tatsächliche dynamische Abstimmung von Energieangebot und Energieverbrauch zu erreichen. Hierbei hilft das Werkzeug der Gebäudesimulation. Durch Gebäudesimulationen können alle physikalisch relevanten Energieflüsse dynamisch im Jahreszyklus ermittelt werden, wodurch eine entsprechend suffiziente Planungsdatengrundlage geschaffen wird.

Die auf die Realität abgestimmte Auslegungsmethodik zur Erschließung erneuerbarer Energiequellen, wie beispielsweise Geothermie oder generell Wärmepumpentechnologie verschiedenster Quellen, ermöglicht es, diese Systeme wirtschaftlich konkurrenzfähig oder so-

gar überlegen im Vergleich zu fossilen Energieträgern und Systemen zu machen. Die Methode der statischen Heizlastauslegung nach DIN EN 12831 [4] sollte dementsprechend durch ein höherwertiges, realitätsnäheres, dynamisches Planungsszenario abgelöst werden, um die zeitnahe und flächendeckende Umsetzung regenerativer Energieversorgung zu fördern.

Die dynamische Planung ermöglicht eine präzisere und effizientere Dimensionierung der Energiesysteme, indem sie die tatsächlichen Bedürfnisse und Schwankungen im Energieverbrauch berücksichtigt. Dies führt zu einer optimierten Nutzung der Ressourcen und reduziert die Kosten für überdimensionierte Anlagen. Die Berücksichtigung des dynamischen Jahreslastgangs stellt sicher, dass die Systeme genau auf die spezifischen Anforderungen abgestimmt sind, wodurch Überkapazitäten vermieden und die Effizienz maximiert werden.

Darüber hinaus trägt die dynamische Auslegung zur Stabilität des Energienetzes bei, indem sie die Integration volatiler erneuerbarer Energien erleichtert und die Flexibilität des Systems erhöht. Dies ist besonders wichtig angesichts der zunehmenden Elektrifizierung von Prozessen und der steigenden Nachfrage nach erneuerbaren Energien. Durch die präzise Anpassung an die tatsächlichen Lastprofile können regenerative Energiesysteme besser in bestehende Infrastrukturen integriert werden, was die Abhängigkeit von fossilen Energieträgern weiter reduziert.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Integration erneuerbarer Energien nur durch die Anwendung moderner, dynamischer Planungsmethoden wirtschaftlich und technisch sinnvoll gestaltet werden kann. Die Umstellung von statischen auf dynamische Auslegungsmethoden ist ein notwendiger Schritt, um die flächendeckende Nutzung erneuerbarer Energien voranzutreiben und die Ziele der Energiewende zu erreichen.

Im Quartier Hosterwitz/Pillnitz wurden die dynamischen Lastkurven mithilfe eines digitalen Zwillings detailliert ermittelt. Auf Grundlage dieser präzisen Daten konnten die optimalen Systemkomponenten ausgewählt werden. Aufgrund der klimatischen Bedingungen und der spezifischen Anforderungen des Standorts fiel die Wahl auf eine Wärmepumpe, die an zwei Quellen angeschlossen ist: eine Luftquelle und eine geothermische Quelle. Diese hybride Lösung bietet mehrere entscheidende Vorteile, die sowohl die Investitions- als auch die Betriebskosten erheblich beeinflussen.

In den Übergangszeiten, wie Frühling und Herbst, sind die Lufttemperaturen oft günstiger als die Erdreichtemperaturen. Dies ermöglicht es, die notwendige Größe der geothermischen Quelle (Bohrungen oder Kollektoren) zu reduzieren. Im speziellen Fall von Pillnitz konnte die Größe der Kollektoren um 25 % verringert werden. Diese Reduktion hat signifikante Auswirkungen auf die Investitionskosten des Energiesystems und führt bereits in der Bauphase zu großen Einsparungen.

Ein weiterer wesentlicher Vorteil ist die Optimierung der Betriebskosten. Die Effizienz von Wärmepumpen, gemessen am Coefficient of Performance (COP), hängt stark von den Quelltemperaturen ab. Durch die Nutzung einer hybriden Lösung, die sowohl Luft- als auch Erdwärmequellen umfasst, können die Quelltemperaturen je nach Bedarf optimal genutzt werden, was die Effizienz und damit die Betriebskosten während der Nutzungsphase verbessert.

Es lässt sich nicht pauschal sagen, welche Systemkomponenten und Kombinationen für jedes Quartier optimal sind. Dies hängt von zahlreichen Faktoren ab, einschließlich der Bausubstanz, des Standorts, der Nutzung sowie weiteren spezifischen Bedingungen. Um die bestmöglichen Ergebnisse zu erzielen, ist eine Variantenstudie mittels Gebäudesimulation und digitaler Zwillinge erforderlich.

Die Gebäudesimulation ermöglicht es, verschiedene Szenarien durchzuspielen und deren Auswirkungen auf die Energieeffizienz und Kosten zu analysieren. Der digitale Zwilling, ein virtuelles Modell des Quartiers, hilft dabei, die dynamischen Energieflüsse im Jahresverlauf genau zu simulieren und die Planung der Energiesysteme auf eine solide Datenbasis zu stellen. Durch diese fortschrittlichen Methoden können maßgeschneiderte Lösungen entwickelt werden, die sowohl wirtschaftlich als auch ökologisch nachhaltig sind.

