

ActiveSkin - Thermisch aktivierte Fassadensysteme im Industriesektor

ActiveSkin - Thermally activated façade systems in the
industrial sector

vom Fachbereich 13 -
Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
der Technischen Universität Darmstadt

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

genehmigte Dissertation

von Master of Science
Carina da Silva

Erstgutachter: Prof. Dr.-Ing. Jens Schneider
Zweitgutachter: Prof. Dr.-Ing. Ulrich Knaack

Darmstadt 2023

da Silva, Carina: ActiveSkin - Thermisch aktivierte Fassadensysteme im Industriesektor
/ActiveSkin - Thermally activated façade systems in the industrial sector

Darmstadt, Technische Universität Darmstadt
Jahr der Veröffentlichung der Dissertation auf TUPrints: 2024
Tag der mündlichen Prüfung: 28.11.2023

URN: urn:nbn:de:tuda-tuprints-265792
URL: <https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/26579>

Veröffentlicht unter CC BY-SA 4.0 International
<https://creativecommons.org/licenses/>

Danksagung

Meine Dissertation ist das Ergebnis einer langen und intensiven Reise, die ohne die Unterstützung und Ermutigung zahlreicher Menschen nicht möglich gewesen wäre.

Mein aufrichtiger Dank gilt meinem Doktorvater, Prof. Dr.- Ing. Jens Schneider. Er hat mir die wertvolle Gelegenheit gegeben, am Institut ISM+D sowohl in der Forschung als auch in der Lehre Erfahrungen zu sammeln und meine Promotion angehen zu dürfen, die meine berufliche und persönliche Entwicklung maßgeblich geprägt haben.

Ein besonderer Dank gebührt auch Prof. Dr.- Ing. Ulrich Knaack, meinem Korreferenten, der mich während des gesamten Forschungsprozesses mit Inspiration und Motivation, fachlichem Rat und Geduld begleitet und unterstützt hat.

Ebenso möchte ich mich bei meinen ehemaligen Kollegen der „Energy Efficient Construction“-Gruppe, insbesondere David Bewersdorff, Xenia Kirschstein und Anja Schaffarczyk, bedanken. Ihre Anregungen und konstruktiven Diskussionen haben dazu beigetragen, meine Arbeit zu bereichern. Dank und Anerkennung gilt auch Silke Wallner im Sekretariat, nicht nur für ihre Hilfestellung in allen administrativen Angelegenheiten, sondern auch für ihre motivierende Unterstützung.

Von tiefsten Herzen danke ich meiner Familie und insbesondere meinem Partner, die mich während dieser intensiven Forschungszeit bedingungslos unterstützt und ermutigt haben, sei es durch aufmunternde Worte, Geduld oder schlichtweg das Verständnis für die vielen Stunden, die ich mit meiner Forschung verbracht habe.

Abschließend danke ich all jenen, die mir in vielfältiger Weise ihre Hilfe und Expertise zur Verfügung gestellt haben. Die Fertigstellung dieser Dissertation markiert einen bedeutenden Meilenstein in meinem akademischen Werdegang!

Kurzfassung

Der Schwerpunkt dieser Dissertation liegt primär auf dem Themenkomplex "Thermisch aktivierter Fassadensysteme" (kurz: TAF-Systeme), wobei die Fassade der ETA-Fabrik der TU Darmstadt als zentrales Forschungs- und Untersuchungsobjekt dient. Die ETA-Fassade zeichnet sich dadurch aus, dass sie sowohl auf der Rauminnenseite als auch auf der Außenseite mit wassergeführten Rohrsystemen, auch als Kapillarrohrmatten bezeichnet, thermisch aktiviert wird. Zusätzlich ist sie hydraulisch mit den gebäudetechnischen Anlagen sowie der Produktionskette der ETA-Fabrik verbunden, was eine effiziente Nutzung von Abwärme über diverse Schnittstellen hinweg ermöglicht.

Das Hauptziel bestand darin, eine solide Wissensgrundlage für die gezielte Anwendung der thermischen Aktivierung von Fassaden zu schaffen. Dies erstreckte sich von der Analyse des konstruktiven Aufbaus bis hin zur eingehenden Untersuchung der thermischen Bauphysik des TAF-Systems. Darüber hinaus wurden die Potenziale zur Anwendung solcher TAF-Systeme im Industriesektor durch eine statistische Auswertung von 1.346 Gebäuden der Kategorie „Produktions-, Werkstatt-, Lager- oder Betriebsgebäude“ identifiziert. Hierbei lag der Fokus auf den vorherrschenden Gebäudehüllprinzipien und Klimatisierungskonzepten.

Für das Referenzsystem, die ETA-Fassade, erfolgte eine Systemuntersuchung und -optimierung durch verschiedene Ansätze. Hierzu zählten die Auswertung von Messdaten, die während einer Produktionswoche im Jahre 2018 erfasst wurden, sowie die simulativen hygrothermischen Analysen und Parameterstudien. Diese haben Aufschluss über die Energieeffizienz und -flexibilität der ETA-Fassade gegeben und Möglichkeiten aufgezeigt, die eine Verbesserung der bereits guten Wärmeübertragungs- und Wärmespeichereigenschaften auf Baustoff- und Bauteilebene erzielten. Im Zuge dieser Untersuchungen konnten auch jene Konfigurationen herausgearbeitet werden, die eine deutliche Schwächung der energetischen Leistungsfähigkeit darstellen.

Des Weiteren wurden die ökologischen Merkmale der ETA-Fassade mithilfe einer digitalen Ökobilanzierung erfasst, die den Bedarf an weiterführender Forschung und Entwicklung in diesem Bereich verdeutlichte. Abschließend wurden anhand von Schlussrechnungen, die nach baulicher Fertigstellung der ETA-Fabrik von den ausführenden Firmen gestellt wurden, die Kosten für die ETA-Fassade ermittelt und den BKI-Kostenkennwerten gegenübergestellt. Angesichts der festgestellten erhöhten Kosten für die "ETA-Fassade" als Mockup bzw. Forschungsobjekt wurde die Notwendigkeit einer standardisierten Herstellung eines TAF-Moduls verdeutlicht. Erst wenn die energetischen, ökologischen und ökonomischen Eigenschaften in Einklang gebracht werden, kann eine erfolgreiche Markteinführung gewährleistet werden.

Abstract

The Dissertation's Focus is primarily on the issue of "thermally activated façade systems" (short "TAF-systems"), with the façade of the ETA-factory at the TU Darmstadt serving as the central research and study object. The ETA-façade is characterised by being thermally activated both on the inner space and on the outside with water-bearing pipe systems, also known as capillary tube mats. In addition, it is hydraulically connected to the technical building systems as well as the production chain of the ETA-factory, which enables efficient use of waste heat across various interfaces.

The main objective was to create a solid knowledge base for the targeted application of thermal activation of façades. This ranged from the analysis of the constructive design to the in-depth investigation of the thermal building physics of the TAF-system. In addition, the potentials in the industrial sector were identified through a statistical evaluation of 1.346 buildings in the category "production, workshop, warehouse or factory buildings". The focus here was on the prevailing building envelope principles and air conditioning concepts.

For the reference system, the ETA-façade, a system investigation and optimisation were carried out using various approaches. These included the evaluation of measurement data collected during a production week in 2018, as well as the simulative hygrothermal analyses and parameter studies. These provided information on the energy efficiency and flexibility of the ETA-façade and identified opportunities to improve the heat transfer and heat storage properties at the building material and structural component level. Throughout these investigations, it was also possible to identify those configurations that represent a significant decrease in energy performance.

Furthermore, the ecological characteristics of the ETA-façade were recorded with the help of a digital life cycle assessment, which highlighted the need for further research and development in this area. The costs for the ETA-façade were determined on the basis of final invoices submitted by the contractors after the construction of the ETA-factory was completed and compared with the BKI cost ratios. In view of the identified increased costs for the "ETA-façade" as a mock-up or research object, the necessity of a standardised production of a TAF-module was highlighted. A successful market launch can only be guaranteed if the energetic, ecological and economic properties are harmonised.

Résumé

Cette thèse se concentre en premier lieu sur le complexe thématique des "systèmes de façades activés thermiquement" (en abrégé : systèmes TAF), la façade de l'usine ETA de l'Université technique de Darmstadt servant d'objet central de recherche et d'étude. La façade ETA se caractérise par le fait qu'elle est activée thermiquement aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur de la pièce par des systèmes de tuyaux guidés par l'eau, également appelés nattes de tubes capillaires. De plus, elle est reliée hydrauliquement aux installations techniques du bâtiment ainsi qu'à la chaîne de production de l'usine ETA, ce qui permet une utilisation efficace de la chaleur perdue à travers diverses interfaces.

L'objectif principal était de créer une base de connaissances solide pour l'application ciblée de l'activation thermique des façades. Cela s'est étendu de l'analyse de la structure constructive à l'étude approfondie de la physique thermique du bâtiment du système TAF. En outre, les potentiels dans le secteur industriel ont été identifiés grâce à une analyse statistique de 1 346 bâtiments de la catégorie "bâtiments de production, d'atelier, de stockage ou d'exploitation". L'accent a été mis ici sur les principes d'enveloppe de bâtiment et les concepts de climatisation prédominants.

Le système de référence, la façade ETA, a fait l'objet d'une étude et d'une optimisation par différentes approches. Il s'agissait notamment de l'évaluation des données de mesure collectées pendant une semaine de production en 2018, ainsi que des analyses hygrothermiques simulées et des études paramétriques. Celles-ci ont permis d'obtenir des informations sur l'efficacité et la flexibilité énergétiques de la façade ETA et de mettre en évidence des possibilités d'amélioration des propriétés de transfert et de stockage de la chaleur, déjà bonnes, au niveau des matériaux et des éléments de construction. Ces études ont également permis de mettre en évidence les configurations qui affaiblissent considérablement les performances énergétiques.

En outre, les caractéristiques environnementales de la façade ETA ont été évaluées à l'aide d'une analyse numérique du cycle de vie, ce qui a mis en évidence la nécessité de poursuivre la recherche et le développement dans ce domaine. Enfin, les coûts de la façade ETA ont été calculés à l'aide des factures finales établies par les entreprises de construction après l'achèvement de la construction de l'usine ETA et comparés aux valeurs caractéristiques des coûts BKI. Au vu de l'augmentation des coûts constatée pour la "façade ETA" en tant que maquette ou objet de recherche, la nécessité d'une fabrication standardisée d'un module TAF a été mise en évidence. Ce n'est que lorsque les caractéristiques énergétiques, écologiques et économiques sont harmonisées qu'une introduction réussie sur le marché peut être garantie.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	5
Kurzfassung	6
Abstract	7
Résumé	8
Inhaltsverzeichnis	9
Abkürzungen und Formelzeichen	11
1 Einleitung	1
1.1 Hintergrund und Motivation	1
1.2 Ziel und Methodik der Arbeit	4
1.3 Aufbau der Arbeit	5
2 Energieeinsparung, Energieeffizienz und Energieflexibilität	9
2.1 Energieformen	9
2.2 Energieeinsparung vs. Energieeffizienz	11
2.3 Energieflexibilität	15
3 Konzeptionierung von thermisch aktivierten Fassadensystemen	19
3.1 Fassade - funktionale, klimaaktive und dynamische Schnittstelle	19
3.2 Merkmale thermisch aktivierter Fassaden (TAF)	39
4 Industriegebäude und ihre Merkmale	55
4.1 Hüllprinzipien und Typologien	55
4.2 Klimatische Anforderungen in Industriegebäuden	65
5 ETA-Fassade – Energetische Validierung	71
5.1 Beschreibung der ETA-Fassade	73
5.2 Messtechnische Untersuchungen – Produktionswoche 2018	82
5.3 Energetische Validierung der Messungen	89
6 ETA-Fassade 2.0 - Konzeption von energetisch optimierten Varianten	94
6.1 Zielgrößen der Fassadenkonzeptionierung	94

6.2	Baustoffebene	97
6.3	Bauteilebene	103
6.4	Gebäudeebene	108
7	Simulative Energieanalysen	110
7.1	Hygrothermische Bauteilbetrachtungen	111
7.2	Auswertung der simulativen Analyse	142
8	Ökologie und Ökonomie	195
8.1	Ökologische Bewertung	195
8.2	Ökonomische Bewertung	213
9	Fazit	221
9.1	Wesentliche Ergebnisse	221
9.2	Ausblick und weiterer Forschungsbedarf	230
10	Literatur	233
	Anlagen	249
A1.	Weitere statische Auswertungen - ENOB:dataNWG	249
A2.	Thermografiebilder – Messung am 21.03.18	261

Abkürzungen und Formelzeichen

Abkürzungen

ArbStättV	Arbeitsstättenverordnung
Äqv.	Äquivalent
AS	Aufbauschicht
ASR	Technische Regeln für Arbeitsstätten
Bbl.	Beiblatt
BDH	Bundesverband der Deutschen Heizungsindustrie
BEG	Bundesförderung für effiziente Gebäude
BHKW	Blockheizkraftwerk
BIM	Building Information Modelling
BKI	Baukosteninformationszentrum
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BNB	Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen
bspw.	beispielsweise
BVF	Bundesverband Flächenheizungen und Flächenkühlungen
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CSC	Concrete Sustainability Council
DAfStb	Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e.V.
d.h.	das heißt
DGNB	Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen
DGUV	Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung
DIN	Deutsches Institut für Normung
DSC	differential scanning calorimeter
e.V.	eingetragener Verein

EMT	Generalized Effective Medium Theory
EN	europäische Norm
EnEV	Energieeinsparverordnung
EPD	Environmental Product Declaration
etc.	et cetera
FVHF	Fachverband Baustoffe und Bauteile für vorgehängte hinterlüftete Fassaden e.V.
GEG	GebäudeEnergieGesetz
GP	Geometrische Parameter
GWP	Treibhauspotential (Global Warming Potential)
IÖR	Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung
ISM+D	Institut für Statik und Konstruktion
ISO	International Organization for Standardization
IWU	Institut Wohnen und Umwelt
KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau
KG	Kostengruppe
LCA	Ökobilanz (Life Cycle Assessment)
LCI	Life Cycle Inventory
LCIA	Life Cycle Impact Assessment
LIM	Lowest Isopleth for Mould
MBO	Musterbauordnung
MF	Mineralfaser
MP	Materialspezifische Parameter
mrUHPC	mikrobewehrter ultrahochfester Beton
NTC	negative temperature coefficient
NWG	Nichtwohngebäude
o.ä.	oder Ähnliche

PCM	Phase Change Material
PJ	Petajoule
PP	Physikalische Parameter
PV	Photovoltaik
QNG	Qualitätssiegel Nachhaltiges Gebäude
SK	statischer Kern
sog.	sogenannt
TAF	Thermisch aktivierte Fassaden
TGA	Technische Gebäudeausrüstung
TRY	Testreferenzjahr
u.a.	unter anderem
UNEP	United Nations Environment Programme
UV	ultraviolett
U-Wert	Wärmedurchgangskoeffizient
UWPk	Umweltwirkungspotenzial
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
WG	Wohngebäude
WLP	Wärmeleitprofil
WTA	Wissenschaftlich-Technischen Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V
WUFI	Wärme Und Feuchte Instationär

Wichtige Formelzeichen und Symbole

a	Temperaturleitzahl
b	Wärmeeindringkoeffizient
c	spezifische Wärmekapazität
$C_{\text{eff}}(\theta)$	effektive Wärmespeicherkapazität
C_{wirk}	wirksame Wärmespeicherfähigkeit

EER	Energy Efficiency Ratio
g_{atm}	atmosphärischer Gesichtsfeldfaktor
g_{terr}	terrestrischer Gesichtsfeldfaktor
Horizontal I_{IR}	horizontale Infrarotstrahlungsintensität
h_{r}	Wärmeübergangskoeffizient aus langwelliger Strahlung
I	Strahlung an der Bauteiloberfläche
$I_{\text{,refl}}$	vom Erdboden reflektierte atmosphärische Gegenstrahlung
I_{e}	langwellige Emissionsstrahlung der Bauteiloberfläche
I_{l}	langwellige Gegenstrahlung
$I_{\text{l,atm}}$	atmosphärische Gegenstrahlung
$I_{\text{l,terr}}$	terrestrische Gegenstrahlung
m	Masse
N	Bedeckungsgrad des Himmels
Nu	Nußelt-Zahl
Pr	Prandtl-Zahl
P_{therm}	Thermische Leistung
\dot{Q}	Wärmestrom zwischen Fluid und Rohr
\dot{q}	Wärmestromdichte
\dot{Q}_{e}	Äußerer Wärmestromanteil der thermischen Aktivierung
\dot{Q}_{i}	Innerer Wärmestromanteil der thermischen Aktivierung
$\dot{q}_{\text{l,r}}$	radiative Wärmestromdichte
$Q_{\text{T,e}}$	Monatlicher Transmissionswärmeverlust nach außen
Re	Reynoldszahl
s_{d}	wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke
β_{p}	Wasserdampfübergangskoeffizient
T_{A}	Oberflächentemperatur
T_{L}	Lufttemperatur

T_{sky}	Himmelstemperatur bzw. Temperatur der Atmosphäre
T_{tau}	Taupunkttemperatur
UWP_k	Umweltwirkungspotenzial Konstruktion
α_c	konvektiver Wärmeübergangskoeffizient
ΔE_{Flex}	Energieflexibilität
ΔQ	Differenz der gespeicherten Energie
ΔQ_{flex}	Flexibilisierbarer Energieinhalt pro m Fassade
$\Delta \bar{\theta}$	Differenz der mittleren Bauschichttemperatur
ε	langwelliger Emissionsgrad der Bauteiloberfläche
ε_{sky}	Emissionsgrad des Himmels
σ	Stefan-Boltzmann Konstante
ω_{Fluid}	Fluidgeschwindigkeit

1 Einleitung

1.1 Hintergrund und Motivation

Der Klimawandel ist zweifellos eine der größten Herausforderungen unserer Zeit. Angesichts des Anstiegs der globalen Durchschnittstemperatur besteht die dringende Notwendigkeit, diesen auf maximal 1,5 °C gegenüber dem vorindustriellen Niveau (Bezugszeitraum: 1850 bis 1900) zu begrenzen. (Umweltbundesamt, 2023b)

In diesem Zusammenhang hat die Bundesregierung Deutschland mit der Überarbeitung des Klimaschutzgesetzes, das Ziel der Erfüllung der Treibhausgasneutralität auf das Jahr 2045 vorgezogen. Diese Gesetzesnovelle trat am 31. August 2021 in Kraft und legt den Grundstein für eine umfassende Umgestaltung, die zu einem klimaneutralen Deutschland führen soll. Im Rahmen dieses Ziels strebt die Bundesregierung sogar negative Emissionen an, um nach 2050 einen Netto-Null-Ausstoß von Treibhausgasen zu erreichen. Bereits bis 2030 sollen die Emissionen um 65 % im Vergleich zum Basisjahr 1990 gesenkt werden. (Bundesregierung, 2022)

Angesichts dieses ambitionierten Zeitrahmens bleiben somit nur noch wenige Jahre, um das bundesweite Ziel der Klimaneutralität zu erreichen. Die bevorstehende Aufgabe erfordert eine schnelle und grundlegende Veränderung, sowohl der Energieversorgung als auch der energieverbrauchenden Sektoren. Besonders die ressourcenintensiven Sektoren, wie der Gebäude- und der Industriesektor, stehen vor enormen Herausforderungen in diesem Prozess.

Der gebäuderelevante Endenergiebedarf hat in Deutschland zwischen 2008 und 2021 bereits einen positiven Trend gezeigt und sank um 9,7 % auf 3.119 Petajoule (PJ). Dies entspricht jedoch noch 31,8 % des gesamten Endenergiebedarfs in Deutschland. (Umweltbundesamt, 2023a)

Gleichzeitig verursacht der Industriesektor mit jährlich 2.365 PJ rund 24 % des deutschen Endenergiebedarfs. Davon entfallen wiederum 67 % auf industrielle Prozesswärme, von der ein wesentlicher Teil ungenutzt in Form von Abwärme verloren geht und ggf. weiteren Kühlaufwand erfordert. (IN4climate.NRW, 2022)

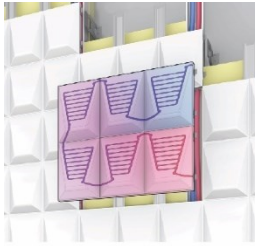
Die Nutzung industrieller Abwärmeströme bietet ein vielversprechendes Potenzial zur Einsparung von Primärenergieträgern und zur Reduktion von CO₂-Emissionen. Aus technisch-wirtschaftlicher Sicht liegt das Abwärmennutzungspotenzial bei etwa 18 %. Ein Teil der Abwärme wird bereits in den Anlagen selbst durch Wärmerückgewinnung

wiederverwendet, doch der verbleibende Teil wird bisher als diffuse Abwärme ungenutzt freigesetzt. Die effiziente Nutzung der industriellen Abwärme erfordert die Verknüpfung von Abwärmequellen mit geeigneten Abwärmesenken durch den Einsatz von Wärmetauschern, Wärmespeichern und Wärmepumpen. (Fraunhofer ISI, 2013)

Eine solche Abwärmenutzung kann auf einzelner Anlagenebene erfolgen, aber auch auf einer größeren Dimension. Ein gelungenes Beispiel hierfür stellt die bauliche Umsetzung der ETA-Fabrik (ETA: Energieeffizienz, Technologie und Anwendungszentrum) dar, die 2016 auf dem Campus der TU Darmstadt errichtet wurde. Die Abwärmenutzung erfolgt über die Vernetzung der Gebäudehülle mit der Prozesskette über ein thermo-hydraulisches Netz. Dadurch werden Synergien durch die Steuerung der Energieströme und die Rückgewinnung von Energie ermöglicht. Die Gebäudehülle bzw. die opaken Fassaden- und Dachmodule dienen hierbei als großflächige Wärmetauscher. Abhängig von den jeweiligen Anforderungen tragen sie zur Kühlung oder Beheizung des gesamten Gebäudes oder einzelner Komponenten der Prozesskette bei. Zur Sicherstellung der thermo-hydraulischen Vernetzung ist die Gebäudehülle sowohl raumseitig als auch außenseitig thermisch aktiviert. Diese thermische Aktivierung wird durch den Einsatz von wasserdurchströmten Kapillarohrmatten ermöglicht. Diese können bspw. auf der Raumseite Wärme (bzw. Abwärme) aufnehmen und sie über die Vernetzung an die Gebäudeaußenseite leiten. Dort findet ein Wärmeaustausch statt, indem während der Nachtstunden Wärme an die kalte Außenumgebung abgegeben wird. (Abele et al., 2019)

Die Fassade spielt als integraler Bestandteil des Energiekreislaufs der ETA-Fabrik eine entscheidende Rolle bei der Umsetzung einer bivalenten oder, je nach Kühlbedarf und vorhandener Fassadenfläche, gar einer monovalenten Kühlung. Dies ermöglicht eine deutliche Reduzierung des Energiebedarfs im Vergleich zu einer ausschließlichen Kühlung über herkömmlichen Kältemaschinen. Gleichzeitig kann die Fassade Kälte aus erneuerbaren Energien beziehen, was im Einklang mit den Zielen des Klimaschutzgesetzes steht und eine Erhöhung des Anteils an erneuerbaren Energien ermöglicht. Die Fassade übernimmt in diesem Kontext eine zentrale Rolle als Wärmetauscher und Schlüsselement der thermo-hydraulischen Vernetzung. Obwohl die ETA-Fabrik bereits baulich umgesetzt wurde, wurden bisher keine ausgeprägten Untersuchungen zur energetischen Performance der Fassade durchgeführt. Daher bildet die energetische Bewertung der Fassade den Fokus dieser Dissertation. Durch eine detaillierte Analyse sollen Erkenntnisse gewonnen werden, die zur Optimierung der Wärmeübertragung und somit zu einer weiteren Verbesserung der Gesamtenergieeffizienz der ETA-Fabrik beitragen können.

Die bisherige Forschung im Bereich multifunktionaler oder thermisch aktivierter Fassaden hat einige interessante Ansätze hervorgebracht, die jedoch überwiegend einseitig thermisch aktivierte Fassadensysteme demonstrieren oder auf solarthermische Fassadenkonzeptionierungen abzielen, die größtenteils darauf ausgerichtet sind, Solarenergie aufzunehmen:



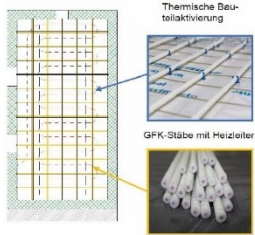
FORSCHUNGSPROJEKT „FUTURE FAÇADE“

- › **Fassadensystem** Solarthermisch aktivierte funktionsintegrierte Metallfassade (kassettenförmige Kollektorfassade) mit optimiertem Einstrahlwinkel
- › **Energie-/Wärmeträger** Fluid (Wasser)
- › **Zielfunktion** dezentrale Energiegewinnung zur Warmwasserbereitung, Heizunterstützung und Kühlung im Haushalt
- › **Projektförderung** AIF Projekt GmbH und CORNET (Collective Research NETworking)
- › **Projektpartner** HTWK Leipzig, Fraunhofer IWU, CRM Group und Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V.



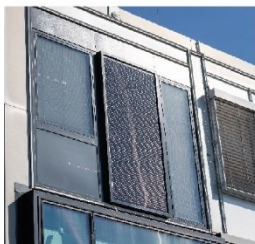
FORSCHUNGSPROJEKT „TABSOLAR III“

- › **Fassadensystem** Durch das sog. FracTherm-Verfahren werden filigrane Kanäle in Hochleistungsbeton (UHPC) integriert, um solarthermische Fassadenelemente mit einer bionisch inspirierten Kanalstruktur zu generieren. Über einen Wärmetauscher gelangt die aufgenommene Wärme in einen Wärmepumpen-Kreislauf.
- › **Energie-/Wärmeträger** Fluid (Wasser)
- › **Zielfunktion** Unterstützung der Wärmepumpe
- › **Forschungsinstitut** Fraunhofer ISE



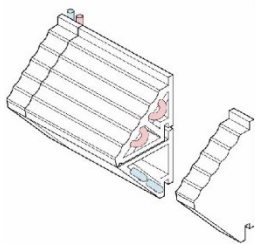
FORSCHUNGSPROJEKT „MUFUBISS“

- › **Fassadensystem** „Multifunktionale Bauelemente mit schaltbarer Wandisolation und Speicher“. Die Verbundelementfassade besteht aus regelbaren, vakuumisolierten Elementen mit einem Betonkern, in dem elektrisch aktivierbare Bewehrungsstäbe oder wasserdurchflossenen Rohrregister integriert sind.
- › **Energie-/Wärmeträger** Strom und Fluid (Wasser)
- › **Zielfunktion** Heizen und Kühlen, Wärmespeicherung und Wärmedämmung
- › **Projektförderung** Bundesministerium für Wirtschaft und Energie BMWi
- › **Projektpartner** CG TEC GmbH, CuroCon GmbH, Innogration GmbH, ZAF Bayern, TU Kaiserslautern



EE-MODULFASSADE

- › **Fassadensystem** Die PV-Modulfassade ist mit einer integrierten Kleinstwärmepumpe ausgestattet, ebenso wie einem dezentralen Lüftungsgerät mit Wärmerückgewinnung.
- › **Energie-/Wärmeträger** Strom
- › **Zielfunktion** Energieerzeugung, Heizen und Kühlen
- › **Forschungsinstitut** Fraunhofer IBP und Fraunhofer IEE



TACE-SYSTEM

- › **Fassadensystem** „Thermal Active Ceramic Envelope“. Das keramische Fassadenverkleidungsmodul absorbiert oder reflektiert Sonneneinstrahlung durch variable Oberflächenmorphologie, Farbe und Materialeigenschaften, während es die Energie durch Advektion weiterleitet.
- › **Zielfunktion** Heizen und Kühlen durch unterschiedliche Oberflächenorientierungen
- › **Entwickler** Jason Oliver Vollen (Dissertation)

Abbildung 1.1: Aktueller Forschungsstand nach (Schmidt, 2022), (Hermann et al., 2022), (Kipf et al., 2021), (Möhlmann, Fleck und Kregel, 2022), (Vollen, 2020)

Die in vorstehender Abbildung 1.1 beschriebenen Forschungsansätze und Fassadenentwicklungen repräsentieren einen Ausschnitt des aktuellen Forschungsstandes. Im Kapitel 3 dieser Dissertation werden im Abschnitt „Praxisbeispiele“ zwei realisierte Projekte vorgestellt. Dabei handelt es sich zum einen um eine thermisch aktive Stampflehmfassade und zum anderen um die erstmalige Einführung der aktiven Wärmedämmung.

1.2 Ziel und Methodik der Arbeit

Die Gebäudehülle eines Bauwerks stellt ein großes energetisches Gewinn- und Verlustpotenzial dar, da sie als Schnittstelle zwischen dem Innenraum und der Außenumgebung maßgeblich für den Wärme- und Energiehaushalt eines Gebäudes verantwortlich ist. Trotz dieser wesentlichen Funktion gibt es noch zu wenig fundierte wissenschaftliche Untersuchungen zu der energetischen Wirkungsweise einer beidseitig thermisch aktivierten Fassade. Um diese Forschungslücke zu schließen, widmet sich diese Dissertation dem Ziel, die bereits baulich umgesetzte ETA-Fassade als Untersuchungsobjekt heranzuziehen und insbesondere ihre Energieeffizienz und Energieflexibilität umfassender zu bewerten. Zusätzlich werden ökologische und ökonomische Bilanzierungen vorgenommen, um die Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit der untersuchten Fassade beurteilen zu können.

Zu Beginn wird hierfür ein grundlegendes Verständnis dafür geschaffen, was thermisch aktivierte Fassaden sind. Dabei wird auf Grundlagen zu fassadenbezogenen Themen wie Hygrothermik, Wärmetransportmechanismen, Ökologie und Ökonomie eingegangen. Auf dieser Basis erfolgt schrittweise die Quantifizierung der Energieströme in und um die thermisch aktivierte Fassade. Dabei werden bereits vorhandene Forschungsansätze berücksichtigt und weiterentwickelt. Besonders im Fokus steht eine detaillierte Wärmestromanalyse mittels 2D-Simulation, um die Kühlleistung während der Nachtauskühlung zu bewerten, sowie die Berechnung der Energieflexibilität durch die Ermittlung des Wärmespeichervermögens. Zur Validierung der hygrothermischen Simulationen werden die messtechnischen Untersuchungen an der ETA-Fassade der sog. Produktionswoche im März 2018 herangezogen. Dies ermöglicht einen praxisnahen Abgleich der simulierten Ergebnisse mit den tatsächlich gemessenen Daten, um die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Simulationen sicherzustellen.

Anschließend folgt eine Benchmarking-Analyse auf Grundlage einer Parameterstudie, bei der verschiedene Baustoff- und Bauteilkonfigurationen simulativ untersucht werden. Hierdurch können die wesentlichen energetischen Einflussfaktoren identifiziert und verifiziert werden, was es ermöglicht, gezielte Aussagen über Potenziale zur Steigerung der Energieeffizienz und Energieflexibilität zu treffen.

Im Zuge der vorstehend erläuterten Herangehensweise sollen die folgenden Forschungsfragen fundiert untersucht und beantwortet werden:

1. Wie lassen sich die übergeordneten Begriffe „Energieeffizienz“ und „Energieflexibilität“ auf die Fassadenebene abstrahieren und wie sehen die methodischen Festlegungen zur Quantifizierung dieser Zielgrößen aus?
2. Durch welche Merkmale zeichnet sich eine thermisch aktivierte Fassade (TAF-System) aus und welchen Nutzen bieten diese?
3. Liegen Potenziale auf Industriegebäude-Ebene in Verbindung mit der Fassade vor und wie sind diese definiert?
4. Welche charakteristischen Werte sind maßgebende Einflussgrößen für die energetische Optimierung der ETA-Fassade? Welcher Parameter übt den stärksten/schwächsten Einfluss aus?
5. Wie hoch ist der Nachhaltigkeitsgrad der ETA-Fassade in Bezug auf Ökologie und Ökonomie?

1.3 Aufbau der Arbeit

Zu Beginn dieser Dissertation wird eine fundierte Basis an Grundlagen und Informationen zu thermisch aktivierten Fassaden und den bauphysikalischen Schnittmengen geschaffen, um ein umfassendes Verständnis für diese spezifische Fassadenart zu entwickeln. Dies wird durch die Inhalte der Kapitel 2 und 3 erfüllt. Ab Kapitel 4 werden zusätzliche klimatische Zusammenhänge sowie verschiedene Typologien und Hüllprinzipien im Industriesektor beleuchtet. Mit dem Übergang zu Kapitel 5 liegt der Fokus dann auf einer eingehenden Untersuchung der ETA-Fassade auf energetischer, ökologischer und wirtschaftlicher Ebene. Im Folgenden werden die Inhalte der einzelnen Kapitel kurz beschrieben und in Abbildung 1.2 die Kapitelstruktur veranschaulicht:

Kapitel 2: Kapitel 2 widmet sich der Definition und Differenzierung grundlegender Energiebegriffe sowie einer eingehenden Erläuterung der energetischen Zielgrößen, Energieeffizienz und Energieflexibilität.

Kapitel 3: In Kapitel 3 werden die energetischen und ökologischen Anforderungen an Fassaden umfassend behandelt. Insbesondere wird ein Schwerpunkt auf die Technologie

und die Merkmale des TAF-Systems gelegt. Hier werden die einzelnen Komponentenebenen, "Rohrsystem", "Trägermaterial" und "Hinterlüftung", speziell für die ETA-Fassade betrachtet.

Kapitel 4: In diesem Kapitel werden typische Abwärmelasten in Abhängigkeit von der Industriebranche aufgezeigt und klimatische Anforderungen, insbesondere die maximal zulässige Raumlufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit, berücksichtigt. Weiterhin werden die in Deutschland verbreiteten Hüllprinzipien und Typologien von Industriegebäuden vorgestellt. Als Datenquelle wurde u.a. die Forschungsdatenbank für Nichtwohngebäude „ENOB:dataNWG“ genutzt. Da ein direkter Zugriff auf die Datenbank oder Einsicht der dort vorliegenden Informationen nicht zulässig ist, wird in diesem Zusammenhang ein R-Skript verfasst, das es ermöglicht gezielte Abfragen durchzuführen und Informationen aus der genannten Forschungsdatenbank statistisch zu analysieren und auszuwerten.

Kapitel 5: In Kapitel 5 liegt der Fokus auf der ausführlichen Beschreibung der ETA-Fassade. Dabei wird insbesondere auf den konstruktiven Aufbau eingegangen, um die Besonderheiten dieses TAF-Systems hervorzuheben. Zudem wird die thermohydraulische Vernetzung der Fassade mit der Prozesskette auf Gebäudeebene detailliert erläutert, um das Verständnis für die thermische Interaktion dieser Fassadenlösung mit dem Gesamtenergiesystem zu vertiefen. In diesem Kontext werden auch die messtechnischen Untersuchungen und die Herangehensweise während der Produktionswoche im Jahre 2018 im Einzelnen erläutert. Die daraus gewonnenen Daten werden einer energetischen Validierung unterzogen mit dem Ziel der Bewertung der Energieeffizienz der ETA-Fassade.

Kapitel 6: In Kapitel 6 werden mögliche energetische Variationen der ETA-Fassade auf Baustoff-, Bauteil- und Gebäudeebene aufgezeigt. Dabei werden geeignete Optimierungsansätze identifiziert, um die thermische Leistungsfähigkeit der ETA-Fassade zu erhöhen und ihre Eignung für verschiedene Anwendungsfälle zu erweitern.

Kapitel 7: Im Rahmen dieses Kapitels werden simulative Untersuchungen mit WUFI 2D durchgeführt, wobei zunächst die hygrothermische Analyse der ETA-Fassade in ihrem IST-Zustand im Vordergrund steht. Die daraus resultierenden Ergebnisse werden anschließend einer Validierung und Sensitivitätsanalyse unter Berücksichtigung der vorgestellten Messdaten aus Kapitel 5 unterzogen, um die Zuverlässigkeit der Simulationsmodelle sicherzustellen. Zudem wird eine Parameterstudie durchgeführt, bei der gezielt ausgewählte Variationen aus Kapitel 6 als Parameter herangezogen und untersucht werden.

Kapitel 8: Abschließend erfolgt eine ganzheitliche Bewertung der Nachhaltigkeit der ETA-Fassade, wobei sowohl ökologische als auch ökonomische Aspekte berücksichtigt werden. Für die ökologische Bewertung wird als Tool eine digitalen Ökobilanzierung mit One Click LCA eingesetzt, um die Umweltauswirkungen der Fassade zu analysieren. Gleichzeitig erfolgt eine ökonomische Bewertung durch die Kostenfeststellung anhand von Schlussrechnungen. Dabei wird die ETA-Fassade mit den BKI-Kostenkennwerten verglichen, um die Wirtschaftlichkeit der Technologie zu untersuchen.

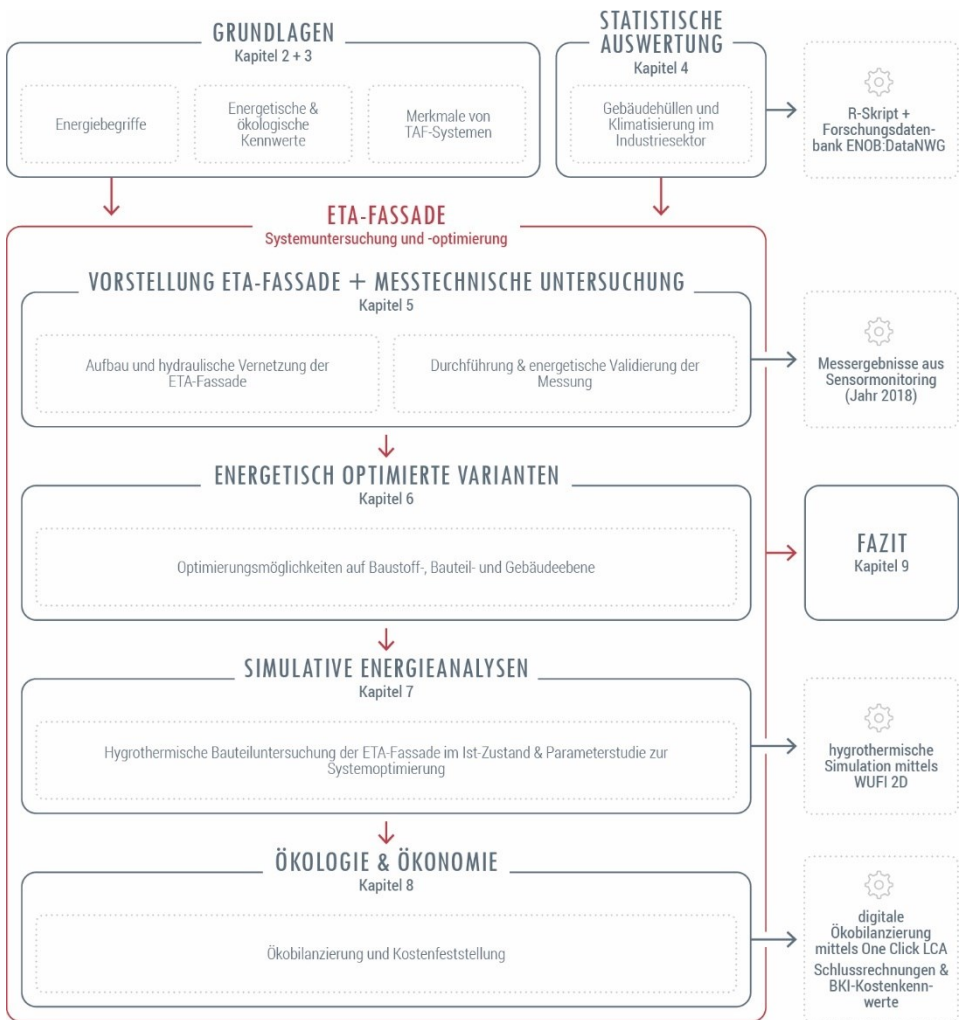


Abbildung 1.2: Aufbau der Arbeit

2 Energieeinsparung, Energieeffizienz und Energieflexibilität

Mit dem vorstehend beschriebenen Ziel der Bundesregierung, Deutschland im Rahmen der Energiewende 2050 den Weg zum klimaneutralen Gebäudebestand zu ebnen, sind vorerst einige Hürden zu nehmen. Insbesondere in Bezug auf die energetischen Bezeichnungen und deren Zusammenhänge liegt selbst in der heutigen Zeit, in der das Thema Energie täglich behandelt wird, weiterhin ein hoher Aufklärungsbedarf vor.

Zur energetischen Bewertung eines Gebäudes bzw. einer Gebäudekomponente ist es wichtig erst einmal den energetischen Ausgangszustand des Gebäudes zu identifizieren, energetische Zielgrößen festzulegen und schließlich den energetischen Endzustand zu erfassen und zu beurteilen. Hierfür spielen die Begriffe Energieeinsparung, Energieeffizienz und Energieflexibilität eine bedeutende Rolle. Diese Begriffe werden in vielen Hinsichten verwendet, oftmals ist sich der Nutzer jedoch nicht im Klaren was mit diesen Fachausdrücken tatsächlich beabsichtigt wird.

Die Energieeffizienz und Energieflexibilität sind zentrale Ergebnisgrößen dieser Dissertation, weshalb diese im Folgenden näher beschrieben werden.

2.1 Energieformen

Energie ist eine physikalische Größe, die aus dem griechischen en-ergon (= innere Arbeit) stammt (Blum, Rosenthal und Diekmann, 2020). Sie wird als Erhaltungsgröße bezeichnet, da es nicht möglich ist Energie zu erzeugen oder zu vernichten, d.h. die in ein System eingeführte Energie wird im gleichen Maße wieder aus dem System entnommen. Dies entspricht dem Prinzip der Energieerhaltung. (Günther, 2014)

Wie aus der Namensherkunft abzuleiten, lässt sich Energie in Arbeit bzw. in verschiedene Energiearten ineinander umwandeln. In Verbindung mit der Energieumwandlung wird meist von Energieverlusten gesprochen. Bei solchen Verlusten geht hingegen keine Energie verloren, vielmehr wird Energie in Form von Reibungs- oder Wärmeenergie (Abwärme) an die Umgebung abgegeben (siehe Abbildung 2.1). Folgende Energieerscheinungsarten können aus einer Energieumwandlung hervorgerufen werden:

- Thermische Energie (Wärme bzw. Kälte)
- Kinetische Energie

- Potenzielle Energie
- Elektromagnetische Energie
- Chemische Energie
- Nuklearenergie

(Blum, Rosenthal und Diekmann, 2020)

Die quantitative Bemessung der Energie erfolgt über die internationale Einheit Joule ($1 \text{ J} = 1 \text{ Ws} = 1 \text{ Nm} = 1 \text{ kgm}^2/\text{s}^2$). In Deutschland wird hingegen meist mit kWh gerechnet. Ein kJ entspricht dabei 3600 kWh.

Im Zuge der Energiewende spielt die Energiequelle, aus der Energie bezogen wird, eine zentrale Rolle. Insbesondere die Primärenergie liegt im Fokus des Energiekonzepts 2050, denn künftig soll der bundesweite Primärenergiebedarf um 50 % gegenüber 2008 reduziert werden (BMUB, 2016). Ziel ist hierbei den künftigen Primärenergiebedarf hauptsächlich aus regenerativen Energiequellen zu beziehen.

Die Primärenergie beschreibt die Energie, die aus einer natürlichen Quelle gewonnen und noch nicht aufbereitet bzw. umgewandelt wurde. Dabei lässt sich zwischen fossilen Energiequellen wie Erdöl oder Erdgas und erneuerbaren Energiequellen wie Wind- oder Sonnenenergie unterscheiden. Häufig ist die aus der Energiequelle generierte Energie nicht direkt nutzbar und erfordert eine weitere Umwandlung. Diese umgewandelte Energie wird als Sekundärenergie (z.B. Strom, Heizöl oder Fernwärme) bezeichnet. Die in einem Gebäude zugeführte Energie wird durch die Endenergie repräsentiert. Diese ist die vom Verbraucher bezogene Energie, wie beispielsweise Strom aus der Steckdose. Die Nutzenergie steht schließlich dem Verbraucher in Form von Wärme, Kraft, Licht etc. zur Verfügung. (Blesl und Kessler, 2013)

Abbildung 2.1 beschreibt die vorstehend beschriebenen Energieformen anhand eines Energieflussdiagramms auf Gebäudeebene.

Im Rahmen einer ökologischen Betrachtung eines Produktes oder einer Dienstleistung werden oftmals die Energieformen "Primärenergie" und "Graue Energie" verwechselt. Die Graue Energie bezieht sich im Gegensatz zur Primärenergie nicht nur auf die Energiegewinnung, sondern auf die Energiemenge, die für Herstellung, Transport, Lagerung und Entsorgung eines Produktes, benötigt wird. Sie wird als Summe der Primärenergien aus den zuvor genannten Prozessen betrachtet. Dabei kann die Ermittlung der grauen Energie auf unterschiedlichen Analyseebenen erfolgen. Im Bauwesen beispielsweise auf Baustoff-, Bauteil-, Gebäude- oder Quartiersebene.

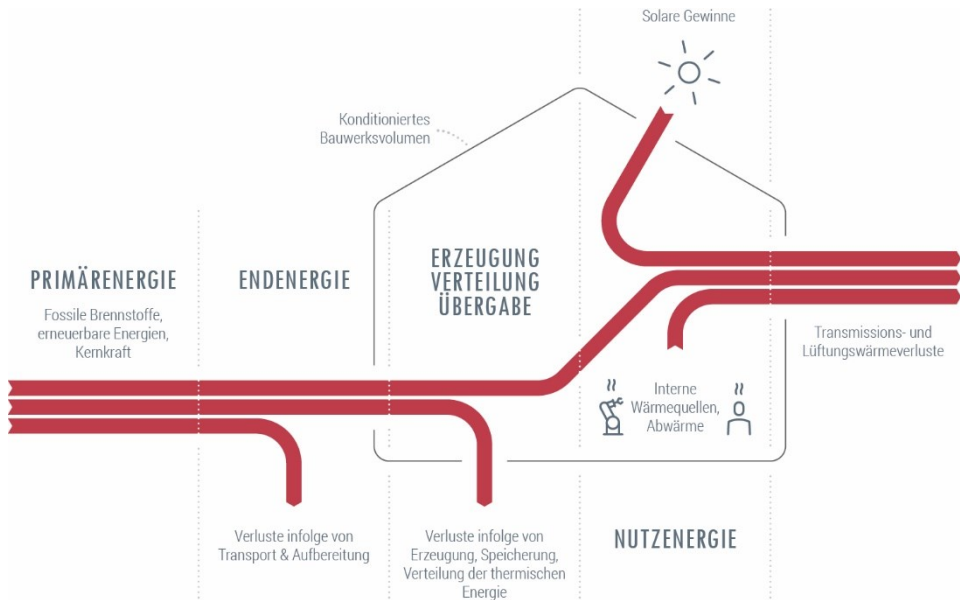


Abbildung 2.1: Relevante Energieformen im Gebäudesektor

2.2 Energieeinsparung vs. Energieeffizienz

Die Begriffe Energieeffizienz und Energieeinsparung werden fälschlicherweise oft als Synonyme verwendet, wobei sie nicht dasselbe darstellen.

Energieeinsparung

Ziel der Energieeinsparung ist die Reduktion des Energiebedarfs eines Systems mit Hilfe bestimmter Energieeinsparmaßnahmen. Die Größe des dabei erzielbaren Nutzens bleibt unberücksichtigt. Somit zählen unter den Energieeinsparmaßnahmen Methoden zur Erhöhung der Energieeffizienz eines Gebäudes und dessen technischer Gebäudeausrüstung sowie ein teilweiser oder vollständiger Verzicht auf Energie z.B. durch Beschränkung des Nutzens oder durch Ersatz der zuvor vorgesehenen energierelevanten Zielgrößen durch weniger energieintensive Bedürfnisse. (Thomas und Irrek, 2007)

Ein Beispielfall hierfür wäre die Erzeugung eines behaglichen Innenraumklimas in einem Wohnraum. Zur Einsparung der Energie wird die Innentemperatur unter den gewünschten Wert reduziert. Durch den Verzicht einer als angenehm empfundenen Innenraumtemperatur wird weniger Energie als vorgesehen eingesetzt, womit zugleich eine Energieeinsparung erzielt wird. Grundsätzlich bedeutet das, dass bei der Einsparung

von Energie lediglich die aufgewendete Energie als Steuerungsgröße eine Rolle spielt (Pehnt, 2010).

Zur Ermittlung der Energieeinsparung gibt es zwei prinzipielle Methoden, die in der ISO 50047 "Bestimmung von Energieeinsparungen in Organisationen" beschrieben werden: Top-Down und Bottom-Up (ISO 50047:2016).

Die Top-Down-Methode bezeichnet die Analyse von Systemen, bei der übergeordnete Energiekennzahlen (z.B. Energieeinsatz pro Produktionsmenge) bestimmt werden. Dabei werden die Kenngrößen für den Energieverbrauch über einen bestimmten Zeitraum auf einer sektoralen Ebene (Systemebene) ermittelt, wodurch die Energieeffizienz eines ganzen Gebäudes festgestellt werden kann. Die Bottom-Up-Methode umfasst dagegen die Untersuchung von Systemen mit erhöhter Detailgenauigkeit, um präzise Informationen über die Auswirkungen einzelner Maßnahmenpakete auf ihre Steigerung der Energieeffizienz liefern zu können. Sie eignet sich insbesondere für das Monitoring und die Bewertung von Maßnahmen bei denen die Veränderungen der Endverbräuche nicht durch Top-Down Indikatoren erfasst werden können. (Pehnt, 2010) (Soultana, 2014)

Die beiden Methoden werden durch vier Merkmale charakterisiert:

- Art der Maßnahme und ggf. beeinflussende Faktoren
 - Art der ermittelten Einsparungen
 - Art der verwendeten Eingangsgrößen
 - Systemgrenzunterschiede (z.B. ganzer Sektor, eine Anlage oder einzelne Komponenten)
- (Pehnt, 2010)

Die Bottom-Up-Methode wird im Kapitel 7 aufgegriffen, um die erzielbare Energieeffizienzsteigerung und die dafür erforderlichen Maßnahmen (Parametervariationen) aufzeigen zu können.

Häufig wird bei der Ermittlung des Energieeinsparpotenzials der Einfluss des sogenannten „Rebound-Effektes“ vernachlässigt. Dieser hat eine reduzierende Wirkung auf die gewünschte Energieersparnis. Sollte beispielsweise eine Effizienzmaßnahme eine Reduzierung der Energiekosten herbeigeführt haben, so könnte dies eine Erhöhung der Nachfrage in einem anderen Energiesektor bewirken, da schließlich mehr finanzielle Mittel zur Verfügung stehen. Es ist nur sehr eingeschränkt möglich den Einfluss des Rebound-Effektes zu quantifizieren. Etwa 10 % bis 30 % der durch Effizienzmaßnahmen erzielten Energieeinsparungen können durch diesen Effekt reduziert werden (Madlener und Alcott, 2007). Im Jahre 1865 definiert William Stanley Jevons das Phänomen des Rebound-Effektes. Zu dieser Zeit wurde die Wattsche Dampfmaschine eingeführt, die wesentlich effizienter war als die Vorgängermaschine. Schnell stieg der Kohlebedarf in Großbritannien, da deutlich mehr Dampfmaschinen betrieben wurden (Jevons, 1866). Der

Umfang des Rebound-Effektes lässt sich durch Messungen oder Simulationen nicht ermitteln. Im Zuge dieser Dissertation wird deshalb auf eine solche Quantifizierung verzichtet.

Energieeffizienz

Die Methoden zur Steigerung der Energieeffizienz fallen unter die Maßnahmen zur Energieeinsparung. Sie entsprechen im Grunde genommen einer Teilmenge des Energieeinsparens. Gemäß der europäischen Energiedienstleistungsrichtlinie wird die Energieeffizienz als „Verhältnis von Ertrag an Leistung, Dienstleistungen, Waren oder Energie zu Energieeinsatz“ definiert (Bundesministerium der Justiz, 2010). Demzufolge ist die Energieeffizienz als Quotient aus Nutzen und Aufwand zu betrachten. Zieht man hierbei das zuvor beschriebene Beispiel heran, so wird die Innentemperatur im Falle der Energieeffizienz nicht reduziert. Ziel ist es die Behaglichkeit zu wahren und trotzdem Energie zu sparen bzw. den Energieaufwand zu minimieren (siehe hierzu Abbildung 2.2).

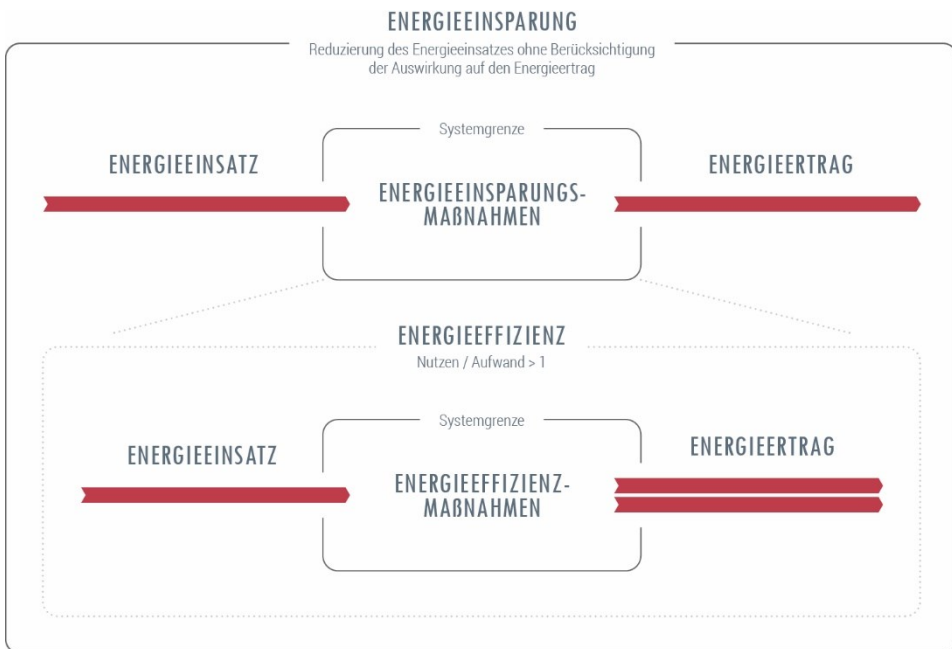


Abbildung 2.2: Zusammenhang zwischen Energieeinsparung und Energieeffizienz

Ein Indikator zur Bestimmung der Energieeffizienz ist die Relationsgröße zwischen dem Zustand mit und ohne Effizienzmaßnahme, d.h. es muss ein Vergleich zwischen dem Vor- und Nachher-Zustand gemacht werden. Dieser Vergleich kann dabei auf zwei

Ebenen vollzogen werden. Auf der Ebene der Energieumwandlung oder auf der Energienachfrageseite. Bei der Betrachtung der Energieumwandlungsebene dient der Nutzungs- bzw. Wirkungsgrad der Energieumwandlung als Indikator zur Bestimmung der Energieeffizienz. In diesem Zusammenhang wird das Verhältnis zwischen erzeugter Endenergie oder Nutzenergie und der verwendeten Primärenergie oder Sekundärenergie betrachtet. Erfolgt die Bestimmung der Endenergieeffizienz auf der Energienachfrageseite, so wird die notwendige Energie zur Erfüllung eines bestimmten Bedürfnisses bzw. Komforts (z.B. zur Erfüllung von bestimmten Behaglichkeitsanforderungen wie die Wärme in einem Raum) bewertet. Eine Steigerung der Endenergieeffizienz resultiert aus der eingesparten Energiemenge bei gleichem Energienutzen. (Irrek und Thomas, 2008)

Nun ist im Rahmen dieser Dissertation die Energieeffizienz eines thermisch aktivierten Fassadenbauteils zu bestimmen. Dabei gibt es bisher noch keine normative Festlegung zur Ermittlung der Energieeffizienz solcher Fassadenbauteile. Hierzu können jedoch gängige Methoden aus verwandten Bereichen herangezogen werden.

Die Energieeffizienz eines Gebäudes wird im Rahmen der Energiebilanzierung erhoben. Dabei wird das Gebäude in Abhängigkeit des erforderlichen Primärenergiebedarfs (Q_P) [$\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$] in Energieeffizienzklassen eingeteilt (siehe Abschnitt 2.1). Diese Herangehensweise ist jedoch nur auf Gebäudeebene unter Berücksichtigung der geometrischen Einflussparameter möglich. Im Zuge des Berechnungsverfahrens des Primärenergiebedarfs nimmt die thermische Gebäudehülle und die damit einhergehenden Transmissionswärmeverluste jedoch einen hohen Stellenwert ein. Die Transmission wird dabei über den Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) beschrieben. Je kleiner der U-Wert, desto besser fällt die Energiebilanzierung und somit die Energieeffizienz des Gebäudes aus. Die jährlichen Transmissionswärmeverluste lassen sich dabei durch das Aufsummieren der gemäß (DIN V 18599-2, 2018) ermittelten monatlichen Transmissionswärmeverluste bestimmen.

Monatlicher Transmissionswärmeverlust nach außen:

$$Q_{T,e} = U_{\text{Bauteil}} \cdot A_{\text{Bauteil}} \cdot (\theta_i - \theta_{e,\text{Monat}}) \cdot t \quad (2.1)$$

mit

$Q_{T,e}$:	Monatlicher Transmissionswärmeverlust nach außen [kWh/Monat]
U_{Bauteil} :	Wärmedurchgangskoeffizient des Bauteils [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]
A_{Bauteil} :	Fläche des Bauteils [m^2]
θ_i :	Innentemperatur [$^{\circ}\text{C}$]
$\theta_{e,\text{Monat}}$:	mittlere Monatsaußentemperatur [$^{\circ}\text{C}$]
t:	Dauer des Berechnungsschritts [h]

Daraus leitet sich ab, dass sich über den U-Wert der Gebäudehülle die Energieeffizienz auf Bauteilebene bewerten lässt. Besteht die Fassade nun ggf. aus diversen Bauteilen, wie es bei thermisch aktivierten Fassaden der Fall sein kann, so wäre der flächengewichtete mittlere U-Wert im Zuge der zuvor beschriebenen Berechnung anzuwenden.

Thermisch aktivierte Bauteile bzw. Fassaden agieren in ihrer Funktion nicht nur als thermische Gebäudehülle, sondern auch als Übertragungsfläche für thermische Energie mit dem Ziel das entsprechende Gebäude zu beheizen oder zu kühlen. Somit ist es sinnvoll die Energieeffizienz auch im Bereich der Klimatechnik zu betrachten. Die in Gleichung (2.1) verwendete durchschnittliche Monatsaußentemperatur berücksichtigt sowohl den Tages- als auch den Nachtverlauf. Bei der Berechnung der Energieeffizienz des thermisch aktivierten Fassadenbauteils, das hauptsächlich zur nächtlichen Auskühlung verwendet wird, sind die mittleren Monatsaußentemperaturen speziell für die Nachtzeiträume heranzuziehen (vgl. Kapitel 7.2.1.2).

Für thermisch aktivierte Fassadensysteme wird die Energieeffizienz mit Hilfe der Kennzahl "EER" (Energy Efficiency Ratio) beschrieben und quantifiziert. Sie stellt die erbrachte thermische Leistung zur eingesetzten elektrischen Leistung im Verhältnis. Dabei entspricht eine hohe EER-Kennzahl einer hohen Energieeffizienz.

$$EER = \frac{|\text{wertschöpfende Energie}|}{|\text{aufgenommene Energie}|} \quad (2.2)$$

mit

EER: Energy Efficiency Ratio [-]

Die EER-Kennzahl wird maßgeblich von der Leistungsfähigkeit der in der Fassade integrierten Klimatechnik bestimmt, insbesondere von ihrer thermischen Leistungsfähigkeit.

2.3 Energieflexibilität

Die Energieflexibilität beschreibt die Fähigkeit eines Systems flexibel auf die Schwankungen des Energieangebots zu reagieren. Insbesondere unter Berücksichtigung des fluktuierenden Angebots an regenerativen Energien und der einhergehenden Energiewende ist die Energieflexibilität eine relevante Energiegröße. Im Gebäudesektor wird dies durch die gezielte Steuerung des Energieverbrauchs, durch die Anwendung von sog. Lastmanagement-Maßnahmen ("consumption on demand") erreicht (Industrie Wegweiser, 2019). Im Rahmen der Gebäudeklimatisierung kommen nachstehende Energieflexibilisierungsmaßnahmen in Frage:

- Zeitliche Verschiebung des Energieverbrauchs (Lastverschiebung)
- Hystereseaufweitung des Lastprofils bzw. des Anforderungsprofils
- Zeitliche Entkopplung der Energieaufnahme und -abgabe durch die Trägheit der Gebäudehüllelemente (Lastverzicht)
- Zwischenspeicherung von thermischer Energie (funktionale oder immanente Speicher)

Bei der Anwendung dieser Maßnahmen dürfen die klimatischen Anforderungen, abhängig von der Nutzung des jeweiligen Gebäudes/Raumes, nicht verletzt werden.

Grundsätzliches Ziel der Energieflexibilität ist zu Zeiten hohen Energieangebots aus erneuerbaren Energien, einen erhöhten Energieverbrauch zu generieren und den Energiebezug aus erneuerbaren Energien zu forcieren, um somit vor allen Dingen eine Reduzierung der CO₂-Emissionen zu erreichen. Dabei wird nicht unbedingt eine Energieeinsparung erzielt, denn oftmals bedeutet eine Abweichung vom thermischen Referenzlastprofil eine Erhöhung des Energiebezugs zu einer anderen Zeit. Dies ist ein wesentlicher Unterschied zur Energieeffizienz bzw. -einsparung, bei denen das Ziel ist Energie einzusparen. Das zu hebende Energieflexibilitätpotenzial ist von vielen Einflussfaktoren abhängig:

- Konstruktive und bauphysikalische Eigenschaften der Gebäudehülle
- Gebäudetechnik zur Klimatisierung
- Nutzung von funktionalen Speichertechnologien
- Integration von immanenten bzw. bauteilintegrierten Speichern
- Gebäudeautomation
- Klimarandbedingungen

Insofern lässt sich die Energieflexibilität nicht isoliert berechnen, sondern nur über eine gekoppelte Analyse der einzelnen zuvor genannten Faktoren.

Zur quantitativen Ermittlung der Energieflexibilität sind schließlich folgende charakteristische Größen wesentlich:

- Laständerung: Lasterhöhung/-reduktion ΔP_{flex}
- Dauer der Laständerung: Abrufdauer Δt_{Abruf}
- Häufigkeit der Laständerung: Abrufhäufigkeit pro Jahr N_{Abruf}

Letzteres ist im Zuge der Berechnung nicht zwingend erforderlich, doch unter Berücksichtigung der Abrufhäufigkeit pro Jahr lässt sich zusätzlich eine Aussage über die energetisch flexibilisierbare Jahresenergiemenge für jede Flexibilitätsmaßnahme treffen. (Sauer, Abele und Buhl, 2019)

$$\Delta E_{\text{flex}} = |\Delta P_{\text{flex}}| \cdot \frac{N_{\text{Abruf}}}{\text{Jahr}} \cdot \Delta t_{\text{Abruf}} \quad (2.3)$$

mit

ΔE_{flex} : Energieflexibilität [J]

ΔP_{flex} : Laständerung [W]

N_{Abruf} : Abrufhäufigkeit [-]

Δt_{Abruf} : Abrufdauer

Die Abrufdauer bezieht sich dabei auf den maximalen Zeitraum zwischen dem Einsetzen einer Laständerung und dem Beginn der Deaktivierung der Flexibilitätsmaßnahme. Die Laständerung infolge einer Flexibilitätsmaßnahme wird relativ zur Last im Referenzbetrieb angegeben. Das impliziert, dass die flexible Leistung $\Delta P_{\text{flex}}(t)$ nicht die absolute Leistung darstellt, sondern vielmehr die Abweichung vom etablierten normalen Betriebszustand. Im Kontext des energetischen Flexibilitätspotenzials stellt die thermisch aktivierte Fassade eine anlagenspezifische Möglichkeit zur Leistungsanpassung dar, die als technisches Potenzial bezeichnet wird. Das technische Potenzial umfasst die Option, den Leistungsbedarf innerhalb der gegebenen technologischen Rahmenbedingungen zu variieren. Es repräsentiert die Gesamtheit aller möglichen Maßnahmen zur energetischen Flexibilität. (Sauer, Abele und Buhl, 2019)

Die vorstehend beschriebenen Energiebegriffe werden in den nachfolgenden Kapiteln vielfach verwendet, insbesondere zur Bewertung der energetischen Optimierung der thermisch aktivierten Gebäudehülle der ETA-Fabrik.

3 Konzeptionierung von thermisch aktivierten Fassadensystemen

Als Beitrag zur Energiewende 2050 sind insbesondere die im Gebäudesektor vorhandenen Potenziale zur Erschließung erneuerbarer Energien zu berücksichtigen. Dabei können Gebäudehüllenelemente als aktive Energiesteuerungssysteme und Energielieferanten dienen. Durch fassadenintegrierte Energietechnologien kann dabei ein erheblicher Schritt in Richtung Energiewende gemacht werden. Zu den wesentlichen Parametern, die schließlich die Effizienz solcher energetisch aktiver Fassadensysteme im Rahmen der Energiebilanz aufzeigen, gehören der Energiebedarf und die Energiebereitstellung. Diese Bilanzgrößen lassen sich gezielt durch bestimmte Maßnahmen beeinflussen:

- Senkung der Energieverluste, insb. Transmissionswärmeverluste
- Minimierung der Energieverbräuche
- Erzeugung/Nutzung von Energie durch erneuerbare Energiequellen
- Speicherung von Energie durch fassadenintegrierte Lösungsansätze
- Reaktion auf unterschiedliche Klima- und Nutzungsrandbedingungen (Gosztanyi, 2012)

Die Umsetzung der zuvor genannten Maßnahmen bewirkt, unter Berücksichtigung der standort- und nutzungsspezifischen Anforderungen, eine Energieeffizienzsteigerung im Vergleich zu einer konventionellen Fassade. Inwiefern diese Maßnahmen in Fassaden umgesetzt werden können und welche Restriktionen in Betracht gezogen werden müssen, wird in diesem Kapitel beschrieben.

3.1 Fassade - funktionale, klimaaktive und dynamische Schnittstelle

Die Gebäudehülle wird nicht nur durch ihre Konstruktion, Form und Oberfläche charakterisiert, sondern spielt insbesondere in der Bauphysik eine zentrale Rolle. Die Bauphysik der Fassade beschäftigt sich mit der Regulierung der Energie- und Stoffströme, die von innen und außen auf die Fassade einwirken. In welchem Ausmaß die jeweiligen Energie- und Stoffströme vorkommen, hängt zum einen von der Gebäudenutzung und

zum anderen von den klimatischen Verhältnissen im Außenraum ab. Dabei hat die Fassade als Schnittstelle zwischen diesen beiden Zuständen einen hohen Stellenwert, denn sie muss unzählige Funktionen zeitgleich erfüllen. Diese lassen sich in Kategorien klassifizieren, die in Abbildung 3.1 umfassender dargelegt werden.

EXTERN	FASSADE		INTERN
Tägliche und saisonale schwankende Einflüsse	Schutzfunktionen	Tragfunktionen	Nutzungsanforderungen (Behaglichkeit)
Makroklima	<ul style="list-style-type: none"> › Wärme- & Feuchteschutz › Schallschutz › Visuelle Behaglichkeit (Sonnen- & Blendschutz) 	<ul style="list-style-type: none"> › Gebäude- & Eigenlasten › Windlasten › Verkehrslasten 	<ul style="list-style-type: none"> › Thermische Anforderungen › Visuelle Anforderungen › Hygienische Anforderungen › Akustische Anforderungen › Brandschutz
<ul style="list-style-type: none"> › Temperatur › Luftfeuchtigkeit › Solarstrahlung & Tageslicht › Niederschlag › Luftbewegung (Geschwindigkeit & Richtung) 	Nutzung v. Umweltenergien	TGA-Funktionen	
Mikroklima	<ul style="list-style-type: none"> › Solarenergienutzung › Natürliche Be- und Entlüftung › Tageslichtnutzung 	<ul style="list-style-type: none"> › Heizung › Kühlung › Lüftung › Beleuchtung/Tageslicht 	
<ul style="list-style-type: none"> › Städtische Wärmeinseln › Immissionen (Lärm, Abgase, etc.) 	Sicherheitsfunktionen		
	<ul style="list-style-type: none"> › Brand- & Rauchschutz › Einbruchschutz 		

Abbildung 3.1: Funktionen einer Gebäudefassade nach (Weller, 2013)

Im Zuge dieser Dissertation wird der Fokus nur auf einen Bruchteil der vorstehend genannten Funktionen gelegt: Schutzfunktion (Wärme- und Feuchteschutz), Nutzfunktion (Nutzung von Umweltenergien) und TGA-Funktion (Kühlung).

3.1.1 Energetische Anforderungen & Kennwerte

Als multifunktionales Gebäudeelement übernimmt die Fassade insbesondere die Aufgabe des klimatischen Raumabschlusses. Dabei bietet sie vor allen Dingen Schutz vor unerwünschten Wärme-, Sonnen- sowie Feuchteinträgen. In der Heizperiode dagegen sind Wärmeverluste zu minimieren. Um die Umsetzung dieser Funktionen sicherzustellen, werden in unterschiedlichen Normen und Richtlinien Anforderungen formuliert, die teilweise verpflichtend einzuhalten sind.

Schutzfunktion (Wärme- und Feuchteschutz)

In der Bauphysik wird zwischen winterlichem und sommerlichem Wärmeschutz unterschieden. Im Winter ist das Ziel Wärme im Gebäude zurückzuhalten und im Sommer sollte die Wärme von außen nicht in den Innenraum eingetragen werden.

Im Rahmen der Wärme- und Sonnenschutzfunktion legt insbesondere das Gebäudeenergiegesetz (kurz: GEG) die relevantesten Anforderungen fest und weist auf die hierfür erforderlichen weiterführenden Regelwerke hin. Das GEG betrachtet dabei Wohn- und Nichtwohngebäude getrennt voneinander. In der vorliegenden Arbeit liegt der Fokus auf Nichtwohngebäude, im Speziellen auf Industriegebäude.

Im Winter ist der **Wärmedurchgangskoeffizient U-Wert** [$W/(m^2K)$] die Anforderungsgröße, die gemäß GEG einzuhalten ist. Diese Kennzahl beschreibt den Wärmefluss vom Innenraum über die wärmeübertragende Gebäudehülle zum Außenraum und ist direkt abhängig von den einzelnen Baustoffschichten und deren Wärmeleitfähigkeiten λ . Je größer die Wärmeleitfähigkeit, desto besser die Wärmeverteilung im Fassadenquerschnitt und desto größer die Fähigkeit des Wärmetransports. Das GEG legt in Anlage 2 zu § 18, Absatz 1 (GEG, 2020) für zu errichtende Nichtwohngebäude einen U-Wert für die Referenzausführung von

- $U = 0,28 W/(m^2K)$ (bei einer Raum-Solltemperatur von $\geq 19^\circ C$) und
- $U = 0,35 W/(m^2K)$ (bei Raum-Solltemperaturen von 12 bis $< 19^\circ C$)

fest. Bei Bestandsgebäude liegen die maximalen U-Werte gemäß GEG, Anlage 7 zu § 48 (GEG, 2020) bei

- $U = 0,24 W/(m^2K)$ (für Raum-Solltemperaturen von $\geq 19^\circ C$) und
- $U = 0,35 W/(m^2K)$ (für Raum-Solltemperaturen von 12 bis $< 19^\circ C$).

Mit dem Wärmedurchgangskoeffizienten wird, der in Kapitel 2.2 beschriebene Transmissionswärmeverlust bestimmt.

Durch den vorliegenden Fokus auf Industriegebäude, die hauptsächlich auch als Arbeitsstätten zuzuordnen sind, ist die Arbeitsstättenverordnung (ArbStättV) nicht zu vernachlässigen. Die ArbStättV definiert Schutzziele zur Sicherheit des Beschäftigten und ist vom Unternehmer verbindlich umzusetzen. Als Anforderungsgrößen spielen insbesondere die Raumtemperatur, Tageslicht und die Sichtverbindung zur Außenwelt eine wichtige Rolle. Hierbei legt die ArbStättV lediglich die Anforderungsgrößen fest, beziffert diese jedoch nicht. Die technischen Regeln für Arbeitsstätten (ASR) definieren die Anforderungen gemäß ArbStättV. Wesentlich ist die ASR A3.5, die die Mindest-Raumtemperatur unter Berücksichtigung der Körperhaltung und der Arbeitsschwere darlegt (DIN SPEC 33428, 2019). Gemäß ASR A3.5 sollte sich die Raumtemperatur in einem Spektrum von 12 bis $20^\circ C$ bewegen und eine maximale Raumtemperatur von $26^\circ C$ auch an heißen Sommertagen nicht überschreiten. Ab einer Überschreitung von $30^\circ C$ müssen Kompensationsmaßnahmen im Rahmen einer Gefährdungsbeurteilung formuliert werden.

Auch im Bereich des Feuchteschutzes sind im Laufe des Winters (Tauperiode) und des Sommers (Verdunstungsperiode) gewisse Grenzwerte einzuhalten. Die Feuchteregulierung im Fassadenquerschnitt und somit die Ermittlung der anfallenden Feuchte (z.B. Tauwassermenge) in der Konstruktion wird im Rahmen der (DIN 4108-3, 2018) und (DIN EN ISO 13788, 2013) festgeschrieben. Ziel ist hierbei, dass innerhalb einer Bauteilkonstruktion nur so viel Tauwasser anfällt, dass es während der Sommerperiode wieder austrocknen kann. Dies kann nur unter Berücksichtigung einer zeitgleichen Betrachtung des thermischen und des hygrischen Verhaltens der Bauteilkonstruktion sichergestellt werden. Dabei zählen zu den maßgebenden Feuchteeinwirkungen, die Feuchtediffusion (Dampf-, Lösungs- und Oberflächendiffusion) und die Feuchteleitung (Kapillarleitung) (vgl. hierzu Abbildung 3.2).

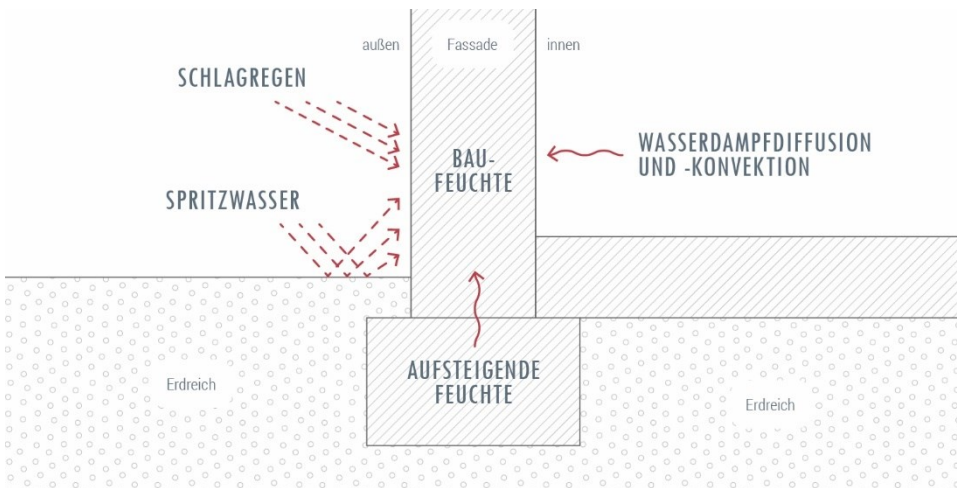


Abbildung 3.2: Feuchteeinwirkungen auf eine Fassade

Die Funktion der Fassade in Bezug auf die Feuchteregulierung im Bauteilquerschnitt (Verhinderung von Tauwasserausfall) wird statisch über das sog. Glaser-Verfahren nach DIN 4108-3 bewertet. Die maßgebende Einflussgröße ist hierbei die baustoffspezifische **Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ [-]** mit der die Wasserdampfdiffusion durch ein Bauteil hindurch beschrieben werden kann. Die Wasserdampfdiffusion tritt durch unterschiedliche Wasserdampfpartialdrücke auf der Innen- und Außenseite des Bauteils auf. Mit der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl und der entsprechenden Baustoffdicke lässt sich die **wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke s_d [m]** ermitteln. Dieser beschreibt den Widerstand des Baustoffes, die das Gemisch aus Wasserdampf und Luft beim Durchdringen der Baustoffschichten überwinden muss.

$$s_d = \mu \cdot d \quad (3.1)$$

mit

- s_d : wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke [m]
 μ : Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl [-]
 d : Dicke der Baustoffschicht [m]

Mit einer reinen stationären Betrachtung der Dampfdiffusion (Glaser-Verfahren) werden Sorptionseigenschaften, der Flüssigkeitstransport über Kapillarleitung sowie die Oberflächendiffusion vernachlässigt. Es sind numerische Methoden erforderlich, um die genannten hygrischen Einflussgrößen zu bestimmen. Auch die thermisch-hygrischen Wechselwirkungen (Einfluss auf Wärmeleitung und Latentwärmeeffekte) sind lediglich über die dynamische Betrachtung möglich. Hierfür werden zwei Differentialgleichungen für den Wärme- und Feuchtetransport miteinander gekoppelt (vgl. Kapitel 7.1).

Zur Beschreibung des Flüssigkeitstransports in kapillarporösen Baustoffen dient die Fähigkeit eines Baustoffes der kapillaren Wasseraufnahme (Kapillarleitung). Diese wird durch den **Wasseraufnahmekoeffizient w-Wert** [$\text{kg}/(\text{m}^2\text{h}^{0.5})$] quantifiziert. Der Wassergehalt eines Baustoffes besitzt eine hohe Relevanz hinsichtlich des künftigen thermischen Verhaltens des Gesamtbauteils. Die Wärmeleitfähigkeit vergrößert sich bei feuchten Baustoffen, was einen direkten Einfluss auf den Transmissionswärmeverlust und somit auf die Energiebilanz hat.

Weiterhin ist der Einfluss der Bewitterung der außenliegenden Bauteilschicht zu bemessen. In diesem Fall ist die **Regenwasserabsorptionszahl** [-] von Bedeutung, die die Einwirkung des Schlagregens auf die Fassade bzw. den Anteil des an der Fassade verbleibenden Regenwassers an der Bauteiloberfläche beschreibt.

Aus der numerischen Bewertung der Fassade resultiert schließlich der **Gesamtwassergehalt** [kg/m^3] bzw. der Wassergehalt in den einzelnen Materialschichten, der damit einhergehende Temperaturverlauf und die relative Feuchte an den einzelnen Positionen innerhalb der Konstruktion und an den Oberflächen.

In Bauteilen werden oftmals **Luftschichten** innerhalb der Konstruktion der Gebäudehülle integriert, mit dem Ziel den thermischen Energietransport sowie den Feuchteintrag im Bauteil gezielt zu beeinflussen. Dabei wird zwischen einer ruhenden, schwach belüfteten und stark belüfteten Luftschicht differenziert. Die Wärme- und Feuchteschutzeigenschaften der Fassade werden wesentlich durch die Größe der Öffnungsquerschnitte und die Luftschichtdicke beeinflusst. Wenn das Bauteil vertikal betrachtet wird (entlang seiner Höhe), entstehen in einer Luftschicht Temperaturschichtungen. Für den Wärmeübergang spielt die Art der Strömung, laminar oder turbulent, eine bedeutende Rolle. Über die **Reynoldszahl Re** [-], benannt nach dem Physiker Osborne Reynolds, kann in Abhängigkeit von den Kontaktoberflächen bestimmt werden, ob sich eine laminare oder turbulente Strömung einstellt. Im Zuge einer laminaren

Strömung treten im Gegensatz zur turbulenten Strömung keine Querströmung oder Verwirbelungen auf.

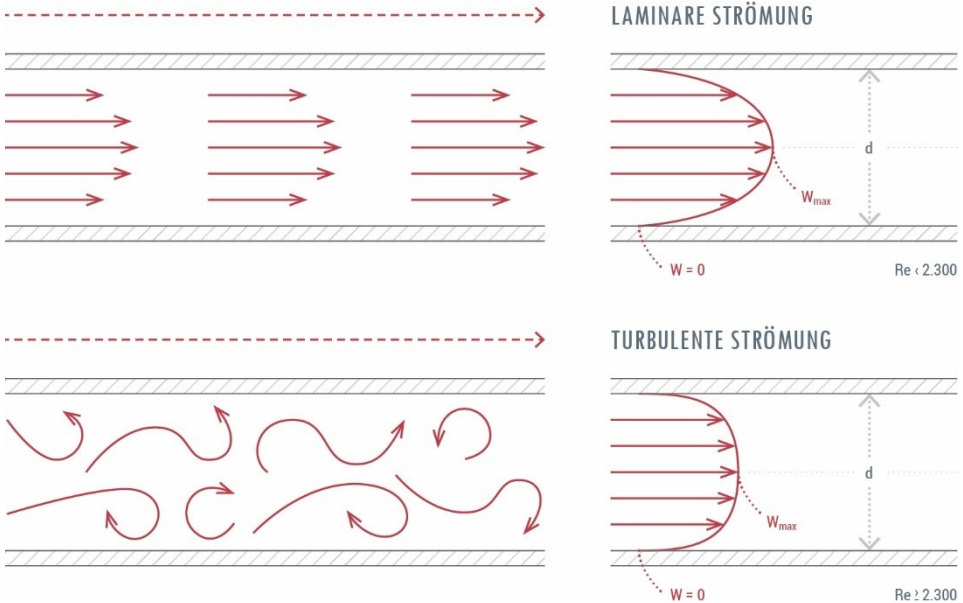


Abbildung 3.3: Strömungsarten – laminare und turbulente Strömung nach (Brehm, 2015)

Ab einer bestimmten kritischen Reynoldszahl lassen sich diese zwei Strömungszustände, je nach Art des durchströmten Körpers, unterscheiden:

- ebene Platte/Fläche: $Re_{krit} = 5 \times 10^5$
- Rohr/Kanal: $Re_{krit} = 2320$

Wenn die berechnete Reynoldszahl $Re \leq Re_{krit}$ beträgt, handelt es sich um eine laminare Strömung. Wenn jedoch Re_{krit} überschritten wird, kann von einer turbulenten Strömung ausgegangen werden. (Skolaut, 2018) (Merker, 1987)

Reynoldszahl für ebene Flächen:

$$Re = \frac{\omega \cdot L}{\nu} \quad (3.2)$$

mit

Re: Reynoldszahl [-]

ω : Anströmgeschwindigkeit [m/s]

- L: Plattenlänge [m]
 v: kinematische Viskosität [m²/s]

Um Umweltenergien nutzen zu können, können Rohrsysteme, die mit Wasser durchströmt werden, in die äußere und raumseitige Schicht einer Fassade integriert werden. Zur Bewertung der Strömungsart innerhalb der Rohre wird auch hier die Reynoldszahl benötigt:

Reynoldszahl für Rohrströmung:

$$\text{Re} = \frac{\rho \cdot v \cdot d_H}{\eta} \quad (3.3)$$

mit

- Re: Reynoldszahl [-]
 ρ: Dichte des Fluids [kg/m³]
 v: mittlere Strömungsgeschwindigkeit des Fluids [m/s]
 d_H: Hydraulischer Durchmesser [m]
 η: kinematische Viskosität [Pa·s]

Die Kenngröße, die die zuvor genannten konvektiven Einflussgrößen vereint, ist der **konvektive Wärmeübergangskoeffizient h** [W·K⁻¹·m⁻²], der in der (DIN EN ISO 6946, 2018) aufgeführt wird. Dieser kennzeichnet die Wärmeübertragung zwischen einem Fluid und einer festen Oberfläche. Zur Bestimmung des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten wird insbesondere die **Nußelt-Zahl** [-] herangezogen, die unter Berücksichtigung des durchströmten Körpers und der Strömungsart aus einem Tabellenwerk des VDI-Wärmeatlas entnommen (VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, 2013b) oder über die nachstehenden Formeln berechnet werden kann:

Nußelt-Zahl für laminare Strömung:

$$\text{Nu}_{\text{lam}} = 0,664 \cdot \sqrt{\text{Re}} \cdot \sqrt[3]{\text{Pr}} \cdot K \quad (3.4)$$

Nußelt-Zahl für turbulente Strömung:

$$\text{Nu}_{\text{turb}} = \frac{0,037 \cdot \text{Re}^{0,8} \cdot \text{Pr}^{\frac{1}{4}}}{1 + 2,443 \cdot \text{Re}^{-0,1} \cdot (\text{Pr}^{\frac{2}{3}} - 1)} \cdot K \quad (3.5)$$

Für Untersuchungen von laminaren Rohrdurchströmungen ist die Formel (3.6) anzuwenden:

$$\text{Nu}_{\text{lam}} = [49,371 + (1,615 \cdot \sqrt[3]{\beta} - 0,7)^3] \quad (3.6)$$

mit

- Nu: Nußelt-Zahl [-]
- Re: Reynoldszahl [-]
- Pr: Prandtl-Zahl [-]
- K: K-Faktor für Gase = 1 [-]
- β : mittlerer Profilmfaktor

Die **Prandtl-Zahl** [-] erfasst hierbei die wesentlichen Stoffgrößen im Wärmeübergang:

$$\text{Pr} = \frac{v \cdot c_p \cdot \rho}{\lambda_F} \quad (3.7)$$

mit

- Pr: Prandtl-Zahl [-]
- v: kinematische Viskosität [m^2/s]
- c_p : spezifische Wärmekapazität [$\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$]
- ρ : Dichte des Fluids [kg/m^3]
- λ_F : Wärmeleitfähigkeit des Fluids [W/mK]

Nutzfunktion (Nutzung von Umweltenergien)

Insbesondere im Hinblick auf die Ziele der Energiewende, ist es wichtig Potenziale zur Nutzung erneuerbarer Energien zu heben. Fassadensysteme bieten hierbei viele Möglichkeiten. Gerade im Industriesektor liegen enorme potenzielle Applikationsflächen für Photovoltaik und Solarthermie vor. Die Energieproduktion muss sich jedoch nicht auf die additiven Systeme beschränken. Mit thermischer Aktivierung kann die über die Fassade aufgenommene Wärmeenergie weiter genutzt werden. Die Fassade beschränkt sich dabei nicht nur auf die Aufnahme von Umweltenergie, sondern bietet auch die ideale Möglichkeit, Wärme während der Nachtstunden abzugeben.

Eine physikalische Kenngröße zur Beschreibung des Wärmeeindring- bzw. -abgabeverhaltens einer Fassade, stellt die **Temperaturamplitudendämpfung v** [-] dar. Es handelt sich hierbei um die zeitabhängige periodische Wärmeausbreitung in einem Bauteil, die das Verhältnis zwischen den Amplituden der Außenlufttemperatur und der Oberflächentemperatur auf der Innenseite des Bauteils beschreibt (siehe Abbildung 3.4). Die an der äußeren Seite der Fassade auftretenden Temperaturschwankungen werden beim Durchdringen des Bauteils an der Innenseite gedämpft und mit einer zeitlichen Verzögerung abgegeben. Insbesondere die Verzögerung, die der Phasenverschiebung

entspricht, gibt eine Aussage darüber, wann eine bestimmte Wärmeenergiemenge (Umweltwärme) in welchen Baustoffschichten zu erwarten ist. Dies ist vor allen Dingen eine wichtige Einflussgröße bei der Konfiguration eines energetisch optimierten Bauteils bzw. bei der Wahl der Reihenfolge/Abfolge der Baustoffschichten.

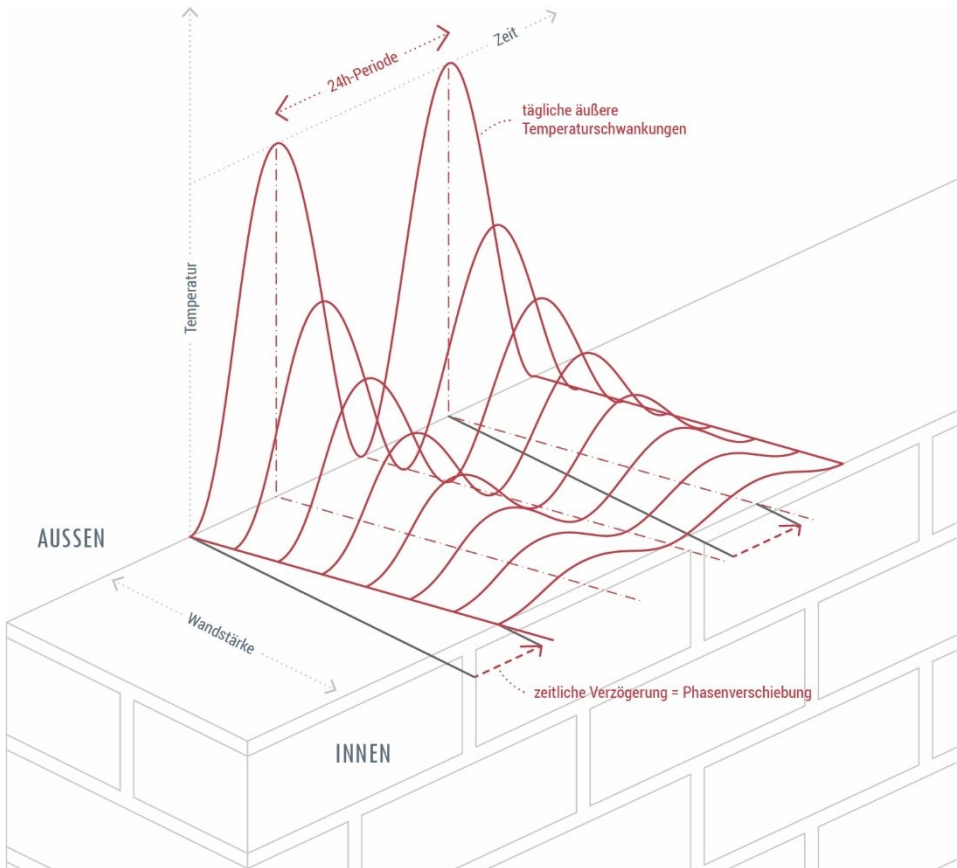


Abbildung 3.4: Zeitabhängige periodische Wärmeausbreitung einer Fassade nach (Zürcher und Frank, 2018)

Die **Strahlungsaufnahmefähigkeit** wird stark von der Oberflächenbeschaffenheit, der Oberflächenneigung und der Farbe der Oberfläche beeinflusst, die wiederum die Höhe der Strahlungsreflektion bestimmen. Dabei spielt die Strahlungsabsorptionszahl und die Reflektionszahl eine bedeutende Rolle (VDI 6007 Blatt 3, 2015). Die auf die Erdatmosphäre auftretende Sonnenstrahlung entspricht der kurzwelligigen Strahlung und wird gestreut, reflektiert und absorbiert. Dadurch gelangt nur ein Bruchteil der Gesamtstrahlungsleistung der Sonne auf die Erde, in Deutschland etwa $1100 \text{ kWh/m}^2\text{a}$

(Globalstrahlung) gemäß dem deutschen Wetterdienst (EUMETSAT CM SAF, 2023). Für Fassaden lassen sich in Abhängigkeit von dessen Orientierung die Intensität der einfallenden Strahlung über den Sonnenverlauf bzw. über ein Sonnenstanddiagramm ermitteln. Die Intensität der Strahlung steht dabei in Abhängigkeit vom Sonnenstand, der zurückzulegenden Strecke des Lichts durch die Atmosphäre, den Reflektionseigenschaften der Umgebung und die Neigung und Orientierung der bestrahlten Fassadenfläche.