Zusammenfassend zeigt die Implementierung eines hybriden Wärmepumpensystems im Quartier Hosterwitz/Pillnitz, dass durch die präzise Ermittlung dynamischer Lastkurven und die gezielte Auswahl von Systemkomponenten erhebliche Einsparungen bei den Investitions- und Betriebskosten erzielt werden können. Diese Herangehensweise ist ein exemplarisches Modell für andere Quartiere und unterstreicht die Bedeutung innovativer Planungsmethoden und Technologien für die erfolgreiche Integration erneuerbarer Energien in städtischen Gebieten.

3.4 Aktivierung der Speichermasse

Thermische Speichermasse fungiert als Puffer gegen Temperaturschwankungen, indem sie Wärme aufnimmt, wenn diese im Überfluss vorhanden ist – beispielsweise während der Sonnenstunden – und diese bei Bedarf wieder abgibt. Dies verringert die Abhängigkeit von externen Heiz- oder Kühlsystemen, was in Zeiten steigender Energiepreise und wachsender Umweltbelastungen besonders vorteilhaft ist. An heißen Tagen halten Gebäude mit hoher Speichermasse die Innenräume angenehm kühl, während sie in kalten Nächten die gespeicherte Wärme langsam abgeben und so den Wohnkomfort erheblich steigern.

Zudem ermöglicht die thermische Masse eine effizientere Nutzung von Energiesystemen wie Wärmepumpen. Diese Systeme können während kostengünstiger Stromphasen aktiviert werden, um Energie zu speichern, die dann freigesetzt wird, wenn sie am meisten benötigt wird. Dieses Prinzip der Lastverschiebung ist

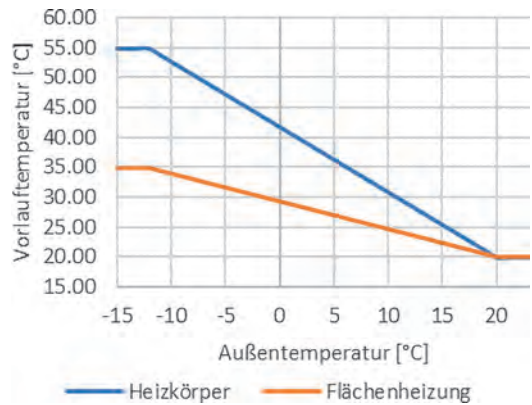


Bild 5. Außentemperaturabhängige Vorlauftemperaturen (Varianten 1 und 2) (Institut für Bauklimatik)

wirtschaftlich vorteilhaft und unterstützt gleichzeitig die Netzstabilität, indem es hilft, Lastspitzen im Stromnetz zu glätten.

Ein weiterer Vorteil der thermischen Speichermasse liegt in der Verbesserung der Netzstabilität und der Reduzierung operativer Kosten. Gebäude, die in der Lage sind, auf dynamische Marktsignale zu reagieren, beispielsweise durch Demand-Response-Programme, werden zu aktiven Teilnehmern im Energiemarkt. Die Speicherfähigkeit der thermischen Masse fördert zudem die Integration erneuerbarer Energiequellen. Sie kann Energie aus Sonne und Wind speichern und zu einem späteren Zeitpunkt bereitstellen, was diese Energieformen verlässlicher und effektiver macht.

Die Aktivierung der thermischen Speichermasse der Außenwand stellt eine besonders innovative Methode dar und bietet ein signifikantes Speicherpotenzial. Während bei Fußbodenheizungen lediglich die Estrichschicht aktiviert wird, ermöglicht das außenliegende Temperierungssystem die Nutzung der gesamten Außenwand als Speicher. Um das Potenzial und den Mehrwert dieser Methode zu verdeutlichen, wurden Simulationen zur Untersuchung verschiedener Sanierungsstrategien durchgeführt. Die Variantenstudie vergleicht drei Systeme für ein Bestandsgebäude in Pillnitz/Hosterwitz:

- Variante 1: WDVS + Heizkörper
- Variante 2: WDVS + Fußbodenheizung innen
- Variante 3: SustainaShell

Obwohl die Energiebedarfe der verschiedenen Heizsystemvarianten aufgrund ähnlicher Dämmstärken nur geringfügig variieren, zeigt sich ein deutlicher Vorteil bei den Flächenheizungssystemen. Diese Systeme benötigen zwar minimal mehr Energie, erzielen jedoch durch die effizientere Wärmepumpentechnologie (höhere COP-Werte) und niedrigere Vorlauftemperaturen (vgl. Bild 5) größere Einsparungen beim Stromverbrauch (Bild 6). Dies ist besonders wirtschaftlich, da Strom ein verhältnismäßig teurer Energieträger ist.