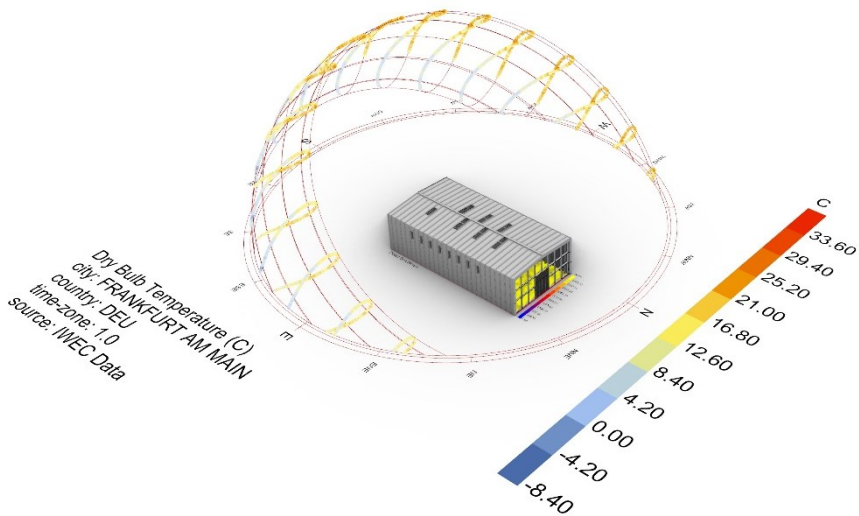


Abbildung 3.5: Sonnenstanddiagramm bezogen auf die ETA-Fabrik

Der **Absorptionskoeffizient** für Sonnenstrahlung, auch bekannt unter **Strahlungsabsorptionsgrad** α [-], beschreibt die Abnahme der Strahlung beim Durchdringen eines Mediums. Die (DIN V 18599-2, 2018) listet die im Bauwesen relevanten Strahlungsabsorptionsgrade auf und kann somit als Orientierung verwendet werden. Im Gegensatz dazu gibt die **Reflektionszahl** [-] den Anteil der nicht absorbierten Strahlungsenergie an und weist auf, wie viel Strahlung je nach Oberflächenfarbe reflektiert wird.

Das fluktuierende Energieangebot aus erneuerbaren Energieträgern, wie Sonnenenergie oder Umweltwärme/-kälte, ist zeitlich beschränkt. Die Zeitspanne, an der keine Energie bezogen werden kann, kann durch eine immanente Speicherung überbrückt werden. Im Bauwesen umfasst die **immanente Speicherung** die Verwendung von in Bauteilen integrierten Speichern. Diese Art der Speicherung wird durch die Nutzung der

Trägheit des Bauteils ermöglicht, indem Baustoffe mit hoher Rohdichte oder Wärmespeicherkapazität verwendet werden.

Im Rahmen des sommerlichen Wärmeschutznachweises ist, in Bezug auf die opaken Bereiche, insbesondere die thermische Speichermasse der Fassade und aller raumabschließenden Bauteile (Boden und Decke) ein wesentlicher Einflussfaktor. Dadurch wird in gewissem Maße ein thermischer Ausgleich innerhalb des Bauteils ermöglicht. Hierbei ist vor allen Dingen die **wirksame Wärmespeicherfähigkeit** C_{wirk} [Wh/(Km²)] gemäß (DIN V 4108-6, 2003), die **Temperaturleitzahl** a [m²s⁻¹] und der **Wärmeeindringkoeffizient** b [kJ/m²s^{0,5}K] zu berücksichtigen.

Die wirksame Wärmespeicherfähigkeit beeinflusst das Aufheiz- und Auskühlverhalten der raumabschließenden Flächen. Je größer diese ist, desto langsamer kühlt sich der Raum aus bzw. heizt sich der Raum auf. Im Wesentlichen beschreibt C_{wirk} die thermische Trägheit eines Baustoffes oder Bauteils, d.h. seine Fähigkeit, Wärmeenergie aus der Umgebung aufzunehmen, zu speichern und später wieder abzugeben.

$$C_{\text{wirk}} = c_p \cdot \rho \cdot d_{\text{wirk}} \cdot A \quad (3.8)$$

mit

C_{wirk} : wirksame Wärmespeicherfähigkeit [Wh/K]

d_{wirk} : wirksame Bauteilstärke [m]

c_p : spezifische Wärmekapazität [J/kg·K]

ρ : Dichte des Baustoffes [kg/m³]

A : Bauteilfläche [m²]

Die **Temperaturleitzahl** a stellt den Umfang bzw. die Tiefe der Temperaturänderung im jeweiligen Baustoff dar (Heimrath, 2018). Dabei steigt die Reichweite mit zunehmender Wärmeleitfähigkeit λ und abnehmendem Speichervermögen $c \cdot \rho$.

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \quad (3.9)$$

mit

a : Temperaturleitzahl [m²/s]

λ : Wärmeleitfähigkeit des Baustoffs [W/mK]

c : spezifische Wärmekapazität [J/kg·K]

ρ : Dichte des Baustoffes [kg/m³]

Der **Wärmeeindringkoeffizient** b gibt an, wieviel Wärme beim Aufheiz- bzw. Auskühlvorgang im Bauteil verbleibt (Bossert, 2016). Dies ist umso ausgeprägter, je höher die Wärmeleitfähigkeit und das Speichervermögen des Bauteils ist.

$$b = \sqrt{\lambda \cdot c \cdot \rho} \quad (3.10)$$

mit

- b: Wärmeeindringkoeffizient [$\text{kJ/m}^2\text{h}^{0,5}\text{K}$]
 λ : Wärmeleitfähigkeit des Baustoffs [W/mK]
c: spezifische Wärmekapazität [$\text{J/kg}\cdot\text{K}$]
 ρ : Dichte des Baustoffes [kg/m^3]

Doch auch leichte Bauweisen können eine hohe Speicherfähigkeit aufweisen. Integrierte **Phasenwechselmaterialien (PCM)** in Form von Baustoffgemischen oder dezentrale Speicher ermöglichen vergleichbar hohe Speichereigenschaften wie Baustoffe mit hohen Rohdichten. Phasenwechselmaterialien können in Abhängigkeit von ihrem Schmelzpunkt und der Umgebungstemperatur thermische Energie aufnehmen, zwischenspeichern und wieder abgeben. Sie nutzen das Prinzip der latenten Wärmespeicherung, wodurch Temperaturspitzen geglättet werden können, was auch unter "Peakshifting-Effekt" bekannt ist. Dabei wird überschüssige Wärme, z.B. Abwärme aus Maschinen in Produktionshallen aufgenommen, wodurch die Amplitude der fluktuierenden Raumtemperaturkurve reduziert wird. Im Abschnitt 3.2 wird das Prinzip des Phasenwechsels und die damit verbundene Speicherung thermischer Energie genauer erläutert.

TGA-Funktionen (Kühlung)

Um dem Ziel der Klimaneutralität im Jahre 2045 näher zu kommen, ist es notwendig den Primärenergiebedarf für den Betrieb der Technischen Gebäudeausrüstung auf das Minimum zu reduzieren. Insbesondere die Gewerke Kühlung, Lüftung und Beleuchtung sind wesentliche Energieverbraucher im Industriesektor. Hierfür ist eine gewerkeübergreifenden Planung und Konzeption einer „smarten Gebäudehülle“ sinnvoll und erforderlich. Für eine „smarte Gebäudehülle“ wird eine Vernetzung der baukonstruktiven Komponenten mit den technischen Funktionen benötigt. Eine solche Vernetzung wird idealerweise über Sensoren und Aktoren, die eine Steuerung bestimmter Vorgänge und die Kommunikation der vernetzten Komponenten untereinander ermöglichen, erreicht. Dabei werden von den Sensoren Einflussparameter, wie beispielsweise die Außenlufttemperatur, gemessen und an ein Gebäudeautomationssystem weitergeleitet. Die Information wird dort über ein auf bestimmte Anforderungen und Funktionen der Gebäudehülle ausgelegten Algorithmus verarbeitet, um dann bestimmte Aktoren anzusteuern.

Ein solches **Sensormonitoring** ist insbesondere im Industriesektor sinnvoll, da hierbei auch auf bestimmte Prozessketten oder Abwärmeentwicklungen im Innenraum reagiert werden kann. Durch Berücksichtigung von Wetterprognosen und Produktionsplanung

ließe sich beispielsweise die Gebäudeklimatisierung bereits im Vorfeld vorbereiten. Im Sinne der Gebäudeautarkie werden vier Systemtypologien unterschieden:

- statisch
- dynamisch
- kybernetisch und
- kognitiv

Die Unterscheidungsmerkmale beziehen sich insbesondere auf die Bedienung der Systeme und die Vernetzung mit der TGA, die in Tabelle 3.1 dargestellt sind.

Tabelle 3.1: Systemtopologie der Gebäudeautarkie nach (Heusler, 2015)

System	Bedienung		Vernetzung mit TGA	
	manuell	gesteuert	nein	ja
Statisch			x	
dynamisch	x		x	
kybemetisch		x	x	
kognitiv		x		x

Statische Systeme werden weder gesteuert noch mit der vorhandenen TGA vernetzt. Dynamische Systeme hingegen können vom Nutzer manuell bedient werden, wie beispielsweise das Ein- und Ausschalten einer dezentralen Klimaanlage. Die für die Gebäudeautarkie relevanten Systeme sind die kognitiven und kybernetischen Gebäudesysteme. Ein wesentlicher Unterschied zwischen diesen beiden Typologien ist die Kopplung an die technische Gebäudeausrüstung. Dadurch lassen sich gezielt physikalische bzw. klimatische Parameter steuern, beispielsweise kann über eine Kopplung die Kühlung eines Gebäudes in Abhängigkeit von der Öffnung von Fenstern gesteuert werden. (Heusler, 2015)

Die größte Herausforderung ist jedoch die Wahl der zu integrierenden technischen Funktionen in der Fassade. Die aus der Konstruktion der Fassade resultierenden Funktionen dürfen durch die integrierten technischen Funktionen nicht beeinträchtigt oder gar unterbunden werden. Demzufolge sind die Zielfunktionen der Gebäudehülle vorher sinnvoll festzulegen und die zu erwartenden Wechselwirkungen sollten bereits in der frühen Entwurfsplanung messtechnisch oder simulativ untersucht werden. Folgende

technischen Lösungen können als **fassadenintegrierte Systeme** in Betracht gezogen werden:

- Dezentrale Lüftungsgeräte mit Wärmerückgewinnung
- Bauteilintegrierte Photovoltaik oder Solarthermie
- Fluiddurchströmte Rohrsysteme zur Wärmeauf- und/oder -abgabe
- natürliches Lüften durch Nutzung des Kamineffektes
- selbstregulierende Spaltlüfter
- adiabate Kühlung
- immanente Speichersysteme (z.B. PCM-Speicher)

Im Rahmen dieser Dissertation werden fluiddurchströmte Rohrsysteme und immanente Speichertechnologien innerhalb der ETA-Fassade simulativ untersucht und energetisch bewertet (vgl. Kapitel 7).

3.1.2 Ökologische und nachhaltige Anforderungen & Kennwerte

In der heutigen Zeit der Energiewende ist eine reine Energieeffizienzbetrachtung unzureichend. Es findet ein Perspektivenwechsel statt, ein Umdenken hinsichtlich eines sinnvollen Einsatzes ressourcenschonender Produkte wie beispielsweise regenerative Rohstoffe oder recycelte Baustoffe.

Bei einer Fassadenplanung ist nicht nur die Multifunktionalität der Gebäudehülle relevant, sondern auch die Integration von ökologischen Designaspekten in den frühen Planungsphasen. Als direkte Schnittstelle nach Außen definiert die Fassade das Image eines Gebäudes/Unternehmens. Insbesondere im Industriesektor ist die Umsetzung von smarten und zugleich ökologischen Fassadenkonzepten oftmals entscheidend für die Akzeptanz in der Gesellschaft. Zur Umsetzung ressourcensparender Gebäude, ist primär die Betrachtung der grauen Energie auf Baustoff- und Bauteilebene erforderlich. Insbesondere im Industriesektor kann durch ein solches Konzept das „grüne Image“ eines Unternehmens aufgebessert werden. Fassaden, die für ein Gebäude als repräsentatives Element fungieren, können durch die Einbeziehung ökologischer Aspekte eine erhöhte Wertschätzung durch die Gesellschaft erlangen.

Die Bezeichnungen "Nachhaltigkeit" und „Umweltverträglichkeit“ wird in diesem Zusammenhang gerne verwendet. Doch ab wann ist ein Baustoff, Bauteil oder gar ein Gebäude nachhaltig? Wer entscheidet darüber?

Der Nachhaltigkeitsgedanke findet allmählich Eingang in die gesetzlichen Bestimmungen im Bauwesen. Der erste Meilenstein setzt das GEG. Dort wird erstmals

das Thema „Graue Energie“ in Form einer Pflichtangabe der vom Gebäude ausgehenden CO₂-Emissionen im Energieausweis einbezogen.

Die neuen Festlegungen der Bundesförderung für effiziente Gebäude (BEG) zeigen ähnliche Tendenzen. Dies wird durch die Einführung der Nachhaltigkeits-Klasse in den Programmteilen "Wohngebäude" (BEG WG) und "Klimafreundlicher Neubau" (BEG Neubau) deutlich. Um die Nachhaltigkeits-Klasse zu erreichen, ist eine Zertifizierung erforderlich, die die Einhaltung der Anforderungen des „Qualitätssiegels Nachhaltiges Gebäude" (QNG) bescheinigt. Diese Maßnahmen verdeutlichen das verstärkte Bestreben, nachhaltige und umweltfreundliche Bauweisen zu fördern und zu unterstützen. Die Einbeziehung der Nachhaltigkeits-Klasse in die BEG-Programme zeigt deutlich den Wandel hin zu einer umweltbewussten Bauindustrie. (Bundesförderung für effiziente Gebäude, 2023)

Weiterhin sind die ökologischen Eigenschaften, die sich aus der Fassadenkonfiguration ergeben, von großer Bedeutung. Dazu zählen CO₂-Emissionen, Rohstoffeinsatz, Primärenergiebedarf sowie die Demontierbarkeit. Für die Bewertung der ökologischen Kriterien stehen Zertifikate (z.B. Environmental Product Declaration) zur Verfügung, doch diesen bedienen sich nur wenig Planer, da die Bewertungsmethodik über Zertifikate intransparent und komplex ist. (Hildebrand, 2021)

In den nachfolgenden Abschnitten werden Methoden und Werkzeuge für eine kreislaufgerechte und nachhaltige Fassadenplanung vorgestellt.

3.1.2.1 Ökodesign-Prinzipien nach „EcoDesignKit“

Grundlegende Ziele nachhaltiger und ökologischer Fassadenkonzeptionierungen sind die Ressourcenschonung und die Reduktion von Schadstoffbelastungen. Gemäß EcoDesignKit (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz, 2023) können im Rahmen der Fassadenentwurfsphase unter Berücksichtigung bestimmter Ökodesign-Prinzipien ökologische Aspekte verankert und die zuvor genannten Ziele umgesetzt werden. Für eine nachhaltige Fassadenkonzeptionierung sind sieben Prinzipien zu berücksichtigen. Zwischen diesen Prinzipien sind Abhängigkeiten und Schnittstellen vorhanden, die implizieren, dass die Erfüllung einer Teilmenge, zur Einhaltung der restlichen Prinzipien führt. So ist z.B. die Langlebigkeit an die Eigenschaft der Reparierbarkeit gekoppelt.

Langlebigkeit

Bei dem Prinzip der Langlebigkeit liegt der Schwerpunkt auf der Verlängerung der Nutzungsdauern von Produkten, in diesem Falle von Fassadenkonstruktionen. Die Langlebigkeit wird weitgehend von drei Faktoren bestimmt: die Nutzungsdauer und -intensität sowie die technische Lebensdauer. Die Dauer und Intensität einer Nutzung werden stark von der Akzeptanz des Nutzers beeinflusst. Besteht eine Bindung zwischen

dem Nutzer und der Fassadenkonstruktion, beispielsweise aufgrund eines futuristischen Designs der Fassade, so ist der Nutzer gewillt, das Gebäude mit dieser Fassadenkonstruktion länger und intensiver zu nutzen, da dies meist auch mit dem Image des Gebäudes/Unternehmens einhergeht. Die technische Lebensdauer sollte hierbei jedoch für einen längeren Zeitraum ausgelegt werden als die erwartete Nutzungsdauer. Dies wird mit einer ökologisch und energetisch effizienten technischen Umsetzung des Fassadensystems sichergestellt.

Reparierbarkeit

Die Lebensdauer eines Produkts hängt eng mit der Reparierbarkeit zusammen. Im Laufe der Nutzungszeit ist zwangsläufig mit einem Verschleiß von bestimmten Bauteilkomponenten einer Fassadenkonstruktion zu rechnen. Dabei sollte die Fassade so konzeptioniert sein, dass eine Möglichkeit zum Komponentenaustausch oder -aufrüstung besteht. Eine Aufrüstung wird insbesondere erforderlich, wenn sich technische Standards verändern, was zur heutigen Zeit sicher zu erwarten ist. Ein modularer Aufbau mit demontierbaren Verbindungselementen und wenig integrierter Technik ermöglicht eine flexible Fassadenplanung und gewährleistet die Reparierbarkeit, was zur Langlebigkeit beiträgt.

Materialeffizienz und Ressourcenschutz

Das EcoDesign-Prinzip "Materialeffizienz und Ressourcenschutz" strebt an, natürliche Ressourcen schonend zu nutzen. Es zielt darauf ab, den Einsatz des Produkts bei gleichem Nutzen zu reduzieren. Eine Möglichkeit, dies zu erreichen, besteht darin, Recyclingmaterialien zu verwenden.

Energieeffizienz

Das Prinzip der Energieeffizienz ist im Rahmen des EcoDesignKits ähnlich definiert wie im Kapitel 2.2 dieser Dissertation.

Bei energieeffizienten Produkten bzw. Fassadenkonstruktionen handelt es sich um Systeme, die wenig Energie benötigen, aber dennoch keine Einbußen in ihrer Funktionalität erfahren. Energieeffiziente Bauteile sind zugleich umweltfreundlich, da der Energieverbrauch und der CO₂-Ausstoß proportional zueinanderstehen. Ebenso weist ein geringer Energieverbrauch auf einen reduzierten finanziellen Aufwand hin.

Problemstoffarmut

Das Ökodesign-Prinzip „Problemstoffarmut“ verfolgt das Ziel schädliche Stoffe in Produkten bzw. Fassadenkonstruktionen zu minimieren. Dabei geht es um Stoffe, die die menschliche Gesundheit gefährden, die Umwelt beispielsweise durch eine Begünstigung des CO₂-Ausstoßes schädigen können oder auch die Recyclingfähigkeit eines Produktes beeinträchtigen. Sollte eine Vermeidung oder ein Ersatz dieser Problemstoffe nicht

möglich sein, so müssen Maßnahmen ergriffen werden, damit einer Freisetzung entgegengewirkt wird.

Nachwachsende Rohstoffe

Wie aus den meisten ökologischen Betrachtungen bekannt, weist die Verwendung von Produkten aus natürlichen, regenerativen Rohstoffen geringe oder gar keine Umwelteinwirkungen auf. Nachwachsende Rohstoffe kommen meist als pflanzliche Rohstoffe vor und werden entweder energetisch oder stofflich ausgeschöpft.

Kreislauffähigkeit

Die Eigenschaft der Kreislauffähigkeit eines Produktes besagt, dass bereits verwendete Materialien als Sekundärmaterialien wiederverwendet werden sollen. Bei der Nutzung eines Sekundärmaterials werden Umweltbelastungen minimiert, da die Phase des Abbaus der Rohstoffe sowie deren Verarbeitung nicht nochmals wiederholt werden müssen. Dabei spielt jedoch die Ebene der Kreislaufführung eine bedeutende Rolle. Hinsichtlich der ersparten Umweltbelastung macht es einen wesentlichen Unterschied, ob reine Baustoffe oder ob Baustoffkompositionen bzw. ganze Bauteile in die Kreislaufwirtschaft eingeführt werden.

3.1.2.2 Energiemengenkalkulation im Entwurfsprozess - Ökobilanzierung nach DIN 14040

Eine kreislaufgerechte Fassadenplanung beinhaltet die Identifikation und Kalkulation von benötigten Energiemengen für das betreffende Bauteil. Die Herausforderung liegt hier bei der Quantifizierung der grauen Energie der Material- und Konstruktionsvarianten bereits in frühen Planungsphasen. Im Bauwesen werden Ökobilanzen spät, meist als Nachweistool genutzt. Der Einsatz in früheren Planungsphasen zur Realisierung von Optimierungen findet nicht oder nur in einzelnen Fällen statt (Gantner et al., 2018). Der Etablierung einer planungsbegleitenden Fassadenökobilanzierung steht der Kosten- und Zeitaufwand entgegen. Mit den bisherigen zur Verfügung stehenden Tools der Ökobilanzierung sind die einzelnen Schritte, wie Quantifizierung, Analyse und Validierung sehr langwierig, meist durch fehlende Datengrundlagen und Wissen der Planer. Durch die Anwendung der Ökobilanzierung ausschließlich als Nachweisinstrument, werden erheblich Potenziale zur Reduzierung der Umwelteinwirkung bzw. Optimierung der „grünen Bilanz“ einer Fassade, die in der frühen Planung einfacher in die Entwürfe etabliert werden können, versäumt. Die Durchführung von Gebäudeökobilanzierungen (Life Cycle Assessment = LCA) basiert auf den Vorgaben gemäß (DIN EN ISO 14040, 2021) und (DIN EN ISO 14044, 2021). (Kuhnhenne et al., 2010)

Ziel einer Ökobilanz ist die Bestimmung der Umwelteinwirkungen eines Produktes, in diesem Fall einer Fassade, während seines Lebenszykluses. Dabei werden folgende Lebensphasen betrachtet:

- die Rohstoffgewinnung
- die Herstellung
- die Nutzung
- die Abfallbehandlung
- das Rezyklieren („cradle to cradle“) oder der finale Abbau („cradle to grave“) (Kuhnhenne et al., 2010)

Für die Bewertung der in den vorstehenden Lebenszyklusphasen generierten grauen Energie der Material- und Konstruktionsvarianten sind Daten für eine Massen- und Volumenbilanz erforderlich. Auf Baustoffebene werden die sog. EPDs (Environmental Product Declaration), Umweltdeklarationen für Bauprodukte, herangezogen. Diese liegen jedoch nur für eine kleine Menge an Bauprodukten vor, weshalb weitere Datenbanken berücksichtigt werden müssen. Hierfür wird die Datenbank „Ökobau.dat“ verwendet, die Informationen zu relevanten Umweltindikatoren bereitstellt. Zu den zu identifizierenden Indikatoren hinsichtlich der Fassade gehören das Treibhauspotenzial (GWP: global warming potential) und der Primärenergiebedarf.

Die allgemeine Fassadenplanung erfolgt grundsätzlich in vier Schritten, ohne dabei Aspekte der Ökobilanzierung zu berücksichtigen:

1. Ermittlung der Grundlagen und Anforderungen aus der geplanten Nutzung
2. Konzeptentwicklung und Variantenuntersuchung unter Berücksichtigung der in Schritt 1 festgelegten Anforderungen
3. Evaluierung und Zieldefinition
4. Finale Klärung der Fassadenkonfiguration sowie Konstruktionsentwicklung

Künftig sollten in diesen Planungsschritten Elemente der Ökobilanzierung integriert werden, um frühzeitig die Umwelteinwirkungen zu begrenzen. Durch den Einsatz des „Top-Down-Ansatzes“ sollen die abstrakten Planungsschritte stufenweise an Detailierungsgrad gewinnen. Zu den Planungsschritten fehlen teilweise noch adäquate Ökobilanz-Benchmarks oder gar Studien. Daher wurden anfänglich drei Konkretisierungsstufen - "screening", "simplified" und "complete" - entsprechend den Planungsschritten abgeleitet. Die Unvollständigkeit dieser Stufen wird durch Sicherheitsaufschläge korrigiert. (Gantner et al., 2015)

Das Verbundprojekt „BIM-basierte Integrale Planung“, gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), hat sich dieser Thematik angenommen und die Konkretisierungsstufen feiner aufgliedert. Es handelt sich hierbei

um vier Konkretisierungsstufen, die das Gebäude als Gesamtsystem bis hin zur detaillierten Komponentenkonfiguration der Bauteile behandeln (siehe Abbildung 3.6).

Die für die Fassadenplanung relevanten Konkretisierungsstufen beschränken sich auf Stufe 2 bis 4, die die Konstruktionsweise von Fassaden detailliert betrachten. Das Funktions- und Elementsystem sind miteinander gekoppelt, denn das Funktionssystem beschreibt die Bauweise der Fassade (z.B. Mauerwerkswand mit Wärmedämmverbundsystem) und das Elementsystem unterteilt diese Konstruktionsweise in zwei Komponenten: Tragkonstruktion und Aufbauschicht (z.B. Stahlgerüst und Sandwichelement).

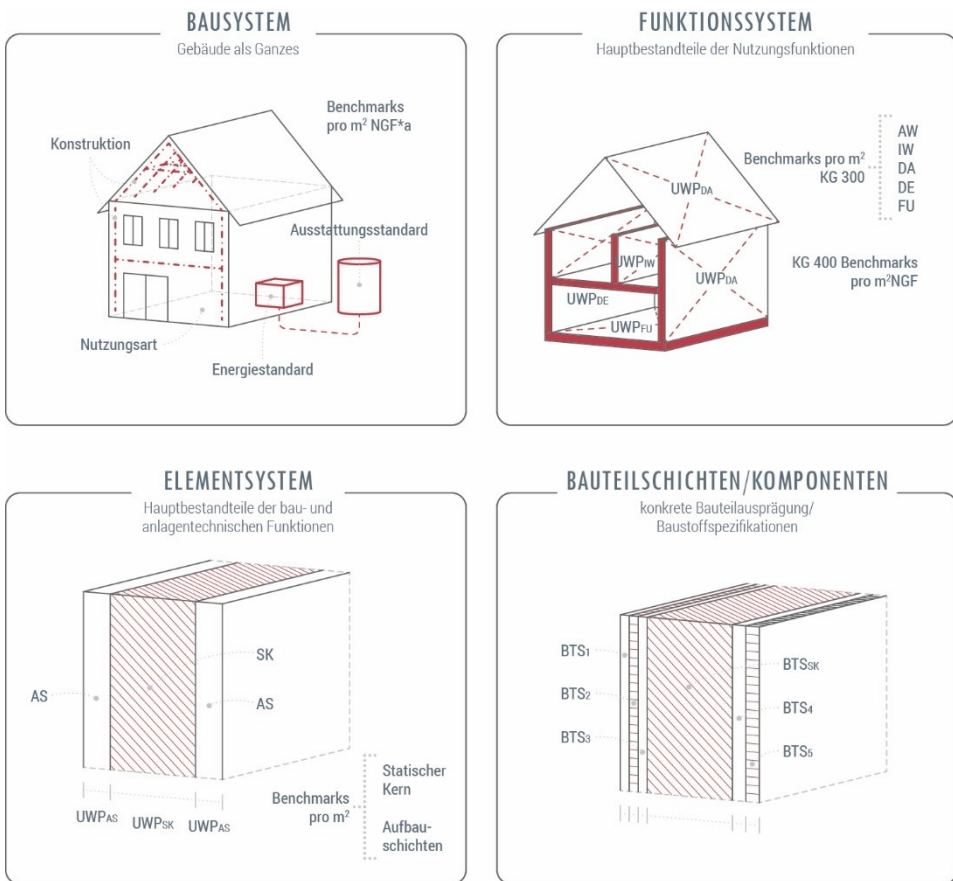


Abbildung 3.6: Schematische Darstellung der Konkretisierungsstufen im Rahmen der Gebäudeplanung nach (Gantner et al., 2018)

Für die Durchführung der Ökobilanzierung innerhalb der Konkretisierungsstufen werden nun Benchmarks herangezogen, die sich aus arithmetischen Mitteln aus den Ergebnissen von bereits durchgeführten LCA-Betrachtungen von Bauteilen in vergangenen Bauprojekten ergeben. Dabei werden für Fassaden Massen-, Flächen- und Volumeneinheiten (z.B. m² Außenwand, m³ Beton oder kg Stahl) angesetzt (Quack, 2001).

Endergebnis einer planungsbegleitenden Fassadenökobilanzierung stellt das Umweltwirkungspotenzial (UWP_k) dar. Über den festgelegten Betrachtungszeitraum wird dabei der durchschnittliche jährliche Wert der Umweltwirkungen beschrieben, die sich aus der Konstruktion, Herstellung, Instandhaltung, Verwertung und Entsorgung einschließlich der verwendeten Anlagentechnik ergeben. Dieser bestimmt sich wie folgt (Gantner et al., 2018) (DGNB GmbH, 2018):

$$\text{UWP}_k = \frac{H+E+I}{t_d} \quad (3.11)$$

mit

- H: prognostizierter Wert bei der Herstellung [kg Umweltwirkungs-Äqu./((m² NGF·a))]
 E: prognostizierter Wert bei der Verwertung und Entsorgung [kg Umweltwirkungs-Äqu./((m² NGF·a))]
 I: prognostizierter Wert durch die Instandhaltung und Austausch [kg Umweltwirkungs-Äqu./((m² NGF·a))]
 t_d: Betrachtungszeitraum [a]

Ziel ist mit einer in frühen Planungsphasen einfachen Ökobilanzierung von Fassadenbauteilen und -baustoffen schrittweise und unterteilt in Konkretisierungsstufen frühzeitige Abschätzungen zu den aus der geplanten Fassadenkonstruktion resultierenden Umweltwirkungen machen zu können. Diese basieren dabei auf Benchmarks, die sich aus vergangenen Projekten ableiten lassen. Dabei ist ein Vergleich der Ergebnisse mit weiteren energetischen und konstruktiv funktionalen Parametern essenziell, um die ökologische Bauweise der Fassade nicht überzubewerten. Nicht immer ist die ökologische Bauweise, die energetisch sinnvollste, z.B. bei Gegenüberstellung der U-Werte. Es muss ein Kompromiss zwischen etlichen Bewertungskriterien erfolgen, um somit eine Bewertung im Bauwerkskontext und demzufolge eine nachhaltige Konfiguration der Fassade sicherzustellen.

3.2 Merkmale thermisch aktivierter Fassaden (TAF)

Thermisch aktivierte Fassaden werden den sogenannten „intelligenten Fassaden“ zugeordnet. Doch was macht eine Fassade intelligent? Böke beschreibt die Intelligenz einer Fassade als die Eigenschaft der Gebäudehülle auf wechselnde Randbedingungen selbständig zu reagieren. Dabei zieht Böke die lateinische Definition der Intelligenz heran. Die Intelligenz wird als die Fähigkeit beschrieben Entscheidungen zu treffen, also gezielt zwischen mehreren Möglichkeiten zu wählen. (Böke, 2020) (Knaack et al., 2007)

Auch Prof. Knaack beschäftigt sich mit dem Thema der Anpassungsfähigkeit von Fassaden. Er definiert eine Gebäudehülle mit der Fähigkeit sich selbst an bestimmte Außen- und Innenrandbedingungen anzupassen als eine „adaptive Fassade“ (Knaack et al., 2014). Bei beiden Definitionen geht es schließlich um die Aktion und Reaktion der Gebäudehülle durch integrierte dynamische Komponenten, die zielgerichtet auf veränderte Szenarien eingehen. Im Zuge dieser Selbstregulierung werden Informationen erfasst, Daten verarbeitet und validiert sowie zur Erreichung eines bestimmten Zustandes umgesetzt. Die dabei relevante Fähigkeit der Selbstregulierung resultiert aus der Konfiguration auf Baustoff- und/oder Bauteilebene.

Ebenso besteht die Möglichkeit erst auf Bauteilebene smarte Eigenschaften einzuführen, was beispielsweise durch Sensormonitoring erfolgen kann. Die Sensoren müssen hierbei im Bauteil an geeigneten Stellen verortet werden. Diese Orte werden durch die zuvor festgelegte Zielaufgabe der Gebäudehülle bestimmt. Entsprechend den äußeren (z.B. Wetterbedingungen) und inneren Einflüssen (z.B. internen Wärmequellen) kann somit eine systematische Interaktion zwischen der technischen Gebäudeausrüstung (TGA) und der Fassade geschaffen und auf dieser Ebene digital gesteuert werden. Ziel ist schließlich durch die Entwicklung einer interaktiven Fassade den Einsatz von Gebäudetechnik sowie Fremdenergie zu minimieren.

Zur Identifizierung der geeigneten Stellen für die Integration der Adaptivität ist die Kenntnis über die einzelnen Funktionsebenen einer Fassade erforderlich. Die Hauptfunktionen einer Fassade finden in drei Ebenen statt (Knaack et al., 2007):

1. Innere Funktionsebene
2. Funktionsebene mit Tragwerk
3. Äußere regenabdichtende Ebene

Die inneren und äußeren Ebenen der Fassade übernehmen die bauphysikalischen Funktionen, wie Wärme-, Feuchte- und Schallschutz, die für die Energieeffizienz von Bedeutung sind. Lediglich diese zwei Funktionsebenen sind für die Integration adaptiver und insbesondere thermischer Eigenschaften geeignet, denn diese stellen die notwendige

Schnittstelle zur Umgebung her, die schließlich zur Aktivierung der „smarten“ Eigenschaften erforderlich ist. Sie dienen insbesondere der thermischen Übertragung und Speicherung, die vor allen Dingen für thermisch aktivierte Fassaden in Frage kommen.

Thermisch aktivierte Fassaden sind adaptive Fassaden, die auf thermische Impulse reagieren. Für die notwendige thermische Interaktion dient u.a. die thermische Masse bzw. die thermische Speicherfähigkeit eines Bauteils. Dabei wird die Wärmekapazität sowie die Geschwindigkeit des Wärmestroms beeinflusst, die es schließlich gilt zu steuern. Eine thermische Aktivierung wurde bisher weitestgehend an Decken oder Böden umgesetzt, da diese meist aus dem Baustoff Beton bestehen und somit eine hohe thermische Masse aufweisen. Da aus konstruktiven Gründen diese jedoch meist aufgeständert oder abgehängt werden, um technische Leitungen in diesen Bereichen zu führen, sind hier Restriktionen hinsichtlich der Optimierung des Wärmestroms vorhanden. Den thermischen Eigenschaften der Fassade wächst somit eine wesentliche Rolle zu, weshalb im Zuge dieser Dissertation der Fokus darauf gerichtet wird.

Thermisch aktivierte Fassaden stellen eine Weiterentwicklung aus der bekannten Betonaktivierung von Decken dar. Dabei wurden in der Mitte des Deckenbauteils (klassische Bauteilaktivierung) oder oberflächennah (Oberflächennahe Bauteilaktivierung) Rohrsysteme im Beton eingelassen, die mit Wasser durchströmt werden (siehe Abbildung 3.7 sowie Abschnitt 3.2.1).

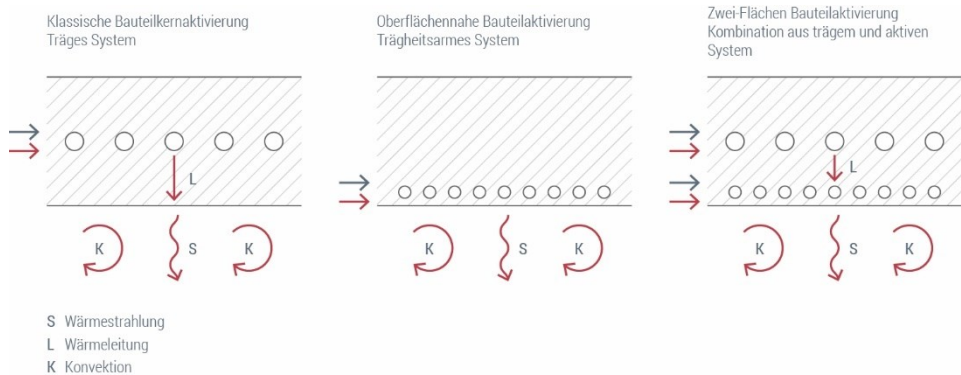


Abbildung 3.7: Arten der Bauteilaktivierung

Die oberflächennahe Bauteilaktivierung ist in Bezug auf Fassadensysteme die aktuell gängigste Variante, da somit thermische Energie schneller aufgenommen und abgegeben werden kann. Hierbei wird zwischen Absorberflächen und Übertragungsflächen unterschieden. Absorberflächen dienen hauptsächlich der Erzeugung bzw. Aufnahme von Energie. Übertragungsflächen wiederum besitzen die Aufgabe der Energieabgabe.

Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal ist die Art der Aktivierung der thermischen Masse. Hierbei wird von passiven oder aktiven Systemen gesprochen. Das aktive System erfolgt über eine erzwungene Übertragung thermischer Energie, beispielsweise über PV-Elektro-Heizdrähte, die im Beton eingelassen werden (Solar-elektrische Betonkernaktivierung) (my-PV GmbH, 2022) oder, wie vorstehend beschrieben, über ein mit Wasser oder Luft durchströmtes Rohrsystem. Dabei wird ein Wärmestrom forciert, der die thermische Masse des umgebenden Materials zur Aufnahme bzw. Speicherung thermischer Energie anregt. Die passive Systemaktivierung beruht hingegen auf die Ausschöpfung der thermischen Eigenschaften des Bauteils über natürliche Wärmeströme. Diese resultieren aus der Umgebung z.B. durch ein erhöhtes Abwärme-Aufkommen. Zudem ist eine Hybrid-Variante möglich. Hierbei werden Rohrsysteme im Bauteil als bivalentes System eingelassen, die lediglich zum Einsatz kommen bzw. mit einem thermischen Übertragungs-Medium durchströmt werden, wenn Lastspitzen abgefangen werden sollen.

Im Folgenden werden exemplarisch thermisch aktivierte Systeme aufgelistet, die bisher in der Forschung und teilweise bereits auf dem Markt etabliert sind:

- Thermisch aktivierte Betonelemente: Betonkernaktivierung oder Betonoberflächenaktivierung (siehe Abbildung 3.7)
- Thermisch aktivierte Stahlhohlprofile mit Wasser oder Luft durchströmt
- Thermisch adaptive Keramikfassaden mit integrierten Rohrsystemen
- Solarenergiefassaden (BIPV oder BIST)
- Solarthermische Jalousie
- Fassaden mit integrierten PCM-Kassetten (makroverkapseltes PCM)

Vorteil und zugleich Ziel der thermischen Aktivierung einer Fassade ist die energetische Verwertung von großen thermischen Übertragungsflächen, die lediglich niedrige Vorlauftemperaturen bzw. Systemtemperaturdifferenzen benötigen, wodurch das "LowEx-Prinzip" zur Anwendung kommt. Dabei kann die erforderliche thermische Energie aus Umweltenergien bezogen werden, was zusätzlich den Zielen des Energieabkommens 2050 zugute geschrieben werden kann. Es wird bestrebt die nötige Gebäudetechnik auf das Minimum zu reduzieren und ein Höchstmaß an Gebäudeautarkie zu realisieren.

3.2.1 Komponente: Rohrsystem

Wie bereits im vorstehenden Abschnitt beschrieben, ist die bekannteste Art der thermischen Bauteilaktivierung die über Rohrsysteme. Dabei werden üblicherweise wasserdurchströmte Rohrregister im Zuge der Errichtung, aber auch additiv im Rahmen einer Sanierung eines Gebäudes im Bauteil integriert. Seltener kommen luftgeführte

Systeme zum Einsatz, da Luft als Wärmeträgermedium eine geringere Wärmekapazität aufweist.

Hintergrund dieser Dissertation ist die Untersuchung und die energetisch optimierte Auslegung eines bereits vorhandenen thermisch aktivierten Fassadensystems. Fassaden stellen große und meist thermisch ungenutzte Flächen zur Verfügung, die sich effektiv zur thermischen Aktivierung einsetzen lassen. Durch die mögliche große Rohrregisterfläche fällt die thermische Aktivierung von Fassaden zur Kategorie „Flächentemperierung“. Solche Systeme haben zum Vorteil, dass lediglich geringe Vorlauftemperaturen erforderlich werden, wodurch der Einsatz von erneuerbaren Energien auf direktem Wege ermöglicht werden kann. Die Nutzung erneuerbarer Energien erfolgt beispielsweise über die Aufnahme von Umgebungswärme (solare Wärme) oder durch die Wärmeabgabe an die kalte Außenluft während der Nachtperiode. Es besteht jedoch auch die Möglichkeit der Nutzung von Geothermie. In diesem Fall können erdberührte Wandflächen zum Einsatz kommen, die die Temperatur des Erdreichs z.B. zur Abführung von Wärme nutzen. Hierbei kommen Wände der Untergeschosse eines Gebäudes oder Verbauwände aus Beton wie Schlitz- und Bohrpfahlwände in Frage.

Charakteristisch für die thermische Aktivierung von Bauteilen bzw. Fassaden ist die Ausschöpfung der thermischen Eigenschaften des Trägermaterials. Das Trägermaterial ist die Bauteilschicht, in der das Rohrregister eingebettet wird. Hierbei wird meist auf eine hohe Wärmespeicherfähigkeit des Trägermaterials und somit auf die Trägheit des Systems gesetzt, um somit große Mengen an thermischer Energie zeitversetzt auf- und abgeben zu können. Hierbei ist die zeitversetzte Reaktion bei der Wärmaufnahme bzw. -abgabe ein Werkzeug zur Selbstregulierung des Systems. In diesem Fall wird so lange Wärme auf- bzw. abgegeben bis die Raumtemperatur die Temperatur des aktivierten Bauteils erreicht. Da die Temperatur des aktivierten Bauteils zusätzlich über die wasserdurchströmten Rohre gesteuert (über die Änderung der Vorlauftemperatur) und somit eine Temperaturdifferenz je nach gewünschter Raumsolltemperatur zielgerichtet aufrechterhalten werden kann, wird der Selbstregulierungseffekt verstärkt. (Glück, 1999)

Ein weiterer Vorteil der Flächentemperierung ist der effektive Ausgleich der Oberflächentemperaturen mittels Strahlungsaustausch, was insbesondere im Innenbereich zu einer hohen thermischen Behaglichkeit führt. Auch diese Eigenschaft kann durch den Einsatz der thermischen Aktivierung über Rohrsysteme stark beeinflusst werden. Hierbei spielt insbesondere die geometrische Dimensionierung des Rohrsystems eine wesentliche Rolle, die durch folgende Faktoren abhängig ist:

- Rohrdurchmesser
- Rohrposition im Bauteil (Lage zur Oberfläche und zur Dämmschicht)
- Rohrabstand zueinander
- Art der Rohrleitungsführung
- Schaltung der Rohrleitung (Parallel- oder Reihenschaltung)

Die thermische Effizienz des thermisch aktivierten Bauteils wird wesentlich durch die Wahl des **Durchmessers** der einzelnen Rohre beeinflusst. Dabei ist zwischen den normalen Rohrsystemen, wie sie in Fußbodenheizungen Anwendung finden, und Kapillarrohren zu unterscheiden. Rohre von Fußbodenheizungen besitzen üblicherweise einen Durchmesser von 10 bis 25 mm. Kapillare hingegen weisen einen Durchmesser von 3 bis 5 mm auf. In diesem Bereich ist für den Übergang des Wärmestroms weiterhin die Wärmeleitfähigkeit und die Dicke der Ummantelung sowie die Rohrlänge entscheidend. Bei hohlzylindrischen Wänden mit vergleichsweise großem Durchmesser und geringer Wandstärke kann die Berechnung des Wärmestroms für eine beliebige Stelle innerhalb des Rohrs mithilfe der nachstehenden Formel erfolgen:

$$\dot{Q} = -\lambda_m \cdot A(r) \frac{dT}{dr} \quad \text{mit } A(r) = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot l \quad (3.12)$$

mit

- \dot{Q} : Wärmestrom zwischen Fluid und Rohr [W]
- λ_m : Wärmeleitfähigkeit des Rohrmantelmaterials [W/m·K]
- r: Innendurchmesser [m]
- l: Rohrlänge [m]

Hierbei wird aufgrund der geringen Krümmung, ähnlich zu ebenen Wänden, von einem konstanten Wärmestrom über die gesamte Oberfläche im Abstand r ausgegangen.

Die **Rohrlänge** sollte dabei bei etwa maximal 150 m je Heizkreis liegen, da dieser einen direkter Einfluss auf den Strömungswiderstand ausübt. Der Volumenstrom in den Rohren bestimmt wiederum, durch den Einfluss auf die Entzugsleistung, den Energieertrag.

Der **Abstand** zwischen den Rohrsträngen wirkt sich vor allen Dingen auf die Strahlungsintensität der Wärmeübertragung und somit auf die Wärmeleistung des thermisch aktivierten Bauteils aus. Dabei ist zudem auf die gegenseitige Beeinflussung der Rohre hinsichtlich der Wärmeströme zu achten.

Die vorstehend beschriebenen Parameter, Rohrdurchmesser, Rohrlänge und Rohrabstand bestimmen schließlich die Temperaturhomogenisierung im Bauteil.

Befasst man sich nun mit der nächsten Ebene, dem Rohrregister, so kommt die Lage und die Art der Verlegung in den Fokus. Die **Lage des Rohrregisters** zur Oberfläche bestimmt die Effektivität der Selbstregulierung. Je näher die Rohre an der Oberfläche des Bauteils positioniert werden, desto größer und schneller ist die Wärmeübertragung. Auch wirkt sich mit größer werdendem Abstand der Rohre zur Dämmschicht die thermische Wärmeübertragung positiver aus. Die Rohrposition im Bauteil wird ebenso durch das gewählte Trägermaterial und somit durch den Herstellungsprozess bestimmt. Die Lage des Rohrsystems muss mit dem Herstellungsprozess kompatibel sein. (Javanmardi und Pahn, 2016)

Die Rohrleitungen können grundsätzlich auf zwei unterschiedliche Weisen verlegt werden: die sog. „Mäander-Form“ und die „Bifilare-Form“. Die bifilare **Verlegungsart** ähnelt einem schneckenförmigen Gebilde und ermöglicht eine gleichmäßige Oberflächentemperaturverteilung, da der Vor- und Rücklauf nebeneinander geführt werden. Die Mäander-Form stellt eine fortlaufende S-Form dar und liefert eine weniger gleichmäßige Oberflächentemperaturverteilung. Die Art der Leitungsführung unterliegt zudem hydraulischen Anforderungen, wie Druckverluste und Entlüftungserfordernissen, die bei der Planung des Systems zu beachten sind.

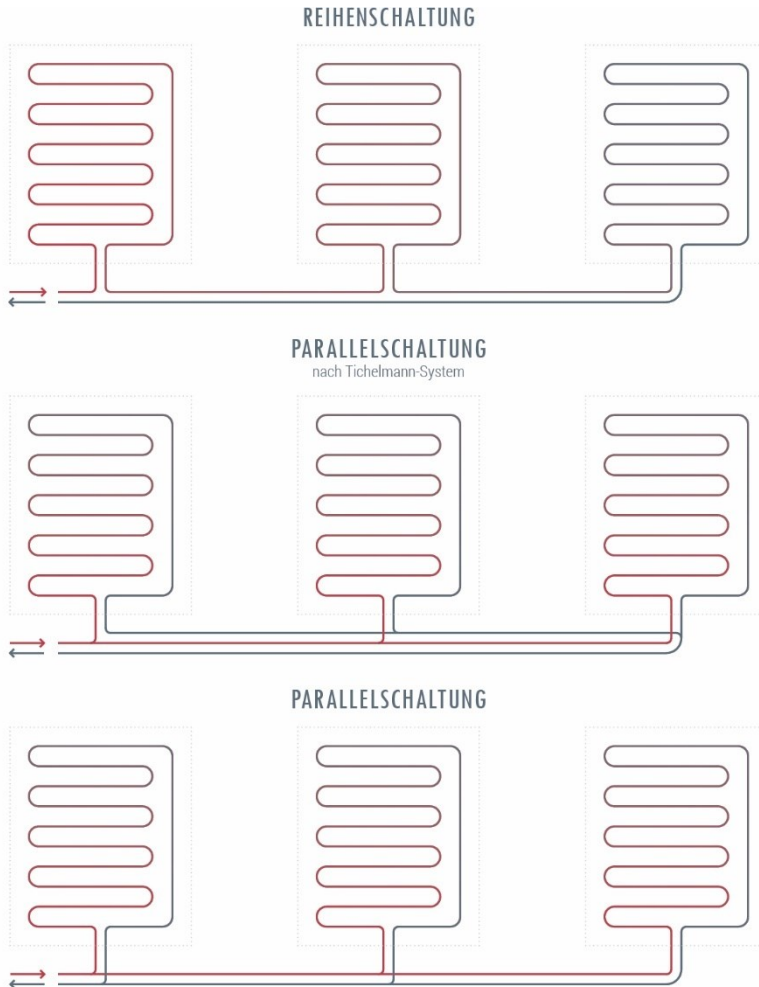


Abbildung 3.8: Reihen- und Parallelschaltung von Rohrkreissystemen

Nicht nur die Art der Leitungsführung, sondern auch die **Schaltung der Rohrkreissysteme**, Reihen- oder Parallelschaltung, ist von Relevanz, da diese durch ihre Gesamt-Rohrleitungslänge, eine Aussage über die Entzugsleistung und somit die Effizienz des Systems geben können (vgl. Abbildung 3.8).

Die Entzugsleistung ist hierbei abhängig von dem Druckverlust. Zur Begrenzung der Leistung der Hydraulikpumpe sowie zur Vermeidung einer turbulenten Strömung, ist ein maximaler Druckverlust von 30 kPa (0,3 bar) einzuhalten. Im Zuge einer Parallelschaltung wird der Druckverlust klein und zudem in allen Rohrregistern gleich gehalten. (BeKa Heiz- und Kühlmatten GmbH, 2015)

Zur Vermeidung eines thermischen Kurzschlusses zwischen der aktivierten Außen- und Innenseite, ist eine zwischengeschaltete Dämmebene von Vorteil.

Im Zuge der Positionierung der thermischen Aktivierung ist nicht nur eine Angrenzung der Außenseite gegen Außenluft denkbar, sondern auch erdberührte Außenwandbauteile können in Frage kommen. In diesem Fall wird statt der Umgebungslufttemperatur die Temperatur des Erdreiches herangezogen. Die Temperatur im Untergrund ist in drei Zonen unterteilt. Im Falle von erdberührten Wandelementen im Bereich des Untergeschosses, wird lediglich der oberflächennahe Bereich des Erdbodens als Wärmesenke genutzt. Die Untergrundtemperatur in diesem Bereich wird hauptsächlich von der über den Tag bzw. hochskaliert über dem Jahr schwankende Lufttemperatur (zeitversetzt) beeinflusst. Die tägliche Schwankung der Lufttemperatur kann durch eine annähernde sinusförmige Kurve dargestellt werden. Aus diesem Grund kann auch die oberflächennahe Erdreichtemperatur unter Berücksichtigung einer Phasenverschiebung und Amplitudendämpfung mit einem sinusförmigen Verlauf angenommen werden. (Bauer et al., 2018)

Die Phasenverschiebung und Amplitudendämpfung steht im direkten Zusammenhang mit der Temperaturleitfähigkeit des Erdreiches, die wiederum von der Bodenart und dem vorhandenen Grundwasseranteil abhängig ist. Bei einer hohen Temperaturleitfähigkeit ist von einer größeren Eindringtiefe des Temperaturzykluses zu rechnen. (Kürten, 2014)

3.2.2 Komponente: Trägermaterial

Industriegebäude besitzen aufgrund ihres hohen Abwärmepotenzials, emittiert durch interne Lasten wie Maschinen, Kleingeräte oder Personen, einen höheren Kühlbedarf als andere Gebäudearten. Mit Blick auf die Ziele des Energiekonzepts 2050 wird der Verwendung der vorhandenen Umweltenergien besonders im Industriesektor eine entscheidende Rolle zugewiesen. Gerade deswegen ist hier die Nutzung von Speicherpotenzialen innerhalb der Trägerschicht unentbehrlich, da erneuerbare Energien nur fluktuierend zur Verfügung stehen. Somit ist vor allen Dingen eine kurz- und mittelfristige Speicherung von Kälteenergie notwendig. Es gilt schließlich die Integration der Energiespeicherung, entweder über funktionale Speicher (Wasserspeicher, PCM-

Speicher etc.) oder über das Speicherpotenzial im Bauteil selbst (abhängig von der Wärmespeicherfähigkeit des Trägermaterials), sicherzustellen. Im letzteren Fall fungiert das Bauteil als konstruktiver Speicher, was unter dem Prinzip der immanenten Speicherung bekannt ist.

Tabelle 3.2: spezifische Wärmekapazität von typischen Fassadenbaustoffen nach (Holzmann, Wangelin und Bruns, 2012) und (Schweizer, 2022)

Baustoff	Spezifische Wärmekapazität c_p [J/(kgK)]
Putz/Mauermörtel	1000
Stahlbeton	880
Bimshohlblockstein	800
Kalksandstein	880
Ziegelstein	840
Nutzholz	1600
Holzfasernplatten	1700
Holzwohle-Platten (WW)	1470
Expandierter Polystyrol (EPS)	1450
Polypropylen (PP)	1800
Polyurethan-Hartschaum (PUR)	1400
Natursteine	1000
Aluminiumlegierung	880
Stahl	450
Mineralwolle	1030
Luft	1008

Eine immanente Speicherung ist erst dann sinnvoll, wenn Baustoffe im Bauteil eingesetzt werden, die ein hohes Wärmespeichervermögen besitzen, sprich eine hohe spezifische Wärmespeicherkapazität c_p [kJ/kgK] aufweisen. Die spezifische

Wärmekapazität beschreibt die Fähigkeit eines Stoffes zugeführte thermische Energie aufzunehmen, zu speichern und abzugeben (Holzmann, Wangelin und Bruns, 2012).

Die Speicherfähigkeit hängt jedoch auch maßgeblich von der Masse eines Stoffes ab. Demnach können Stoffe mit einer hohen Rohdichte und einer hohen spezifischen Wärmekapazität mehr thermische Energie speichern als Stoffe in Leichtbauweise. In Tabelle 3.2 sind spezifische Wärmekapazitäten von typischen Fassadenbaustoffen dargestellt. Die aufgelisteten Baustoffe zählen zu den sensiblen Speichermedien. Sensible Wärmespeicher nehmen thermische Energie auf, erhöhen dabei ihre Temperatur und geben sie wieder ab. Den sensiblen Wärmespeichern sind auch Baustoffe zugeordnet die weniger gutes Speichervermögen, aufgrund ihrer geringen Rohdichte, aufweisen. Um trotz dieser geringen Rohdichte dennoch ein hohes Wärmespeicherpotenzial zu erreichen, werden latente Wärmespeicher einbezogen.

Latentwärmespeicher nehmen thermische Energie auf, ändern ihren Aggregatzustand und speichern die Wärme so lange bis es erneut zu einem Phasenwechsel kommt und geben die gespeicherte Energie wieder frei. Dabei wird bei gleichen Temperaturunterschieden ein Vielfaches an Wärme gespeichert als bei sensiblen Wärmespeichern.

Das Prinzip des Phasenwechsels ist hier das ausschlaggebende für die Steigerung des Wärmespeichervermögens und des Speicherzykluses. Wird die Phasenwechseltemperatur eines latenten Speichermediums erreicht und weiter Energie zugeführt, so bleibt die Temperatur konstant und die zuvor verbundenen Moleküle trennen sich voneinander. Dadurch kommt es zu einem Phasenübergang, meist von fest zu flüssig (Phasenübergang: Schmelzen) und umgekehrt (Phasenübergang: Erstarren). Sobald der Phasenübergang komplett abgeschlossen ist, erhöht sich die Temperatur ein weiteres Mal. Kommt es erneut zum Phasenwechsel, so wird die aufgenommene Energie wieder freigesetzt (siehe Abbildung 3.9). Diese latente Wärmespeicherung ist in der Thermodynamik auch als "Enthalpie" bekannt. (Javanmardi und Pahn, 2016)

Zur latenten Speicherung werden sogenannte Phasenwechselmaterialien (engl. PCM - Phase Change Materials) herangezogen. Die Unterteilung der PCM ist auf zwei Unterscheidungsmerkmale zurückzuführen:

- Phasenwechseltemperatur
- Kohlenstoffzusammensetzung

Die Phasenwechseltemperatur bezeichnet die kritische Temperatur bzw. Temperaturspektrum, bei der der Phasenübergang stattfindet. Im Rahmen der Kohlenstoffzusammensetzung wird zwischen organischen und anorganischen Materialien differenziert. Als anorganische PCM kommen im Bauwesen Salzhydrate in Frage. Beispiele hierfür sind Calciumchloridhexahydrat ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) oder Glaubersalz ($\text{NaSO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$). Zur Klasse der organischen PCMs zählen die Paraffine ($\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$), die

aus gesättigten Kohlenwasserstoffverbindungen bestehen. Maßgebend für die Enthalpie organischer PCMs ist die Anzahl der Kohlenstoffatome. (Javanmardi und Pahn, 2016)

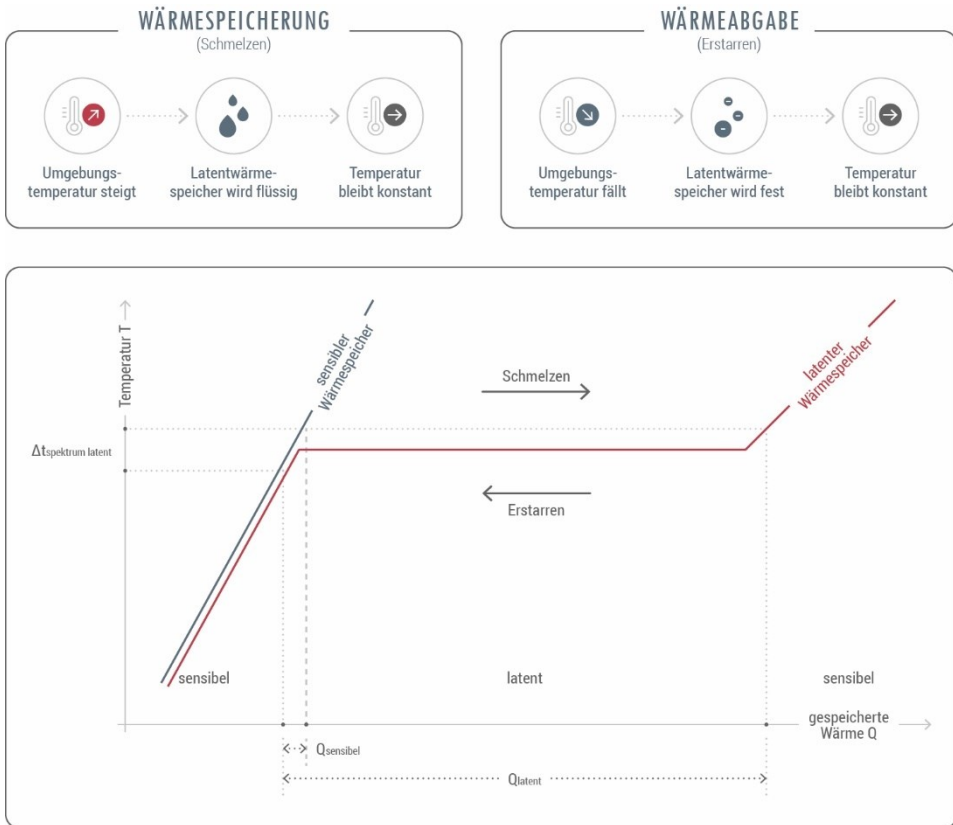


Abbildung 3.9: Latentwärmespeichervorgang – Prinzip des Phasenwechsels

Latentwärmespeicher haben gegenüber sensiblen Speichern zum großen Vorteil, dass sie trotz ihrer höheren Wärmespeicherkapazität kompakt und somit platzsparend eingesetzt und auf die erforderliche Phasenwechseltemperatur eingestellt werden können. Im Zuge des Phasenwechsels erfahren sie zudem lediglich eine Volumenänderung von weniger als 10 % und können die thermische Energie praktisch verlustfrei speichern. (Heimrath, 2018) (Javanmardi und Pahn, 2016)

3.2.3 Komponente: Hinterlüftung

Vorgehängte hinterlüftete Fassaden besitzen ein vielfältiges Portfolio an bauphysikalischen Eigenschaften und Funktionen, wodurch sich Synergien aus dieser Multifunktionalität ausschöpfen lassen. Charakteristisch für eine vorgehängte hinterlüftete Fassade ist die konstruktive Trennung der Dämmschicht und der Fassadenbekleidung über eine Hinterlüftungsebene. Der grundlegende Aufbau besteht aus vier Hauptbestandteilen, die in Abbildung 3.10 grafisch dargestellt sind (Pelvay, 2020):

- Bekleidungselement
- Hinterlüftungsraum
- Unterkonstruktion mit Wärmedämmschicht
- Verankerungseinheit

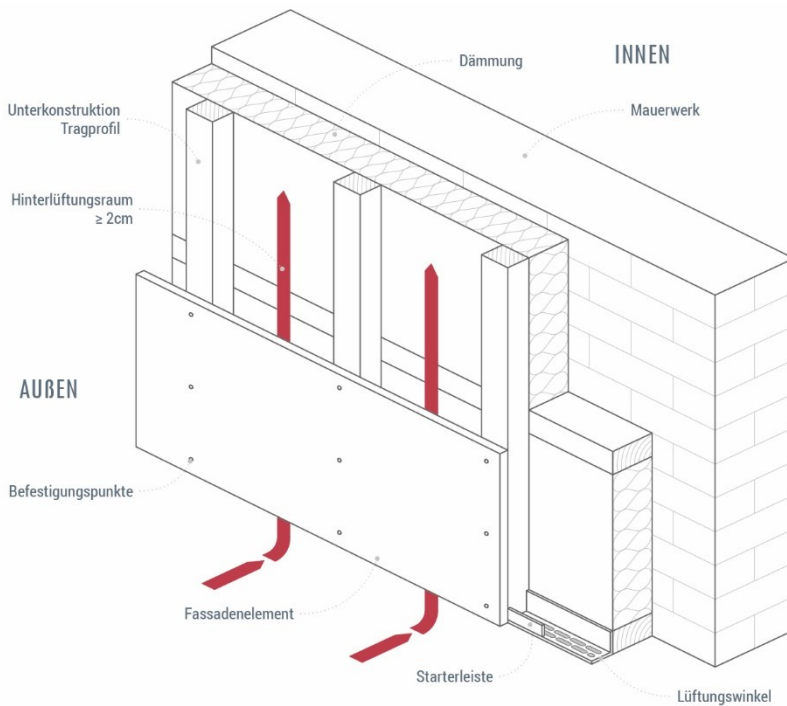


Abbildung 3.10: Systemkomponenten einer vorgehängten hinterlüfteten Fassade nach (FVHF, 2017)

Der Hinterlüftungsraum lässt sich als eine durchströmte Ebene zwischen dem Bekleidungselement und der Wärmedämmung beschreiben, dessen strömende Luft in energetischer Hinsicht vielfältig positiv genutzt werden kann. Der Hinterlüftungsraum ist

zudem essenziell für die Bauphysik der Fassade, insbesondere für den Feuchte- und Wärmeschutz. Im Bereich des Feuchteschutzes dient die Hinterlüftung der Abführung von überschüssiger Feuchte im Bauteil, wodurch eine mögliche Tauwasserbildung unterbunden werden soll. Dies resultiert aus dem günstigen Dampfdiffusionsverhalten.

Im Winter fungiert die Luft im Zwischenraum als eine Art Wärmepolster, das dem Transmissionswärmeverlust entgegenwirkt (abhängig von der Luftwechselrate). Dadurch benötigt die Wand mehr Zeit, um sich abzukühlen. Dieser Effekt wird gemäß (DIN EN ISO 6946, 2018) durch den äußeren Wärmeübergangswiderstand R_{se} berücksichtigt. Zur Reduzierung des Wärmestroms der Fassade im Sommer hingegen, besteht in der Hinterlüftungsebene das Potenzial Wärme über die Luftzirkulation (sog. Kamineffekt) abzutragen. Steigt die Temperaturdifferenz zwischen der vorgehängten Bekleidung und der Luft an, so erhöht sich zugleich die Luftgeschwindigkeit in der Hinterlüftungsebene. Dies resultiert daraus, dass sich die Dichte der Luftschicht ρ während der Erwärmung verringert, aufsteigt und sich gegen die Gravitation bewegt. (Walsdorf-Maul, 2017)

Die Hinterlüftung leistet somit einen erheblichen Beitrag zur Steuerung des Wärmehaushaltes des Fassadenbauteils.

Zur Wärmebilanzierung einer hinterlüfteten Fassade sind die drei Wärmetransportmechanismen, Strahlung, Konvektion und Leitung zu berücksichtigen. Vor allem mit der vorherrschenden Konvektion und Oberflächenstrahlung innerhalb der Hinterlüftung lässt sich der Wärmeeintrag stark beeinflussen. Folgende Abbildung 3.11 zeigt die Wärmebilanz an einer vorgehängten hinterlüfteten Fassade:

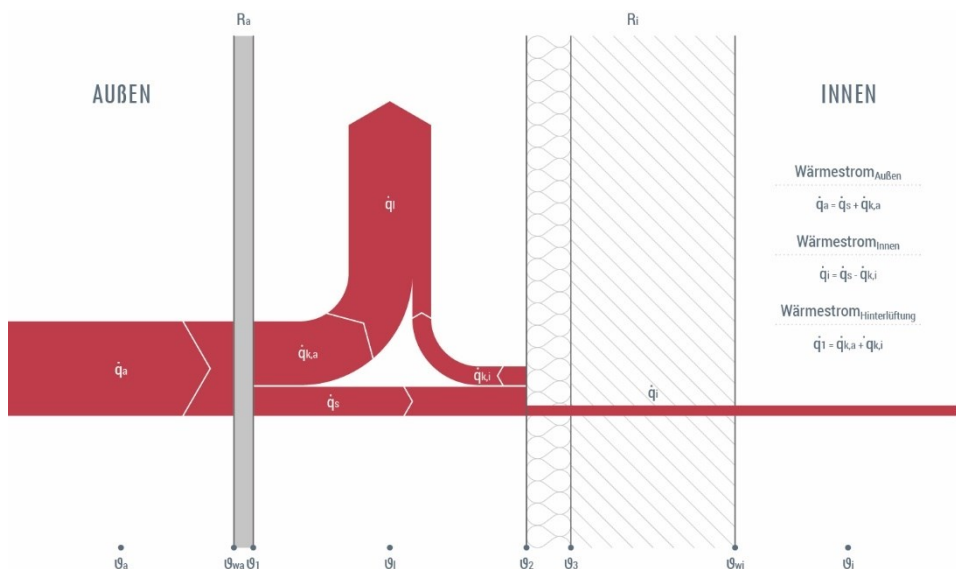


Abbildung 3.11: Wärmetransportmechanismen an einer hinterlüfteten Wandkonstruktion nach (Walsdorf-Maul, 2017)

Die (DIN EN ISO 6946, 2018) beschreibt im Abschnitt 6.9 die erforderlichen konstruktiven bzw. geometrischen Eigenschaften einer Luftschicht zur Sicherstellung der Tauwasserfreiheit und der wärmeschutztechnischen Funktionen. Ebenso greift die FVHF-Leitlinie diese Anforderungen auf (siehe Tabelle 3.3).

Durch Sensormonitoring und einer Gebäudeautomation können konstruktive Änderungen von bauphysikalischen Eigenschaften gezielt gesteuert werden, um zum einen die Temperatur der Luftschicht und zum anderen die Luftbewegung je nach Erfordernis zu modifizieren. Der im Bauteil stattfindende Wärmestrom sowie der Wärmeaustausch zwischen den Bauteilschichten werden ferner dynamisch kontrolliert, wodurch sich schließlich der bisher statische U-Wert dynamisch verändert. Aktuell ist unter dem Begriff „dynamischer U-Wert“ die dynamische Analyse des U-Wertes unter Betrachtung des instationären Wärmeflusses im Bauteil durch Einbezug der veränderlichen Außen- und Innentemperaturen, solarer Strahlung und der thermischen Masse bekannt. Der instationäre Wärmefluss ist hierbei lediglich von den äußerlichen Randbedingungen abhängig. Dies macht eine Übertragung der Ergebnisse auf andere Fälle schwierig, da eine starke Abhängigkeit vom Standort vorliegt. Durch eine zusätzliche Berücksichtigung dynamischer Veränderungen der bauphysikalischen Eigenschaften im Bauteil können bauteilbedingte Betrachtungen erfolgen, dessen Übertragbarkeit auf andere Gebäude/Bauteile ermöglicht wird.

Tabelle 3.3: Konstruktive und geometrische Anforderungen an Luftschichten gemäß (DIN EN ISO 6946, 2018) und (FVHF, 2017)

Anforderungsart	Anforderungsbeschreibung
geometrisch	$d_{\text{Abstand,min}} = 20$ mm vor der Außenwand $d_{\text{Hinterlüftungsquerschnitt}} = 30$ bis 50 mm (planerisch inkl. Bauwerkstoleranzen) Dachrand mit $A_{\text{min}} = 50$ cm ² pro m Wandlänge Sockelbereich mit $A_{\text{min}} = 50$ cm ² pro m Wandlänge
konstruktiv	Be- und Entlüftungsöffnungen am Gebäudefußpunkt und am Dachrand untere Abschluss der VHF: $d_{\text{min}} = 30$ cm oberhalb der Geländeoberfläche Sockelbereich: Sicherung der Öffnungen zur Hinterlüftung durch Lüftungsgitter

Folgende konstruktive und bauphysikalische Änderungen kommen im Rahmen der neuen Interpretation des dynamischen U-Wertes in Frage:

- Geometrische Änderung der Be- und Entlüftungsöffnungen: Schließen der Be- und Entlüftungsöffnung oder Reduzierung der Öffnungsweite zur Steigerung des Potenzials des Wärmepolsters
- Fassadenkieme an der äußeren Bekleidungsebene zur Nachtauskühlung
- Kombinierte natürliche Belüftung: Zuluft über ein Erdkanal oder über die Außenluft
- Konstruktive Unterteilung der vertikalen und/oder horizontalen Luftschicht über Klappensysteme
- gezielte Beeinflussung der Temperatur der äußeren Bekleidungsebene durch thermische Aktivierung

3.2.4 Praxisbeispiele für thermisch aktivierte Fassaden

Sowohl in der Forschung als auch in der Praxis haben sich thermisch aktivierte Fassaden bereits etabliert. Nachstehend werden daher zwei Praxisbeispiele in Form von Steckbriefen vorgestellt:

ALNATURA ARBEITSWELT



Ort / Lage

- › Mahatma-Ghandi-Straße 7, Darmstadt

Nutzungsart

- › Büro- und Verwaltungsgebäude

Architekt

- › haascookzemmrich STUDIO2050, Stuttgart

Bauherr

- › Alnatura Produktions- und Handels GmbH

Beschreibung des Fassadensystems

Bei der Fassade des Alnaturagebäudes handelt es sich um Europas größte zweischalige Stampflehmfassade. Die $d_{\text{ges}} = 68\text{cm}$ dicke Fassade ist selbsttragend und verfügt über eine eingestampfte Dämmschicht aus recyceltem Schaumglasschotter ($d_{\text{dämm}} = 17\text{cm}$). Nahe der Innenoberfläche sind wasserführende Rohrleitungen zur thermischen Aktivierung eingebracht, die mit Erdwärme gespeist werden. Zur Vermeidung der Lehmauswaschung wurden Trasskalkmörtel-leisten an der äußeren Lehmsschicht ausgeführt.



Integrierte Rohrsysteme
(wasserdurchströmt)



Ressourcenschonend
(Trägermaterial: Lehm)



Geothermische
Energieeinspeisung



Energetische und bauphysikalische Eigenschaften

U-Wert = $0,35\text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

Energiequelle der thermischen Aktivierung: geothermisch mit einer Leistung von 82 kW

ZOLLVEREIN SCHOOL OF MANAGEMENT AND DESIGN



Ort / Lage

- › Zeche Zollverein, Essen

Nutzungsart

- › Schulgebäude

Architekt

- › Böll und Krabel, Essen

Bauherr

- › Entwicklungsgesellschaft Zollverein mbH, Essen

Beschreibung des Fassadensystems

Die Gebäudefassade besteht aus $d = 30$ cm dickem Sichtbeton (einschalige Konstruktion) mit integrierten wassergeführten Rohrsystemen. Das mäanderförmige Rohrsystem wird geothermisch mit Grubenwasser über unterirdische Nahwärmeleitungen gespeist. Die thermische Aktivierung dient der konstanten Konditionierung der Außenwand (TemperaturInnenoberfläche > 18 °C), um somit auf eine Wärmedämmung verzichten zu können. Mit der „aktiven Wärmedämmung“ konnten die Anforderungen der damals gültigen EnEV eingehalten werden.



Integrierte Rohrsysteme
(wasserdurchströmt)



Ressourcenschonend
(keine Verwendung von
Wärmedämmung)



Geothermische
Energieeinspeisung durch
Grubenwasser



„Aktive Wärmedämmung“ über thermische Aktivierung

WRG: Versorgung mit 30 °C warmen Grubenwasser aus 1000 m Tiefe (thermales Tiefenwasser)

4 Industriegebäude und ihre Merkmale

Die Art der Nutzung und die daraus resultierende Abwärme spielen eine zentrale Rolle bei der Untersuchung von Bauteiloptimierungen in Bezug auf energetische Parameter. Sie sind die entscheidenden Einflussfaktoren bei der Berechnung des Kühlenergiebedarfs, der wiederum die erforderliche Leistungsfähigkeit der Klimatisierungskomponenten bestimmt. Insbesondere im Industriesektor sind die Abwärmemengen im Vergleich zu anderen Gebäudearten, je nach Nutzung und der vorhandenen Prozesskette, als relativ hoch einzustufen. Demzufolge ruhen hier hohe Energieeffizienzpotenziale. Zudem stellen Industriegebäude eine große Fassadenfläche zur Verfügung, die meist lediglich bauphysikalische Mindestanforderungen erfüllt. Dadurch eröffnen sich Möglichkeiten für eine erweiterte und komplexere Betrachtung energetischer Optimierung. Es treten jedoch Herausforderungen auf, die dabei berücksichtigt werden müssen:

- volatile innere thermische Lasten
- zonenweise wechselnde Anforderungsprofile, je nach Prozesskette
- ungünstiges Verhältnis von Volumen zu Grundfläche

Die nachfolgenden Abschnitte werden die relevanten Einflussgrößen beleuchten und genauer untersuchen. Dabei werden typische Gebäudehülltypologien, klimatische Anforderungen und interne Wärmelasten in Abhängigkeit von verschiedenen Industriebranchen sowie die üblicherweise verwendeten Klimatisierungstechnologien näher erläutert.

4.1 Hüllprinzipien und Typologien

Gebäudehüllen im Industrie- und Gewerbesektor bergen ein großes und nahezu nicht erforschtes energetisches Potenzial. Basierend auf Statistiken aus dem Jahr 2010 wird dem deutschen Gebäudebestand eine Fassadenfläche von etwa 5,2 Milliarden m² zugeschrieben, was die energetische Bedeutung unbestreitbar macht. Vorgehängte hinterlüftete Fassaden, die im Rahmen der Dissertation in den Fokus rücken, entsprechen einem Anteil von ca. 15 %, sprich 800 Millionen m² Fassadenfläche. Durchschnittlich wird einem Gebäude eine Fassadenfläche von rund 800 m² zugerechnet, was darauf schließen lässt, dass in Deutschland etwa eine Millionen Bestandsgebäude mit einer

vorgehängten hinterlüfteten Fassadenkonstruktion vorhanden sind. (Knackstedt, Boddenberg und Herrmann, 2010)

Aus öffentlich abrufbaren Statistiken, wie beispielsweise die zuvor erwähnten, lassen sich nur grobe Informationen zum Gebäudebestand im Industriesektor ableiten. Es sind keine Informationen zum prozentualen Anteil an Industriegebäuden in Deutschland herzuleiten. Insbesondere statistische Daten zu typischen Fassadentypen in diesem Sektor sind inexistent. Um diese Wissenslücke zu schließen, wurden im Zuge dieses Kapitels Daten aus dem Forschungsprojekt „ENOB:dataNWG“, des Instituts Wohnen und Umwelt GmbH (IWU) angefordert. Resultat des Forschungsprojektes ist eine bisher erstmalige Forschungsdatenbank für Nichtwohngebäude, die u.a. die Möglichkeit bietet, auf Grundlage von Geobasisdaten, Informationen zur energetischen Qualität von Nichtwohngebäuden einzuholen. Im Rahmen dieses Projektes wurden über drei Teilprojekte bisher insgesamt 66.000 Nichtwohngebäude identifiziert, bewertet und schließlich in der Datenbank implementiert. Dabei wurden Gebäudemerkmale wie Bauwerkstyp, Gebäudefunktion und Branche, energetische Qualität des Gebäudes und der dort vorliegenden Anlagentechnik, Eigentümerstruktur und weitere Informationen gesammelt. Das Projekt wird von einem aus drei Instituten bestehenden Konsortium bearbeitet. Dazu gehören das IWU, Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung (IÖR) und die Bergische Universität Wuppertal, Fachgebiet Ökonomie des Planens und Bauens (BUW-ÖPB). (ENOB:dataNWG, 2021a)

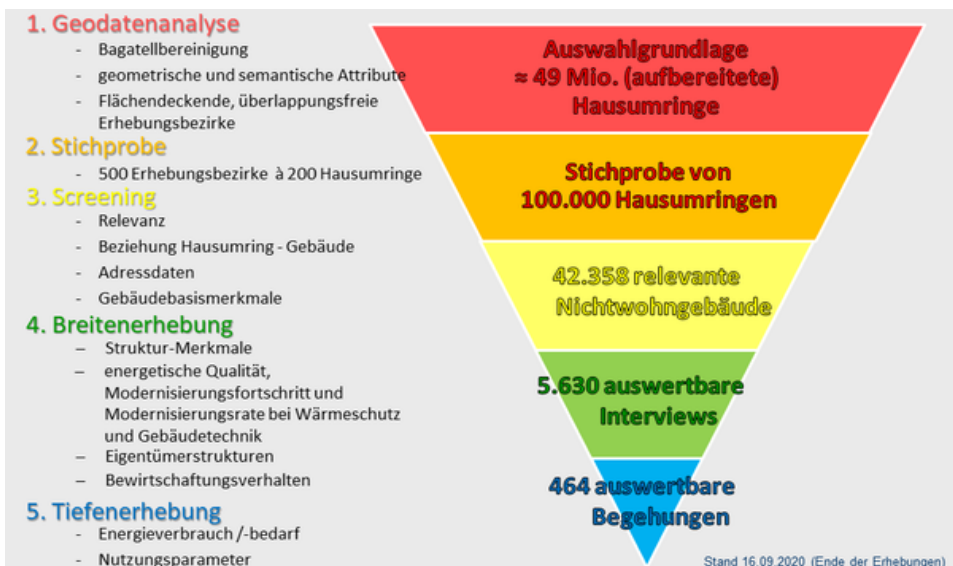
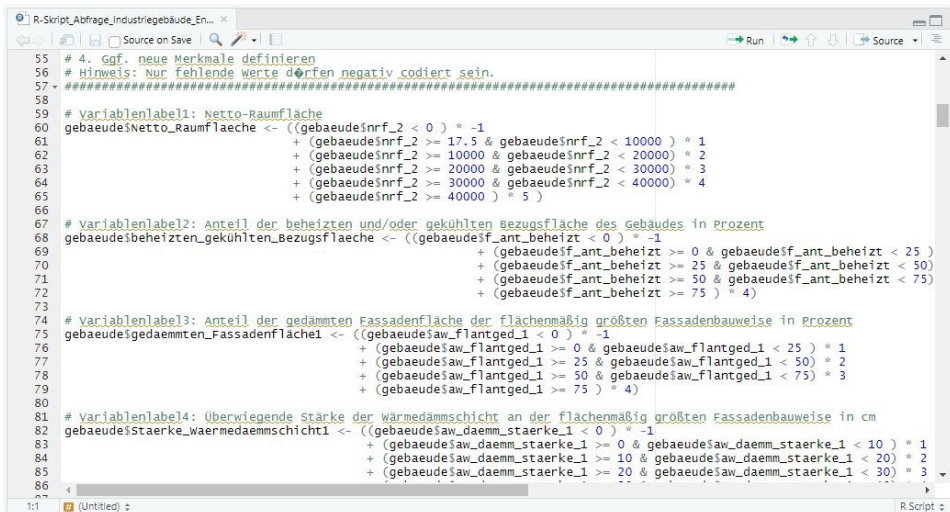


Abbildung 4.1: Projektdesign ENOB:dataNWG - Datenerhebung (ENOB:dataNWG, 2021b)

Zur fundierten Untersuchung von typischen Fassadenbauten im Industriesektor wurde eine Fernrecherche über R-Skript durchgeführt. Dabei handelt es sich um die Statistik-Software „R“, mit der über ein Skript bzw. die eingegebene Syntax Ergebnisse aus der Datenbank gezogen werden können. Voraussetzung ist hierbei ein Vertragsschluss mit der IWU.



```

55 # 4. ggf. neue Merkmale definieren
56 # Hinweis: Nur fehlende Werte dürfen negativ codiert sein.
57 #####
58
59 # Variablenlabel1: Netto-Raumfläche
60 gebaueDesNetto_Raumflaeche <- ((gebaueDesnrnf_2 < 0) * -1
61 + (gebaueDesnrnf_2 >= 17.5 & gebaueDesnrnf_2 < 10000) * 1
62 + (gebaueDesnrnf_2 >= 10000 & gebaueDesnrnf_2 < 20000) * 2
63 + (gebaueDesnrnf_2 >= 20000 & gebaueDesnrnf_2 < 30000) * 3
64 + (gebaueDesnrnf_2 >= 30000 & gebaueDesnrnf_2 < 40000) * 4
65 + (gebaueDesnrnf_2 >= 40000) * 5)
66
67 # Variablenlabel2: Anteil der beheizten und/oder gekühlten Bezugsfläche des Gebäudes in Prozent
68 gebaueDesbeheizten_gekuehltten_Bezugsflaeche <- ((gebaueDesf_ant_beheizt < 0) * -1
69 + (gebaueDesf_ant_beheizt >= 0 & gebaueDesf_ant_beheizt < 25)
70 + (gebaueDesf_ant_beheizt >= 25 & gebaueDesf_ant_beheizt < 50)
71 + (gebaueDesf_ant_beheizt >= 50 & gebaueDesf_ant_beheizt < 75)
72 + (gebaueDesf_ant_beheizt >= 75) * 4)
73
74 # Variablenlabel3: Anteil der gedämmten Fassadenfläche der flächenmäßig größten Fassadenbauweise in Prozent
75 gebaueDesgedaemmtten_Fassadenflaeche1 <- ((gebaueDesaw_flantged_1 < 0) * -1
76 + (gebaueDesaw_flantged_1 >= 0 & gebaueDesaw_flantged_1 < 25) * 1
77 + (gebaueDesaw_flantged_1 >= 25 & gebaueDesaw_flantged_1 < 50) * 2
78 + (gebaueDesaw_flantged_1 >= 50 & gebaueDesaw_flantged_1 < 75) * 3
79 + (gebaueDesaw_flantged_1 >= 75) * 4)
80
81 # Variablenlabel4: Überwiegende Stärke der Wärmedämmschicht an der flächenmäßig größten Fassadenbauweise in cm
82 gebaueDesstaerke_waermedaemmschicht1 <- ((gebaueDesaw_daemm_staerke_1 < 0) * -1
83 + (gebaueDesaw_daemm_staerke_1 >= 0 & gebaueDesaw_daemm_staerke_1 < 10) * 1
84 + (gebaueDesaw_daemm_staerke_1 >= 10 & gebaueDesaw_daemm_staerke_1 < 20) * 2
85 + (gebaueDesaw_daemm_staerke_1 >= 20 & gebaueDesaw_daemm_staerke_1 < 30) * 3
86 + (gebaueDesaw_daemm_staerke_1 >= 30) * 4)

```

Abbildung 4.2: Auszug aus R-Skript

Im Zuge der statistischen Beurteilung der Industriegebäude hinsichtlich Fassadenbauweise und der Art der thermischen Konditionierung waren die folgenden Variablen maßgebend, die aus der „Variablendokumentation Fernrecherchen“ vom 08. August 2022 stammen (IWU, 2022):

- Nutzungsart des Gebäudes
- Anteil der beheizten und/oder gekühlten Bezugsfläche des Gebäudes
- Bauweise der Fassade
- Vorhandensein einer Wärmedämmung an den Außenwänden
- Flächenanteil der Verglasungen/Fenster an der Fassadenfläche in Prozent
- Fassadenfläche des Gebäudes gegen Außenluft
- Freie Fassadenfläche des Gebäudes in Himmelsrichtungen Nord/Ost/Süd/West
- Überwiegende Beheizungsart
- Haupt-Energieträger im Gebäude
- Haupt-Wärmeerzeuger
- Überwiegende Art der Heizwärmeübergabe in der Nutzungsfläche
- Vorhandensein einer Solaranlage an der Fassade

- Vorhandensein einer Kühlung mit zentralen mechanischen Kälteanlagen
- Vorhandensein einer passiven Kühlung durch sommerliche Nachtlüftung oder einer freien Kühlung
- Nutzungsart der zentralen mechanischen Kälteerzeugung - Raumkühlung und -klimatisierung
- Nutzungsart der zentralen mechanischen Kälteerzeugung - Gewerbliche Kälte (für Kühl- oder Gefrierräume bzw. Prozesskälte)
- Art der Rückkühlung
- Überwiegende Art der Kälteübergabe in der Nutzungsfläche

Um ein tiefgreifendes Verständnis der zuvor genannten Variablen zu erlangen, wurden insgesamt 46 statistische Auswertungen durchgeführt, die auf der Hauptgebäudekategorie 8 basieren. Diese Kategorie umfasst 1346 Gebäude, die als "Produktions-, Werkstatt-, Lager- oder Betriebsgebäude" klassifiziert sind. Im weiteren Verlauf werden nur die wesentlichen Auswertungen detailliert erläutert, um einen klaren Überblick zu bieten. Dennoch werden zur Vollständigkeit alle weiteren Auswertungen in der Anlage 1 dargestellt.

Innerhalb der Hauptgebäudekategorie "Produktions-, Werkstatt-, Lager- oder Betriebsgebäude" sind die Unterkategorien unter 800 bis 811 in der Variablendefinition zu finden. Diese Unterkategorien sind in Abbildung 4.3 aufgelistet.

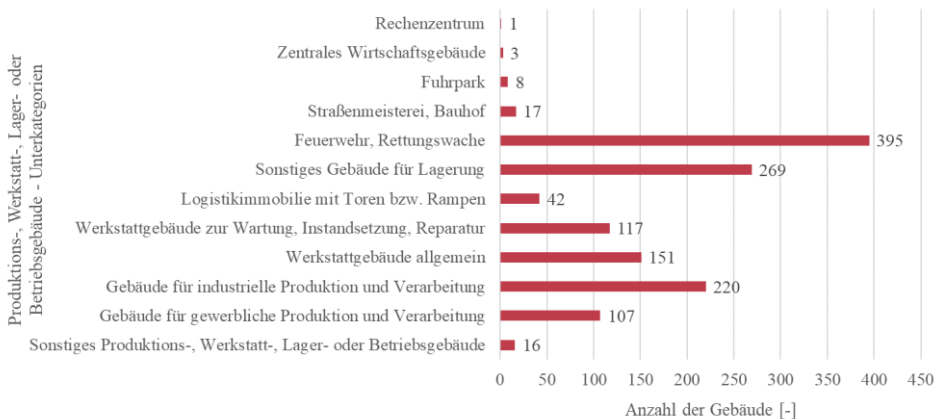


Abbildung 4.3: Gebäude der Unterkategorien 800 bis 811 und deren Häufigkeit

In dieser Dissertation liegt der Fokus auf bestimmten Gebäuden mit hohen Wärmelasten, für die eine nächtliche Kühlung über eine thermische Aktivierung sinnvoll wäre. Zu den relevanten Kategorien, die für diese Betrachtung von Bedeutung sind, gehören "Sonstige Gebäude für Lagerung", "Gebäude für industrielle Produktion und

Verarbeitung", "Gebäude für gewerbliche Produktion und Verarbeitung" und "Rechenzentrum". Die Kategorien "Gebäude für industrielle Produktion und Verarbeitung" und "Sonstige Gebäude für Lagerung" sind nach den Feuerwehr- und Rettungswachen die am häufigsten vertretenen Unterkategorien.

In der nächsten Auswertung (siehe Abbildung 4.4) werden die energetischen Standards der Gebäude untersucht, wobei zwischen dem Passivhausstandard, dem Effizienzhaus 55 und dem Effizienzhaus 70 unterschieden wird. Es ist erkennbar, dass lediglich etwa 1 % der Gebäude einem dieser energetischen Standards entsprechen. Das bedeutet, dass ungefähr 99 % der Gebäude nicht den hier abgefragten Standards zuzuordnen sind. Es bleibt jedoch unklar, ob diese Gebäude möglicherweise einem anderen Energiestandard entsprechen oder ob sie tatsächlich keine energetischen Maßnahmen erfahren haben.