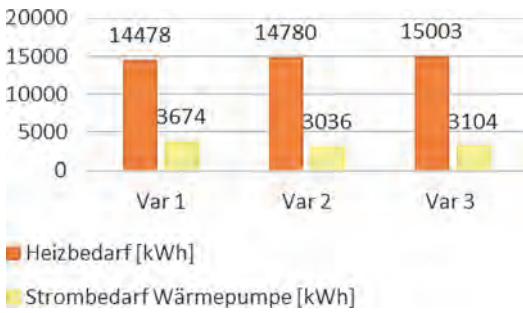


Bild 6. Vergleich der Energiebedarfe der Varianten (Institut für Bauklimatik)

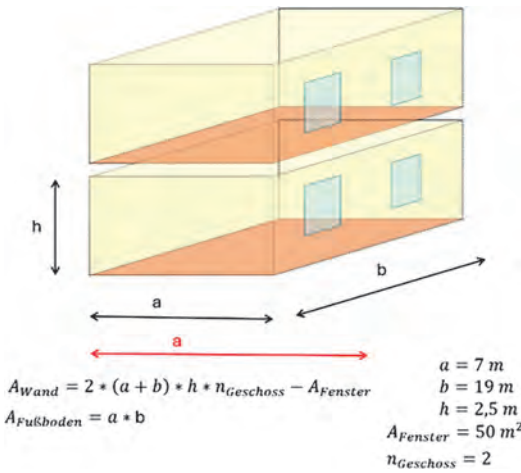


Bild 7. Darstellung der Flächenverhältnisse (Institut für Bauklimatik)

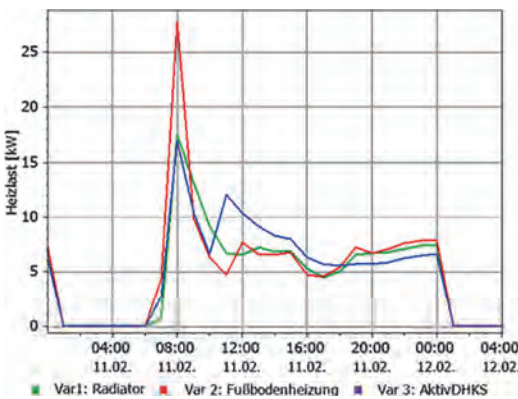


Bild 8. Heizlastvergleich der Varianten für den 11. Februar (Institut für Bauklimatik)

Das Beispielgebäude in Pillnitz/Hosterwitz zeigt, dass die wirtschaftlichen Vorteile der SustainaShell durch das milde Klima und die spezifische Kubatur des Gebäudes noch nicht vollständig genutzt werden. Die optimale Anwendung des Systems wird erreicht, wenn das Verhältnis von Außenwandfläche zur Geschossfläche minimal ist (Bild 7), was die Effizienz weiter steigert.

Darüber hinaus trägt SustainaShell, ähnlich wie eine Fußbodenheizung, zur Reduktion der Stromlastspitzen (Peak-Shaving) bei (Bild 8). Ein weiterer bedeutender Vorteil ist das Load-Shifting, das durch das träge System ermöglicht wird. Dies bedeutet, dass die Heizlastspitzen auf Zeiten verschoben werden können, in denen der PV-Strom am effizientesten genutzt werden kann. Dadurch werden die Energiebedarfe geglättet und eine gleichmäßigere Energieverwendung über den Tag hinweg ermöglicht.

Darüber hinaus ermöglicht das System, im Hinblick auf die zukünftige Entwicklung des Klimawandels, eine nahezu kostenfreie Kühlung. Stromüberschüsse im Sommer können genutzt werden, um eine passive Kühlung über die Flächensysteme zu realisieren und gleichzeitig die geothermische Quelle zu regenerieren. Dies trägt insbesondere zur ganzjährigen Behaglichkeit im Gebäude bei (Bild 9).

Die Integration der thermischen Speichermasse in den Bau und die Planung von Gebäuden stellt somit nicht nur eine technische Notwendigkeit dar, sondern auch eine wirtschaftliche und ökologische Investition in die Zukunft. Sie hilft, Energiekosten zu senken, die Umwelt zu schützen und den Wohnkomfort zu verbessern, was sie zu einem Schlüsselement moderner, nachhaltiger Architektur macht. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Aktivierung der Speichermasse durch außenliegende Temperierung eine innovative und effektive Methode darstellt, um Energieeffizienz zu steigern, Betriebskosten zu senken und den Wohnkomfort nachhaltig zu verbessern.

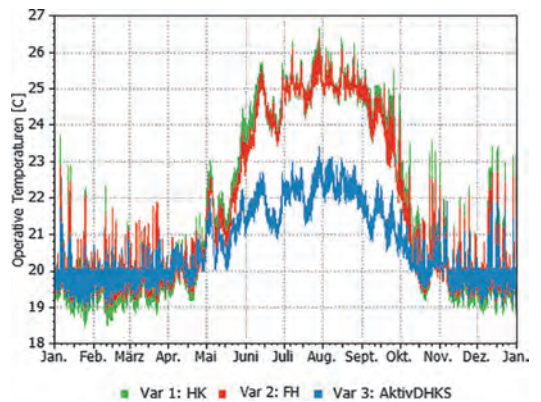


Bild 9. Vergleich der operativen Temperaturen anhand des Raum WE04_Wohnen (Institut für Bauklimatik)

3.5 Innovative Planung mit Digital Twin und Gebäudesimulation

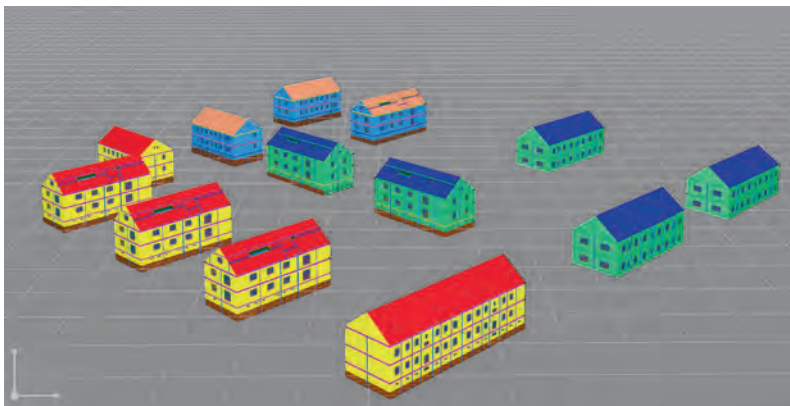
Die Nutzung modernster Planungsmethoden wie des Digital Twin und der Gebäudesimulation bietet eine innovative Herangehensweise zur Optimierung von Sanierungsprojekten und zur Implementierung effizienter Energiesysteme. Im Quartier Hosterwitz/Pillnitz wurden dynamische Lastkurven präzise mithilfe eines digitalen Zwillings ermittelt. Dieses virtuelle Modell des Quartiers ermöglicht eine detaillierte Analyse und Si-

mulation der Energieflüsse über das gesamte Jahr hinweg.

Der digitale Zwilling bildet die Grundlage für eine umfassende Variantenstudie, bei der verschiedene Sanierungsstrategien und deren Auswirkungen auf die Energieeffizienz untersucht wurden. So konnten unter realitätsnahen Bedingungen unterschiedliche Systemkomponenten und deren Kombinationen getestet werden, um die bestmögliche Lösung für das jeweilige Gebäude zu identifizieren.

Komponente
[PilHost] Neubau GEG Kellerdecke adiabat auf SeiteB
[PilHost] Neubau GEG Geschossdecke
[PilHost] Neubau GEG Geschossdecke adiabat auf SeiteB
[PilHost] Bestand Erdwand
[PilHost] Neubau GEG Geschossdecke adiabat auf SeiteA
[PilHost] Bestand Innerwand tragend
[PilHost] Bestand Dach
[PilHost] Sanierter Bestand AussenWand
[PilHost] Sanierter Bestand Geschossdecke
[PilHost] Neubau GEG Kellerdecke
[PilHost] Neubau GEG Bodenplatte
[PilHost] Sanierter Bestand Oberste Geschossdecke
[PilHost] Bestand Geschossdecke adiabat auf SeiteB
[PilHost] Neubau GEG Dach
[PilHost] Bestand AussenWand
[PilHost] Bestand Geschossdecke
[PilHost] Bestand Fussbodenerdberührt
[PilHost] Bestand Geschossdecke adiabat auf SeiteA
[PilHost] Bestand Innerwand tragend adiabat auf SeiteB
[PilHost] Bestand Innerwand
[PilHost] Bestand Innerwand adiabat auf SeiteB
[PilHost] Neubau GEG AussenWand
[PilHost] Sanierter Bestand Dach

a)



b)

Bild 10. Quartier Pillnitz/Hosterwitz;
a) Legende Komponenten;
b) Simulationsmodell
(Institut für Bauklimatik)

Insgesamt zeigt die Anwendung von Digital Twin und dynamischer Gebäudesimulation, dass maßgeschneiderte Lösungen entwickelt werden können, die sowohl wirtschaftlich als auch ökologisch nachhaltig sind. Diese fortschrittlichen Methoden erlauben eine präzise Dimensionierung der Energiesysteme, reduzieren die Kosten für überdimensionierte Anlagen und verbessern die Integration erneuerbarer Energien. Dies macht sie zu unverzichtbaren Werkzeugen für die moderne, nachhaltige Architektur und Stadtplanung.

Der digitale Zwilling eines Gebäudes integriert sämtliche reale Einflussfaktoren, die auf das Gebäude einwirken. Dazu gehören das lokale Außenklima, die Nutzung des Gebäudes, umgebende Verschattungen sowie die detaillierten Konstruktionsaufbauten inklusive der Materialkennwerte. Diese umfassende digitale Repräsentation ermöglicht eine präzise Analyse und Planung.

Bild 10 veranschaulicht die unterschiedlichen Konstruktionszustände im Quartier Hosterwitz/Pillnitz. Die unsanierten Bestandsgebäude sind in Gelb dargestellt, die mit einem Wärmedämmverbundsystem (WDVS) sanierten Bestandsgebäude in Blau und die Neubauten in Grün. Diese farbliche Differenzierung hilft, die verschiedenen Sanierungsstadien und ihre spezifischen energetischen Eigenschaften auf einen Blick zu erkennen.

Durch die Einbeziehung aller relevanten Parameter und Bedingungen bietet der digitale Zwilling eine solide Grundlage für die Entwicklung effizienter und nachhaltiger Energiekonzepte, die exakt auf die jeweiligen Gegebenheiten abgestimmt sind.

Das Gebäudemodell wurde mit der Software SIM-VICUS [5] erstellt.