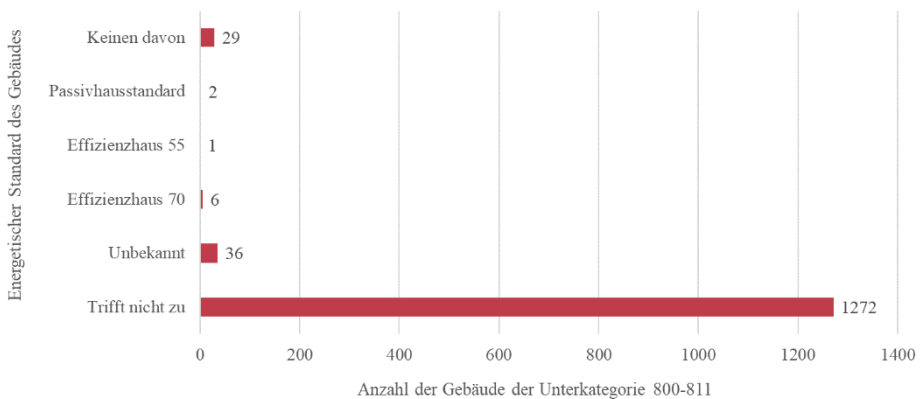


Abbildung 4.4: Energetischer Standard der Gebäude der Unterkategorien 800 bis 811

Die in Abbildung 4.5 dargestellte Auswertung gibt Aufschluss darüber, ob seit dem Jahr 2010 Maßnahmen an der Gebäudehülle durchgeführt worden sind. Dabei zeigt sich, dass etwa 92 % der Gebäude keine energetischen Maßnahmen an ihrer Gebäudehülle umgesetzt haben. Diese Erkenntnis lässt auf ein großes Potenzial für die Integration neuer Fassadenkonzepte schließen, da diese Gebäude im Zuge der Energiewende höchstwahrscheinlich eine solche energetische Sanierung durchführen müssen. Die Tatsache, dass der überwiegende Teil der Gebäude bisher keine Maßnahmen an ihrer Gebäudehülle durchgeführt hat, verdeutlicht den dringenden Handlungsbedarf, nachhaltige Lösungen zu implementieren.

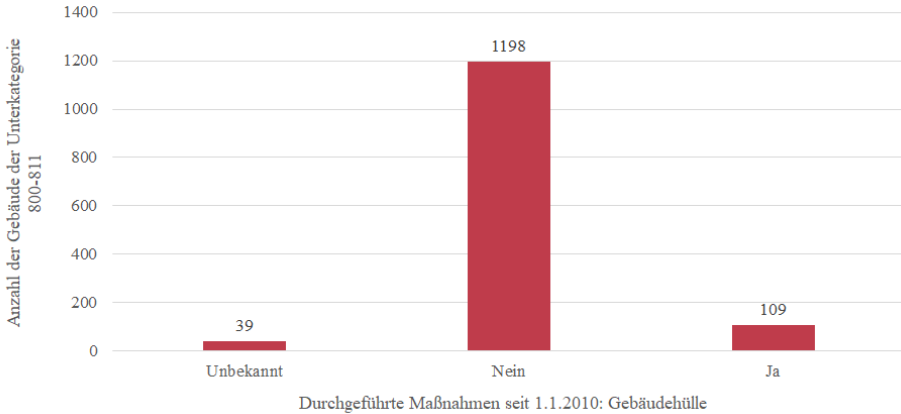


Abbildung 4.5: Maßnahmen an der Gebäudehülle seit 2010

Im Zuge der nachstehenden Abfrage wurde die Fassadenbauweise der untersuchten Gebäude ermittelt. Es stellt sich heraus, dass die massive Bauweise den größten Anteil mit 66 % ausmacht, während die Leichtbauweise lediglich 13 % repräsentiert. Andere Fassadensysteme wie Glas-, Element- oder Pfosten-Riegel-Fassaden sind unter der Kategorie "Fassadensystem" zusammengefasst und machen einen Anteil von 1,6 % aus. Dieser geringe Anteil lässt sich dadurch erklären, dass Gebäude der Hauptkategorie 8 keinen Fokus auf Design oder Sichtbezug nach außen legen. Zudem muss der Sichtbezug von außen nach innen minimiert werden, um eine gewisse Vertraulichkeit zu gewährleisten. Weiterhin weisen solche Gebäude bereits hohe Wärmelasten im Innenraum auf, weshalb das Ziel darin besteht, den Anteil an opaken Flächen zu maximieren.

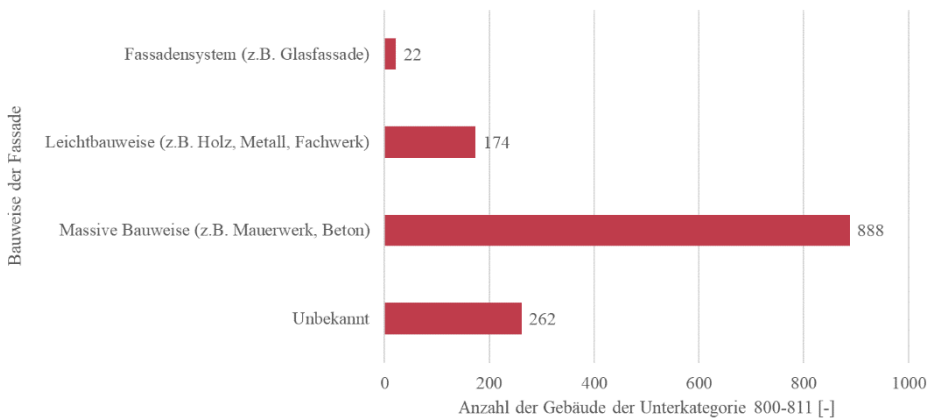


Abbildung 4.6: Fassadenbauweise der Gebäude der Unterkategorie 800-811

Die eben genannten Bauweisen wurden weiter differenziert. Im Bereich der massiven Bauweise stellt sich heraus, dass die einschalige Konstruktion mit schweren Baustoffen wie Beton den größten Anteil mit 54 % ausmacht (siehe Abbildung 4.7). Diese Ergebnisse waren zu erwarten, da aus vorherigen Auswertungen hervorgeht, dass seit 2010 nur 8 % der Gebäude energetische Maßnahmen an der Gebäudehülle erfahren haben und lediglich 1 % den energetischen Standards entsprechen. Einschalige Fassaden aus Beton oder schwerem Mauerwerk gelten als konventionelle Bauweisen und werden seit Jahrzehnten im Bauwesen angewendet. Aufgrund der hohen Anzahl einschaliger, massiver Konstruktionen im Bestand erweist sich das energetische Sanieren mit Hilfe vorgehängter hinterlüfteter Konstruktion als äußerst zielführend. Der Anteil der bereits vorliegenden vorgehängten hinterlüfteten Fassaden beträgt 4 %.

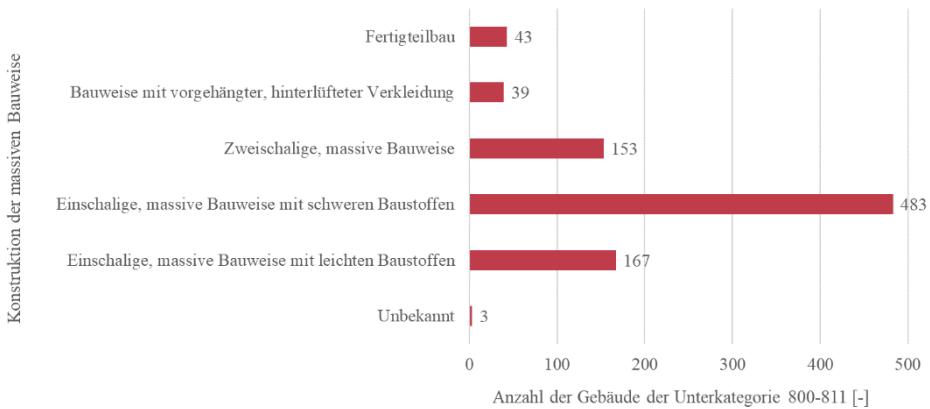


Abbildung 4.7: Konstruktionsarten der massiven Bauweise und deren Häufigkeiten

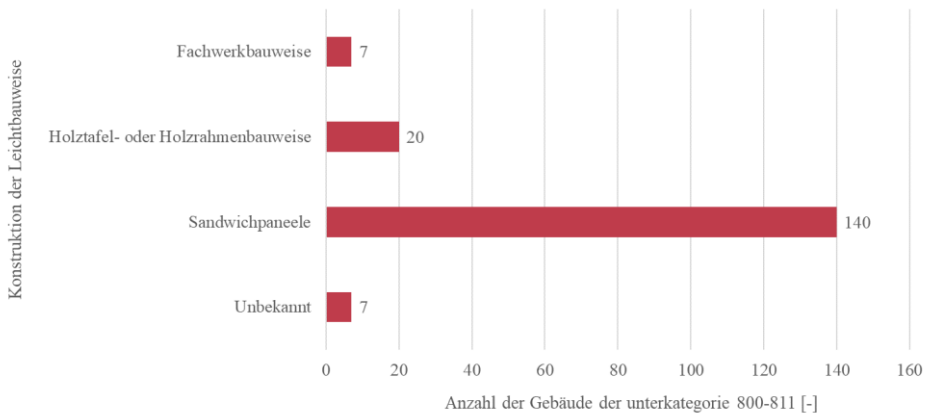


Abbildung 4.8: Konstruktionsarten der leichten Bauweise und deren Häufigkeiten

Bei der Betrachtung der leichten Bauweise dominieren die Sandwichpaneele mit einem Anteil von etwa 80 %. Im Gegensatz dazu sind die Holz- und die Fachwerkbauweise in dieser Gebäudekategorie nur in geringem Umfang vertreten (vgl. Abbildung 4.8). Innerhalb der kaum vertretenen Bauweise "Fassadensystem" ist die Pfosten-Riegel-Fassade am häufigsten anzutreffen (siehe Abbildung 4.9)

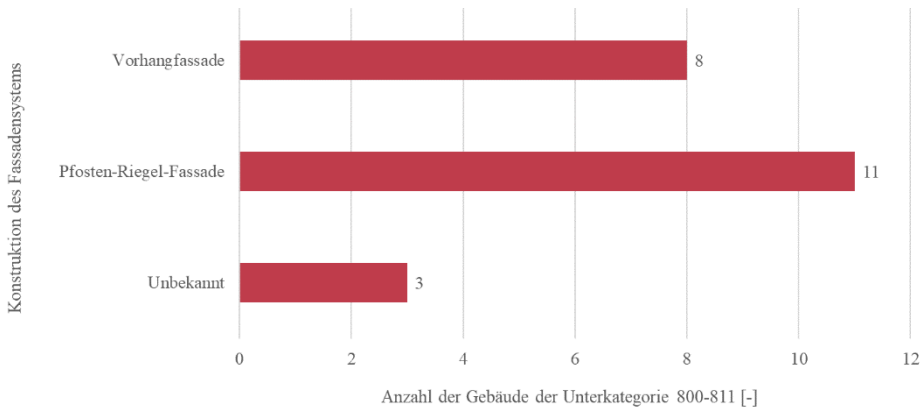


Abbildung 4.9: Konstruktionsarten der Bauweise „Fassadensysteme“ und deren Häufigkeiten

Die nächste Auswertung (siehe Abbildung 4.10) befasst sich mit dem Vorhandensein einer Wärmedämmung an den Außenwänden. Es ist überraschend, dass ein Anteil von etwa 37 % der Außenwände tatsächlich gedämmt ist. Dies steht im Widerspruch zu dem geringen Anteil (8 %) der Gebäude, an denen seit 2010 Maßnahmen an der Gebäudehülle durchgeführt wurden, da das Dämmen einer Fassade als solche Maßnahme gilt. Daher wird angenommen, dass die Wärmedämmung bereits vor 2010 angebracht wurde.

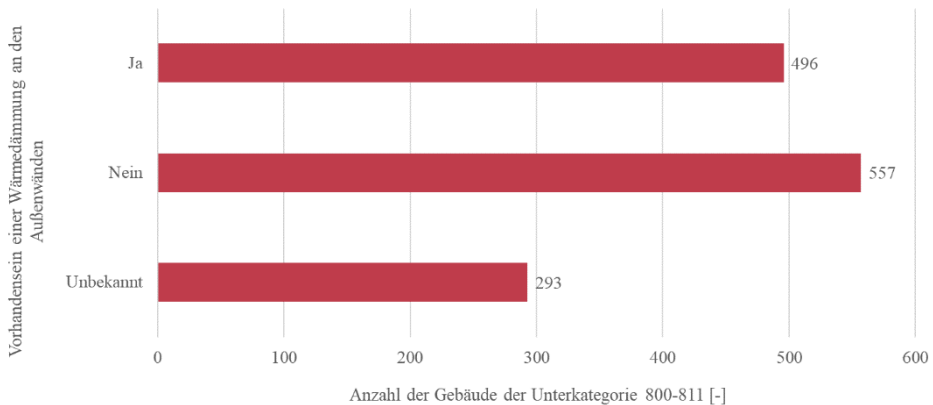


Abbildung 4.10: Vorhandensein einer Wärmedämmung an Außenwänden

Im Rahmen der Auswertung in Abbildung 4.11 wurde ermittelt, wie viele oberirdische Vollgeschosse den einzelnen Gebäuden der Unterkategorie 800-811 zugeordnet werden können. Etwa 79 % dieser Gebäude weisen 5 bis 10 Vollgeschosse auf. Es bleibt jedoch unklar, ob in diesen Gebäuden, auch Mischnutzungen vorliegen, beispielsweise Büroeinheiten o.ä., wodurch diese Vollgeschosse möglicherweise anderen Nutzungen zugeordnet werden und nicht dem Hallenbereich von Produktionsbetrieben. Aus der Anzahl der Geschosse lassen sich im Allgemeinen wichtige Informationen ableiten:

- Abhängigkeit zur Gebäudeklasse und somit Anforderungen gemäß Musterbauordnung (MBO).
- Einfluss auf erforderliche Fugendurchlässigkeit (Luftdichtheit) des Gebäudes.
- Je höher das Gebäude ist, desto größer wird verhältnismäßig die Fassadenfläche im Vergleich zur Dachfläche sein.
- Mit einer zunehmenden Anzahl von Vollgeschossen steigt auch der Heiz- und Kühlbedarf des Gebäudes.

Die restlichen 21 % der Gebäude sind dem Wert "<0" zugeordnet. Es wird vermutet, dass es sich hierbei beispielsweise um Rechenzentren handelt, die aufgrund der Minimierung von externen Wärmelasten oft unterirdisch errichtet werden.

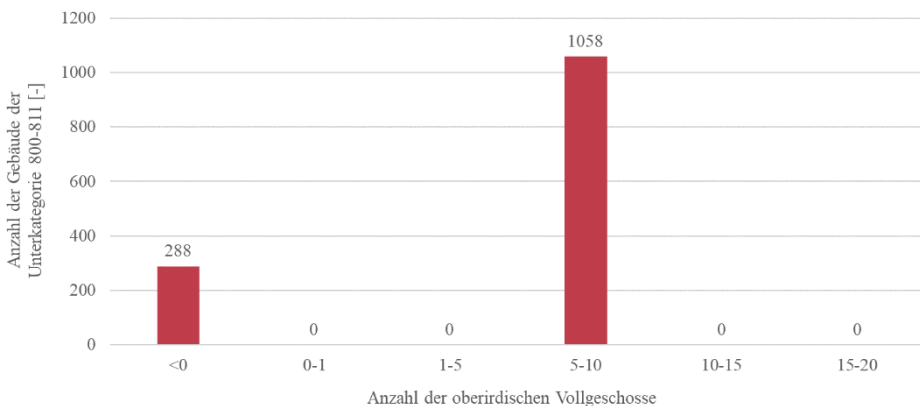


Abbildung 4.11: Anzahl der oberirdischen Vollgeschosse

Im Zuge der nächsten Auswertung wurde die freie Fassadenfläche der Gebäude der Unterkategorie 800-811 in Bezug auf die verschiedenen Himmelsrichtungen untersucht. Es zeigt sich, dass im Durchschnitt etwa 96 % der Gebäude eine Fassadenfläche von 0 bis 1000 m² pro Himmelsrichtung aufweisen. Lediglich wenige Gebäude besitzen eine größere Fassadenfläche. Die Unterscheidung zwischen den Himmelsrichtungen gestaltet

sich aufgrund des breiten Spektrums von 0 bis 1000 m² Fassadenfläche als schwierig. Selbst wenn beispielsweise die Südfassade eine Fläche von 500 m² und die Nordfassade das Doppelte aufweist, fallen beide Flächen immer noch in diese Kategorie. Somit lässt sich anhand der Fassadenfläche allein keine eindeutige Zuordnung zu den Himmelsrichtungen treffen.

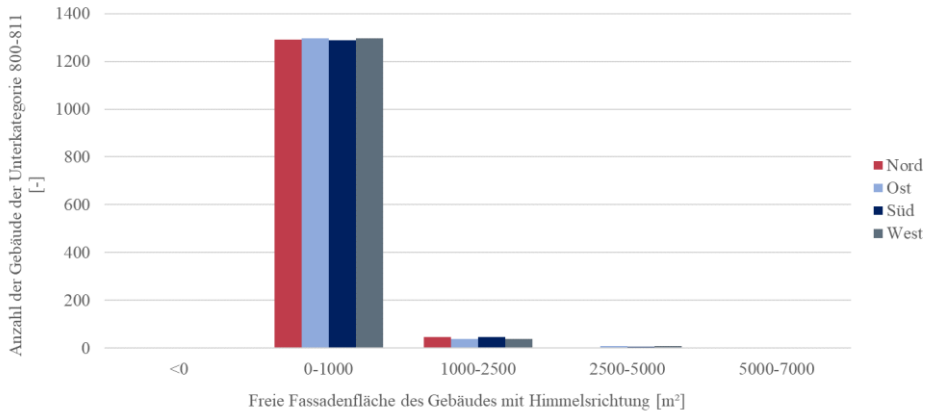


Abbildung 4.12: Konstruktionsarten der Bauweise „Fassadensysteme“ und deren Häufigkeiten

Die nächsten zwei Auswertungen beziehen sich auf die Übergabesysteme für Heizwärme und Kälte. Für die Beheizung werden überwiegend (zu 51 %) Heizkörper verwendet. Dies macht Sinn, da der Heizwärmebedarf in der Gebäudekategorie 8 eher gering ausfällt und somit in einzelnen Aufenthaltsräumen Heizkörper eingesetzt werden. Und wie auch aus den fehlenden Energiestandards der Gebäude deutlich wird, werden vorwiegend Wärmeerzeuger mit hohen Vorlauftemperaturen verwendet. Die anderen Übergabarten, wie Deckenheizung oder thermisch aktivierte Bauteile, erfordern Niedertemperaturen.

Bezüglich der Kühlung werden von den genannten Auswahlmöglichkeiten meist raumluftechnische Anlagen verwendet. Das macht allerdings nur ein Anteil von 4 % aus. Hier wählten die Befragten die Auswahlmöglichkeit „Trifft nicht zu“ aus. Basierend auf dieser Auswertung sowie unter Berücksichtigung weiterer Auswertungen, die in den Anlagen zu finden sind, lässt sich daraus schließen, dass in diesem Fall keine aktiven (mechanischen) Kühlungssysteme vorhanden sind. Ein Anteil von 11 % der Hauptgebäudekategorie 8 nutzen passive Systeme wie Nachtlüftung oder Rückkühlsysteme. Sobald die Gebäude ohne Energiestandard künftig einer energetischen Sanierung unterzogen werden müssen, wird der Primärenergiebedarf der Klimatisierungstechnik zu einem relevanten Thema werden. Dies wird dazu führen, dass sich die aktuellen Ergebnisse der Statistik verändern.

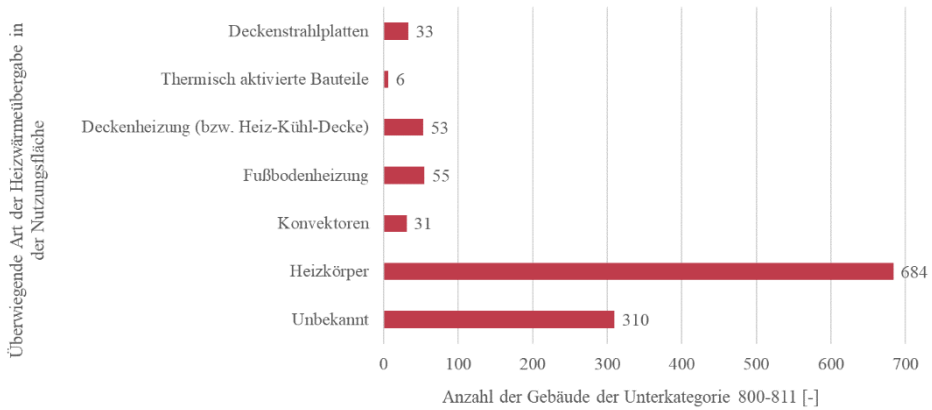


Abbildung 4.13: Art der Heizwärmeübergabe

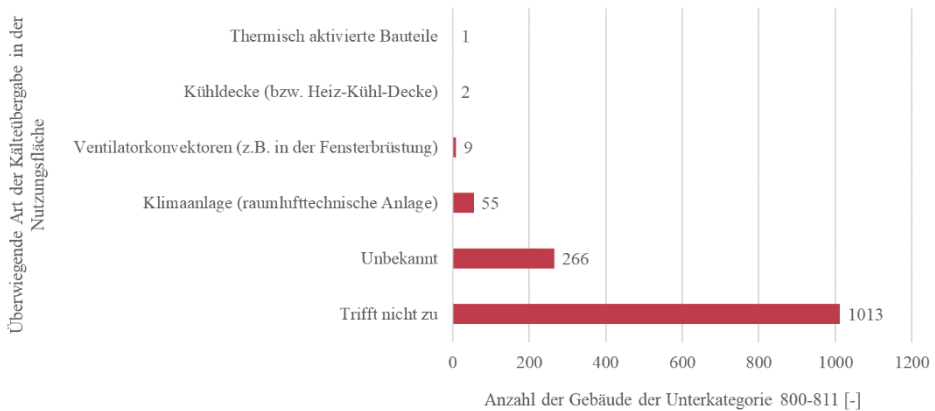


Abbildung 4.14: Art der Kälteübergabe

4.2 Klimatische Anforderungen in Industriegebäuden

Die Konfiguration einer Fassade hängt insbesondere vom Umgebungsklima, aber auch wesentlich von der Nutzung des Gebäudes und der damit einhergehenden Abwärmelast ab. Die abzuführende Wärmemenge ist eine wesentliche Einflussgröße bei der Ermittlung des Kühlbedarfs eines Industriegebäudes und des klimatischen Anforderungsprofils.

Diese lässt sich über die bestehenden oder geplanten Produktionsprozesse (Prozesskette), der Maschinendichte und den eingelagerten Produkten ableiten. Für unterschiedliche Industriebranchen gibt die Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV) Erfahrungswerte für Wärmelasten an (Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V., 2021), die in Tabelle 4.1 aufgelistet sind.

Tabelle 4.1: Abwärmelasten in Abhängigkeit der Industriebranche

Branche	Wärmelastabschätzungen [W/m²]
Druckereien	170
PU-Schaumverarbeitung	120
Kunststoff-Spritzgießen	100
Montagehallen	25 bis 45
Kaltverformen von Blechen (z.B. Tiefziehen)	100 bis 200
Metall-Warmverformen (z.B. Schmieden)	150 bis 300
Mechanische Fertigung (Zerspanung)	50 bis 250
Sandaufbereitung	50 bis 100
Kernherstellung Coldbox	50 bis 80
Kernherstellung Hotbox	100 bis 150
Metall-Formguss	300 bis 400
Metall-Druckguss	200 bis 300

Hieraus wird deutlich, dass die Abwärmelasten je nach Branche stark variieren und das Spektrum innerhalb jeder einzelnen Branche ein großes Temperaturdelta aufweist. Daher sollten diese Informationen lediglich als Richtwerte für die Dimensionierung der Fassade in Bezug auf ihre Kühlleistung dienen. Darüber hinaus ist die Wärmelast in der Regel nicht über die Fläche der Industriehalle konstant. Sie liegt in unterschiedlicher Intensität vor, abhängig von den Standorten der Maschinen, die Abwärme erzeugen. Daher empfiehlt es sich, bei Bereichen mit unterschiedlichen Wärmelasten eine räumlich bauliche Trennung vorzunehmen, um eine effektive Klimatisierung zu ermöglichen. Eine solche partielle Kühlung wird als „Inseltemperierung“ bezeichnet. Im Forschungsprojekt "ETA im Bestand" des BMWi werden derzeit solche Lösungen zur Inseltemperierung

untersucht. Dabei wird die partielle Kühlung über thermisch aktivierte Raumbühlemente (wassergeführte Kühlsysteme) an bestimmten festgelegten Bereichen in Industriehallen umgesetzt.

Klimatische Anforderungen – Temperaturen:

Grundlage für die Ermittlung der klimatischen Anforderungen im Industriesektor stellen die technischen Regeln für Arbeitsstätten (kurz: ASR) dar. Dort werden im Abschnitt A3.5 „Raumtemperatur“ die Anforderungen an die Raumtemperaturen nach den Kriterien „Arbeitsschwere“ und „Körperhaltung“ während der Nutzungsdauer festgelegt (Ausschuss für Arbeitsstätten, 2010). Siehe hierzu folgende Tabelle 4.2. Zudem werden Maximaltemperaturen zur Sicherstellung des Wohlergehens des Arbeitnehmers definiert. Diese stehen in direkter Abhängigkeit zur Außentemperatur. Liegt die Außentemperatur bei unter 26 °C, so ist die Innentemperatur auf 26 °C zu begrenzen. Überschreitet die Außentemperatur die 26 °C-Grenze und liegt zudem die Innentemperatur bei über 26°C, dann sind geeignete Sonnenschutzvorrichtungen gemäß ASR, Abschnitt 4.3 einzuplanen und zusätzliche Maßnahmen nach Abschnitt 4.4, wie aus dem Sommerlichen Wärmeschutz gemäß DIN 4108-2 bekannt, anzusetzen.

Tabelle 4.2: Raumtemperaturanforderungen in Abhängigkeit der Arbeitsschwere und Körperhaltung

Überwiegende Körperhaltung	Arbeitsschwere		
	Leicht	Mittel	Schwer
	Leichte Hand-/Armarbeit bei ruhigem Sitzen bzw. Stehen verbunden mit gelegentlichem Gehen	Mittelschwere Hand-/Arm- oder Beinarbeit im Sitzen, Gehen oder Stehen	Schwere Hand-/Arm-, Bein- und Rumpfarbeit im Gehen oder Stehen
Sitzen	+ 20 °C	+ 19 °C	-
Stehen, Gehen	+ 19 °C	+ 17 °C	+ 12 °C

Klimatische Anforderungen – Feuchte:

Zur Sicherstellung eines hygienischen Klimas legt die Arbeitsstättenrichtlinie auch Anforderungen an die relative Luftfeuchtigkeit fest. Diese ist insbesondere zur Vermeidung von Tauwasserbildung relevant, wodurch Lagergut, Maschinen und die Baukonstruktion vor Kondensat geschützt werden. Das Temperaturniveau muss also stetig über dem Taupunkt gehalten werden. Die Arbeitsstättenrichtlinie beschreibt im Abschnitt A3.6 (Ausschuss für Arbeitsstätten, 2012) die maximal zulässige Luftfeuchtigkeit in

Abhängigkeit von der Lufttemperatur im Raum. Ein Minimalwert für die relative Luftfeuchtigkeit wird dabei nicht formuliert.

Branchenabhängig werden zudem klimatische Toleranzbereiche definiert, die dazu dienen speziellen Fertigungsverfahren optimale Luftfeuchte-Bedingungen bereitzustellen. In Tabelle 4.3 und Tabelle 4.4 sind diese Ideal-Werte bzgl. der relativen Luftfeuchte aufgeführt.

Tabelle 4.3: maximal zulässige Luftfeuchtigkeit in Abhängigkeit von der Raumlufttemperatur

Lufttemperatur [°C]	Relative Luftfeuchte [%]
20	80
22	70
24	62
26	55

Tabelle 4.4: optimale Luftfeuchte-Bedingungen für spezielle Fertigungsverfahren

Branche	optimale rel. Luftfeuchtigkeit [%]
Druckindustrie	50 bis 65 (Brune Luftbefeuchtung Proklima GmbH)
Lagerung von Leiterplatten	30 bis 50 bei 18 bis 22 °C (Janaer Leiterplatten, 2009)
Holzindustrie	40 bis 60 (Condair GmbH)
Textilindustrie	65 bis 70 bei 20 bis 25 °C (CAREL S.p.A, 2007)

Sonderbeispiel – Kühllager:

Kühllager haben im Industriesektor eine Sonderstellung. Das klimatische Anforderungsprofil in Kühllagern ist stark abhängig von den eingelagerten Produkten. Dies wird vorwiegend in der Lebensmittellagerung deutlich. Entsprechend der Lebensmittelgruppe variieren insbesondere die einzustellenden Temperaturbereiche. Relative Luftfeuchte und die Durchlüftung sind dabei sekundär. In der nachstehenden Tabelle 4.5 werden einige Beispiele im Zusammenhang mit dem Lagergut aufgezeigt.

Tabelle 4.5: Temperaturniveaus im Kühllager-Sektor

Produkt	Temperatur [°C] (rel. Feuchte [%])	Lagergut
Fleischerzeugnisse (Bund für Lebensmittelrecht und Lebensmittelkunde e. V., 2006)	4 - 7	Huftiere, Wild, Geflügel, Nebenprodukte bei der Schlachtung
Gemüse (Landesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit)	1 - 2	Artischocken, Blumenkohl, Broccoli, Fenchel, Karotten, Kohlrabi, Lauch, Radieschen, Rosenkohl, Salat, Spinat
	2 - 4	Chinakohl, Erbsen, Feldsalat, Spargel
	4 - 7	Grüne Bohnen, Zwiebeln
	7 - 10	Aubergine, Gurken, Knoblauch, Paprika
Obst (Landesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit)	12 - 16	Tomaten
	1 - 3	Aprikosen, Birnen, Heidelbeeren, Himbeeren, Kirschen, Kiwis, Pfirsiche
	3 - 7	Äpfel, Avocados, Clementinen, Erdbeeren, Mandarinen, Trauben
Elektrogeräte (Robering Lagersysteme GmbH & Co. KG)	7 - 12	Ananas, Grapefruits, Mangos, Meloe, Papayas, Zitrone
	12-15	Bananen
Druckerpapier (sorembâ GmbH)	10 - 25	
Textilien (Berufsgenossenschaft Energie Textil Elektro Medienerzeugnisse)	20 - 23 (50 – 55 %)	
	20 - 25 (40 - 70 %)	Baumwolle
	20 – 25 (55 - 80 %)	Wolle
	22 - 25 (60 - 70 %)	Seide
	20 - 27 (50 - 75 %)	Chemiefasern

Wie aus den vorstehenden Erläuterungen hervorgeht, ist die Definition eines Anforderungsprofils für Industriehallen nicht eindeutig darstellbar. Eine „typische Produktionshalle“ oder ein „typisches Kühlager“ mit entsprechend genauen Abwärmelasten und klimatischen Anforderungen sind aufgrund der Branchen- und Produktvielfalt nicht existent.

5 ETA-Fassade – Energetische Validierung

Die thermische Aktivierung von Fassaden birgt unzählige Möglichkeiten zur Einbindung von erneuerbaren Energien. Eine gesonderte energetische Optimierung von einzelnen Systemkomponenten eines Gebäudes, ob Baukörper, TGA oder Produktionslinie (im Falle eines Industriegebäudes) betreffend, ist jedoch für die angestrebte Energieautarkie von Gebäuden nicht ausreichend. Eine Energieoptimierung kann unter alleiniger Betrachtung von Einzellösungen nicht gänzlich effizient und nachhaltig gestaltet werden.

Das Forschungsprojekt „ETA - Energietechnologien und Anwendungen in der Produktion“ hat sich im Zeitraum 2013 bis 2018 der Zusammenführung individueller Energieoptimierungspfade angenommen und betrachtet dabei das gesamte System einer Fabrik. Aus dem vom Projektträger Jülich und Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderte Pilotprojekt resultierte die bauliche Umsetzung einer Lernfabrik, die ETA-Fabrik (siehe Abbildung 5.1), die die Systemkomponenten Gebäudetechnik, Prozesskette und Gebäudehülle über die Gebäudeautomation miteinander vereint. Die ETA-Fabrik befindet sich auf dem Campus „Lichtwiese“ der Technischen Universität Darmstadt (siehe Abbildung 5.2) und wurde März 2016 fertiggestellt, mit dem Ziel der künftigen universitären Erforschung von Energieeffizienz und -flexibilität im Industriesektor. Die bisher isolierte Betrachtung der Gebäudehülle wurde im Rahmen der ETA-Fabrik erstmals in energetischer Verknüpfung mit der Halle implementierten Prozesskette aus dem Bereich Metallverarbeitung untersucht. Die energetische Abhängigkeit zwischen der ETA-Fassade und den technischen Anlagen und Maschinen erfolgt über die thermische Aktivierung der Innen- und Außenseite der Fassade und den zwischengeschalteten thermischen Speichern, die es ermöglichen die Abwärme aus den industriellen Prozessen aufzunehmen und weiter zu nutzen. Diese Konfiguration erlaubt die thermisch-energetische Optimierung der Beheizung und Kühlung der gesamten Fabrik. (Abele et al., 2019)

Die ETA-Fassade stellt im Rahmen dieser Dissertation das zu untersuchende Referenzsystem für thermisch aktivierte Gebäudehüllen im Industriesektor dar und wird in diesem Kapitel vorgestellt. Dabei wird auf den konstruktiven Aufbau der Fassade und dessen energetische Performance eingegangen. Dazu werden die Ergebnisse der messtechnischen Untersuchungen aus der im Jahre 2018 stattgefundenen Produktions-Testwoche herangezogen.



Abbildung 5.1: Südostansicht der ETA-Fabrik (Foto: Eibe Sönnecken)

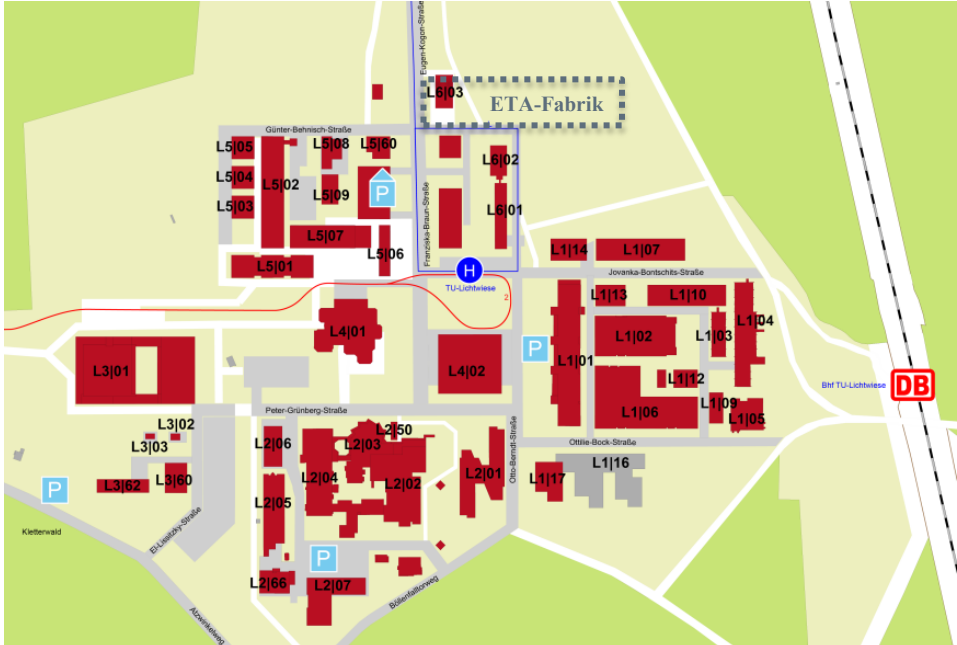


Abbildung 5.2: Campus Lichtwiese - Lage ETA-Fabrik (L6|03) (Technische Universität Darmstadt)

5.1 Beschreibung der ETA-Fassade

Charakteristisch für die ETA-Fassade ist die oberflächennahe Aufnahme und Abgabe von thermischer Energie. Diese Funktion resultiert aus der thermischen Aktivierung, über die im Bauteil integrierten wasserführenden kapillarähnlichen Rohrleitungsnetze. Die typische Multifunktionalität einer Fassade wird somit durch diese thermische Interaktion ergänzt. Insbesondere können somit unter Berücksichtigung des Nachhaltigkeitsgedankens Umweltenergien (z.B. nächtliche atmosphärische Gegenstrahlung) sowie thermische Energieverluste der Umgebung (z.B. Maschinenabwärme) aufgenommen und in das Gesamtsystem eines Industriegebäudes eingespeist werden, wodurch schließlich eine wiederholte Nutzung (Wiederverwertung) ermöglicht wird.

5.1.1 Konstruktiver Aufbau

Bei der ETA-Fassade handelt es sich um eine vorgehängte hinterlüftete Fassade, dessen Struktur sich aus den Anforderungen des Industriebaus ergibt. Die Anforderungen zielen besonders auf eine flexible Grundrissgestaltung mit großen Spannweiten ab. Dies wurde durch die modulare Bauweise der ETA-Fabrik bzw. dessen Gebäudehülle erfüllt.

Die einzelnen opaken Module der Fassade orientieren sich nach Osten und Westen am Standort Lichtwiese der TU Darmstadt und weisen eine gerippte Oberflächenstruktur auf, die optisch im Zusammenhang mit der Innenseite der Gebäudehülle steht. Die Modularität betrifft über die Außenwandkonstruktion hinaus auch die Dachkonstruktion, die in direkter Verbindung mit den Fassadenelementen steht.

Geometrie:

Die Geometrie des Fassadensystems ergab sich insbesondere aus der angestrebten modularen Bauweise und aus logistischen Zwängen. Die Fassadenmodule sollten die tragende Funktion beinhalten und werkseitig gefertigt werden. Somit resultierte ein Fassadenelement mit einer Breite von $b = 2,98$ m und einer Höhe von $h = 10,14$ m. Die Tiefe des Moduls von $d_1 = 0,575$ m (im PI-Plattenbereich) bzw. $d_2 = 1,26$ m (im PI-Stützenbereich) generierte sich insbesondere aus der erforderlichen wärmeschutztechnischen Funktion. Im Zuge der Baustoffwahl sollte sich die Konstruktion angesichts der Nachhaltigkeit auf nahezu ein Material für alle Funktionsschichten beschränken. Um dies zu realisieren wurde ein Mineralschaum (siehe nachstehender Abschnitt „Baustoffe“) für die dämmende Funktion gewählt, der aufgrund der mit Mineralwolle vergleichsweise höheren Wärmeleitfähigkeit, eine größere Dämmstärke zur Kompensation aufweisen musste. (Franz Traub GmbH & Co. KG, 2014) (Abele et al., 2019)

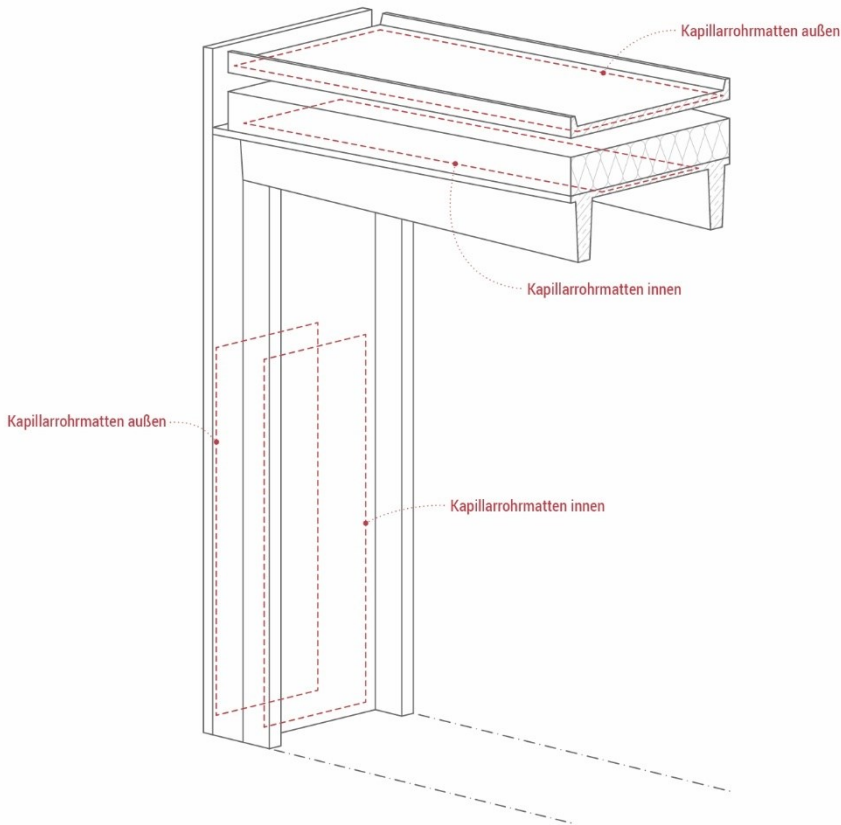


Abbildung 5.3: Modulares ETA-Fassadensystem

Baustoffe/Bauteilschichten:

Wie bereits vorstehend beschrieben, sollte im Rahmen der ETA-Fabrik-Planung der Ansatz einer baustoffeinheitlichen Bauteilkonfiguration erfolgen. Die massive hinterlüftete Fassade basiert auf dem Werkstoff „Zement“, der im Beton sowie in der Dämmschicht Berücksichtigung findet.

Schicht 1 – Innenschale aus Stahlbeton

Die zum Innenraum der Produktionshalle gerichtete Innenschale beinhaltet die tragende Funktion. Diese ist als PI-förmige Platte ausgebildet und besteht aus Stahlbeton bzw. Normalbeton der Güte C50/60. Der Plattenbereich weist eine Dicke von $d_{PI-Platte} = 12 \text{ cm}$ und auf Ebene der Stütze wird eine zusätzliche Dicke bzw. Tiefe von

$d_{PI \text{ Stütze}} = 58 \text{ cm}$ erreicht. Dieses Element wird als Fertigteil im Werk hergestellt. (Franz Traub GmbH & Co. KG, 2014)

Beton birgt konstruktiv und wärmeschutztechnisch vorteilhafte Eigenschaften. Durch die hohe thermische Trägheit resultierend aus der hohen Wärmespeicherfähigkeit, lässt sich die angrenzende Raumwärme aufnehmen und zwischenspeichern. Zusätzlich kann Beton nahezu jede gewünschte Form annehmen und bietet somit im Hinblick auf Modularität kostengünstige Möglichkeiten. Im Industriebau ist vor allen Dingen der Brandschutz von Relevanz. Stahlbeton wird gemäß (DIN 4102-4, 2016) der Baustoffklasse A1 (nicht brennbar) zugeordnet.

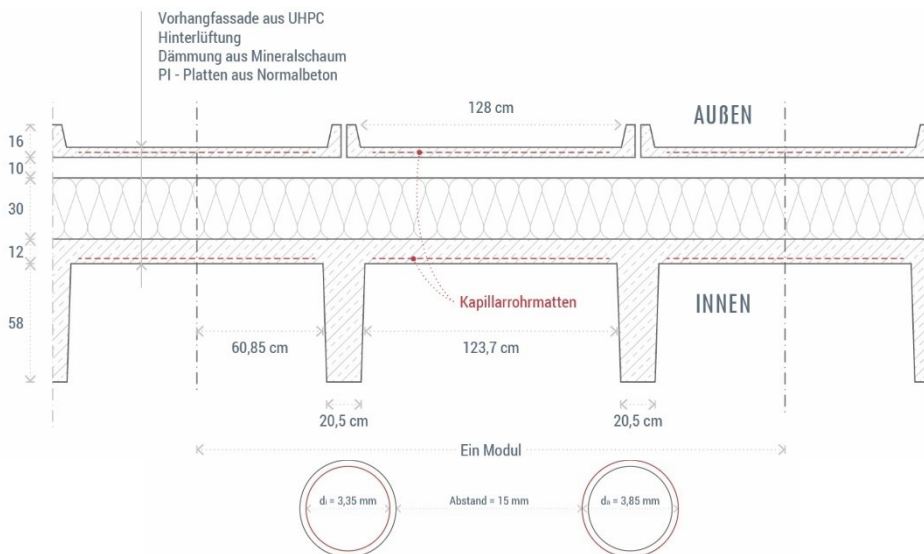


Abbildung 5.4: Konstruktionsaufbau und Kapillarrohrdimensionierung des ETA-Fassadenmoduls

Schicht 2 – Dämmung aus Mineralschaum

Die dämmende Funktion der ETA-Fassade übernimmt eine zementgebundene Proteinschaumschicht (mineralisierter Schaum, MF), die werkseitig auf die frisch gegossene Stahlbetonoberfläche (Schicht 1) angebracht wird. Der Name „Proteinschaum“ resultiert daraus, dass ein Protein aus Horn zur Schaumbildung herangezogen wird. Die Dämmstärke liegt bei $d_{\text{Mineralschaum}} = 30 \text{ cm}$. Bei einer Rohdichte von $\rho = 180 \text{ kg/m}^3$ wird eine Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{23, \text{dry}} = 0,06 \text{ W/mK}$ (ermittelt bei $23 \text{ }^\circ\text{C}$) bzw. $\lambda_{10, \text{dry}} = 0,059 \text{ W/mK}$ (ermittelt bei $10 \text{ }^\circ\text{C}$) erreicht. Die erwähnte Rohdichte ist variabel durch das semikontinuierliche Herstellungsverfahren einstellbar. Dabei wird die Struktur bzw. die Größe und Verteilung der Luftporen bestimmt (Maier et al., 2021). Laut dem Wärmeschutznachweis der ETA-Fabrik wird mit Hilfe der Mineralschaumschicht für die

Außenwandkonstruktion mit Angrenzung zur Außenluft ein U-Wert von $0,225 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ erreicht (osd - office for structural design, 2014). Zusätzlich ist der mineralisierte Schaum nicht brennbar (Baustoffklasse A1) und ist daher für den Einsatz in der ETA-Fabrik mit hohen Brandschutzanforderungen geeignet (Maier, Gilka-Bötzow und Schneider, 2016).

Schicht 3 – Hinterlüftung

Die Funktionalität einer vorgehängten hinterlüfteten Fassadenkonstruktion steht in direkter Abhängigkeit von der Qualität der Hinterlüftung. Diese fungiert als Trennschicht zwischen zwei wesentlichen Funktionsebenen, die äußere Abdichtungsebene (Witterungsschutz) und der Funktionsebene (Feuchte-, Wärme-, Schall und Brandschutz). Zur Sicherstellung der Funktionalität der Hinterlüftung legt die Fassadenrichtlinie 2018 (FVHF, 2018) auf Grundlage der (DIN 18516-1, 2010) geometrischen Eigenschaften für diese Schicht fest. Die Dicke der Hinterlüftung bzw. der Abstand der zwei zuvor beschriebenen Funktionsebenen muss mindestens $d_{\text{Hinterlüftung}} = 20 \text{ mm}$ betragen. Lediglich durch Befestigungselemente oder Unterkonstruktionen darf dieser Abstand lokal auf 5 mm reduziert werden. Die ETA-Fassade weist eine Hinterlüftungsschicht von $d_{\text{Hinterlüftung,ETA}} = 100 \text{ mm}$ auf und erfüllt somit die Mindestanforderung.

Des Weiteren sind ausreichend dimensionierte Be- und Entlüftungsöffnungen zu berücksichtigen. Diese sind am Gebäudefußpunkt (über ein Lüftungsgitter) sowie am Dachrand auszuführen. Dabei ist ein Öffnungsquerschnitt von mindestens 50 cm^2 je 1 m Wandlänge sicherzustellen. Die ETA-Fassade berücksichtigt zusätzlich zu den vorstehenden Öffnungsquerschnitten eine vertikale Fuge von 2 cm über die komplette Wandlänge. (DIN 18516-1, 2010)

Schicht 4 – Vorhangfassade aus ultrahochfestem Beton

Der äußerliche Fassadenabschluss wird durch den mikrobewehrten ultrahochfesten Beton (mrUHPC) geprägt. Diese Schicht weist eine Dicke von $d_{\text{UHPC}} = 5,5 \text{ cm}$ auf und besteht aus einem dichten Mörtel und einer feingliedrigen Mattenbewehrung. Charakteristisch für die eingebettete Bewehrung ist die feine Stahldicke von 1 mm mit einer Maschenweite von 12 mm . Diese Geometrie und Anordnung führen zu einer hohen Druckfestigkeit, sodass dadurch dünnere und zugleich größere Elemente ermöglicht werden. Die vorgehängten Betonplatten der ETA-Fassade sind insofern auf eine Abmessung von 10 m auf $1,50 \text{ m}$ dimensioniert worden (Maier, Gilka-Bötzow und Schneider, 2016). Zwei solcher Platten sind einem Fassadenmodul zugeordnet. Durch die gleichmäßige Verteilung des Stahlanteils ergibt sich eine hohe mechanische, aber auch thermische Beständigkeit mit einer Wärmeleitfähigkeit von $\lambda = 5 \text{ W}/(\text{mK})$. (Maier et al., 2021)

Zudem bietet sich ultrahochfester Beton insbesondere als äußere Schicht an, die der Bewitterung ausgesetzt ist. UHPC besitzt einen 45 mal höheren s_d -Wert als der von

Normalbeton. Dies bedeutet, dass ein viel größerer Widerstand gegen den Durchgang von Wasserdampf vorliegt. (Reineck et al., 2004)

Thermische Aktivierung (in Schicht 1 und 4 integriert):

Die besondere Eigenschaft der ETA-Fassade ist die thermische Aktivierung der Außen- und Innenseite über Rohrsysteme, die mit einem Wasser-Glykosal-Gemisch durchströmt werden. Das Glykosal wird dem Wasser zugefügt, damit das Wasser auch bei Temperaturen unter 1°C verwendet werden kann. Die thermische Aktivierung soll insbesondere für die Hallenkühlung eingesetzt werden, sodass durchaus Temperaturen unter dem Gefrierpunkt vorliegen könnten.

Bei der Art des Rohrsystems handelt es sich um sogenannte Kapillarrohrmatten. Diese wurden ursprünglich entwickelt, um einen korrosionsfesten Wärmeübertragungssystem auf dem Markt zu etablieren. Nun werden sie vielfach genutzt und gewinnen im Bauwesen an Bedeutung. Charakteristisch für diese Matten sind die kleinen Rohrdurchmesser, die sich im Durchschnitt zwischen 3 und 5 mm bewegen. In der ETA-Fassade sind Kapillarrohrmatten der Firma BEKA, Typ K.S15 (BeKa Heiz- und Kühlmatten GmbH, 2021a) zur Ausführung gekommen. Diese weisen einen Rohrdurchmesser von $d_{\text{Durchmesser}} = 3,35 \text{ mm}$ mit einer Wanddicke von $d_{\text{Rohrmantel}} = 0,5 \text{ mm}$ auf und ordnen sich in einem Abstand von $d_{\text{Abstand}} = 15 \text{ mm}$ zueinander an. Die sogenannten Stammrohre, dienen der Zusammenführung der einzelnen Kapillaren sowie dem Anschluss an den Vor- und Rücklauf und haben eine Abmessung von 20x2 mm. Diese geometrischen Merkmale bewirken eine homogene Temperaturverteilung und -übertragung, da ein engmaschiges System eine größere thermische Übertragungsoberfläche aufweist. Bei der verwendeten Kapillarrohrmatte verlaufen zudem die Vor- und Rücklaufrohre parallel zueinander. Dies ermöglicht eine parallele Durchströmung, was wiederum zu einem homogenen Temperaturfeld führt. Der Unterschied zwischen der Vorlauf- und Rücklauf-Temperatur ist in solchen Fällen sehr gering, üblicherweise zwischen 1 und 3 Kelvin. Aus diesem Grund wird für die Dimensionierung dieser Mattensysteme in der Regel die mittlere Heizmitteltemperatur verwendet. Weiterhin liegen die Kapillarrohrmatten oberflächennah mit einer geringen Betonüberdeckung vor, wodurch die zu übertragende thermische Energie einen geringeren Widerstand überwinden muss. Die Matten befinden sich direkt unterhalb der oberen Bewehrungsebene und haben, abhängig von ihrer Position, unterschiedliche Abmessungen: 0,5 m x 7 m oder 1 m x 6 m (Breite x Höhe). Die Anordnung der einzelnen Matten erfolgt nach dem Tichelmann-Prinzip (siehe Abbildung 3.8). Dabei ist jede Matte für sich mit zwei Außenrohren für den Vor- und Rücklauf verbunden, sodass jedes Element einzeln regelbar ist und bei Bedarf, beispielsweise im Falle eines Schadens, abschaltbar ist. (Maier et al., 2021)

Die Kapillarrohre bestehen aus Polypropylen (PP), ein sehr leichter und zugleich harter Kunststoff (Random-Copolymerisat, Typ 3 (DIN 8078, 2008)) mit einer Rohdichte von $\rho = 905 \text{ kg/m}^3$. Durch die hohe Dehnbarkeit und dynamische Belastbarkeit, eignet es sich

gut für die Verwendung in Fassaden mit variabler Formgebung. Polypropylen bietet weiterhin eine hohe chemische Beständigkeit, weist jedoch gegenüber UV-Strahlung Unbeständigkeit auf, sodass eine freie Bewitterung nicht möglich ist. Ein Nachteil dieses Kunststoffes ist die Baustoffklasse „B2 normal entflammbar“. Die guten brandschutztechnischen Eigenschaften der zuvor beschriebenen Bauteilschichten werden somit abgeschwächt. Polypropylen lässt sich mit dem Ansatz der Wiederverwertung gut recyceln, sofern eine Sortenreinheit vorliegt. Dabei kann das entnommene Polypropylen zu neuen Produkten verschmolzen werden, die jedoch nicht im Lebensmittelbereich genutzt werden können. (polymehr GmbH, 2015)



Abbildung 5.5: Fotoaufnahme des Herstellprozesses eines Fassadenmoduls (Foto: ISM+D)

5.1.2 Sensormonitoring

Eine Fassade mit energetisch effizienten Elementen, ist erst dann vollständig „smart“, wenn die Elemente miteinander kommunizieren. Die Kommunikation resultiert aus Datenverarbeitungsvorgängen, Dateninformationen werden als Input-Information gelesen und verarbeitet, woraus eine bestimmte Zielgröße generiert wird. Hierfür sind insbesondere zwei Bestandteile für die Kommunikationsfähigkeit eines Systems maßgeblich. Die Informationsquelle und das hinterlegte System- bzw. Rechenmodell, das schließlich eine Zielinformation ausgibt. Das Kommunikationsprinzip ist hier das sogenannte Sensormonitoring. Sensoren werden an zuvor festgelegten Stellen implementiert, die bestimmte Daten messen und diese an eine Gebäudeautomation

weiterleiten. In der Gebäudeautomation sind physikalische oder mathematische Modelle hinterlegt, die diese Messdaten als Inputinformationen einlesen. Je nach Algorithmus, z.B. hysteresegesteuerte Raumlufttemperatur in der Fabrikhalle, werden beim Erreichen von vorher definierten Grenzwerten, Aktoren angesteuert und aktiviert. Aktoren wären in diesem Fall, z.B. das Öffnen von Ventilen und/oder das Einschalten von Pumpen, mit beispielsweise dem Ziel einen bestimmten Volumenstrom und die Temperatur des Wärmeträgermediums in den Kapillarrohrmatten (Wasser-Glykosal-Gemisch) einzustellen. Die Konfiguration des Sensormonitoringsystems ist mit Bedacht zu wählen. Dabei sind die Zielgrößen als erstes zu definieren. Erst dann erfolgen die Definition und Verortung der einzelnen Sensoren und Aktoren und zugleich die Bestimmung des Berechnungsmodells. (Jacob und Kukovec, 2022)

Die ETA-Fassade unterliegt ebenso einem Sensormonitoring. Dabei wurden jedoch nur insgesamt vier Wandmodule mit Sensoren ausgestattet, zwei Module mit Ost- und zwei mit West-Orientierung. Es liegen Sensoren auf vertikaler Ebene über die Höhe des Moduls und auf horizontaler Ebene entlang des Bauteilquerschnitts vor. Auf vertikaler Ebene sind auf vier Höhen (1m, 3m, 5m und 9,5 m) Sensoren verbaut. Innerhalb des Bauteils selbst sind je nach Bauteil in fünf Bauteilschichten Sensoren integriert, meist in den Abständen 5 mm, 25 mm, 430 mm, 557 mm und 583 mm (von innen nach außen, siehe Abbildung 5.6).

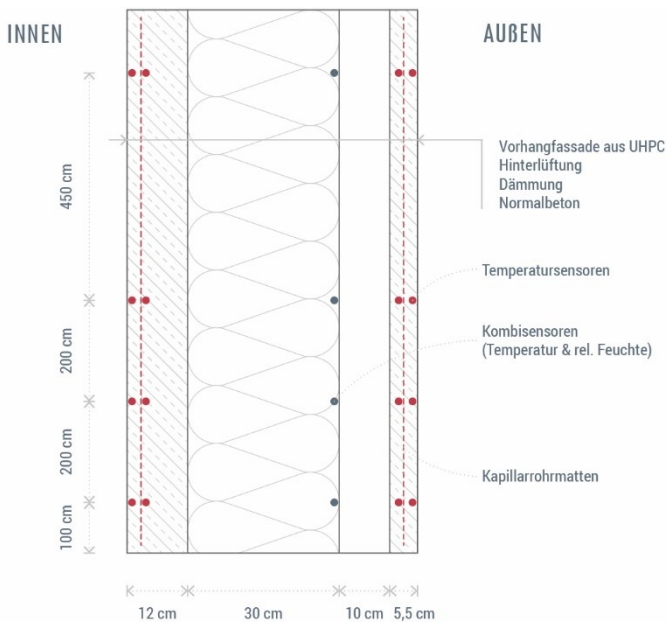


Abbildung 5.6: Sensorausstattung der Fassadenmodule – hier exemplarisch für Wand W6-HW013

Bei der genutzten Sensorik handelt es sich um Temperatursensoren, Kombisensoren für Lufttemperatur und relative Luftfeuchte sowie Wärmeleitplatten. Die Wärmeleitplatten befinden sich lediglich an zwei Modulen (Ost W5 und West W22) an der Bauteiloberfläche zur Raumseite.

5.1.3 Thermohydraulische Vernetzung

Ein weiteres besonderes Merkmal der ETA-Fassade ist dessen thermische Vernetzung mit der Produktionskette und den thermischen Speichern über die zwei der drei thermohydraulischen Netze der ETA-Fabrik. Die hydraulische und thermische Interaktion dieser Komponenten erfolgt über zwischengeschaltete Plattenwärmetauscher. Wesentliche Bestandteile einer thermischen Vernetzung sind die Wärmequellen und -senken, die über eine Vernetzung thermische Energie austauschen können. In diesem Fall wird thermische Energie in Form von Wärme über einen wasserbasierten Kreislauf von der Wärmequelle zur Wärmesenke transportiert. Somit kann die an der Wärmequelle vorherrschende Abwärmeenergie abtransportiert und effizient weitergenutzt werden, wodurch die angestrebte Kühlung der Halle sichergestellt wird.

Die mit den Kapillarrohrmatten hydraulisch verbundenen Rohrleitungsnetze, Kalt- und Warmwassernetz, liegen im gemäßigten Temperaturniveau vor. Das Kaltwassernetz verfügt über ein Temperaturniveau zwischen 10 und 20 °C und wird hauptsächlich zur Maschinenkühlung verwendet, die zur Produktionskette gehören. In der warmen Jahreszeit wird das Kaltwassernetz zudem für die Gebäudekühlung herangezogen. Das Warmwassernetz, mit einem Temperaturspektrum von 30 bis 40 °C hingegen, wird im Winterlastfall für die Beheizung der Fabrikhalle auf Niedertemperaturniveau verwendet sowie zur Rückkühlung von Maschinen mit weitaus höherem Temperaturniveau. Das dritte hydraulische Netz, Heißwassernetz, ist nicht mit der Gebäudehülle verbunden. Dieses weist einen Temperaturbereich von 70 bis 85 °C auf und wird für den Antrieb der Absorptionskältemaschine genutzt. Das hohe Temperaturniveau ergibt sich aus der Abwärme des Ofens, zwei Blockheizkraftwerke (kurz: BHKWs) und einer Gasbrennwertanlage.

Weitere wesentliche Elemente des thermischen Netzes sind die drei thermischen Energiespeicher aus Beton, die außerhalb des Gebäudes im Erdreich eingelassen sind. Hier wird, den Temperaturbereichen der Netze entsprechend, thermische Energie zwischengespeichert. Die Speicherzeit hängt dabei vom Wärme- bzw. Kältebedarf, der Umgebung und der gewünschten Vorlauftemperatur ab. Die Dachmodule, die mit den Wandmodulen eine konstruktive Einheit bilden, sind ebenfalls thermisch aktiviert und hydraulisch vernetzt. Zusätzlich ist dort eine Berieselungsanlage verortet, die von einer erdberührten Regenwasserzisterne gespeist wird und die über das Verdunsten der berieselten Dachflächen (sog. Prinzip der adiabaten Kühlung) die Halle zusätzlich kühlt. Die thermohydraulische Vernetzung strebt zwei Ziele an, die effiziente Abwärmenutzung

sowie die Kühlung und in seltenen Fällen die Beheizung des Gebäudes mit geringen Exergiebezug über Umweltenergie. Diese Funktionen werden durch das erzwungene Temperaturgefälle initiiert.

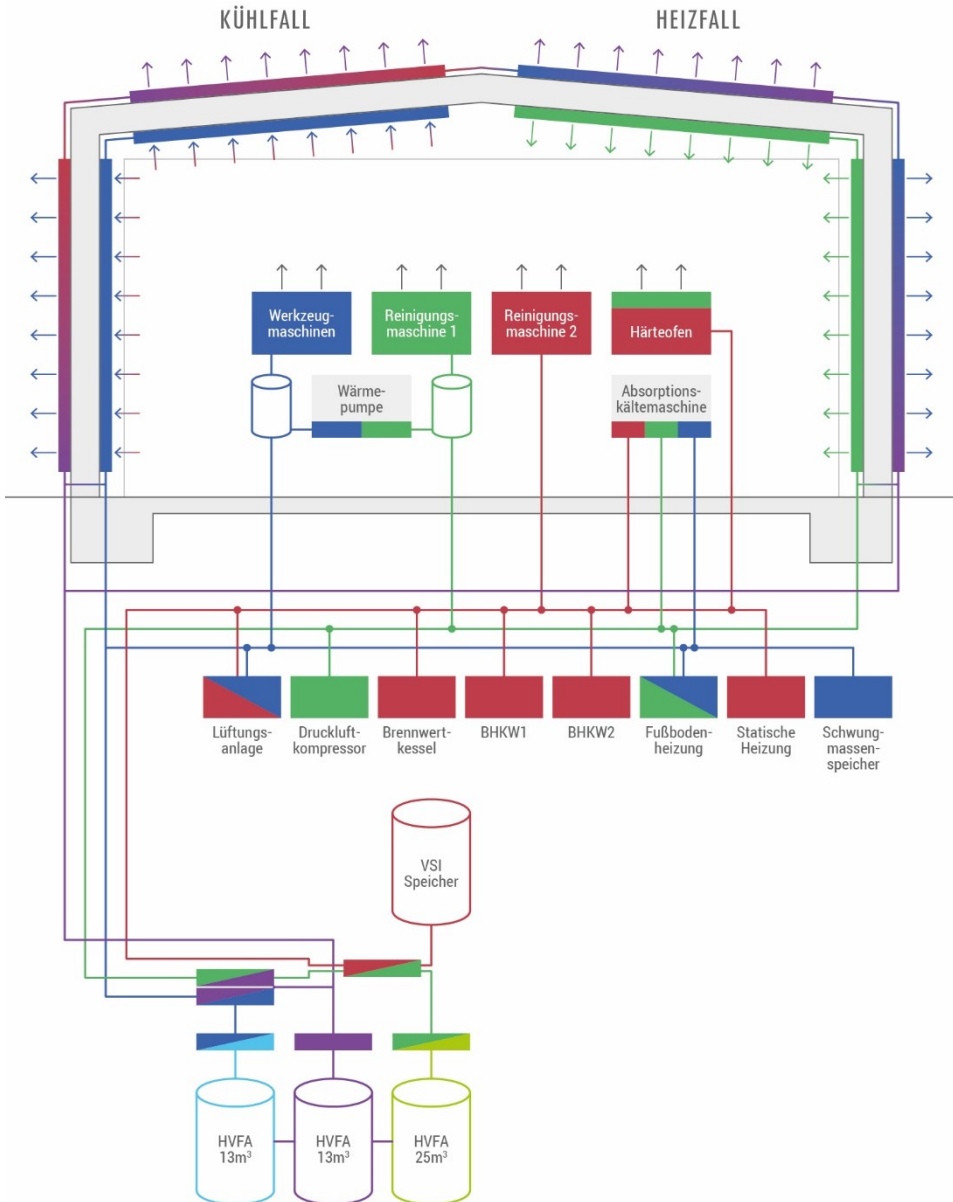


Abbildung 5.7: Thermohydraulisches Netz der ETA-Fabrik

Die Raumlufttemperatur befindet sich auf einem höheren Temperaturniveau (Kühlfall) als das Wasser in den Kapillarrohrsystemen der Innenseite der Fassadenmodule. Es folgt eine Aufnahme von thermischer Energie auf Kapillarrohrsystemebene, da rein physikalisch, thermische Energie immer vom hohen zum niedrigen Temperaturniveau strömt. Die aufgenommene thermische Energie wird durch die Durchströmung weiter an die äußere Schicht der ETA-Fassade geführt und durch die Umgebungstemperatur während der Nacht gekühlt (Kühlfall). Im Heizfall, der in Industriegebäuden, insbesondere in Produktionsstätten, selten oder gar nicht auftritt, wird warmes Fluid durch das Kapillarrohrsystem geleitet. Die Wärme hierfür kann aus verschiedenen Quellen stammen, wie den unterirdischen Betonspeichern, der Abwärme aus dem Maschinenkühlvorgang oder der durch die äußere thermisch aktivierte Schicht aufgenommenen Solarwärme.

Die ETA-Fassade weist isoliert einige thermisch-energetische Besonderheiten auf, die jedoch erst in Gesamtbetrachtung mit dem thermohydraulischen Netz und den zugehörigen Elementen, effizient ausgeschöpft werden können.

5.2 Messtechnische Untersuchungen – Produktionswoche 2018

Die ETA-Fabrik wurde errichtet mit dem Ziel künftig als Lernfabrik zu fungieren. Hier sollen Ansätze der Energieeffizienz und Energieflexibilität im Industriesektor aufgezeigt und innovative Anwendungsmöglichkeiten untersucht werden. Hierzu werden vereinzelt Maschinen aus der Produktionskette eingeschaltet und analysiert. Die in der ETA-Halle vorliegenden Maschinen gehören einer Metallverarbeitungs-Prozesslinie von Bosch-Rexroth an. Diese Prozesslinie bildet die klassischen Prozessschritte wie Zerspanen, Härten und Reinigen zur Produktion eines Hydraulikbauteils ab.

An den sog. Produktionswochen wird die gesamte Prozesslinie für eine Woche eingeschaltet, womit der Realbetrieb imitiert werden kann. Im Rahmen dieser Produktionswochen werden einzelnen Maschinen auf Effizienz geprüft, aber auch die Funktionalität des Kühl- und Heizbetriebs der Halle. Die Maschinen erzeugen durch ihren Betrieb Abwärme, wodurch das thermohydraulische Netz und dessen Funktion der Hallenkonditionierung erprobt werden kann.

Im März 2018 wurde die ETA-Fassade auf ihre thermische Leistungsfähigkeit geprüft. Dabei wurden drei Szenarien der Kühlung untersucht:

- Kühlbetrieb der Fabrikhalle über die inneren Kapillarrohrmatten mit Energiebezug

- aus den äußeren Kapillarrohrmatten (1) oder
- aus den unterirdischen thermischen Speichern (2)
- Beladen der thermischen Speicher der Kalt- und Warmwassernetze (3)

Die dabei durchgeführten Versuchsabläufe werden im Folgenden für die jeweiligen Messungen 1 bis 3 schrittweise textlich erläutert sowie anschließend grafisch dargestellt.

Messung 1 - Kühlbetrieb über die thermische Aktivierung der ETA-Fassade
20. bis 21. März 2018:

Am ersten und zweiten Tag der Produktionswoche wurde die Hallenkühlung über die inneren und äußeren Kapillarrohrmatten getestet.

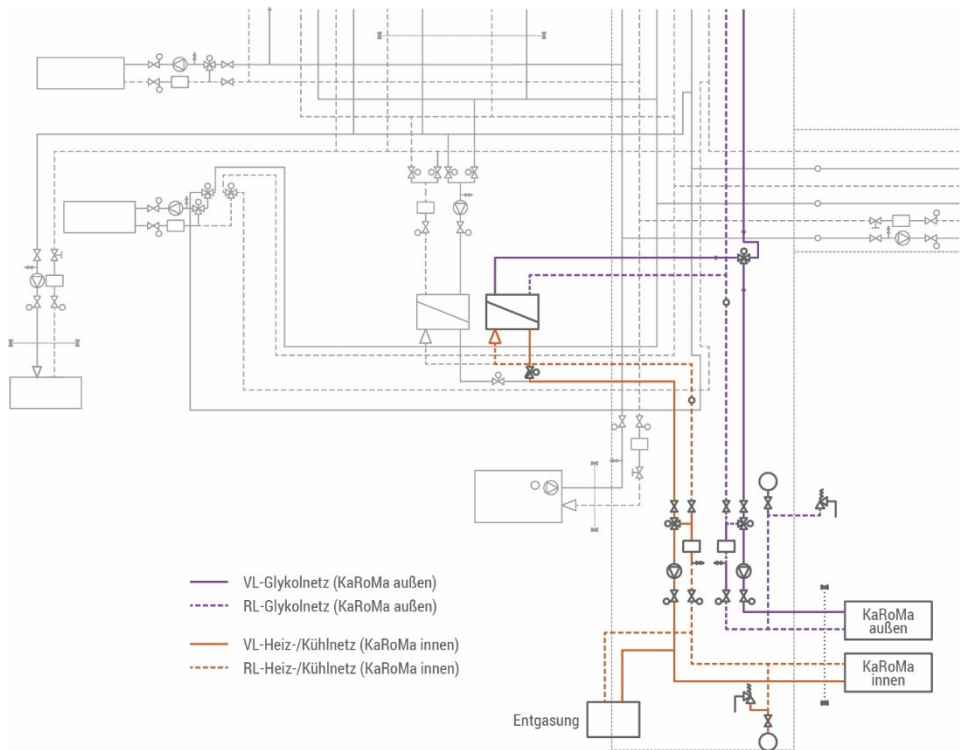


Abbildung 5.8: Vernetzung zwischen innenliegenden und außenliegenden Kapillarrohrmatten

Schritt 1 – 7:00 Uhr am 20.03.2018:

Zu Beginn wurde die Halle stufenweise durch das Einschalten einzelner Maschinen der Produktionskette über die Abwärmeeinwirkung aufgeheizt. Ziel war es hierbei mit Hilfe der Maschinenabwärme die Hallentemperatur auf das Maximum zu heizen. Das

Maximum wird erreicht, wenn sich ein thermisches Gleichgewicht ergibt. Das ist der Zeitpunkt, an dem keine Steigung mehr der Raumlufttemperatur zu erkennen bzw. beim Kurvenverlauf ein Plateau festzustellen ist.

Schritt 2 – 17:30 Uhr am 20.03.2018:

Mit dem Erreichen des thermischen Gleichgewichts folgte die Initiierung des Kühlbetriebs der Fabrikhalle. Dazu wurde die Pumpe 600 zur Steuerung des Volumenstroms eingeschaltet und das Ventil RV600 geöffnet, wodurch die äußeren Kapillarrohrmatten, die in 294 m² Dachfläche und 24 m² Wandfläche eingebettet sind, mit dem Wasser-Glykosol-Gemisch durchströmt wurden. Dabei stellt sich ein Temperaturgefälle ein, die Wärme wird von den Kapillarrohrmatten an die kältere Außenumgebung übertragen. Zugleich wurde die Pumpe 500 und das Ventil RV500 zur Durchströmung der innenliegenden Kapillarrohrmatten geöffnet, wodurch eine Fläche von insgesamt 447,5 m² (227 m² Wandfläche und 220,5 m² Deckenfläche) thermisch aktiviert wurde. Das außen heruntergekühlte Wärmeträgermedium wurde nach innen geführt und kühlte die Halle ab.

Schritt 3 – 11:30 Uhr am 21.03.2018:

Am darauffolgenden Tag wurde der Kühlbetrieb des 5.871 m³ großen Hallenvolumens über die Kapillarrohrmatten durch das Ausschalten der Pumpen und Ventile beendet.

In den folgenden drei Abbildungen sind sowohl die Volumenstromverläufe der Pumpen 500 und 600 sowie als auch die Temperaturverläufe der Kapillarrohrsysteme (Vor- und Rücklauf) und der Halle, aufgeteilt in drei Hallenbereiche, abgebildet.

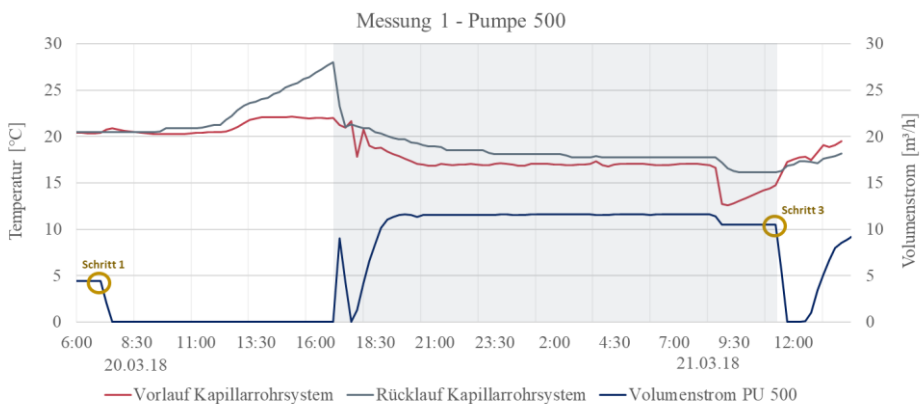


Abbildung 5.9: Messung 1 – Daten Pumpe 500

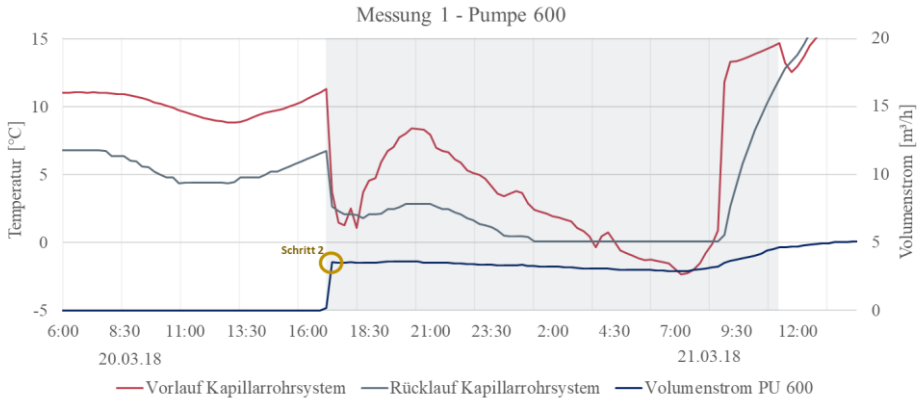


Abbildung 5.10: Messung 1 – Daten Pumpe 600

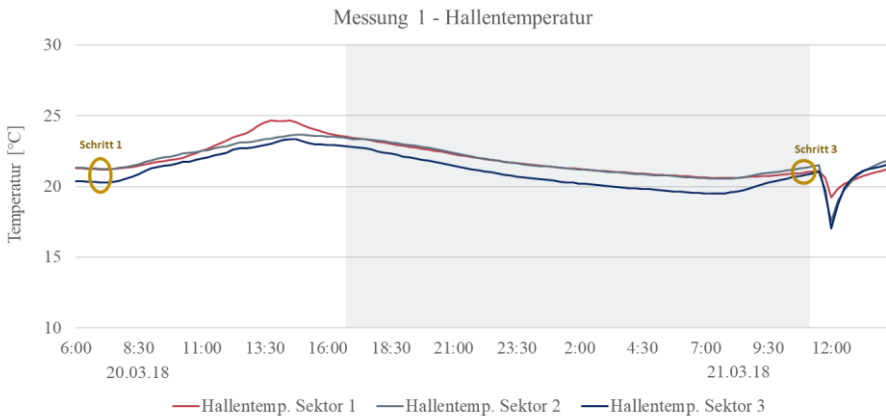


Abbildung 5.11: Messung 1 – Hallentemperaturdaten

Messung 2 - Beladung der thermischen Speicher über die äußeren Kapillarrohrmatten 21. bis 22. März 2018:

Die zwei Betonspeicher SP 795 (blau) und SP 796 (rosa), die an das Kalt- und Warmwassernetz angebunden sind, wurden über die Nachtstunden mit kaltem Wasser-Glykosal-Gemisch aus den außenliegenden Kapillarrohrmatten beladen und somit heruntergekühlt.

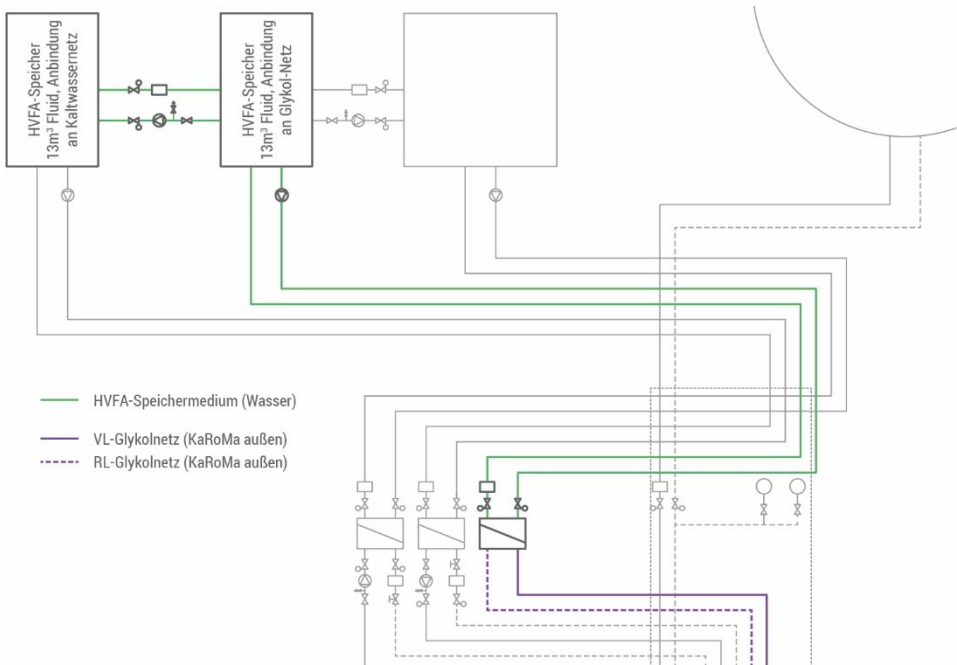


Abbildung 5.12: Kopplung der thermischen Speicher mit den äußeren Kapillarrohmatten

Schritt 1 – 18:30 Uhr am 21.03.2018:

Am 21.03.2018 um 18:30 Uhr wurden die Pumpen 600 und 716 eingeschaltet. Die Pumpe 716 steuert den thermohydraulischen Speicherkreislauf an und ist mit dem Kreislauf der Pumpe 600 über einen Wärmetauscher verbunden.

Schritt 2 – 7:00 Uhr am 22.03.2018:

Die Pumpen 600 und 716 wurden ausgeschaltet, womit auch die Beladung der thermischen Speicher eingestellt worden ist.

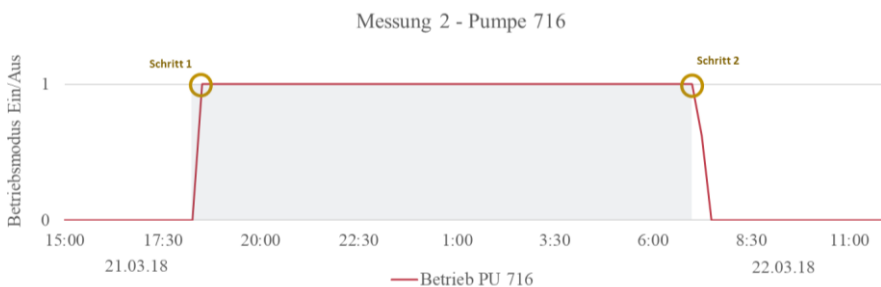


Abbildung 5.13: Messung 2 – Betriebsmodus Pumpe 716

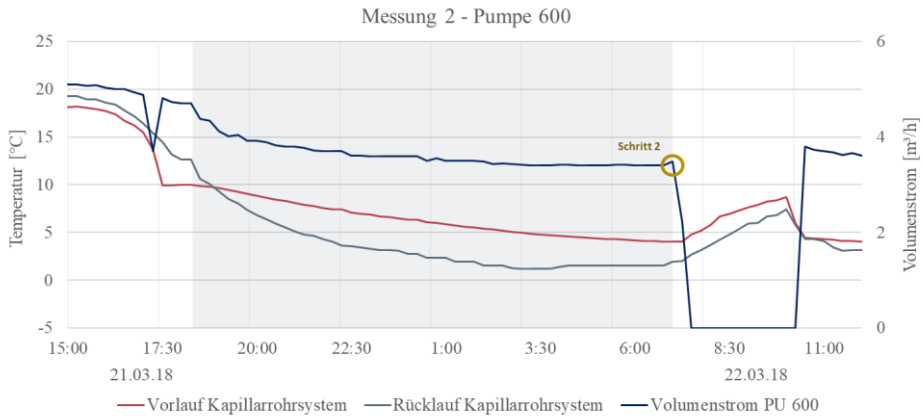


Abbildung 5.14: Messung 2 – Daten Pumpe 600

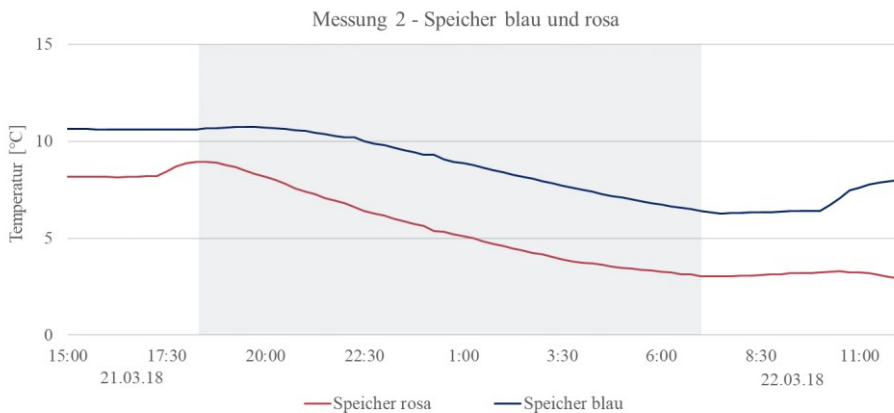


Abbildung 5.15: Messung 2 – Temperaturdaten Speicher „blau“ und Speicher „rosa“

Messung 3 - Kühlbetrieb - Speicher speist innenliegende Kapillarrohrsysteme 22. bis 23. März 2018:

Am dritten Messtag wurden die innenliegenden Kapillarrohrratten mit kaltem Wasser aus den Speichern SP 795 (blau) und SP 796 (rosa) versorgt.

Schritt 1 – 7:00 Uhr am 22.03.2018:

Die Produktionsmaschinen wurden in Betrieb genommen. Dabei stieg durch die Abwärmentwicklung die Hallentemperatur bis zum Zeitpunkt des thermischen Gleichgewichts an.

Schritt 2 – 15:30 Uhr am 22.03.2018:

Die über Nacht mit Kälteenergie beladenen Speicher haben nun die inneren Kapillarrohrmatten mit der notwendigen Energie gespeist. Für die Durchströmung der inneren Kapillarrohrmatten wurde zunächst der thermische Speicher des Kaltwassernetzes genutzt und die Pumpe 500 aktiviert. Der Warmwasserspeicher sollte lediglich als redundantes System dienen und nur dann genutzt werden, wenn die Energie des Kaltwasserspeichers nicht ausreichend sein sollte.

Schritt 3 – 13:30 Uhr am 23.03.2018:

Die Messungen der Produktionswoche wurden eingestellt. Die Pumpen und Ventile wurden ausgeschaltet.

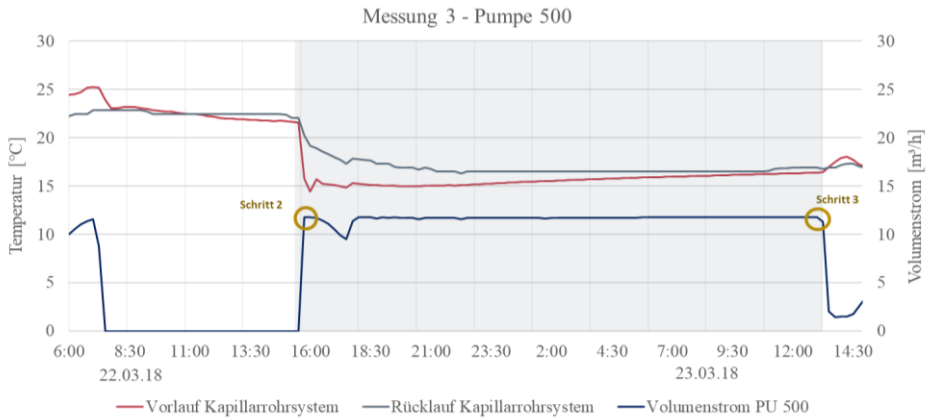


Abbildung 5.16: Messung 3 – Daten Pumpe 500

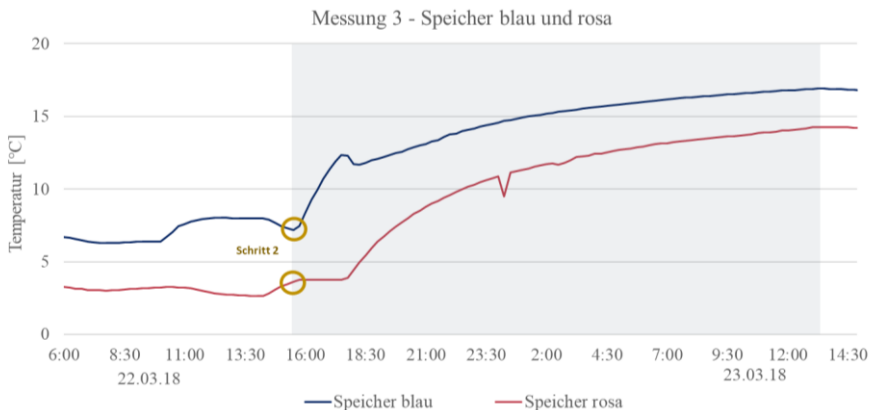


Abbildung 5.17: Messung 3 – Temperaturdaten Speicher „blau“ und Speicher „rosa“

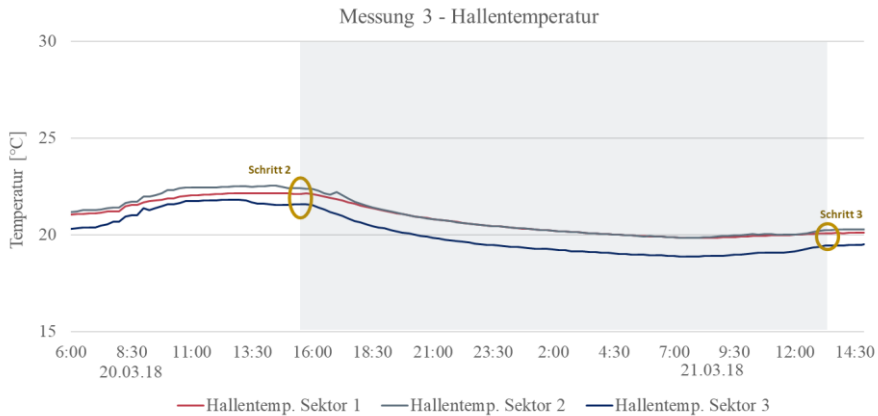


Abbildung 5.18: Messung 3 - Hallentemperaturdaten

5.3 Energetische Validierung der Messungen

Im Zuge der messtechnischen Untersuchungen während der Produktionswoche im März 2018 wurden nachstehende Datenpunkte aufgenommen, die der Validierung der energetischen Performance der ETA-Fassade dienen:

- Temperaturdaten:
 - Raumlufttemperatur der Fabrikhalle [°C]
 - Außenlufttemperatur [°C]
 - Bauteiltemperaturen [°C] (siehe Sensorpunkte, Kapitel 5.1 2)
 - Temperaturschichtung in thermischen Speichern
 - Pumpendaten 105, 500, 600, 710, 716 und Plattenwärmetauscher PWT6:
 - Vor- und Rücklauftemperatur [°C]
 - Volumenstrom [m³/h]
 - Ventildaten RV 500 und 600:
 - Ventilstellung [%]
- (Da Silva, Schneider und Maier, 2018)

Anhand der über die Gebäudeautomation aufgezeichneten Datenpunkte, können quantitative und qualitative Aussagen zur energetischen Leistungsfähigkeit der thermisch aktivierten Fassade getroffen werden.

Zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit der thermisch aktivierten ETA-Fassade müssen zunächst die zwei Formen der abzuführenden Maschinenabwärme unterschieden werden. Die bekannteste Form der Abwärme, ist die die über warme Abluft (Konvektion)

und über Wärmestrahlung über die Maschinenoberfläche generiert wird. Diese kann über den Temperaturanstieg der Raumluft innerhalb einer vorher festgelegten Zeitspanne quantifiziert und in [kJ] angegeben werden. Eine weitere Form der Abwärme ist die wasserbasierte Wärmeabgabe an die thermohydraulischen Netze bzw. an die unterirdischen Betonspeicher der ETA-Fabrik. Über den Temperaturanstieg innerhalb der Speicher während der Betriebszeit der Maschinen, kann ein thermisches Lastprofil erstellt werden.

Durch die thermohydraulische Vernetzung der Gebäudehülle mit den Produktionsmaschinen, können beide Abwärme-Formen mit Hilfe der wassergeführten Kapillarrohrmatten gekühlt bzw. aufgenommen werden. Die konvektive und strahlungsabhängige Abwärme wird direkt über die inneren und äußeren Kapillarrohrmatten oder über die inneren Kapillarrohrmatten in Verbindung mit den hydraulischen Speichern heruntergekühlt. Dies entspricht den Messtagen 1 und 3 der Produktionswoche im März 2018. Die wasserbasierte Abgabe von Abwärme kann über die Speicherkühlung, die über die äußeren Kapillarrohrmatten stattfindet, erfolgen. Diese Kühlmethode wurde am zweiten Messtag durchgeführt.

Die thermische Leistung der inneren und äußeren thermisch aktivierten Fassadenseiten lässt sich nun anhand der aufgezeichneten Volumenströme sowie Vor- und Rücklauftemperaturen des durchströmenden Wasser-Glykosol-Gemisches berechnen:

$$P_{\text{Therm}} = \frac{\dot{V} \cdot \rho_{\text{WG}} \cdot c_{\text{WG}} \cdot (T_{\text{RL}} - T_{\text{VL}})}{A} \quad (5.1)$$

mit

P_{Therm} : Thermische Leistung [W/m²] mit Umrechnungsfaktor 1/3600

\dot{V} : Volumenstrom [m³/h]

ρ_{WG} : Rohdichte des Wasser-Glykosol-Gemisches [kg/m³]

c_{WG} : spezifische Wärmekapazität [J/kgK]

T_{RL} : Temperatur des Rücklaufs [K bzw. °C]

T_{VL} : Temperatur des Vorlaufs [K bzw. °C]

A : Übertragungsfläche der inneren bzw. äußeren Gebäudehülle [m²]

Im Rahmen dieser Dissertation liegt der Fokus auf der Kühlleistung der ETA-Fassade im Zusammenhang mit der nächtlichen Kühlung durch die thermisch aktivierten Elemente. Dabei erfolgt eine reine Bauteilbetrachtung, bei der das autarke thermisch aktivierte Fassadensystem im Vordergrund steht, ohne Berücksichtigung der Betonspeicher oder anderer externer Komponenten. Zur Ermittlung der Kühlleistung der ETA-Fassade wird daher der erste Messtag herangezogen. Dieser zeichnet sich dadurch aus, dass die Fassade als isoliertes System betrachtet wurde. Eine Kühlung des Innenraums durch die thermische Aktivierung der innen- und außenliegenden Kapillarrohrmatten.

Dies ermöglicht eine Analyse der Leistungsfähigkeit der ETA-Fassade während der Stunden ohne Solarenergieeintrag. Im Folgenden wird der gesamte Messzeitraum am ersten Messtag ausgewertet. Im Zuge der simulativen Analyse wird ein Ausschnitt davon während der Nachtstunden betrachtet (siehe Kapitel 7).

Thermische Leistung der inneren Fassadenseite:

Im Rahmen der ersten Messung wurde die Hallenkühlung über die inneren und äußeren Kapillarrohrmatten getestet. Mit den inneren Kapillarrohren soll die Hallentemperatur herabgesetzt werden. Die Kühlenergie wird hierbei über die Außenluft bezogen. Zur Ermittlung der thermischen Kühlleistung wurde der Volumenstrom und die Temperaturen am Vor- und Rücklauf der Pumpe 500 sowie die gesamte Übertragungsfläche der Innenseite der Wand- und Dachmodule herangezogen. Die simulative Analyse in Kapitel 7 hingegen verwendet die an den Oberflächen vorliegenden Wärmeströme und nutzt somit eine andere Herangehensweise im Zuge der Ermittlung der Kühlleistung.

In Abbildung 5.19 ist der Kurvenverlauf der zeit- und temperaturabhängigen thermischen Kühlleistung dargestellt. Es ist ein eingependelter Zustand mit relativ konstanter Leistung zwischen 21 und 23 Uhr festzustellen. Die mittlere Kühlleistung im eingependelten Zustand beträgt $44,09 \text{ W/m}^2$:

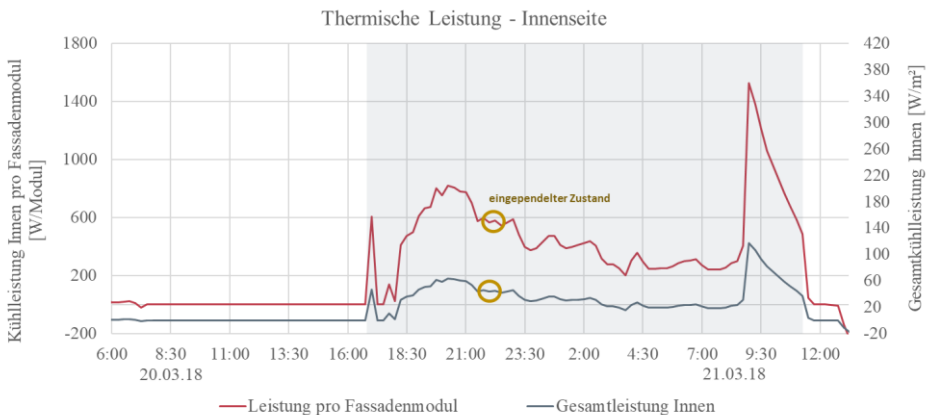


Abbildung 5.19: Kühlleistung der innenliegenden Fassadenseite im Zuge der Messung 1

Bei der energetischen Validierung ist zudem die für die Pumpe aufgewendete elektrische Energie zu berücksichtigen. Dies kann mit Hilfe der Leistungszahl beurteilt werden, was zudem eine Vergleichbarkeit mit anderen Kühlsystemen ermöglicht. Die Leistungszahl oder Energy Efficiency Ratio der Kühlung (kurz: EER) beschreibt das

Verhältnis von Kühlleistung und Antriebsleistung. Je höher die Leistungszahl, desto energieeffizienter ist das untersuchte Kühlsystem.

$$\text{EER} = \left| \frac{P_{\text{therm}}}{P_{\text{Antrieb}}} \right| \quad (5.2)$$

mit

EER: Energy Efficiency Ratio [-]

P_{therm} : Kühlleistung [W/m^2]

P_{Antrieb} : Antriebsleistung [W/m^2]

Die Antriebsleistung der Pumpen kann durch die elektrische Wirkleistung in [W] der Pumpen und die Übertragungsfläche bestimmt werden. Die Wirkleistungen der Pumpen 500 und 600 werden für den Betriebszeitraum am ersten Messtag zwischen 17:30 Uhr am 20.03. bis 11:30 Uhr am 21.03. ermittelt. Die Pumpe 500 weist eine elektrische Wirkleistung von 562,77 W im Durchschnitt auf, während die Pumpe 600 im gleichen Zeitraum durchschnittlich 324,30 W verbraucht.

Um die Leistungszahl EER zu berechnen, wird die nach Gleichung (5.1) ermittelte Kühlleistung berücksichtigt. Hierbei werden die Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf der Kapillarrohrmatten, die Rohdichte und spezifische Wärmekapazität des Wasser-Glykosol-Gemisches sowie der durch die Pumpe 500 erzeugte Volumenstrom herangezogen. Für den ersten Messtag ergaben sich folgende Durchschnittswerte im Betriebszeitraum zwischen 17:30 Uhr und 11:30 Uhr:

- Volumenstrom der Pumpe 500: 10,94 m^3/h
- Rohdichte Wasser-Glykosol-Gemisch: 1031,5 kg/m^3
- spezifische Wärmekapazität Wasser-Glykosol-Gemisch: 3920 $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
- Rücklauftemperatur: 18,10 $^{\circ}\text{C}$
- Vorlauftemperatur: 16,69 $^{\circ}\text{C}$

Das EER liegt im eingependelten Zustand zwischen 21:00 und 23:00 Uhr bei 35,18 für die Innenseite der ETA-Fassade. Es ist jedoch zu beachten, dass sich die vorstehend genannten Werte auf alle thermisch aktivierten Module (Wand- und Deckenelemente) beziehen. Um eine Auswertung für ein Fassadenmodul durchführen zu können, ist eine flächenanteilige Berechnung erforderlich. Dafür müssen der Volumenstrom und die Wirkleistung der Pumpe auf den Fassaden- bzw. Wandanteil reduziert werden, um einen Wert pro Modul zu erhalten.

Von der Gesamtfläche von 447,5 m^2 der innenseitig aktiven Wand- und Deckenfläche entfallen 227 m^2 auf die Wandfläche. Somit wird nur ein Anteil von 50,73 % betrachtet. Insgesamt werden 18 Wandmodule aktiviert, was bei der Bemessung eines einzelnen

Fassadenmoduls zusätzlich einkalkuliert werden muss. Auf diese Weise lässt sich die thermische Leistung für ein Fassadenmodul identifizieren.

Die mittlere Kühlleistung (innen) je Fassadenmodul mit einer aktivierten Fläche von 13 m² beträgt im eingependelten Zustand 573,57 W/Modul.

Thermische Leistung der äußeren Fassadenseite:

Um die thermische Leistung der äußeren Fassadenseite zu ermitteln, erfolgt die Berechnung auf die gleiche Art und Weise wie zuvor beschrieben. Die Pumpe 600 weist eine Wirkleistung von 324,30 W auf. Die thermische Kühlleistung wird, wie bei der innenliegenden thermisch aktiven Fläche, gemäß Gleichung (5.1) bestimmt. Für den ersten Messtag ergeben sich die folgenden Durchschnittswerte:

- Volumenstrom der Pumpe 600: 3,39 m³/h
- Rohdichte des Wasser-Glykosol-Gemischs: 1035 kg/m³
- Spezifische Wärmekapazität des Wasser-Glykosol-Gemischs: 3880 J/(kg·K)
- Rücklauftemperatur: 1,90 °C
- Vorlauftemperatur: 4,21 °C

Die mittlere Kühlleistung im eingependelten Zustand beträgt -45,41 W/m². Mit einer Gesamtfläche von 318 m² außenseitig aktivierter Fläche, die Wand- und Dachflächen umfasst, sind 24 m² der aktivierten Außenwand zuzuordnen. Dies entspricht einem Anteil von 7,55 % Außenwandfläche. Auf diesen Anteil entfallen 4 Außenwandmodule. Die mittlere Kühlleistung (außen) je Fassadenmodul mit einer aktivierten Fläche von 9 m² beträgt im eingependelten Zustand -408,83 W/Modul. Das EER liegt im eingependelten Zustand bei 44,52 für die Außenseite der ETA-Fassade.

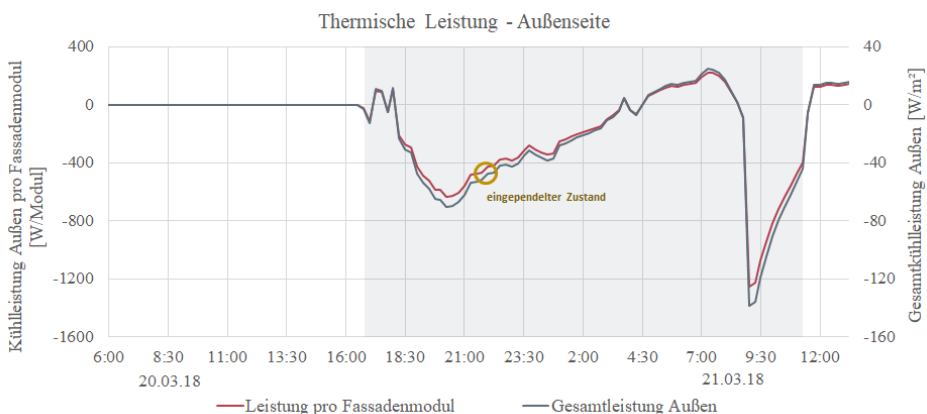


Abbildung 5.20: Kühlleistung der außenliegenden Fassadenseite im Zuge der Messung 1

6 ETA-Fassade 2.0 - Konzeption von energetisch optimierten Varianten

Die im vorstehenden Kapitel beschriebene Fassadenkonstruktion der ETA-Fassade wird im Zuge dieses Kapitels auf Optimierungsmöglichkeiten hinsichtlich der energetischen Performance untersucht. Dabei sind die in Kapitel 3 eingeführten Funktionsebenen einer Fassade heranzuziehen und als Untersuchungsabschnitte zu definieren. Die Hauptfunktionen einer Fassade finden in drei Ebenen statt:

- Innere Funktionsebene
- Funktionsebene mit Tragwerk
- Äußere regenabdichtende Ebene
(Knaack et al., 2007)

Im weiteren Vorgehen werden ausschließlich die beiden Funktionsebenen, innere und äußere Ebene, in Betracht gezogen. Diese Ebenen sind entscheidend, da sie die notwendige Schnittstelle zur Umgebung darstellen und vor allem für thermisch aktivierte Fassaden von Bedeutung sind. Sie realisieren die relevanten bauphysikalischen Funktionen wie Wärme- und Feuchteschutz, die wiederum eine energetische Relevanz haben und insbesondere der thermischen Übertragung und Speicherung dienen.

Eine Vielzahl von Hemmnissen erschweren die Konzeptionierung einer Standardlösung. Der heterogene Gebäudebestand im Industriesektor sowie die sich daraus ergebenden Gebäudezonen mit unterschiedlichen Anforderungsniveaus, wie beispielsweise in Kühllagern oder Produktionshallen (vgl. Kapitel 4), schränken diese Zielvorstellung ein. Im Folgenden wird eine Lösung erforscht, die für Produktionshallen, wie die ETA-Fabrik, zugeschnitten ist.

6.1 Zielgrößen der Fassadenkonzeptionierung

Zu Beginn einer jeder Konzeptionierung sollten die Zielvorstellungen des Endergebnisses formuliert sein und im stetigen Abgleich im Zuge der Konzeptentwicklung stehen. Die angestrebten Kriterien, die eine Optimierung von thermisch aktivierten Fassadenkonstruktionen im Industriesektor erlauben, sollten in ihrer Gesamtheit folgende Zielgrößen einbeziehen und umsetzen können:

- 1) Einsatz von erneuerbaren Energien (z.B. Umweltwärme, Sonnenenergie oder Geothermie) für die Konditionierung des Gebäudes:
Bisher erfolgt die Konditionierung von Gebäuden unter Verwendung eines beträchtlichen Anteils an fossiler Energie, was gleichzeitig zu einer Verstärkung des CO₂-Fußabdrucks führt. Angesichts der direkten Angrenzung der Fassade zu erneuerbaren Energiequellen sollte das Potenzial an diesem Punkt ausgeschöpft werden. Durch die Einbindung erneuerbarer Energien in die Gebäudefassade kann nicht nur der Ausstoß von Treibhausgasen verringert werden, sondern es wird auch thermische Energie im Niedertemperaturbereich genutzt – dies fällt in den optimalen Temperaturbereich für die Raumkonditionierung.
- 2) Bewusster Einsatz bauphysikalischer Eigenschaften auf Baustoff- und Bauteilebene:
Bei der Gestaltung einer Fassade ist es wichtig, die Mechanismen für Wärme- und Feuchtetransport bewusst einzubeziehen, um mögliche Funktionskonflikte zu vermeiden. Im Einklang mit den Prinzipien der Bauphysik sollte sorgfältig bestimmt werden, welche Funktion von jeder Schicht des Bauteils übernommen werden soll.
- 3) Abwärmennutzung:
Die Fassade steht nicht nur in direkter Angrenzung zu erneuerbaren Energien, sondern auch zur Raumluft, die insbesondere im Industriesektor einen hohen Anteil an Abwärme beinhaltet. Diese Abwärme kann über die Fassade aufgenommen und wieder verwendet werden, was zur Wärmerückgewinnung beiträgt und somit den Bedarf an primären Energiequellen reduziert.
- 4) Modulbauweise und Standardisierung:
Durch die simultane Vorfertigung der Module mit bspw. den Tiefbau- und Fundamentarbeiten ergibt sich eine erhebliche Zeit- und Kostenersparnis. Im Gegensatz zur Individualisierung steht hier die Übertragbarkeit des modularen Konzeptes auf weitere Gebäude sowie die Möglichkeit zur schnellen Erweiterung, Umgestaltung oder Demontage im Vordergrund. Dies führt zu mehr Kostensicherheit und Flexibilität im Bauablauf. Zudem trägt die Modulbauweise auch ökologisch bei, da durch die Vorfertigung weniger Ausschussmaterial entsteht, was insgesamt ressourcenschonender ist.
- 5) Steigerung des Enttechnisierungsgrades: So viel Technik wie nötig, aber so wenig wie möglich:
Die Enttechnisierung verfolgt das Ziel, die fassadenintegrierte Technik auf ein notwendiges Minimum zu beschränken. Dieser Ansatz hat diverse Vorteile, allen

voran in Bezug auf Nachhaltigkeit und Lebenszyklusanalysen (LCA). Die kürzere Lebensdauer der technischen Anlagen im Vergleich zur Fassade führt dazu, dass Wartung und Instandsetzung früher durchgeführt werden müssen, als es üblicherweise für Fassaden der Fall wäre. Diese gezielte Enttechnisierung trägt nicht nur dazu bei, die Betriebskosten in einem überschaubaren Rahmen zu halten, sondern fördert auch eine insgesamt nachhaltigere und effizientere Nutzung der Gebäudeinfrastruktur.

- 6) Etablierung von LowEx-Systemen zur Reduzierung des Exergieverbrauchs:
Dieses Konzept fokussiert sich darauf, mit möglichst wenig "wertvoller" Energie, der sogenannten Exergie, auszukommen. Das übergeordnete Ziel besteht darin, die Temperaturdifferenzen zwischen der Raum-Soll-Temperatur und dem eingesetzten Wärmeträger auf ein Minimum zu begrenzen. Durch die Implementierung von LowEx-Systemen wird ein Planungsinstrument geschaffen, das nicht nur zur Verminderung des Exergieverbrauchs beiträgt, sondern auch dazu dient, die Treibhausgasemissionen signifikant zu reduzieren.

- 7) Minimierung der CO₂-Äquivalente:
Die Notwendigkeit der Minimierung der CO₂-Äquivalente wird durch eine Reihe von Gründen angetrieben. Einerseits resultiert sie aus den Vorgaben des Klimaschutzabkommens, das eine reduzierte CO₂-Emission zur Bewältigung des Klimawandels fordert. Hinzu kommt die aktuelle CO₂-Steuer, die derzeit bei 30 Euro pro Tonne liegt und bis 2026 auf 65 Euro pro Tonne steigen soll, was zusätzlichen Anreiz für Emissionsreduktionen schafft (Burger et al., 2022). Neben den ökonomischen Aspekten sind auch verbesserte Ökobilanzergebnisse ein Motiv für die CO₂-Minimierung. Nicht zuletzt steigert eine geringere CO₂-Belastung die Chancen auf bessere Nachhaltigkeitszertifizierungen, wodurch die Gesamtnachhaltigkeit von Projekten betont wird.

Diese Ziele sollen über die zwei zentralen Funktionsebenen der Fassade (äußere und innere Funktionsebene) umgesetzt werden. Dabei unterliegen die zwei Fassadenabschnitte unterschiedlichen Anforderungen. Die Außenseite ist volatilen Randbedingungen durch saisonale klimatische Veränderungen ausgesetzt.

Zielfunktionen der äußeren Funktionsebene:

- Witterungsschutz vor UV-Strahlung und Niederschlag bzw. Feuchteeinwirkung
- Schnelle Abgabe von Wärmelasten durch hohe thermische Übertragung während der Nachtstunden
- Reduzierung der Temperaturamplitude über eine geringe thermische Speicherung

Bauphysikalische Interpretation der Zielfunktionen:

- Diffusionsoffenheit bzw. Abführung von Kondensat-Feuchtigkeit
- Nachts: Fähigkeit einer hohen Wärmeleitung und -strahlung und große wärmeübertragende Fläche zur schnelleren Wärmeabführung mittels oberflächennaher Aktivierung
- Tags: zusätzlicher Einsatz eines funktionalen Speichers als Wärmesenke

Die innere Funktionsebene ist dem zu konditionierenden Raum ausgerichtet und unterliegt anderen Randbedingungen. Die klimatischen Anforderungen in diesem Bereich sind viel präziser, aber dafür konstanter als an der Außenseite. Die Anforderungen, die aus der Nutzungsart des Industriegebäudes resultieren, bestimmen wesentlich die Entwicklung des energetischen Fassadenkonzepts.

Zielfunktionen der inneren Funktionsebene:

- hohe thermische Speicherfähigkeit im niedrigeren Temperaturniveau
- hohe thermische Übertragung bzw. Aufnahmefähigkeit
- Sicherstellung eines behaglichen Raumklimas

Bauphysikalische Interpretation der Zielfunktionen:

- hohe spezifische Wärmekapazität der aktivierten Trägerschicht
- hohe Wärmeleitung und -strahlung
- große wärmeübertragende Fläche zur schnelleren Wärmeaufnahme

In der Regel kann die Erfüllung der Ziele und Kriterien nur auf bestimmten Ebenen erreicht werden. Zum Beispiel durch die Veränderung von Stoffeigenschaften auf Baustoffebene oder erst durch das Zusammenspiel einzelner Komponenten auf Bauteilebene. Aus diesem Grund werden diese beiden Ebenen separat betrachtet. Die nachfolgenden Abschnitte beschreiben, wie und auf welcher Ebene die zuvor aufgezeigten Funktionen umgesetzt werden können.

6.2 Baustoffebene

6.2.1 Erhöhung der Speicherfähigkeit

Der prinzipielle Anreiz für die Untersuchungen im Rahmen dieser Dissertation ist die Tatsache, dass der Energiebedarf und die Energieerzeugung zeitlich nicht synchron verlaufen. D.h. dass Energie, die am Tag zugetragen wird, zeitversetzt über die Nacht abgetragen werden muss, um die Raumtemperatur konstant zu halten. Dabei gilt es die

Speicherung von thermischer Energie zu maximieren und diese zeitversetzt erneut bereit zu stellen.

Die Erhöhung der thermischen Speicherfähigkeit soll, wie im vorstehenden Kapitelabschnitt zu entnehmen ist, nur im Bereich der inneren Funktionsebene der ETA-Fassade genutzt werden. Eine erhöhte Speicherfähigkeit von thermischer Energie auf niedrigem Temperaturniveau reduziert und verschiebt zeitlich den Kältebedarf des Gebäudes. Auf Baustoffebene wird dies über die Erhöhung der spezifischen Wärmekapazität der eingesetzten Baustoffe realisiert. Je höher die Dichte eines Baustoffs, umso mehr thermische Energie (sensible Energie) kann er speichern. Die sensible Speicherfähigkeit ist somit durch die Rohdichte des Baustoffes begrenzt. Eine zusätzliche Erhöhung der spezifischen Wärmekapazität kann allerdings durch die ergänzende Berücksichtigung der spezifischen Wärmekapazität im latenten Bereich geschaffen werden. Dies wird durch den Einsatz von Phasenwechselmaterialien ermöglicht. Durch die Kombination der Speicherung sensibler und latenter Wärme kann die im Raum vorhandene Wärmelast zeitlich von den Temperaturschwankungen im Außenraum (tagsüber) nahezu entkoppelt werden. Bedingt durch die zeitliche Verschiebung der Wärmelast kann in diesem Fall eine erneuerbare Wärmesenke durch die Nutzung der nächtlichen Umgebungstemperatur angewendet werden.

Die Anwendung von PCM in der äußeren Funktionsebene ist nicht zu empfehlen, da das PCM der UV-Strahlung und der Heizleistung der Sonne ausgesetzt ist, wodurch die notwendige Regeneration limitiert wird. Die Regeneration auf der raumseitigen Schicht kann entweder durch Belüftung durch Ausnutzung der nächtlichen Raumluftabkühlung oder durch die wassergeführten Rohrsysteme verlaufen. Bei der wassergeführten Kühlung kann die Vorlauftemperatur knapp unter dem Schmelzpunkt des jeweiligen PCMs liegen, wofür sich regenerative Energiequellen gut eignen. (Obergefell et al., 2020)

Die Anwendung von PCM im Bauwesen zielt darauf ab, die thermische Trägheit von Gebäuden zu verbessern und die Temperatur- und Energiefluktuationen auszugleichen.

PCM-Arten:

Es gibt verschiedene Arten von PCM, die je nach ihrem Phasenübergang und ihren thermischen Eigenschaften differenziert werden können. Im Bauwesen werden vor allem folgende Arten von PCM eingesetzt:

- Organische PCMs: Alkane, Wachse und Paraffine
- Anorganische PCMs: Salzhydrate, Wasser, Nitrate, Chloride und Hydroxide (Jacob und Kukovec, 2022)

Diese werden in drei wesentlichen Grundformen bzw. Konsistenzen weiterverarbeitet:

- **Pulver:**
Die einzelnen Partikel des PCMs werden von einer Hülle umschlossen und in eine Wasserlösung getaucht. Im nächsten Schritt wird das Wasser entfernt mit dem Ziel ein Pulver aus eingekapseltem PCM zurückzulassen.
- **„Cake“:**
Die PCM-Partikel werden ebenso von einer Hülle umschlossen und in eine Wasserlösung getaucht. Der wesentliche Unterschied zum Pulver ist, dass nur ein Anteil des Wassers entfernt wird, so dass eine kuchenähnliche Masse zurückbleibt, die zu 30 % aus Wasser und zu 70 % aus Feststoffen besteht.
- **„Slurry“:**
Beim Slurry wird ähnlich wie beim Cake ein Anteil des Wassers in der Masse erhalten. Die PCM-Partikel werden ebenfalls umhüllt und in eine Wasserlösung getaucht. Hier verbleibt ein größerer Anteil an Wasser, etwa 60 %. Es entsteht eine Aufschlämmung, die somit nur zu 40 % aus Feststoffen besteht.
(Oró et al., 2014) (Mehling, Brütting und Haussmann, 2022)

Thermische Eigenschaften von PCM

Zur Identifikation eines für eine bestimmte Anwendung geeigneten PCMs sind folgende thermische Eigenschaften relevant:

- Temperaturbereich des Phasenwandels [K] (Schmelz- und Erstarrungsbereich)
- Schmelz- bzw. Erstarrungsenthalpie [kJ/kg] (notwendige Energie für den Phasenwechsel)
- Wärmeleitfähigkeit [W/mK]
- Spezifische Wärmekapazität [kJ/(kg·K)]
- Rohdichte für die Zustände fest und flüssig [kg/m³]

Im Industriegebäudesektor soll die thermisch aktivierte Fassade der Kühlung des Hallenbereiches dienen. Im Falle der ETA-Fabrik handelt es sich um eine nachgebildete Produktionshalle. Die Durchschnitts-Soll-Temperatur beträgt hier $21\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$ und ist für die Auswahl des PCMs maßgebend. Die Raum-Soll-Temperatur muss im Schmelz- und Erstarrungsbereich des PCMs liegen, indem der interkristalline Phasenwandel stattfindet.

Bei der Verwendung von PCM im Bauwesen ist es ratsam, dass die Schmelz- und Erstarrungsbereiche ein breites Spektrum abdecken. Dies liegt daran, dass im Bauwesen aufgrund des trägen thermischen Verhaltens der Baustoffe nur selten präzise Temperaturen erreicht werden können. Daher sollten die Temperaturbereiche für den Phasenwechsel eine gewisse Hysterese ermöglichen. Im Gebäudebereich werden üblicherweise Salzhydrate oder Paraffine verwendet. Die spezifischen Schmelzenthalpien

liegen im Mittel bei etwa 180 kJ/kg für Paraffine und 300 kJ/kg für Salzhydrate. (Mankel, 2020)

Im Bauwesen sind bisher aufgrund der hohen Investitionskosten noch nicht viele Phasenwechselmaterialien auf dem Markt etabliert worden. Dennoch gibt es bereits in der Forschung angewendete PCMs, von denen nachstehend drei aufgelistet sind:

- PCM-Slurry: organisches PCM in einem Phasenwechsel-Temperaturbereich von etwa 10 bis 50 °C in einer Mikroverkapselung bestehend aus Polymethylmethacrylat (PMMA) oder Melaminharz. (Mehling, Brütting und Haussmann, 2022)
- Mikroverkapseltes Paraffin z.B. des Herstellers Microtek, Produkttyp: Nextek-Technologie (microtek laboratories, inc.)
- Bio-PCM aus Bioabfällen z.B. des Herstellers PureTemp LLC (PureTemp LLC, 2023)

Die Integration von PCM kann durch Verkapselung erreicht werden, entweder auf Makro- oder Mikroebene. Im Kapitel 6.3.3 wird die Makroverkapselung behandelt. Die Mikroverkapselung hingegen ermöglicht die direkte Integration auf Baustoffebene und beinhaltet das Beschichten von PCM-Partikeln, die sich im Größenbereich von 1 µm bis 1 mm befinden. Im Bauwesen werden in der Regel Hüllmaterialien wie Melamin-Formaldehyd-Harze oder Polyalkylmethacrylate verwendet, da sie die erforderliche Robustheit bieten. (Kramer, 2000)

Phasenwechselmaterialien weisen eine hohe Schmelzenthalpie auf, jedoch haben sie im Gegenzug eine niedrige Wärmeleitfähigkeit. Dies führt dazu, dass die Übertragung von thermischer Energie langsam erfolgt. Daher ist es wichtig, dass die Verkapselung die Wärmeleitfähigkeit nicht beeinträchtigt, damit die Wärmeübertragung beschleunigt wird. (Fachhochschule Münster)

Notwendige Menge an PCM

Die erforderliche Menge an PCM lässt sich anhand einer dynamischen Kühllastberechnung auf Grundlage der (VDI 2078, 2015) genau berechnen. Dabei ist die Kühllastberechnung und somit auch der PCM-Anteil von der Raumgrundfläche abhängig. Als Richtwert sollte mindestens 300 kJ/m² zur Verwendung kommen. (Schmidt, Pawelz und Kieseritzky, 2016)

Sollte PCM als Gemisch in Kombination mit Putz oder Mörtel verwendet werden, sollte aufgrund der erzielbaren Festigkeit dieser Baustoffschicht nie mehr als 25 bis 30 % PCM-Anteil vorliegen. (Mankel, 2020)

6.2.2 Kreislaufgerechte Baustoffwahl

Bei der kreislaufgerechten Baustoffwahl spielt die Reduzierung der grauen Energie eine entscheidende Rolle. Es hat sich gezeigt, dass der Großteil der grauen Energie für die Außenwand (ca. 32 %) aufgewendet wird (siehe Abbildung 6.1) (Zimmermann und Reiser, 2021). Die Auswahl der Fassadenkonfiguration hat daher einen maßgeblichen Einfluss auf den Bedarf an grauer Energie. Graue Energie umfasst den nicht-erneuerbaren Primärenergiebedarf eines Gebäudes und seiner Baustoffe über die gesamte Lebensdauer.

Im Rahmen dieses Unterkapitels bzw. des Kapitels 8.1 steht die ökobilanzielle Beurteilung der ETA-Fassade im Fokus. Das Ziel ist es, den nicht erneuerbaren Primärenergieaufwand und die Treibhausgasemissionen abzuschätzen. Ein aufkommender Trend ist die Verwendung BIM-basierter, digitaler Ökobilanzierungstools, da sie die Verknüpfung mit CAD-Modellen ermöglichen.

Für die digitale Ökobilanzierung der ETA-Fassade wurde das Grasshopper Plug-In "One Click LCA" verwendet. Dabei wurde versucht, die Systemgrenze der Ökobilanzierung auf die Fassade zu beschränken und Ergebnisse für 1 m² Fassadenfläche zu generieren. Das Hauptziel bestand darin festzustellen, ob die Fassade bereits in frühen Planungsphasen mit einem solchen Bilanzierungstool ökobilanziert werden kann.

Die erzielten Ergebnisse sollen schließlich dazu dienen, ökologische Optimierungsmöglichkeiten für die ETA-Fassade aufzuzeigen. Durch diese Untersuchung können Erkenntnisse gewonnen werden, die zur Weiterentwicklung und Verbesserung der ETA-Fassade beitragen. Die Beschreibung der Ökobilanzierung der ETA-Fassade und dessen Ergebnisse erfolgt im Kapitel 8.1.

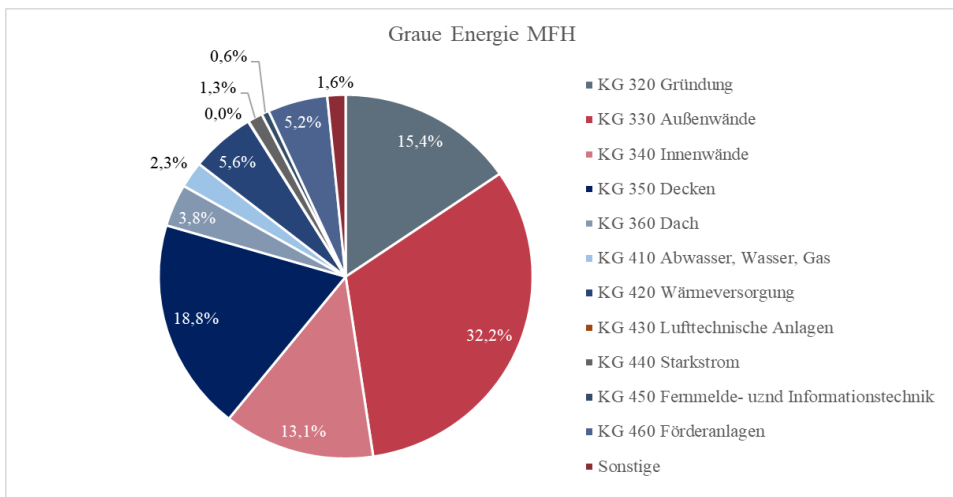


Abbildung 6.1: Graue Energie eines Mehrfamilienhauses gegliedert in Kostengruppen nach DIN 276, Bilanzzeitraum: 80 Jahre, in Anlehnung an (Zimmermann und Reiser, 2021)

Weiterhin haben seit dem 01. Januar 2023 Ökobilanzierungen einen bedeutenden Stellenwert erlangt, insbesondere aufgrund der Einführung der neuen Förderprodukte der KfW "Klimafreundliche Nichtwohngebäude" und "Klimafreundliche Nichtwohngebäude mit QNG". Beide Programme beinhalten eine Ökobilanzierung, bei der mindestens der nicht-erneuerbare Primärenergieaufwand sowie die Treibhausgasemissionen ermittelt werden müssen.

Die Grundlage für die Ökobilanzierung nach dem Qualitätssiegel Nachhaltiges Gebäude (QNG) bilden die seit dem 1. März 2023 eingeführten Rechenwerte 2023 des QNG. Diese basieren auf der Ökobilanz-Datenbank "Ökobau.dat" in der Version 2020-II sowie auf den Ökobilanz-Modulen gemäß DIN EN 15804. (Bundesministerium für Wohnen und Stadtentwicklung und Bauwesen, 2023)

Durch die Einbeziehung der Ökobilanzierung in die Förderprodukte der KfW wird ein verstärkter Fokus auf die Umweltauswirkungen von Nichtwohngebäuden gelegt. Die Ermittlung des Primärenergieaufwands und der Treibhausgasemissionen ermöglicht es, den ökologischen Fußabdruck von Fassadenkonfigurationen genauer zu bewerten und gezielt Maßnahmen zur Reduzierung des Ressourcenverbrauchs und der Emissionen zu ergreifen.

Variation des Trägermaterials für TAF-Module

Die Effizienz des TAF-Systems hängt maßgeblich von der Wahl des Wärmeträgermediums sowie des Trägermaterials ab, in dem das Medium integriert ist (siehe Abschnitt 6.3.2). Bei der ETA-Fassade wird Beton als Trägermaterial eingesetzt, in das wassergeführte Kapillarrohrsysteme eingebettet sind. Aktuelle Forschungsarbeiten sowie Entwicklungen auf dem Markt befassen sich zunehmend mit der Erforschung von alternativen Trägermaterialien in Verbindung mit thermischer Aktivierung.

Holz:

Mindrup hat eine Untersuchung an thermisch aktivierten Massivholzelementen in Brettsperrholzbauweise durchgeführt. Hierbei erfolgt die thermische Aktivierung mithilfe von Luftkanälen, die durch Fräsungen im Inneren der Brettsperrholzelemente erzeugt werden. Die Berücksichtigung luftgeführter Systeme zur energetischen Optimierung der ETA-Fassade wurde ausgelassen, da Luft aufgrund ihrer geringeren Wärmeleitfähigkeit im Vergleich zu Wasser weniger effizient ist. Die Integration von wassergeführten Systemen direkt in das Holz stellte sich laut Mindrup als problematisch dar, da die Verwendung von Wasser aufgrund des erhöhten Risikos von Schäden an den Rohrsystemen innerhalb der Brettsperrholzelemente sowie aus produktionstechnischen Gründen ungeeignet ist. (Mindrup, 2019)

Ziegel:

Am Markt sind bereits thermisch aktivierte Systeme in Ziegelbauweise verfügbar. Ein Beispiel hierfür ist das Produkt "Unitherm" von Unipor. Dieses besteht aus Verblendschalen aus Carrobric-Ziegelplatten, die als Langlochplatten ausgeführt sind, wodurch die Verlegung eines einzelnen Heizrohrs in vier Schleifen möglich wird. Die Elemente werden im Werk vorgefertigt, dabei mit dem Systemrohr versehen und mit Rundstahl bewehrt. Die anschließende Verfüllung erfolgt mittels eines verdichteten Spezialmörtels, der die Rohdichte erhöht, um eine bessere Wärmeleitung zu gewährleisten. Dies ist von Bedeutung, da herkömmliches Ziegelmauerwerk lediglich Rohdichten von 600 bis 1000 kg/m³ aufweist. (UNIPOR Ziegel Marketing GmbH, 2019)

Lehm:

Lehm wird im Bauwesen aufgrund seiner vorteilhaften nachhaltigen Eigenschaften, wie einer guten CO₂-Bilanz und Recyclingfähigkeit, sowie seiner positiven bauphysikalischen Aspekte, wie feuchtigkeitsregulierender Wirkung und hoher Wärmespeicherfähigkeit ($\rho = 1450 \text{ kg/m}^3$), gerne eingesetzt. Bisher wird Lehm vor allem raumseitig in Form von Lehmputz oder Vorsatzschalen eingesetzt. In diesem Zusammenhang hat die Firma Leipfänger-Bader eine wasserführende Klima-Lehmplatte entwickelt. Diese Trockenbauplatte aus Lehm ist mit einem Armierungsgewebe und einem integrierten Kunststoff-Metall-Verbundrohr (14 mm x 2 mm) versehen. (Leipfänger Bader, 2023)

6.3 Bauteilebene

6.3.1 Thermische Bauteilaktivierung über Rohrsysteme

Eine sinnvolle Möglichkeit, auf Bauteilebene Einfluss auf die thermische Aktivierung der Fassade zu nehmen, besteht darin, die Eigenschaften des Rohrsystems zu variieren. Besonders im Hinblick auf die Geometrie und die Materialität des Rohrsystems erweist sich eine Parametervariation als besonders sinnvoll.

Geometrie

Folgende Parameter werden in Bezug auf die Geometrie variiert:

- Rohrdurchmesser
- Rohrabstand zueinander: Mit kleineren Abständen zwischen den parallel verlaufenden Rohren steigt die thermische Übertragung. Dadurch wird die

Temperaturwelligkeit sowohl in der Konstruktion als auch auf der Oberfläche verringert.

- Rohrmatten-Positionierung: Variation der Lage innerhalb der inneren und äußeren Funktionsebene
- Dicke der Überdeckung: Bewertung der Temperaturwelligkeit

Rohrmaterial

Die Wärmeleitfähigkeit des Rohrmaterials spielt eine entscheidende Rolle bei der Übertragungsrate thermischer Energie. Die Wahl des Materials hängt jedoch eng mit dem Rohrdurchmesser und der Oberflächenstruktur der Anwendungsfläche zusammen. Für kapillarähnliche Rohrsysteme, die eine gewisse Flexibilität aufweisen sollen (z.B. zum Einsatz auf abgerundeten Oberflächen), kommen beispielsweise nur Kunststoffe in Frage. (Bundesverband Flächenheizung und Flächenkühlung e.V., 2020)

- Kunststoffrohre:
 - Polypropylen (PP)
 - vernetzter Polyethylen (PE-X)
 - Polybuten (PB-H / PB-R)
 - Polyethylen erhöhter Temperaturbeständigkeit (PE-RT I / II)
 - vernetzter Polyethylen mittlerer Dichte (PE-MDX)
 - Polyolefin-Aluminium-Verbundrohre
 - Kunststoff-Verbundrohre
- Mehrschichtverbundrohre:
 - Verbund eines Kunststoffbasisrohres mit einer Metall-Lage aus z. B. Aluminium
- Kupferrohre:
 - Kupferrohrsysteme mit Kunststoff-Ummantelungen
 - desoxidiertes, sauerstofffreies Kupfer (Cu-DHP)

6.3.2 Optimierung der Wärmetransportmechanismen

Im Kontext der thermischen Aktivierung von Bauteilen, speziell von Fassaden, ist die Übertragung von thermischer Energie wohl der bedeutendste thermodynamische Prozess. Bei der angestrebten energetischen Optimierung des ETA-Fassadenmoduls spielt die Untersuchung der Wärmetransportmechanismen daher eine wesentliche Rolle. Grundsätzlich werden drei Arten von Wärmetransportmechanismen unterschieden: Konvektion, Wärmeleitung und Wärmestrahlung. Jeder dieser Mechanismen trägt zur Übertragung von Wärmeenergie bei und beeinflusst somit die Effizienz und Leistungsfähigkeit des ETA-Fassadenmoduls.

Konvektion (Fluiddurchströmung): Wärmetransport im Rohrsystem

Im Falle der Konvektion ist die Untersuchung des Fluids innerhalb des Rohrsystems sinnhaft. Dabei lassen sich zwei Parameter variieren:

- Das Mischverhältnis des Kühlmittels bzw. des Wasser-Glykosol-Gemisches.
- Der Wasserdruck, der durch die Umwälzpumpe erzeugt wird.

Durch die Variation dieser Parameter können die Strömungseigenschaften (z.B. Fluidgeschwindigkeit) und somit die Wärmeübertragungsrate zwischen Fluid und Rohr beeinflusst werden.

Wärmeleitung: Wärmetransport vom Rohrregister in das Bauteil

Zur zügigen Aufnahme von thermischer Energie auf der inneren Funktionsebene und der Wärmeabgabe an der äußeren Funktionsebene sollte die Fähigkeit der Wärmeleitung maximiert werden. Die thermische Energie, die auf die Oberfläche des Bauteils auftritt, muss mit geringem Widerstand durch das Trägermaterial über die Ummantelung des Rohrsystems bis schließlich zum Wärmeträgermedium innerhalb des Rohrsystems transportiert werden. Somit sind auf diesem Wege folgende Parameter zu prüfen:

- Maximierung der Wärmeleitfähigkeit der Ummantelung des Rohrsystems (bereits im Abschnitt 6.3.1 beschrieben)
- Maximierung der Wärmeleitfähigkeit des Trägermaterials (mit und ohne PCM)
- Dicke der Ummantelung des Rohrsystems: Eine dünnere Ummantelung reduziert den Widerstand für die Wärmeleitung und erleichtert somit den Transport der thermischen Energie.

Wärmestrahlung: Wärmetransport von der raumseitigen/außenseitigen Oberfläche

Der Wärmetransport über Wärmestrahlung wird von verschiedenen Parametern beeinflusst. Dazu gehören:

- die langwellige Strahlung während der Nachtstunden, einschließlich der sogenannten "atmosphärischen Gegenstrahlung"
- Der Emissionsgrad ϵ , der angibt, wie stark eine Wandfläche Wärmestrahlung mit ihrer Umgebung austauscht.
- Optimierung der Lage des Rohrregisters mit dem Ziel eine geeignete Oberflächentemperatur der Überdeckungsschicht zu erreichen

6.3.3 Erhöhung der Speicherfähigkeit

Speicherung von thermischer Energie auf Makroebene ist üblicherweise in Form von dezentralen Speichern bekannt. Dabei wurde PCM bereits in vielen Bauprojekten als eigenständiges System beispielsweise innerhalb von Lüftungskanälen genutzt. Auf Bauteilebene lässt sich PCM jedoch auch als Komponente bzw. Bauteilschicht in makroverkapselter Form integrieren. Es bestehen mehrere Ausführungs- und Verkapselungsmöglichkeiten:

- Latentspeicherplatten: Dabei handelt es sich um verzinkte Blechkassetten, die mit PCM gefüllt sind. Die Oberseite der Platten verfügt über eine Rillenoberfläche, in der Rohre eingebettet werden können. (Lerche et al., 2010)
- CSM-Module („compact storage module“): Diese bestehen aus einer mit Salzhydraten gefüllten Aluminiumhülle (Rubitherm Technologies GmbH, 2023)
- in PE-Rohre verpacktes PCM (Salzhydrat) zur Anwendung in Pfosten-Riegel-Fassaden (Jager, 2014)
- Fassadenintegrierte dezentrale Lüftungsgeräte mit PCM (Hall et al.)

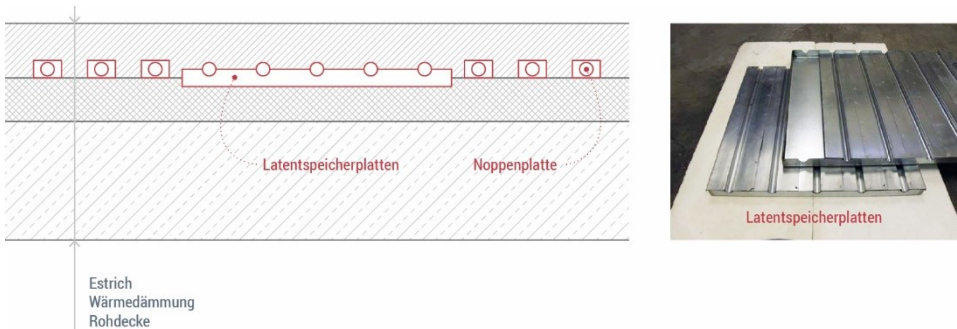


Abbildung 6.2: Im Fußbodenaufbau integrierte Latentspeicherplatten nach (Lerche et al., 2010)

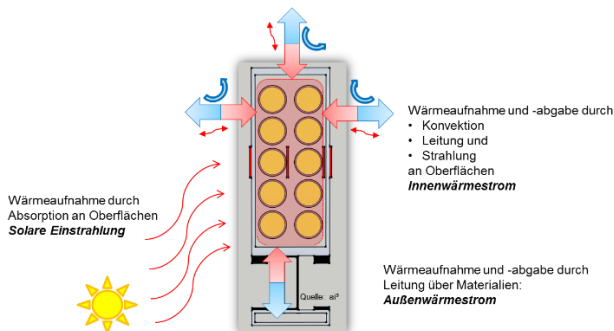


Abbildung 6.3: Pfosten-Riegel-Fassaden mit integriertem PCM-Rohren (Jager, 2014)

6.3.4 Interaktive Hinterlüftungsebene

Die Hinterlüftung trägt maßgeblich zur Festlegung des U-Werts der Fassadenkonstruktion bei, ebenso wie zur Ableitung der angesammelten Feuchtigkeit zur Feuchteregulierung. Durch saisonale Veränderungen der Hinterlüftung ergibt sich der Ansatz des dynamischen U-Werts. Es stehen verschiedene Optionen zur Verfügung, um Anpassungen in der Hinterlüftung vorzunehmen, bspw. durch den Einsatz automatisierter Klappen oder Einschübe.

- Verschließen der Hinterlüftungsebene (Erzeugung einer ruhenden Luftschicht)
- Anpassung des Öffnungsquerschnitts der Belüftungsöffnungen (Steuerung zwischen schwach und stark belüfteter Schicht)

Das Verschließen der Hinterlüftungsebene verursacht eine Dämmwirkung, wie die einer ruhenden Luftschicht. Eine ruhende Luftschicht bedeutet, dass sie von keiner Außenluft durchströmt wird, da sie vollständig luftdicht umschlossen ist. Um einen vollständigen Austausch mit der Außenluft zu verhindern, muss entweder eine Folie verwendet werden oder der Luftspalt zwischen den Außenwandbekleidungen aus UHPC müsste so minimiert werden, dass der Querschnitt der vorhandenen Öffnungen 500 mm^2 pro Meter Länge nicht überschreitet. Sobald dies gewährleistet ist, kann die ruhende Luftschicht als dämmende Schicht (Heizperiode) betrachtet werden.

Hinterlüftete Außenwände zeichnen sich durch einen Luftwechsel aus. Dabei wird zwischen schwach belüfteten und stark belüfteten Wänden unterschieden, für die kein Nachweis des klimabedingten Feuchteschutzes gemäß DIN 4108-3 erforderlich ist (DIN 4108-3, 2018). Im Falle einer schwach belüfteten Wand mit einer Öffnungsquerschnittsfläche zwischen 500 und 1.500 mm^2 beträgt die Wärmeleitfähigkeit das Doppelte im Vergleich zu einer ruhenden Luftschicht mit gleicher Dicke. Bei einer stark belüfteten Wand, deren Öffnungen einen Querschnitt von 15 cm^2 pro Meter Länge überschreiten, entspricht der R_{se} -Wert dem R_{si} -Wert an der warmen Seite der Hinterlüftungsebene. D.h. die Luftschicht trägt der Dämmung nicht mehr bei und wird in der U-Wertberechnung nicht berücksichtigt. (DIN EN ISO 6946, 2018)

Basierend auf diesen Aspekten lässt sich ableiten, dass unter Berücksichtigung der jeweiligen klimatischen Bedingungen die Öffnungsweite sensorgesteuert dimensioniert werden könnte, um eine effektive Wärmeabfuhr oder das Beibehalten eines Wärmepolsters zu gewährleisten. Während der Kühlperiode sind die Eigenschaften einer stark belüfteten Schicht von Vorteil, während im Zuge der Heizperiode die Eigenschaften einer ruhenden Luftschicht bevorzugt werden. Bei der Schaffung einer ruhenden Luftschicht ist jedoch darauf zu achten, dass der Feuchteschutz gewährleistet wird, da Feuchtelasten aufgrund des fehlenden Luftwechsels nicht mehr ausreichend abtransportiert werden können.

6.4 Gebäudeebene

6.4.1 Positionierung der thermisch aktivierten Fassadenmodule

Auf Gebäudeebene lässt sich zusätzlich zu den vorstehend genannten Parametern noch die Positionierung der thermisch aktivierten Fassade variieren. Dabei wird zwischen der raumseitigen und der außenliegenden thermischen Aktivierungsebene differenziert.

Außenliegende Aktivierungsebene:

Bisher lag der Fokus bei der ETA-Fassade auf der Betrachtung der Außenluft als äußere Angrenzung. Interessant könnte jedoch auch die Positionierung der aktivierten Seite gegen das Erdreich sein. Hier wäre die Wärmesenke nicht mehr die nächtliche kalte Umgebungsluft, sondern das Erdreich, das weniger schwankenden Temperaturen unterliegt und somit einen größeren Zeitraum zum Kühlen zur Verfügung stellt. Eine sinnvolle Lösung könnte hier eine bivalente thermische Aktivierung sein, bei der beide Angrenzungen kombiniert werden. Allerdings ist dies in Industriegebäuden, die in der Regel nur oberirdische Geschosse aufweisen, oft nicht umsetzbar (siehe Kapitel 4.1).

Für alle anderen Gebäude, die eine Unterkellerung oder ein Plattenfundament aufweisen, bietet sich die Nutzung des Erdreichs als Wärmesenke an. In den meisten Fällen sind Industriegebäude nur eingeschossig unterkellert, was einer Erdreichtiefe von etwa 3 bis 4 Metern entspricht. Die in diesem Bereich vorliegende oberflächennahe Erdwärme befindet sich auf einem Temperaturniveau zwischen 5 bis 15 °C, was ein idealer Temperaturbereich für eine LowEx-System im Niedertemperaturbereich ist. Das Erdreich weist zudem gute thermische Eigenschaften auf, wie eine hohe Wärmeleitfähigkeit des Gesteins (Wärmetransport durch Wärmeleitung) und eine hohe Wärmekapazität zur thermischen Speicherung, wodurch Temperaturschwankungen, die durch die angrenzende Außenluft verursacht werden, geglättet werden können. Zudem ermöglicht der hohe konvektive Wärmetransport durch das Grundwasser eine zusätzliche Wärmeübertragung. (Born et al., 2022)

Innenliegende Aktivierungsebene:

Raumseitig sollte die Aktivierungsebene dort positioniert werden, wo die größte Wärmebelastung zu erwarten ist, um die Raumtemperatur effektiv herunter kühlen zu können. Thermische Energie wird über Konvektion und Strahlung aufgenommen, wodurch sich zwei geeignete Positionen identifizieren lassen.

Im Hinblick auf die Konvektion erweist sich eine Platzierung im oberen Drittel der Halle als ideal. Die Tatsache, dass warme Luft aufsteigt, bildet hierbei die Grundlage. Dieser Auftrieb resultiert aus der geringeren Dichte von warmer Luft im Vergleich zu

kalter Luft. Während warme Luft aufgrund der erhöhten kinetischen Energie der einzelnen Moleküle eine geringere Dichte aufweist, sinkt kalte Luft aufgrund ihrer höheren Dichte nach unten. Die Moleküle in warmer Luft bewegen sich schneller und entfernen sich voneinander, was zu einer niedrigeren Dichte führt.

Bezogen auf die Strahlung hingegen ist die Position nahe den wärmeemittierenden Maschinen der Prozesslinie (insbesondere der Metall- und Glasindustrie) sinnvoll. Die hier vorliegenden technischen Anlagen verlieren Wärme als Nebenprodukt über deren Mantelfläche. Um diese Abwärme effektiv zu nutzen, ist es ratsam, die Aktivierungsebene in unmittelbarer Nähe zu positionieren. Auf diese Weise können die thermischen Aktivierungsflächen die abgegebene Wärme absorbieren. Im Industriesektor werden bereits zahlreiche Maßnahmen ergriffen, um die Abwärme zu reduzieren. Dazu gehören Maßnahmen wie Dämmung und Wärmerückgewinnung. Die Wärmerückgewinnung wird beispielsweise in der ETA-Fabrik umgesetzt, indem eine erzwungene Konvektion durch wassergeführte Rohrleitungen und den Einsatz von Wärmetauschern ermöglicht wird. Es gibt jedoch viele Maschinen, die nur begrenzt gedämmt oder nicht mit einer Wärmerückgewinnung ausgestattet werden können. In solchen Fällen bietet es sich an, thermisch aktivierte Flächen auf gleicher Höhe zu platzieren, damit die entstehende Abwärme geräteunabhängig abgeführt werden kann.

7 Simulative Energieanalysen

Im Zusammenhang mit der in Kapitel 5 vorgestellten thermisch aktivierten Fassade der ETA-Fabrik sowie der verschiedenen Ansatzmöglichkeiten zur energetischen Auswertung auf Baustoff-, Bauteil- und Gebäudeebene aus Kapitel 6, sind simulative Untersuchungen durchzuführen. Ziel dieser Untersuchungen ist die Analyse des hygrothermischen Bauteilverhaltens der ETA-Fassade, aus der eine Aussage zur realisierbaren Energieeffizienz und Energieflexibilität resultieren soll.

Dabei wird die aktuelle Konfiguration der ETA-Fassade und dessen messtechnischen Untersuchungsergebnisse als Benchmark für diese Bewertung herangezogen. Es erfolgt somit eine vergleichende Analyse von Ergebnissen mit einem festgelegten physikalischen Modell der ETA-Fassade. Mithilfe einer Wärmestromanalyse soll insbesondere die nächtliche Kühlleistung eines Fassadenmoduls ermittelt und daraus die Energieeffizienz berechnet werden. Die Energieflexibilität wird wiederum über das Wärmespeichervermögens des Bauteils abgeleitet.

Im Rahmen dieses Kapitels sind folgende Thesen zu beantworten:

- a) Wie und in welchem Umfang erfolgt die Wärmeaufnahme/-abgabe über die thermische Aktivierung auf Bauteilebene?
- b) Welche Auswirkungen haben bestimmte Parameter auf das hygrothermische Bauteilverhalten der ETA-Fassade?
- c) Wie verhält sich die zeitliche und geometrische Verteilung der hygrothermischen Gegebenheiten (Temperatur, relative Feuchte, Wärmeströme, Wassergehalt etc.)?
- d) Welche Parametervariation ist die sinnvollste bei der Verfolgung des Ziels der energetischen Optimierung der ETA-Fassade?

Für die hygrothermischen Energieanalysen wird die Simulationsumgebung WUFI® 2D herangezogen, mit der zweidimensionale Fragestellungen abgebildet und gelöst werden können. Hierzu nutzt WUFI® 2D gekoppelte Differentialgleichungen zur Beschreibung der Wärme- und Feuchtetransportvorgänge.

7.1 Hygrothermische Bauteilbetrachtungen

Die in Kapitel 5 beschriebene ETA-Fassade soll mit Hilfe von Simulationsberechnungen hygrothermisch untersucht werden. Wesentliche Teile der Berechnungsmethodik solcher simulativen Analysen sind genormt. Hierbei kommen nachstehende Normen zum Tragen:

- DIN 4108-3 [2018-10] (DIN 4108-3, 2018)
- DIN EN 15026 [2007-07] (DIN EN 15026, 2007) und
- WTA-Merkblatt 6-2 [2014-12] (WTA, 2014).

Ziel und Zweck einer hygrothermischen Untersuchung ist die detaillierte Verhaltensanalyse bauphysikalischer Vorgänge innerhalb von objektbezogenen Bauteilen. Dabei soll die langfristige bauphysikalische Tauglichkeit eines vordefinierten Konstruktionsaufbaus unter bestimmten Randbedingungen sichergestellt und Grenzwerte, die das kritische Verhalten definieren, identifiziert werden (WTA, 2022).

Folgende bauphysikalische Prozesse werden dabei berücksichtigt (WTA, 2014):

- thermische Speicherung
- Wärmetransport sowie Bauteilauffeuchtung durch Wasserdampfdiffusion
- Wärmeübertragung durch Berücksichtigung von Latentwärmeeffekten
- Feuchtebedingter Transmissionswärmeverlust
- Tauwasserbildung an Bauteiloberflächen (Außen durch nächtliche Abstrahlung und Innen durch Wasserdampfsorption)
- Feuchtetransport in der Flüssigphase (Niederschlagsbelastung) und in der Dampfphase

Im Vergleich zur eindimensionalen stationären Normberechnung gemäß Glaser werden, wie aus der vorstehenden Auflistung hervorgeht, zusätzlich sowohl Wärme- und Feuchtespeichervorgänge als auch die Latentwärmewirkung durch Verdunstung oder Kondensation berücksichtigt (WTA, 2014).

Dabei haben die an der Fassade angrenzenden Klimabedingungen eine hohe Relevanz:

- Innenklima: Raumlufttemperatur und relative Feuchte
- Außenklima: Außenlufttemperatur, relative Feuchtigkeit, Regenbeaufschlagung, Wind und atmosphärische Gegenstrahlung

Hygrothermische Simulationsverfahren beruhen auf den Gesetzen der Thermodynamik und den entsprechenden thermodynamischen Bilanzgleichungen. Hierzu zählen die Bilanzgleichungen für den Wärme- und Feuchtetransport.

Die Bilanzgleichung für Wärme basiert auf dem Energieerhaltungssatz. Dieser besagt, dass in einem abgeschlossenen und reibungsfreien System die Summe der inneren Energien erhalten als auch konstant bleibt und somit ihre Änderung gleich null ist. Im Falle eines trockenen Baustoffs ist die Änderung der inneren Energie proportional zur Temperaturänderung. Bei Betrachtung von feuchten Baustoffen wird zudem die innere Energie der Feuchte berücksichtigt. Die Bilanzgleichung für Feuchte beruht auf dem Prinzip des Massenerhaltungsgesetzes. In einem abgegrenzten System ist die Summe der einfließenden Feuchte gleich der Masse der ausfließenden Feuchte. (VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, 2013a)

Die Veränderung der Wärmeenergie und des Feuchtegehalts über die Zeit und den Weg sowie dessen Zusammenhänge werden über die Kopplung der entsprechenden Differentialgleichungen abgebildet. Das den hygrothermischen Untersuchungen zugrunde liegende Berechnungsmodell wird somit maßgebend von den folgenden zwei Differentialgleichungen für den Wärme- und Feuchtetransport beeinflusst (Fraunhofer Institute for Building Physics IBP, 2009):

Wärmetransport:

$$\frac{\partial H}{\partial \theta} \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + h_v \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\delta}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \right) \quad (7.1)$$

mit

- H : Enthalpie eines feuchten Baustoffes [J/m³]
- θ : Temperatur [°C]
- λ : Wärmeleitfähigkeit [W/m·K]
- h_v : Verdunstungsenthalpie von Wasser [J/kg]
- δ : Wasserdampfdiffusionskoeffizient von Luft [kg/msPa]
- μ : Dampfdiffusionswiderstandsfaktor (trocken) [-]

Feuchtetransport:

$$\rho_w \frac{\partial u}{\partial \varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho_w D_w \frac{\partial u}{\partial \varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\delta}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \right) \quad (7.2)$$

mit

- ρ_w : Dichte von Wasser [kg/m³]
- u : Wassergehalt [m³/m³]
- φ : relative Feuchte [-]

- D_w : Flüssigtransportkoeffizient [m^2/s]
 δ : Wasserdampfdiffusionskoeffizient von Luft [kg/msPa]
 μ : Dampfdiffusionswiderstandsfaktor (trocken) [-]

Eine Temperaturänderung über die Zeit bewirkt eine Änderung des Wasserdampfdrucks (p_{sat}) in der Wärme- und Feuchtegleichung. Dampfdruckunterschiede sind die treibenden Kräfte für den Dampfdiffusionstransport innerhalb des Bauteils und an den Bauteiloberflächen. Somit führt die Änderung von p_{sat} zu einer Veränderung der Feuchte über die Zeit. Aus dieser Feuchteänderung resultiert wiederum eine Zu- bzw. Abnahme der Temperatur und von p_{sat} . (Fraunhofer Institute for Building Physics IBP, 2009)

Zur Lösung des vorstehend dargestellten Differentialgleichungssystems werden numerische Lösungsverfahren angewendet. Im Zuge dieser Arbeit wurden die resultierenden Differentialgleichungen mit Hilfe der sog. Finiten-Volumen-Methode (numerische Näherungsmethode) diskretisiert, ein iterativer Prozess in allen Gitterelementen des gewählten numerischen Netzes, bis die Konvergenz auf ein Minimum reduziert wird.

7.1.1 Simulationsumgebung WUFI 2D

Die Grundlage für das vorstehend beschriebene numerische Lösungsverfahren bildet die Simulationsumgebung WUFI® 2D. WUFI steht für „Wärme Und Feuchte Instationär“ und wurde vom Fraunhofer-Institut für Bauphysik entwickelt. WUFI® 2D berechnet in erster Linie Temperatur- und Feuchtefelder in zweidimensionalen Bauteilquerschnitten in Abhängigkeit von der zeitlichen Komponente. Die WUFI-Simulationssoftware-Reihe bietet vier übergeordnete Programme, WUFI® Pro und WUFI® 2D für Bauteilsimulationen sowie WUFI® Plus und WUFI® Passive für Gebäudesimulationen. Die diesen Hauptprogrammen zugrundeliegenden Rechenverfahren wurden über Freiland- und Labordaten verifiziert. (Fraunhofer Institut für Bauphysik IBP, 2019)

7.1.2 Simulationsmodell

Die Anwendung der Simulationsumgebung sowie simulative Untersuchung der ETA-Fassade wird im Folgenden in Anlehnung an die in WUFI® 2D vorhandene Baumstruktur zur Modellierung beschrieben. Die Baumstruktur beinhaltet folgende Bausteine:

- Geometrie
- Numerisches Gitter

- Materialien
- Anfangsbedingungen
- Oberflächen/Klima
- Quellen/Senken
- Numerik

Geometrische Modellierung:

Zu Beginn der geometrischen Nachbildung der ETA-Fassade und dessen thermische Aktivierung wurden zur Verfügung stehende Pläne der Ausführungsplanung herangezogen und miteinander verglichen. Dabei hat sich erwiesen, dass der Grundrissplan des Erdgeschosses zur Heizungs- und Kälteinstallation im Maßstab 1:50 hinsichtlich des Detaillierungsgrades am geeignetsten ist (Kruse Ingenieurgesellschaft mbH & Co. KG, 2014).

Eine präzise Beschreibung des Bauteilaufbaus der ETA-Fassade kann dem Kapitel 5 entnommen werden. In Abbildung 7.1 ist eine in CAD nachgebildete Zeichnung des darzustellenden Fassadenmoduls veranschaulicht. Bei genauer Betrachtung dieser Abbildung wird schnell ersichtlich, dass zur Vereinfachung der Modellbildung Symmetrien ausgenutzt werden können. Hierzu wurde das Fassadenmodul in vier Teile gesplittet, da zwei Symmetrieachsen identifiziert werden konnten (siehe Abbildung 7.2).

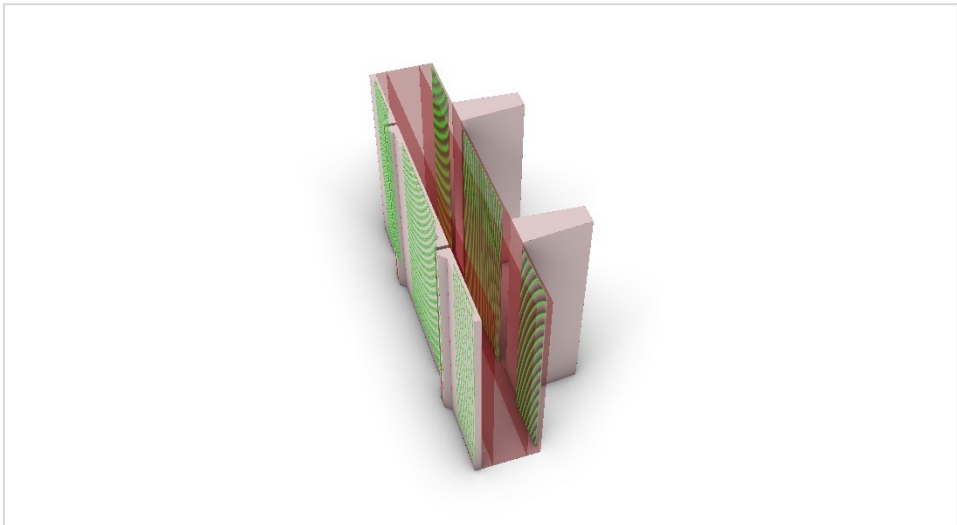
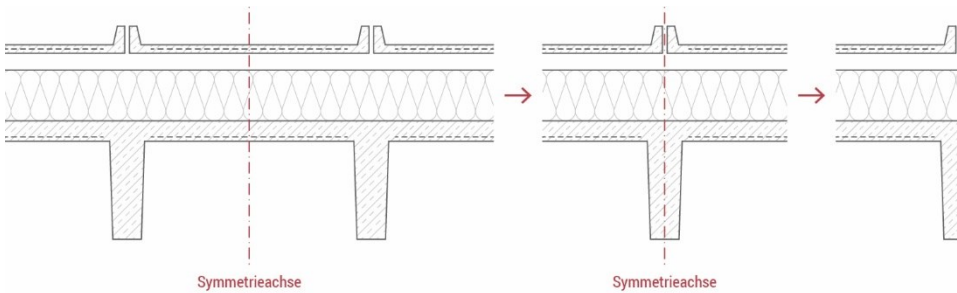


Abbildung 7.1: Perspektivische Darstellung eines ETA-Fassadenmoduls aus Rhino Grasshopper

Abbildung 7.2: Symmetrieanwendung - Vereinfachung des Modells auf $\frac{1}{4}$ des Fassadenmoduls

Für das Konstruieren in WUFI® 2D ist ein Grafikskript anzuwenden, das vektorbasiert rechteckige Elemente zeichnet. Im Grafikskript werden die Koordinaten sowie die Länge und Höhe der jeweiligen Rechtecke definiert. Andere Formen, außer Rechtecke, lässt WUFI® 2D nicht zu, was sich als erste Restriktion dieser Software identifizieren lässt. Demnach müssen komplexe Geometrien aus mehreren Rechtecken zusammengesetzt werden. Im Falle der ETA-Fassade betrifft dies insbesondere die kreisförmigen Rohre der Kapillarrohrmatten und die trapezförmigen Auskragungen wie beispielsweise die PI-Platte. Insofern sind diese Elemente als Quadrate oder Rechtecke abzubilden (siehe Abbildung 7.3).

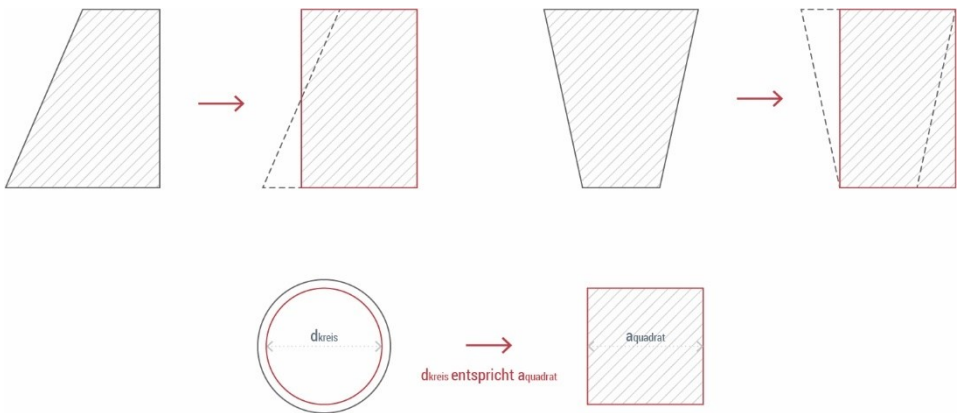


Abbildung 7.3: Geometrische Umsetzung von trapezförmigen und kreisrunden Formen

Diese Restriktion hat eine wesentliche Relevanz in Bezug auf die Wärmeübertragung bzw. auf die Übertragungsfläche der thermischen Aktivierungsebene. Die Darstellung der einzelnen Rohre kann über zwei Möglichkeiten erfolgen. Der Kreisumfang des tatsächlichen Rohres wird dem Umfang eines Quadrates gleichgesetzt oder der

Durchmesser des Rohres entspricht der Seitenlänge des Quadrates. Bichlmair hat hierzu simulative Voruntersuchungen durchgeführt und die Ergebnisse mit der Wärmeabgabe eines kreisrunden Rohres verglichen. Aus dieser Gegenüberstellung geht hervor, dass mit einer Seitenlänge, die dem Kreisdurchmesser entspricht, realitätsnähere Ergebnisse resultieren. Demzufolge wurde für die Modellierung des Rohrmantels ein Quadrat mit der Seitenlänge gleich dem Kreisdurchmesser des Rohres angesetzt. (Bichlmair, 2020)

Alternativ gäbe es die Möglichkeit solch dünne Konstruktionen in Form von Widerständen darzustellen. Da jedoch für die spätere Parameterstudie auch die geometrischen Eigenschaften der Rohre variiert werden sollen, kommt diese Alternative nicht zum Tragen.

Das Simulationsmodell wird als Fassadenquerschnitt auf 2D-Ebene nachgebildet. Dies ist für die Modellierung einer flächigen Aktivierung eines Fassadenabschnittes ausreichend, da keine Anschlussdetails bauphysikalisch bewertet werden sollen (Stichpunkt: Wärmebrücken). In dieser Arbeit liegt der Fokus beim wärme- und feuchteschutztechnisch „ungestörten“ Bereich. Mit einer 3D-Simulation wäre jedoch eine detaillierte Darstellung der Rohrdurchströmung mit Hilfe einer Strömungssimulation möglich. Die Strömungseigenschaften können jedoch indirekt über die Berechnung des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten unter Berücksichtigung der Nußelt-Zahl einbezogen werden. Dies wird im Abschnitt „Rand- und Übergangsbedingungen“ näher erläutert.

Die Technische Universität Dresden und die Technische Universität Graz haben sich intensiv mit der Notwendigkeit von dreidimensionalen, hygrothermischen Simulationen auseinandergesetzt. Hierfür wurde mithilfe der Simulationsumgebung Delphin eine umfassende Untersuchung eines Balkenauflegers in einer Außenwand durchgeführt, sowohl in zwei- als auch in dreidimensionaler Darstellung. Dabei wurden detaillierte Messergebnisse mit den Simulationsergebnissen gegenübergestellt. Es stellte sich heraus, dass die thermischen Ergebnisse der 3D-Simulationen keine signifikant genaueren Werte lieferten als die 2D-Simulationen. Hingegen wurden die hygrischen Ergebnisse durch die dreidimensionale Berechnung etwas präziser wiedergegeben, wobei die Unterschiede nur geringfügig waren. Zusammenfassend kann das Fazit aus der Untersuchung gezogen werden, dass hygrothermische 2D-Simulationen als ausreichend genau angesehen werden können. (Ruisinger und Kautsch, 2019)

Unter Berücksichtigung der vorstehenden Argumente würde eine 3D-Simulation keinen erheblichen Mehrwert für die hier erzielbaren Ergebnisse darstellen.

Numerisches Gitter:

Die Genauigkeit der erzielbaren numerischen Lösung ist von der Diskretisierung des Modells abhängig. Die Diskretisierung entspricht der Aufteilung des Modells in kleine Gitterelemente, die dann als Berechnungselemente zur Lösung der in Kapitel 7.1.1 beschriebenen Differentialgleichungen für den Wärme- und Feuchtetransport dienen. Die

Feinheit des numerischen Gitters bestimmt die Berechnungsgenauigkeit der Simulation, wodurch aber von einer längeren Rechenzeit auszugehen ist. Die Gitterelemente erstrecken sich dabei in x- und y-Richtung (2D). In z-Richtung wird eine unendliche Ausdehnung angenommen.

Das numerische Gitter wurde im Falle der ETA-Fassade manuell erzeugt. Im Bereich der Baustoffgrenzen und Bauteilränder ist eine feinere Auflösung des numerischen Gitters gewählt worden. Dies ist begründet durch den zu erwartenden höheren Temperatur- und Feuchtgradienten. An den Symmetrieachsen werden adiabate Randbedingungen angesetzt (siehe Abschnitt „Rand- und Übergangsbedingungen“). Dort ist eine feine Auflösung des Gitters nicht notwendig, da an adiabaten Grenzflächen kein Austausch von thermischer Energie oder Feuchte stattfindet.

Für die Ermittlung der grundsätzlich notwendigen Feinheitsgrades des Simulationsmodells, wurde eine Netz-Sensitivitätsanalyse (siehe Kapitel 7.1.3.2) durchgeführt. Aus dieser konnte abgeleitet werden, dass mit einer Anzahl von $600 \times 225 = 135.000$ Gitterelementen eine ausreichend gute Ergebnisqualität erzielbar ist. Der nachstehende Auszug aus WUFI® 2D zeigt die gewählte Diskretisierung.

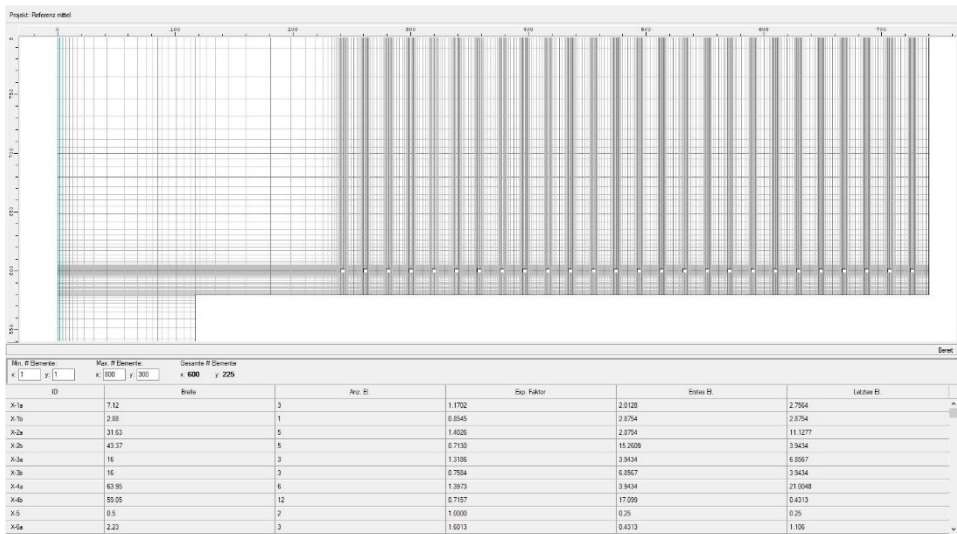


Abbildung 7.4: Diskretisierung des numerischen Gitters des ETA-Fassadenmodells

Materialien:

Für das Referenzmodell der ETA-Fassade wurden die Baustoffe angelegt, die zur Ausführung kamen. Hierfür wurden die Materialdaten aus den vorhandenen Dokumenten der Ausführungsplanung herangezogen. Beim Anlegen eines Materials sind Baustoff- sowie Wärme- und Feuchtetransportkennwerte für die beabsichtigte hygrothermische

Simulation gemäß ihren realen Eigenschaften zu definieren. Materialkennwerte, die nicht aus Materialdatenblätter der Ausführungsplanung entnommen werden konnten, wurden aus der WUFI-Materialdatenbank oder der Literatur extrahiert. Tabelle 7.1 gibt die wesentlichen Materialdaten des Referenzmoduls übersichtlich wieder.

Tabelle 7.1: Materialkennwerte des ETA-Referenzmoduls

Material	Rohdichte	Wärmeleitfähigkeit	spez. Wärmekapazität	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl
	ρ [kg/m ³]	λ [W/(mK)]	c_p [J/(kgK)]	μ [-]
Normalbeton C50/60	2400	2,5	850	80
Kapillarrohre aus PP	905	0,21	2000	10000
Mineralschaum	180	0,06	1000	5
Luftschicht	1,3	0,59	1000	0,15
mrUHPC	2549	5	850	80

Quellen: (DUCON Europe GmbH & Co. KG, 2016) (Maier, 2023) (BeKa Heiz- und Kühlmatten GmbH, 2021a) (Fraunhofer-Institut für Bauphysik, 2023) (Abele et al., 2019)

Anfangsbedingungen:

Hygrothermische Simulationen beginnen zu einem zuvor definierten Zeitpunkt, an dem festgelegte Anfangsbedingungen bzgl. der Baustoffe vorliegen. Die Feuchtegehalte der Materialien wurden basierend auf ihrer relativen Feuchte und Temperatur definiert. Dabei spielt die Anfangstemperatur nur eine untergeordnete Rolle, da sich die Temperaturverhältnisse innerhalb des betrachteten Bauteils schneller einpendeln als die Feuchteverhältnisse. Folglich genügt es, wenn alle Materialschichten zu Beginn die gleiche Temperatur aufweisen. Gemäß WTA-Merkblatt 6-2 sollte eine Temperatur von +20°C angenommen werden, die entsprechend im vorliegenden Fall angesetzt worden ist. Es ist empfehlenswert, eine realistische Anfangsfeuchte für das Bauteil zu wählen, da sich der Feuchtegehalt des Bauteils nur sehr langsam einstellt. Zu Beginn wurde beim Referenzmodell von einem normaltrockenen Zustand ausgegangen. Für alle Materialschichten wurde daher die Gleichgewichts- bzw. Sorptionsfeuchte bei einer relativen Luftfeuchte von 80 % angenommen. (WTA, 2014)

Mit der Analyse der Simulationsergebnisse sollte erst nach Erreichen des eingeschwungenen Zustands begonnen werden. Wenn die jährliche Veränderung des Wassergehaltes im Vergleich zum Wassergehalt des Vorjahres weniger als 1 % beträgt, wird dieser Zustand als erreicht angesehen.

Randbedingungen:

Die Randbedingungen beschreiben die Einflüsse von außen auf das Bauteil, während die Übergangsbedingungen vorgeben, wie sich die Temperatur- und Feuchteverhältnisse an der Grenzschicht zwischen dem Bauteil und seiner Umgebung ändern.

Bei der ETA-Fassade wurden Messungen im März 2018 durchgeführt (siehe Kapitel 5), die über drei Tage mit unterschiedlichen Messsituationen erfolgten. Ausschließlich der erste Messtag (20./21.03.2018) diente der Identifikation der nächtlichen Kühlleistung durch die thermische Aktivierung der Fassade. In diesem Messzeitraum lagen die Ergebnisse über etwa zwei Stunden (21 bis 23 Uhr) im eingeschwungenen Zustand vor. Die in dieser Zeitspanne erzielten Ergebnisse wurden ausgewertet und dienen der Validierung der hygrothermischen Simulation. Demzufolge liegt zur Validierung der energetischen Performance der ETA-Fassade eine stationäre Lösung vor, die durch eine instationäre Berechnung mit konstanten Randbedingungen angenähert werden konnte. Die Ergebnisse der zuvor beschriebenen drei Stunden wurden gemittelt und als Randbedingungen für das Simulationsmodell festgelegt.

Im Folgenden sind die Randbedingungen aufgeführt, die im Rahmen dieser Arbeit angesetzt worden sind.

Außen- und Innenklima:

Das Außenklima variiert je nach Jahreszeit, Tageszeit und Standort des zu untersuchenden Gebäudes. Entsprechend fluktuiert das Außenklima und wird in Bauteilsimulationen üblicherweise im Jahresverlauf z.B. über Testreferenzjahre (TRY) betrachtet. Die messtechnischen Untersuchungsergebnisse der ETA-Fassade werden als Benchmark für die simulative Analyse dieser Dissertation herangezogen, wodurch konstante Randbedingungen anzusetzen sind. Dies betrifft insbesondere das Außenklima und dessen Einflussgrößen, die sich auf die Wärme- und Feuchteverhältnisse eines Bauteils auswirken:

- Außentemperatur
- Luftfeuchtigkeit
- Windgeschwindigkeit
- Niederschlagsmenge
- Sonneneinstrahlung (kurzwellige Strahlung)
- Himmelstrahlung (langwellige Strahlung)

Aus der messtechnischen Untersuchung wurde eine gemittelte Außentemperatur von $-2,26\text{ °C}$ und eine relative Luftfeuchtigkeit von $75,06\%$ abgeleitet, die über die Wetterstation der ETA-Fabrik in der Zeitspanne des eingependelten Zustands erfasst worden sind. Den Messdaten und der Messdokumentation zufolge, lag eine Niederschlagsmenge von 0 l/m^2 vor. Die hier herangezogenen Messdaten wurden

zwischen 21 und 23 Uhr verzeichnet, wodurch die Sonneneinstrahlung zur Beurteilung der nächtliche Kühlleistung nicht einbezogen wird.

Die langwellige Strahlung spielt eine maßgebende Rolle bei der nächtlichen Abstrahlung von Oberflächen. In einer klaren Nacht wird der Himmel als eine kalte Oberfläche wahrgenommen, da er im Vergleich zur Erdoberfläche eine geringe Temperatur aufweist. Dies hat zur Folge, dass sich die Oberfläche eines Bauteils in einer klaren Nacht stärker abkühlt als in einer bewölkten Nacht. Wenn die Fassadenoberfläche im Vergleich zum Himmel eine höhere Temperatur aufweist, wird Wärme durch Strahlung an den Himmel abgegeben. In diesem Fall spricht man von einem Strahlungsübergang zwischen der Bauteiloberfläche und dem Himmel. Je größer die Temperaturdifferenz zwischen der Bauteiloberfläche und dem Himmel ist, desto höher ist der Wärmefluss durch Strahlung. Die Himmelstemperatur kann durch verschiedene Faktoren beeinflusst werden, wie z.B. der Bewölkungsgrad, die Luftfeuchtigkeit und die Höhe der Wolken. Ein großer Bewölkungsgrad oder eine höhere Luftfeuchtigkeit führt zu einer höheren Himmelstemperatur. Weiterhin steigt die Himmelstemperatur mit zunehmender Höhe der Wolken. Die Himmelstemperatur wird erst im Rahmen der Auswertung berechnet und in der Wärmestromanalyse (siehe Kapitel 7.2.1.2) integriert.

Auch das Innenklima wurde aus der messtechnischen Untersuchung entnommen. Dabei wurde in der Fabrikhalle eine Raumlufttemperatur von 21,7 °C und eine relative Luftfeuchtigkeit von 52,74 % gemessen. Diese Messwerte stammen aus der verbauten Sensorik innerhalb der Halle. Dort liegt je Hallensektor (Aufteilung der Halle in drei Sektoren) jeweils ein Lufttemperatursensor vor, aus denen ein Mittelwert gebildet worden ist.

Im Falle der ETA-Fassade haben wir die Besonderheit der thermischen Aktivierung, die durch die eben beschriebenen Klimaverhältnisse beeinflusst werden. Für die Bewertung der Kühlleistung ist die Fluidtemperatur innerhalb der Kapillarrohre besonders relevant. Das hydraulische Netz der ETA-Fabrik ist mit Temperatursensoren an den Vor- und Rückläufen der hydraulischen Pumpen (Pumpe 500 und 600) zur Versorgung der Kapillarrohrmatten ausgestattet. Die mittlere Fluidtemperatur konnte somit aus der Vor- und Rücklauftemperatur berechnet werden. Die mittlere Fluidtemperatur der innenseitigen Kapillarrohrmatte beträgt 17,77 °C und die der äußeren Kapillarrohre 3,95°C.

Übergangsbedingungen:

Übergangsbedingungen beschreiben die wärme- und feuchtetechnische Wechselwirkung zwischen Bauteilgrenzschichten und deren Umgebung. Dabei handelt es sich um Bedingungen an Grenzbereichen, wie die an der Innen- und Außenfläche der Fassade, aber auch die des Übergangs zwischen dem Fluid und der Rohrwand der Kapillarrohre.

Die Wärme- und Feuchteübertragung an den Bauteiloberflächen werden mit dem Wärmeübergangskoeffizienten α und dem Wasserdampfübergangskoeffizienten β

charakterisiert. Der Wärmeübergangskoeffizient, der über den Kehrwert der Wärmeübergangswiderstände ermittelt wird, wird durch zwei Wärmetransportmechanismen beeinflusst und lässt sich somit in zwei Anteile zerlegen: der konvektive Wärmeübergangskoeffizient zur Beschreibung des konvektiven Transportes durch Luftströmungen und der radiative Anteil, der die langwellige Abstrahlung darstellt. Gemäß (DIN 4108-2, 2013) und (DIN EN ISO 6946, 2018) beläuft sich der Wärmeübergangskoeffizient für die Bauteilinnenoberfläche auf $8 \text{ W/m}^2\text{K}$. Dabei entsprechen $4 \text{ W/m}^2\text{K}$ dem Strahlungsanteil und weitere $4 \text{ W/m}^2\text{K}$ sind der konvektiven Übertragung zuzuschreiben. Bei erzwungener Konvektion durch Wind, wie im Außenbereich vorliegend, ist der äußere konvektive Wärmeübergangswiderstand nur über Feldversuche einzugrenzen. Schaube beschreibt für Außenwände ein Wärmeübergangswiderstand von $0,056 \text{ m}^2\text{K/W}$. Mit dem Kehrwert liegt demzufolge ein äußerer Wärmeübergangskoeffizient von ca. $\alpha = 17 \text{ W/m}^2\text{K}$. Dabei sind $10,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ dem konvektiven Anteil zuzuordnen. (Schaube und Werner, 1986)

Die kurzwellige Strahlung ist im Übergangswiderstand nicht berücksichtigt, demzufolge entspricht der radiative Anteil der langwelligen Wärmestrahlung. Der Wärmeübergangskoeffizient aus langwelliger Strahlung lässt sich in Abhängigkeit von dem Emissionsgrad der Oberfläche und der mittleren Temperatur zwischen Oberfläche und Umgebung mit folgender Gleichung berechnen:

$$h_r = \varepsilon * 4 * \sigma * T_{mn}^3 \quad (7.3)$$

mit

- h_r : Wärmeübergangskoeffizient aus langwelliger Strahlung [$\text{W/m}^2\text{K}$]
- ε : Emissionsgrad langwelliger Strahlung [-]
- σ : Stefan-Boltzmann-Konstante mit $\sigma = 5,67e^{-8} \text{ [W/(m}^2\text{K}^4\text{)]}$
- T_{mn} : mittlere Temperatur zwischen Oberfläche und Umgebung [K]

Im Kapitel 7.2 wird näher auf den langwelligen Strahlungsaustausch im Zusammenhang mit der Himmelstemperatur eingegangen.

Da sowohl der Wärmeübergang als auch der Wasserdampfübergang von einer Grenzluftschicht an der Oberfläche des Bauteils beeinflusst werden, liegt derselbe Grund für das Auftreten eines Widerstands bei beiden Vorgängen vor. Aufgrund ähnlicher Umweltbedingungen, die die Grenzschichten beeinflussen, bestehen Analogien zwischen den beiden Übertragungsprozessen. Das β kann daher mithilfe der folgenden Zahlenwertgleichung berechnet werden. (Schmidt, 2006)

$$\beta_p = 7 * 10^{-9} * \alpha_K \quad (7.4)$$

mit

β_p : Wasserdampfübergangskoeffizient [$\text{kg}/\text{m}^2\text{sPa}$]

α_K : konvektiver Wärmeübergangskoeffizient [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]

Eine maßgebende Einflussgröße des Wärmeübergangs der thermisch aktivierten Fläche ist der Wärmeübergangskoeffizient des Wärmeträgermediums zur Kapillarrohrinnenwand. Dieser ist abhängig von der Fließgeschwindigkeit des Kühlmittels (Wasser-Glykosol-Gemisch), der Rauheit der Rohroberfläche und den temperaturabhängigen Stoffwerten des Kühlmittels. Die Fluidgeschwindigkeit wird zur Ermittlung der Strömungsart benötigt und lässt sich wie folgt berechnen:

$$\omega_{\text{Fluid}} = \frac{\dot{V}}{A_{\text{Rohr}}} \quad (7.5)$$

mit

ω_{Fluid} : Fluidgeschwindigkeit [m/s]

\dot{V} : Volumenstrom [m^3/s]

A_{Rohr} : Rohrquerschnittsfläche [m^2]

Bei dem Volumenstrom handelt es sich um die Durchflussmengen, die an den Pumpen 500 und 600 des hydraulischen Netzes der ETA-Fabrik, während der messtechnischen Untersuchung, verzeichnet worden sind. Für die Durchströmung der innenliegenden Kapillarrohrmatte ist die Pumpe 500 zuständig. Diese stellt jedoch auch für die thermisch aktivierten Dachmodule den notwendigen Volumenstrom zur Verfügung, wodurch für den Volumenstrom eines einzelnen Rohres der innenliegenden Rohrmatte eines Fassadenmoduls eine anteilige Ermittlung notwendig ist. Durch das Heranziehen der innen aktivierten Flächenanteile und der Anzahl der Rohre je Matte kann der Volumenstrom je Kapillarrohr bestimmt werden. Die Pumpe 500 weist zum Zeitraum der Messung einen Gesamtvolumenstrom von $11,55 \text{ m}^3/\text{h}$ auf. Von der gesamten aktivierten Innenbauteilfläche (Wand- und Deckenfläche) entsprechen $50,73 \%$ dem Wandanteil. Die Wand-Innenfläche wird an insgesamt 18 Kapillarrohrmattensysteme thermisch aktiviert, die wiederum jeweils 52 Vorlaufrohre aufweisen. Die mittlere Fluidtemperatur ergibt sich aus den Vor- und Rücklauftemperaturen der einzelnen parallelgeschalteten Rohre (siehe Abbildung 7.5), weshalb lediglich die Anzahl der Vorlaufrohre in die anteilige Volumenstromberechnung eingeht. Unter Berücksichtigung der vorstehend beschriebenen Anteile ergibt sich je Rohr ein Volumenstrom von $0,00625 \text{ m}^3/\text{h}$ bzw. umgerechnet von $1,7388\text{e}^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$.