3.6 SIM-VICUS

Die Simulationsoberfläche SIM-VICUS stellt ein leistungsstarkes Werkzeug zur Gebäude- und Energietechnik-Simulation dar. Im Kern basiert SIM-VICUS auf dem Nandrad-Simulationsprogramm [6], das für seine Genauigkeit und Effizienz bekannt ist. Diese Kombination ermöglicht detaillierte und präzise Simulationen von Gebäuden und deren Energiesystemen.

Eine der herausragenden Eigenschaften von SIM-VICUS ist die Möglichkeit zur Auswertung der Simulationsergebnisse mithilfe des Post-Proc-Analysetools. Post-Proc [7] bietet eine umfassende und detaillierte Analyse der Simulationsdaten, was für die Bewertung und Optimierung der Gebäudemodelle von entscheidender Bedeutung ist.

Besonders hervorzuheben ist die grafische Benutzeroberfläche von SIM-VICUS. Diese spielt eine wesentliche Rolle bei der intuitiven Gestaltung und Parametrierung der Simulationsmodelle. Die grafische Oberfläche unterstützt Falschfarbendarstellungen, die es ermöglichen, unterschiedliche Parameter und Ergebnisse auf einfache und visuell zugängliche Weise darzustellen. Diese Darstellungen sind nicht nur hilfreich, um komplexe Daten schnell zu interpretieren, sondern sie

tragen auch dazu bei, Fehler in der Modellierung und Parametrierung leicht zu erkennen, zu vermeiden und zu beheben.

Die intuitive Benutzerführung und die visuelle Rückmeldung durch Falschfarbendarstellungen machen SIM-VICUS zu einem benutzerfreundlichen Werkzeug, das sowohl für Experten als auch für Anwender mit weniger Erfahrung in der Simulationstechnik geeignet ist. Die Möglichkeit, Parameter visuell und interaktiv anzupassen, verbessert die Effizienz und Genauigkeit der Simulationsprozesse erheblich.

Insgesamt bietet SIM-VICUS eine umfassende und flexible Plattform für die Gebäudesimulation, die durch den Einsatz des Nandrad-Rechenkerns und des Post-Proc-Analysetools unterstützt wird. Die grafische Oberfläche mit ihren Falschfarbendarstellungen trägt wesentlich dazu bei, dass komplexe Simulationen intuitiv und fehlerfrei durchgeführt werden können. Dies macht SIM-VICUS zu einem unverzichtbaren Werkzeug für die moderne Gebäudetechnik und -planung.

4 Energiekonzept

Das Energiekonzept für das Quartier Hosterwitz/Pillnitz zeichnet sich durch seine Effizienz und Einfachheit aus, wobei modernste Technologien zum Einsatz kommen, um eine nachhaltige und wirtschaftliche Energieversorgung zu gewährleisten.

Zentral zwischen den Häusern wird ein Geothermieflachkollektor verlegt, der als primäre Quelle für Erdwärme dient. Eine zentrale Wärmepumpe, die sowohl an diese Erdwärmequelle als auch an eine Luftquelle angeschlossen ist, nutzt automatisch die jeweils günstigere Quelle basierend auf den aktuellen Quelltemperaturen. Diese automatische Umschaltung optimiert die Effizienz und senkt die Betriebskosten.

Ein zentraler Warmwasserspeicher ist ebenfalls vorgesehen, um Spitzenlasten abzufangen und Dunkelflauten, also Zeiten ohne ausreichende Energieproduktion, kurzfristig zu überbrücken. Dies sorgt für eine gleichmäßige und zuverlässige Wärmerversorgung im gesamten Quartier.

Das Verteilungsnetz wird als Zweileitersystem ausgeführt. Variantenrechnungen haben gezeigt, dass ein Vierleitersystem in diesem Fall unwirtschaftlich wäre. Obwohl getrennte Vorlauftemperaturen für die Außenwandtemperierung und die Heizkörper eine höhere Effizienz bieten könnten, rechtfertigen sie nicht den zusätzlichen Investitionsaufwand. Daher werden die Temperaturen für die Außenwandtemperierung durch Rücklauf-Beimischung heruntergemischt.

Für die Bereitstellung von Trinkwarmwasser werden dezentrale Durchlauferhitzer eingesetzt. Eine zentrale Zirkulation wurde aus Kostengründen und wegen hoher Zirkulationsverluste vermieden. Obwohl die Nutzung des vorgewärmten Heizungsvorlaufs untersucht wurde, ergaben die Berechnungen, dass der technische