Für Ermittlung des Rohrvolumenstroms der außenliegenden Rohre der ETA-Fassade wurde die gleiche Systematik herangezogen. Die außenliegenden Kapillarrohrmatten werden durch die Pumpe 600 gespeist, die ein Gesamtvolumenstrom von $3,45 \text{ m}^3/\text{h}$ fördert. Von der gesamten außenliegenden thermisch aktivierten Fläche (Außenwand- und

Dachfläche) macht der Wandanteil 7,55% aus. Insgesamt wurden lediglich vier äußere Wandmodule in der ETA-Fabrik thermisch aktiviert, die zudem nur 26 Vorlaufrohre aufweisen. Daraus resultiert ein Volumenstrom von $0,0025 \text{ m}^3/\text{h}$ bzw. $6,95713 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$.

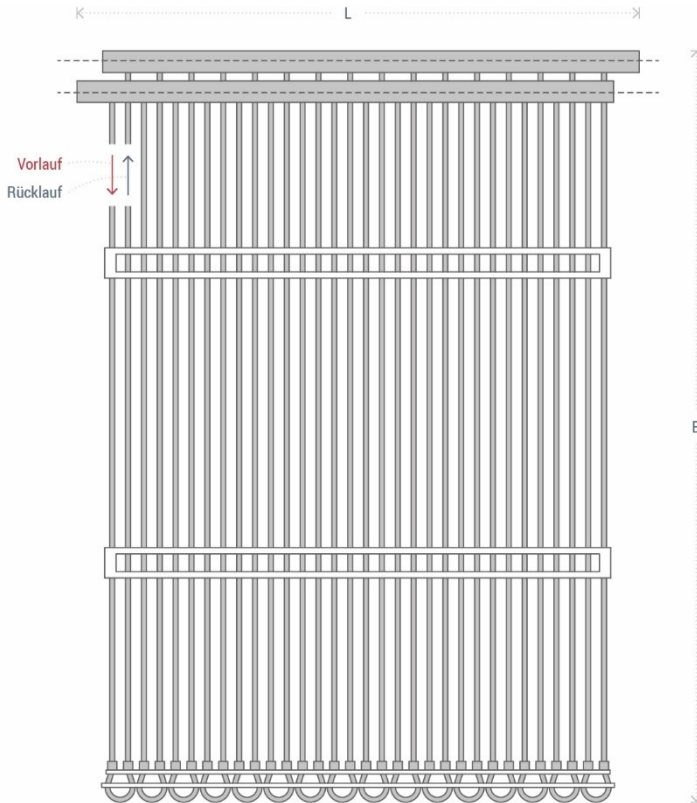


Abbildung 7.5: Vor- und Rücklaufsystematik der Kapillarrohmatten Typ K.S15 nach (BeKa Heiz- und Kühlmatten GmbH, 2021a)

Zur abschließenden Ermittlung der Fluidgeschwindigkeit ist ergänzend die Querschnittsfläche des Rohres zu bestimmen. Mit einem Innendurchmesser von $d_i = 3,35 \text{ mm}$ ergibt sich ein Rohrquerschnitt von $8,8141 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$. Daraus resultieren die folgenden zwei Fluidgeschwindigkeiten, die zur Ermittlung der Strömungsart und schließlich des Wärmeübergangskoeffizienten zur Rohrrinnenwand angesetzt werden:

- Fluidgeschwindigkeit Kapillarrohr innen: $\omega_{\text{Fluid,innen}} = 0,19728 \text{ m/s}$
- Fluidgeschwindigkeit Kapillarrohr außen: $\omega_{\text{Fluid,außen}} = 0,07893 \text{ m/s}$

Die innere Fluidgeschwindigkeit liegt innerhalb und die der außenliegenden Kapillarrohre unterhalb des Spektrums für wirtschaftliche Fluidgeschwindigkeiten für Rohre mit Innendurchmesser < 10 mm (siehe Abbildung 7.6).

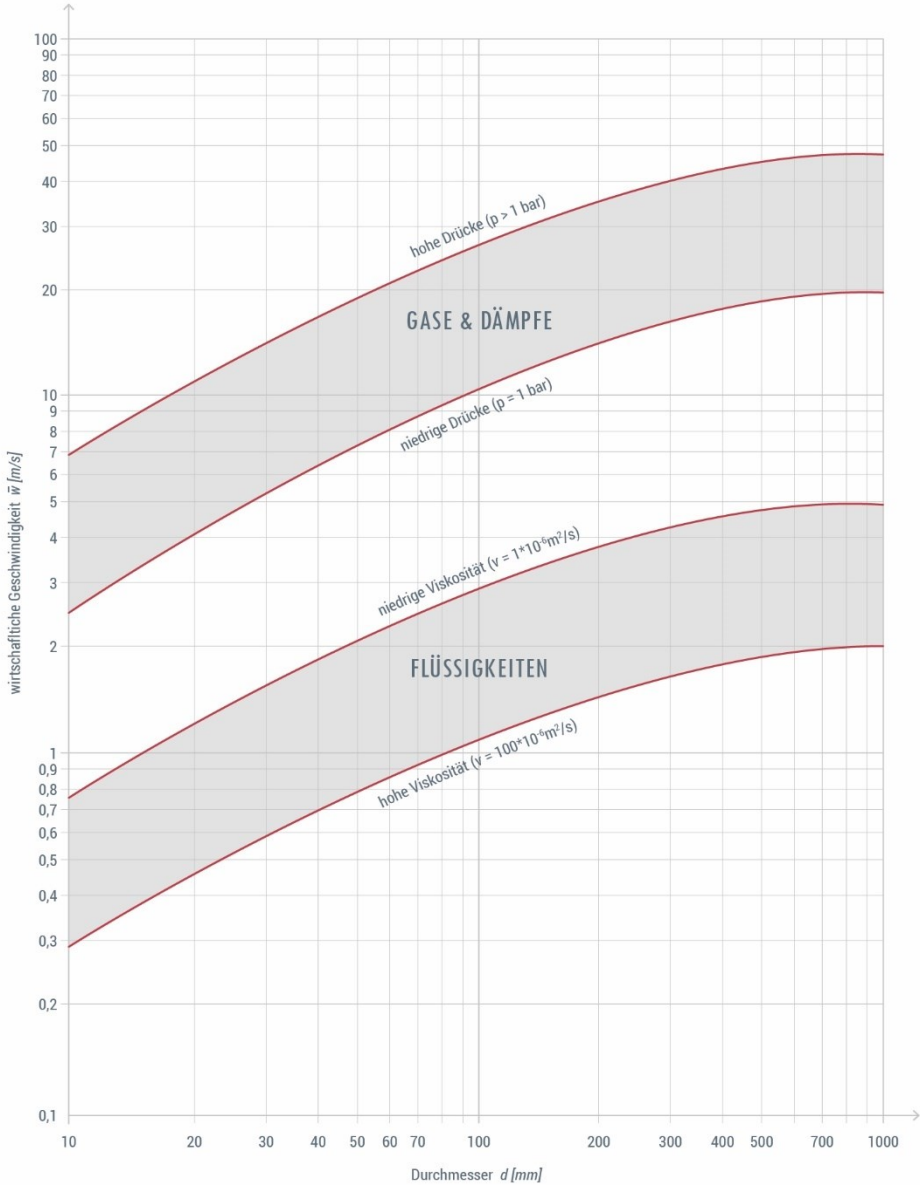


Abbildung 7.6: Wirtschaftliche Fluidgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Rohrdurchmesser nach (Picht, Beyer und Neumann, 2008)

Gemäß DIN EN 1264 wird zwischen turbulenter und laminarer Strömung unterschieden. Die Art der Rohrdurchströmung hat einen signifikanten Einfluss auf die Übertragung der thermischen Energie. Eine laminare Strömung führt zu einer geringeren Wärmeübertragung, was aus der geringeren Geschwindigkeit und Verwirbelung resultiert. Im Gegensatz dazu bildet sich bei der turbulenten Strömung eine diffuse Wirbelstruktur, die zu einer besseren Durchmischung des Fluids führt. Das erhöht die Wärmeübertragung und die Effizienz von thermisch aktivierten Fluidsystemen. Turbulente Strömungen treten bei höheren Geschwindigkeiten auf, bei denen Reibungskräfte und Impulserhaltung eine Rolle spielen. Ob sich eine Strömung im Rohr laminar oder turbulent verhält, hängt von der Reynoldszahl ab, die bereits im Kapitel 3 (vgl. Gleichung $Re = \frac{\rho \cdot v \cdot d_H}{\eta}$ (3.3))

eingeführt worden ist. Bei niedrigen Reynoldszahlen ($Re < 2300$) ist die Strömung im Rohr laminar. Eine Reynoldszahl zwischen 2300 und 4000 beschreibt den Übergangsbereich. Dabei herrscht eine instabile laminare Strömung mit periodischen Verwirbelungen im Fluid. Bei höheren Reynoldszahlen ($Re > 4000$) liegt eine turbulente Strömung vor. (DIN EN 1264-5, 2021)

Zu den wesentlichen Größen, die die Reynoldszahl beeinflussen, gehören die Geschwindigkeit, die Dichte und die dynamische Viskosität des Fluids sowie der Rohrdurchmesser. Ein weiterer wichtiger Faktor ist die Fluidtemperatur, da sie die Viskosität und damit die Reibungskräfte beeinflusst. In der ETA-Fassade wurde ein Wasser-Glykosol-Gemisch mit einem Mischverhältnis von 80/20 (20 % Glykosol) verwendet, um das Einfrieren von Wasser im Kühlsystem zu verhindern. Dadurch wird das Risiko von Rohrbeschädigungen oder -blockaden minimiert. Mit einer mittleren Fluidtemperatur von $T_{\text{Fluid,innen}} = 17,77 \text{ °C}$ und $T_{\text{Fluid,außen}} = 3,95 \text{ °C}$ (vgl. hierzu Kapitel 5) können die spezifischen thermodynamischen Fluideigenschaften nun anhand von herstellerspezifischen Diagrammen entsprechend abgelesen werden (siehe Abbildung 7.7). Diese dienen wiederum auch der Berechnung der Prandtl-Zahl, der Nusselt-Zahl und dem Druckverlustbeiwert, die für die Ermittlung des Wärmeübergangskoeffizienten, ein Maß für die Wärmeübertragungsrate zwischen dem Fluid und der Rohrwand, relevant sind. Eine höhere Prandtl-Zahl und Nusselt-Zahl bedeuten einen höheren Wärmeübergangskoeffizienten, während ein höherer Druckverlustbeiwert die Strömungsgeschwindigkeit verringert und somit den Wärmeübergangskoeffizienten reduziert. Für die ETA-Fassade wurde über die Reynoldszahl eine deutliche laminare Rohrdurchströmung identifiziert, wodurch unter Berücksichtigung der vorstehend beschriebenen Strömungsparameter ein Wärmeübergangskoeffizient von $\alpha_{\text{Fluid,Innenseite}} = 573,62 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ für die innenliegenden Rohre und $\alpha_{\text{Fluid,Außenseite}} = 564,98 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ für die außenliegenden Rohre ergibt.

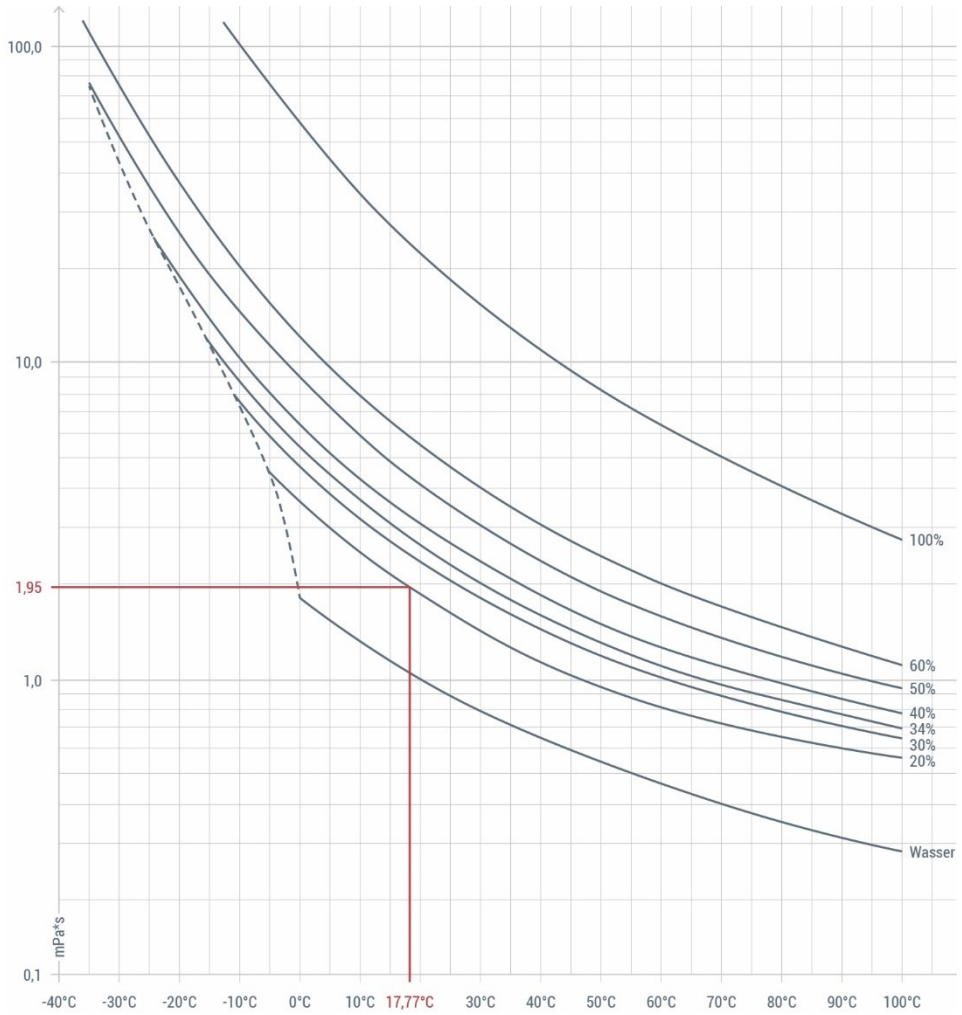


Abbildung 7.7: Dynamische Viskosität von Wasser-Glykosol-Gemischen in Abhängigkeit von der Fluidtemperatur nach (pro KÜHLSOLE GmbH, 2003)

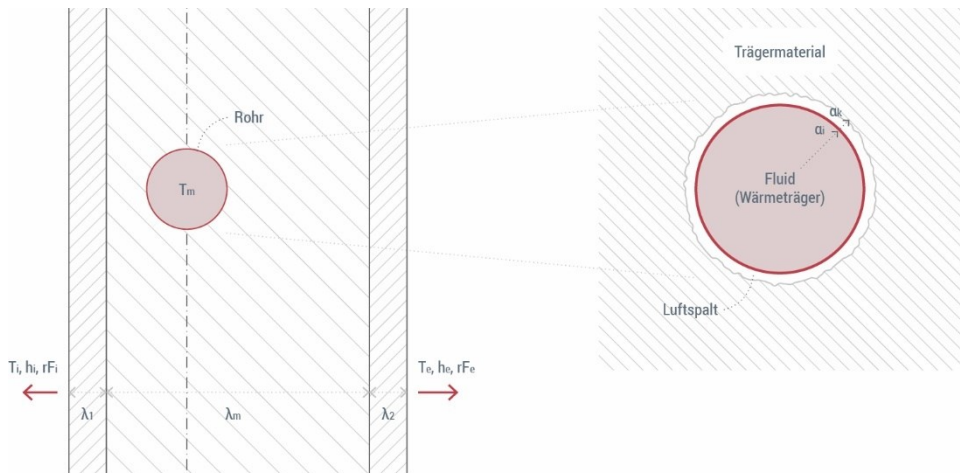
Eingangsgrößen - Rohrdurchströmung (Innenseite)				
d_i	Innendurchmesser	[m]	0,00335	
A_i	Querschnittsfläche	[m ²]	8,81E-06	
l_{Rohr}	Länge des Rohres	[m]	14	
$T_{\text{Fluid,mittel}}$	mittlere Wassertemperatur	[C°]	17,77	
ω_{Fluid}	Fluidgeschwindigkeit	[m/s]	1,97E-01	
V	Volumenstrom	[m ³ /h]	0,00626 [m ³ /s]	1,74E-06
Δp_{Hydr}	hydraulische Druckdifferenz	[bar]	1,36	
η_{Fluid}	dynamische Viskosität	[Pa s]	0,00195	
$c_{p,\text{Fluid}}$	spezifische Wärmekapazität	[J/(kgK)]	3920	
ρ_{Fluid}	Dichte des Fluids	[kg/m ³]	1031,5	
λ_{Fluid}	Wärmeleitfähigkeit	[W/mK]	0,52	
Re	Reynolds-Zahl	[-]	349,60	
Pr	Prandtl-Zahl bei $T_{\text{Fluid,mittel}}$	[-]	14,70	
Nu	mittlere Nusselt-Zahl	[-]	3,70	
β_{mittel}	mittlerer Profilfaktor	[-]	1,23	
ζ	Druckverlustbeiwert	[-]	0,112	
α	Wärmeübergangskoeffizient (konvektiv)	[W/(m ² ·K)]	573,615	

Abbildung 7.8: Eingangsgrößen zur Bestimmung der Rohrdurchströmung (Innenseite)

Eingangsgrößen - Rohrdurchströmung (Außenseite)				
d_i	Innendurchmesser	[m]	0,00335	
A_i	Querschnittsfläche	[m ²]	8,81E-06	
l_{Rohr}	Länge des Rohres	[m]	12	
$T_{\text{Fluid,mittel}}$	mittlere Wassertemperatur	[C°]	3,95	
ω_{Fluid}	Fluidgeschwindigkeit	[m/s]	0,0789	
V	Volumenstrom	[m ³ /h]	0,002504567 [m ³ /s]	6,96E-07
Δp_{Hydr}	hydraulische Druckdifferenz	[bar]	1,17	
η_{Fluid}	dynamische Viskosität	[Pa s]	0,0034	
$c_{p,\text{Fluid}}$	spezifische Wärmekapazität	[J/(kgK)]	3880	
ρ_{Fluid}	Dichte des Fluids	[kg/m ³]	1035	
λ_{Fluid}	Wärmeleitfähigkeit	[W/mK]	0,515	
Re	Reynolds-Zahl	[-]	80,49	
Pr	Prandtl-Zahl bei $T_{\text{Fluid,mittel}}$	[-]	25,62	
Nu	mittlere Nusselt-Zahl	[-]	3,68	
β_{mittel}	mittlerer Profilfaktor	[-]	0,58	
ζ	Druckverlustbeiwert	[-]	0,299	
α	Wärmeübergangskoeffizient (konvektiv)	[W/(m ² ·K)]	564,979	

Abbildung 7.9: Eingangsgrößen zur Bestimmung der Rohrdurchströmung (Außenseite)

Da die Rohre im Simulationsmodell geometrisch und physikalisch abgebildet werden, ist das Einbeziehen des Kontaktkoeffizienten α_K (Kehrwert des thermischen Kontaktwiderstands) zwischen dem Rohr und der Trägerschicht nicht erforderlich. Der Kontaktkoeffizient ist ein Maß für die Effizienz der Wärmeübertragung zwischen zwei sich berührenden Oberflächen oder in diesem Fall zwischen der Rohroberfläche und des umgebenden Betons. Der Kontaktkoeffizient hängt von verschiedenen Faktoren ab, wie beispielsweise der Art und Beschaffenheit der beiden Oberflächen und der Druckbelastung. Dieser Wert wäre in diesem Fall nur zu berücksichtigen, wenn die Rohrummantelung im Simulationsmodell nicht dargestellt worden wäre. Da die Kapillarrohre und dessen Geometrie wesentlich für die Parameterstudie sind, konnte auf die Verrohrung nicht verzichtet werden.



h_i	Wärmeübergangskoeffizient innen [W/m ² K]
h_e	Wärmeübergangskoeffizient außen [W/m ² K]
α	Wärmeübergangskoeffizient Wärmeträgermediums zur Rohrwand [W/m ² K]
α_K	Kontaktkoeffizient zwischen Heizrohr und Trägerschicht [W/m ² K]
T_i	Temperatur innen (Raumtemperatur) [°C]
T_e	Temperatur außen (Außentemperatur) [°C]
T_m	Temperatur des Wärmeträgermediums [°C]
λ	Wärmeleitfähigkeiten der Bauteilschichten [W/mK]
r_{Fi}	relative Luftfeuchte innen [%]
r_{Fe}	relative Luftfeuchte außen [%]

Abbildung 7.10: Thermische Materialkennwerte und Randbedingungen in Anlehnung an (Hahne und Elgeti, 2013) und (Bichlmair, 2020)

Quellen und Senken:

Im Abschnitt „Quellen und Senken“ werden vorhandene Wärme-, Feuchte- und Luftquellen definiert. Bei der ETA-Fassade handelt es sich um eine vorgehängte hinterlüftete Fassade, dessen Hinterlüftungsebene über den Ansatz einer Luftquelle

berücksichtigt wird. Hier ist die Festlegung des vorhandenen Luftwechsels erforderlich, wofür eine Annahme angesetzt worden ist, da wesentliche Parameter zur genauen Berechnung des Luftwechsels nicht bekannt waren. Einflussgrößen sind hierbei die Größe und Anordnung der Lüftungsöffnungen, die Windgeschwindigkeit und die Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenluft. Zur exakten Ermittlung der Luftströmung und dessen Eigenschaften wäre hierfür eine numerische Strömungssimulation oder eine Druckdifferenzmessung an den Lüftungsöffnungen notwendig gewesen. Um dennoch eine realistische Annahme treffen zu können, wurden Untersuchungen von (Kehl, Weber und Hauswirth, 2010), (Maas, 2008) und (Petersen und Harderup, 2011) herangezogen. In diesen Untersuchungen wurde festgestellt, dass der Luftwechsel von Luftschichten in Fassaden ohne signifikanten Genauigkeitsverlust als konstant über den Verlauf eines Jahres angenommen werden kann. Bei hinterlüfteten Bekleidungen mit einer Luftschichttiefe von 50 mm, haben die Untersuchungen gezeigt, dass je nach Art der Hinterlüftung (hinterlüftete Fassade und belüftet Fassade) und Windabschirmung (keine, durchschnittliche und starke Abschirmung) Luftwechselraten zwischen 3 bis 30 h⁻¹ realistisch sind (Hauswirth und Kehl, 2010). Für eine durchschnittliche Abschirmung, wie es in einer Stadt zu erwarten wäre, liegt die Größenordnung zwischen 7 (belüftet) und 20 h⁻¹ (hinterlüftet). Aus der Untersuchung konnte zusätzlich festgestellt werden, dass mit zunehmender Luftschichtdicke sich die Luftwechselraten reduzieren. Eine Luftschichtdicke von 30 mm weist einen Luftwechsel von 13 bis 32 h⁻¹ auf, dies entspricht somit einem höheren Luftwechsel als die der 50 mm Luftschichtdicke. Aufgrund des größeren Luftvolumens muss eine größere Menge an Luft bewegt werden, was sich auf die Luftwechselrate auswirkt.

Die ETA-Fassade weist gemäß Wärmeschutznachweis (osd - office for structural design, 2014) eine Hinterlüftung mit einer Luftschichtdicke von 100 mm auf. In diesem Fall würde sich die Zuordnung „hinterlüftete Fassade“ ergeben und eine um den Faktor 2 bzw. 3,3 größere Luftschichtdicke als die der vorstehend aufgeführten Luftschichten aus der Untersuchung. Unter Berücksichtigung dieser Randbedingungen wurde ein Luftwechsel von 5 h⁻¹ für das Simulationsmodell als gute Annäherung festgesetzt.

Numerik:

Im Rahmen der Numerik werden Parameter, die einen wesentlichen Einfluss auf die Rechenzeit, Genauigkeit und numerische Stabilität ausüben, festgelegt. Für die simulative Untersuchung der ETA-Fassade wurden die Zeitschrittweiten und Berechnungszeiträume je nach erzielbare Bemessungsgröße gewählt. Für die Berechnung der Energieeffizienz bzw. Kühlleistung je Fassadenmodul wurde eine Zeitschrittweite von 7200 s (2 Stunden) mit einem Berechnungszeitraum von 6 Jahren festgelegt. Dieser lange Berechnungszeitraum resultiert aus der nur langsam konvergierenden Feuchtetransportgleichung. Zur Bemessung der thermischen Speicherung wurde ein

engeres Zeitraster mit einer Zeitschrittweite von 1 Stunde über ein Berechnungszeitraum von 4 Jahren angesetzt.

Weiterhin wird in diesem Modellierungs-Schritt die Konvergenz und dessen Eigenschaften definiert. Die Konvergenz beschreibt die Anzahl der Iterationen, die erforderlich sind, um eine konvergente Lösung zu erhalten. Eine höhere Konvergenz erhöht die Genauigkeit der Ergebnisse, erhöht jedoch auch die Rechenzeit. Die Simulationsumgebung WUFI® 2D nutzt das Residuum-Konvergenzkriterium. Residuen sind die Differenzen zwischen den berechneten und den tatsächlichen Werten der Zielgrößen, die in der Simulation berücksichtigt werden. Mit dem Residuum-Konvergenzkriterium wird beabsichtigt das Residuum, in diesem Fall die Wärme- und Feuchtigkeitsflüsse, kleiner als ein bestimmter Schwellenwert zu halten, um zu signalisieren, dass die Berechnungen konvergiert sind. Wenn die Differenz zwischen zwei aufeinanderfolgenden Iterationen kleiner ist als das angegebene Konvergenzkriterium, wird die letzte iterative Lösung als Lösung für diesen Zeitschritt akzeptiert und die Simulation geht zum nächsten Zeitschritt über. Als Konvergenzkriterium wurde ein Wert von $5e^{-5}$ gewählt.

Die Lösung der Temperatur- und Feuchtetransportgleichungen erfolgt über ein impliziertes Verfahren, sprich es wird eine iterative Korrektur der Lösung verwendet. Die Solver lösen parallel bzw. abwechselnd die Gleichungen für Temperatur und die relative Feuchte. Dabei wird die Ausgabegröße aus der einen Gleichung in die andere Gleichung eingesetzt bis ihre Residuen das angegebene Konvergenzkriterium erfüllen.

7.1.3 Validierung und Sensitivitätsanalysen

7.1.3.1 Validierung – Messung und Simulation im Vergleich

Im Zuge einer simulativen Analyse ist es wichtig sicherzustellen, dass das Simulationsmodell reale Bedingungen korrekt widerspiegelt und verlässliche Ergebnisse liefert. Eine Möglichkeit, dies zu überprüfen, besteht darin, das Modell mit vorher durchgeführten Messungen zu validieren. Dabei werden die Messergebnisse mit den Ergebnissen des Simulationsmodells verglichen. Zur Validierung wurden die Temperaturen an den Sensorpositionen entlang des Fassadenquerschnitts herangezogen (siehe Tabelle 7.2).

In der ETA-Fassade wurden NTC 10kOhm Temperatursensoren verbaut. Diese verlaufen in bestimmten Abständen entlang des Bauteilquerschnitts in der Mitte des Fassadenmoduls (vgl. Kapitel 5.1.2). NTC 10kOhm Sensoren sind Thermistoren, die häufig in der Gebäude- und Kältetechnik eingesetzt werden, um Temperaturmessung durchzuführen. NTC steht dabei für „negative temperature coefficient“, was bedeutet, dass der Widerstand des Sensors mit steigender Temperatur abnimmt. Ein NTC 10kOhm Sensor hat bei einer Referenztemperatur von 25 °C einen Widerstand von 10.000 Ohm.

Gemäß Angaben unterschiedlicher Hersteller können sich je nach Einbauzustand und eingestellter Spannung Abweichungen von bis zu $\pm 0,4$ K ergeben. (Tränkler und Reindl, 2014)

Tabelle 7.2 zeigt, die Abweichungen zwischen den gemittelten Temperaturen an den Sensorpositionen im ETA-Fassadenquerschnitt auf. Die mittleren Temperaturen beziehen sich dabei auf den eingeschwungenen Zeitraum am Messtag vom 21.03.2018 zwischen 21 und 23 Uhr. Die ersten drei Sensoren befinden sich in der inneren Betonschale bzw. PI-Platte aus Normalbeton. Hier liegen Abweichungen von 0,82 bis 1,03 °C vor. Die Sensoren 4 und 5 befinden sich hingegen in der äußeren Betonschale aus mikrobewehrtem ultrahochfestem Beton (mrUHPC). Dort liegen minimale Abweichungen vor von 0,03 bis 0,11 °C. Die identifizierten lokalen Unterschiede können sich insbesondere aus den zwei verschiedenen Betonarten ergeben. Beim Normalbeton wurden Bewehrungsmatten aus Stahl eingesetzt. Die in diesem Bereich eingelegten Sensoren (Nr. 1 bis 3) können beim Einbau nahe der Bewehrungsstäbe verlegt worden sein, die eine höhere Wärmeleitfähigkeit aufweisen als der umgebende Beton. Dies kann punktuell Einfluss auf die gemessenen Temperaturen nehmen. Insbesondere die Temperatur des Sensors 3 bewegt sich außerhalb des zu erwarteten Temperaturgefälles innerhalb der ersten Bauteilschicht. Die äußere Betonschale aus mrUHPC entspricht dagegen einem faserbewehrten Beton. Hierbei werden Stahlfasern homogen im Beton verteilt. In diesem Bereich werden wesentlich kleinere Unterschiede zwischen Messung und Simulation festgestellt. Messabweichungen können zudem aus nicht korrekt eingestellten Spannungen der einzelnen Sensoren ergeben. Weiterhin können Sensoren während des Einbetonierens innerhalb eines Luftpolsters verbaut worden sein. Luftpolster verzögern aufgrund ihrer geringeren Wärmeleitfähigkeit als die des Betons den Wärmetransport.

Diskrepanzen aus simulativen Fehleingaben können insbesondere bei der Eingabe der Materialeigenschaften des Normalbetons (innenliegenden Betonschale) resultieren. Hierbei ist der Wärmetransport maßgeblich von der zum Zeitpunkt der Messung vorliegenden Baufeuchte und der definierten Wärmeleitfähigkeit abhängig. Ein Feuchtesensor innerhalb dieser Schicht wurde nicht verbaut, sodass eine Evaluierung dieses Einflussfaktors nicht möglich ist. Die Materialeigenschaften, die in der Simulation eingepflegt worden sind, ergeben sich aus der Dokumentation der Ausführungsplanung (Franz Traub GmbH & Co. KG, 2014) (Abele et al., 2019). Eine zusätzliche Abweichung könnte aus der ungenauen Sensorlage entlang des Fassadenmoduls resultieren. Die Positionierung der Sensoren wurde aus Fotos des Betoniervorgangs entnommen, woraus eine mittige Sensorlage abgeleitet worden ist. Eine genau definierte Sensorpositionierung konnte nicht aus den Einbauplänen hergeleitet werden.

Für hygrothermische Simulationen sind die WTA-Merkblätter 6-1 und 6-2 (WTA, 2022) (WTA, 2014) sowie die (DIN EN 15026, 2007) zu erfüllen. Die daraus resultierenden Kriterien sowie die des Benchmark-Tests gemäß (DIN EN ISO 10211, 2018) werden mit WUFI® 2D erfüllt. Validierungsverfahren für simulative

Untersuchungen der thermischen Bauteilaktivierung im Abgleich zu Messungen sind zum aktuellen Zeitpunkt nicht bekannt (Bichlmair, 2020).

Insgesamt ist eine Abweichung von maximal 4,31 % (unterhalb der 5 %-Grenze gemäß (WTA, 2014)) zwischen der messtechnischen und simulativen Untersuchung als vertretbar einzustufen und ist somit als hinreichend korrekte Darstellung der realen Bedingungen zu betrachten.

Tabelle 7.2: Validierung – Ergebnisse aus Messung und Simulation

Temperatur-Mittelwerte an Sensorpositionen	T_{Sensor#1}	T_{Sensor#2}	T_{Sensor#3}	T_{Sensor#4}	T_{Sensor#5}
	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
Messung	19,06	18,97	19,01	3,24	2,96
Simulation	18,24	18,07	17,98	3,35	2,99
Abweichungen [°C]	0,82	0,9	1,03	0,11	0,03
Abweichungen [%]	3,42	3,77	4,31	0,45	0,11

7.1.3.2 Netz-Sensitivitätsanalyse

Sensitivitätsanalysen tragen dazu bei, die Zuverlässigkeit und Genauigkeit von Simulationsergebnissen zu verbessern. Im Zuge dieser Arbeit wurde vorerst eine Netzabhängigkeitsstudie durchgeführt, um eine geeignete Gitternetzstruktur für die simulativen Analysen zu wählen.

Eine Netz-Sensitivitätsanalyse kann helfen, die optimale Netz-Parameterwahl (Elementgröße und Knotenanzahl) zu bestimmen. Dabei wurde der Feinheitsgrad der Gitterstruktur variiert bis sich die Simulationsergebnisse nicht mehr bedeutend unterschieden. Dabei müssen die Abweichungen im Mittel unter 5 % bleiben (WTA, 2014). Für die simulative Untersuchung der ETA-Fassade wurden drei Feinheitsgrade miteinander verglichen: grob, mittel und fein. Im ersten Schritt wurde die Simulation mit einem groben Gitternetz durchgeführt. Danach erfolgte die Verfeinerung des Berechnungsgitters durch die Verdopplung der Gitterdichte auf x- und y-Ebene bzw. Halbierung der Elementdicken. Dies wurde insbesondere in Bereichen mit starken Temperatur- und Feuchtegradienten umgesetzt. Im Zuge der ersten Betrachtung (von grob zu mittel) liegen hinsichtlich der Temperaturen Abweichung von maximal 0,754 % vor. Die zweite Verfeinerung weist eine maximale Differenz von 0,185 % auf.

Tabelle 7.3: Gitternetzstruktur – Sensitivitätsanalyse Temperatur

Gitternetzstruktur (Anz. Elemente, x / y)	T_{Sensor#1} [°C]	T_{Sensor#2} [°C]	T_{Sensor#3} [°C]	T_{Sensor#4} [°C]	T_{Sensor#5} [°C]
Grobes Netz (30.000 Elemente, 300x100)	18,2438	18,0713	17,7934	3,3234	2,9792
Mittleres Netz (135.000 Elemente, 600x225)	18,2311	18,0593	17,9286	3,3395	2,9872
Feines Netz (540.000 Elemente, 1200x450)	18,2339	18,0625	17,9618	3,3373	2,9847
Abweichungen GN zu MN [%]	0,0694	0,0667	0,7541	0,4826	0,2667
Abweichungen MN zu FN [%]	0,0151	0,0180	0,1850	0,0647	0,0841

Die relativen Feuchten hingegen weisen im Rahmen der ersten Verfeinerung Abweichungen von max. 4,07 % auf und schließlich 0,83 % Abweichung in der zweiten Verfeinerungsstufe.

Tabelle 7.4: Gitternetzstruktur – Sensitivitätsanalyse relative Feuchte

Gitternetzstruktur (Anz. Elemente, x / y)	rel. F_{#1} [%]	rel. F_{#2} [%]	rel. F_{#3} [%]	rel. F_{#4} [%]	rel. F_{#5} [%]
Grobes Netz (30.000 Elemente, 300x100)	62,7023	52,7298	30,2369	47,7869	50,0708
Mittleres Netz (135.000 Elemente, 600x225)	62,6207	52,2106	29,0539	48,4794	50,0899
Feines Netz (540.000 Elemente, 1200x450)	62,7211	52,6358	29,0466	48,8796	50,1336
Abweichungen GN zu MN [%]	0,1303	0,9945	4,0718	1,4284	0,0381
Abweichungen MN zu FN [%]	0,1603	0,8144	0,0250	0,8256	0,0873

Da sich die in Tabelle 7.3 und Tabelle 7.4 aufgeführten Abweichungen unterhalb des Grenzwertes von 5 % bewegen und die Rechenzeit mit größer werdendem Feinheitsgrades des numerischen Gitters erheblich steigt, ist es vertretbar, die weiteren Berechnungen auf Basis der mittleren Gitternetzstruktur durchzuführen. Ein grobes Netz wird hierfür jedoch nicht gewählt, da größere Abweichungen zwischen dem groben und mittleren Netz bei der Betrachtung der relativen Feuchte (max. 4,07 %) vorliegen.

7.1.3.3 Parameterstudie - untersuchte Parameter

Ziel dieser Arbeit ist unter anderem die Identifikation von maßgeblichen Parametern und die Quantifizierung deren Einflussnahme auf die Gesamtkühlleistung sowie die thermische Speicherfähigkeit des ETA-Fassadenmoduls. Dies wird im Folgenden mit Hilfe einer Parameterstudie erarbeitet. Die hierbei gewählten Parameter resultieren aus dem vorstehenden Kapitel 6, worin mögliche Optimierungsansätze auf Baustoff- und Bauteilebene erörtert worden sind. Es werden drei Parameterarten untersucht: physikalische, geometrische und materialspezifische Parameter.

Bei der physikalischen Parameterart (Abk.: PP) handelt es sich um Variationen in Bezug auf Fluidtemperaturen der innen- und außenliegenden Kapillarrohrmatten, auf Außenklima auf Basis von Wetterdaten und auf physikalische Größen wie Wärmeübergangskoeffizienten und Luftwechselraten.

Fluidtemperaturen innen- und außenliegender Rohrsysteme - PP

Das auf die Messung von März 2018 bezugnehmende Referenzmodell der ETA-Fassade weist eine Fluidtemperatur von 17,77 °C (raumseitig) und 3,95 °C (außenliegend) auf. Das hier vorliegende Temperaturdelta von ca. 14 °C wurde zur Bestimmung weiterer zu prüfender Fluidtemperaturpaaren herangezogen. Folgende Variationen der Temperaturpaare werden im Rahmen der Parameterstudie untersucht: 12/-2°C, 14/0°C und 16/2°C.

Außenklima (Außenlufttemperatur und rel. Feuchte) - PP

Das Referenzmodell unterliegt durch das Benchmarking konstanten Randbedingungen. Um dennoch eine Aussage über die Leistungsveränderung über den Jahresverlauf treffen zu können, wurden Wetterdaten für Darmstadt für das Jahr 2018 (Visual Crossing, 2023) abgerufen und monatlich ausgewertet. Bei der Auswertung wurde vorerst jahreszeitabhängig identifiziert, in welchem Zeitraum eine nächtliche Auskühlung sinnvoll ist. Hierzu wurde der gemeinsame Zeitraum erfasst, der keinen Sonnenenergieeintrag aufweist. Aus Tabelle 7.5 können die Sonnenenergiefreien Zeiträume entnommen werden. Für diese Zeiträume wurden für die entsprechenden Monate die Außenlufttemperaturen und relativen Feuchten als Monatsmittel berechnet und als Randbedingungen für die simulative Analyse der einzelnen Monate angesetzt.

Diese Herangehensweise erlaubt, trotz der konstanten Randbedingungen der hygrothermischen Simulation, eine dynamische Betrachtung des Jahresverlaufs für das Jahr 2018.

Tabelle 7.5: Jahreszeitabhängige Nachtauskühlung – Zeitraum ohne Sonnenenergieeintrag

Jahreszeit	Monate	Gemeinsamer Zeitraum ohne Sonnenenergieeintrag
Frühling	März, April, Mai	20:00 bis 6:00 Uhr
Sommer	Juni, Juli, August	21:00 bis 5:00 Uhr
Herbst	September, Oktober, November	20:00 bis 6:00 Uhr
Winter	Dezember, Januar, Februar	17:00 bis 7:00 Uhr

Wärmeübergangskoeffizient zwischen Innenwand und Raumluft - PP

Im Zusammenhang mit den Wärmeübergangskoeffizienten wurden zwei Untersuchungen vorgenommen. Die erste beschäftigt sich mit der Auslegung des Wärmeübergangskoeffizienten zwischen der Innenwand und der Raumluft (α_{Innen}). Für das Referenzmodell wurde ein $\alpha_{\text{Innen}} = 8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ gewählt. Der Wärmeübergangskoeffizient der Innenoberfläche hängt jedoch von verschiedenen Faktoren ab, die diesen Koeffizienten zwischen 5 und 12 $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ variieren lassen. Zu den Haupteinflussfaktoren zählen die Oberflächenbeschaffenheit und die Strömungsgeschwindigkeit der Luft an der Innenoberfläche. Um genaue Werte zu identifizieren, wäre hierbei eine zusätzliche CFD-Simulation oder eine Messung der oberflächennahen Strömung notwendig gewesen. Aufgrund des thermischen Auftriebs in hohen Räumen und der damit einhergehenden steigenden Strömungsgeschwindigkeit pro Meter Höhe, wird im unteren Bereich der ETA-Fabrik von mindestens 5 $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ (auch aufgrund der Positionierung der technischen Anlagen nahe den Wänden) und im oberen Bereich von 12 $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ angenommen. Daraus lässt sich schließen, dass mit einer sinnvollen Positionierung der thermischen Aktivierung eine Optimierung des Wärmeübergangs und somit der Kühlleistung erzielt werden kann.

Wärmeübergangskoeffizient Fluid - PP

Ein weiterer untersuchter Parameter ist der Wärmeübergangskoeffizient des Fluids α_{Fluid} in den Rohren, der sich über den Volumenstrom steuern lässt. Dieser wird im Zuge der Parameterstudie mit 100, 1000 und 5000 $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ variiert. Diese Variation dient der Beurteilung der Auswirkungen unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeiten auf den Wärmetransport. Gemäß VDI-Wärmeatlas (Gnielinski, 2013) ist ein Wärmeübergang ab

2.200 W/(m²K) einer turbulenten Strömung zuzuordnen. Für den Referenzfall ergab sich aus vorstehenden Berechnungen ein $\alpha_{\text{Fluid,Innen}} = 574 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ und $\alpha_{\text{Fluid,außen}} = 565 \text{ W/(m}^2\text{K)}$. Dies entspricht in beiden Fällen einer laminaren Strömung.

Luftwechselrate der Luftschicht - PP

Im Kapitel 7.1.2 wurde auf die Herleitung der im Referenzmodell angesetzten Luftwechselrate der Luftschicht bzw. Hinterlüftung eingegangen. Für die Parameterstudie wurden in Anlehnung an die von (Hauswirth und Kehl, 2010) aufgezeigten Werte, Luftwechselraten beginnend bei 0, zur Darstellung einer ruhenden Luftschicht, bis hin zu einer Luftwechselrate von 20 h⁻¹ für stark belüftete Luftschichten, gewählt. Weiterhin werden Zwischenwerte von 10 und 15 h⁻¹ mit untersucht.

Die geometrischen Parameter (Abk.: GP) beziehen sich auf konstruktive Veränderungen am Ursprungsmodell, durch Veränderung der innenliegenden Rohrüberdeckung, der Rohrdimensionierungen oder außenliegenden Oberflächenstruktur.

Rohrüberdeckung - GP

Die Stärke der Rohrüberdeckung setzt dem Wärmestrom einen Widerstand entgegen. Zur Beurteilung der Auswirkungen der Überdeckungsstärke auf den Wärmetransport werden zwei Varianten untersucht: eine Rohrüberdeckung mit 10 mm und eine mit 35 mm. Im Vergleich dazu weist das Referenzmodell eine Rohrüberdeckung von 17,825 mm auf.

Rohrsystemdimensionierung - GP

Eine weitere geometrische Parametervariation wird über die Modifikation der innen- und außenliegenden Rohrsysteme bewirkt. Die Variation bezieht sich dabei auf den Innendurchmesser und die Manteldicke der Rohre sowie auf den Abstand der Rohre zueinander. Hierfür wurden die Varianten auf Basis von marktgeführten Produkten des Herstellers Beka Heiz- und Kühlmatten GmbH gewählt. Zum einen eine weitere Kapillarrohrrmatte, das Produkt P.VS20 und zum anderen eine Kupferverrohrung (Typ C.M10.65.n.L.080.aa ohne WLP). Beide Rohrsysteme werden nach wie vor in Beton eingebettet.

Außenliegende Oberflächenstruktur - GP

Für eine ästhetische Gestaltung wurde der außenliegenden Betonplatte aus UHPC eine spezifische Oberflächenstruktur verliehen. Diese besteht aus vertikal angeordneten Rillen, die das Rippenmuster der Innenseite der Halle (PI-Platten) aufgreifen sollen. Um diese Rillen umzusetzen, wurden Strukturmatrizen des Herstellers Reckli GmbH (Produkt 2/63 WISLA) verwendet (RECKLI GmbH). Diese Strukturmatrizen fungieren als eine Art Schalungssystem und werden während des Betoniervorgangs eingesetzt. Die erzielte

Oberflächenstruktur weist an der äußeren Oberfläche U-förmige Erhebungen mit einem Durchmesser von 10 mm auf. Als Referenzsystem wurde eine glatte Oberfläche gewählt, aber um den Einfluss der Erhebungen auf die Wärmeübertragung zu untersuchen, wurde diese spezifische Oberflächenstruktur in die Parameterstudie aufgenommen.

Unter den materialspezifischen Parametern (Abk.: MP) zählt die Veränderung des Trägermaterials oder der Einsatz von Phasenwechselmaterialien.

Trägermaterial - MP

Auf Basis der eben beschriebenen Kupferrohrvariante und des Rohrsystems des Referenzmodells werden weitere Varianten auf alternativen Trägermaterialien untersucht, woraus sich zwei ergänzende Betrachtungen ergeben. Beim ersten Fall werden die Kupferrohrsysteme in Wärmeleitprofile geklemmt und auf einer hinterlüfteten Gipskartonplatte montiert. Die zweite Abwandlung wird durch eine in Putz integrierte Kapillarrohrmatte charakterisiert.

PCM-Gemische - MP

Beim Einsatz von PCM soll die Verbesserung der thermischen Speicherkapazität des Fassadenmoduls quantifiziert werden. PCM zeichnet sich dadurch aus, dass es in der Lage ist, thermische Energie während des Phasenwechsels zu speichern oder freizusetzen.

Im Rahmen der Parametervariation wurde das Produkt RT18HC des Herstellers Rubitherm angewendet. Das gewählte PCM weist ein Schmelzbereich von 17 bis 19 °C und einen Erstarrungsbereich von 19 bis 17 °C auf. Die Phasenwechseltemperaturen der PCMs sind zur Festlegung der Fluidtemperaturen innerhalb der Rohrsysteme relevant. Die Fluidtemperatur muss mindestens 1 bis 2 K unterhalb der vorstehend genannten Temperaturbereiche liegen, damit Verluste, die bspw. beim Wärmeübergang zwischen Fluid und Rohrummantelung entstehen, berücksichtigt werden können. Andernfalls kommt es nicht zur Aktivierung der PCMs, wodurch die Zugabe der PCMs hinfällig werden würde.

Da im Falle der ETA-Fassade die Rohrsysteme nicht in reinem PCM eingebettet werden, sondern in einem Gemisch aus PCM und dem vorhandenen Trägermaterial (Beton), sind zuvor die effektiven thermischen Materialkennwerte des Baustoffgemisches über eine Homogenisierung zu ermitteln. Diese werden dann als Eingabeparameter für die hygrothermische Simulation herangezogen. Hierbei ist die effektive Wärmeleitfähigkeit λ_{eff} und die effektive Wärmespeicherkapazität ρC_{eff} nach dem Modellansatz von (Mankel, 2020) zu berechnen. Die Homogenisierungsmethodik der effektiven Wärmespeicherkapazität lässt sich durch eine Parallelschaltung von n Komponenten ausdrücken, wobei ihre Gewichtung über den Volumenanteil V erfolgt und der volumetrische Wichtungsfaktor χ berücksichtigt wird:

$$\rho \cdot C_{\text{eff}}(\theta) = \sum_{i=1}^n \chi_i \cdot \rho_i \cdot C_i(\theta) \quad (7.6)$$

Mit der Gleichung (7.7) kann die effektive Wärmeleitfähigkeit des Gemisches bestimmt werden, das auf das EMT-Modell nach (Wang et al., 2006) basiert:

$$\chi_1 \cdot \frac{\lambda_1 - \lambda_{eff}}{\lambda_1 + \lambda_{eff}} + \chi_2 \cdot \frac{\lambda_2 - \lambda_{eff}}{\lambda_2 + \lambda_{eff}} = 0 \quad (7.7)$$

Im Zuge dieser Arbeit sollen drei PCM-Gemische bewertet werden: PCM-Beton, PCM-Gipskarton und PCM-Putz. Dabei wird in allen Fällen ein PCM-Volumenanteil von 30 Vol.-% angesetzt. Zu Beginn sind die Schmelz- und Erstarrungsteilenthalpien zu ermitteln. Diese können entweder messtechnisch über einen DSC-Versuch (Differential Scanning Calorimetry) ermittelt oder, wenn vorhanden, aus einem technischen Datenblatt entnommen werden. Für diese Arbeit wurde zu Beginn das Produkt nextec 18C, ein mikroverkapseltes PCM des Herstellers microtek, untersucht (siehe Abbildung 7.11).



Abbildung 7.11: DCS-Messung – Vorbereitung und Durchführung des Versuchs

Hierzu lagen keine technischen Datenblätter mit Schmelz- oder Erstarrungsteilenthalpien vor, sodass im fachbereichseigenen Labor eine Wärmestrom-DSC-Messung in Anlehnung an die (DIN 51005, 2022) und (DIN 51007, 2019) durchgeführt worden ist. Die Untersuchungen erfolgten an jeweils drei Einzelproben unter Verwendung des Heizratentests gemäß IEA DSC 4229 PCM Standard (Gschwander et al., 2015). Hierfür ist zuerst eine geeignete Heiz- bzw. Kühlrate zu wählen. Je kleiner die Rate gewählt wird, desto näher befindet sich die PCM-Probe während einer Temperaturänderung am thermodynamischen Gleichgewicht (Mankel, 2020). Für die Wärmestrom-DSC-Messung wurde eine Heiz-/Kühlrate von $2 \text{ K}\cdot\text{min}^{-1}$ gewählt. Die einzelnen Proben zeigten Massen zwischen 10 mg bis 60 mg auf.

Über die DSC-Messung konnten somit für alle Proben die Phasenwechselenthalpien ermittelt werden. Aus diesen Messergebnissen wurden die Mittelwerte der Teilenthalpien (siehe Abbildungen 7.12 und 7.13) separat für den Heiz- und Kühlvorgang gebildet und über die Temperatur abgetragen.

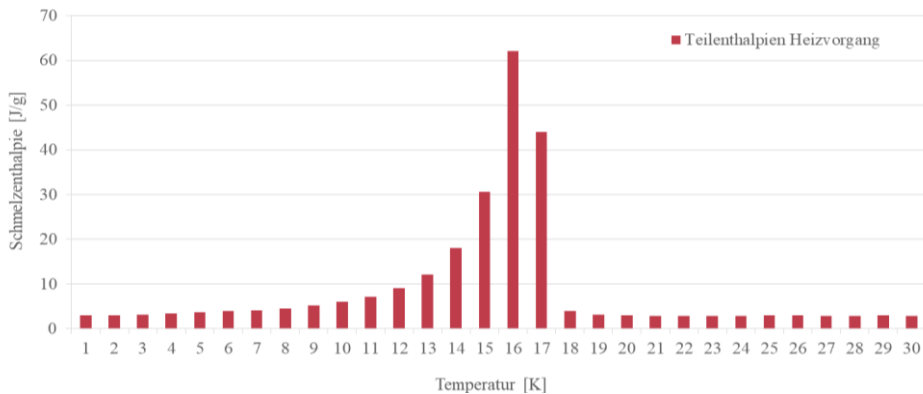


Abbildung 7.12: DCS-Messung – Mittelwerte der Teilenthalpien - Heizvorgang

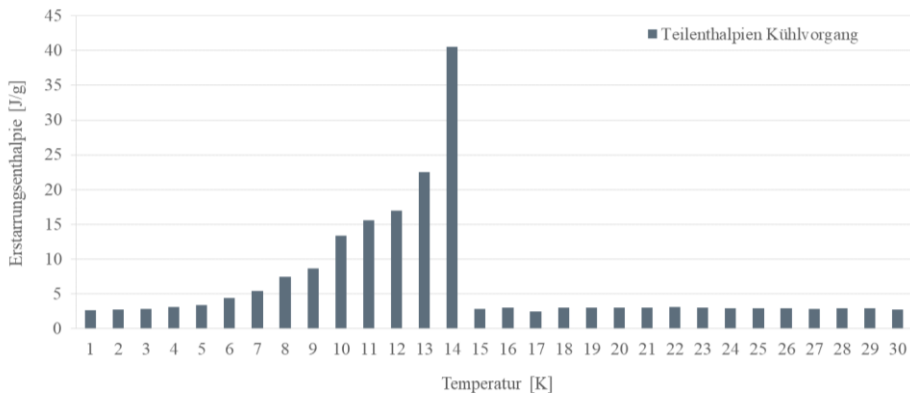


Abbildung 7.13: DCS-Messung – Mittelwerte der Teilenthalpien - Kühlvorgang

Für die ETA-Fassade sollte der Phasenwechselpeak zwischen 17 und 19 °C liegen, um mit den Fluidtemperaturen, die der Aktivierung des PCM's dienen, nahe der Raumsolltemperatur von $21 \pm 1^\circ\text{C}$ zu liegen. Aus diesem Grund wurde das vorstehend beschriebene mikroverkapselte PCM (nextec 18C) des Herstellers microtek nicht weiterverwendet. Ersatzweise wurde das Produkt RT18HC des Herstellers Rubitherm herangezogen. Die entsprechenden Phasenwechsel-Teilenthalpien waren hier schon im technischen Datenblatt enthalten. Die Enthalpien wurden mittels eines 3-Schicht-Kalorimeter ermittelt.

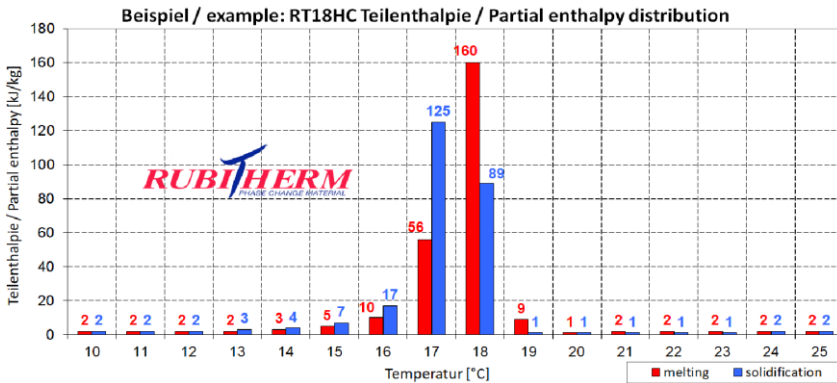


Abbildung 7.14: Teilenthalpien des Produktes RT18HC (Rubitherm Technologies GmbH, 2020)

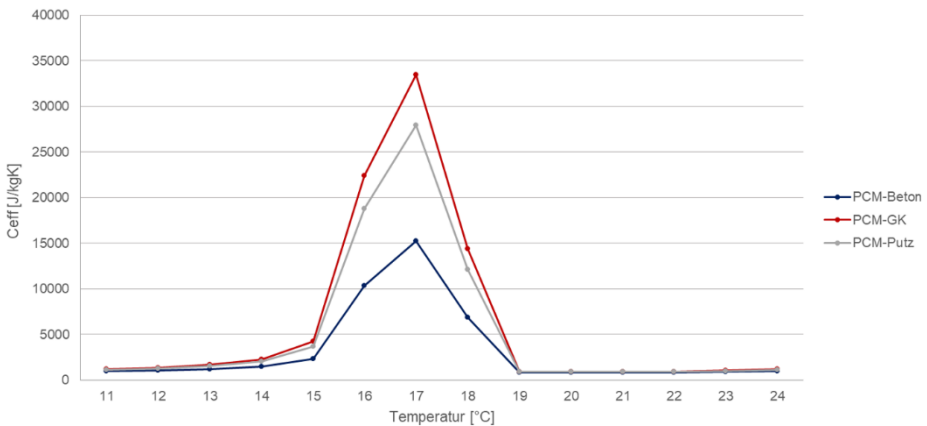


Abbildung 7.15: Effektive Wärmespeicherkapazität c_{eff} der untersuchten PCM-Gemische

Die Teilenthalpien des RT18HC werden im nächsten Schritt kumuliert und nach der Temperatur abgeleitet. Daraus ergibt sich die spezifische Wärmekapazität des PCMs c_{PCM} , die für die Berechnung von C_{eff} der Gemische erforderlich ist. Unter Verwendung der Gleichungen (7.6) und (7.7) kann nun C_{eff} (siehe Abbildung 7.15) sowie die effektive Wärmeleitfähigkeit für die drei zu untersuchenden Gemische ermittelt werden.

Tabelle 7.6 fasst die Konfigurationen der physikalischen, geometrischen und materialspezifischen Varianten der Parameterstudie zusammen.

Tabelle 7.6: Übersicht zur Parameterstudie

Parameterart	Parameter	Variation	Einheit
physikalisch	Fluidtemperaturen $T_{Fluid,innen}/T_{Fluid,außen}$	12/-2; 14/0; 16/2	[°C]
physikalisch	Außentemperatur/rel. Feuchte $T_a/rel.F_a$	Januar: 5,99 / 89,74 Februar: -0,55 / 71,71 März: 3,48 / 78,19 April: 12,38 / 69,23 Mai: 16,20 / 66,95 Juni: 18,34 / 70,83 Juli: 20,75 / 57,29 August: 19,81 / 62,06 September: 14,15 / 71,07 Oktober: 10,86 / 77,65 November: 6,33 / 77,44 Dezember: 4,53 / 68,53	[°C], [%]
physikalisch	Luftwechsellraten der Luftschicht	0; 5; 10; 12	[1/h]
physikalisch	Wärmeübergangskoeffizient innen (Wand-Raumluft)	5; 10; 20	[W/m²K]
physikalisch	Wärmeübergangskoeffizient Fluid (Fluid-Rohrmantel)	100; 1000; 5000	[W/m²K]
geometrisch	Rohrüberdeckung innen	10; 35	[mm]
geometrisch	Oberflächenstruktur Außen	Rillen mit 10 mm Durchmesser	[-]

geometrisch/material-spezifisch	Innendurchmesser Rohr/Manteldicke Rohr/Abstand zwischen den Rohren (Rohrmaterial/Trägermaterial)	4,5/0,8/20 (Polypropylen); 10/0,6/80 (Kupfer); 10/0,6/80 (Kupfer mit WLP auf GK); 3,35/0,5/15 (Polypropylen in Putz)	[mm]
Materialspezifisch	PCM-Gemische innen	PCM-Beton; PCM-Putz; PCM-GK	-

7.2 Auswertung der simulativen Analyse

Im Zuge des Kapitels 7.2 werden die durchgeführten Simulationen getrennt für das Referenzmodell (vorhandene Konfiguration der ETA-Fassade) und die Parameterstudie ausgewertet. Hierbei wird im Einzelnen auf folgende Zielgrößen eingegangen:

- die rechentechnische Zuverlässigkeit des Modells und dessen Ergebnisse,
- die Beurteilung der Energieeffizienzsteigerung und
- die Bewertung der Energieflexibilität

7.2.1 Auswertung Referenzmodell

7.2.1.1 Konvergenz und Feuchtegehalte

Eine Herausforderung bei hygrothermischen Simulationen besteht darin, sicherzustellen, dass die Ergebnisse ausreichend genau sind und dass das Modell konvergiert. Nach einer Simulation wird hierfür immer zuerst die numerische Qualität der Ergebnisse mittels einer Konvergenzbewertung beurteilt. Im Zuge einer Konvergenzbewertung werden Änderungen in den Ergebnissen von Iteration zu Iteration überprüft. Wenn sich die Ergebnisse nicht mehr signifikant verändern, wird angenommen, dass das Modell gegen eine stabilisierte Lösung konvergiert ist.

Scheitert das Lösungsverfahren an bestimmten Stellen bzw. wird das voreingestellte Konvergenzkriterium von $5e^{-5}$ überschritten (siehe Kapitel 7.1.2, Abschnitt Numerik), so ergeben sich Konvergenzfehler. Ein erster Hinweis auf die Zuverlässigkeit der Ergebnisse ergibt sich aus der Gesamtanzahl der Konvergenzfehler. Demnach gilt es diese so gering wie möglich zu halten. Eine hohe Anzahl an Konvergenzfehler, deutet meist auf hohe Feuchtegehalte hin, was durch einen hohen Feuchteeintrag oder zu dampfdichte Schichten innerhalb des Bauteils verursacht wird.

Während der Simulation des ETA-Referenzmodells haben sich insgesamt neun Konvergenzfehler bis zum Zeitschritt 6.348 ergeben. Diese lagen somit noch in den ersten zwei simulierten Jahren vor, da insgesamt 26.280 Zeitschritte für ein

Berechnungszeitraum von 6 Jahren mit einer Zeitschrittweite von 2 Stunden (Simulationsverlauf wird sechs Mal wiederholt) im Zuge der Simulation durchlaufen. Als Orientierung zur Einschätzung der numerischen Stabilität, beschreibt WUFI (Schmidt, 2006) eine maximale Anzahl von 50 Konvergenzfehlern pro simuliertes Jahr. Eine Überschreitung dieser Anzahl, könnte auf ein Problem in der Simulation hinweisen.

Weiterhin ist zu beachten, dass Simulationen eine Einschwingphase beinhalten, bis ein stabiles Ergebnis geliefert wird. Während dieser Phase kann es zu starken Schwankungen in den Ergebnissen kommen, da die Parameter noch nicht auf ihre endgültigen Werte eingestellt sind. Dadurch können die Ergebnisse in der Auswertung verfälscht werden. Um die Einflüsse der Schwankungen während der Einschwingphase zu begrenzen, werden die Ergebnisse des letzten Simulationsverlaufs (6. Jahr) zur Auswertung herangezogen.

Nach der Konvergenzbewertung sollte zudem der Gesamtwassergehalt im Bauteil sowie der Wassergehalt in den einzelnen Bauteilschichten und -oberflächen geprüft werden, wodurch einer langfristigen Wasseransammlung im Bauteil entgegengewirkt werden kann. Bei dem Nachweis des Gesamtwassergehaltes sollte mit fortlaufender Berechnungszeit der Wassergehalt stetig abnehmen, bis sich ein eingeschwungener Zustand einstellt. Der Verlauf des Gesamtwassergehaltes der ETA-Referenzfassade kann aus Abbildung 7.16 entnommen werden. Dieser weist einen stetig abnehmenden Verlauf auf und ist somit als unkritisch einzustufen.

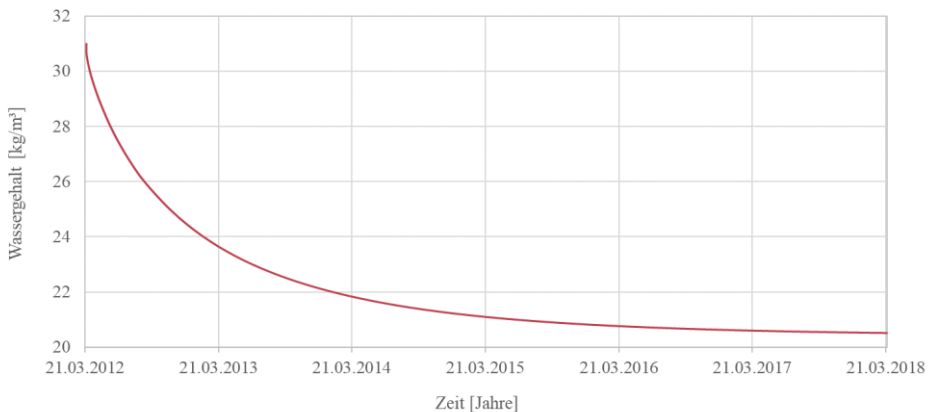


Abbildung 7.16: Gesamtwassergehalt - Referenzmodell

Zur Nachweisführung der Schimmelpilzfreiheit bzw. Tauwasserbildung auf der Innenoberfläche des Bauteils und im Bereich von Luftschichten, wurden die Isoplethenverläufe herangezogen und ausgewertet. Mit den Isoplethen kann eine mögliche Schimmelpilzbildung unter Berücksichtigung der Temperatur, Feuchte und des vorhandenen Baustoffes (Substrat) abgeschätzt werden. Diese drei Faktoren beschreiben die entscheidenden Wachstumsvoraussetzungen, die zeitgleich in einem bestimmten

Umfang vorhanden sein müssen, um ein Pilzwachstum zu begünstigen. Um die gegenseitigen Abhängigkeiten zwischen diesen Faktoren beschreiben zu können, werden die sogenannten LIM-Kurven als Grenzkurven berücksichtigt. Diese stellen die untersten Grenzen eines möglichen Pilzwachstums dar. (Sedlbauer, Zillig und Krus, 2001)

Im Falle der ETA-Fassade wurden die LIM-Kurven an der raumseitigen Bauteiloberfläche sowie im Bereich der Luftschicht unterschritten (siehe Abbildungen 7.17 und 7.18). Es wird somit nicht von einem Schimmelpilzrisiko ausgegangen. Nach einer erfolgreichen Validierung können im weiteren Verlauf die Simulationsergebnisse ausgewertet werden. Das wesentliche Ziel ist eine Aussage über die Energieeffizienz und die Energieflexibilität der ETA-Fassade treffen zu können. Dabei werden unterschiedliche Auswertungsverfahren angewendet, auf die im nächsten Abschnitt eingegangen wird.

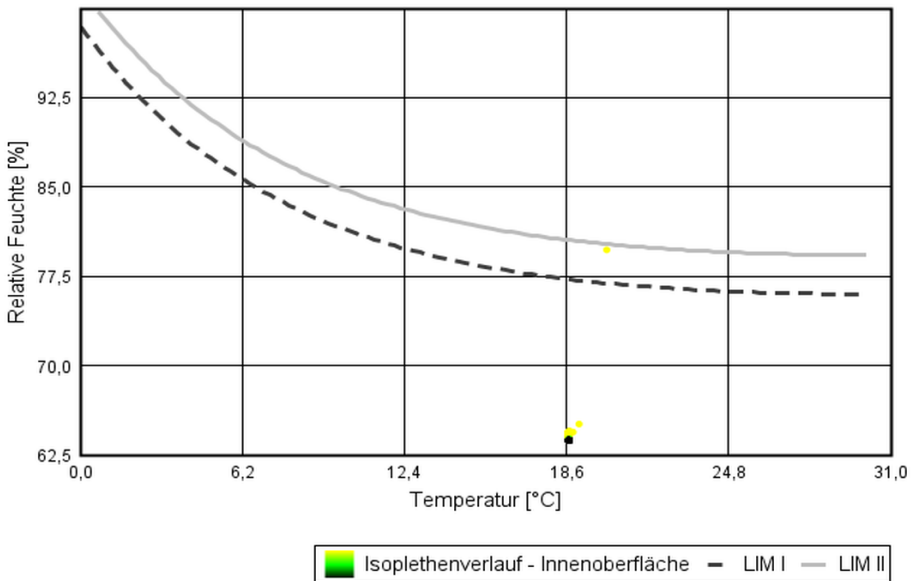


Abbildung 7.17: Isoplethenverlauf an der Innenoberfläche – Referenzmodell

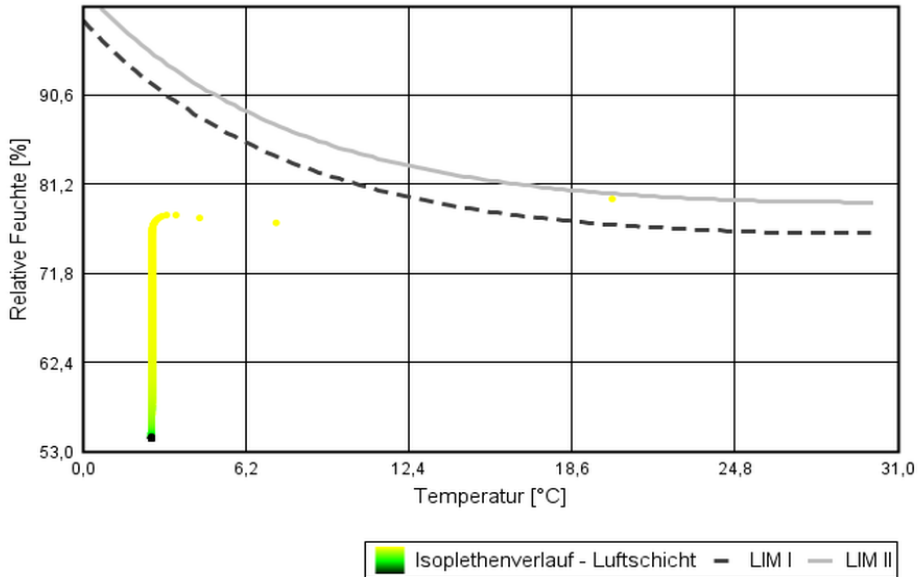


Abbildung 7.18: Isoplethenverlauf innerhalb der Luftschicht - Referenzmodell

7.2.1.2 Energieeffizienz - Wärmestromanalyse

Eine maßgebende Größe zur Beurteilung der energetischen Performance eines Bauteils ist die Energieeffizienz. Die Energieeffizienz eines Außenbauteils oder in diesem Fall der thermisch aktivierten ETA-Fassade wird über die quantitative Bewertung der Wärmeabgabe und -aufnahme beschrieben. Gemäß der Berechnungsmethode nach Elgeti (Elgeti, 1971) können die übertragenen Wärmeanteile in und aus einem Bauteil mit Heizleitungen berechnet werden. Elgetis Verfahren kann jedoch nur auf eine große Wand mit lediglich einem Heizrohr angewendet werden. Da dies nicht der untersuchenden Fassade entspricht, sind numerische Simulationsverfahren, wie hier der Fall, durchzuführen, um gegenseitige Einflüsse (Wärme- und Feuchtetransport) zwischen den einzelnen Rohren berücksichtigen zu können. Der Wärmetransportmechanismus beinhaltet die Wärmeleitung innerhalb des Bauteils sowie die Wärmestrahlung und -konvektion an den Bauteilgrenzen. Die Ermittlung der Kühlleistung beruht auf der Wärmeabgabe und -aufnahme an den Oberflächen des Bauteils. Um den Wärmestrom zu analysieren, der sich aus den Anteilen der Wärmestrahlung und -konvektion ergibt, wird eine stationäre Wärmestromanalyse durchgeführt. Das thermische Feld wird dabei als relevante Ergebnisgröße ausgewertet. Zur Quantifizierung der Energieeffizienzsteigerung wurde zudem das Referenzmodell ohne thermische Aktivierung modelliert und simuliert. Mit dem Vergleich des Fassadenmodells mit und ohne thermische Aktivierung, kann schließlich eine Aussage über die Energieperformance einer thermisch aktiven

Konfiguration gegenüber einer Fassade ohne Kühlfunktion getroffen werden. Folgende Schritte wurden im Rahmen der stationären Wärmestromanalyse umgesetzt:

Schritt 1: Vergleichsmodelle

Simulation von zwei ETA-Fassadenmodellen, mit und ohne thermische Aktivierung zur angestrebten Evaluierung der Effizienzsteigerung durch die thermische Aktivierung. In diesem Zusammenhang wurde für das Modell ohne thermische Aktivierung auf die Modellierung der Rohrsysteme in beiden Betonschale verzichtet. Die ETA-Fassade wird somit als eine konventionelle vorgehängte hinterlüftete Fassade betrachtet.

Schritt 2: Oberflächen-Temperaturprofile

Für jedes Gitterelement der Bauteiloberflächen werden über die Bauteilbreite die Temperaturprofile für innen und außen ausgelesen. Die Bauteilbreite beschränkt sich dabei auf den Stegbereich, in der die thermische Aktivierung stattfindet. Die Auskragungen wurden hierbei nicht betrachtet.

Schritt 3: Wärmeübergang – Konvektion und Strahlung

In diesem Schritt werden die Wärmeübergangsbedingungen getrennt für Konvektion und Wärmestrahlung festgelegt. Im Zuge der Modellierung wurden die Wärmeübergänge bereits als Gesamtwert hinterlegt. Dabei wurde für die Innenoberfläche ein Wärmeübergangskoeffizient von $\alpha_{\text{innen}} = 8 \text{ W/m}^2\text{K}$ mit einem konvektiven Anteil von $4 \text{ W/m}^2\text{K}$ und einem radiativen von ebenfalls $4 \text{ W/m}^2\text{K}$ gewählt. Für die Außenoberfläche gilt ein Wärmeübergangskoeffizient von $\alpha_{\text{außen}} = 17 \text{ W/m}^2\text{K}$. Dabei sind $10,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ dem konvektiven Anteil zuzuordnen (siehe Abschnitt 7.1.2). Während der Nachtstunden wird der radiative Wärmeübergang an der Außenoberfläche durch langwellige Strahlung im Wellenlängenspektrum um $10 \mu\text{m}$ charakterisiert. Diese Art von Strahlung wird von Objekten auf der Erdoberfläche in Form von Wärmestrahlung abgegeben. Der Strahlungsaustausch kann mithilfe der folgenden Gleichung beschrieben werden, vorausgesetzt, dass die Umgebung sich in etwa auf Lufttemperatur befindet und die Strahlungspartner ähnliche Emissionsgrade aufweisen. (VDI 3789, 2019) (Wemhöner, Genkinger und Afjei, 2011):

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_{\text{Umgebung}}^4 - \varepsilon_A \cdot \sigma \cdot T_A^4 \approx \alpha_{r,lw} \cdot \Delta T \quad (7.8)$$

mit

ε	Emissionsgrad [-]
σ :	Stefan-Boltzmann Konstante = $5,6697 \times 10^{-8} \text{ [W/m}^2\text{K}^4]$
T_{Umgebung} :	Umgebungstemperatur bzw. Außenlufttemperatur [K]
T_A :	Oberflächentemperatur [K]
$\alpha_{r,lw}$:	langwelliger radiativer Wärmeübergangskoeffizient [$\text{W/m}^2\text{K}$]

Lediglich bei kleinen Temperaturdifferenzen kann die Strahlungsbilanz wie in vorstehender Gleichung linearisiert werden. Dies spiegelt das vereinfachte Verfahren wider. Um jedoch eine präzise Aussage zur nächtlichen Auskühlung treffen zu können, ist eine explizite langwellige Strahlungsbilanz zu führen. Die für die Nachtauskühlung zu berücksichtigende Strahlungsbilanz enthält folgende Strahlungsanteile:

$$I = \varepsilon \cdot I_l - I_e \quad (7.9)$$

mit

- I Strahlung an der Bauteiloberfläche [W/m²]
- ε langwelliger Emissionsgrad der Bauteiloberfläche [-]
- I_l: langwellige Gegenstrahlung [W/m²]
- I_e: langwellige Emissionsstrahlung der Bauteiloberfläche [W/m²]

I entspricht der Wärmestromdichte durch langwellige Strahlung an der Außenoberfläche eines opaken Bauteils. Ergibt sich aus dieser Formel ein negativer Wert, so beschreibt dies eine Abkühlung (Wärmeabgabe) an der Oberfläche. Für die Strahlungsanteile I_l und I_e gelten folgende Gleichungen:

$$I_l = g_{\text{atm}} \cdot I_{l,\text{atm}} + g_{\text{terr}} \cdot (I_{l,\text{terr}} + I_{l,\text{refl}}) \quad (7.10)$$

mit

- I_{l,atm}: atmosphärische Gegenstrahlung [W/m²]
- I_{l,terr}: terrestrische Gegenstrahlung [W/m²]
- I_{l,refl}: vom Erdboden reflektierte atmosphärische Gegenstrahlung [W/m²]
- g_{atm}: atmosphärischer Gesichtsfeldfaktor [-]
- g_{terr}: terrestrischer Gesichtsfeldfaktor [-]

Die Gesichtsfeldfaktoren dienen der Berücksichtigung der Bauteilneigung gegenüber der Horizontalen mit dem Neigungswinkel β. Für eine Fassade bzw. Wand gilt: β = 90 °:

$$g_{\text{atm}} = \cos^2\left(\frac{\beta}{2}\right) \quad (7.11)$$

$$g_{\text{terr}} = \cos\left(\frac{\beta}{2}\right) \quad (7.12)$$

mit

- β: Neigungswinkel des Bauteils [°]

Die Anteile der Gegenstrahlung lassen sich wie folgt berechnen:

$$I_{l,\text{terr}} = \varepsilon_{l,\text{terr}} \cdot \sigma \cdot T_{\text{terr}}^4 \quad (7.13)$$

mit

- $\epsilon_{l,terr}$: langwelliger Emissionsgrad des Erdbodens [-]
 T_{terr} : Temperatur des Erdbodens [K]
 σ : Stefan-Boltzmann Konstante = $5,6697 \times 10^{-8}$ [W/m²K⁴]

Nachts kann für die Temperatur des Erdbodens die Außenlufttemperatur als Annäherung angenommen werden.

$$I_{l,refl} = \rho_{l,terr} \cdot I_{l,atm} \quad (7.14)$$

mit

- $\rho_{l,terr}$: langwelliger Reflexionsgrad des Erdbodens [-]
 $I_{l,atm}$: atmosphärische Gegenstrahlung [W/m²]

$$I_{l,atmo} = \sigma \cdot T_{sky}^4 \quad (7.15)$$

mit

- T_{sky} : Himmelstemperatur bzw. Temperatur der Atmosphäre [K]
 σ : Stefan-Boltzmann Konstante = $5,6697 \times 10^{-8}$ [W/m²K⁴]

Die Ermittlung der Himmelstemperatur ist etwas komplexer, weshalb darauf in Schritt 5 detaillierter eingegangen wird. Abschließend ist noch die langwellige Emissionsstrahlung der Bauteiloberfläche wie folgt zu bestimmen:

$$I_e = \epsilon \cdot \sigma \cdot T_A^4 \quad (7.16)$$

mit

- T_A : Temperatur der Bauteiloberfläche [K]
 σ : Stefan-Boltzmann Konstante = $5,6697 \times 10^{-8}$ [W/m²K⁴]
 ϵ : langwelliger Emissionsgrad der Bauteiloberfläche [-]

Zur Berechnung der einzelnen Terme der Strahlungsbilanz wurden die folgenden Reflexions- und Emissionsgrade verwendet:

- langwelliger Emissionsgrad des Erdbodens $\epsilon_{l,terr}$: 0,9 [-]
- langwelliger Reflexionsgrad des Erdbodens $\rho_{l,terr}$: 0,1 [-]

Die sich aus den vorstehenden Formeln (Wemhöner, Genkinger und Afjei, 2011) (Kehrer und Schmidt, 2006) (Hu, 2007) ergebenden langwelligen Strahlungsanteile sind in Tabelle 7.7 aufgeführt:

Tabelle 7.7: Anteile der langwelligen Strahlungsbilanz für die thermisch aktivierte Außenseite

Strahlungsanteil		Wert	Einheit
I_e	langwellige Emissionsstrahlung der Bauteiloberfläche	312,37	[W/m ²]
$I_{l,atmo}$	atmosphärische Gegenstrahlung	243,71	[W/m ²]
$I_{l,terr}$	terrestrische Gegenstrahlung	274,79	[W/m ²]
$I_{l,refl}$	vom Erdboden reflektierte atmosphärische Gegenstrahlung	24,37	[W/m ²]

Schritt 4: Umgebungstemperaturen

Nun sind die Innen- und Außenlufttemperaturen dem Simulationsmodell zu entnehmen. Diese stammen aus der messtechnischen Untersuchung im März 2018, die dem Simulationsmodell zugrunde gelegt worden sind:

- Raumlufthemperatur: 294,85 K
- Außenlufttemperatur: 270,89 K

Schritt 5: Himmelstemperatur

Hier ist zu Beginn die Himmelstemperatur zur Berücksichtigung der atmosphärischen Gegenstrahlung des Nachthimmels zu ermitteln. Die Bewertung der Himmelstemperatur ist erforderlich, um die Netto-Wärmeübertragung zwischen den Bauteil-Außenoberflächen und dem Himmel oder vielmehr um die Strahlungskühlung zu bestimmen. Die Wärmeübertragung der Außenoberfläche eines Gebäudes auf die Umgebung ist abhängig von der Konvektion und der Strahlung. Derartige Wärmetransportmechanismen werden seit vielen Jahren durch die Verwendung der Außenlufttemperatur berücksichtigt. Dies ist jedoch nur für den konvektiven Anteil korrekt (vgl. Schritt 3). Der Austausch der langwelligen Himmelsstrahlung ist eine Funktion der effektiven Himmelstemperatur. Im Zusammenhang mit Gebäuden wird die Strahlungskühlung durch Wärmeverluste über die Emission langwelliger Strahlung in Himmelsrichtung bestimmt, wobei der Himmel als Wärmesenke betrachtet wird. Die Strahlungskühlung ist somit ein passiver Ansatz zur Kühlung, der die thermischen Strahlungseigenschaften ausnutzt, um Bereiche eines Gebäudes zu kühlen, die einer kälteren Oberfläche, wie dem Himmel, zugewandt sind. Um solche Übertragungen bewerten zu können, müssen der Emissionsgrad und die Himmelstemperatur bestimmt werden. Die Himmelstemperatur kann hierbei vereinfacht als Durchschnittswert der Temperatur zwischen dem Boden und der oberen Troposphäre, in der weniger Wasserdampf herrscht, angegeben werden. Vom Boden bis zur oberen Troposphäre nehmen die Temperaturen tendenziell ab, sodass die Himmelstemperatur niedriger ist als

die Lufttemperatur. Die Strahlungskühlung erreicht ihren Höhepunkt in der Nacht, wenn der Himmel klar ist und die Luftfeuchtigkeit sinkt. (Albatayneh et al., 2020)

Seit Beginn des 20. Jahrhundert haben sich zahlreiche Forscher mit Modellen zur Ermittlung der Himmelstemperatur beschäftigt. Albatayneh gehörte zu einen dieser Forscher und hat mit Hilfe verschiedener Realversuche und CFD-Simulationen eine numerische Berechnungsmethode zur Bestimmung der Himmelstemperatur entwickelt, die die höchste Genauigkeit aufweist, wenn diese zur Bestimmung der monatlichen Himmelstemperatur angewendet wird.

Zur Berechnung der Himmelstemperatur wird zu Beginn der Emissionsgrad des Himmels benötigt, der abhängig von der Taupunkttemperatur und dem Bedeckungsgrad des Himmels ist. Dieser wird wie folgt berechnet:

$$\varepsilon_{\text{sky}} = \left(0,787 + 0,767 \cdot \ln\left(\frac{T_{\text{Tau}}}{273,15}\right) \right) + 0,0224N - 0,0035N^2 + 0,00028N^3 \quad (7.17)$$

mit

T_{Tau} : Taupunkttemperatur [K]

N: Bedeckungsgrad des Himmels [Zehntel]

N beschreibt dabei die erwartete Bedeckung des Himmels, wobei N gleich 0 einen klaren Himmel entspricht und 10 einem bedeckten Himmel. Des Weiteren muss zur Bestimmung der Himmelstemperatur die horizontale Infrarotstrahlungsintensität ($\text{Horizontal}_{\text{IR}}$) berechnet werden, die maßgebend im Zusammenhang mit der Außenlufttemperatur steht:

$$\text{Horizontal}_{\text{IR}} = \varepsilon_{\text{sky}} \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (7.18)$$

mit

ε_{sky} : Emissionsgrad des Himmels [-]

σ : Stefan-Boltzmann Konstante = $5,6697 \times 10^{-8}$ [W/m²K⁴]

T: Außenlufttemperatur bei ungesättigter Luft [K]

Mit den in den Gleichungen (7.18) und (7.19) ermittelten Größen kann nun die Himmelstemperatur ermittelt werden.:

$$T_{\text{sky}} = \left(\frac{\text{Horizontal}_{\text{IR}}}{\sigma} \right)^{0,25} - 273,15 \quad (7.19)$$

Tabelle 7.8: Berechnungsgrößen für die Ermittlung der Himmelstemperatur

Einflussgrößen		Wert	Einheit
T_{Tau}	Taupunkttemperatur	267,51	[K]
N	Bedeckungsgrad des Himmels	1,54	[Zehntel]
ε_{sky}	Emissionsgrad des Himmels	0,798	[-]
T	Außenlufttemperatur bei ungesättigter Luft	270,89	[K]
T_{sky}	Himmelstemperatur	256,05	[K]

Tabelle 7.8 listet die relevanten Berechnungsgrößen für die Ermittlung von T_{sky} auf:

Schritt 6: Wärmestromanalyse

Mit den in den Schritten 2 bis 4 ermittelten Temperaturen und Wärmeübergangskoeffizienten können nun die Wärmestromdichten berechnet werden. Die Wärmestromdichte ist dabei senkrecht zu Grenzfläche gerichtet und beschreibt eine Leistungsdichte, die auf ein Flächenelement wirkt (DIN EN ISO 10211, 2018). Hierbei wird für die Bewertung der außenliegenden thermisch aktivierten Seite eine getrennte Betrachtung des konvektiven und radiativen Anteils vorgenommen. Für die innenliegende Schicht beziehen sich beide Wärmetransportmechanismen auf die gleiche Umgebungstemperatur, die operative Raumtemperatur. Diese fasst die Lufttemperatur und die mittlere Strahlungstemperatur der Umgebungsflächen zusammen. Auch der Wärmeübergangskoeffizient von $8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ teilt sich gleichermaßen auf, weshalb hier auf die getrennte Betrachtung verzichtet werden kann.

Die konvektiven Wärmestromdichten lassen sich durch Anwendung des Fourierschen Gesetzes sowie gemäß DIN EN ISO 10211, Abschnitt 9.2 wie folgt berechnen (DIN EN ISO 10211, 2018):

$$\dot{q}_c = \alpha_c \cdot (T_A - T_L) \quad (7.20)$$

mit

- \dot{q}_c : konvektive Wärmestromdichte [W/m^2]
- α_c : konvektiver Wärmeübergangskoeffizient [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]
- T_A : Oberflächentemperatur [K]
- T_L : Lufttemperatur [K]

Die radiative Wärmestromdichte wiederum wird unter Berücksichtigung der in Schritt 3 ermittelten Terme berechnet:

$$q_{i,r} = I = \varepsilon \cdot I_i - I_e \quad (7.21)$$

Erfolgt mit der thermischen Aktivierung eine Wärmeabgabe (Beheizen), so ergeben sich negative Wärmestromdichten, da Wärme aus dem System entnommen wird. Bei einer Kühlung oder Wärmeaufnahme ergeben sich dagegen positive Werte. Für die ETA-Fassade gilt es, Wärme aus dem Innenraum in das Wärmeträgermedium (Fluid im Rohrsystem) zu führen und an das außenliegenden Rohrsystem weiterzuleiten, damit dann dort die Wärme an die Außenumgebung abgeführt wird. Demzufolge müssen sich Außen negative Werte und Innen positive Werte ergeben. Die so ermittelten Wärmestromdichten werden dann für die entsprechenden Gitterelemente über die Bauteilbreite integriert, woraus sich der Wärmestrom ergibt:

$$\dot{Q} = \int_0^b q_A \, dy \quad (7.22)$$

mit

- \dot{Q} : Wärmestrom [W/m]
- \dot{q} : Wärmestromdichte [W/m²]
- A: Flächenelement [m²]
- b: Integrationsgrenze über die Bauteilbreite [m]

Nachdem die Wärmeströme an den Innen- und Außenoberflächen getrennt für die Simulationsmodelle mit und ohne Kapillarrohrmatten ermittelt worden sind, können nun die Wärmestromanteile der thermischen Aktivierung berechnet werden. Durch Subtraktion des Wärmestroms an der Fassaden-Innenoberfläche ohne Kapillarrohrmatten vom Wärmestrom mit integrierten Kapillarrohrmatten kann der zum Innenraum gerichtete Wärmestromanteil ermittelt werden (Bichlmair, 2020).

$$\dot{Q}_i = \dot{Q}_{i,mTA} - \dot{Q}_{i,oTA} \quad (7.23)$$

mit

- \dot{Q}_i : Innerer Wärmestromanteil der thermischen Aktivierung [W/m]
- $\dot{Q}_{i,mTA}$: Wärmestrom innen mit thermischer Aktivierung [W/m]
- $\dot{Q}_{i,oTA}$: Wärmestrom innen ohne thermische Aktivierung [W/m]

Weiterhin lässt sich durch Subtraktion des Wärmestroms der Fassade ohne thermische Aktivierung vom Wärmestrom an der Außenoberfläche der Wand mit thermischer

Aktivierung der zusätzlich nach außen abgegebene Wärmestrom resultierend aus der thermischen Aktivierung bestimmen:

$$\dot{Q}_e = \dot{Q}_{e,mTA} - \dot{Q}_{e,oTA} \quad (7.24)$$

mit

\dot{Q}_e : Äußerer Wärmestromanteil der thermischen Aktivierung [W/m]

$\dot{Q}_{e,mTA}$: Wärmestrom außen mit thermischer Aktivierung [W/m]

$\dot{Q}_{e,oTA}$: Wärmestrom außen ohne thermische Aktivierung [W/m]

Schließlich setzt sich der von der thermischen Aktivierung ausgehende Wärmestrom aus den Wärmestromanteilen zusammen, die nach innen und außen abgegeben werden:

$$\dot{Q}_{ges,TA} = |\dot{Q}_i| + |\dot{Q}_e| \quad (7.25)$$

mit

$\dot{Q}_{ges,TA}$: Gesamter Wärmestrom der thermischen Aktivierung [W/m]

\dot{Q}_i : Innerer Wärmestromanteil der thermischen Aktivierung [W/m]

\dot{Q}_e : Äußerer Wärmestromanteil der thermischen Aktivierung [W/m]

Tabelle 7.9: Wärmestromanteile der thermischen Aktivierung

Wärmestromanteil	Wert	Einheit
\dot{Q}_i Innerer Wärmestromanteil der thermischen Aktivierung	12,997	[W/m]
\dot{Q}_e Äußerer Wärmestromanteil der thermischen Aktivierung	-42,146	[W/m]
$\dot{Q}_{ges,TA}$ Gesamter Wärmestrom der thermischen Aktivierung	55,143	[W/m]

Schritt 7: Thermische Effizienz bzw. Energieeffizienz

Abschließend ist die thermische Effizienz des ETA-Fassadenmoduls bzw. der thermischen Aktivierung zu bestimmen. Hierzu sind die Ergebnisse aus der Wärmestromanalyse auf ein ganzes Fassadenmodul zu überführen, da zur Ausnutzung von Symmetrien und somit zur Vereinfachung der hygrothermischen Simulation, ein Viertel der Fassade modelliert wurde. Hierzu wird der innere Wärmestromanteil mit thermischer Aktivierung mit dem Faktor 4 und der äußere mit dem Faktor 3 multipliziert. An der Außenfläche der ETA-Fassade werden lediglich 3 Modulanteile thermisch aktiviert, daher der Faktor 3. Im Anschluss können dann die zwei wesentlichen Größen zur Bestimmung der thermischen Effizienz ermittelt werden:

- Energieaufwand: ergibt sich aus der Wirkleistung bzw. elektrischen Leistung der Pumpen.
- Thermische Nutzen: wird in Form von abgeführter Wärme dargestellt.

Zu Beginn ist der Energieaufwand der Hydraulikpumpen 500 und 600 zu bestimmen, die mit mechanischer Energie das Wasser-Glykosol-Gemisch im geschlossenen hydraulischen Netz unter Druck und dadurch in Bewegung setzen. Mit der Pumpe 500 werden die innenliegenden Kapillarrohrmatten der Außenwand sowie der Decken bedient. Im Zeitraum der Messung im März 2018 wurde eine elektrische Leistung von 568,88 W verzeichnet. Demgegenüber dient die Pumpe 600 dem außenliegenden Kapillarrohrnetz. Hier wurde eine elektrische Leistung von 324,35 W festgestellt.

Um lediglich den Anteil eines Fassadenmoduls heranzuziehen, wird vorerst der prozentuale Anteil eines Moduls ermittelt. Es liegt eine Deckenfläche von 220,5 m² und einen Fassadenfläche 227 m² vor. Die Fassade macht somit ein Anteil von 50,73 % an der innenliegenden Gesamtfläche aus. Ein Fassadenmodul weist eine thermisch aktivierte Innenfläche von 13 m² auf, was wiederum einem Fassadenanteil von 5,73 % entspricht.

Die außenliegende thermisch aktivierte Fläche macht einen wesentlich geringeren Anteil aus, da nur wenige Module der ETA-Fassade außen aktiviert worden sind. Insgesamt wurde außen eine Dachfläche von 294 m² und eine Fassadenfläche von lediglich 24 m² thermisch aktiviert. Der Fassadenanteil liegt hier bei 7,55 %. Ein thermisch aktiviertes Fassadenmodul weist eine Kapillarrohrmattenfläche von 9 m² auf, was einem Fassadenanteil von 37,5 % gleicht. Mit den vorstehend ermittelten Flächenanteilen kann nun der Energieaufwand der Hydraulikpumpen 500 und 600 bestimmt werden. Für die innenliegende thermische Aktivierung leistet die Pumpe 500 16,536 W pro Fassadenmodul. Mit der Pumpe 600 hingegen wird eine elektrische Leistung von 9,183 W für die außenliegende thermische Aktivierung benötigt.

Die zweite maßgebende Größe ist die abgeführte Wärme je Fassadenmodul, die den thermischen Nutzen widerspiegelt. Die zuvor berechneten inneren und äußeren Wärmestromanteile [W/m] beziehen sich auf die x-y-Schnittebene. Um die Wärmeabgabe jedoch für ein Fassadenmodul darstellen zu können, ist die z-Ebene und somit die Höhe der Kapillarrohrmatten miteinzubeziehen. Diese ist je nach Positionierung im Modul unterschiedlich. Die außenliegenden Kapillarrohrmatten weisen eine Höhe von 6 m und die innenliegenden eine Höhe von 6 und 7 m auf. Unter Berücksichtigung dieser Höhen ergeben sich die nachstehenden abgeführten Wärmemengen, respektive Kühlleistungen:

- aufgenommene Wärme Innen: 337,91 W pro Modul (25,99 W/m²)
- abgegebene Wärme Außen: -758,63 W pro Modul (-84,29 W/m²)

Gemäß dem Bundesverband der Deutschen Heizungsindustrie (kurz: BDH) (Hartmann, 2019) und der (DIN EN 1264-5, 2021) beträgt die maximale spezifische

Kühlleistung von wandartigen Flächenkühlung ca. 65 W/m^2 bei einer operativen Raumtemperatur von $26 \text{ }^\circ\text{C}$ und einer Oberflächentemperatur von $18 \text{ }^\circ\text{C}$ ($\Delta T = 8 \text{ }^\circ\text{C}$). Dabei bezieht sich dieser Wert auf eine in den Innenraum gerichtete Flächenkühlung mit einem Wärmeübergangskoeffizienten von $8 \text{ W/(m}^2\text{K)}$. Dies würde der innenliegenden Seite der ETA-Fassade entsprechen, jedoch liegt die hier vorliegende Temperaturdifferenz bei ca. $3,4 \text{ }^\circ\text{C}$ und weicht somit um etwa $4,6 \text{ }^\circ\text{C}$ ($57,5 \%$) von dem Referenzfall ab. Da die Temperaturdifferenz der maßgebende Faktor bei der Berechnung der spezifischen Kühlleistung einer Flächenkühlung ist, kann die Abweichung auf die Kühlleistung des Referenzfalls überführt werden, woraus sich zum Vergleich eine spezifische Kühlleistung von $37,38 \text{ W/m}^2$ ergibt. Mit $25,99 \text{ W/m}^2$ liegt die innenliegende Seite der ETA-Fassade $11,39 \text{ W/m}^2$ unterhalb der maximal erreichbaren Kühlleistung.

Gemäß dem Bundesverband Flächenheizungen und Flächenkühlungen e.V. (BVF e.V., 2007) werden für Wandsystem typische spezifische Kühlleistungen von 40 bis 50 W/m^2 bei gleichen Randbedingungen wie aus dem Referenzbeispiel des Bundesverbands der Deutschen Heizungsindustrie. Hier werden Kühlleistungen beschrieben, die gemäß Stand der Technik üblicherweise realisierbar sind. Geht man hier von einem Mittelwert von 45 W/m^2 aus und berücksichtigt die prozentuale Abweichung, die sich durch die Temperaturdifferenz ergibt, so ergibt sich ein Vergleichswert von $25,88 \text{ W/m}^2$. Werden also „typische“ spezifische Kühlleistungen zum Vergleich herangezogen, die den Stand der Technik berücksichtigen, so liegt die ETA-Fassade genau in diesem Spektrum. Für die außenliegende thermische Aktivierung existieren keine Referenzwerte, die zum Vergleich herangezogen werden können. Im Verhältnis zur raumseitigen thermischen Aktivierung weist sie jedoch eine um ca. 3,2-fache Kühlleistung auf, was maßgeblich aus dem Ansatz der langwelligen Strahlungsbilanz resultiert.

Mit dem Energieaufwand und dem thermischen Nutzen kann nun die Energieeffizienz pro Fassadenmodul bestimmt werden. Diese wird mit dem Energy Efficiency Ratio (kurz: EER) angegeben. Der EER gibt das Verhältnis der abgeführten Wärmemenge zur aufgewendeten Antriebsleistung der Pumpen an. Abhängig von der Lage der thermischen Aktivierung (Innen oder Außen) ergeben sich folgende EERs:

- EER Innen: 20,43
- EER Außen: 82,61

7.2.1.3 Energieflexibilität - Thermische Speicherfähigkeit

Die Energieflexibilität beschreibt eine Ergebnisgröße, die sich aus der Wärmespeicherfähigkeit bzw. der Trägheit eines Bauteils ergibt. Die thermische Speicherfähigkeit lässt sich nicht aus einer stationären Betrachtung entnehmen. Hierfür ist ein instationärer Betrieb der thermischen Aktivierung simulativ zu untersuchen. Im Zuge

eines dynamischen Betriebs ist eine kurzfristige Erhöhung der Wärmeaufnahme zu erwarten, als Reaktion auf das Einschalten der thermischen Aktivierung.

Ziel ist es die bereits durch die ETA-Fassade vorliegende thermische Speicherfähigkeit zu identifizieren und im Rahmen der Parameterstudie (siehe Abschnitt 7.2.2) diese durch den Einsatz von PCM im Trägermaterial zu erhöhen und somit die Kühlleistung für einen längeren Zeitraum sicherzustellen.

Das Bestreben der Erhöhung der Speicherfähigkeit liegt auf der innenliegenden Seite vor, denn hier liegt die Schnittstelle zur konditionierenden Umgebung vor. Der raumseitige Kühlvorgang soll, wenn möglich, zeitlich gestreckt werden. Die Ergebnisse dieser Betrachtung sollen aufzeigen, wie schnell das Bauteil auf Änderungen der Energiezufuhr reagieren und wie viel Energie es zwischenspeichern kann.

Das Referenzmodell der ETA-Fassade weist raumseitig als Trägermaterial „Normalbeton“ auf. Beton verfügt insbesondere aufgrund der hohen Rohdichte und Wärmeleitfähigkeit über eine gute Wärmespeicherfähigkeit.

Für die Simulation ist zuvor ein Zeitplan zum Ein- und Ausschalten der thermischen Aktivierung festzulegen. Dabei wird als Zeitschritt eine Stunde bzw. 3600 s angesetzt. Die thermische Aktivierung erfolgt über die Temperaturanpassung des Fluids. Hierbei wurde zur Aktivierung von einer Fluidtemperatur von $T_{\text{Fluid}} = 16 \text{ °C}$ und im ausgeschalteten Zustand eine Fluidtemperatur nahe der Raumtemperatur von $T_{\text{Fluid}} = 20 \text{ °C}$ ausgegangen. Die 16 °C ergibt sich vor allen Dingen aus der Phasenwechseltemperatur des PCMs, dass im Rahmen der Parameterstudie untersucht wird.

Im Zeitplan wird zu Beginn für 1000 h eine Einschwingphase der Fassade ohne Aktivierung bzw. im nahezu ungekühlten Zustand ($T_{\text{Fluid}} = 20 \text{ °C}$) einkalkuliert. Danach folgt eine Aktivierungsphase über 1000 h mit einer Fluidtemperatur von $T_{\text{Fluid}} = 16 \text{ °C}$. Erst nach dieser Zeitspanne erfolgen die Kühlphasen mit entsprechenden Unterbrechungen: 24 h, 12 h, 6 h, 4 h und 2 h jeweils mit und ohne thermische Aktivierung. Diese Regelstrategie bzw. Zeitplan wird der Simulation zu Grunde gelegt und vier Mal wiederholt. Der vierte Zyklus wird dann zur Auswertung herangezogen, um den hygrothermisch eingependelten Zustand bewerten zu können.

Um nun die thermische Speicherfähigkeit quantitativ bestimmen zu können, wird das verzögerte Verhalten bei der Wärmeabgabe bzw. -aufnahme beobachtet, denn je höher die Wärmespeicherfähigkeit des Bauteils, desto deutlicher ist die Verzögerung der Wärmeabgabe. Dies wird durch die Untersuchung der Temperaturen auf unterschiedlichen Ebenen in der aktivierten Schicht umgesetzt. Hierfür werden die mittleren Temperaturen auf folgende Ebenen betrachtet:

- Rohrebene (Tiefe: 17,83 mm)
- Ebenen der Schichtgrenzen
 - raumseitige Oberfläche (Tiefe: 0 mm)
 - Grenzschicht zwischen Beton und Dämmebene (Tiefe: 120 mm)
- auf Höhe der Mittellinie (Tiefe: 60 mm)

Die Temperaturprofile werden für das Referenzsystem auf den zuvor genannten Ebenen mit ihren jeweiligen Bauschichttiefen ermittelt und ausgewertet. Diese werden in den Abbildungen 7.19 und 7.20 aufgezeigt. Abbildung 7.20 stellt ein Auszug der Abbildung 7.19 dar, zur besseren Darstellung und Einsicht der Ein- und Ausschaltvorgänge und der damit verbundenen Temperaturprofile.

Zwischen der Grenzfläche zur Dämmung und der Rohrebene liegen 102,17 mm Beton, was somit den größten Abstand zur thermischen Aktivierung bzw. Kapillarrohrrmatten wiedergibt. Zwischen der Rohrebene und der Innenoberfläche liegen lediglich 17,83 mm, was eine geringe Überdeckung darstellt und wodurch eine schnelle Wärmeübertragung aufgrund des geringen Widerstands zu erwarten ist. Aus den nachstehenden Diagrammen lässt sich im 24h-Einschalt-Intervall das Verhalten der Wärmefaufnahme ablesen. Beim Einschalten der thermischen Aktivierung mit einer Fluidtemperatur von 16 °C beträgt die Temperaturdifferenz zwischen Rohrebene und Dämmebene $\Delta T_{RE-DE,0h} = 1,211$ °C. Dabei liegt die Temperatur der Grenzschicht an der Dämmebene bei $T_{DE,0h} = 19,09$ °C. Nach einer Stunde Kühlung reduziert sich die Temperaturdifferenz auf $\Delta T_{RE-DE,1h} = 0,947$ °C bzw. auf eine Grenzschicht-Temperatur von $T_{DE,1h} = 18,24$ °C. Es werden etwa 1,5 Stunden benötigt um die Temperatur der Grenzschicht zwischen Dämmebene und Beton um 1 °C zu reduzieren.

Im Vergleich dazu beträgt die Temperaturdifferenz zwischen Rohrebene und Innenoberfläche kurz nach dem Einschalten $\Delta T_{RE-OF,0h} = 0,26$ °C. Dabei liegt die Oberflächentemperatur bei $T_{OF,0h} = 18,14$ °C. Diese hält sich über die 24 h relativ konstant. Nach einer Kühldauer von 1 Stunde, herrscht eine Temperaturdifferenz von $\Delta T_{RE-OF,1h} = 0,24$ °C (Veränderung um 0,02 °C) und eine Oberflächentemperatur von $T_{OF,1h} = 17,52$ °C. Die Innenoberfläche konnte nach einer Stunde um 0,62 °C runtergekühlt werden. Nach 24 Stunden ist ein eingependelter Zustand zu erkennen, es bildet sich ein Plateau aus. Die maximal erreichbare Oberflächentemperatur beim Kühlvorgang beträgt $T_{OF,24h} = 16,84$ °C. Schließlich lässt sich daraus ableiten, dass etwa 2,5 Stunden Kühlung erforderlich sind, um die Oberflächentemperatur um 1 °C zu reduzieren.

Die an der thermisch aktivierten Betonebene angrenzenden Schichten und deren Temperaturen üben auf den Temperaturverlauf während des Einschaltvorgangs einen hohen Einfluss aus. Die Oberfläche erfährt im Zuge der Kühlung drei Wärmetransportvorgänge, Wärmeleitung zwischen der Rohrebene und der Oberfläche und schließlich Konvektion und Strahlung zwischen der Oberfläche und der angrenzenden Raumluft. Sobald eine Temperaturdifferenz zwischen der Oberfläche und der Raumluft herrscht, wird durch die kühlere Oberfläche Wärme aufgenommen, was die Oberflächentemperatur erhöht. Dies ist jedoch genau das was mit der thermischen Aktivierung erzielt werden soll, die Entnahme von Wärme aus der Raumluft zur Konditionierung des Raumes. Schließlich lässt sich aus der Untersuchung der Temperaturprofile entnehmen, dass die geringen Temperaturunterschiede zwischen der Rohrebene und der Oberfläche auf einen schnellen Wärmetransport und somit auf eine

geringe Verzögerung hinweisen, woraus sich eine geringe Wärmespeicherung zwischen diesen zwei Ebenen schließen lässt. Dies begünstigt die erzielbare schnelle Reaktionsfähigkeit des Systems.

Eine genauere Beurteilung des verzögerten Wärmetransports lässt sich lediglich im Vergleich mit einer Variante zur hier untersuchten ETA-Fassade (siehe Parameterstudie im Abschnitt 7.2.2) durchführen.

Im nächsten Schritt wird weiterhin das Wärmespeichervermögen der innenliegenden thermisch aktivierten Schicht über die Betrachtung der mittleren Schichttemperatur untersucht.

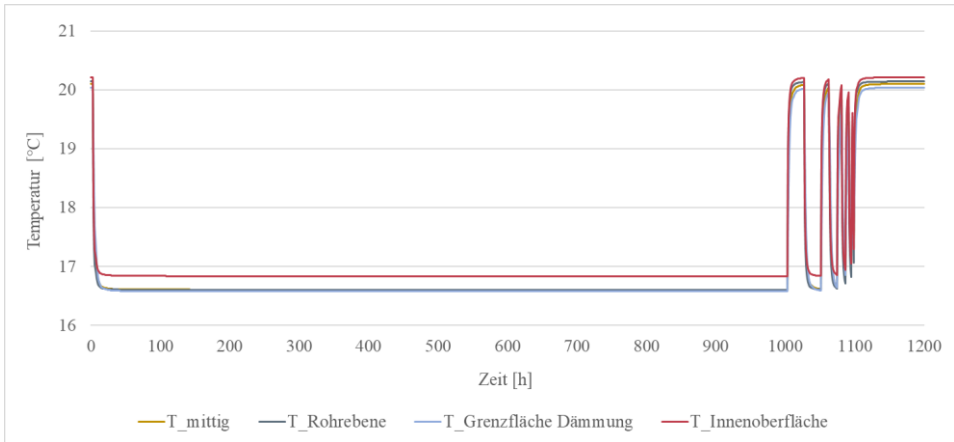


Abbildung 7.19: Temperatur-Zeit-Profile auf vier Bauschichttiefen - Referenzmodell

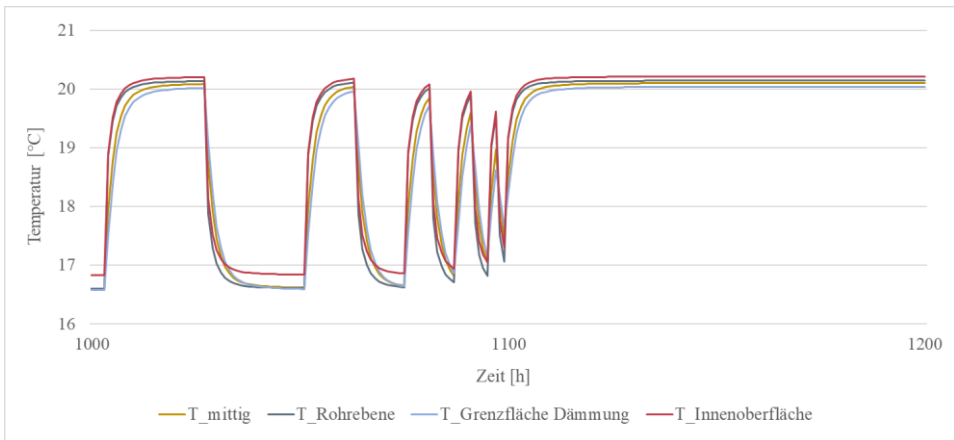


Abbildung 7.20: Temperatur-Zeit-Profile (Auszug) - Referenzmodell

Bei gleichbleibenden Randbedingungen des Simulationsmodells, lässt sich durch die zusätzliche Betrachtung der mittleren Bauschichttemperatur (Temperatur der Trägerschicht Beton) im aktivierten und ausgeschalteten Zustand das Wärmespeichervermögen der innenliegenden thermisch aktivierten Schicht ermitteln. Dabei ist insbesondere die Differenz dieser mittleren Temperatur ausschlaggebend, denn diese beeinflusst maßgebend die gespeicherte Wärmeenergie. Das Wärmespeichervermögen wird somit wie folgt bestimmt (Bichlmair, 2020):

$$\Delta Q = m \cdot c \cdot \Delta \bar{\theta} \quad (7.26)$$

mit

- ΔQ : Differenz der gespeicherten Energie [J]
 m : Masse der Trägerschicht [kg]
 c : spezifische Wärmekapazität [J/(kgK)]
 $\Delta \bar{\theta}$: Differenz der mittleren Bauschichttemperatur [K]

Im Falle der Bewertung des Referenzmodells der ETA-Fassade sind die physikalischen Eigenschaften des Betons, die Masse und die spezifische Wärmekapazität heranzuziehen. Das im Rahmen der Simulation verwendete „Normalbeton“ weist eine Rohdichte von 2400 kg/m^3 und eine spezifische Wärmekapazität von 850 J/kgK . Unter Berücksichtigung der Querschnittsfläche, die dem Modell entnommen werden kann, kann das Wärmespeichervermögen pro m Fassade identifiziert werden. Die in Abbildung 7.21 und Abbildung 7.22 dargestellten Diagramme beschreiben die berechneten Verläufe des Wärmespeichervermögens der raumseitigen thermisch aktivierten Trägerschicht in Abhängigkeit der Ein- und Ausschaltzeiträume der thermischen Aktivierung.

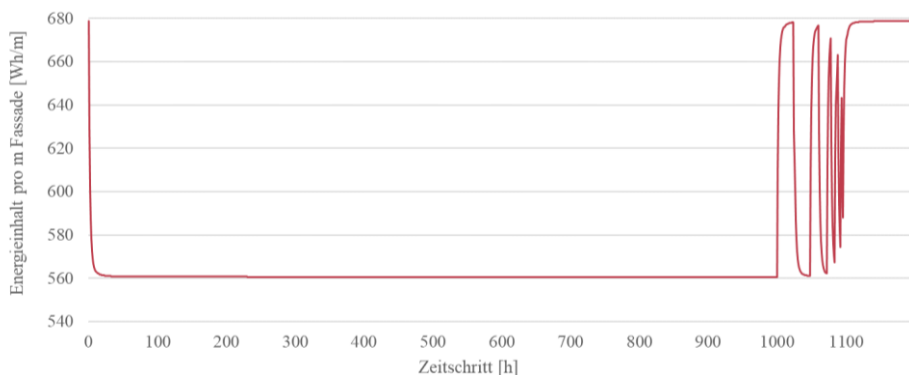


Abbildung 7.21: Differenz des Energieinhalts im stündlichen Verlauf. Der Verlauf beginnt mit dem Zeitabschnitt 1000 h thermische Aktivierung (Fluidtemperatur: $16 \text{ }^\circ\text{C}$).

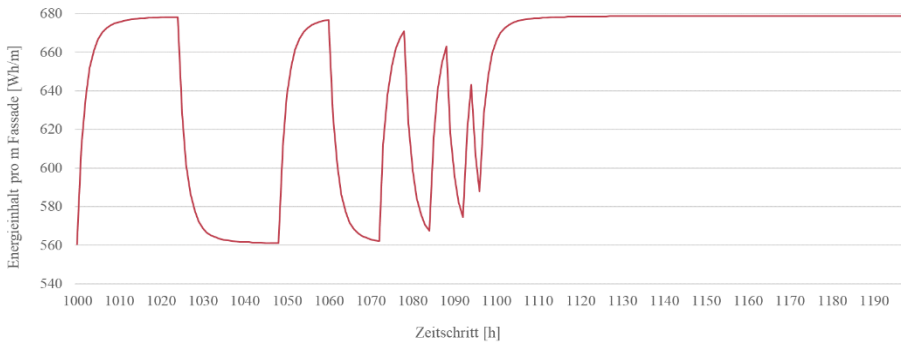


Abbildung 7.22: Differenz des Energieinhalts im stündlichen Verlauf - Auszug

Bei einer Temperaturdifferenz des Fluids von 4 K zwischen dem Ein- und Ausschaltvorgang, nimmt die Trägerschicht aus Normalbeton innerhalb eines Intervalls von 24 Stunden 117,14 Wh pro m Fassade auf. Dies ist nach der 1000-stündigen Kühlphase und der für 24 Stunden abgeschalteten thermischen Aktivierung zu beobachten. Gleichzeitig lässt sich in dieser Phase erkennen, dass sich nach etwa 24 Stunden eine Art Plateau ausbildet. D.h., dass bei einer Temperaturdifferenz von 4 K die Aufnahme und Speicherung von thermischer Energie nach ca. 24 Stunden begrenzt bzw. ausgeschöpft ist. Das bedeutet, dass die maximale Wärmespeicherung bei etwa 117 Wh pro m Fassade liegt. Dabei ist jedoch noch zu beachten, dass sich die Ergebnisse immer auf ein Viertel der ETA-Fassade beziehen. Aus Gleichung (7.26) lässt sich erkennen, dass die Masse und somit die angesetzte Querschnittsfläche als Faktor bzw. Multiplikator in der Formel fungiert. Somit lassen sich die Ergebnisse zum Wärmespeichervermögen um den Faktor 4 multiplizieren, was dann die tatsächliche Wärmespeicherfähigkeit beschreibt. Somit lässt sich daraus ableiten, dass 468 Wh pro m ETA-Fassade an thermische Energie gespeichert werden können.

Weiterhin ist zu beobachten, dass mit immer kürzer werdenden Regelintervallen die maximale Wärmespeicherfähigkeit sinkt. Eine Halbierung des Regelintervalls von 24 h auf 12 h, führt zu einer Reduzierung des Energieinhaltes von 117,14 Wh/m auf 114,51 Wh/m (Reduzierung um 2,25 %). Eine weitere Halbierung des Intervalls von 12 auf 6 h führt zu einer Reduzierung von 9,77 % (103,32 Wh/m). Es stellt sich ein negativ exponentieller (degressiver) Verlauf ein (vgl. Abbildung 7.23). Aus dem Kurvenverlauf lässt sich ableiten, dass der Wendepunkt der angenäherten Kurve bei etwa 6 bis 7 h liegt und dieser den idealen max. Kühlintervall darstellt, da mit größeren Kühlintervallen die Steigerung des Wärmespeichervermögens begrenzt ist.

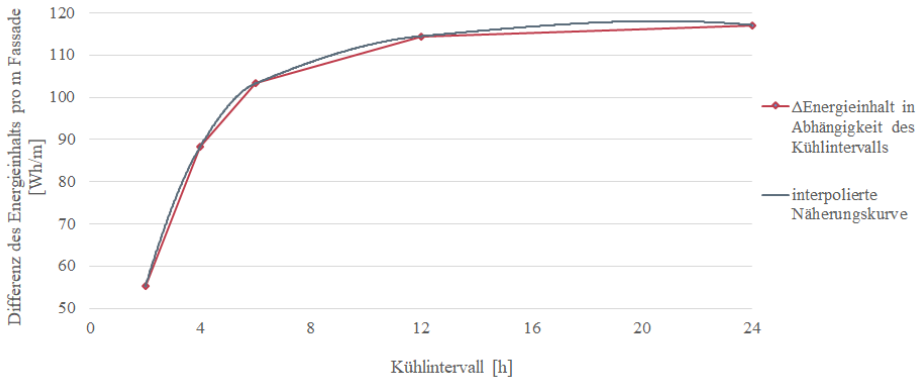


Abbildung 7.23: Differenz des Energieinhalts in Abhängigkeit des Kühlintervalls – Degressiver Verlauf

7.2.2 Auswertung Parameterstudie

Im Rahmen der Parameterstudie können verschiedene Einflussfaktoren auf das Verhalten des Fassadenbauteils sowie dessen Sensitivitäten untersucht werden. Es kann festgestellt werden, welche Parameter einen signifikanten Einfluss auf das Bauteilverhalten haben und welche weniger relevant sind. Dieses Wissen ist wichtig, um Kosten- sowie Energieeinsparungen zu maximieren. Im Zuge der Parameterstudie wurden drei Parameterarten unterschieden: physikalische, geometrische und materialspezifische Parameter. In den nachstehenden Abschnitten wird auf die Ergebnisse dieser Parametervariation eingegangen. Dabei wird für die physikalischen und geometrischen Parameter die Energieeffizienz über die Wärmestromanalyse durchgeführt und für die PCM-Gemische (materialspezifische Parameter) gesondert das Wärmespeichervermögen sowie die Energieflexibilität ausgewertet.

7.2.2.1 Physikalische Parameter

Außenklima (Außenlufttemperatur und rel. Feuchte)

Durch das Benchmarking sind dem Referenzmodell konstante Randbedingungen auferlegt. Um dennoch Rückschlüsse auf die Leistungsveränderung ziehen zu können, wurden Wetterdaten für Darmstadt aus dem Jahr 2018 abgerufen (Visual Crossing, 2023) und monatlich analysiert. Bei der Analyse wurde zunächst ermittelt, in welchen Zeiträumen eine nächtliche Auskühlung abhängig von der Jahreszeit sinnvoll ist. Hierzu wurde der Zeitraum ermittelt, in dem kein Sonnennergieeintrag stattfindet (vgl. Tabelle 7.5). Für diese Zeiträume wurden die Durchschnittswerte der Außenlufttemperaturen und

relativen Feuchten für die entsprechenden Monate berechnet und als Klimarandbedingungen für die simulative Analyse verwendet (siehe Abbildung 7.24).

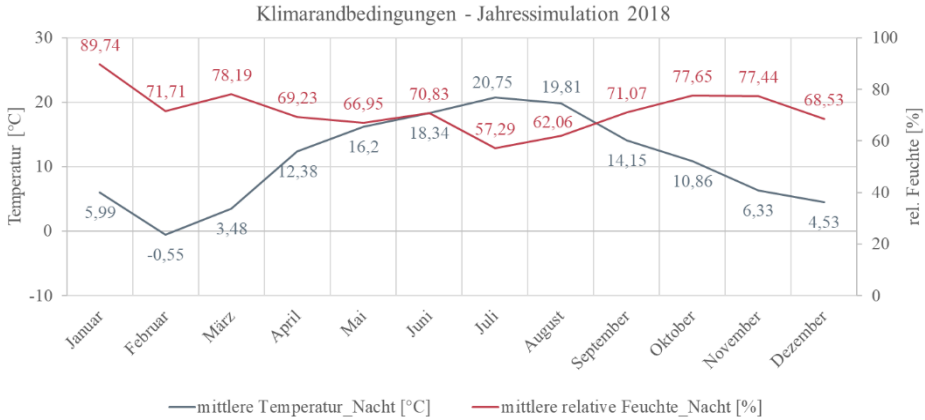


Abbildung 7.24: Klimarandbedingungen Jahressimulation 2018 - Parameter: Außenklima

Durch die unterschiedlichen Klimarandbedingungen ergeben sich dementsprechend auch variierende Himmelstemperaturen, die mithilfe von Monatsmitteln aus der Taupunkttemperatur, dem Bewölkungsgrad und der Außenlufttemperatur berechnet werden können (siehe Abbildung 7.25).

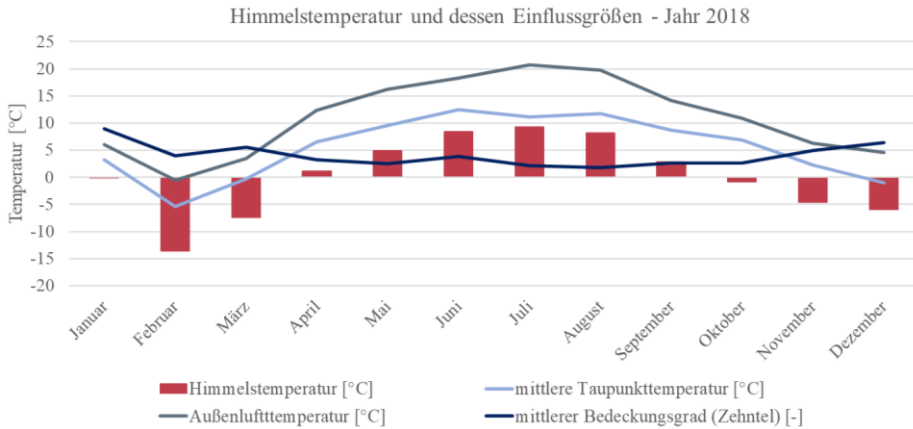


Abbildung 7.25: Monatlich gemittelte Himmelstemperaturen 2018 – Parameter: Außenklima

Die nächtliche Abstrahlung oder Bauteilkühlung bezeichnet den Prozess der Wärmeabgabe von der Erdoberfläche in den Weltraum während der Nacht. Eine hohe

Himmelstemperatur kann die nächtliche Abstrahlung verringern, da die umgebende Atmosphäre eine gewisse Menge an Infrarotstrahlung zur Erdoberfläche zurückstrahlen kann. Dies wird als atmosphärische Gegenstrahlung bezeichnet. Eine erhöhte Himmelstemperatur führt zu einer erhöhten Emission von atmosphärischer Gegenstrahlung, die die Wärmeabgabe von der Erdoberfläche in den Weltraum reduziert.

Die quantitative Beurteilung der nächtlichen Auskühlung basiert auf der Bestimmung der langwelligen Netto-Abstrahlung an der Bauteiloberfläche. Diese Netto-Abstrahlung ergibt sich aus der Differenz zwischen der Gesamt-Gegenstrahlung und der Bauteilemission.

Hierfür müssen die relevanten langwelligen Strahlungsanteile identifiziert werden, die von sich verändernden klimatischen Randbedingungen beeinflusst werden (siehe Abbildung 7.26). Die Formel zur Berechnung der nächtlichen Auskühlung bzw. zur Gesamtbilanzierung aller Strahlungsanteile wurde im Abschnitt 7.2.1.2 bereits vorgestellt.

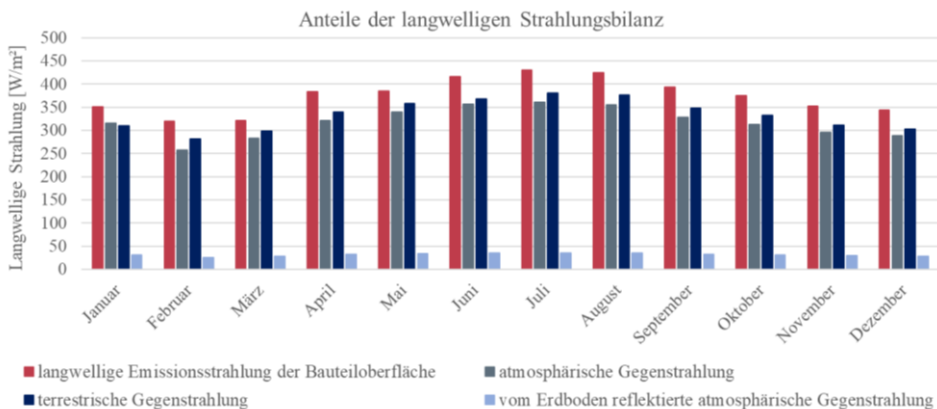


Abbildung 7.26: Anteile der langwelligen Strahlungsbilanz 2018 – Parameter: Außenklima

Im Falle einer positiven Nettoabstrahlung wird eine Erwärmung der Bauteiloberfläche bewirkt, während ein negativer Wert zu einer Abkühlung führt. Dabei gilt: Je kleiner I_l (gesamte langwellige Gegenstrahlung) und je größer I_e (langwellige Emissionsstrahlung der Bauteiloberfläche), desto kleiner ist die Differenz (bzw. größer die negative Differenz) und umso effizienter die Kühlung.

Bei der Bilanzierung der Strahlungsanteile, kann deren Einfluss auf das Gesamtergebnis prozentual quantifiziert werden. Die atmosphärische Gegenstrahlung beeinflusst die langwellige Gegenstrahlung zu etwa 20 %. Die maßgebliche Größe der langwelligen Gegenstrahlung ist $I_{l,terr}$, die im Durchschnitt zu etwa 70 % Einfluss nimmt. Es ist daher anzustreben $I_{l,terr}$ möglichst klein zu halten. Das größte Potenzial zur Steigerung der Energieeffizienz liegt dementsprechend dort, wo die größte Differenz

zwischen $I_{l,terr}$ (sollte einen kleinen Wert annehmen) und I_c (sollte möglichst groß gehalten werden) vorliegt. In diesen Bereichen besteht die Möglichkeit, den Wärmeverlust zu minimieren und die Abkühlung des Bauteils zu maximieren. Durch eine gezielte Steuerung der Kühlzeiträume (Einschalten der thermischen Aktivierung) zu Zeiten mit geringen $I_{l,terr}$ und hohen außenseitigen Fluidtemperaturen (bewirkt ein hohes I_c) kann somit die Effizienz der Kühlung optimiert werden.

Die Abbildungen 7.27 bis 7.30 zeigen die Verteilung der Wärmestromdichte über die Breite des Bauteils im Vergleich zur Referenzfassade. Die Bauteilbreite repräsentiert den thermisch aktivierten „Stegbereich“ des simulativ untersuchten Fassadenmoduls. Die Wärmestromdichte gibt an, wie viel Wärmeenergie pro Flächeneinheit übertragen wird und gibt somit Aufschluss über die Intensität der Wärmeübertragung.

Anhand der Diagramme lässt sich erkennen, dass die Monate „Juli“ und „August“ insgesamt die beste Leistung zeigen. In der heißen Jahreszeit ist die Wärmestromdichteverteilung an der Außenoberfläche des Bauteils am höchsten. Im Gegensatz dazu bleibt die Wärmestromdichteverteilung an der Innenoberfläche nahezu unverändert, weshalb auf die Darstellung dieser verzichtet worden ist.

Für den Monat Mai konnten lediglich Simulationsergebnisse unter Berücksichtigung einer Modellanpassung generiert werden. Hierbei musste ein Luftwechsel von 10 statt 5 h^{-1} angesetzt werden, damit die Feuchtebelastung unterhalb des Konvergenzkriteriums fällt. Durch die monatliche Betrachtung konnte diese Modellschwachstelle identifiziert werden. Demzufolge ist in den Sommermonaten die erwartende Feuchtebelastung mit der Einhaltung eines Mindestluftwechsels von 10 h^{-1} zu berücksichtigen.

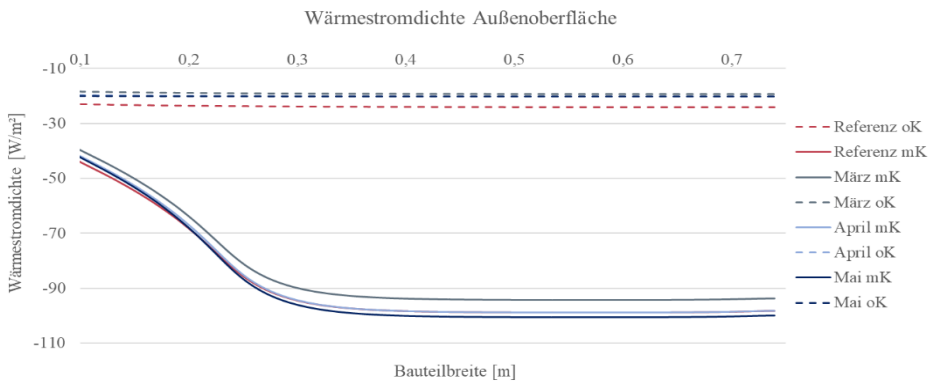


Abbildung 7.27: Wärmestromdichteverteilung Außenoberfläche Frühling (März, April, Mai)

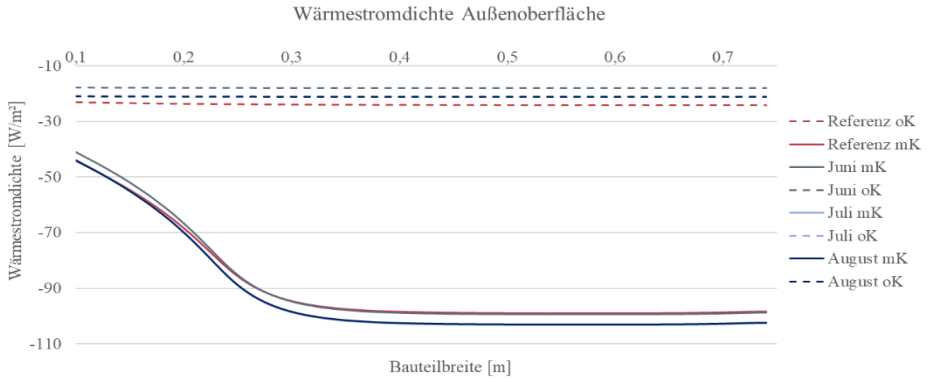


Abbildung 7.28: Wärmestromdichteverteilung Außenoberfläche Sommer (Juni, Juli, Aug)

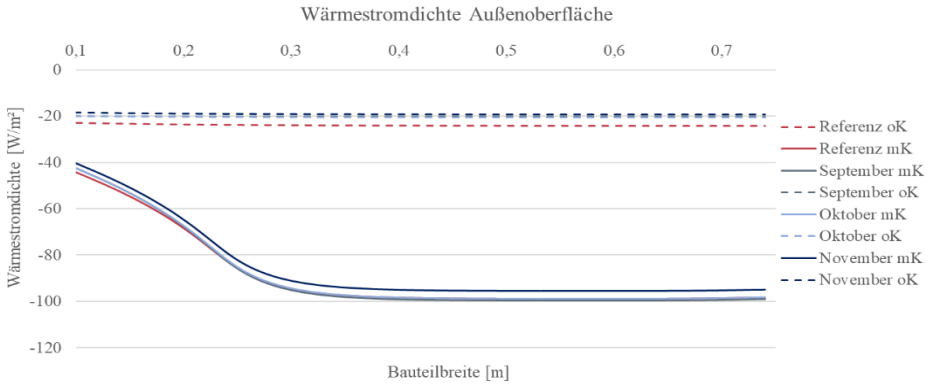


Abbildung 7.29: Wärmestromdichteverteilung Außenoberfläche Herbst (Sept, Okt, Nov)

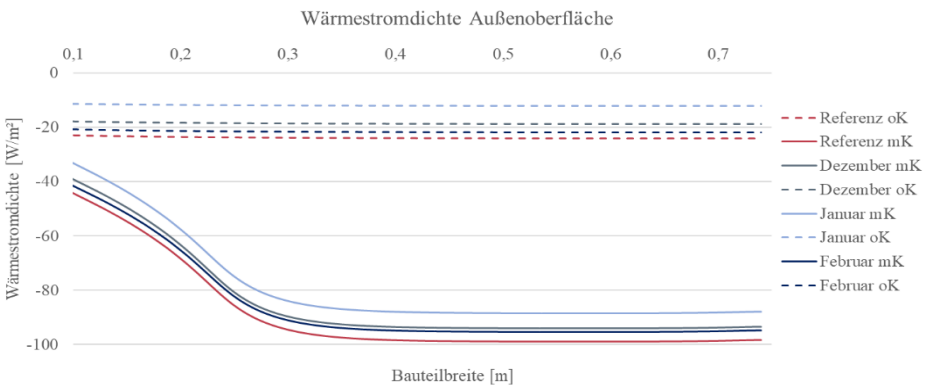


Abbildung 7.30: Wärmestromdichteverteilung Außenoberfläche Winter (Dez, Jan, Feb)

Die Ergebnisse der Integration dieser Wärmestromdichten über die Bauteilbreite, die den Wärmestromanteilen der monatlichen Untersuchung entsprechen, sind in Tabelle 7.10 zusammengefasst. Es ist zu beachten, dass im Zusammenhang mit dem Gesamt-Wärmestrom die Absolutwerte addiert werden.

Das Referenzmodell basiert auf Messungen im März 2018. Bei der Auswertung der Daten zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen dem Referenzmodell und den Messungen im März. Lediglich eine geringe Differenz von 0,74 W/m ist festzustellen.

Tabelle 7.10: Wärmestromanteile der thermischen Aktivierung – Parameter: Außenklima

Monat	Innerer Wärmestromanteil \dot{Q}_i [W/m]	Äußerer Wärmestromanteil \dot{Q}_e [W/m]	Gesamter Wärmestrom $\dot{Q}_{ges,TA}$ [W/m]
Januar	13,75	-43,05	56,80
Februar	13,16	-41,40	54,56
März	13,52	-42,37	55,89
April	14,34	-44,34	58,68
Mai	14,76	-45,20	59,96
Juni	14,89	-45,81	60,70
Juli	15,11	-46,30	61,41
August	15,03	-46,08	61,11
September	14,21	-44,78	58,99
Oktober	14,21	-44,05	58,26
November	13,78	-43,00	56,78
Dezember	13,62	-42,50	56,12
Referenz	13,00	-42,15	55,15

Im Zuge der Ermittlung des thermischen Nutzens, werden die berechneten Wärmestromanteile auf ein vollständiges Fassadenmodul hochgerechnet (siehe Tabelle 7.11). Abschließend wird das EER (Energy Efficiency Ratio) berechnet, um eine Aussage über die Energieeffizienz treffen zu können. Auch hier ist zu erkennen, dass im Monat „Juli“ die höchste Effizienz vorliegt.

Tabelle 7.11: Thermischer Nutzen in Form von abgeführter Wärme je Modul – Parameter: Außenklima

Monat	Thermischer Nutzen			
	aufgenommene Wärme Innen		abgegebene Wärme Außen	
	[W]	[W/m ²]	[W]	[W/m ²]
Januar	357,59516	27,50732	-774,873	-86,097
Februar	342,07914	26,31378	-745,1208	-82,7912
März	351,61178	27,04706	-762,6708	-84,7412
April	372,9596	28,6892	-798,0786	-88,6754
Mai	383,8822	29,5294	-813,5748	-90,3972
Juni	387,26922	29,78994	-824,5692	-91,6188
Juli	392,97258	30,22866	-833,3568	-92,5952
August	390,74516	30,05732	-829,5156	-92,1684
September	369,38044	28,41388	-806,0688	-89,5632
Oktober	369,38044	28,41388	-792,9018	-88,1002
November	358,3684	27,5668	-774,0612	-86,0068
Dezember	354,05812	27,23524	-765,054	-85,006

*Modulfläche Innen (13 m²); Modulfläche Außen (9 m²)

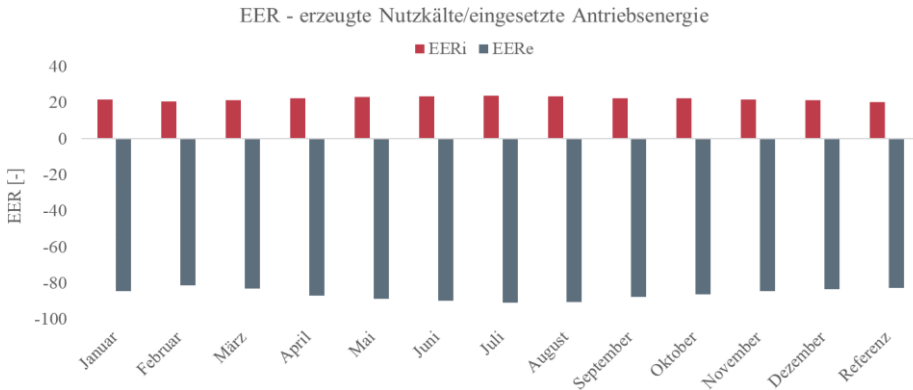


Abbildung 7.31: Energy Efficiency Ratio EER - Parameter: Außenklima

Fluidtemperaturen innen- und außenliegender Rohrsysteme

Zur Festlegung der Fluidtemperaturen wurde das Referenzsystem bzw. dessen Temperaturdelta herangezogen. Hier lag ein Temperaturunterschied von $\Delta T = 14 \text{ }^\circ\text{C}$ zwischen der raumseitigen und außenliegenden Fluidtemperatur vor. Dieser Temperaturunterschied entspricht einem Temperaturverlust, der sich hauptsächlich aus dem klimabedingten Temperaturgradienten zwischen Innen- und Außenumgebung sowie aus den Wärmetransportverlusten über Wärmeleitung innerhalb des Fassadenbauteils ergibt. Zusätzlich sind die Verluste resultierend aus der Wärmeübertragung zwischen den innen- und außenliegenden Kapillarrohrmatten zu berücksichtigen. Die Verluste sind dabei bedingt durch die zu überbrückenden Rohrleitungslängen und dem damit einhergehenden Druckverlust sowie durch den Widerstand, der durch den Plattenwärmetauscher gegeben ist. Der Druckverlust entsteht durch die Reibung der Flüssigkeit an den Innenwänden des Rohrs. Der Zusammenhang zwischen Rohrlänge, Druckverlust und Temperaturverlust ist von verschiedenen Faktoren abhängig, wie beispielsweise der Reynoldszahl und dem Druckverlustbeiwert, die wiederum vom Rohrdurchmesser, der Fließgeschwindigkeit des Fluids, den Materialeigenschaften des Rohrs und der Art des Fluids (z.B. Viskosität) selbst beeinflusst werden. Gemäß Aumatec (Schönfelder, 2023) ist infolge der genannten Verluste über die Rohrleitungen und dem Plattenwiderstand ein Temperaturverlust von 2 K zu erwarten. Somit sind die klimabedingten Temperaturverluste ausschlaggebend für das Zustandekommen des Temperaturdeltas.

Der sich aus dem Druckverlust ergebende Temperaturunterschied zwischen der innen- und außenliegenden Seite von $\Delta T = 14 \text{ }^\circ\text{C}$ wurde hier als maßgebende Größe zur Bestimmung der variierenden Temperaturpaare herangezogen. Folgende Variationen der Temperaturpaare $T_{\text{innen}}/T_{\text{außen}}$ wurden im Rahmen der Parameterstudie untersucht: $12/-2^\circ\text{C}$, $14/0^\circ\text{C}$ und $16/2^\circ\text{C}$.

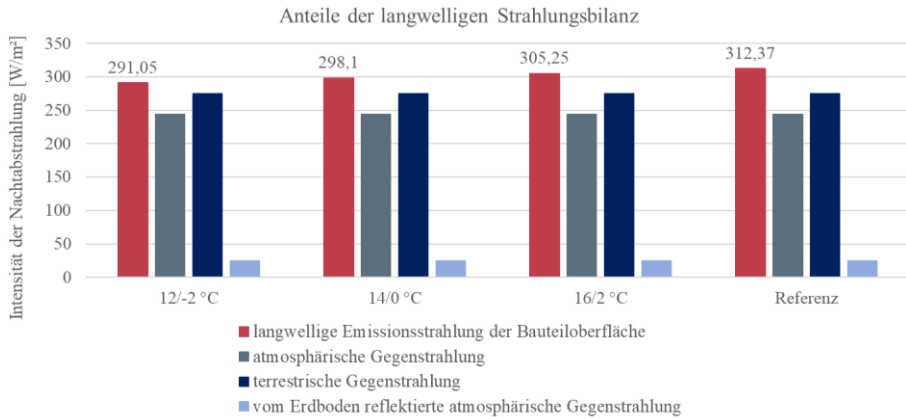


Abbildung 7.32: Anteile der langwelligen Strahlungsbilanz - Parameter: Fluidtemperaturen

Zu Beginn sind die Klimarandbedingungen und die entsprechenden Strahlungsanteile zu bestimmen. Da im Falle dieser Parametervariation die gleichen Randbedingungen angesetzt werden, wie die des Referenzmodells, ändert sich lediglich die langwellige Emissionsstrahlung der Bauteiloberfläche (siehe Abbildung 7.32). Die Variante „16/2°C“ weist die größte Emissionsstrahlung auf, ist jedoch um $7,12 \text{ W/m}^2$ kleiner als die des Referenzmodells, was durch die geringere mittlere Temperatur der Außenoberfläche des Referenzmodells resultiert. Weiterhin ist die Himmelstemperatur zu ermitteln. Diese gleicht ebenfalls der des Referenzmodells und liegt bei $T_{\text{sky}} = 256,05 \text{ K}$.

In den Abbildungen 7.33 und 7.34 werden die Wärmestromdichteverteilungen über die Bauteilbreite dargestellt. Aus den Diagrammen lässt sich erkennen, dass die Variante „16/2 °C“ insgesamt am besten abschneidet. Dabei ist die Außen- und Innenoberfläche in der Gesamtheit zu betrachten.

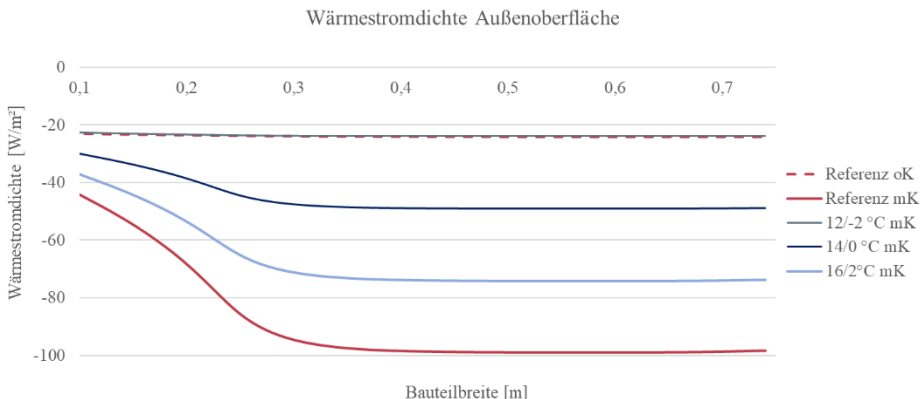


Abbildung 7.33: Wärmestromdichteverteilung Außenoberfläche - Parameter: Fluidtemperaturen

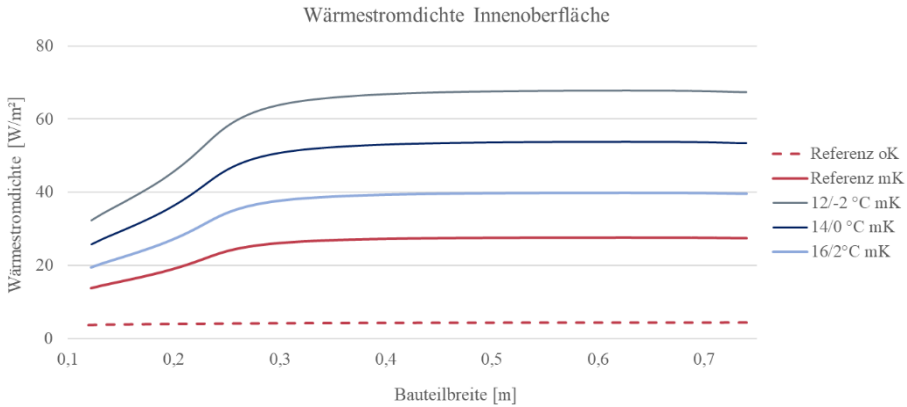


Abbildung 7.34: Wärmestromdichteverteilung Innenoberfläche - Parameter: Fluidtemperaturen

Des Weiteren zeigt sich die Korrelation zwischen der Wärmestromdichte und der Temperaturdifferenz zwischen Umgebung und Oberfläche. Bei der Variante „16/2 °C“ liegt raumseitig eine mittlere Temperaturdifferenz von $\Delta T = 4,8 \text{ °C}$ und an der Außenseite von $\Delta T = -3,5 \text{ °C}$ vor.

Tabelle 7.12 fasst die Ergebnisse der Integration dieser Wärmestromdichten über die Bauteilbreite zusammen, die den Wärmestromanteilen der drei untersuchten Temperaturpaare entsprechen. Der Wärmestrom wird hier in W/m angegeben, da die Simulation auf 2D-Ebene durchgeführt worden ist und somit die Bauteilhöhe keine Berücksichtigung gefunden hat. Die Höhe wurde jedoch rechnerisch in Tabelle 7.13 einbezogen.

Tabelle 7.12: Wärmestromanteile der thermischen Aktivierung – Parameter: Fluidtemperaturen

Wärmestromanteile für ¼ Modul [W/m]		12/-2 °C	14/0 °C	16/2 °C
\dot{Q}_i	Innerer Wärmestromanteil der thermischen Aktivierung	35,633	27,735	19,924
\dot{Q}_e	Äußerer Wärmestromanteil der thermischen Aktivierung	0,136	-14,036	-28,225
$\dot{Q}_{\text{ges,TA}}$	Gesamter Wärmestrom der thermischen Aktivierung	35,769	41,771	48,149

Diese Wärmestromanteile beziehen sich auf ein Viertel Fassadenmodul (Symmetrienausnutzung, vgl. Abschnitt 7.1.2) und werden im Zuge der Berechnung des „thermischen Nutzens“ auf ein komplettes Fassadenmodul umgerechnet.

Tabelle 7.13: Thermischer Nutzen in Form von abgeführter Wärme pro Modul – Parameter: Fluidtemperaturen

Thermischer Nutzen [W] bzw. ([W/m ²])	12/-2 °C	14/0 °C	16/2 °C
aufgenommene Wärme Innen	926,46 (71,27)	721,12 (55,47)	518,02 (39,85)
abgegebene Wärme Außen	2,45 (0,27)	-252,65 (-28,07)	-508,06 (-56,45)

*Modulfläche Innen (13 m²); Modulfläche Außen (9 m²)

Um schließlich eine Aussage zur Energieeffizienzsteigerung treffen zu können, wird das EER berechnet. Dieses gibt das Verhältnis zwischen der von der thermischen Aktivierung erzeugten Kühlleistung und der dafür aufgewendeten elektrischen Leistung der entsprechenden hydraulischen Förderpumpe an. Auch hier ist zu erkennen, dass die Variante „16/2°C“ die effizientere der untersuchten Temperaturpaare ist. Im Vergleich zum Referenzmodell jedoch, sind die Fluidtemperaturen des Referenzmodells (17,77/3,95°C) in Bezug auf die abgegebene Wärme nach Außen effizienter. Dies ist durch die größere Temperaturdifferenz zwischen der Himmelstemperatur und der Oberflächentemperatur bzw. der größeren langwelligen Emissionsstrahlung begründet.

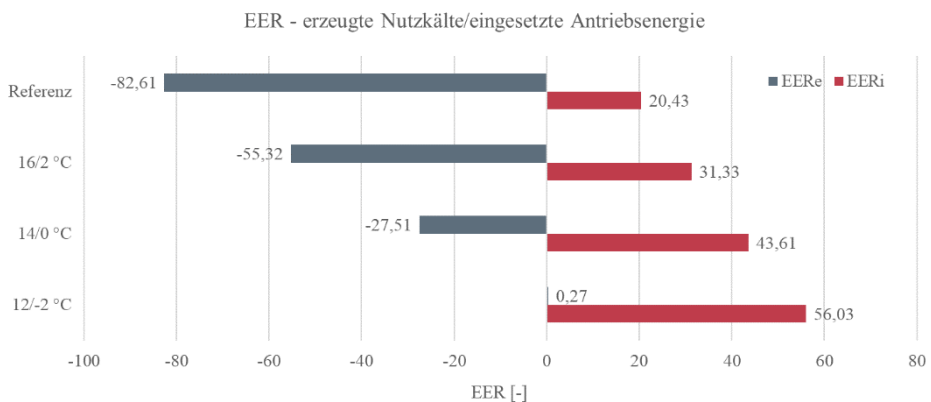


Abbildung 7.35: Energy Efficiency Ratio EER - Parameter: Fluidtemperaturen

Bei der Erforschung der Energieeffizienzsteigerung spielt nicht nur die Untersuchung der Fluidtemperaturen eine entscheidende Rolle, sondern auch der Einfluss auf die raumseitige Oberflächentemperatur. Insbesondere im Innenraum besteht durch die geringere Luftzirkulation entlang der Wand die Gefahr von Tauwasserbildung. Aus

diesem Grund wurde eine detaillierte Analyse mittels Isoplethenbetrachtung (Verhältnis zwischen Oberflächentemperatur und relativer Feuchte) durchgeführt. Aus dieser Untersuchung geht hervor, dass eine Reduzierung der Fluidtemperatur der raumseitigen Kapillarrohrmatte auf 12 °C zu Überschreitungen der LIM-Kurven I und II führt (siehe Abbildung 7.36). Die Fluidtemperaturpaare 14/0°C und 16/2°C unterschreiten hingegen die beiden zuvor genannten LIM-Kurven, sodass für die raumseitigen Kapillarrohrmatten Temperaturen von unter 14 °C bedenklich hinsichtlich eines potenziellen Schimmelpilzwachstums sind.

Isoplethen_Fluid_Innen_12°C

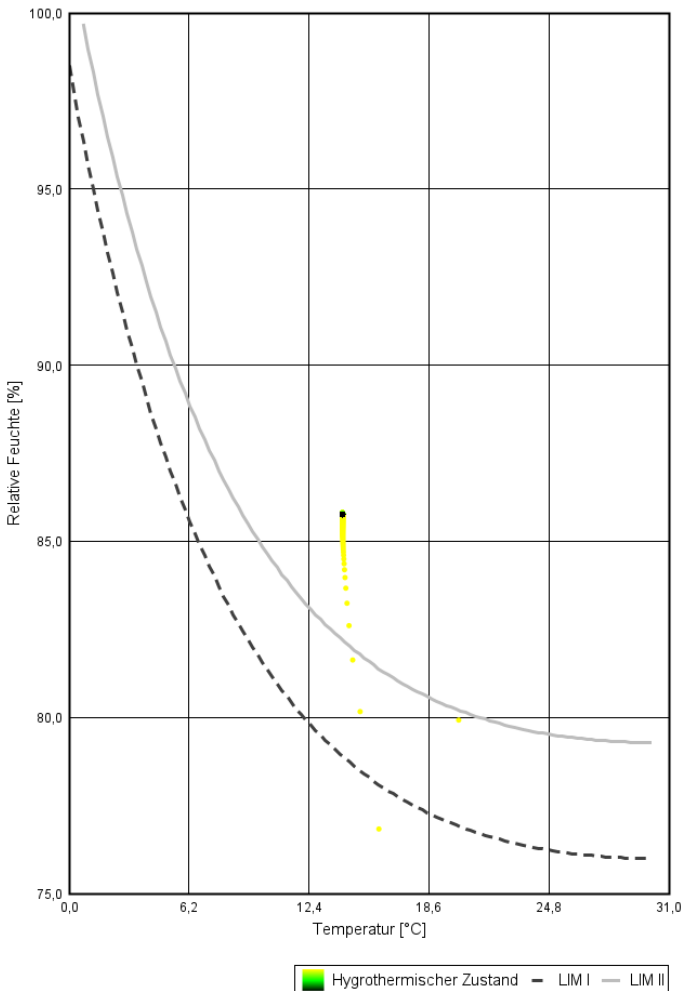


Abbildung 7.36: Isoplethenbetrachtung 12/-2°C – Parameter: Fluidtemperaturen

Zusammenfassend lässt sich aus dieser Parametervariation ableiten, dass die gewählten Fluidtemperaturen der inneren und äußeren Kapillarrohrmatten des Referenzmodells in der Gesamtbetrachtung am effizientesten sind und zu keiner Tauwasserbildung an der Innenoberfläche der Wand führen.

Wärmeübergangskoeffizient zwischen Innenwand und Raumluft

Im Rahmen dieser Parameterstudie wurden Variationen des Wärmeübergangskoeffizienten α_{Innen} zwischen der Innenwand und der Raumluft untersucht. Für das Referenzmodell wurde hierfür ein $\alpha_{\text{Innen}} = 8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ gewählt.

Der Wärmeübergangskoeffizient kann in hohen Räumen, wie beispielsweise in Industriehallen, je nach Höhenlage variieren. Dies wird durch Konvektionseffekte verursacht. Mit zunehmender Wandhöhe wird der Aufstieg warmer Luft entlang der Wandoberfläche begünstigt. Dies kann zu einer verstärkten Konvektion führen, wodurch der Wärmeübergangskoeffizient erhöht wird. Für die ETA-Fabrik wird daher im unteren Wandbereich mindestens $\alpha_{\text{Innen}} = 5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ und im oberen Bereich von $12 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ angenommen. Es ist zudem ratsam, die thermische Aktivierung in den oberen Bereichen zu positionieren, da dies zum einen dazu führt, dass Produktionsmaschinen die Wärmeübertragung durch Konvektion und Strahlung nicht beeinflussen, und zum anderen vermeidet es zusätzlichen Wartungsaufwand aufgrund möglicher Beschädigungen der Kapillarrohrmatten durch versehentliches Anbohren.

Die Veränderung des Wärmeübergangskoeffizienten α_{Innen} bewirkt eine Veränderung der Innenseite des betrachteten Systems. Es wird deutlich, dass mit einem höheren konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten insgesamt ein größeres EER erzielt wird, wie in Abbildung 7.38 veranschaulicht wird.

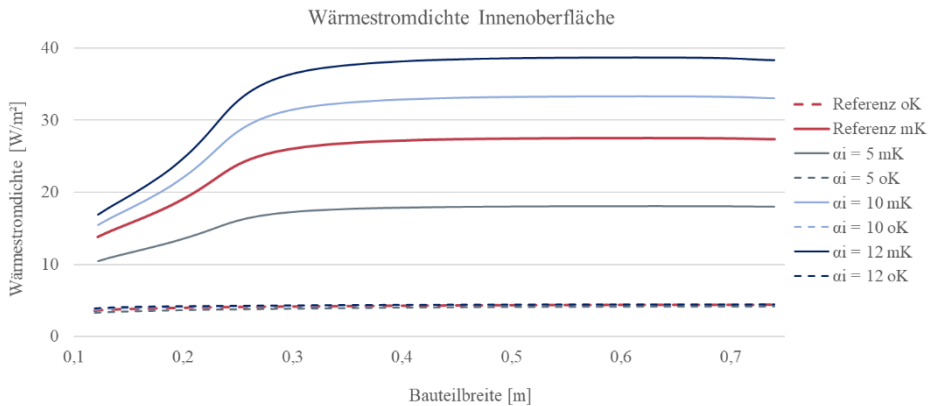


Abbildung 7.37: Wärmestromdichteverteilung Innenoberfläche - Parameter: α_{Innen}

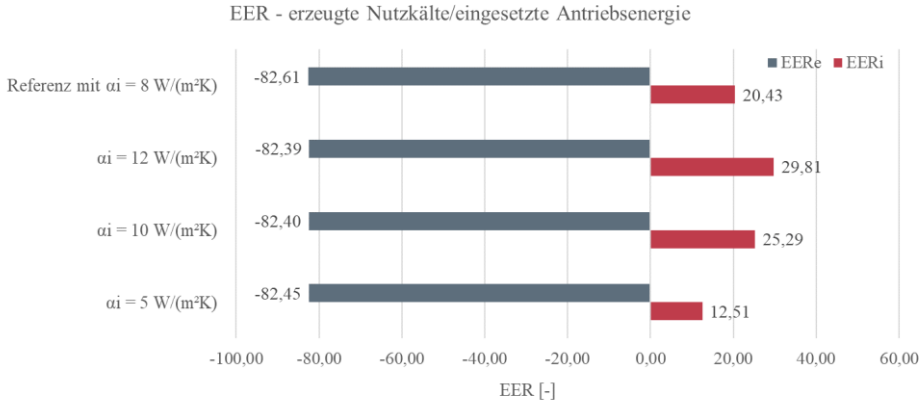


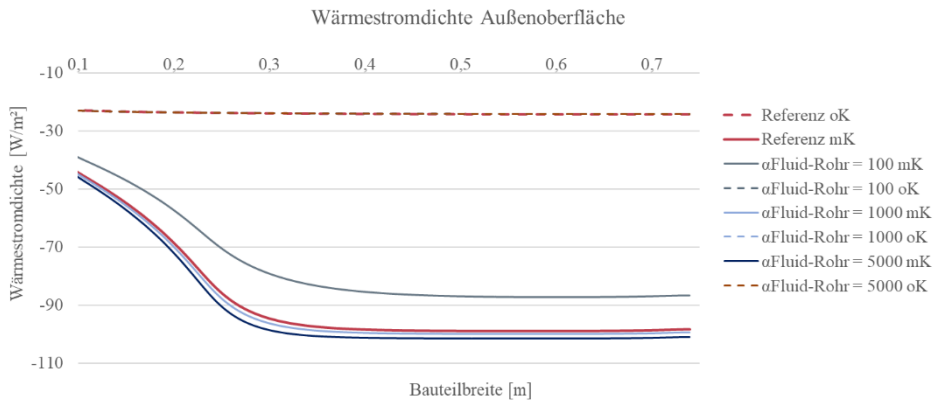
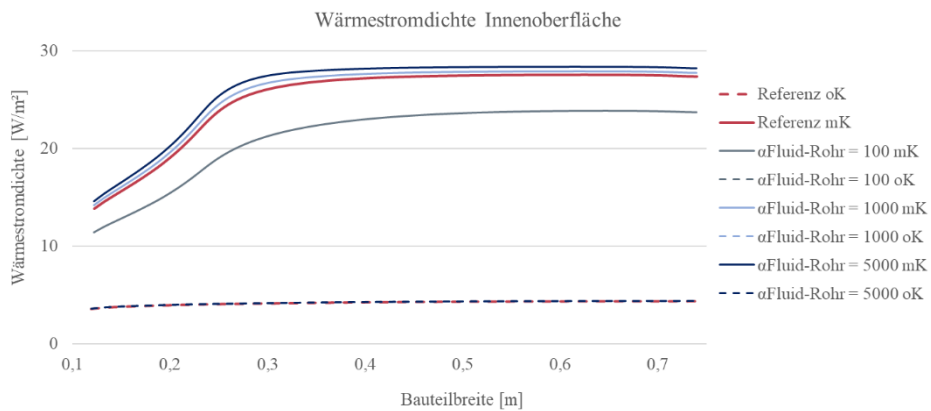
Abbildung 7.38: Energy Efficiency Ratio EER - Parameter: α_{Innen}

Die Gegenüberstellung des Energieeffizienzverhältnisses (EER) verdeutlicht den wesentlichen Einfluss des Wärmeübergangskoeffizienten auf die Kühlleistung. In der Referenzkonfiguration, in der α_{Innen} einen Wert von 8 W/(m²K) aufweist, beträgt der Energieeffizienzverhältnis $\text{EER}_i = 20,43$. Im Vergleich dazu führt ein α_{Innen} von 12 W/(m²K) zu einem EER_i von 29,81. Dies entspricht einer Verbesserung der Energieeffizienz um 31 %.

Wärmeübergangskoeffizient Fluid

Im Zuge dieser Untersuchung wurde der Wärmeübergangskoeffizient des Fluids $\alpha_{\text{Fluid-Rohr}}$ in den Rohrsystemen mit 100, 1000 und 5000 W/(m²K) variiert, woraus die Auswirkungen unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeiten auf den Wärmetransport beurteilt werden können. Für den Referenzfall ließ sich ein $\alpha_{\text{Fluid,Innen}} = 574$ W/(m²K) und $\alpha_{\text{Fluid,außen}} = 565$ W/(m²K) berechnen, was einer laminaren Strömung entspricht. Mit den Werten 100 und 1000 W/(m²K) wird weiterhin von einer laminaren Strömung ausgegangen. Gemäß VDI-Wärmeatlas (Gnielinski, 2013) wird angenommen, dass erst bei einem Wärmeübergang von 2.200 W/(m²K) eine turbulente Strömung vorliegt.

Anhand der Abbildungen 7.38 und 7.39 lässt sich erkennen, dass zwischen dem Referenzmodell und den Werten von 1000 und 5000 W/(m²K) nur geringe Unterschiede bestehen. Die Veränderungen in der Leistung sind minimal und zeigen kaum signifikante Abweichungen. Es scheint, dass der Wärmeübergangskoeffizient in diesem Bereich wenig Einfluss auf die Wärmeabgabe bzw. -aufnahme hat. Allerdings zeigt sich ein erkennbarer Unterschied, wenn der Wärmeübergangskoeffizient auf einen sehr niedrigen Wert von 100 W/(m²K) gesetzt wird. In diesem Fall ist eine deutliche Verschlechterung der Wärmestromdichte um etwa 15 W/m² zu beobachten.

Abbildung 7.39: Wärmestromdichteverteilung Außenoberfläche - Parameter: $\alpha_{\text{Fluid-Rohr}}$ Abbildung 7.40: Wärmestromdichteverteilung Innenoberfläche - Parameter: $\alpha_{\text{Fluid-Rohr}}$

Bei einer nahezu Verdopplung des Ausgangswerts von 565 auf 1000 ergibt sich eine Verbesserung um etwa 1,9 %. Wenn der Wert jedoch um fast das Fünffache von 565 auf 5000 erhöht wird, beträgt die Verbesserung etwa 4,3 %. Aus diesen Ergebnissen lässt sich ableiten, dass keine wesentliche Verbesserung erzielt wurde. Interessanterweise führt eine Reduzierung um fast das Fünffache wiederum zu einer erheblichen Verschlechterung von 18,4 %. Dies weist darauf hin, dass das Verhältnis zwischen dem Wärmeübergangskoeffizienten und der Energieeffizienz exponentiell ist. Es gibt eine Verbesserung bis zu einem bestimmten Punkt, in diesem Fall bis zu einem Wert von 500. Danach bildet sich ein Plateau, auf dem keine wesentliche Verbesserung der Energieeffizienz mehr zu verzeichnen ist. Diese Schlussfolgerungen gelten sowohl für die Betrachtung der

Außenseite als auch für die Innenseite. Es ist daher nicht sinnvoll, den Volumenstrom zu erhöhen, da dies keine Auswirkungen auf die Energieeffizienz ausüben würde.

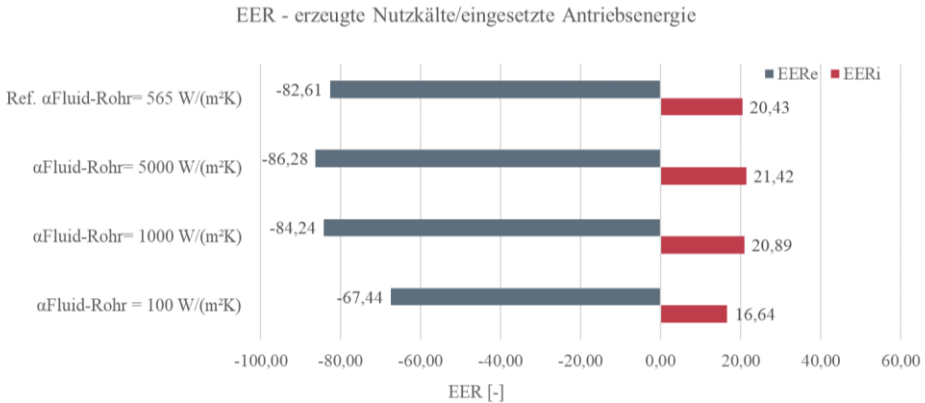


Abbildung 7.41: Energy Efficiency Ratio EER - Parameter: α_{Fluid}

Luftwechselrate der Luftschicht

Für die Durchführung der Parameterstudie wurden Luftwechselraten im Rahmen der von (Hauswirth und Kehl, 2010) vorgeschlagenen Werte ausgewählt. Dabei reichen die angesetzten Luftwechselraten von 0 h^{-1} , um eine ruhende Luftschicht darzustellen, bis hin zu einer Luftwechselrate von 20 h^{-1} für stark belüftete Luftschichten. Zusätzlich werden Zwischenwerte von 10 h^{-1} und 15 h^{-1} untersucht.

Die in dieser Parameterstudie angesetzten Klimarandbedingungen entsprechen dem Messtag im März 2018. In diesem Fall liegen winterliche Außentemperaturen vor, aus denen insbesondere in den Nachtstunden, wie hier betrachtet, nur geringe Wärmeeinträge über Strahlung und Konvektion an der Innenseite der vorgehängten Betonschale zu erwarten sind. Dieser geringe Wärmeeintrag resultiert aus der geringen Temperaturdifferenz zwischen der durch die Kapillarrohrmatten erwärmten Betonoberfläche und dem Temperaturniveau der Luftschicht. Mit den nachstehenden Abbildungen wird dies deutlich. Die gewählten Luftwechselraten üben keinen Einfluss auf die Wärmestromdichteverteilungen bzw. Kühlleistungen der ETA-Fassade aus. Die Verläufe der Wärmestromdichten über die Breite des Bauteils weisen eine nahezu identische Charakteristik zum Referenzmodell auf.

Die primäre Funktion einer Hinterlüftung liegt jedoch nicht in der gezielten Beeinflussung der Wärmeübertragung. Die Hinterlüftungsschicht hat den Zweck, sicherzustellen, dass Wasser, das in den Hinterlüftungsraum gelangt, keine unzulässige Feuchtebelastung in den dahinterliegenden Schichten verursacht. Das Wasser muss abgeführt werden, um Schäden und Feuchteprobleme zu vermeiden. Es ist jedoch anzumerken, dass auch Fassaden, die nicht hinterlüftet sind, aber dennoch eine Luftschicht

aufweisen, unter bestimmten Bedingungen ausreichend gut trocknen können. Dies gilt insbesondere dann, wenn ein hoher Fugenanteil vorhanden ist, der den Feuchtetransport und die Luftzirkulation begünstigt. In solchen Fällen kann die Luftschicht als zusätzlicher Feuchtepuffer dienen und die Trocknung der Fassade unterstützen.

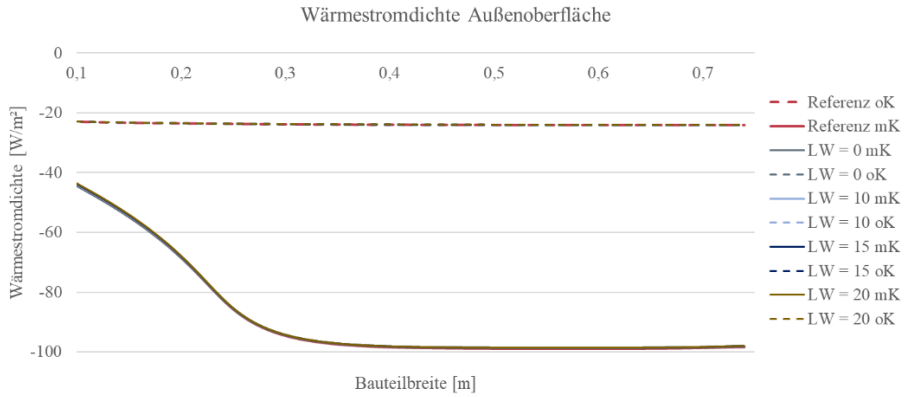


Abbildung 7.42: Wärmestromdichteverteilung Außenoberfläche - Parameter: Luftwechsel Luftschicht

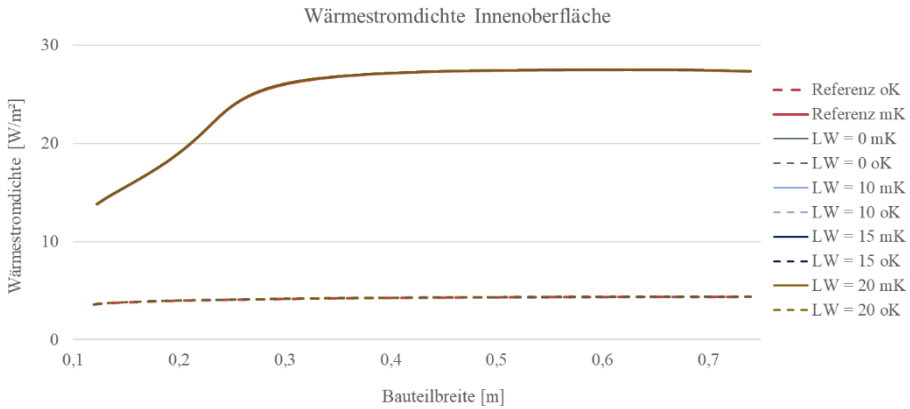


Abbildung 7.43: Wärmestromdichteverteilung Innenoberfläche - Parameter: Luftwechsel Luftschicht

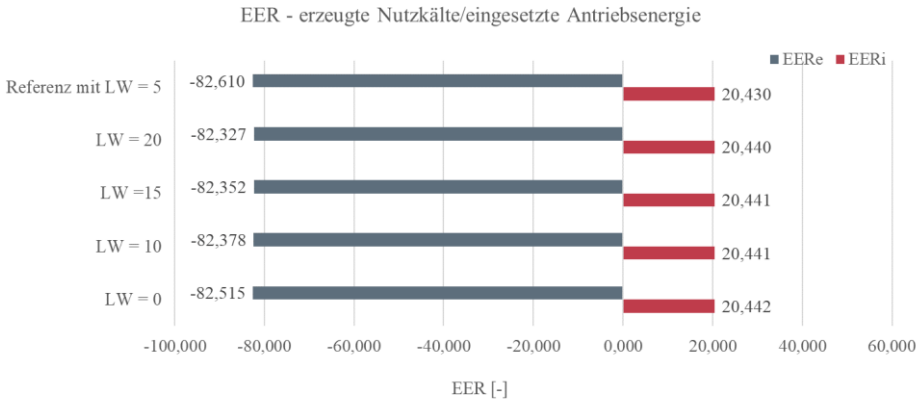


Abbildung 7.44: Energy Efficiency Ratio EER - Parameter: Luftwechsel Luftschicht

Um nun die Feuchtebelastung der unterschiedlichen Luftwechselraten beurteilen zu können, werden die Simulationsergebnisse zur relativen Feuchte sowie die IsoPLEthen sowohl innerhalb der Luftschicht als auch innerhalb der Dämmebene herangezogen. Aus den Ergebnissen wird klar, dass ein erhöhter Luftwechsel tatsächlich zu einer Reduzierung der Feuchtebelastung führt. Im Vergleich zur Referenzvariante mit einem Luftwechsel von 5 h^{-1} ist in einer ruhenden Luftschicht ein Anstieg der relativen Feuchte um etwa 6 % zu verzeichnen. Allerdings zeigen sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den Luftwechselraten von 5 bis 20 h^{-1} in Bezug auf die Feuchtigkeitswerte innerhalb der Luftschicht. Der Feuchteeintrag in die Dämmschicht hängt von der Feuchtebelastung der Luftschicht ab. Im Vergleich zur Referenzvariante zeigt die ruhende Luftschicht einen um 4,6 % höheren Feuchteeintrag innerhalb der Dämmschicht.

In den warmen Sommermonaten offenbart sich eine gegensätzliche Verhaltensweise: Es ist weniger Feuchte in der Luftschicht vorhanden, doch dafür steigt die Feuchtebelastung an der Dämmschicht deutlich an. Die Ursache dafür liegt in der feucht-wärmeren Außenluft, die eine größere Menge an Wasserdampf enthält im Vergleich zur kühleren Raumluft. Die Umkehrdiffusion tritt als Konsequenz auf. Während im Winter der Wasserdampf vom Innenraum nach außen diffundiert, geschieht im Sommer das Gegenteil. Die warme und feuchte Luft dringt von außen in das Bauteil ein und kondensiert an den inneren, kalten Schichten. Dieser Prozess führt zur Bildung von Tauwasser. Da die Dämmschicht kälter ist als die durch den Luftwechsel zugeführte feucht-warme Außenluft, kann dort die Feuchtigkeit zu Tauwasser kondensieren.

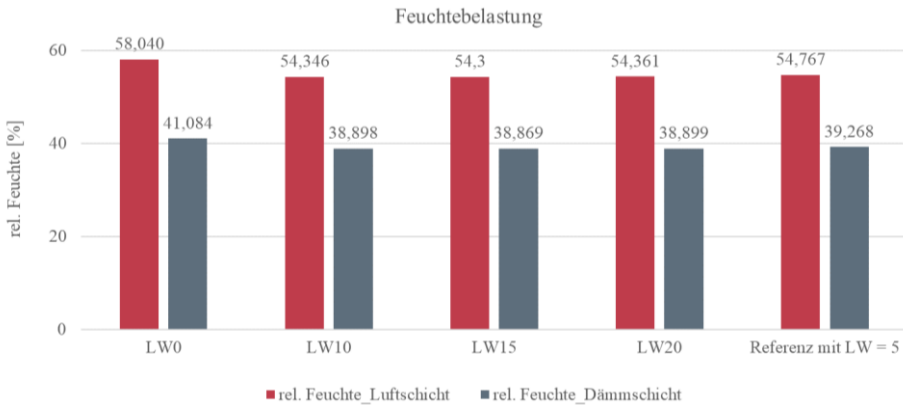


Abbildung 7.45: Feuchtebelastung März 2018 - Parameter: Luftwechsel Luftschicht

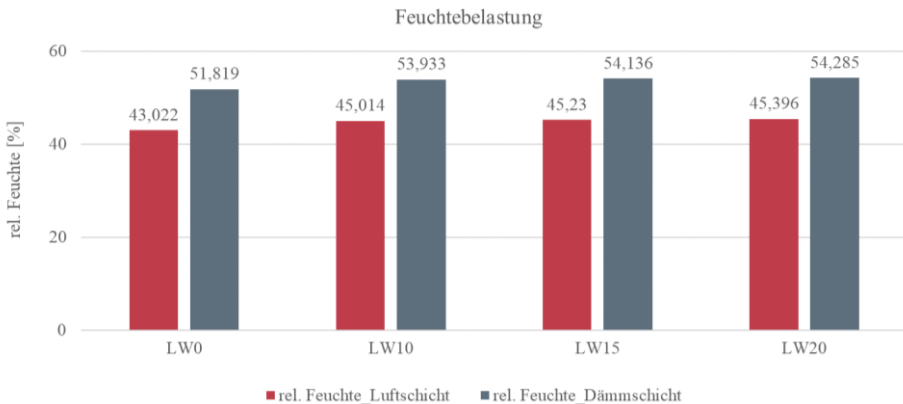


Abbildung 7.46: Feuchtebelastung Juli 2018 - Parameter: Luftwechsel Luftschicht

Die aktuelle Gesetzgebung schreibt die Bauteildimensionierung für den Winterfall vor, sodass die innenliegenden Schichten diffusionsdicht und die außenliegenden diffusionsoffen ausgebildet werden. Damit wird sichergestellt, dass Wasserdampf nicht in das Bauteil eindringen kann und gleichzeitig schnell auf der Außenseite ausdringen kann.

7.2.2.2 Geometrische Parameter

Rohrüberdeckung

In der vorliegenden Untersuchung werden die Auswirkungen der Überdeckungsstärke auf den Wärmetransport in zwei Varianten analysiert: eine Rohrüberdeckung von 10 mm und von 35 mm. Die Untersuchung konzentriert sich dabei ausschließlich auf die Innenseite der ETA-Fassade, da laut Angaben des Herstellers Ducon eine noch geringere

Überdeckung der außenliegenden Kapillarrohrmatte aus konstruktiven Gründen nicht möglich wäre. Die Überdeckung an der Außenseite liegt bei 25,3 mm. Im Vergleich dazu beträgt die Rohrüberdeckung im Referenzmodell auf der Innenseite 17,8 mm.

Die Abbildungen 7.46 und 7.47 zeigen den Einfluss der Rohrüberdeckung auf die Wärmeübertragung. Bei einer Reduzierung der Rohrüberdeckung um 7,8 mm im Vergleich zum Referenzmodell ergibt sich eine Verbesserung von 8,73 %. Interessanterweise zeigt sich eine Verbesserung um 1,42 % bei einer Vergrößerung der Rohrüberdeckung auf 35 mm. Dies ist auf eine höhere Wärmestromdichteverteilung in den ersten 15 cm des Stegbereichs zurückzuführen, worin keine Rohre verbaut sind (siehe linker Bereich der Abbildung 7.47). Die Wärmeleitung der „Kälte“ erfolgt hier konstanter und über einen längeren Weg. Dadurch kann mehr Masse (Beton) noch vor der radiativen und konvektiven Wärmeübertragung an der Oberfläche aktiviert werden. Der Stegbereich neben der Rohrmatte nimmt somit mehr "Kälte" auf und kann in diesem Bereich mehr Wärme aus dem Raum aufnehmen. Mit zunehmender Schichtdicke nimmt die Anzahl der Moleküle entlang des Wärmeleitungspfades zu.

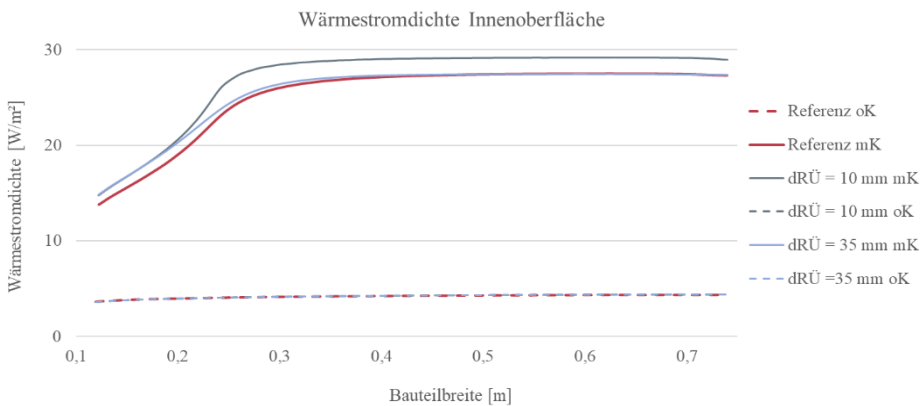


Abbildung 7.47: Wärmestromdichteverteilung Innenoberfläche - Parameter: Rohrüberdeckung

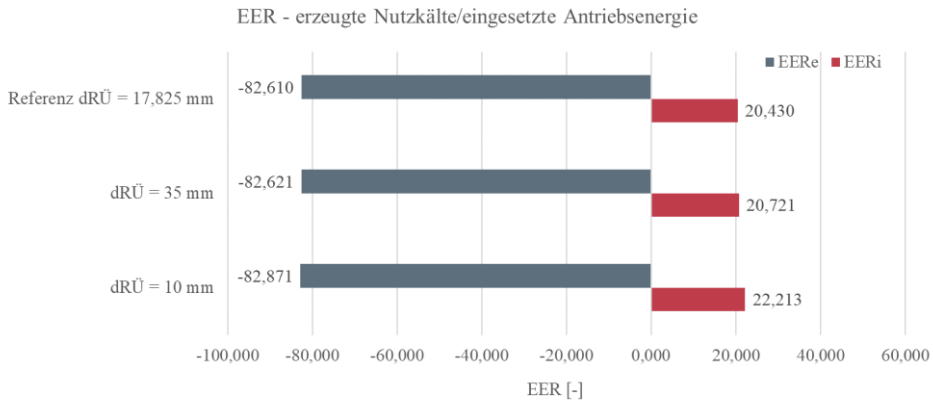
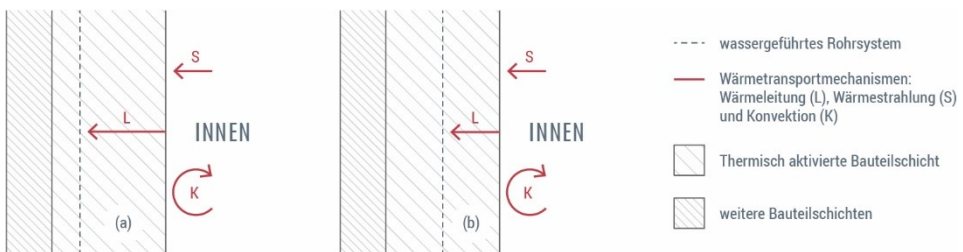


Abbildung 7.48: Energy Efficiency Ratio EER - Parameter: Rohrüberdeckung

Dieser Nebeneffekt wirkt sich auch im Bereich der Kapillarrohrmatte aus. Die Wärmestromverteilung der Rohrüberdeckung mit 35 mm gleicht in diesem Bereich dem Verlauf des Referenzmodells. Bei einer stärkeren Betonüberdeckung erhöht sich die Widerstandsfähigkeit gegenüber dem Wärmefluss. Die wirksame Wärmespeicherefähigkeit der dickeren Betonschicht (sog. Trägheit des Betons) führt zu einer deutlich gedämpften Wärmeaufnahme an der Oberfläche. Wärme aus dem Raum gelangt bei einer 35 mm Überdeckung somit langsamer in das Bauteilinnere, wodurch die Oberflächentemperatur niedriger ist als mit einer Überdeckung von 17,8 mm. Dies resultiert aus dem höheren Wärmetransportanteil durch Wärmeleitung (siehe Abbildung 7.49).



(a) weist einen größeren Wärmedurchlasswiderstand $R = \frac{d}{\lambda} \left[\frac{m^2K}{W} \right]$ auf als (b), woraus eine verzögerte Wärmeaufnahme resultiert.