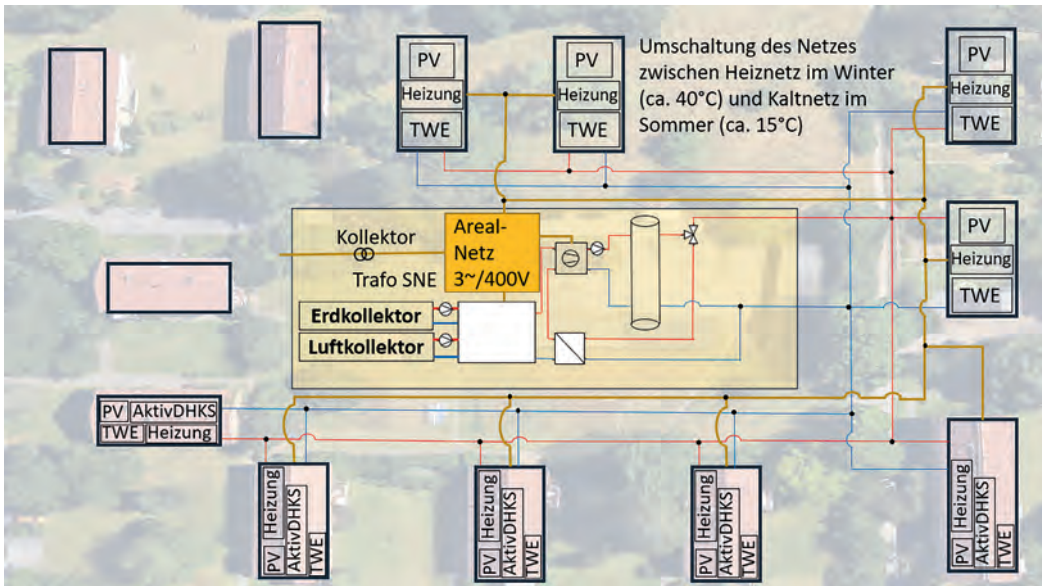


Bild 11. Energiekonzept (Institut für Bauklimatik)



Bild 12. Flächenkollektor (aus [8])

Aufwand den wirtschaftlichen Mehrwert überschreiten würde. Daher wurde eine einfachere Lösung bevorzugt.

Dieses Konzept setzt auf eine reduzierte und handelbare Betriebsweise, um komplexe Anlagenkonzepte zu vermeiden. Auf den Dächern der Gebäude werden Photovoltaikmodule installiert, die Strom zur Eigenversorgung generieren. Diese PV-Elemente tragen nicht nur zur Deckung des Eigenbedarfs bei, sondern unterstützen auch die Nachhaltigkeitsziele des Quartiers.

Das Quartier ist dennoch nicht autark. Es gibt nach wie vor eine Winterlücke, diese ist jedoch minimiert und die Betriebsweise des Quartiers besonders netzdienlich, da die Baukörper als Wärmespeicher aktiviert werden und damit für eine Lastprofilglättung sorgen. Insgesamt bietet dieses durchdachte Energiekonzept eine effiziente, kostengünstige und nachhaltige Lösung,

die den Anforderungen des modernen Wohnens gerecht wird und gleichzeitig einen Beitrag zum Umweltschutz leistet (Bilder 11 und 12).

5 Implementierung im Quartier

Die Planung und Vorbereitung der Sanierungsmaßnahmen erfolgen parallel zum Verlauf des EU-Forschungsprojektes NEUTRALPATH. Dabei werden detaillierte Analysen und Simulationen durchgeführt, um die optimalen Maßnahmen zur energetischen Verbesserung der Bestandsgebäude zu ermitteln. Die Planung umfasst sowohl technische als auch wirtschaftliche Aspekte, um sicherzustellen, dass die Maßnahmen sowohl effizient als auch kostengünstig sind. Ein zentraler Bestandteil der Vorbereitung ist die Integration eines umfassenden Monitoringsystems, um die geplanten Maßnahmen während und nach der Umsetzung genau zu überprüfen und zu validieren.

Die logistischen Herausforderungen bei der Durchführung der Sanierungsmaßnahmen sind erheblich, insbesondere aufgrund des Bestrebens, die Bauarbeiten im bewohnten Zustand durchzuführen. Um dies zu bewältigen, wird ein detaillierter Bauzeitenplan erstellt, der eng mit den Bewohnern kommuniziert wird. Zudem werden Maßnahmen ergriffen, um die Sicherheit und den Komfort der Bewohner während der Bauphase zu gewährleisten, einschließlich Lärmschutzmaßnahmen und temporärer Zugangslösungen. Da der Baulärm tagsüber, wenn die Bewohner in der Regel auf Arbeit sind, stattfindet, ist die Störung durch die Bauarbeiten marginal.

6 Wirtschaftlichkeit und Kosteneffizienz

6.1 Kostenanalyse der Sanierungsmaßnahmen

Eine detaillierte Kostenanalyse wird durchgeführt, um die wirtschaftliche Machbarkeit der Sanierungsmaßnahmen zu gewährleisten. Diese Analyse umfasst die Material- und Arbeitskosten sowie die langfristigen Betriebskosten. Es wird erwartet, dass die initialen Investitionen durch die erheblichen Einsparungen bei den Energiekosten und die langfristige Wertsteigerung der Immobilien gerechtfertigt sind.

6.2 Vergleich zu herkömmlichen Sanierungsmethoden

Im Vergleich zu herkömmlichen Sanierungsmethoden zeigt sich, dass die Implementierung außenliegender Wandtemperierung zwar initial höhere Kosten verursachen kann, diese jedoch durch langfristige Einsparungen und die Verbesserung der Energieeffizienz mehr als ausgeglichen werden. Zusätzlich bieten diese innovativen Technologien erhebliche Vorteile in Bezug auf Nachhaltigkeit und Wohnkomfort.

Ein typisches System zur Dämmung wäre ein Wärmedämmverbundsystem (WDVS), das jedoch Probleme mit Veralgung aufweist. Um dieser Veralgung vorzubeugen, werden häufig ökologisch bedenkliche Stoffe wie Biozide eingesetzt. Im Gegensatz dazu kann die außenliegende Temperierung der Außenwand diese bauphysikalischen Probleme hygrothermisch beheben. Zwar führt dieses System zu leicht höheren Wärmeverlusten, diese werden jedoch durch die niedrigen Vorlauftemperaturen effizient ausgeglichen und die benötigte Quellenergie ist kostengünstig verfügbar.