Abbildung 7.49: Verzögerter Wärmetransport - Parameter: Rohrüberdeckung

Rohrsystemdimensionierung

Eine weitere geometrische Untersuchung wird durch die Anpassung der inneren und äußeren Rohrsysteme erreicht. Dabei werden der Innendurchmesser, die Manteldicke der Rohre, der Abstand zwischen den Rohren und auch das Rohrmaterial variiert. Beide Systeme werden nach wie vor in Beton eingebettet.

Für die erste Variante wurde ein weiteres Kapillarrohrsystem des Herstellers Beka Heiz- und Kühlmatten GmbH, Kapillarrohrmatte Typ P.VS20 (BeKa Heiz- und Kühlmatten GmbH, 2021b), herangezogen, wodurch im simulierten Fassadenteil auf der Innen- und Außenseite jeweils 19 Rohre zu finden sind. Diese Variante weist folgende geometrische Eigenschaften auf:

- Innendurchmesser: 4,5 mm
- Manteldicke: 0,8 mm
- Rohrabstand: 20 mm
- Material: Polypropylen

Die zweite Anpassung der Rohrsystemdimensionierung beschreibt eine Kupferverrohrung des Herstellers Beka Heiz- und Kühlmatten GmbH (Kupfermäander Typ C.M10.65.n.L.080.aa ohne WLP).

- Innendurchmesser: 10 mm
- Manteldicke: 0,6 mm
- Rohrabstand: 80 mm
- Material: Kupfer

Durch den größeren Rohrabstand und Durchmesser können in einem ¼-Fassadenmodul sechs Rohre, jeweils an der Innen- und Außenseite, verlegt werden.

Aus den Abbildungen 7.49 und 7.50 lässt sich ablesen, dass das Kapillarrohrsystem Typ P.VS20 an der Innenoberfläche weniger Energie aufnimmt als die Referenzvariante. Jedoch ist es in der Lage, außen mehr Energie abzugeben als das Referenzsystem. Dies liegt an der höheren Oberflächentemperatur an der Außenseite, woraus sich eine größere langwellige Bauteilemission ergibt, die einen großen Einfluss auf die langwellige Strahlungsbilanz besitzt. Die höhere Oberflächentemperatur resultiert aus der Kombination mehrerer Faktoren. Zum einen führt die Reduzierung der Anzahl der Rohre pro Modul zu einer höheren mittleren Strömungsgeschwindigkeit pro Rohr bei gleichbleibendem Gesamtvolumenstrom. Zum anderen führt die Verwendung größerer Rohrdurchmesser zu einer Reduktion der Fluidgeschwindigkeit und einer kleineren Reynoldszahl. Dadurch wird der Wärmeübergangskoeffizient zwischen Fluid und Rohr verringert. Der Wärmeübergangskoeffizient beläuft sich für die Innenseite auf $\alpha_{\text{Fluid}} = 429,06$ und $\alpha_{\text{Fluid}} = 421,24$ für die Außenseite. Da der übertragene Wärmestrom

proportional zur Temperaturdifferenz zwischen Rohrmantel/Fluid sowie zum Wärmeübergangskoeffizienten ist, ist hier mit einem geringeren Wärmestrom zu rechnen, sodass der Abkühlprozess „verlangsamt“ wird.

Die Kupfervariante weist im Vergleich dazu Temperaturwelligkeiten auf, die durch die größeren Abstände zwischen den Rohren sichtbar werden. Aufgrund dieser größeren Abstände verfügt diese eine um 31 % kleinere wärmeübertragende Fläche, was zu einer geringeren Wärmeaufnahme und -abgabe führt. Zudem verfügt die Kupfervariante einen um das 3-Fache größeren Innendurchmesser, woraus sich kleinere Wärmeübergangskoeffizienten an der Innen- und Außenseite ($\alpha_{\text{Fluid}} = 202,33$ (Innen) und $\alpha_{\text{Fluid}} = 193,06$ (Außen)) ergeben.

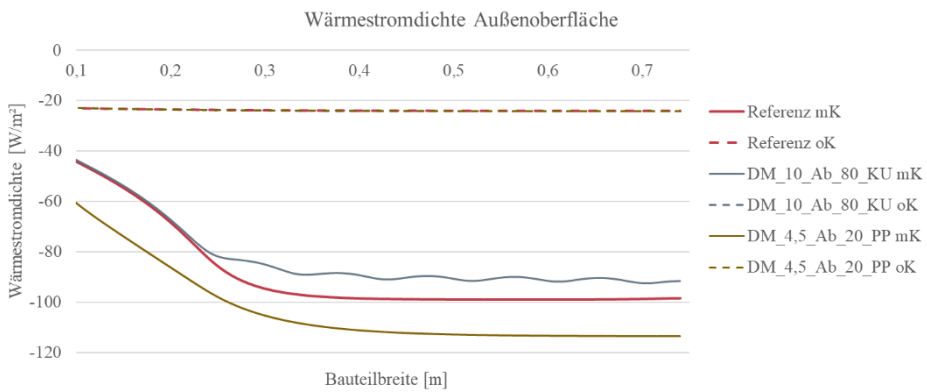


Abbildung 7.50: Wärmestromdichteverteilung Außenoberfläche - Parameter: Rohrsystem

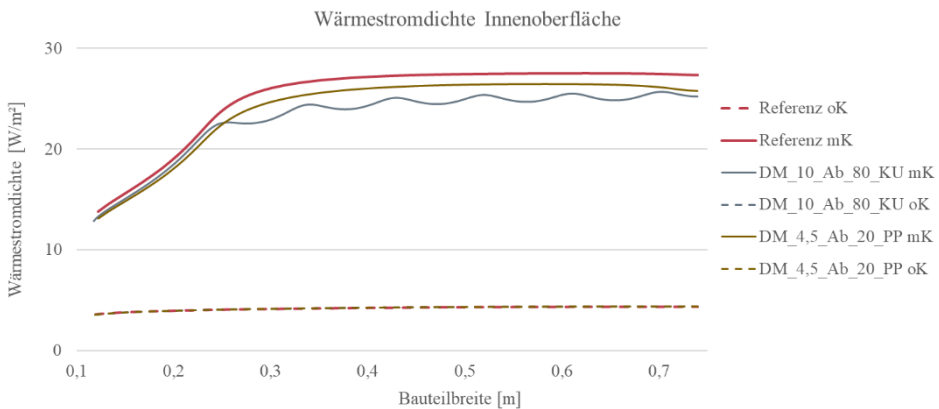


Abbildung 7.51: Wärmestromdichteverteilung Innenoberfläche - Parameter: Rohrsystem

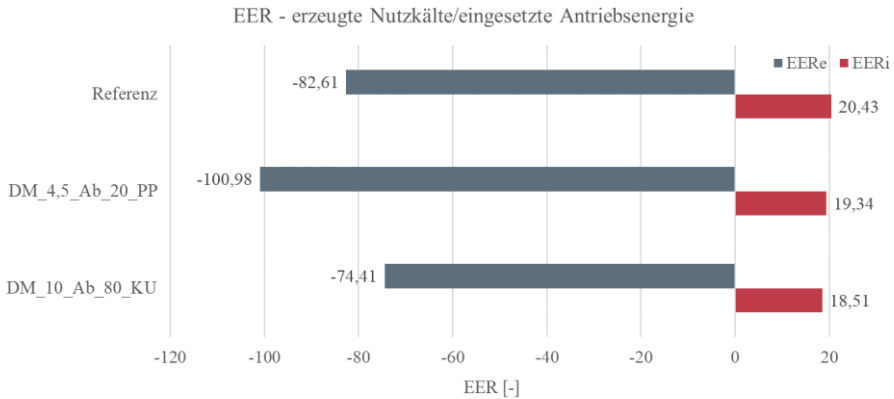


Abbildung 7.52: Energy Efficiency Ratio EER - Parameter: Rohrsystem

Außenliegende Oberflächenstruktur

Im Rahmen dieser Parametervariation wurde die rillenförmige Oberflächenstruktur der außenliegenden Betonschale aus UHPC auf den Einfluss auf die Wärmeübertragung untersucht. Mit den vertikal angeordneten Rillen sollte das raumseitige Rippenmuster, das aus den statisch erforderlichen PI-Platten resultiert, aufgegriffen werden (siehe Abschnitt 7.1.3.3). Die Rillen weisen U-förmige Erhebungen mit einem Durchmesser von 10 mm auf. In Abbildung 7.53 wird deutlich, dass eine solche Rippenform keinen wesentlichen Einfluss auf die Wärmeübertragung hat. Die Wärmestromdichte verteilt sich heterogen was sich aus der vorliegenden und zu erwartenden Temperaturwelligkeit ergibt. An der Außenoberfläche sind im Vergleich zur Referenzvariante (glatte Oberfläche) Temperaturdifferenzen von 0,097 bis -2,150 °C vorhanden. Dies ist in diesem Fall, Betrachtung der außenseitigen Betonschale, als unkritisch zu betrachten. Prinzipiell ist eine geringe Temperaturwelligkeit aufgrund der erzielbaren Behaglichkeit in einem Raum anzustreben. D.h. eine Temperaturwelligkeit ist lediglich raumseitig und auf Höhe der im Raum befindlichen Personen kritisch zu hinterfragen. Aber auch da wäre die hier vorliegende Temperaturwelligkeit durch die kurze Periodenlänge, die sich aus den relativ kleinen Erhebungen bzw. Durchmesser der einzelnen Rillen ergibt, als unkritisch zu bewerten.

Die Energieeffizienz bzw. das EER beschreibt einen positiven Einfluss der Rillenstruktur. Dies ergibt sich durch die größere wärmeübertragende Fläche der rillenförmigen Oberfläche.

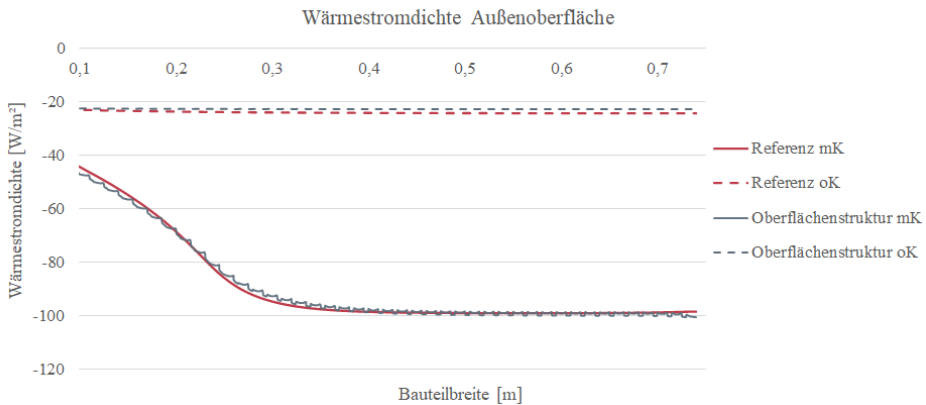


Abbildung 7.53: Wärmestromdichteverteilung Außenoberfläche - Parameter: Oberflächenstruktur

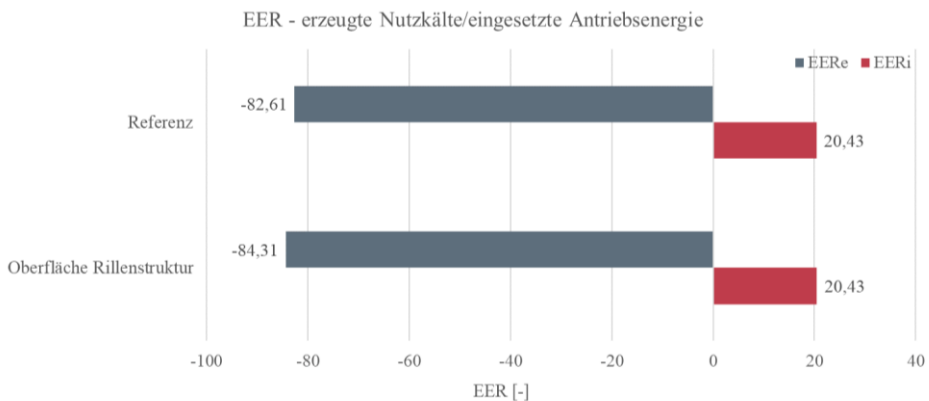


Abbildung 7.54: Energy Efficiency Ratio EER - Parameter: Oberflächenstruktur

7.2.2.3 Materialspezifische Parameter

Trägermaterial

Im Rahmen der Untersuchungen zur Parametervariation der Rohrsystemdimensionierung werden zusätzlich Varianten mit alternativen Trägermaterialien an der Innenseite betrachtet. Im ersten Fall werden die Kupferrohrsysteme in Wärmeleitprofile geklemmt und auf einer hinterlüfteten Gipskartonplatte montiert. Diese Konfiguration ermöglicht die direkte Weiterleitung von Wärme von den Rohren in die Wärmeleitprofile, die dann eine größere Übertragungsfläche zur Verfügung stellen. Die zweite Abwandlung hingegen stellt eine

in Putz integrierte Kapillarrohrmatte dar. Diese beiden Varianten eröffnen unterschiedliche Ansätze zur Integration der Rohrsysteme in unterschiedliche Trägermaterialien und erweitern somit die Untersuchungsmöglichkeiten im Hinblick auf die Wärmeübertragungseigenschaften.

Die Kupferrohrvariante mit Wärmeleitprofilen eignet sich besonders gut für den Bestand, da sie eine nachträgliche Anwendung von thermischer Aktivierung ermöglicht. Allerdings geht aufgrund der konstruktiv bedingten Hinterlüftung und dem Einsatz von Gipskarton trotz der sehr guten Wärmeleitfähigkeit der Wärmeleitprofile Kühlleistung verloren (siehe Abbildung 7.55). Im Vergleich zum Referenzmodell weist diese Konstruktionsweise eine um ca. 27 % niedrigere EER_i (vgl. Abbildung 7.56).

Bei der Betrachtung der Putzvariante fällt auf, dass sie eine erhöhte Temperaturwelligkeit aufweist, was zu einer ungleichmäßigen Verteilung des Wärmestroms und somit auch zu Behaglichkeitseinbußen (im Industriesektor weniger relevant) führt. Diese Unregelmäßigkeiten können auf die spezifischen Eigenschaften des Trägermaterials, nämlich des Putzes, zurückgeführt werden. Der Putz besitzt eine geringere Rohdichte, was wiederum zu einer verringerten Wärmeleitung führt. Dadurch wird das EER_i gegenüber der Referenz um etwa 5 % reduziert.

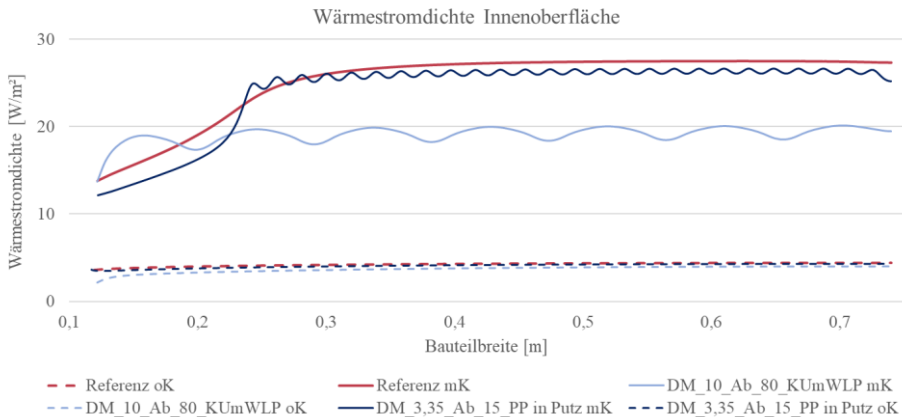


Abbildung 7.55: Wärmestromdichteverteilung Innenoberfläche - Parameter: Trägermaterial

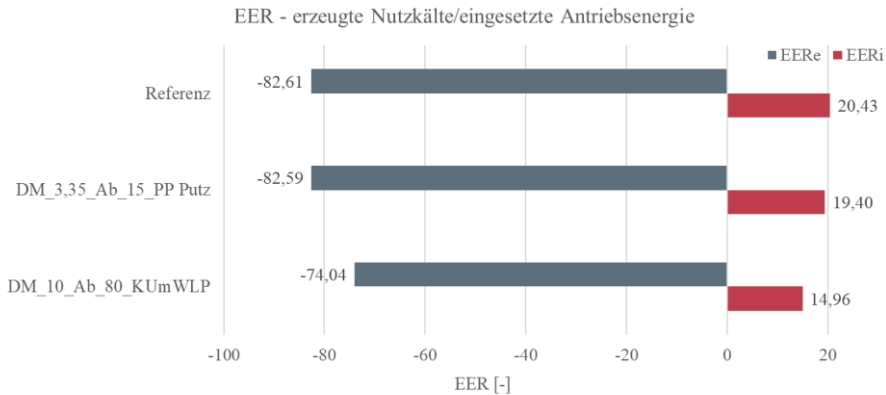


Abbildung 7.56: Energy Efficiency Ratio EER - Parameter: Trägermaterial

PCM-Gemische

Durch die Integration von PCM in der Fassadenkonstruktion, kann die thermische Trägheit der Fassade verbessert werden. Das bedeutet, dass die Fassade in der Lage ist, mehr Wärmeenergie aufzunehmen und zu speichern. Allerdings ist aufgrund der täglichen und saisonalen Temperaturschwankungen sowie Strahlungsintensitäten der Sonne von einem Einsatz an der außenliegenden Seite abzuraten. Dies reduziert die Performance des PCMs über die Zeit. Auch unter Berücksichtigung, dass bei Fassaden von einer technischen Lebensdauer von mindestens 50 Jahren ausgegangen wird, ist der Einsatz von PCM hier nicht zu empfehlen, da dies die Funktionalität und somit die Lebensdauer reduzieren würde. Diese Zeitspanne berücksichtigt die durchschnittliche Lebensdauer von Gebäuden sowie die erwartete Nutzungsdauer der Fassadenmaterialien. Die raumseitige Fassade unterliegt keinen stark wechselnden Umweltbedingungen, wodurch die Anwendung von PCM hier zielführend ist.

Im Zuge dieser Parameterstudie sollen drei PCM-Gemische bewertet werden: PCM-Beton, PCM-Gipskarton und PCM-Putz. Dabei wird in allen Fällen ein PCM-Volumenanteil von 30 Vol.-% angesetzt. Für die Simulation wurde der gleiche Betriebsplan zum Ein- und Ausschalten der thermischen Aktivierung festgelegt, wie bei der Ermittlung des Wärmespeichervermögens des Referenzmodells:

- Zeitschritt: 3600 s
- Fluidtemperatur im eingeschalteten Zustand: $T_{\text{Fluid}} = 16 \text{ °C}$ (bedingt durch Phasenwechseltemperatur des PCMs)
- Fluidtemperatur im ausgeschalteten Zustand: $T_{\text{Fluid}} = 20 \text{ °C}$

PCM-Beton:

Das Referenzmodell der ETA-Fassade weist raumseitig als Trägermaterial „Normalbeton“ auf. Beton verfügt insbesondere aufgrund der hohen Rohdichte und Wärmeleitfähigkeit über eine gute Wärmespeicherfähigkeit. Allerdings kann diese Eigenschaft durch die Integration von PCM optimiert werden, was Gegenstand dieser Untersuchung ist.

Bei der PCM-integrierten Variante ist die bereits im Abschnitt 7.1.3.3 beschriebene effektive Wärmekapazität sowie die effektive Rohdichte zur Ermittlung der Masse anzusetzen. Während Beton eine konstante spezifische Wärmekapazität von 850 J/kgK aufweist, kann durch Zugabe von PCM eine um ein Vielfaches größere temperaturabhängige effektive Wärmekapazität erreicht werden (siehe Abbildung 7.57). Der Latentwärmeeffekt ist hier zwischen 15 und 19 °C deutlich zu erkennen. Bei 17 °C erreicht das PCM-Beton-Gemisch die höchste Wärmekapazität mit 15.265 J/kgK, das nahezu 18-fache im Vergleich zum reinen Beton. Weiterhin ist bei der Bestimmung des Energiegehalts bzw. des Wärmespeichervermögens die effektive Rohdichte des Gemisches zu berücksichtigen. Diese liegt bei 1.944 kg/m³.

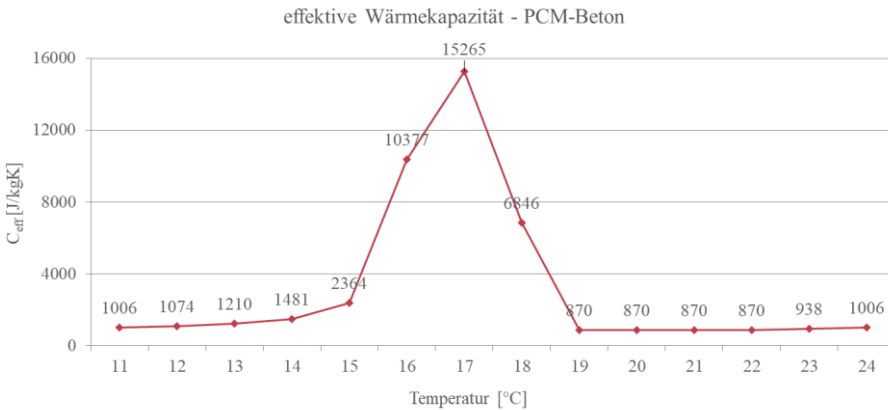


Abbildung 7.57: Effektive Wärmekapazität PCM-Beton - Parameter: PCM-Gemische

Abbildung 7.58 beschreibt das Wärmespeichervermögen des PCM-Beton-Gemischs unter den zuvor beschriebenen Randbedingungen und ab dem Zeitpunkt, ab dem die thermische Aktivierung für 1000 h eingeschaltet worden ist. Der „zackige“ Kurvenverlauf entsteht durch den Wechsel der effektiven Wärmekapazität bei ganzzahligen Temperaturänderungen, z.B. nach etwa 10 h von 17,01 °C auf 16,99 °C. In diesem Bereich fällt der Energieinhalt von 8732 auf 8365 Wh/m.

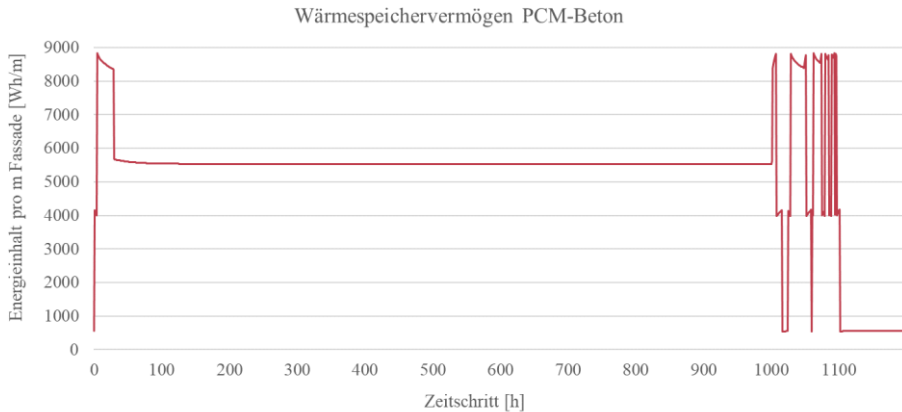


Abbildung 7.58: Wärmespeichervermögen PCM-Beton - Parameter: PCM-Gemische

Zur besseren Bewertung des Kurvenverlaufs, stellt Abbildung 7.59 ein Auszug ab Stunde 1000 nach dem Ausschalten der thermischen Aktivierung dar. Hierbei werden alle Aktivierungszeiträume grau hinterlegt.

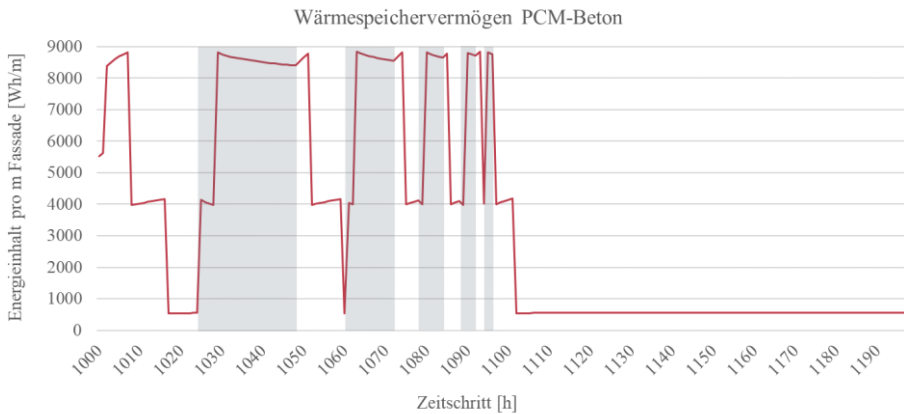


Abbildung 7.59: Wärmespeichervermögen PCM-Beton (Auszug) - Parameter: PCM-Gemische

Ab Stunde 1024 wird die thermische Aktivierung eingeleitet und die Fluidtemperatur auf 16 °C festgelegt. In diesem Zeitintervall wurde nach 6 Stunden die maximale Differenz des Energieinhalts mit einem Wert von 8.207 Wh/m erreicht, wobei der höchste Peak bei 8.762 Wh/m lag. Nachstehend sind die Ergebnisse der weiteren Aktivierungszeiträume aufgelistet:

- Zeitraum_{thermAkt} 12 h: nach 4 h max. Δ Energieinhalt = 8.247 Wh/m
- Zeitraum_{thermAkt} 6 h: nach 2 h max. Δ Energieinhalt = 4.818 Wh/m
- Zeitraum_{thermAkt} 4 h: nach 2 h max. Δ Energieinhalt = 4.768 Wh/m
- Zeitraum_{thermAkt} 2 h: nach 1 h max. Δ Energieinhalt = 4.795 Wh/m

Die max. Energieinhalte nehmen mit geringer werdenden Aktivierungszeiträumen stetig ab. Dies liegt tatsächlich weniger an der Dauer der Aktivierung, sondern vielmehr an dem vorgelagerten Zeitraum der Deaktivierung. Bei stetig kürzer werdenden Phasen der Deaktivierung, bleibt dem Baustoff somit auch weniger Zeit zum Regenerieren bzw. Einpendeln der Baustofftemperatur. D.h. die nachfolgenden Aktivierungsphase beginnt mit einer niedrigeren Baustofftemperatur, wodurch die max. zu beurteilende Differenz des Energieinhalts stufenweise abnimmt. Daraus lässt sich ableiten, dass bei der Entwicklung einer Regelstrategie zur thermischen Aktivierung die Deaktivierungszeit als wesentlicher Faktor berücksichtigt werden sollte. Dies ist auch stark von der zu aktivierenden Masse abhängig. Ist eine hohe Masse vorhanden (bestimmt durch die Rohdichte und das Volumen bzw. Fläche), so spielt die Regenerationsdauer eine relevante Rolle. Ist lediglich eine geringe Masse vorhanden, wie in den zwei folgenden PCM-Varianten der Fall, so ist die Dauer der Deaktivierung nicht wesentlich.

Um das PCM-Gemisch hinsichtlich der thermischen Speicherfähigkeit beurteilen zu können, ist zudem ein Vergleich mit dem Referenzmodell erforderlich. Wenn beispielsweise die Aktivierungsspanne von 12 Stunden des Referenzmodells als Vergleich herangezogen wird, zeigt sich, dass das Referenzmodell die gesamte Zeitspanne von 12 Stunden benötigt, um eine maximale Differenz des Energieinhalts von 115 Wh/m zu erreichen. Im Vergleich dazu zeigt sich eine um das nahezu 72-fache größere Wärmespeichervermögen (Differenz des Energieinhalts), das innerhalb von 4 Stunden und bei einer Temperaturdifferenz von 4 K des Fluids erreicht werden kann. Dies verdeutlicht die hohe Effizienz und das Potenzial des untersuchten PCM-Gemischs in Bezug auf die Wärmespeicherung.

Im Rahmen der materialspezifischen Parameter wurden zwei Trägermaterialvarianten untersucht: ein Kupferrohrsystem mit Wärmeleitprofilen auf einer hinterlüfteten Gipskartonplatte und eine Kapillarrohrmatte in Putz eingebettet. In beiden Trägermaterialien wurde ein PCM-Volumenanteil von 30 Vol.% eingebunden, um auch hier den Einfluss auf die thermische Speicherfähigkeit beurteilen zu können.

PCM-Gipskarton und PCM-Putz:

Die Gipskartonplatte sowie der Putz weisen, wie Beton, eine konstante spezifische Wärmekapazität von 850 J/kgK auf. Nach Zugabe des PCMs erreicht das PCM-GK-Gemisch eine noch höhere effektive Wärmekapazität als die des PCM-Beton-Gemisches. Die höchste Wärmekapazität (bei 17 °C) beträgt 33.474 J/kgK. Demgegenüber besitzt die

PCM-Putz-Variante eine effektive Wärmekapazität von 27.952 J/kgK bei 17°C. Die für die Ermittlung des Wärmespeichervermögens erforderliche effektive Rohdichte des PCM-GK-Gemisches liegt bei 859 kg/m³ und der PCM-Putz-Variante bei 1.034 kg/m³.

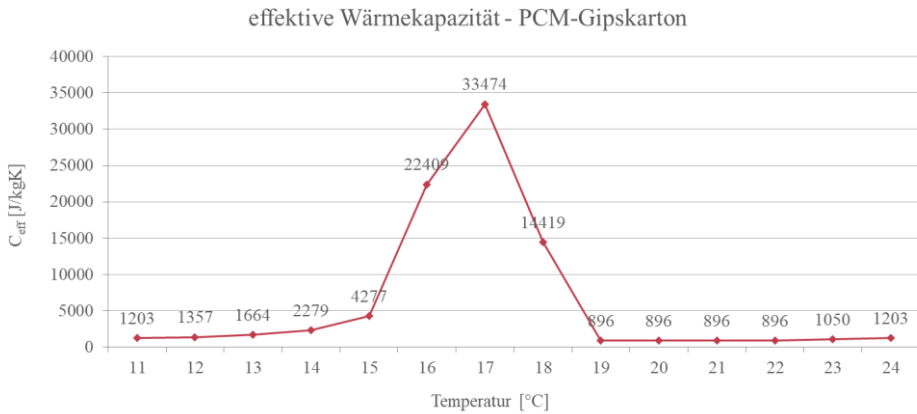


Abbildung 7.60: Effektive Wärmekapazität PCM-Gipskarton - Parameter: PCM-Gemische

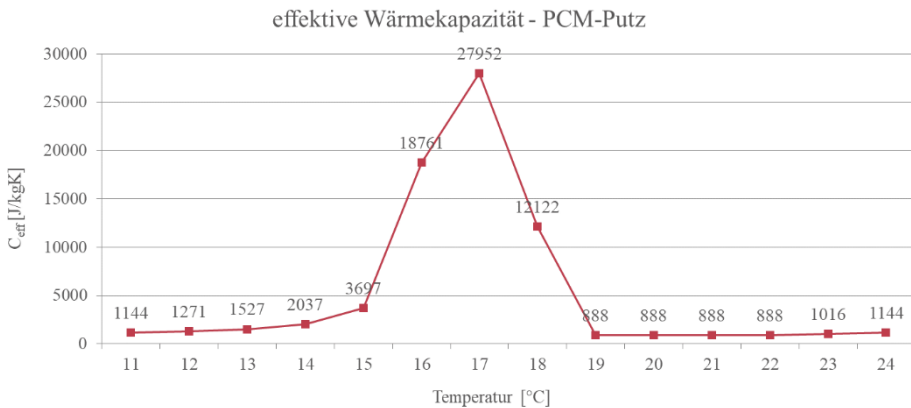


Abbildung 7.61: Effektive Wärmekapazität PCM-Putz - Parameter: PCM-Gemische

Auch im Falle dieser zwei zusätzlichen PCM-Varianten werden die zeitlich höher aufgelösten Diagramme zur Beschreibung des Verlaufs des gespeicherten Energieinhalts im Rahmen der bereits aufgezeigten Regelintervalle herangezogen. In der nachfolgenden Auflistung werden für die jeweiligen Regelintervalle maximale Differenzen der Energieinhalte und die entsprechenden Dauern bis zum Erreichen dieses Zustands beschrieben:

PCM-Gipskarton

- Zeitraum_{thermAkt} 24 h: nach 3 h max. Δ Energieinhalt = 1.044 Wh/m
- Zeitraum_{thermAkt} 12 h: nach 3 h max. Δ Energieinhalt = 1.041 Wh/m
- Zeitraum_{thermAkt} 6 h: nach 3 h max. Δ Energieinhalt = 1.039 Wh/m
- Zeitraum_{thermAkt} 4 h: nach 2 h max. Δ Energieinhalt = 1.046 Wh/m
- Zeitraum_{thermAkt} 2 h: nach 2 h max. Δ Energieinhalt = 1.044 Wh/m

PCM-Putz

- Zeitraum_{thermAkt} 24 h: nach 3 h max. Δ Energieinhalt = 976 Wh/m
- Zeitraum_{thermAkt} 12 h: nach 3 h max. Δ Energieinhalt = 974 Wh/m
- Zeitraum_{thermAkt} 6 h: nach 2 h max. Δ Energieinhalt = 980 Wh/m
- Zeitraum_{thermAkt} 4 h: nach 2 h max. Δ Energieinhalt = 977 Wh/m
- Zeitraum_{thermAkt} 2 h: nach 2 h max. Δ Energieinhalt = 972 Wh/m

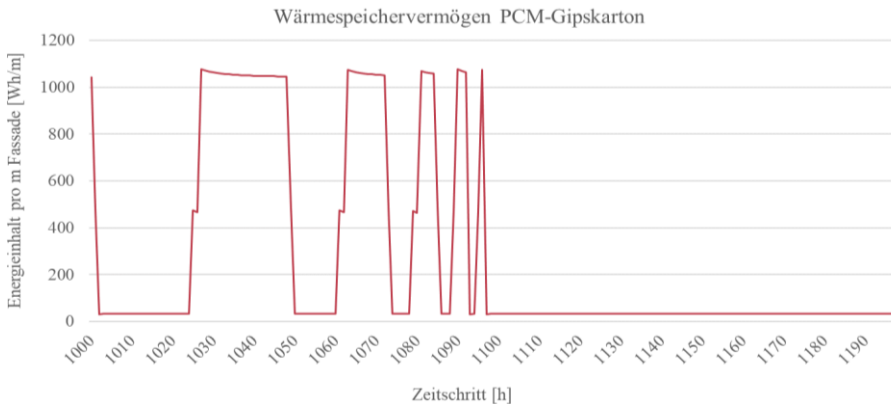


Abbildung 7.62: Wärmespeichervermögen GK-PCM (Nahaufnahme) - Parameter: PCM-Gemische

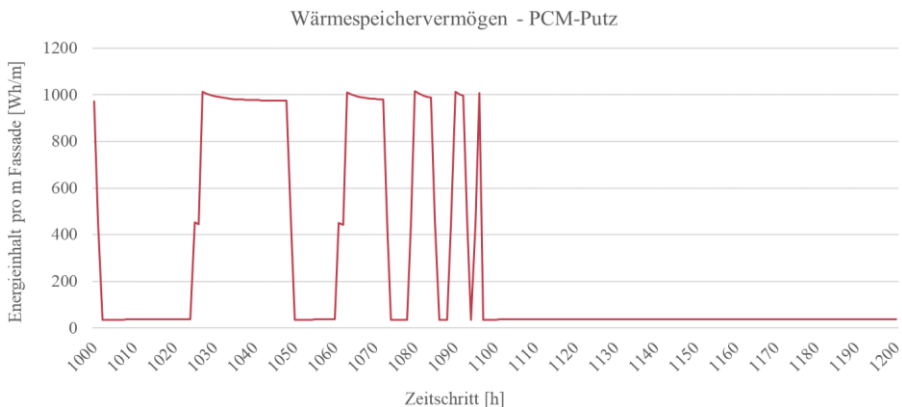


Abbildung 7.63: Wärmespeichervermögen PCM-Putz (Nahaufnahme) - Parameter: PCM-Gemische

Die Ergebnisse der zwei vorstehenden PCM-Varianten entsprechen nur einem Bruchteil des möglichen Wärmespeichervermögens des PCM-Beton-Gemisches. Dies resultiert aus der etwa doppelt so großen Rohdichte und 8-fach größeren aktivierten Baustofffläche des PCM-Beton-Gemisches.

Energieflexibilität

Im Industriesektor können neben geeigneten Betriebsstrategien bzgl. der in der Fabrik vorhandenen Prozesslinie, auch Hardwarelösungen zur Steigerung der Energieflexibilität herangezogen werden. Gemäß (Sauer, Abele und Buhl, 2019) werden die Hardwarelösungen in zwei Kategorien unterschieden:

- [a] „Schaffen und/oder Vergrößern der Speicherkapazitäten“ und
- [b] „Schaffung von Systemredundanzen und/oder Bivalenz“

Unter der Maßnahme [a] werden u.a. systemimmanente Speicher durch die Integration von PCM in Gebäudebauteilen aufgelistet. Diese Maßnahme wurde im Zuge der vorstehenden Parametervariation vorgenommen, für die die flexibilisierbare Energie berechnet werden kann. Im Kapitel 2 wurde die allgemeine Berechnungsformel eingeführt (vgl. Gleichung (2.3)):

$$\Delta E_{\text{flex}} = |\Delta P_{\text{flex}}| \cdot \frac{N_{\text{Abruf}}}{\text{Jahr}} \cdot \Delta t_{\text{Abruf}}$$

mit

ΔE_{flex} : Energieflexibilität [J]

ΔP_{flex} : Laständerung [W]

N_{Abruf} : Abrufhäufigkeit [-]

Δt_{Abruf} : Abrufdauer

Diese bezieht sich allerdings auf die möglichen Änderungen des Leistungsbezuges von technischen Anlagen, wie die einer Prozessmaschine. Im Falle von Flexibilisierungsmaßnahmen, die nicht auf Maschinen-Lastprofilen basieren, sondern wie hier auf die Speicherung von thermischer Energie, entfallen die Terme $|\Delta P_{\text{flex}}|$ und Δt_{Abruf} und werden durch $|\Delta Q_{\text{flex}}|$ ersetzt. Zudem ist die Antriebsleistung der Pumpen zur hydraulischen Versorgung der Kapillarrohrrmatten, die der Aktivierung des PCMs dienen, zu berücksichtigen:

$$\Delta E_{\text{flex}} = [|\Delta Q_{\text{flex}}| - (|\Delta P_{\text{flex,Antrieb}}| \cdot \Delta t_{\text{Abruf}})] \cdot \frac{N_{\text{Abruf}}}{\text{Jahr}} \quad (7.27)$$

mit

ΔE_{flex} : Energieflexibilität [J]

ΔQ_{flex} :	Flexibilisierbarer Energieinhalt pro m Fassade [J]
$\Delta P_{\text{flex,Antrieb}}$:	Antriebsleistung der hydraulischen Pumpen [W]
N_{Abruf} :	Abrufhäufigkeit [-]
Δt_{Abruf} :	Abrufdauer

ΔQ_{flex} wurde bereits für die drei PCM-Gemische (PCM-Beton, PCM-Gipskarton und PCM-Putz) bestimmt für eine Temperaturdifferenz des Fluids von 4 K (siehe vorstehender Abschnitt). ΔQ_{flex} stellt hierbei die Differenz des Energieinhalts pro m Fassade dar, was vorerst auf ein Fassadenmodul hochgerechnet werden muss. Dies erfolgt unter Einbezug der Modulhöhe. Da die Kühlung während des Nachtzeitraums erfolgen soll, ist der Ansatz eines Kühlintervall von 24 Stunden nicht sinnvoll. Daher wird hier exemplarisch eine Abrufdauer von 6 Stunden zu Grunde gelegt, die gemäß Abbildung 7.23 als ideales Kühlintervall gilt. Zusätzlich zur Abrufdauer, ist die Abrufhäufigkeit pro Jahr zu bestimmen. Eine Produktionshalle wird üblicherweise 7 Tage die Woche betrieben, um einem Produktionsausfall entgegenzuwirken, womit von einer Abrufhäufigkeit von 365 Tagen im Jahr auszugehen ist. Unter Berücksichtigung dieser Aspekte und der Antriebsleistung der Pumpen, ergeben sich folgende Energieflexibilitäten bzw. Energieflexibilitätssteigerungen durch die Integration von PCM in der innenliegenden thermisch aktivierten Schicht:

Tabelle 7.14: Energieflexibilität - Vergrößerung der Speicherkapazität durch Integration von PCM

Monat	$\Delta E_{\text{flex,total}}$ pro Fassadenmodul		$\Delta E_{\text{flex,Steigerung}}$
	[kWh im Jahr]		
Beton ohne PCM	208,91		-
PCM-Beton	11.394,49	-208,91	11.185,58
PCM-Gipskarton	2.428,81	-208,91	2.219,90
PCM-Putz	2.288,84	-208,91	2.079,93

8 Ökologie und Ökonomie

Nachhaltigkeit im Bauwesen ist ein zentrales Anliegen, das umweltgerechte Bauweisen und Technologien mit ökonomischen und soziokulturellen Zielen in Einklang bringt. Um dieses Ziel zu erreichen, ist es von entscheidender Bedeutung, den ökologischen, ökonomischen und gesellschaftlichen Nutzen bereits in der Planungsphase klar herauszustellen. Ganzheitliche Betrachtungen und Bilanzierungen sind dafür unerlässlich. Auf ökologischer Ebene geschieht dies durch eine detaillierte Sachbilanz und eine umfassende Wirkungsabschätzung. Gleichzeitig werden auf ökonomischer Ebene Kostenschätzungen in den frühen Planungsphasen sowie detaillierte Kostenberechnungen im späteren Planungsprozess herangezogen.

Im Kontext der Bewertung einzelner Produkte, wie beispielsweise die ETA-Fassade, bietet sich die Produktlinienanalyse (PLA) als geeignete Methode an. Das Öko-Institut e.V. hat diese Methode entwickelt, um insbesondere ökologische, ökonomische und soziale Auswirkungen für isolierte Produkte abschätzen zu können. Allerdings hat sich die Anwendung dieser Methodik in der Praxis bisher nicht bewährt, da es an allgemein anerkannten Bewertungsmodellen und Benchmarks mangelt. Dennoch zeigen sich vielversprechende Ansätze in Forschungsprojekten, wie zum Beispiel dem Projekt „BIM2LCA4IP“ (BIM-basierte Integrale Planung), die die Grundidee der PLA aufgreifen. (Graubner und Hüske, 2003)

Im Rahmen dieser Dissertation wurde somit erkannt, dass eine ganzheitliche Bewertung des ETA-Fassadenmoduls notwendig ist, um eine Betrachtung aus verschiedenen Perspektiven zu ermöglichen. Es ist daher wichtig, weitere ergänzende Aspekte wie Ökologie und Ökonomie zu berücksichtigen, um eine umfassende Bewertung des untersuchten ETA-Fassadenmoduls zu erreichen.

8.1 Ökologische Bewertung

Hinter jeder ökologischen Bewertung steht die Verpflichtung Deutschlands, die Ziele des Klimaschutzplans bis 2050 einzuhalten. Dabei besteht das konkrete Ziel, bis zum Jahr 2030 die Treibhausgasemissionen um 55 % im Vergleich zum Referenzjahr 1990 zu reduzieren. Gebäude spielen eine zentrale Rolle bei der Erreichung dieser Ziele und stellen eine wichtige Stellschraube dar. (BMUB, 2016)

Die Kurzstudie "Umweltfußabdruck von Gebäuden in Deutschland", die 2020 veröffentlicht wurde, verdeutlicht die immense Bedeutung des Gebäudesektors in

Verbindung mit Treibhausgasemissionen. Demnach wurden im Jahr 2014 deutschlandweit 40 % der Treibhausgasemissionen durch die Herstellung, Errichtung, Modernisierung und Nutzung/Betrieb von Wohn- und Nichtwohngebäuden verursacht. Dies entspricht 362 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalenten. Hinzu kommen weitere 35 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalente, die auf Zulieferer im Ausland zurückgehen. Von den gesamten Treibhausgasemissionen sind 75 % auf die Nutzung und den Betrieb von Gebäuden zurückzuführen, während die verbleibenden 25 % auf die vorgelagerten Lieferketten, die Herstellung, Errichtung und Modernisierung von Wohn- und Nichtwohngebäuden entfallen. (BBSR, 2020)

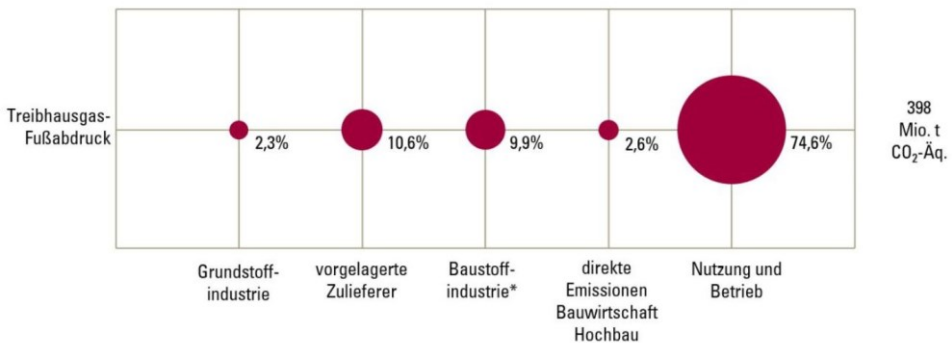


Abbildung 8.1: GWP-Fußabdruck des Handlungsfeldes „Errichtung und Nutzung von Hochbauten“ (BBSR, 2020)

Um die Umweltwirkungen jedes Gebäudes zu beurteilen und den Umweltfußabdruck zu quantifizieren, dient die Ökobilanzierung als wichtiges Instrument. Diese Methode hilft, nachhaltige Entscheidungen zu treffen, um den ökologischen Fußabdruck jedes Gebäudes zu minimieren. Dabei bilden die normativen Grundlagen, bestehend aus DIN EN ISO 14040, DIN EN ISO 14044, DIN EN 15804 und DIN EN 15978, das Fundament für eine standardisierte Vorgehensweise.

Die Phasen der Ökobilanz gliedern sich in drei wesentliche Bereiche: den Untersuchungsrahmen, die Sachbilanz und die Wirkungsabschätzung. Der Untersuchungsrahmen umfasst eine genaue Beschreibung des zu untersuchenden Produktsystems, die funktionelle Einheit, die Systemgrenzen, die ausgewählten Wirkungskategorien und die Methode der Wirkungsabschätzung. In der Sachbilanz, auch als Life Cycle Inventory (LCI) bezeichnet, werden alle relevanten Ressourcen wie Rohstoffe und Energie sowie die Emissionen in Luft, Boden und Wasser erfasst. Die Wirkungsabschätzung, auch bekannt als Life Cycle Impact Assessment (LCIA), beinhaltet die Bewertung der potenziellen Umweltwirkungen auf Grundlage der Ergebnisse aus der Sachbilanz. Hierzu zählt die Wahl geeigneter Wirkungskategorien und Indikatorwerte

sowie die Klassifizierung der Ergebnisse der Sachbilanz in Bezug auf diese Kategorien. (DIN EN ISO 14044, 2021)

Die Datengrundlage für die Ökobilanzierung kann aus generischen Daten bestehen, die Mittelwerte für ein bestimmtes Produkt darstellen, oder aus sogenannten Environmental Product Declarations (EPD), die präzisere Daten liefern. Um auf solide Daten zurückgreifen zu können, existiert die Datenbank ÖkobaDat. Sie bietet über 1.400 Datensätze und dient als verbindliche Grundlage für das Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB). Somit entspricht sie den Anforderungen der DIN EN 15804 und ermöglicht eine Bewertung von Gebäuden im Kontext der Nachhaltigkeit. (Schneider, Pfoh und Grimm) und (DIN EN ISO 14044, 2021)

8.1.1 Digitale Ökobilanzierung mit One Click LCA

Die Gebäudebilanzierung spielt eine entscheidende Rolle bei der Bewertung der Umweltwirkungen eines Bauvorhabens. Allerdings kann der hohe zeitliche Aufwand für diese Bilanzierung eine Herausforderung darstellen und die planungsbegleitende Optimierung erschweren. Eine vielversprechende Lösung bietet sich jedoch durch den Einsatz digitaler Ökobilanzierungstools im Rahmen von BIM-basierten Projektabwicklungen. Diese Tools ermöglichen es, CAD-Modelle mit einer Lebenszyklusanalyse zu verknüpfen und so bereits in frühen Planungsphasen erste Einschätzungen über die Umweltauswirkungen zu erhalten. Diese Informationen können dann in den Entscheidungsprozess einfließen und eine nachhaltige Gestaltung des Bauvorhabens ermöglichen.

Ein solches digitales Ökobilanzierungstool ist das Plug-In "One Click LCA", das in die bekannte 3D-Modellierungssoftware Rhinoceros integriert werden kann. Rhinoceros nutzt das Plug-In Grasshopper zur parametrischen Modellierung von Objekten über eine visuelle Programmierumgebung. Durch die Ergänzung von "One Click LCA" wird die digitale Ökobilanzierung und die Kopplung mit BIM-Modellen ermöglicht. Zusätzliche Schnittstellen können durch Python-Skripte geschaffen werden, um die Funktionalität zu erweitern. Mittels des "One Click LCA" Plug-Ins lassen sich die LCA-Informationen direkt mit den Gebäudedaten verknüpfen. Die verknüpften Daten werden dann in die One Click LCA Cloud exportiert, wo die eigentliche Ökobilanzierung und Berechnungsschritte stattfinden. One Click LCA bietet dabei eine benutzerfreundliche Umgebung, um Entwurfsvarianten miteinander zu vergleichen und Optimierungsansätze zu entwickeln. (Davidson, 2023) (One Click LCA Ltd., 2023)

Die vorliegende Herausforderung besteht in der partiellen Bewertung von einzelnen Funktionselementen, wie es für diese Dissertation im Fokus steht: die Untersuchung einer Fassade. Hierbei gilt es, die Umweltwirkungen dieser spezifischen Komponente isoliert zu bewerten.

In diesem Zusammenhang wurde im Rahmen einer betreuten Thesis von Hannah Merk das Plug-In "One Click LCA" als Werkzeug eingesetzt, um eine digitale Ökobilanzierung der ETA-Fassade gemäß DIN EN 15978 durchzuführen. One Click LCA, wie auch alle weiteren digitalen Ökobilanzierungstools, sind jedoch nicht für die partielle Ökobilanzierung ausgelegt. In der Forschungsarbeit von Hannah Merk galt es hierfür ein Weg zu finden und Restriktionen sowie Schwachstellen zu identifizieren. Die Vorgehensweise im Zuge der isolierten Ökobilanzierung der ETA-Fassade wurde in mehreren Schritten durchgeführt (Merk, 2023):

Schritt 1: Eingrenzung des Untersuchungsrahmens auf das Produktsystem

Der Untersuchungsrahmen umfasst ausschließlich die Fassade der ETA-Fabrik und schließt dabei andere Fassadenelemente wie Fenster, Türen und Sonnenschutzvorrichtungen bewusst aus. Das Produktsystem, das gemäß DIN EN 15978-1 definiert wurde, besteht aus den beiden Komponenten Fassade und Rahmentragwerk, da die ETA-Fassade neben ihrer bauphysikalischen Funktion auch die tragende Funktion des Tragwerks innehat.

Schritt 2: Festlegung der Systemgrenzen

Bei der Ökobilanzierung wurde nur ein Teil der Lebenszyklusphasen des Produktsystems betrachtet, darunter die Herstellungsphase (A1 bis A3), die Errichtungsphase (A4 bis A5), die Nutzungsphase (B1 bis B5) und die Entsorgungsphase (C1 bis C4). Zusätzlich wurde das Potenzial für Wiederverwertung und Rückgewinnung berücksichtigt (D). Die Module B6 und B7 der Nutzungsphase wurden jedoch nicht in die Bewertung einbezogen. Der Grund hierfür liegt darin, dass diese Module nicht für einzelne Komponenten isoliert vom Gebäudebetrieb bewertet werden können.

Angaben zum Lebenszyklus des Gebäudes				Vorteile und Belastungen außerhalb der Systemgrenze
Herstellungsphase	Errichtungsphase	Nutzungsphase	Entsorgungsphase	
A1 Rohstoffbeschaffung A2 Transport A3 Produktion	A4 Transport A5 Errichtung / Einbau	B1 Nutzung B2 Instandhaltung B3 Reparatur B4 Austausch B5 Modernisierung B6 Energieeinsatz für den Betrieb B7 Wassereinsatz für den Betrieb B8 gebäudebezogene Nutzertätigkeit die nicht durch B1-B7 behandelt werden	C1 Rückbau, Abriss C2 Transport C3 Abfallbehandlung C4 Beseitigung	D1 Potenzial für Wiederverwertung, Rückgewinnung und Recycling

Abbildung 8.2: Lebenszyklusphasen eines Produktsystems nach (DIN EN 15978-1, 2021) und (Merk, 2023)

Schritt 3: Betrachtungszeitraum

Als Betrachtungszeitraum wird meist die technische Lebensdauer eines Gebäudes/Bauteils angesetzt. Die technische Lebensdauer umfasst den Zeitraum von der Errichtung bis zum Ausfall eines Bauteils, wobei ein Ausfall eintritt, sobald die vorgesehene Funktion auch durch Instandhaltung nicht mehr gewährleistet werden kann. (Bahr und Lennerts, 2010)

Die ETA-Fassade besteht hauptsächlich aus Stahl, Beton und Mineralschaum, deren Nutzungsdauern gemäß den Vorgaben des Bewertungssystems Nachhaltiges Bauen (BNB) bei mindestens 50 Jahren liegen. (BBSR, 2017)

Bei der Planung langfristiger Gebäude wird angestrebt, ein Tragwerk mit einer Lebensdauer von über 100 Jahren sowie eine Außenhülle mit einer Mindestlebensdauer von 40 Jahren zu realisieren. (König et al., 2012)

Basierend auf den Nutzungsdauern der verwendeten Baustoffe und der Lebensdauer der Gebäudehülle wurde der Betrachtungszeitraum für die ETA-Fassade auf 50 Jahre festgelegt.

Schritt 4: Funktionelle Einheit

Die funktionelle Einheit dient als Bezugsgröße für die Ökobilanzierung und bildet die Grundlage für die Bewertung. Für die spezifische Ökobilanzierung der ETA-Fassade wurde die Flächeneinheit als funktionelle Einheit gewählt, sprich 1 m² Fassade mit festgelegten statischen und wärmeschutztechnischen Eigenschaften (U-Wert).

Schritt 5: Sachbilanz

Im Rahmen der Sachbilanzierung werden die relevanten Sachbilanzdaten berechnet und ermittelt. Hierbei werden die Ergebnisse aus der betreuten Thesis von Hannah Merk herangezogen und aufgezeigt. Um einen Vergleich durchzuführen, werden neben One Click LCA auch händische Berechnungen von Ackermann (Ackermann, 2016) verwendet.

Für die digitale Ökobilanzierung wurde das Modell der ETA-Fassade mittels Rhino modelliert und mit One Click LCA verknüpft. Dabei stieß die erste Restriktion auf, die sich aus der isolierten Betrachtung eines einzelnen Bauteils ergab. Da One Click LCA primär für die Ökobilanzierung von ganzen Gebäuden ausgelegt ist, musste das Modell die gesamte Gebäudehülle abbilden, einschließlich aller vier Wände und des Dachs. Dies erforderte die Erzeugung eines geometrisch vereinfachten Modells (einfacher Kubus), das die Volumina der einzelnen Baustoffschichten dennoch korrekt wiedergab. Diese geometrische Vereinfachung hatte keinen Einfluss auf die Ergebnisse der Ökobilanzierung, da aus dem CAD-Modell lediglich die Baustoffmassen für die Berechnungen entnommen wurden.

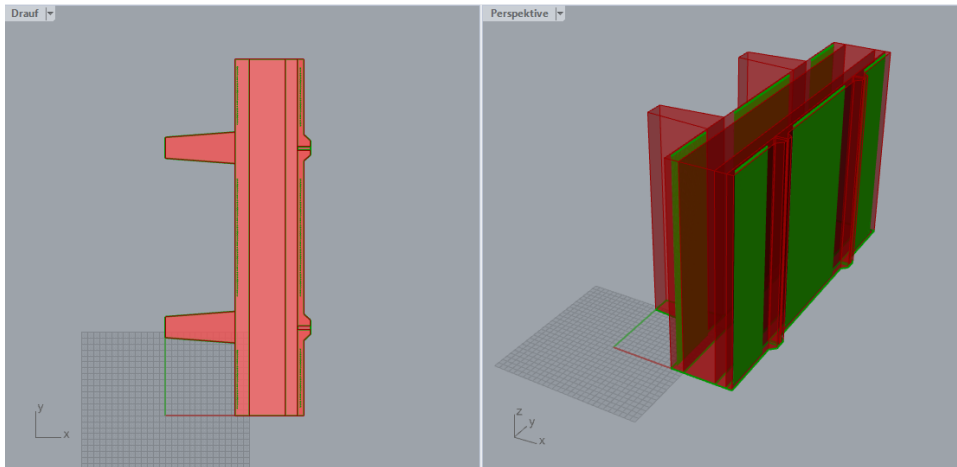


Abbildung 8.3: Rhino- bzw. Grasshopper-Modell des ETA-Fassadenmoduls

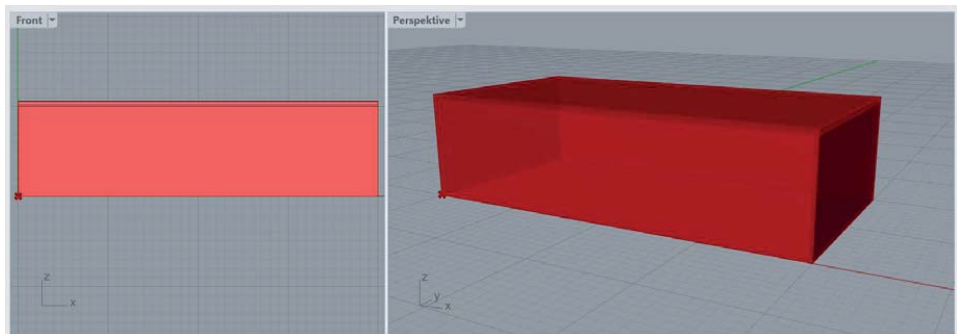


Abbildung 8.4: Vereinfachtes Modell der ETA-Fabrik (Merk, 2023)

Um den einzelnen Baustoffen Eigenschaften zuzuordnen und gleichzeitig eine Schnittstelle zur Ökobilanzierung zu erzeugen, sind im One Click LCA vier Elemente erforderlich (Merk, 2023):

"Select LCA Profile": Dieses Element ermöglicht die Definition eines Materials und dessen Zuordnung zu einem bestimmten Gebäudeelement. In der Datenbank von One Click LCA sind nicht für alle Baustoffe passende Datensätze in Form von EPDs verfügbar. Daher werden generische Datensätze verwendet, die Baustoffen ähneln, indem sie vergleichbare Wärmeleitfähigkeiten und Rohdichten aufweisen. Eine weitere Einschränkung besteht darin, dass Verbundstoffe nicht berücksichtigt werden können. Zum Beispiel muss bei Stahlbeton die Bewehrung separat vom Beton betrachtet werden.

Dies gilt auch für im Beton eingebettete Kapillarrohre. In Tabelle 8.1 sind die aus der Datenbank entnommenen Materialien mit ihrer jeweiligen Zuordnung aufgelistet.

Tabelle 8.1: Materialzuordnung in One Click LCA nach (Merk, 2023)

ETA-Fassade	One Click LCA
Stahlbeton C50/60	Transportbeton C50/60 (EPD – InformationsZentrumBeton GmbH)
	Stahl (generisch)
Minerlasierter Schaum	Minerale Dämmplatten (EPD - Xella)
UHPC (Ducon)	Transportbeton C50/60 (EPD – InformationsZentrumBeton GmbH)
Kapillarrohre aus Polypropylen Random-Copolymerisiert Typ 3 (Beka Heiz- und Kühlmatten GmbH)	Polypropylen-Rohre (generisch)

"Define Material": Hier wird die Menge für die Sachbilanz festgelegt, entweder volumen-, flächen- oder längenbezogen. Durch die Funktion "Define Material" werden die tatsächlichen Massen bzw. Volumina auf eine 1 m² Fassade beschränkt. Ackermann hatte im Rahmen der händischen Berechnung separate Massenermittlungen durchgeführt, die in diesem Zusammenhang verwendet wurden. Pro Quadratmeter Fassadenfläche beträgt beispielsweise der Bewehrungsanteil 32,5 kg/m² und der Polypropylen-Anteil 0,715 kg/m² (Ackermann, 2016).

"Create Construction": In diesem Schritt können den zuvor angegebenen Materialien Klassen zugewiesen werden. Eine Klasse wäre beispielsweise die Zuordnung Außenwand („External Wall“).

"Run LCA": Alle Elemente der erstellten Konstruktion werden mit "LCA durchführen" verbunden. Nachdem die Schritte abgeschlossen sind, können die Daten mittels eines Buttons am Verbindungsknoten "Run in Cloud" in die One Click LCA Cloud importiert werden.

Nach Abschluss dieser vier Schritte ist die eigentliche Sachbilanz vollständig abgeschlossen, was bedeutet, dass alle Baustoffe anhand ihres Volumens oder ihrer Masse abgebildet und den entsprechenden Materialien zugeordnet wurden. Zur Vorbereitung der Wirkungsabschätzung sind jedoch nach Import der Sachbilanzdaten weitere

gebäudebezogene Daten anzugeben. Hierzu zählen der jährlicher Energie- und Wasserverbrauch, die Grundfläche des Gebäudes und der Betrachtungszeitraum. Da das Ziel darin besteht, nur die Fassade zu bilanzieren und nicht das gesamte Gebäude, werden die Verbräuche für Energie und Wasser auf "0" gesetzt. Als Betrachtungszeitraum wird, wie vorstehend beschrieben, von 50 Jahren ausgegangen. (Merk, 2023)

Weiterhin sind die Umweltauswirkungen im Rahmen der Baustellen- und Rückbauphase zu wählen. Die Umweltauswirkungen während der Bauarbeiten auf der Baustelle werden gemäß DIN EN 15978-1 im Modul A5 erfasst (DIN EN 15978-1, 2021). Aufgrund der gemäßigten Klimazone in Darmstadt wurde für die ETA-Fassade das Baustellenszenario "Average site impacts - temperate climate (North) (per GFA)" gewählt. In diesem Szenario wird für die durchschnittliche Produktion von Bauabfällen eine Menge von 5 kg/m² BGF angenommen, die als allgemeine Bauabfälle betrachtet werden. Der Stromverbrauch wird mit 37 kWh/m² BGF und der Gesamtverbrauch von Diesel mit 4,5 l/m² BGF geschätzt. Die Bruttogrundfläche (BGF) der ETA-Fabrik wird entsprechend der geometrischen Parameter mit 800 m² (\approx 20 m x 40 m) angenommen. Dabei wird das gesamte Gebäude vereinfacht als Halle ohne Büroeinheiten betrachtet. Das Modul C1 enthält Umweltwirkungen für Rückbau und Abbruch, die durch das Szenario "Average deconstruction and demolition process (per GIA)" repräsentiert werden. Hierbei werden Emissionen berücksichtigt, die bei allen Rückbau- und Abbruchaktivitäten innerhalb und außerhalb des Geländes entstehen, einschließlich des Energieverbrauchs für die Unterbringung auf der Baustelle und die Nutzung der Anlagen. Die Umweltwirkungen des Transports werden im Modul A4 berücksichtigt, wobei die Transportmethode und die zurückgelegte Entfernung festgelegt werden müssen. Aufgrund fehlender konkreter Daten für die ETA-Fabrik werden die in One Click LCA vorgegebenen regional typischen Werte für die einzelnen Baustoffe verwendet. (Merk, 2023)

Schritt 6: Wirkungsabschätzung:

Im nächsten Schritt, der Wirkungsabschätzung, werden die Ergebnisse der Sachbilanz den entsprechenden Wirkungskategorien zugeordnet. Dieser Vorgang erfordert die Auswahl von Wirkungskategorien, -indikatoren und Charakterisierungsmodellen. Die Auswahl wird automatisch durch One Click LCA ausgeführt und es besteht keine Möglichkeit für individuelle Anpassungen. Als Charakterisierungsmodell wird die CML-IA 2012 Methode verwendet. Im nächsten Schritt erfolgt die Klassifizierung, bei der die Ergebnisse der Sachbilanz den entsprechenden Wirkungskategorien zugeordnet werden. Darauf folgt die Charakterisierung, bei der die Wirkungsindikatorwerte berechnet werden, um die Umweltauswirkungen zu bewerten. Während der Nutzungsdauer von 50 Jahren verursacht der Beton in der Nutzungsphase (Modul B1 bis B5) keine zusätzlichen Umweltwirkungen und Ressourceneinsätze. Das Recyclingpotenzial des Betons (Modul D) kompensiert weitgehend die meisten Umweltwirkungen, die am Lebensende durch den Abbruch des Gebäudes und die Aufbereitung des

Recyclingmaterials entstehen (Modul C1 bis C3). Die maßgeblichen Umweltwirkungen treten vor allem in der Herstellphase (Modul A1 bis A3) auf. (Merk, 2023)

Tabelle 8.2: Ökobilanzergebnisse ETA-Fassade nach (Merk, 2023)

Modul	GWP [kg CO ₂ -Äq. /m ²]	AP [kg SO ₂ -Äq. /m ²]	EP [kg PO ₄ -Äq. /m ²]	ODP [kg CFC11-Äq. /m ²]	POCP [kg Ethene-Äq. /m ²]	ADP [MJ/m ²]	BECCS [kg CO ₂ -Äq.bio/m ²]
A1-A3 Produktion	141,199	0,217	0,031	2,5 E-7	0,0278	1332,494	0
A4 Transport zur Baustelle	5,430	0,010	0,002	9,5 E-7	7,65 E-4	90,110	-
A5 Bauprozess	12,137	0,044	0,027	1,75 E-6	1,49 E-3	226,729	-
B1-B5 Instandhaltung	-	-	-	-	-	-	-
B6 Energieverbrauch	-	-	-	-	-	-	-
B7 Wassereinsatz	-	-	-	-	-	-	-
C1 Abbau/Abriß	1,360	0,003	4,75 E-4	2,2 E-7	0,00021	24,110	0
C2 Abfalltransport	3,174	0,014	3,16 E-3	6,5 E-7	1,95 E-4	90,745	-
C3 Abfallbehandlung	0,287	0,002	2,4 E-4	3,05 E-8	0,00007	7,767	-
C4 Deponierung	0,091	0,001	1,45 E-4	1,65 E-8	1,8 E-5	1,332	-
D Material-Gutschriften	-22,044	0,015	0,00309	3,65 E-7	0,0007	54,029	-

Auswertung bzw. Beurteilung der Ergebnisse:

Die Auswertung der Ergebnisse beinhaltet eine Sensitivitätsanalyse sowie eine Konsistenz- und Vollständigkeitsprüfung. In der Sensitivitätsanalyse werden die signifikanten Parameter identifiziert. Hierbei kommt die Dominanzmethode zum Einsatz, um den Teil des Lebenszyklus zu ermitteln, der den größten Beitrag zu den Umweltwirkungen leistet.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Lebenszyklusphasen A1-A3 (Produktion) in fünf der sechs betrachteten Wirkungskategorien den prozentual größten Beitrag verantwortet. Konkret entstehen hier 86,3 % des Treibhauspotenzials (GWP) und 91,0 % des Potenzials für photochemische Ozonbildung (POCP). Modul A5 (Bau- und Installationsprozess) ist mit 41,9 % für den größten Beitrag zum Eutrophierungspotenzial (EP) und mit 45,5 % für den zweitgrößten Beitrag zum Ozonabbaupotenzial (ODP) verantwortlich. Das Modul A4 (Transport) trägt mit 24,4 % insbesondere zum Ozonabbaupotenzial bei. Eine ähnliche Wirkung zeigt sich im Modul C4 (Abfalltransport), wo es mit 16,5 % ebenfalls zum Ozonabbaupotenzial beiträgt.

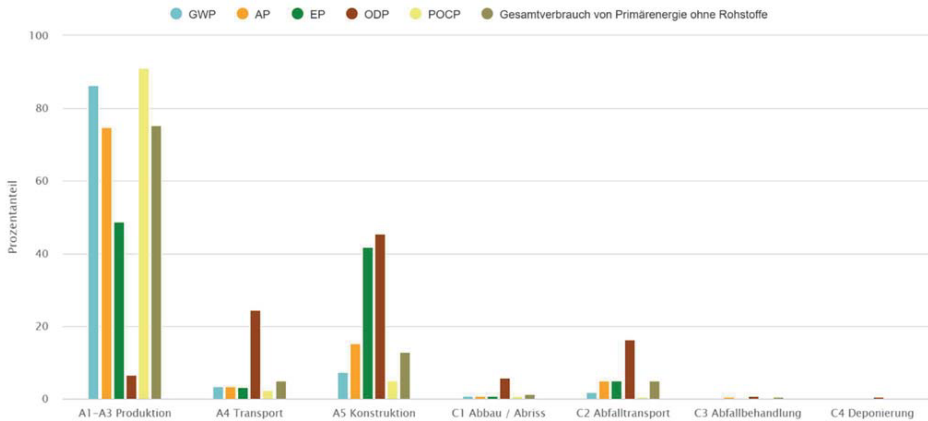


Abbildung 8.5: Ökobilanzergebnisse ETA-Fassade – prozentuale Anteile der Lebenszyklusphasen an Wirkungskategorien (Merk, 2023)

Die nachstehende Abbildung 8.6 zeigt die Umweltwirkung der einzelnen Baustoffe und Bauphasen der ETA-Fassade je Wirkungskategorie. Deutlich wird, dass Transportbeton in allen Kategorien den größten Beitrag im Vergleich zu den restlichen Materialien aufweist. Weiterhin ist zu erkennen, dass der Bewehrungsstahl und die Mineralschaumdämmung ebenfalls einen bedeutenden Einfluss haben. Im Gegensatz dazu übt das Polypropylen der Rohrsysteme einen vergleichsweise geringen Einfluss aus.

Im Zuge der Plausibilitätsprüfung wurden die Erkenntnisse aus Ackermanns Arbeit von 2016 herangezogen und mit den Resultaten aus One Click LCA abgeglichen. Die Ergebnisse aus One Click LCA sind mit Unsicherheiten behaftet, da lediglich Daten aus der softwareeigenen Datenbank genutzt werden konnten. Aufgrund der limitierten Version von One Click LCA war es nicht möglich, eigene Datensätze, die beispielsweise von den Herstellern stammen, manuell zu erzeugen.

Die außenliegende Beton-Schale aus UHPC beispielsweise wird als Fertigbetonteile im Werk hergestellt. Allerdings musste in One Click LCA aufgrund mangelnder Daten

stattdessen Transportbeton angesetzt werden. Das Treibhauspotenzial (GWP) des UHPC liegt im Rahmen der Module A1-A3 (Produktion) bei 618,64 kg CO₂-Äq./m³. Im Vergleich dazu weist der in One Click LCA angesetzte Transportbeton für die Herstellungsphase ein GWP von 334,7 kg CO₂-Äq./m³ auf. Somit stellt das UHPC des Herstellers Ducon ein um 2,1-fach größeres Treibhauspotenzial dar. Gemäß (Ackermann, 2016) liegt der Primärenergiebedarf aus erneuerbaren Energien (PEe) bei 2978,02 MJ/m³ und für nicht erneuerbare Energien (PEne) bei 3417,16 MJ/m³ für das UHPC. Im Gegensatz dazu liegt der PEe für den Transportbeton bei 292 MJ/m³ und für PEne bei 1510 MJ/m³. Daher ist der Primärenergiebedarf aus erneuerbaren Energien bei Ducon um das 10,2-fache und für nicht erneuerbare Energien um das 2,3-fache höher als beim Transportbeton. (Merk, 2023)

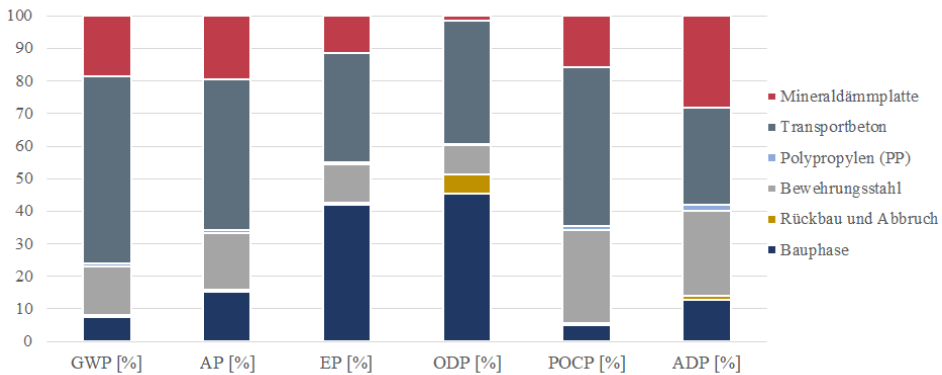


Abbildung 8.6: Ökobilanzergebnisse ETA-Fassade – prozentuale Anteile der Baustoffe und der Bau- und Rückbauphase an den Wirkungskategorien nach (Merk, 2023)

Des Weiteren liefert der deutsche Ausschuss für Stahlbeton e.V. (DAfStb) Orientierungswerte für Treibhausgasemissionen von Beton, die als Vergleich herangezogen werden können. Bei der Betrachtung von "Durchschnittsbetonen" belaufen sich die GWP-Emissionen für ein Beton mit einer Festigkeitsklasse C50/60 auf ungefähr 300 kg CO₂-Äq./m³. Hierbei wird der GWP-Wert des tatsächlich verbauten UHPC deutlich unterschritten. Darüber hinaus bietet das "CO₂-Modul" im CSC-Betonzertifikat (CSC = Concrete Sustainability Council) die Möglichkeit, CO₂-reduzierte Betone zu klassifizieren (siehe Abbildung 8.8). Die am häufigsten umgesetzten Ebenen sind Level 1 und 2, während Level 3 und 4 aufgrund der Dauerhaftigkeit des Betons und der Verfügbarkeit geeigneter Ausgangsstoffe nur eingeschränkt realisierbar sind. (Breitenbücher, 2021)

1	Bezeichnung	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C45/55	C50/60
2		Treibhausgasemissionen in kg CO ₂ -Äquivalent/m ³ Beton					
3	Beton z. B. mit CEM VI o. ä.	125	138	153	171	200	210
4	Beton z. B. mit CEM III/A, CEM II/C o. ä.	142	158	175	195	229	240
5	Beton heutiger Durchschnitt ¹⁾	178	197	219	244	286	300
6	Beton mit CEM I	213	237	261	286	312	325

Abbildung 8.7: Orientierungswerte für Treibhausgasemissionen für Beton (Breitenbücher, 2021)

CO ₂ -Klasse	Beschreibung
Level 1	Reduzierung der Treibhausgasemissionen um mindestens 30 % gegenüber einem Durchschnittsbeton mit CEM I
Level 2	Reduzierung der Treibhausgasemissionen um mindestens 40 % gegenüber einem Durchschnittsbeton mit CEM I
Level 3	Reduzierung der Treibhausgasemissionen um mindestens 50 % gegenüber einem Durchschnittsbeton mit CEM I
Level 4	Reduzierung der Treibhausgasemissionen um mindestens 60 % gegenüber einem Durchschnittsbeton mit CEM I

Abbildung 8.8: CO₂-Klassen für Betone (Breitenbücher, 2021)

Beim Mineralschaum zeigen sich ähnliche Tendenzen hinsichtlich der Abweichungen von den in One Click LCA angesetzten Mineraleämmplatten. Laut Ackermann weist der mineralisierte Schaum für die Module A1 bis A3 ein Treibhauspotenzial (GWP) von 124,9 kg CO₂-Äq./m³, einen Primärenergiebedarf aus erneuerbaren Energien (PEe) von 361,6 MJ/m³ und einen Primärenergiebedarf aus nicht erneuerbaren Energien (PEne) von 422,4 MJ/m³ auf. Im Gegensatz dazu weist die in der Ökobilanzierung verwendete Mineraleämmplatte des Herstellers Xella Baustoffe GmbH ein GWP von 101,0 kg CO₂-Äq., ein PEe von 311,0 MJ/m³ und ein PEne von 1350 MJ/m³ auf. Das Treibhauspotenzial (GWP) des mineralisierten Schaums sowie der PEe sind somit um das 1,2-fache höher als bei der Mineraleämmplatte. Allerdings ist der PEe der Mineraleämmplatte um das 3,2-fache höher als der des mineralisierten Schaums. (Merk, 2023)

Weiterhin basieren die in der Lebenszyklusphase A5 hinterlegten Umweltwirkungen der Baustellenphase auf dem Szenario "Average site impacts - temperate climate (North) (per GFA)", das gemittelten Erfahrungswerten entspricht. Aufgrund dieser Verallgemeinerung kann es zu Abweichungen zu den tatsächlich vorliegenden Umweltwirkungen kommen. Gleichmaßen besteht eine ähnliche Unsicherheit beim Modul C1 (Abriss/Rückbau), da auch hier ein voreingestelltes Szenario genutzt wurde, das nicht auf spezifische Gegebenheiten zugeschnitten ist.

Nachdem alle Fassadenbestandteile (Baustoffe) berücksichtigt wurden, indem die Mengen mit den jeweils zugehörigen Treibhauspotenzialen (GWP) multipliziert und die Ergebnisse anschließend aufsummiert wurden, ergibt sich für die Fassade ein Gesamt-

GWP von 282180,61 kg CO₂-Äq. Im Vergleich dazu führt die Berechnung nach Ackermann zu einem Gesamt-GWP von 329871,78 kg CO₂-Äq. Die Ergebnisse aus One Click LCA weichen somit um 14,5 % von den Ergebnissen nach Ackermann ab. (Merk, 2023)

Optimierungsansätze:

Während der Herstellungsphase der Baustoffe (Modul A1 bis A3) treten die meisten Umweltwirkungen auf, weshalb es notwendig ist, Optimierungsansätze für die verwendeten Baustoffe der ETA-Fassade zu entwickeln.

Beton:

Beton stellt mengenmäßig den größten Anteil der ETA-Fassade dar und weist in allen Wirkungskategorien die höchsten Umweltwirkungen auf. Daher ist die Optimierung dieses Baustoffs entscheidend, um die Umweltauswirkungen zu minimieren. Der DAfStb hat in seiner „Planungshilfe zum nachhaltigen Bauen mit Beton“ mehrere Möglichkeiten zur ökologischen Optimierung von Beton aufgezeigt, die im Folgenden näher erläutert werden (Breitenbücher, 2021):

Die statische Optimierung stellt einen ersten Ansatz dar, um die Umweltauswirkungen von Beton zu reduzieren. Durch eine gezielte Material- und Gewichtseinsparung wird weniger Beton und Bewehrung verwendet, ohne dabei die strukturelle Integrität zu beeinträchtigen. Dadurch werden Ressourcen eingespart und gleichzeitig das Gewicht der Bauteile verringert, was zu einer insgesamt nachhaltigeren Bauweise führt. Ein weiterer Aspekt ist die herstellungstechnische Optimierung. Hierbei werden Maßnahmen ergriffen, um weniger Abfall zu generieren und die Produktionszeit zu verkürzen. Eine Möglichkeit dazu bietet die Modulbauweise, bei der viele gleiche Bauteilquerschnitte verwendet werden. Dadurch kann die Produktion effizienter gestaltet werden, was zu weniger „Verschnitt“ und Abfall führt. Die Optimierung der Betonrezeptur ist ein weiterer wichtiger Schritt in Richtung Nachhaltigkeit. Hierbei liegt der Fokus darauf, die CO₂-Emissionen zu reduzieren, ohne dabei die Widerstandsfähigkeit und Dauerhaftigkeit des Betons zu beeinträchtigen. Durch den Einsatz von speziellen Zusatzstoffen und alternativen Bindemitteln kann der CO₂-Fußabdruck von Beton deutlich verringert werden, während gleichzeitig die erforderlichen technischen Eigenschaften erhalten bleiben.

Ackermann hat sich in seiner Arbeit ebenfalls mit Optimierungsansätzen beschäftigt und wählte den zuvor beschriebenen Ansatz der Betonrezeptur-Optimierung. Die außenseitige Schale der ETA-Fassade besteht aus microbewehrtem Beton, genauer gesagt aus UHPC des Herstellers Ducon. Allerdings weist dieser Beton eine hohe Umweltauswirkung auf, was hauptsächlich auf den hohen Gehalt an GWP zurückzuführen ist. Um eine umweltfreundlichere Zusammensetzung des Ducon-Mörtels zu erreichen, beschreibt Ackermann eine Optimierungsmöglichkeit. Hierbei steht der Zementklinker im

Fokus, der für etwa 80 % des GWP des Mörtels verantwortlich ist. Der Optimierungsansatz besteht darin, einen Teil des Zementklinkers durch ökologisch besseren Hüttensand zu ersetzen. Untersuchungen haben gezeigt, dass der Ersatz von 20 % des Zementklinkers durch Hüttensand keinerlei Einbußen der physikalischen Eigenschaften des Mörtels verursacht. Diese alternative Mörtelkonfiguration führt zu einer Reduktion des GWP um 19 % sowie einer Verringerung des Primärenergiebedarfs um 16 %. (Ackermann, 2016)

Eine weitere Möglichkeit zur Verbesserung der Beton-Rezeptur besteht in der Verwendung von Recycling-Beton, der rezyklierte Gesteinskörnungen aus wiederverwendeten Abbruchabfällen enthält (Schulz 2000). Die Insitu-Wiederverwendung wäre aus kreislauftechnischer Sicht die bevorzugte Wahl. Allerdings gibt die DAfStb-Richtlinie Beton vor, dass der Einsatz von rezyklierten Gesteinskörnungen mit einer Festigkeitsklasse von größer C30/37 nicht zulässig ist (DAfStb, 2010). Besonders relevant ist die Verwendung von Beton für die innenliegende PI-Platte der ETA-Fassade, da sie eine tragende Funktion hat. In diesem Fall wäre die Nutzung von rezyklierten Beton nicht möglich, da eine Festigkeitsklasse von C50/60 erforderlich ist.

Stahl:

Mit One Click LCA besteht die Möglichkeit, einen Konfigurationsvergleich durchzuführen, bei dem alternative Baustoffe mit verbesserten ökologischen Eigenschaften angesetzt werden können. Für Bewehrungsstahl empfiehlt One Click LCA unter anderem die Verwendung der „Carbon steel reinforcing bar (secondary production route scrap)“ des Herstellers Alpa aus Frankreich, der ein GWP von 0,28 kg CO₂-Äq./kg aufweist. Im Gegensatz dazu hat der in der durchgeführten Ökobilanzierung verwendete Stahl ein GWP von 0,68 kg CO₂-Äq./kg. Durch die Nutzung des vorgeschlagenen Bewehrungsstahls von Alpa wäre eine Reduktion um 59 % zum ursprünglichen GWP-Wert möglich. (Merk, 2023)

Mineralschaum:

Auf dem Markt sind mittlerweile ökologisch bessere Alternativen zu dem verbauten Mineralschaum in der ETA-Fassade erhältlich. Der Mineralschaum der ETA-Fassade, weist ein GWP von 124,91 kg CO₂-Äq./m³ auf und eine Wärmeleitfähigkeit von $\lambda = 0,06$ W/mK. Im Vergleich dazu besitzt der Mineralschaum des Unternehmens GEOLYTH Mineral Technologie GmbH, Produkt Geolyth GMS 65 ein deutlich niedrigeres GWP von 57 kg CO₂-Äq./m³ und eine verbesserte Wärmeleitfähigkeit von $\lambda = 0,041$ W/mK (Geolyth Mineral Technologie GmbH, 2022). Dadurch ergibt sich eine Reduzierung um 54 % der Treibhausgasemissionen und zugleich eine Verbesserung der wärmeschutztechnischen Eigenschaften.

Im Rahmen der in diesem Kapitel aufgezeigten Ökobilanzierung wurden zwei wichtige Bestandteile der ETA-Fassade nicht berücksichtigt: die Unterkonstruktion der vorgehängten hinterlüfteten Fassade sowie das für die thermische Aktivierung notwendige Fluid (Wasser-Glykosol-Gemisch). Eine umfassende und vollständige Ökobilanzierung der ETA-Fassade erfordert eine detaillierte Betrachtung dieser Komponenten, die in weiteren Untersuchungen berücksichtigt werden sollten. Es ist wichtig anzumerken, dass in dieser Dissertation der Fokus nicht primär auf ökologischen Aspekten lag, und die hier aufgezeigten Ergebnisse der Ökobilanzierung lediglich zur Vollständigkeit bewertet wurden. Dennoch liefert die hier dargestellte Untersuchung eine erste gute Einschätzung der ökologischen Aspekte der ETA-Fassade, was bereits eine Grundlage für weiterführende Forschungen darstellt.

Des Weiteren wurde ermittelt, dass mit einem digitalen Ökobilanzierungstool, das eigentlich für ganze Gebäude ausgelegt ist, auch partielle Bauteil-Ökobilanzierungen für schnelle erste Einschätzungen in frühen Planungsphasen durchgeführt werden können. Dabei ist jedoch die Datenherkunft ein entscheidender Faktor für eine realitätsnahe Ökobilanzierung. Obwohl One Click LCA eine umfangreiche Auswahl an Environmental Product Declarations (EPDs) bietet, konnten für einige Baustoffe keine passenden EPDs gefunden werden. Daher musste teilweise auf generische Daten zurückgegriffen werden, die Durchschnittswerte darstellen. Eine manuelle Eingabe der Umweltwirkungen wäre an dieser Stelle hilfreich gewesen, was jedoch aufgrund der limitierten Version der Software (student License) nicht möglich war. In der Vollversion wäre diese Funktion hingegen freigeschaltet.

8.1.2 Umweltverträglichkeitsprüfung auf Bauteilebene

Die Durchführung einer Ökobilanzierung ist zeitaufwendig und kostenintensiv und erfordert eine Detailtiefe, die in frühen Planungsphasen oft nicht verfügbar ist, selbst für eine vereinfachte oder partiellen Ökobilanzierung. Es ist daher ratsam, die Ergebnisdarstellung der Gebäudeökobilanz an die Anforderungen und Detailtiefe der jeweiligen Planungsphase anzupassen. Eine Möglichkeit dazu besteht in der Definition von Informationsabstufungen bei der Datenübergabe im Verlauf des Planungsfortschritts. Dadurch können relevante Informationen auf die jeweiligen Planungsphasen abgestimmt und die Ökobilanzierung besser integriert werden.

Im Rahmen des Forschungsprojekts BIM2LCA4IP (BIM-basierte Integrale Planung) wurde ein Konzept entwickelt, das es ermöglichen soll, in frühen Planungsphasen Umweltwirkungen durch LCA-Benchmarks in vier verschiedenen Detaillierungsstufen abzuschätzen (vgl. Kapitel 3.1.2). Diese Abschätzungen basieren auf der Datenermittlung mittels Building Information Modeling (BIM). Dabei werden die Informationen und Daten aus dem BIM-Modell genutzt, um die Umweltauswirkungen zu berechnen und anhand der vordefinierten LCA-Benchmarks in die entsprechenden Detaillierungsstufen

einzustufen. LCA-Benchmarks sind hierbei Durchschnittswerte der LCA-Ergebnisse bereits umgesetzter Projekte, die bestimmten Gebäudetypen und Bauteilen zugeordnet werden. Sie dienen als erste ökologische Ausrichtung für ein Bauvorhaben und ermöglichen eine grobe Abschätzung der Umweltauswirkungen. Dies ist vergleichbar mit der Anwendung von durchschnittlichen Kostenkennwerte (z.B. BKI), bei denen durch Unterscheidung von u.a. Nutzung, Konstruktionsart und Qualitätsniveau eine grobe Schätzung der Kosten als erster Orientierungswert möglich ist. Bei der Ökobilanzierung beziehen sich die Parameter auf die Nutzung, die Konstruktionsart (Bauweise und Materialien), den Energiestandard und den technischen Ausstattungsniveau. (Ebertshäuser et al., 2020) (Gantner et al., 2015)

Angesichts fehlender detaillierter Daten müssen Planungsentscheidungen hinsichtlich der Umweltauswirkungen basierend auf groben Erfahrungswerten getroffen werden, die sich aus den Hauptattributen des geplanten Gebäudes ableiten lassen. Um dieses Vorgehen zu unterstützen, wird das Umweltwirkungspotenzial (UWP) als jährlicher Durchschnittswert über den angesetzten Betrachtungszeitraum herangezogen. Durch die Analyse der Hauptmerkmale des Gebäudes und die Einbeziehung des Umweltwirkungspotenzials können die Planungsentscheidungen auf einer groben Grundlage getroffen werden, die Umweltaspekte berücksichtigt. Die sich aus diesen Abstufungen ergebenden Konkretisierungsstufen wurden in Kapitel 3.1.2 bereits erläutert. Zwei dieser vier Konkretisierungsstufen können der Fassade zugeordnet werden, die Funktions- und die Elementsystemebene. (Gantner et al., 2018)

Die Funktionssystemebene beschreibt dabei die Konstruktionsart der Außenwand, zum Beispiel eine Ziegelaußenwand mit Wärmedämmverbundsystem. Um aussagekräftige Benchmarks für die Funktionssystemebene zu entwickeln, wurden im Forschungsprojekt die wichtigsten konstruktiven und anlagentechnischen Systeme anhand der Positionen für den Neubau des Baukosteninformationszentrums BKI betrachtet. Das Elementsystem hingegen gibt Informationen zu zwei Teilkomponenten der Fassade: der Tragschicht (SK für statischer Kern) und der Aufbauschicht (AS). Für die Festlegung der Elementsystem-Benchmarks werden Durchschnittswerte für die Materialcharakteristika angenommen, die auf Werten aus den Standardkonstruktionsansammlungen des United Nations Environment Programme (UNEP) beruhen. (Gantner et al., 2018)

Die Umweltwirkungen werden pro Bezugsgröße angegeben, wobei im Falle der Fassade 1 m² je Elementsystemkomponente betrachtet wird. Die Umweltwirkungspotenziale der einzelnen Bauteile eines Gebäudes werden separat für jeden Baustoff in Bezug auf die Herstellung, Entsorgung und Instandhaltung aufgeführt. Die Berechnung erfolgt gemäß der Gleichung (8.1) (DGNB GmbH, 2018):

$$\text{UWP}_k = \frac{H+E+I}{t_d} \quad (8.1)$$

mit

- H: prognostizierter Wert bei der Herstellung (Module A1-A3) in [kg Umweltwirkungs-Äqu./m²·a]
- E: prognostizierter Wert bei der Entsorgung (Module C3 und C4) und Verwertung (Modul D) [kg Umweltwirkungs-Äqu./m²·a]
- I: prognostizierter Wert durch die Instandhaltung und Austausch (Modul B4) [kg Umweltwirkungs-Äqu./m² a]
- t_d: Betrachtungszeitraum [a]

Im Rahmen der partiellen Ökobilanzierung der ETA-Fassade wurden für bestimmte Umweltkategorien die Umweltwirkungen bilanziert. Auf Basis dieser Ergebnisse werden die Umweltwirkungspotenziale exemplarisch berechnet. Hierbei dienen die Werte aus Tabelle 8.2 als Grundlage für die Berechnungen. Auffällig ist, dass keine Daten für die Instandhaltung/Austausch im Rahmen der Ökobilanzierung generiert wurden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass ein Austausch von einzelnen Komponenten der ETA-Fassade innerhalb des Betrachtungszeitraums nicht zu erwarten ist. Die Robustheit des Betons lässt auch nicht darauf schließen, dass Instandhaltungsmaßnahmen erforderlich sein werden.