Ein weiterer entscheidender Vorteil der außenliegenden Temperierung ist die signifikante Erhöhung der Behaglichkeit in den Räumen. Durch die Verbesserung der Oberflächentemperaturen fühlen sich Räume mit temperierten Oberflächen bei 18 °C genauso behaglich an wie Räume mit 20 °C Lufttemperatur bei herkömmlicher Heizung. Dies eröffnet die Möglichkeit, Einsparungen durch die Reduzierung der Raumtemperatur zu realisieren, was weiter untersucht werden könnte.

Im Vergleich zum Einbau normaler Flächenheizsysteme im Innenraum bietet das System der außenliegenden Temperierung einen entscheidenden Vorteil: Je besser das Verhältnis von Außenwandfläche zu Fußbodenfläche ist, desto günstiger ist die Installation dieses Systems im Vergleich zu konventionellen Flächenheizungen. Darüber hinaus entfallen Kosten, die durch Leerstand und Umzüge während der Bauphase entstehen würden, da die Sanierung von außen erfolgt und die Bewohner in ihren Wohnungen bleiben können.

Zusammengefasst zeigt der Vergleich, dass moderne Sanierungsmethoden mit außenliegender Fassadentemperierung nicht nur nachhaltiger und komfortabler sind, sondern auch langfristig wirtschaftliche Vorteile bieten. Dies macht sie zu einer attraktiven Option für die energetische Modernisierung von Bestandsgebäuden.

6.3 Langfristige wirtschaftliche Vorteile

Die langfristigen wirtschaftlichen Vorteile der Sanierungsmaßnahmen sind erheblich und vielfältig. Durch die signifikante Reduktion der Energiekosten und die Verbesserung der Energieeffizienz profitieren die Bewohner nicht nur von finanziellen Einsparungen, sondern auch von einer Wertsteigerung ihrer Immobilien. Darüber hinaus tragen die Maßnahmen zur Stabilisierung der Energiekosten bei und machen die Gebäude unabhängiger von den Schwankungen der Energiepreise, was eine nachhaltige und zukunftssichere Wohnsituation schafft.

Ein weiterer wesentlicher Aspekt ist die Reduktion der Investitionskosten durch den Einsatz von Simulationen. Traditionelle Planungsmethoden führen häufig zu einer systematischen Überdimensionierung der Anlagen, wie gängige Studien belegen. Diese Überbemessung kann den Faktor 2 bis 3 erreichen und somit erhebliche Mehrinvestitionskosten verursachen. Durch präzise Simulationen konnten die Sanierungsmaßnahmen jedoch optimal dimensioniert und die Investitionskosten erheblich gesenkt werden.

Neben den optimierten Investitionskosten spielen auch die extrem niedrigen Betriebskosten eine entscheidende Rolle. Diese tragen maßgeblich zur wirtschaftlichen Attraktivität des Systems bei. Transformationsprozesse in der Energieversorgung erfordern zwar anfängliche Investitionen, diese müssen sich jedoch innerhalb akzeptabler Zeiträume amortisieren und über die gesamte Betriebsdauer hinweg lukrative Mehrwerte schaffen.

Die Kombination aus reduzierten Investitionskosten und minimalen Betriebskosten stellt sicher, dass die Sanierungsmaßnahmen nicht nur ökologisch, sondern auch ökonomisch vorteilhaft sind. Dies macht das Konzept zu einem überzeugenden Modell für die energetische Modernisierung von Bestandsgebäuden und bietet eine Blaupause für ähnliche Projekte in anderen Quartieren und Städten.

7 Umwelt- und Klimaschutzaspekte

7.1 Reduktion von CO₂-Emissionen

Ein wesentlicher Umweltvorteil der Sanierungsmaßnahmen ist die signifikante Reduktion der CO₂-Emissionen. Durch den Einsatz erneuerbarer Energien und die Verbesserung der Energieeffizienz der Gebäude wird der CO₂-Ausstoß erheblich reduziert. Dies trägt zur Erreichung der nationalen und internationalen Klimaziele bei.

Lediglich die CO₂-Bilanzen der Baustoffe die für die Sanierung verwendet werden sowie die Strombezüge während der Wintermonate (Strommix aus dem Netz) sind klimakritische Aspekte des Quartiers. Im Vergleich zum Zustand vor der Sanierung, als die Energieversorgung noch auf fossilen Energieträgern basierte, wurde jedoch ein bedeutender Schritt in Richtung wirtschaftlich tragbarer Klimaneutralität gemacht.

7.2 Verbesserung der Energieeffizienz

Die Sanierungsmaßnahmen zielen darauf ab, die Energieeffizienz der Bestandsgebäude erheblich zu verbessern. Dies wird durch die Kombination moderner Dämmtechnologien, effizienter Heizsysteme und der Nutzung erneuerbarer Energien erreicht. Die verbesserten Energieeffizienzstandards führen zu einer nachhaltigen Reduktion des Energieverbrauchs und der Betriebskosten. Dadurch werden die Energiebedarfe gesenkt, die Energieversorgung erfolgt aus regenerativen Quellen und die Nutzer werden in ihrem Verbrauchsverhalten nicht eingeschränkt.

7.3 Beitrag zur nachhaltigen Stadtentwicklung

Durch die Sanierung und die Implementierung nachhaltiger Energiekonzepte leistet das Projekt einen wichtigen Beitrag zur nachhaltigen Stadtentwicklung. Es zeigt, wie bestehende Quartiere energetisch modernisiert und gleichzeitig die Lebensqualität der Bewohner verbessert werden können. Das Projekt dient als Modell für andere Städte und Quartiere, die ähnliche Ziele verfolgen.

8 Monitoring und Evaluierung

8.1 Methoden der Erfolgskontrolle

Die Erfolgskontrolle der Sanierungsmaßnahmen erfolgt durch ein umfassendes Monitoring. Dabei werden kontinuierlich Daten zu Energieverbrauch, CO₂-Emissionen und Raumklima gesammelt und analysiert. Diese Daten ermöglichen eine genaue Evaluierung der Wirksamkeit der Maßnahmen und dienen als Grundlage für eventuelle Anpassungen und Optimierungen. Essenziell ist es, sowohl die Gebäude als auch das Netz und die Energiequelle zu überwachen, um Abweichungen in den Messdaten zu evaluieren, Ursachenforschung zu betreiben und Optimierungen in der Steuerung und Regelung vorzunehmen. Dabei stehen insbesondere die Messung von Energieströmen und Temperaturen im Vordergrund, um detaillierte Einblicke in das Systemverhalten zu erhalten.

8.2 Optimierungspotenziale und Weiterentwicklung

Das Monitoring und die ersten Ergebnisse bieten wertvolle Erkenntnisse für die Optimierung und Weiterentwicklung der Sanierungsmaßnahmen. Identifizierte Optimierungspotenziale werden genutzt, um die Effizienz weiter zu steigern und die Kosten zu reduzieren. Im Verlauf des ersten Jahreszyklus können zudem weitere Anpassungen der Steuerung vorgenommen werden, um diese noch besser auf den Realbetrieb abzustimmen. Die gewonnenen Erkenntnisse fließen in zukünftige Projekte ein, um deren Erfolg zu maximieren und kontinuierlich zu verbessern.

Das kontinuierliche Monitoring und die iterative Optimierung sind entscheidend, um die langfristige Wirksamkeit und Effizienz der Sanierungsmaßnahmen sicherzustellen. Durch die regelmäßige Überprüfung und Anpassung der Systeme können nicht nur aktuelle Herausforderungen bewältigt, sondern auch zukünftige Projekte effizienter und effektiver gestaltet werden. Dies führt zu einer nachhaltigen Verbesserung der Energieeffizienz und trägt erheblich zur Erreichung der Klimaziele bei.

9 Zusammenfassung

Die Auswahl einer geeigneten Sanierungsstrategie und die Transformation hin zu einer regenerativen Energieversorgung erfordert eine dynamische Planung, die über die Standard-DIN-Norm hinausgeht. Die klassische Heizlastberechnung nach DIN 12831 bietet zwar die rechtliche Grundlage, doch erst eine dynamische Betrachtung von Energiebedarf und -angebot im Jahreszyklus ermöglicht eine realitätsnahe Planung. Diese umfassende Datengrundlage erlaubt es, verschiedene Strategien zu untersuchen und fundierte Planungsentscheidungen zu treffen.

Technologisch bietet das Außenwandtemperierungssystem zahlreiche Vorteile. Es wurde in diesem Projekt mehrfach erwähnt: von der Spitzenlastkappung (Peak Shaving) und Lastverschiebung (Load Shifting) über die Nutzung der Speichermasse, bis hin zur Verbesserung der Behaglichkeit und der Möglichkeit, Sanierungen durchzuführen, ohne dass die Bewohner ausziehen müssen. Die Vorteile sind vielfältig und umfassen auch die Reduktion von CO₂-Emissionen und die Verbesserung der Energieeffizienz.

Besonders geeignet ist dieses System für Gebäude, die bisher komplett ungedämmt sind. Es kann jedoch auch angewendet werden, indem alte oder veraltete WDVS-Systeme entfernt und durch das neue System ersetzt werden. Letztlich hängt die Wahl der Methode von den spezifischen Eigenschaften der Immobilie und den jeweiligen Rahmenbedingungen ab. Während eine Außenwandtemperierung neben konventionellen Flächenheizungen und WDVS-Dämmungen eine attraktive Option darstellt, kann auch eine einfache Reduzierung der Vorlauftemperaturen bei Heizkörpern eine kurzfristige Verbesserung bringen. Langfristig gesehen, führt dies jedoch nicht zu einer klimaneutralen Energieversorgung, sondern stellt eher einen ersten Schritt dar.

Die Erkenntnisse aus diesem Projekt unterstützen nicht nur die neue Sanierungsmethode der Außenwandtemperierung, sondern betonen vor allem die Mehrwerte der Planung mithilfe von Simulationen und digitalen Werkzeugen. Die Verknüpfung der Systeme, die Kommunikation und die realitätsgetreue, passgenaue Auslegung durch die Technologie der digitalen Zwillinge tragen wesentlich zur wirtschaftlichen Umsetzung der Energiewende bei. Diese Technologie ist