Tabelle 8.3: Umweltwirkungspotenziale der ETA-Fassade auf Elementsystemebene

	GWP_k [kg CO ₂ -Äq./m ² a]	AP_k [kg SO ₂ -Äq./m ² a]	EP_k [kg PO ₄ -Äq. m ² a]	ODP_k [kg CFC11-Äq./m ² a]	POCP_k [kg Ethene-Äq./m ² a]	ADP_k [MJ/m ² a]	BECCS_k [kg CO ₂ -Äq.bio/m ² a]
UWP _k = UWP _{SK} + UWP _{AS}	2,391	0,005	0,001	1,3E-08	0,001	27,912	0
UWP _k inkl. Unsicherheit (14,5 %)	2,737	0,005	0,001	1,5E-08	0,001	31,960	0

Um die Umweltwirkung der jeweiligen Konstruktionselemente einstufen zu können, ist es nun erforderlich, einen Vergleich mit Hilfe von LCA-Benchmarks durchzuführen. Ein entsprechendes Konzept wurde bereits im Rahmen des Forschungsprojekts BIM2LCA4IP (Ebertshäuser et al., 2020) entwickelt. Allerdings gibt es bisher noch zu wenige Projekte, aus denen die notwendigen Benchmarks generiert werden könnten.

Die nächsten Schritte beinhalten daher die Erhebung der LCA-Benchmarks auf einer deutlich breiteren Erhebung für jede Stufe. Dabei können bereits eingereichte Projekte der

DGNB oder BNB als erste Kennwerte dienen, um die Datenlage zu verbessern. Das entwickelte Konzept zur Anwendung der LCA-Benchmarks soll schließlich in eine webbasierte Ökobilanzsoftware integriert werden, um eine benutzerfreundliche und effiziente Nutzung zu ermöglichen.

Im Rahmen des Zertifizierungsverfahrens bieten sowohl die DGNB als auch das BNB Referenzwerte an, die zur Einschätzung der Emissionen dienen können. Diese Referenzwerte liegen auf Bauteilebene vor, allerdings ohne Spezifizierung der Bauweise und mit Bezug auf die Netto-Raumfläche (siehe Abbildung 8.9). Für einen direkten Vergleich wäre jedoch die Bezugseinheit Bauteilfläche erforderlich.

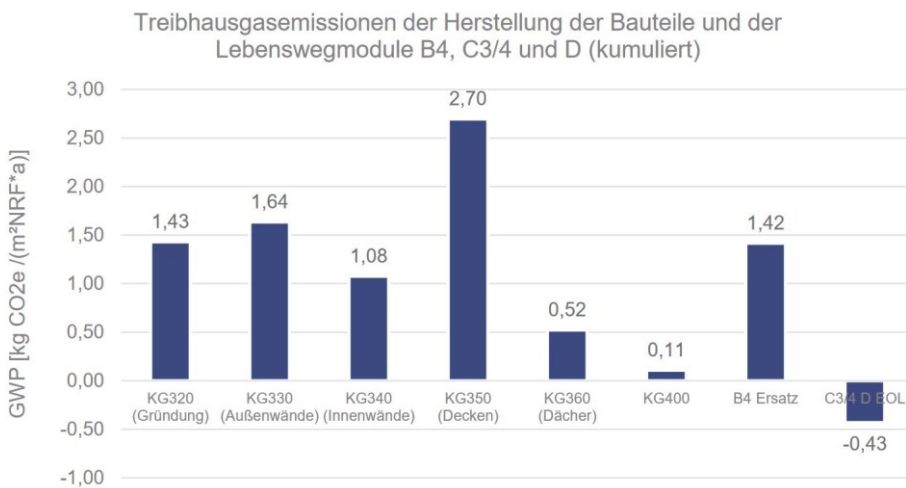


Abbildung 8.9: Treibhausgasemissionen nach Bauteilen (Braune, Ekhvaia und Quante, 2021)

Bei der ökologischen Betrachtung ist es entscheidend, die ganzheitliche Perspektive nicht außer Acht zu lassen. Ein Bauteil sollte nicht nur auf die Optimierung seiner ökologischen Eigenschaften fokussiert sein, sondern auch besonders die Aspekte berücksichtigen, die während der Nutzungsphase eine positive Wirkung haben. Hierzu zählen beispielsweise die vorteilhaften physikalischen Eigenschaften des Betons, wie seine hohe Speichermasse, die zur thermischen Aktivierung beiträgt, sowie seine hohe Druckfestigkeit, die für die Tragfähigkeit von Bedeutung ist. Für die modulare Bauweise, die oft einen hohen Vorfertigungsgrad erfordert, bietet die flexible Formbarkeit des Betons klare Vorteile. Diese Eigenschaft eignet sich auch besonders gut für das Einbetten von Rohrsystemen. Es obliegt somit dem Planer die angemessene Gewichtung und Bedeutung bestimmter Bauteileigenschaften für das jeweilige Bauvorhaben sinnvoll zu wählen und in die Planung einzubinden.

8.2 Ökonomische Bewertung

Die ETA-Fabrik in Darmstadt wurde nach 3 Jahren Planungszeit und 1,5 Jahren Bauzeit im Jahre 2016 fertiggestellt. Im Rahmen dieser Dissertation soll nun isoliert für die ETA-Fassade, die nicht nur als Fassade fungiert, sondern auch an dem Energiekreislauf des Gebäudes angebunden ist, eine Kostenanalyse durchgeführt werden. Dabei werden die tatsächlich entstandenen Kosten berücksichtigt, die sich aus Schlussrechnungen der beteiligten ausführenden Unternehmen ergeben. Im Vergleich dazu dienen die aktuellen BKI-Kostenwerte von 2023 als Referenz, um die Kosten der ETA-Fassade in Bezug auf die entsprechenden Kostengruppen und -arten gemäß DIN 276 auf nationaler Ebene zu verorten. Durch diese Vorgehensweise wird es möglich, die ökonomischen Aspekte der ETA-Fassade im Kontext des Gesamtprojekts zu analysieren und zu bewerten.

Im Bauwesen werden Kostenanalysen in diverse Stufen durchlaufen, um die finanziellen Aspekte eines Bauprojekts zu identifizieren und zu kontrollieren (DIN 276, 2018):

Kostenschätzung:

Die Kostenschätzung bildet den ersten Schritt, bei dem die Baukosten auf Basis von Erfahrungswerten vergleichbarer Projekte oder vorläufigen Mengen- und Kostenannahmen abgeschätzt werden. Es ist eine vorausschauende Einschätzung, um frühzeitig einen Überblick über die finanzielle Dimension des Projekts zu gewinnen.

Kostenberechnung:

Darauf aufbauend folgt die präzisere Kostenberechnung, bei der die Materialmengen, Arbeitsleistungen und Einheitspreise für die einzelnen Bauelemente und -gewerke exakt ermittelt werden.

Kostenvergleich:

Beim Kostenvergleich erfolgt eine Abstimmung der geplanten Kosten mit dem verfügbaren finanziellen Mitteln, um sicherzustellen, dass sämtliche Ausgaben im vorgegebenen Kostenrahmen verbleiben.

Kostenkontrolle/-management:

Hierbei werden die tatsächlichen Kosten fortlaufend mit den ursprünglichen Kalkulationen verglichen. Jegliche Abweichungen werden untersucht, und es werden gezielte Maßnahmen ergriffen, um die Kosten zu optimieren und das Budget einzuhalten.

Abschlusskostenanalyse:

Nach Projektabschluss erfolgt die Abschlusskostenanalyse, bei der die tatsächlichen Kosten mit den vorhergehenden Kalkulationen verglichen werden, um etwaige Abweichungen zu ermitteln. Dies bietet die Möglichkeit, künftige Kostenschätzungen zu verbessern und aus den gewonnenen Erkenntnissen zu lernen.

Die DIN 276 beschreibt zusätzlich die für dieses Kapitel relevante Kostenfeststellung, bei der die endgültigen Kosten in der Kostengruppensystematik ermittelt werden. Die Kostenfeststellung ist Teil der Abschlusskostenanalyse und beruht auf geprüften Abrechnungsbelegen, wie beispielsweise den Schlussrechnungen der beteiligten ausführenden Unternehmen. Die Kostenfeststellung erfolgt dabei durch eine Aufschlüsselung der Gesamtkosten nach Kostengruppen (KG) bis zur 3. Ebene der Kostengliederung. Diese Systematik bietet damit eine standardisierte Grundlage, um die Kosten verschiedener Projekte vergleichbar zu machen. (DIN 276, 2018)

Im Rahmen der festzustellenden Kosten der ETA-Fassade, ist die Ebene der Bauwerkskosten, die die Summe der KG 300 und 400 darstellt, heranzuziehen. Die KG 300 bezieht sich dabei auf die Baukonstruktion und die KG 400 auf die technischen Anlagen. Die ETA-Fassade lässt sich durch ihre Multifunktionalität Bereichen aus beiden Kostengruppen zuordnen. Als vorgehängte, hinterlüftete Fassade mit tragender Funktion, ist sie bei genauerer Betrachtung auf 2. und 3. Ebene der Kostengliederung der KG 330 (Außenwände/vertikal außen) und schließlich der KG 331 (tragende Außenwände) zuzuordnen. Zusätzlich dient sie durch integrierte wassergeführte Rohrsysteme zur Kühlung und Beheizung der Halle und kann somit auf 2. Ebene der KG 420 (Wärmeversorgungsanlagen) und auf 3. Ebene der KG 422 (Wärmeverteilnetze) und KG 423 (Raumheizflächen) zugeordnet werden.

Die Schlussrechnungen, die der KG 300 und 400 zuzuordnen sind, stammen vom Dezernat V der TU Darmstadt (Baumanagement und Technischer Betrieb), die bei der Projektabwicklung der ETA-Fabrik als Bauherr fungierte und in der Planung und Bauphase beteiligt war, sowie das damit einhergehende Kostenmanagement übernommen hatte.

Die Schlussrechnungen beziehen sich auf Material- und Montagekosten der thermisch aktivierten Fassade und der dazugehörigen Hydrauliksysteme. Dabei waren die folgenden Unternehmen beteiligt:

- Ducon Europe GmbH & Co. KG, Darmstadt (Fertigteilfassade) (DUCON Europe GmbH & Co. KG, 2015)
- Bietergemeinschaft RIB RÖSER Ingenieurbeton, Neresheim-Dorfmerkingen und Franz Traub GmbH & Co. KG, Aalen-Ebnat (Normalbeton inkl. Bewehrung und Mineralschaum) (RIB Röser Ingenieurbeton, 2015)

- P.V. Betonfertigteilewerke GmbH, Nordhausen (Unterkonstruktion VHF) (P.V. Betonfertigteilewerke GmbH, 2016)
- AUMA-TEC GmbH, Suhl (Hydraulik) (AUMA-TEC Ausbau-, Umwelt- und Anlagen-Technik GmbH, 2016)

Auf Grundlage der Schlussrechnungen wurden der Kostenkennwert für die Fassade ermittelt. Dieser beschreibt das Verhältnis der Kosten zur entsprechenden Bezugseinheit. Gemäß DIN 276 sind die Kosten der KG 331 auf die Einheit „Außenwandfläche“ [m² AWF] und die der KG 422 und 423 auf „Brutto-Grundfläche“ [m² BGF] zu beziehen. Im Folgenden werden die Kosten für die ETA-Fassade nach den Fassadenbestandteilen aufgeschlüsselt (siehe Abbildungen 8.10 und 8.11) und schließlich aggregiert sowie den entsprechenden Kostengruppen zugeordnet.

Die nachstehenden Abbildungen spiegeln die Kosten je Bezugseinheit für einzelne Komponenten der Fassade und der für die thermische Aktivierung erforderliche Hydraulikkomponenten wider. Die Fassade wird nach Ihren Hauptkomponenten bzw. Bauteilschichten aufgeteilt:

- Betonfassade Innen
- Dämmung
- Bauteiltemperierung
- Betonfassade Außen
- Zuleitungen thermische Aktivierung

Die höchsten Kostenanteile sind der tragenden „Betonfassade Innen“ zuzuordnen. Insbesondere die Herstellung der Fertigteilelemente und die notwendige Bewehrung sind mit 423,3 €/m² AWF äußerst kostenintensiv. Ähnlich sieht es bei der „Betonfassade Außen“ aus. Dort stellen die Fertigteilelemente ebenfalls den größten Kostenposten mit 207,4 €/m² AWF dar.

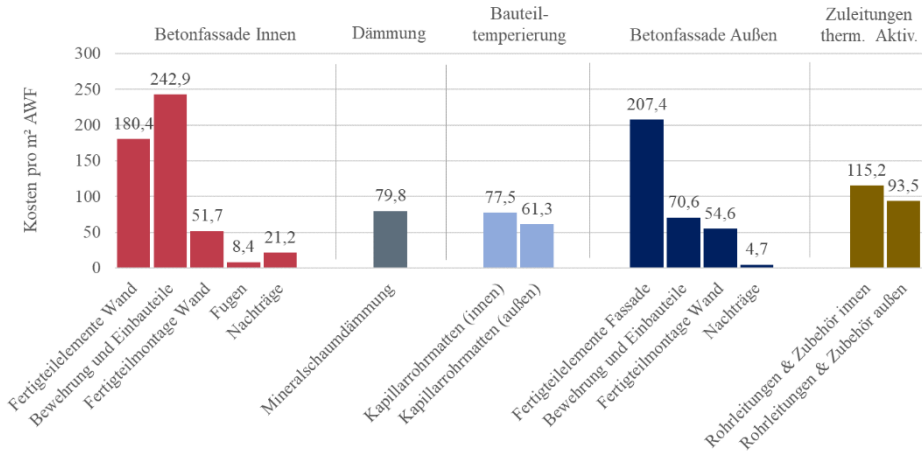


Abbildung 8.10: Kostengliederung nach Fassadenbestandteilen

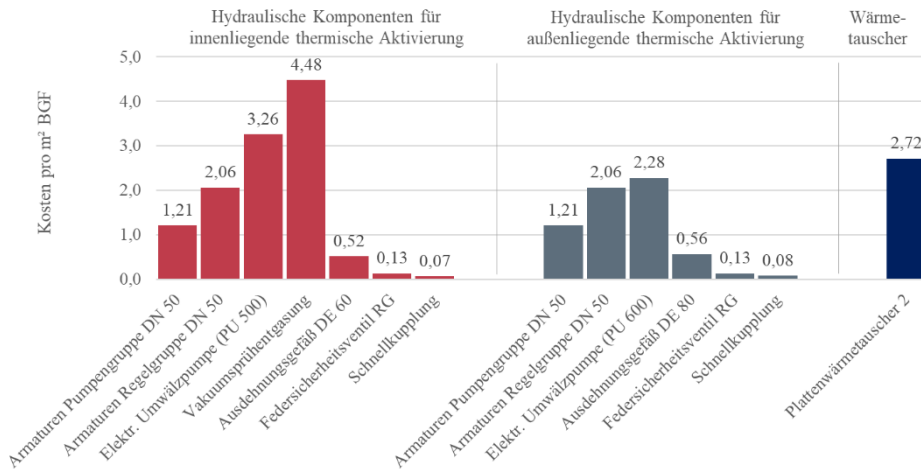


Abbildung 8.11: Kostengliederung nach Hydraulikbestandteilen

Schwierig ist die Zuordnung der Bauteiltemperierung und der entsprechenden Zuleitungen. Die Kapillarrohrmatten sind fester Bestandteil der Fassade und Teil der untersuchten Funktion als thermisch aktives Bauteil. Ziel ist konventionelle VHF mit der thermisch aktivierten Fassade gegenüberzustellen. Aus diesem Grund wurde entschieden, die Bauteiltemperierung und ihre Zuleitungen auch im Zuge der Kostenfeststellung fassadenintegriert zu betrachten und mit Bezug auf 1 m² AWF umzurechnen. Mit dieser

Vorgehensweise entfällt die Zuordnung in KG 423 (Raumheizflächen). Im späteren Vergleich mit den Kostenkennwerte nach BKI ist die KG 423 jedoch anteilig heranzuziehen. Abbildung 8.11 umfasst hingegen, alle Hydraulikkomponenten die nicht der Bezugseinheit „m² AWF“ zugeordnet werden können, aber die hydraulische Vernetzung der innen- und außenseitigen Rohrsysteme sicherstellen. Hierzu zählen u.a. Umwälzpumpen, Regel- sowie Pumpengruppen. Die Kosten dieser Komponenten werden mit Hilfe der Brutto-Grundfläche umgerechnet. Dabei stellt sich heraus, dass die Vakuumsprühentgasung sowie die Umwälzpumpen den größten Einfluss auf die Kosten nehmen.

Im Zuge der beschriebenen Umrechnungen auf die jeweiligen Bezugseinheiten wurden folgende Flächen einkalkuliert:

- Außenwandfläche gesamt: 830,47 m²
- thermische Aktivierte Außenwandfläche innen: 227 m²
- thermische Aktivierte Außenwandfläche außen: 24 m²
- Brutto-Grundfläche gesamt: 1.450 m²
- Brutto-Grundfläche ETA-Fabrik-Halle: 619,4 m²

Abbildung 8.12 schlüsselt die Kosten der KG 331 und 422 auf. Mit den vorstehend beschriebenen Komponenten der Fassade und der Hydraulik ergeben sich für die KG 331 Kosten von ca. 1.269 €/m² AWF und für die KG 422 von ca. 20,8 €/m² BGF. Diese Werte werden nun mit Referenzwerten verglichen.

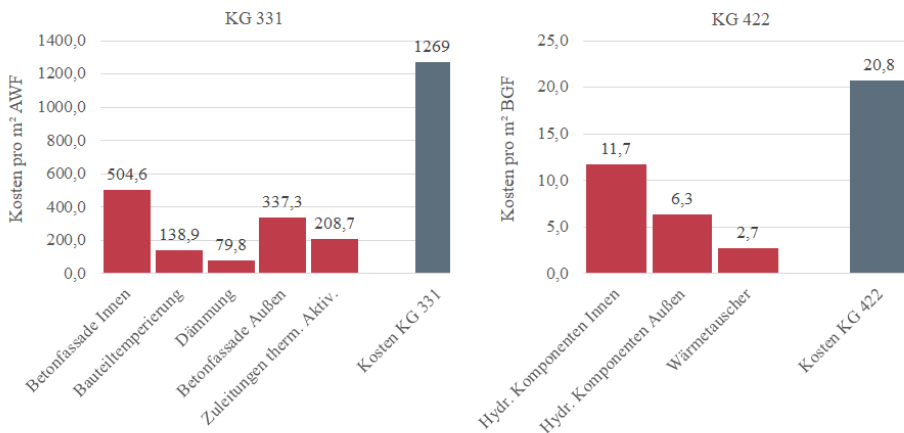


Abbildung 8.12: Aggregation und Aufschlüsselung nach Kostengruppen

In den Baukosteninformationszentren werden umfassende Datenbanken mit den Baukosten abgeschlossener Bauprojekte zur Verfügung gestellt. Damit die Projektbeteiligten die statistischen Kostenkennwerte nutzen können, sind diese in den BKI-Handbüchern zusammengefasst. Diese Handbücher dienen als Kompendien für Baukosten, die sich auf Gebäude, Bauelemente und Positionen (Leistungsbereichen) beziehen. Die BKI bieten Orientierungspunkte und Referenzwerte für die Kostenkalkulation und ermöglichen es, realistische Budgets zu erstellen und finanzielle Risiken besser einzuschätzen. (BKI, 2023a) (BKI, 2023b)

Im Zuge der ökonomischen Bewertung der ETA-Fassade wurde auf die statistischen Kostenkennwerte auf Gebäude- und Bauelementebene der BKI-Handbücher zurückgegriffen. Diese Kostenkennwerte basieren auf dem Stand des 1. Quartals 2023 und beinhalten den Bundesdurchschnitt einschließlich 19 % Mehrwertsteuer. Die Identifizierung der geeigneter Referenzwerte erfolgte in Abhängigkeit von der spezifischen Gebäudeart. Im Falle der ETA-Fabrik diente die Gebäudeart "Industrielle Produktionsgebäude in Massivbauweise" als passende Referenz. Die von der BKI aufgeführten Kostenkennwerte sind als Mittelwerte zu verstehen, die zusammen mit einem Streubereich (von-/bis-Werte) unter Berücksichtigung der Standardabweichung angegeben werden. Dadurch wird die Varianz innerhalb der Kostenkennwerte berücksichtigt und ermöglicht eine realistische Einschätzung der finanziellen Bandbreite für das jeweilige betrachtete Bauelement. (BKI, 2023a)

Tabelle 8.4: BKI-Kostenkennwerte für die Gebäudeart „Industrielle Produktionsgebäude, Massivbauweise“

Kostengruppe		€/Einheit		
		von	Mittel	bis
331	Tragende Außenwände [m ² AWF]	180	460	1290
422	Wärmeverteilstetze [m ² BGF]	20	24	35
423	Raumheizflächen [m ² BGF]	14	29	51
unter Berücksichtigung des Bundeskorrekturfaktors – Stadt: Darmstadt (Faktor: 1,067)				
331	Tragende Außenwände [m ² AWF]	192,06	490,82	1376,43
422	Wärmeverteilstetze [m ² BGF]	21,34	25,61	37,35
423	Raumheizflächen [m ² BGF]	14,94	30,94	54,42

Tabelle 8.4 listet die BKI-Kostenkennwerte für die genannten Kostengruppen auf und berücksichtigt ebenso den Bundeskorrekturfaktor. Der Bundeskorrekturfaktor ist eine Kennzahl, die Aufschluss darüber gibt, wie sich die Baukosten in einer bestimmten Region Deutschlands im Vergleich zum Bundesdurchschnitt verhalten. Für die Stadt Darmstadt beträgt der aktuelle Bundeskorrekturfaktor 1,067. Dies bedeutet, dass die Baukosten in Darmstadt etwa 6,7 % über dem Durchschnittswert für Deutschland liegen. (BKI, 2023b)

Für die ETA-Fassade wurden Kosten in Höhe von 1.296 € pro m² AWF (KG 331) und 20,8 € pro m² BGF (KG 422) ermittelt. Jedoch müssen die 19 % Mehrwertsteuer berücksichtigt werden, um eine korrekte Gegenüberstellung zu ermöglichen. Dadurch ergeben sich Brutto-Kosten von 1.542,24 € pro m² AWF (KG 331) und 24,75 € pro m² BGF (KG 422).

Weiterhin ist bei der Analyse der Kosten für die ETA-Fassade auch der Baupreisindex zu berücksichtigen, der Auskunft über die Preisentwicklung im Bauwesen gibt. Der Baupreisindex berücksichtigt aktuellen Entwicklungen, einschließlich der Lage auf dem Immobilienmarkt, dem Markt für Bauleistungen und den Rohstoffmärkten. (Hessisches Statistisches Landesamt, 2023)

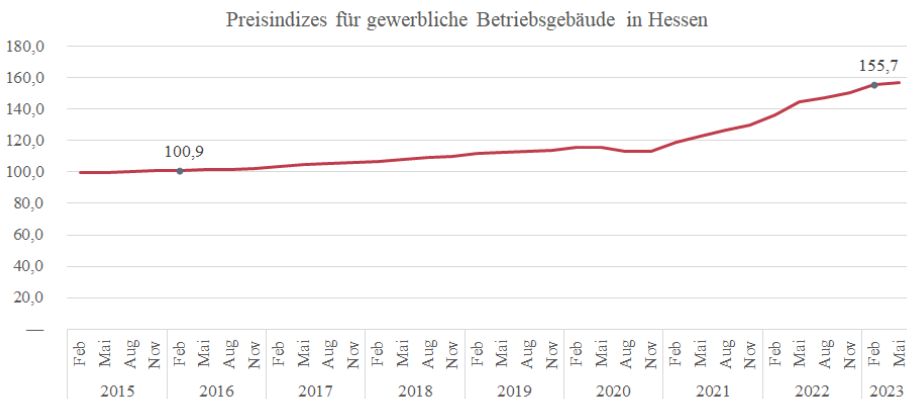


Abbildung 8.13: Preisindex für gewerbliche Betriebsgebäude in Hessen (2015 = 100) nach (Hessisches Statistisches Landesamt, 2023)

Mit folgender Formel lässt sich die prozentuale Veränderung zwischen dem Jahre 2016 und 2023 berechnen (BKI, 2023b):

$$\text{Prozentuale Veränderung} = \left[\left(\frac{\text{Index,neu}}{\text{Index,alt}} \right) \cdot 100 \right] - 100 \quad (8.2)$$

Für die Berechnung wurden, wie in Abbildung 8.13 aufgeführt, die Preisindizes von Februar 2016 und Februar 2023 herangezogen, woraus sich eine prozentuale Veränderung von +54,31 % ergibt. Für die ETA-Fassade bedeutet das, dass die Kosten um diesen prozentualen Anteil aufgestockt werden müssen. Somit ergeben sich folgenden Kosten:

- KG 331: 2.379,85 €/m² AWF
- KG 422: 38,19 €/m² BGF

Bezüglich der Kostengruppe KG 331 fällt auf, dass die ermittelten Kosten der ETA-Fassade deutlich über dem Mittelwert (Überschreitung um das 4,85-fache) und Bis-Wert (Überschreitung um das 1,73-fache) der Kostenkennwerte für KG 331 liegen. Es ist jedoch wichtig zu beachten, dass in diesen Kosten auch Komponenten zur Bauteiltemperierung enthalten sind, die normalerweise unter der KG 423 aufgeführt werden. Diese Elemente machen in KG 331 einen Anteil von 638,12 € (inkl. MwSt. und Veränderung Preisindex) aus. Würde dieser Kostenanteil außer Acht gelassen werden, lägen die Kosten im Streubereich des Kostenkennwertes von KG 331 bei 1.741,73 €/m² AWF).

Für die Kostengruppe KG 422 liegen ebenfalls Überschreitungen der Kostenkennwerte gemäß Tabelle 8.4 vor. Mit 38,19 €/m² BGF wird der Mittelwert um 49 % und der Bis-Wert um ca. 2 % überschritten, was maßgebend aus den hohen Kosten der Vakuumsprühentgasung resultiert.

Die Diskrepanzen zwischen den Baukosten der ETA-Fabrik bzw. -fassade und den Kostenwerten der BKI ergeben sich aus verschiedenen Kosteneinflüssen, insbesondere aufgrund besonderer Nutzungsanforderungen und einer hochwertigen Bauwerksqualität. Die ETA-Fabrik weist funktionale und konstruktive Besonderheiten auf, wie die innovative Abwärmenutzung durch Integration von wassergeführten Systemen in zwei Ebenen der Fassade (innen- und außenliegend), die miteinander verknüpft sind und gezielt angesteuert werden können. Die Anforderungsklasse kann daher als sehr hoch eingestuft werden. Zusätzlich ist zu beachten, dass eine solche thermisch aktivierte Fassade zuvor noch nicht baulich umgesetzt wurde, wodurch die ETA-Fassade als "Mockup" betrachtet werden könnte. Die erstmalige bauliche Umsetzung führte dazu, dass Optimierungsvorgänge aufgrund fehlender Erfahrungswerte hinsichtlich der verbauten Mengen, geometrischen Dimensionierungen und Montageleistungen nicht angesetzt werden konnten. Darüber hinaus müssten die energetischen Vorteile, die durch die Fassade erzeugt werden (wie die energieeffiziente Abwärmenutzung), monetär umgerechnet und im Gesamtkontext der Kostenfeststellung für die komplette ETA-Fabrik zusätzlich evaluiert werden.

9 Fazit

9.1 Wesentliche Ergebnisse

Nach umfangreicher messtechnischer und simulativer Datenanalyse zur thermisch aktivierten Fassade der ETA-Fabrik sowie kritischer Auseinandersetzung mit dem aktuellen Stand der Wissenschaft im Bereich „thermisch aktivierte Fassaden“ konnten die ursprünglichen Forschungsfragen detailliert untersucht und beantwortet werden. Die nachfolgende Auflistung stellt die bereits in Kapitel 1 vorgestellten Forschungsfragen dar:

1. Wie lassen sich die übergeordneten Begriffe „Energieeffizienz“ und „Energieflexibilität“ auf die Fassadenebene abstrahieren und wie sehen die methodischen Festlegungen zur Quantifizierung dieser Zielgrößen aus?
2. Durch welche Merkmale zeichnet sich eine thermisch aktivierte Fassade (TAF-System) aus und welchen Nutzen bieten diese?
3. Liegen Potenziale auf Industriegebäude-Ebene in Verbindung mit der Fassade vor und wie sind diese definiert?
4. Welche charakteristischen Werte sind maßgebende Einflussgrößen für die energetische Optimierung der ETA-Fassade? Welcher Parameter übt den stärksten Einfluss aus?
5. Wie hoch ist der Nachhaltigkeitsgrad der ETA-Fassade in Bezug auf Ökologie und Ökonomie?

Die ersten beiden Forschungsfragen wurden durch die Ausführungen in Kapitel 2 und 3 beantwortet. In diesem Zusammenhang wurde eine klare Definition der Energieeffizienz für die Fassade erarbeitet. Dabei erfolgte eine Unterscheidung zwischen konventionellen Fassaden und thermisch aktivierten Fassadensystemen. Für konventionelle Fassaden wurde der monatliche Transmissionswärmeverlust gemäß DIN 18599-2 als Maßstab genutzt. Bei thermisch aktivierten Fassadensystemen hingegen wurde die Energieeffizienz mithilfe der Kennzahl "EER" (Energy Efficiency Ratio) definiert. Diese Kennzahl beschreibt das Verhältnis zwischen der erzielten thermischen Leistung und der aufgewendeten elektrischen Leistung. Die Unterscheidung zwischen den beiden Ansätzen ergibt sich aus der Integration wassergeführter Rohrsysteme in der ETA-Fassade, deren Durchfluss durch eine Umwälzpumpe gesteuert wird.

Des Weiteren wurde die Definition und Quantifizierung der Energieflexibilität näher beleuchtet. Innerhalb des Kontextes des energetischen Flexibilitätspotenzials stellt die thermisch aktivierte Fassade eine spezifische Möglichkeit zur Leistungsanpassung dar, die als technisches Potenzial betrachtet wird. Zur Steigerung dieses technischen Energieflexibilitätspotenzials auf Bauteilebene wurden zwei mögliche Hardwarelösungen identifiziert:

- [a] „Schaffen und/oder Vergrößern der Speicherkapazitäten“ und
- [b] „Schaffung von Systemredundanzen und/oder Bivalenz“

Die Maßnahme [a] umfasst unter anderem die Integration von systemimmanenten Speichern durch Erhöhung der thermischen Speicherfähigkeit innerhalb eines Bauteils, beispielsweise durch den Einsatz von Phasenwechselmaterialien (PCM) in Gebäudebauteilen. Diese Flexibilisierungsmaßnahme wurde in den Kapiteln 6 und 7 genauer betrachtet, analysiert und führte zur Identifikation einer potenziell flexibilisierbaren Energiemenge. Weitere Einzelheiten dazu finden sich im fortlaufenden Abschnitt des Fazits.

Im Zuge des Kapitels 4 konnten mit Hilfe eines selbst formulierten R-Skripts statistische Daten aus der Forschungsdatenbank ENOB:DataNWG abgerufen werden. Die Analyse der Ergebnisse ergab, dass von den 5.630 erfassten Nichtwohngebäuden insgesamt 1.346 Gebäude der Kategorie "Produktions-, Werkstatt-, Lager- oder Betriebsgebäude" (Kategorie 8) zugeordnet werden konnten. Basierend auf dieser Klassifizierung wurden 46 Auswertungen im Rahmen dieser Dissertation durchgeführt. Aus den Auswertungen lässt sich entnehmen, dass etwa 49 % der Gebäude in dieser Kategorie für industrielle und gewerbliche Produktions- und Verarbeitungsprozesse, Lagerung, Logistik und als Rechenzentren genutzt werden. Lediglich 1 % der Gebäude der Kategorie 8 weisen einen energetischen Standard (Passivhausstandard, EH 55 oder EH 70) auf. Zudem wurde festgestellt, dass etwa 92 % der Gebäude seit 2010 keinerlei energetische Maßnahmen an ihrer Gebäudehülle erfahren haben. Diese Erkenntnis deutet auf ein erhebliches Potenzial für die Implementierung neuer Fassadenkonzepte hin. In Bezug auf die Gebäudehülle stellte sich heraus, dass die massive Bauweise einen Anteil von 66 % ausmacht, während die Leichtbauweise lediglich 13 % repräsentiert. Fassadensysteme wie Glasfassaden, Elementfassaden und Pfosten-Riegel-Fassaden stellen einen Anteil von 1,6 % dar. Im Bereich der massiven Bauweise dominiert die einschalige Konstruktion aus schweren Baustoffen wie Beton mit einem Anteil von 54 % und bei Betrachtung der leichten Bauweise zeigten sich Sandwichpaneele mit einem Anteil von etwa 80 % als vorherrschend.

Zudem wurden in Kapitel 4 unter Einbeziehung weiterer Quellen die Abwärmelasten und branchenspezifische klimatische Anforderungen ermittelt. Hierbei wurde festgestellt, dass die Metallindustrie die höchsten Abwärmelasten aufweist, die je nach Prozesslinie

zwischen 200 und 400 W/m² liegen. In diesem Bereich erweist sich eine bivalente Kühlung über die Gebäudehülle zur ergänzenden nächtlichen Auskühlung als sinnvoll. Mit den in Kapitel 4 generierten Ergebnissen konnte die dritte Forschungsfrage beantwortet werden.

Kapitel 5 widmete sich der Beschreibung der ETA-Fassade, das in dieser Dissertation eingehend untersucht wurde. In diesem Abschnitt wurden die konstruktiven, materialbezogenen und bauphysikalischen Eigenschaften ausführlich erläutert, einschließlich besonderer Merkmale wie dem Sensormonitoring und der hydraulischen Vernetzung mit der Prozesslinie auf Gebäudeebene. Der Schwerpunkt lag jedoch auf der Beschreibung der durchgeführten Messungen an der ETA-Fassade im März 2018 im Rahmen einer sog. „Produktionswoche“. Während dieser Produktionswoche wurden insgesamt drei Messungen durchgeführt, wobei die erste Messung die nächtliche Kühlung isoliert über die Fassade darstellte. Ziel dieser Messung war es, energetische Schlussfolgerungen zu ziehen und die Kühlleistung des Fassadenmoduls zu identifizieren. Die Ermittlung der thermischen Leistung erfolgte anhand der Vor- und Rücklauftemperatur, da zum Zeitraum des eingependelten Zustands keine verfügbaren Thermografiebilder vorlagen, aus denen die Oberflächentemperaturen hätten abgeleitet werden können. Infolgedessen konnte in dieser Analyse lediglich die thermische Leistung auf Ebene der Rohrsysteme in Interaktion mit dem umgebenden Beton (Übertragung über Wärmeleitung) erfasst werden. Dabei wurden die Wärmeübertragungsmechanismen Konvektion und Wärmestrahlung, die maßgeblich zur tatsächlichen Kühlleistung der Fassade beitragen, nicht berücksichtigt. Besonders der Wärmetransport durch Strahlung spielt eine wichtige Rolle bei der Wärmeübertragung. Diese in der Berechnung der Kühlleistung nicht einbezogenen Wärmeübertragungsmechanismen wurden in der hygrothermischen Simulation durch eine explizite Strahlungsbilanz einkalkuliert. Die aus der Messung bzw. der Vor- und Rücklauftemperatur resultierende durchschnittliche Kühlleistung im eingependelten Zustand beläuft sich auf 44,09 W/m² für die Innenseite der ETA-Fassade und -45,41 W/m² für die Außenseite.

Die Kapitel 6 und 7 konzentrierten sich hauptsächlich auf die Simulation und Untersuchung der ETA-Fassade. Zu Beginn wurden potenzielle energetische Optimierungsansätze sowohl auf Baustoff- als auch Bauteilebene formuliert. Daraus wurden Parameter abgeleitet, deren Auswirkungen auf die thermische Leistung der ETA-Fassade in Form einer Parameterstudie bewertet werden sollten. Die ETA-Fassade wurde zunächst in ihrem aktuellen Zustand mit Hilfe von WUFI 2D modelliert und simulativ analysiert. Die Kühlleistung der ETA-Fassade wurde auf Basis der aufgenommenen Wärme an der Innenseite auf 25,99 W/m² und an der Außenseite (abgegebene Wärme) auf -84,29 W/m² berechnet. Wie bereits vorstehend erläutert, führen die unterschiedlichen Ansätze zur Bestimmung der thermischen Leistung zu abweichenden Ergebnissen zwischen den Messungen und der Simulation. Diese Ergebnisse beruhen auf verschiedenen Betrachtungsebenen. Die Messungen erlauben eine

Effizienzermittlung auf Rohrebene, während die Simulation die Oberflächenebene berücksichtigt und die Wärmestromdichte im Austausch mit dem Raum bzw. mit der Außenumgebung analysiert. Ein weiterer bedeutender Unterschied zeigt sich darin, dass die simulative Analyse die Auswirkungen auf die Effizienzsteigerung berücksichtigt hat. Hierbei wurden stets zwei Modelle miteinander verglichen: eines "ohne thermische Aktivierung" und eines "mit thermischer Aktivierung". Durch die Berechnung der Differenz der integrierten Wärmestromdichten konnte festgestellt werden, welchen Einfluss die thermische Aktivierung auf die Energieeffizienz der ETA-Fassade hat. Ohne Anwendung dieser Differenzberechnung ergibt sich für die Innenseite der ETA-Fassade eine Kühlleistung von $31,21 \text{ W/m}^2$, während die Außenseite bei $-115,40 \text{ W/m}^2$ liegt. Diese Werte wären somit mit den Ergebnissen aus der messtechnischen Untersuchung vergleichbar.

Die Ergebnisse der Parameterstudie und deren Gegenüberstellung kann aus den Abbildungen 9.2 und 9.3 entnommen werden. Abbildung 9.1 zeigt eine Übersicht der im Rahmen dieser Dissertation untersuchten Varianten.

Parameterstudie	Variante	Parameterstudie	Variante
Referenzmodell	-	Wärmeübergangskoeffizient	$\alpha_{\text{Innenwand}} = 5$
Luftwechselrate Luftschicht	Luftwechsel 0	Innenwand	$\alpha_{\text{Innenwand}} = 10$
	Luftwechsel 10		$\alpha_{\text{Innenwand}} = 12$
	Luftwechsel 15	Überdeckung der Karomas_Innen	Überdeckung 10 mm
Jahressimulation	Luftwechsel 20		Überdeckung 35 mm
	Januar	Fluidtemperaturen Karomas	$T_{\text{Ki}} = 12 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\text{Ka}} = -2 \text{ }^\circ\text{C}$
	Februar		$T_{\text{Ki}} = 14 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\text{Ka}} = 0 \text{ }^\circ\text{C}$
	März		$T_{\text{Ki}} = 16 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\text{Ka}} = 2 \text{ }^\circ\text{C}$
	April	Rohrsystemdimensionierung	DM 4,5_Ab 20_PP
	Mai		DM 3,35_Ab 15_PP_in Putz
	Juni		DM 10_Ab 80_KU
	Juli		DM 10_Ab 80_KUmWLP
	August	Oberflächenstruktur	Rillen mit $d_{\text{om}} = 10 \text{ mm}$
	September	Wärmeübergangskoeffizient Karomas (Fluid-Rohr)	$\alpha_{\text{Fluid-Rohr}} = 100$
	Oktober		$\alpha_{\text{Fluid-Rohr}} = 1000$
	November		$\alpha_{\text{Fluid-Rohr}} = 5000$
Dezember			

Abbildung 9.1: Parameterstudie - Zuordnung der Varianten

An der Innenseite wird deutlich, dass die Fluidtemperaturen den größten Einfluss ausüben. Allerdings entsprechen Temperaturen von lediglich $12 \text{ }^\circ\text{C}$, was einer Differenz von $10 \text{ }^\circ\text{C}$ zwischen Fluid- und Raumtemperatur entspricht, nicht mehr dem LowEx-Prinzip. Letzteres zielt darauf ab, Temperaturdifferenzen zwischen Raum und Fluid minimal zu halten und dennoch eine effektive Kühlleistung sicherzustellen. Auf der Außenseite hingegen erweisen sich die Fluidtemperaturen des Referenzsystems als besonders wirkungsvoll. Dies legt nahe, dass zur Optimierung der Fluidtemperaturen

keine festen Temperaturpaare festgelegt werden sollten, wie es in der Parameterstudie der Fall war. Insgesamt erzielt das Referenzsystem die besten Gesamtergebnisse.

Weiterhin ist zu erkennen, dass insbesondere die Positionierung der thermischen Aktivierung über die Höhe des zu kühlenden Raums relevant ist. Mit zunehmender Wandhöhe wird der Aufstieg warmer Luft entlang der Wandoberfläche begünstigt. Dies kann zu einer verstärkten Konvektion führen, wodurch der Wärmeübergangskoeffizient erhöht wird. Im oberen Bereich kann mit einer um ca. 46 % höheren Kühlleistung gerechnet werden. Diese Parametervariante wurde lediglich auf der Innenseite umgesetzt und wirkt sich somit nicht auf die Außenseite aus.

Im Falle des Wärmeübergangskoeffizienten zwischen Fluid und Rohrummantelung ergibt sich, dass das Verhältnis zwischen dem Wärmeübergangskoeffizienten und der Energieeffizienz exponentiell verläuft. Es liegt eine Verbesserung bis zu einem Wert von $500 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ (Referenz: $\alpha = 565 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$) vor. Danach bildet sich ein Plateau, auf dem keine wesentliche Verbesserung der Energieeffizienz mehr zu verzeichnen ist. Daher ist es nicht sinnvoll, den Volumenstrom durch die Umwälzpumpe weiter zu erhöhen, da dies keine relevanten Auswirkungen auf die Energieeffizienz hätte. Diese Schlussfolgerung gilt gleichermaßen für die Innen- und Außenseite.

Im Rahmen der Parameterstudie „Luftwechselrate Luftschicht“ wurden die Luftwechselraten der Hinterlüftungsebene zwischen 0 h^{-1} (ruhende Luftschicht) und 20 h^{-1} (stark belüftete Luftschichten) variiert. Es wird deutlich, dass die gewählten Luftwechselraten keinen Einfluss auf die Wärmestromdichteverteilungen bzw. Kühlleistungen der ETA-Fassade (Innen und Außen) ausüben. An dieser Stelle wurde zusätzlich zur Wärmestromanalyse die Feuchtebelastung (rel. Feuchte und Isoplethen) der unterschiedlichen Luftwechselraten innerhalb der Luftschicht als auch innerhalb der Dämmebene untersucht. Aus den Ergebnissen wird klar, dass ein erhöhter Luftwechsel tatsächlich zu einer Reduzierung der Feuchtebelastung führt. In den warmen Sommermonaten offenbart sich eine gegensätzliche Verhaltensweise: Es ist weniger Feuchte in der Luftschicht vorhanden, doch dafür steigt die Feuchtebelastung an der Dämmschicht deutlich an.

Ein weiterer Parameter stellt die „Oberflächenstruktur der außenliegenden Betonschale“ der ETA-Fassade dar. Dort wurde mit einer Strukturmatrize eine rillenförmige Oberfläche aus Designgründen gewählt. Es wird deutlich, dass eine solche Rippenform keinen wesentlichen Einfluss auf die Wärmeübertragung hat. Die Wärmestromdichte verteilt sich aufgrund der vorliegenden Temperaturwelligkeit heterogen. An der Außenoberfläche sind im Vergleich zur Referenzvariante (glatte Oberfläche) Temperaturdifferenzen von $0,097$ bis $-2,150 \text{ }^\circ\text{C}$ vorhanden. Dies ist für die außenseitige Betonschale, als unkritisch zu betrachten, da eine geringe Temperaturwelligkeit lediglich raumseitig zur Sicherstellung der Behaglichkeit anzustreben ist. Das EER beschreibt einen positiven Einfluss der Rillenstruktur. Dies ergibt sich durch die größere wärmeübertragende Fläche der rillenförmigen Oberfläche.

Im Falle der Rohrsystemdimensionierung und Rohrüberdeckung zeigt sich der größte Einfluss in Form einer Schwächung der Kühlleistung durch die Varianten mit der Kupferverrohrung. Die Kupfervariante weist Temperaturwelligkeiten auf, die durch die größeren Abstände zwischen den Rohren sichtbar werden. Aufgrund dieser größeren Abstände verfügt diese eine um 31 % kleinere wärmeübertragende Fläche, was zu einer geringeren Wärmeaufnahme und -abgabe führt. Zudem verfügt die Kupfervariante einen um das 3-Fache größeren Innendurchmesser, woraus sich deutlich kleinere Wärmeübergangskoeffizienten an der Innen- und Außenseite ergeben. Im Falle der Kupferverrohrung mit Wärmeleitblech geht aufgrund der konstruktiv bedingten Hinterlüftung und dem Einsatz von Gipskarton trotz der sehr guten Wärmeleitfähigkeit der Wärmeleitprofile Kühlleistung verloren. Im Vergleich zum Referenzmodell weist diese Konstruktionsweise eine um ca. 27 % niedrigere EERi auf.

Für die Kapillarrohrvariante mit größerem Innendurchmesser und Abstand zueinander, ergeben sich aufgrund der geringen Anzahl an verbauten Rohren lediglich kleine Einbußen der Kühlleistungen. Allerdings ist diese Konfiguration in der Lage, außen mehr Energie abzugeben als das Referenzsystem. Dies liegt an der höheren Oberflächentemperatur an der Außenseite, woraus sich eine größere langwellige Bauteilemission ergibt, die einen großen Einfluss auf die langwellige Strahlungsbilanz besitzt. Da der übertragene Wärmestrom proportional zur Temperaturdifferenz zwischen Rohrmantel/Fluid sowie zum Wärmeübergangskoeffizienten ist, ist hier mit einem geringeren Wärmestrom zu rechnen, sodass der Abkühlprozess „verlangsamt“ wird und die Oberflächentemperatur somit größer ist.

Die Reduzierung der Rohrüberdeckung auf 10 mm zeigt im Vergleich zum Referenzmodell eine Verbesserung von 8,73 %. Allerdings zeigt sich auch eine Verbesserung um 1,42 % bei einer Vergrößerung der Rohrüberdeckung auf 35 mm. Durch die größere Schichtdicke der Rohrüberdeckung ergibt sich ein größerer Wärmedurchlasswiderstand, woraus eine verzögerte Wärmeaufnahme resultiert. Die Untersuchung der Rohrüberdeckung erfolgte ausschließlich an der Innenseite der ETA-Fassade.

Um Rückschlüsse auf die monatliche Leistungsveränderung ziehen zu können, wurden Wetterdaten für Darmstadt aus dem Jahr 2018 abgerufen und monatlich für die Zeiträume der nächtlichen Auskühlung analysiert. Anhand der Diagramme lässt sich erkennen, dass die Monate „Juli“ und „August“ insgesamt die höchste Kühlleistung aufzeigen. In der heißen Jahreszeit ist die Wärmestromdichteverteilung an der Außenoberfläche des Bauteils am höchsten. Für den Monat Mai konnten lediglich Simulationsergebnisse unter Berücksichtigung einer Modellanpassung generiert werden. Hierbei musste ein Luftwechsel von 10 statt 5 h^{-1} angesetzt werden, damit die Feuchtebelastung unterhalb des Konvergenzkriteriums fällt. Demzufolge ist in den Sommermonaten ein Mindestluftwechsel von 10 h^{-1} für die Hinterlüftung sicherzustellen.

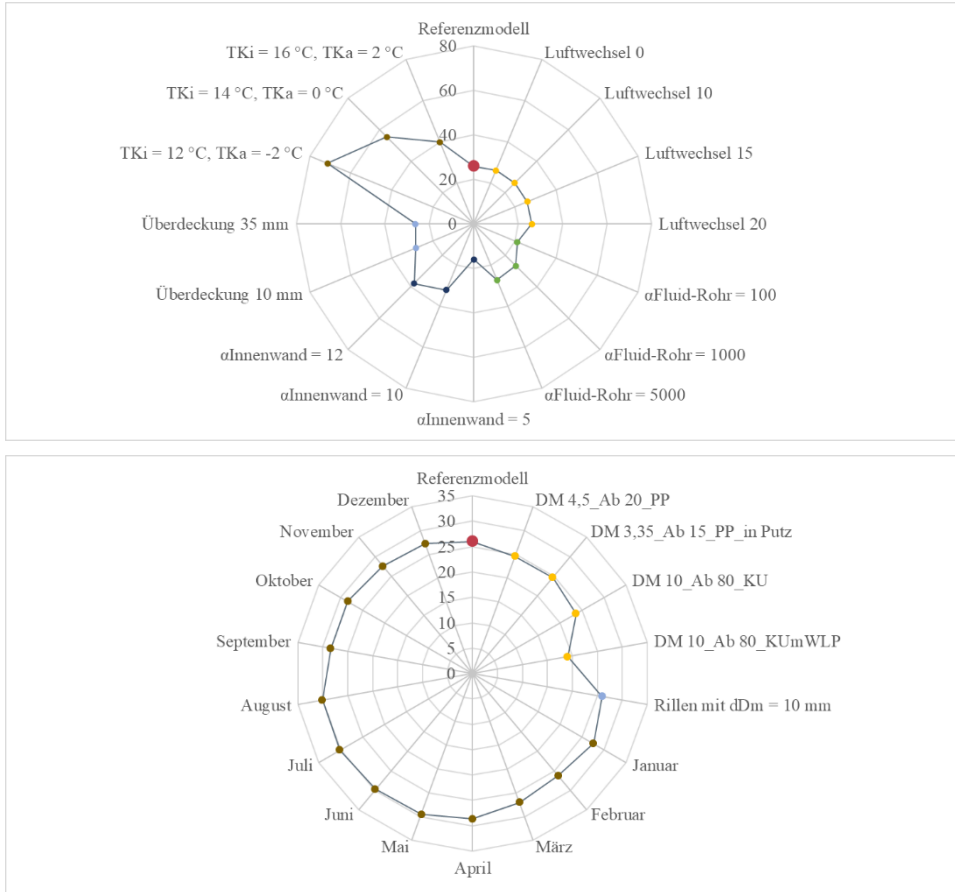


Abbildung 9.2: Ergebnisse Parameterstudie - Kühlleistung in W/m² der Innenseite

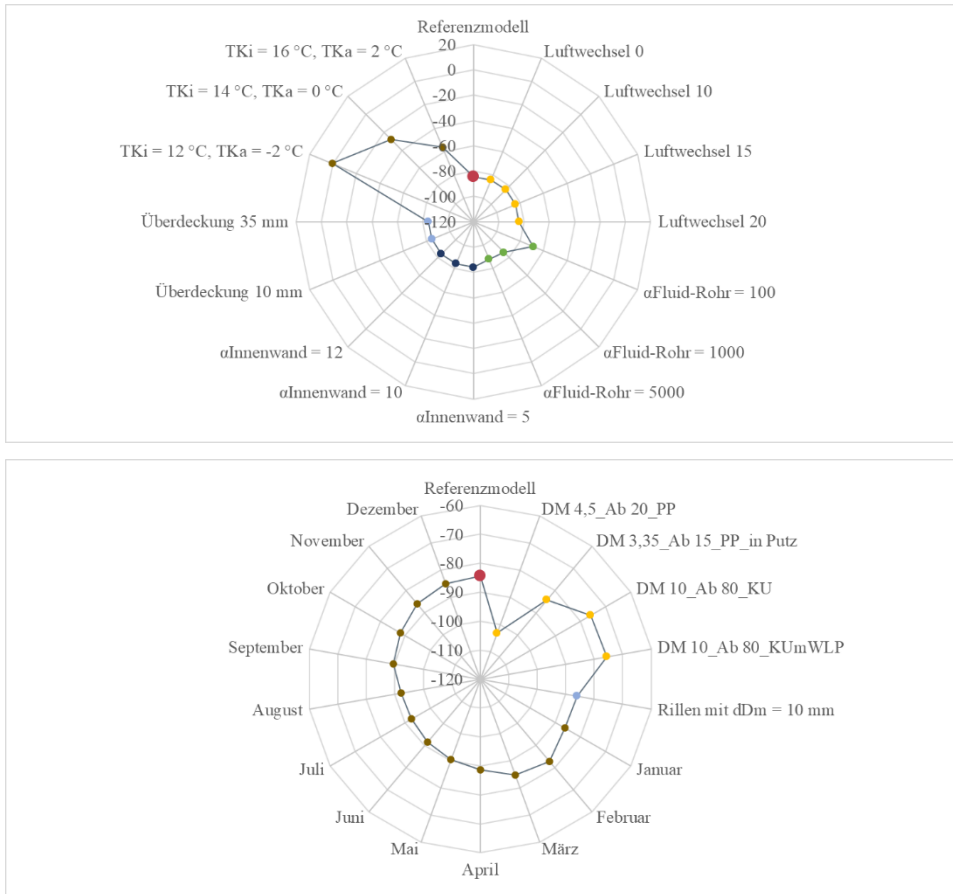


Abbildung 9.3: Ergebnisse Parameterstudie - Kühlleistung in W/m^2 der Außenseite

Im Zuge der materialspezifischen Parameterstudie wurden zur Steigerung der Wärmespeicherfähigkeit des Fassadensystems drei PCM-Gemische bewertet und dem Referenzsystem gegenübergestellt: PCM-Beton, PCM-Gipskarton und PCM-Putz. Dabei wurde in allen Fällen ein PCM-Volumenanteil von 30 Vol.-% angesetzt. Hierzu wurde eine dynamische Berechnung mit bestimmten Aktivierungs- und Deaktivierungszeiträumen der thermischen Aktivierung vorgenommen. Es konnte beobachtet werden, dass die max. Energieinhalte mit geringer werdenden Aktivierungszeiträumen stetig abnehmen, was aus den vorgelagerten Deaktivierungszeiträumen resultiert. Bei stetig kürzer werdenden Phasen der Deaktivierung, bleibt dem Baustoff weniger Zeit zum Regenerieren bzw. Einpendeln der Baustofftemperatur. Daraus lässt sich ableiten, dass bei der Entwicklung einer

Regelstrategie zur thermischen Aktivierung die Deaktivierungszeit als wesentlicher Faktor berücksichtigt werden sollte. Im Vergleich zum Referenzsystem zeigt sich für die Beton-PCM-Variante, dass innerhalb von 4 Stunden und bei einer Fluid-Temperaturdifferenz von 4 K ein um das nahezu 72-fache größere Wärmespeichervermögen erreicht werden kann. Dies verdeutlicht das Potenzial des untersuchten PCM-Beton-Gemischs in Bezug auf die Wärmespeicherung.

Die Ergebnisse der zwei PCM-Gipskarton- und PCM-Putz-Variante entsprechen einem Bruchteil des möglichen Wärmespeichervermögens des PCM-Beton-Gemisches. Dies resultiert aus der etwa doppelt so großen Rohdichte und 8-fach größeren aktivierten Baustofffläche des PCM-Beton-Gemisches.

Weiterhin wurde festgestellt, dass eine Aktivierungsdauer von 6 Stunden den optimalen Zeitraum für die effiziente Nutzung der Wärmespeicherfähigkeit darstellt. Das Ziel der Bestimmung der Wärmespeicherfähigkeit der PCM-Varianten lag in der Quantifizierung der Steigerung der Energieflexibilität. Es konnte identifiziert werden, dass mit einem ETA-Fassadenmodul im IST-Zustand eine flexibilisierbare Energie von $\Delta E_{\text{flex}} = 208,91$ kWh im Jahr genutzt bzw. zwischengespeichert werden kann. Im Vergleich dazu ermöglicht das PCM-Beton-Gemisch eine Flexibilisierung von 11.185,85 kWh pro Jahr. Die Variante mit PCM-Gipskarton weist einen Wert von $\Delta E_{\text{flex}} = 2.219,90$ kWh pro Jahr auf, während die PCM-Putz-Variante einen Wert von $\Delta E_{\text{flex}} = 2.079,93$ kWh pro Jahr erreicht. Mit den Kapiteln 5 bis 7 konnten die Forschungsfragen 3 und 4 beantwortet werden.

Die Klärung der letzten Forschungsfrage erfolgte im 8. Kapitel. Hierbei wurde zur gesamtheitlichen Betrachtung der ETA-Fassade zusätzlich eine ökologische und ökonomische Bewertung durchgeführt. Im Zuge der Ökologie konnten die Umweltwirkungen der einzelnen Baustoffe über eine digitale Ökobilanzierung mit One Click LCA nach Merk und einem Vergleich mit einer händischen Berechnung nach Ackermann aufgezeigt werden.

Für die ETA-Fassade resultierte aus der digitalen Ökobilanzierung ein Gesamt-GWP von 282.180,61 kg CO₂-Äq. Im Vergleich dazu führt die Berechnung nach Ackermann zu einem Gesamt-GWP von 329.871,78 kg CO₂-Äq. Die Ergebnisse aus One Click LCA weichen durch etliche erforderliche Vereinfachungen im Bilanzierungsprozess um 14,5 % von den genau ermittelten Ergebnissen aus der händischen Berechnung ab. Dabei konnte festgestellt werden, dass die Datenherkunft ein entscheidender Faktor für eine realitätsnahe Ökobilanzierung ist. Obwohl One Click LCA eine umfangreiche Auswahl an EPDs bietet, konnten für einige Baustoffe keine passenden EPDs gefunden werden. Aus diesem Grund war es notwendig, teilweise auf generische Daten zurückzugreifen, die lediglich Durchschnittswerte repräsentieren. Daraus ließ sich ableiten, dass mittels eines digitalen Ökobilanzierungstools, das primär für die Bewertung gesamter Gebäude konzipiert ist, auch gezielte Bauteil-Ökobilanzierungen durchgeführt werden können.

Allerdings sollte diese partielle Methode lediglich als Ersteinschätzung in frühen Planungsphasen herangezogen werden.

Die Kostenanalyse der ETA-Fassade wurde anhand von Schlussrechnungen der am Bau beteiligten ausführenden Unternehmen durchgeführt. Die Schlussrechnungen beziehen sich dabei auf Material- und Montagekosten der thermisch aktivierten Fassade und der dazugehörigen Hydrauliksysteme. Im Vergleich dazu dienten die aktuellen BKI-Kostenwerte von 2023 als Referenz, um die Kosten der ETA-Fassade in Bezug auf die entsprechenden Kostengruppen und -arten gemäß DIN 276 verorten zu können. Gemäß DIN 276 wurden die Kostengruppen KG 331 [m² AWF] und KG 422 und 423 [m² BGF] herangezogen. Im Zuge der Kostenanalyse wurde die ETA-Fassade nach den Fassadenbestandteilen aufgeschlüsselt, die entsprechenden Kosten aggregiert sowie den Kostengruppen zugeordnet. Die größten Kostenanteile entfallen auf die "Betonfassade Innen" und die "Betonfassade Außen". Um die Vergleichbarkeit mit den BKI-Kostenkennwerten sicherzustellen, wurden 19 % Mehrwertsteuer, der Baupreisindex zur Berechnung der prozentualen Veränderung zwischen Februar 2016 und Februar 2023 sowie der Bundeskorrekturfaktor für Darmstadt berücksichtigt. Abschließend ergaben sich Kosten von 2.379,85 €/m² AWF für die KG 331 und 38,19 €/m² BGF für die KG 422. Beim Abgleich mit den Kostenkennwerten wurden deutliche Überschreitungen identifiziert. Diese resultieren aus vielfältigen Kosteneinflüssen, insbesondere aufgrund spezifischer Nutzungsanforderungen und einer anspruchsvollen Bauqualität. Hierzu gehören u.a. die Integration von wassergeführten Systemen zur Abwärmenutzung sowie die Tatsache, dass es sich um die erstmalige bauliche Umsetzung einer derart thermisch aktivierten und hydraulisch vernetzten Fassade handelt, die somit als Prototyp zu betrachten ist.

9.2 Ausblick und weiterer Forschungsbedarf

Für eine umfassende Beurteilung der thermischen Leistung von TAF-Systemen empfiehlt es sich, zukünftige Messungen in Form von Langzeitmessungen durchzuführen, um eine robuste Datengrundlage zu schaffen, die wiederum als Referenz für dynamische Simulationen dienen kann. Die Messung des nächtlichen Kühlbetriebs sollte dabei über mindestens die Dauer einer Woche pro Monat erfolgen. Diese kontinuierliche Datenerfassung ermöglicht die Entwicklung einer zugeschnittenen Steuerungsstrategie, die schließlich dynamisch simulativ abgebildet und evaluiert werden kann.

Ergänzend hierzu sollte eine Thermografie über den Verlauf eines kompletten Betriebszyklus durchgeführt werden, um das Temperaturfeld und die Temperaturverteilung über das gesamte Bauteil analysieren zu können. Die aus diesen Daten abgeleiteten Oberflächentemperaturen könnten als Grundlage für die Ermittlung der Kühlleistung mittels Wärmestromanalyse dienen. Obwohl Oberflächenkombisensoren

oder Wärmemengensensoren eine nützliche Ergänzung darstellen würden, ermöglichen diese lediglich die Erfassung von punktuellen Werten und können daher keine umfassende Bewertungsgrundlage über die gesamte Breite und Höhe des Bauteils bieten – so wie es durch eine Thermografie möglich wäre.

Ein präziseres Bild des thermischen Verhaltens des TAF-Systems könnte durch die Platzierung zusätzlicher Sensoren entlang der Bauteilbreite, gewonnen werden. Diese könnten Aufschluss über die Temperaturwelligkeit geben, die jedoch ebenfalls durch gezielte Thermografie während des Kühlbetriebs erfasst werden kann.

Darüber hinaus erweisen sich zusätzliche Strömungsmessungen im ungestörten Bereich entlang der Fassadenhöhe, sowohl raumseitig als auch in der Hinterlüftungsebene, als äußerst hilfreich. Diese Messungen würden wertvolle Erkenntnisse zu thermischen Übergangsbedingungen sowie zu Luftwechselraten und dem thermischen Auftrieb der Hinterlüftung liefern, und somit das Gesamtbild der Fassadenperformance vervollständigen.

Im Rahmen der simulativen Analysen könnten hygrothermische Bauteilsimulationen unter Verwendung alternativer Simulationsumgebungen, wie z.B. Delphin, zusätzliche Erkenntnisse liefern. Insbesondere bei der Anwendung von WUFI 2D lagen Restriktionen bei der Modellierung komplexer Geometrien vor, die möglicherweise Auswirkungen auf die Ergebnisse haben könnten. Um die tatsächliche Tragweite dieses Einflusses zu quantifizieren, wäre ein Vergleich der Ergebnisse mit jenen aus anderen Tools hilfreich.

Zudem empfiehlt sich eine tiefere Analyse durch Kopplung der hygrothermischen Simulation mit einer Optimierungssoftware wie GenOpt. Hierbei könnte mithilfe der Optimierungssoftware eine energetisch optimiertere Bauteil- und Materialkonfiguration identifiziert werden, die gezielt auf ein spezifisches thermisches Anforderungs- und Lastprofil ausgerichtet ist.

Bezüglich der Positionierung der thermisch aktivierten Ebene bietet die Aktivierung erdberührter Außenwände einen interessanten Forschungsansatz. Bei dieser Herangehensweise fungiert das Erdreich als Wärmesenke anstelle der nächtlich kühlen Umgebungsluft. Das Erdreich unterliegt weniger starken Temperaturschwankungen und ermöglicht somit einen längeren und konstanteren Kühlzeitraum. Eine sinnvolle Lösung könnte hier eine bivalente thermische Aktivierung sein, bei der beide Angrenzungsituationen kombiniert werden.

Die ETA-Fassade birgt ein hohes Potenzial zur bivalenten oder, je nach Industriebranche und Abwärmepotenzial, zur monovalenten Kühlung einer Industriehalle. Dennoch gibt es noch einige Herausforderungen zu überwinden, wie beispielsweise ökologische Gesichtspunkte und die kostenintensive Herstellung. Durch zukünftige Forschungsbemühungen könnten diese Hürden angegangen werden, womit die Grundlage für eine modularisierte „Plug-and-Cool-Lösung“ im Industriesektor gelegt werden könnte.

10 Literatur

ABELE, E., M. BECK, D. FLUM, P. SCHRAML, N. PANTEN, F. JUNGE, C. BAUERDICK, M. HELFERT, T. SIELAFF, C. DAUME, M. WEBER, N. STROBEL, A. REDELBERGER, L. POTOTZKY, S. ROTHENBÜCHER, G. LANDGRAF, W. RUMMEL, K. HEIMBACH, P. HAASE, S. STOCK, J. SCHWARZ, S. SCHAAL, R. KUNDE und A. KRÖNAUER, 2019. Gemeinsamer Schlussbericht zum Projekt ETA-Fabrik : Energieeffiziente Fabrik für interdisziplinäre Technologie- und Anwendungsforschung [online]. *Gemeinsamer Schlussbericht zum Projekt ETA-Fabrik*. Gemeinsamer Schlussbericht zum Projekt ETA-Fabrik. Verfügbar unter: doi:10.2314/KXP:1667471384

ACKERMANN, K.C., 2016. *Nachhaltigkeitsbewertung von mineralisiertem Schaum und mikrobewehrtem UHPC*. Bachelorthesis. Darmstadt.

ALBATAYNEH, A., D. ALTERMAN, A. PAGE und B. MOGHADDERI, 2020. The Significance of Sky Temperature in the Assessment of the Thermal Performance of Buildings [online]. *Applied Sciences*, **10**(22), 8057. Applied Sciences. Verfügbar unter: doi:10.3390/app10228057

AUMA-TEC AUSBAU-, UMWELT- UND ANLAGEN-TECHNIK GMBH, 2016. Schlussrechnung Nr. 160612 vom 12.08.2016.

AUSSCHUSS FÜR ARBEITSSTÄTTEN, 2010. *Technische Regeln für Arbeitsstätten; Raumtemperatur. ASR A3.5*.

AUSSCHUSS FÜR ARBEITSSTÄTTEN, 2012. *Technische Regeln für Arbeitsstätten; Lüftung. ASR A3.6*.

BAHR, C. und K. LENNERTS, 2010. *Lebens- und Nutzungsdauer von Bauteilen*.

BAUER, M., W. FREEDEN, H. JACOBI und T. NEU, Hg., 2018. *Handbuch Oberflächennahe Geothermie*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-662-50306-5.

BBSR, 2017. *Nutzungsdauer von Bauteilen für Lebenszyklusanalysen nach Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB)*.

BBSR, 2020. *Umweltfußabdruck von Gebäuden in Deutschland. Kurzstudie zu sektorübergreifenden Wirkungen des Handlungsfelds „Errichtung und Nutzung von Hochbauten“ auf Klima und Umwelt*. 17.

BEKA HEIZ- UND KÜHLMATTEN GMBH, 2015. *Produktdatenblätter Technische Informationen Berechnungsprogramme zur BEKA Kapillarrohrtechnik* [online]. Verfügbar unter: https://www.beka-klima.de/fileadmin/beka/cd/beka-cd_dt.pdf

BEKA HEIZ- UND KÜHLMATTEN GMBH, 2021a. *PRODUKTDATENBLÄTTER | K | Kapillarrohrmatten* [online]. *Kapillarrohrmatte Typ K.S15*.

BEKA HEIZ- UND KÜHLMATTEN GMBH, 2021b. *PRODUKTDATENBLÄTTER | K | Kapillarrohrmatten* [online]. *Kapillarrohrmatte Typ P.VS20*.

BERUFGSGENOSSENSCHAFT ENERGIE TEXTIL ELEKTRO MEDIENERZEUGNISSE. *Portal Luftbefeuchtung* [online]. *Textilindustrie*. Verfügbar unter: <https://luftbefeuchtung.bgetem.de/themen/grundlagen-der-luftbefeuchtung/luftfeuchtigkeit-in-produktionsraeumen-prozessbedingte-luftbefeuchtung/luftfeuchtigkeit-in-der-textilindustrie>

BICHLMAIR, S., 2020. *Die Temperierung und die Erhaltung von Gebäuden in traditioneller Bauweise - Wirkung auf Raumklima und Baukonstruktion*. Dissertation. Forschungsergebnisse aus der Bauphysik. 42. ISBN 9783839616680.

BKI, 2023a. *Baukosten Bauelemente Neubau 2023. Statistische Kostenkennwerte Teil 2* [online]. Stuttgart: BKI. ISBN 9783948683436. Verfügbar unter: <https://permalink.obvsg.at/AC16846579>

BKI, Hg., 2023b. *Baukosten Gebäude Neubau 2023. Statistische Kostenkennwerte Teil 1*. Stuttgart: BKI. ISBN 9783948683429.

BLESL, M. und A. KESSLER, 2013. *Energieeffizienz in der Industrie*. Berlin: Springer Vieweg. ISBN 978-3-642-36514-0.

BLUM, U., E. ROSENTHAL und B. DIEKMANN, 2020. *Energie – Grundlagen für Ingenieure und Naturwissenschaftler. Machbarkeiten, Grenzen und Umweltauswirkungen*. Wiesbaden: Springer Vieweg. ISBN 978-3-658-26933-3.

BMUB, 2016. *Klimaschutzplan 2050* [online]. *Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung*. Verfügbar unter: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Industrie/klimaschutzplan-2050.pdf?__blob=publicationFile&v=1

BÖKE, J., 2020. Thinking- Skins [online]. 1-286 Pages / A+BE | Architecture and the Built Environment, No. 08 (2020): ThinkingSkins. Verfügbar unter: doi:10.7480/abe.2020.08.5035

BORN, H., R. BRACKE, T. EICKER und M. RATH, 2022. *Roadmap Oberflächennahe Geothermie*.

BOSSERT, P., 2016. *Über die 25 Anforderungen einer Aussenwand (Fassade)* [online]. Verfügbar unter: <https://www.ib-rauch.de/bauphysik/aussenwand.html>

BRAUNE, A., L. EKHVIAIA und K. QUANTE, 2021. *Benchmarks für die Treibhausgasemissionen der Gebäudekonstruktion. Ergebnisse einer Studie mit 50 Gebäuden*.

BREHM, A., 2015. *Strömungslehre. Praktikum der technischen Chemie*.

BREITENBÜCHER, R., 2021. *DAfStb-Planungshilfe zum nachhaltigen Bauen mit Beton. Erläuterungen.*

BRUNE LUFTBEFEUCHTUNG PROKLIMA GMBH. *Welche Bedeutung hat die Luftfeuchtigkeit in der Druckerei?* [online]. Verfügbar unter: <https://www.brune.info/magazin/druckerei-luftfeuchtigkeit/>

BUND FÜR LEBENSMITTELRECHT UND LEBENSMITTELKUNDE E. V., 2006. *Leitlinie für gute Verfahrenspraxis gem. Verordnung (EG) Nr. 852/2004; Temperaturanforderungen für bestimmte Lebensmittel tierischen Ursprungs, die in Betrieben des Einzelhandels lose oder selbst verpackt abgegeben werden* [online]. Verfügbar unter: <https://ira-aic-fdb.de/wp-content/uploads/2021/06/temperatur-leitlinie-24-8-20062.pdf>

BUNDESFÖRDERUNG FÜR EFFIZIENTE GEBÄUDE, Hg., 2023. *Gebäudeenergiegesetz. Infoblatt zu den förderfähigen Maßnahmen und Leistungen. Versionsnummer 7.0.* Berlin.

BUNDESMINISTERIUM DER JUSTIZ, 2010. *Gesetz zur Umsetzung der Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates über Endenergieeffizienz und Energiedienstleistungen* [online]. 2010. Verfügbar unter: [https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGBI&start=//*\[@atr_id=%27bgbl110s1483.pdf%27\]#_bgbl_%2F%2F*%5B%40attr_id%3D%27bgbl110s1483.pdf%27%5D__1687008324643](https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGBI&start=//*[@atr_id=%27bgbl110s1483.pdf%27]#_bgbl_%2F%2F*%5B%40attr_id%3D%27bgbl110s1483.pdf%27%5D__1687008324643)

BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ, NUKLEARE SICHERHEIT UND VERBRAUCHERSCHUTZ, 2023. *eco design kit* [online]. Verfügbar unter: <https://www.ecodesignkit.de/>

BUNDESMINISTERIUM FÜR WOHNEN und STADTENTWICKLUNG UND BAUWESEN, 2023. *Anhang Nutzungshinweise* [online]. *Begleitdokument Ökobilanzierung – Rechenwerte 2023, Stand 01.03.2023.* Verfügbar unter: https://www.nachhaltigesbauen.de/fileadmin/pdf/QNG-BEG/%C3%96ökobilanzierung-Rechenwerte_2023_Anhang_Nutzungshinweise_v1-0.pdf

BUNDESREGIERUNG, 2022. *Klimaschutzgesetz - Generationenvertrag für das Klima* [online] [Zugriff am: 1. August 2023]. Verfügbar unter: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/schwerpunkte/klimaschutz/klimaschutzgesetz-2021-1913672>

BUNDESVERBAND FLÄCHENHEIZUNG UND FLÄCHENKÜHLUNG E.V., 2020. *INFORMATIONSDIENST FLÄCHENHEIZUNG UND -KÜHLUNG* [online]. *Rohrsysteme in Flächenheizungen und -kühlungen und elektrische Flächenheizung.*

BURGER, A., B. LÜNENBÜRGER, K. TEWS, J. WEIß und H. ZSCHÜTTIG, 2022. *CO₂-Bepreisung im Verkehrs- und Gebäudebereich sozialverträglich gestalten (Kurzfassung).*

- BVF E.V., 2007. *Bauteilintegrierte Systeme der Flächenheizung und Flächenkühlung – Aufbau und Funktionsweise* [online]. Verfügbar unter: <https://www.baulinks.de/webplugin/pdf/2007-0117.pdf>
- CAREL S.P.A, 2007. *Die Regelung der Feuchtigkeit in der Textilverarbeitung* [online]. Verfügbar unter: <https://www.carel.com/documents/10191/0/%2B302235438/d4c82db5-15d0-4f52-8edb-6de7866d0ae1?version=1.0>
- CONDAIR GMBH. *Luftbefeuchtung für Holzindustrie und Möbelherstellung* [online]. Verfügbar unter: <https://www.condair.de/luftbefeuchtung-holzverarbeitung>
- DA SILVA, C., H. SCHNEIDER und A. MAIER, 2018. Dokumentation der Produktionswoche ETA-Fabrik März 2018.
- DAFSTB, 2010. *DAfStb Beton, rezyklierte Gesteinskörnung:2010-09*.
- DAVIDSON, S., 2023. *Grasshopper* [online]. *Algorithmic modeling for Rhino* [Zugriff am: 24. Juli 2023]. Verfügbar unter: <https://www.grasshopper3d.com/>
- DEUTSCHE GESETZLICHE UNFALLVERSICHERUNG E.V., 2021. *Klima in Industriehallen* [online]. *Antworten auf die häufigsten Fragen*. Verfügbar unter: <https://publikationen.dguv.de/widgets/pdf/download/article/3871>
- DGNB GMBH, 2018. *DGNB System – Kriterienkatalog Gebäude Neubau* [online]. *Ökologische Qualität - ENV1.1 / ÖKOBILANZ DES GEBÄUDES* [Zugriff am: 24. Juli 2023]. Verfügbar unter: https://www.dgnb-navigator.de/fileadmin/user_upload/02_ENV1.1_Oekobilanz_des_Gebaeudes_220727.pdf
- DIN 18516-1, 2010. *DIN 18516-1:2010-06, Außenwandbekleidungen, hinterlüftet - Teil 1: Anforderungen, Prüfgrundsätze*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN 276, 2018. *DIN 276:2018-12, Kosten im Bauwesen*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN 4102-4, 2016. *DIN 4102-4:2016-05, Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen - Teil 4: Zusammenstellung und Anwendung klassifizierter Baustoffe, Bauteile und Sonderbauteile*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN 4108-2, 2013. *DIN 4108-2:2013-02, Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN 4108-3, 2018. *DIN 4108-3:2018-10, Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz - Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN 51005, 2022. *DIN 51005:2022-03, Thermische Analyse (TA) - Begriffe; Text Deutsch und Englisch*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

- DIN 51007, 2019. *DIN 51007:2019-04, Thermische Analyse (TA) - Differenz-Thermoanalyse (DTA) und Dynamische Differenzkalorimetrie (DSC) - Allgemeine Grundlagen*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN 8078, 2008. *DIN 8078:2008-09, Rohre aus Polypropylen (PP) - PP-H, PP-B, PP-R, PP-RCT - Allgemeine Güteanforderungen, Prüfung*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN 1264-5, 2021. *DIN EN 1264-5:2021-08, Raumflächenintegrierte Heiz- und Kühlsysteme mit Wasserdurchströmung - Teil 5: Bestimmung der Wärmeleistung von Wand- und Deckenheizung sowie Kühlleistung von Fußboden-, Wand- und Deckenkühlung; Deutsche Fassung EN 1264-5:2021*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN 15026, 2007. *DIN EN 15026:2007-07, Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen - Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation; Deutsche Fassung EN 15026:2007*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN 15978-1, 2021. *DIN EN 15978-1:2021-09, Nachhaltigkeit von Bauwerken - Methodik zur Bewertung der Qualität von Gebäuden - Teil 1: Umweltqualität; Deutsche und Englische Fassung prEN 15978-1:2021*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN ISO 10211, 2018. *DIN EN ISO 10211:2018-03, Wärmebrücken im Hochbau - Wärmeströme und Oberflächentemperaturen - Detaillierte Berechnungen (ISO 10211:2017); Deutsche Fassung EN ISO 10211:2017*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN ISO 13788, 2013. *DIN EN ISO 13788:2013-05, Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen - Raumseitige Oberflächentemperatur zur Vermeidung kritischer Oberflächenfeuchte und Tauwasserbildung im Bauteilinneren - Berechnungsverfahren (ISO 13788:2012); Deutsche Fassung EN ISO 13788:2012*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN ISO 14040, 2021. *DIN EN ISO 14040:2021-02, Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006 + Amd 1:2020); Deutsche Fassung EN ISO 14040:2006 + A1:2020*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN ISO 14044, 2021. *DIN EN ISO 14044:2021-02, Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen*.
- DIN EN ISO 6946, 2018. *DIN EN ISO 6946:2018-03, Bauteile - Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient - Berechnungsverfahren (ISO 6946:2017); Deutsche Fassung EN ISO 6946:2017*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN SPEC 33428, 2019. *DIN SPEC 33428:2019-06, Klima am Arbeitsplatz und in der Arbeitsumgebung - Grundlagen zur Klimaermittlung. Physikalische Größen: Lufttemperatur, Luftfeuchte, Luftgeschwindigkeit, Wärmestrahlung*. Beuth Verlag GmbH.
- DIN V 18599-2, 2018. *DIN V 18599-2:2018-09, Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung*.

Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung_ - Teil_2: Nutzenergiebedarf für Heizen und Kühlen von Gebäudezonen. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

DIN V 4108-6, 2003. *DIN V 4108-6:2003-06, Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden_ - Teil_6: Berechnung des Jahresheizwärme- und des Jahresheizenergiebedarfs.* Berlin: Beuth Verlag GmbH.

DUCON EUROPE GMBH & CO. KG, 2015. Schlussrechnung Nr. EU20100223 vom 13.10.2015.

DUCON EUROPE GMBH & CO. KG, 2016. *Höchstleistung in Beton* [online]. *Ultimate Performance – Beyond Concrete.* Verfügbar unter: https://ducon.eu/assets/img/Ducon-Infobroschuere_2016.pdf

EBERTSHÄUSER, S., S. JOUINI, P. von BOTH und J. GANTNER, 2020. *BIM-basierte Integrale Planung. Gemeinsamer Schlussbericht.*

ELGETI, K., 1971. *Der Wärmeverlust eines in einer Wand verlegten Rohres.* HLH. Heizung, Lüftung/Klima, Haustechnik. 22.

ENOB:DATANWG, 2021a. *Forschungsdatenbank Nichtwohngebäude* [online]. *Projektbeschreibung.* Verfügbar unter: <https://www.datanwg.de/projektbeschreibung/>

ENOB:DATANWG, 2021b. *Forschungsdatenbank Nichtwohngebäude* [online]. *Teilprojekte.* Verfügbar unter: <https://www.datanwg.de/teilprojekte/>

EUMETSAT CM SAF, 2023. *Globalstrahlung in Deutschland.* Monatssumme 2023: Deutscher Wetterdienst.

FACHHOCHSCHULE MÜNSTER. *Task Force Wärmewende Warmtetransitie* [online]. *Latentwärmespeicher (PCM).* Verfügbar unter: <http://taskforce.wiefm.eu/wissensdatenbank/pcm/>

FRANZ TRAUB GMBH & CO. KG, 2014. Plan etd_021_TT-Wand W12 im Maßstab 1:20 vom 11.12.2014.

FRAUNHOFER INSTITUT FÜR BAUPHYSIK IBP, 2019. *Was ist WUFI®?* [online] [Zugriff am: 11. Juli 2023]. Verfügbar unter: <https://wufi.de/de/software/was-ist-wufi/>

FRAUNHOFER INSTITUTE FOR BUILDING PHYSICS IBP, 2009. *The Calculation Model* [online]. Verfügbar unter: https://www.wufi-wiki.com/mediawiki/index.php/Details:Physics#The_Calculation_Model

FRAUNHOFER ISI, 2013. *Industrielle Abwärmenutzung. Kuzstudie.*

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR BAUPHYSIK, 2023. *WUFI Downloads* [online]. *Klima- und Materialdaten.* Verfügbar unter: <https://wufi.de/de/service/downloads/>

FVHF, 2017. *Planung und Ausführung von Vorgehängten Hinterlüfteten Fassaden (VHF)* [online]. Verfügbar unter: https://www.fvhf.de/Fassade-bilder/docs/Prospekte/FVHF-Leitlinie_Planung_Ausfuehrung-0321.pdf

- FVHF, 2018. *FASSADEN RICHTLINIE 2018; IFD-Richtlinie für die Planung und Ausführung von vorgehängten hinterlüfteten Fassaden* [online]. Verfügbar unter: <https://www.fvhf.de/Fassade-bilder/docs/ifd-fassadenrichtlinie-2017-de.pdf>
- GANTNER, J., B. WITTSTOCK, K. LENZ, M. FISCHER, K. SEDLBAUER und T. SAUNDERS, 2015. *EeBGuide guidance document. Operational guidance for life cycle assessment studies of the energy efficient building initiative* [online]. Stuttgart: Fraunhofer Institut für Bauphysik. ISBN 978-3-8396-0869-2. Verfügbar unter: <http://publica.fraunhofer.de/dokumente/N-349999.html>
- GANTNER, J., P. von BOTH, K. REXROTH, S. EBERTSHÄUSER, R. HORN, O. JORGJI, C. SCHMID und M. FISCHER, 2018. Ökobilanz - Integration in den Entwurfsprozess [online]. *Bauphysik*, 40(5), 286-297. ISSN 01715445. Verfügbar unter: doi:10.1002/bapi.201800016
- GEG, 2020. *Gesetz zur Vereinheitlichung des Energieeinsparrechts für Gebäude und zur Änderung weiterer Gesetze. GEG 2020* [online]. August 2020. Verfügbar unter: https://www.geg-info.de/geg/2020.08.13._bundesgesetzblatt_geg_2020_verkundung.pdf
- GEOLYTH MINERAL TECHNOLOGIE GMBH, Hg., 2022. *Product Carbon Footprint Geolyth GMS 65* [online].
- GLÜCK, B., 1999. *Thermische Bauteilaktivierung. Nutzen von Umweltenergie und Kapillarrohren*. Heidelberg: C. F. Müller. ISBN 3-7880-7674-7.
- GNIELINSKI, V., 2013. G1 Durchströmte Rohre. In: *VDI-Wärmeatlas. Mit 320 Tabellen*. 11., bearb. und erw. Aufl. Berlin: Springer Vieweg, S. 785-792. ISBN 978-3-642-19980-6.
- GOSZTONYI, S., 2012. BioSkin – Bionische Fassaden [online]. Potenziale aus der Bionik für adaptive energieeffiziente Fassaden der Zukunft, **2012**. Verfügbar unter: https://www.forum-holzbau.com/pdf/ibf_12_gosztanyi.pdf
- GRAUBNER, C.-A. und K. HÜSKE, 2003. *Nachhaltigkeit im Bauwesen. Grundlagen - Instrumente - Beispiele*. Berlin: Ernst. ISBN 9783433015124.
- GSCHWANDER, S., T. HAUSSMANN, G. HAGELSTEIN, A. SOLE, G. DIARCE, W. HOHENAUER, D. LAGER, C. RATHGEBER, P. HENNEMANN, A. LAZARO und H. MEHLING, 2015. *Standard to determine the heat storage capacity of PCM using hf-DSC with constant heating/cooling rate (dynamic mode)* [online]. Verfügbar unter: <https://task42.iea-shc.org/Data/Sites/1/publications/Task4224-Standard-to-determine-the-heat-storage-capacity-of-PCM-vers150326.pdf>
- GÜNTHER, M., 2014. Energie in Physik und Wirtschaft. In: M. GÜNTHER, Hg. *Energieeffizienz durch Erneuerbare Energien. Möglichkeiten, Potenziale, Systeme*. s.l.: Springer Vieweg, S. 13-17. ISBN 978-3-658-06752-6.
- HAHNE, E. und K. ELGETI, 2013. E1 Stationäre Wärmeleitung. In: *VDI-Wärmeatlas. Mit 320 Tabellen*. 11., bearb. und erw. Aufl. Berlin: Springer Vieweg, S. 709-726. ISBN 978-3-642-19980-6.

- HALL, M., R. BORNEMANN, D. MAKULLA und M. KIEBEL. *Dezentrale Lüftungsgeräte (DL) mit Latentwärmespeicher im inHaus2* [online]. Josef Gartner Switzerland AG; caverion GmbH. Verfügbar unter: https://www.inhaus.fraunhofer.de/content/dam/inhaus/de/documents/1465_Forum_FM_02GartnerKrantzBornemann-16tcm581-60800.pdf
- HARTMANN, F., 2019. *Flächenkühlung richtig und effizient einsetzen* [online]. Verfügbar unter: https://www.flaechenheizung-bdh.de/fileadmin/user_upload/fachartikel/2019/Fl%C3%A4chen%C3%BChlung_richtig_und_effizient.pdf
- HAUSWIRTH, S. und D. KEHL, 2010. *Hinterlüftung bei Holzfassaden* [online]. Verfügbar unter: https://www.forum-holzbau.com/pdf/hbt10_Hauswirth.pdf
- HEIMRATH, R.e.a., 2018. Hohe solare Deckungsgrade durch thermisch aktivierte Bauteile im urbanen Umfeld [online]. *Nachhaltig wirtschaften*, 2018(20). Nachhaltig wirtschaften. Verfügbar unter: https://nachhaltigwirtschaften.at/resources/sdz_pdf/berichte/schriftenreihe_2018-20-solSPONGEhigh.pdf
- HERMANN, M., C. HILDEBRANDT, J. MATTMÜLLER, A. FELIC, T. SABLOTNY, I. TESARI, K. BETHGE und J. BÖKE, 2022. TABSOLAR® – a novel approach of thermo-active (solar) building systems based on ultra-high performance concrete (UHPC) [online]. *Solar Energy Advances*, 2, 100028. ISSN 26671131. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.seja.2022.100028
- HESSISCHES STATISTISCHES LANDESAMT, 2023. Preisindizes für Bauwerke in Hessen 1968 bis 2023 – Bauleistungen am Bauwerk – Nichtwohngebäude [Zugriff am: 30. Juli 2023]. Verfügbar unter: <https://statistik.hessen.de/unsere-zahlen/preise>
- HEUSLER, W., 2015. *Die Fassade der Zukunft – statisch oder dynamisch?*
- HILDEBRAND, L., 2021. *EMMy – Ecological material mini library* [online]. Verfügbar unter: <https://emmy.rb.rwth-aachen.de/de/>
- HOLZMANN, G., M. WANGELIN und R. BRUNS, 2012. *Natürliche und pflanzliche Baustoffe. Rohstoff - Bauphysik - Konstruktion*. 2., aktualisierte und erw. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg. Studium. ISBN 978-3-8348-1321-3.
- HU, D.-I.J., 2007. *Untersuchung und Optimierung des Einflusses von Latentspeichermaterial auf das thermische und energetische Verhalten von Gebäuden* [online]. Verfügbar unter: <https://www.ub.tuwien.ac.at/diss/AC05034970.pdf>
- IN4CLIMATE.NRW, Hg., 2022. *Prozesswärme für eine klimaneutrale Industrie. Impulspapier der Initiative IN4climate.NRW. Düsseldorf* [online].
- INDUSTRIE WEGWEISER, 2019. *Energieflexibilität* [online]. *Wie energieflexibel ist Ihre Fabrik?* Verfügbar unter: <https://industrie-wegweiser.de/energieflexible-fabrik/>

Internationale Organisation für Normung. ISO 50047:2016, *Energieeinsparungen*. Berlin: Beuth-Verlag.

IRREK, W. und S. THOMAS, 2008. Definition Energieeffizienz [online]. Verfügbar unter: https://wupperinst.org/uploads/tx_wupperinst/energieeffizienz_definition.pdf

IWU, 2022. *Variablendokumentation Fernrechnen*.

JACOB, C. und S. KUKOVEC, Hg., 2022. *Auf dem Weg zu einer nachhaltigen, effizienten und profitablen Wertschöpfung von Gebäuden. Grundlagen – neue Technologien, Innovationen und Digitalisierung – Best Practices* [online]. Kapitel 23 - Der Weg zur autarken Gebäudekonstruktion: Smarte Materialien, Baustoffe und Bauteile sowie deren Interaktion. Wiesbaden: Springer Vieweg. ISBN 978-3-658-34961-5. Verfügbar unter: <http://www.springer.com/>

JAGER, D.-I.W., 2014. *Phasenwechselmaterial (PCM) im Fassadenbau* [online]. *Speicherung von thermischer Energie im Fassadenbau - Einsatz von Phasenwechselmaterial in der Gebäudehülle*.

JANAER LEITERPLATTEN, 2009. *Information zur Verarbeitung von Leiterplatten* [online]. Verfügbar unter: https://www.jlp.de/files/jenaer_leiterplatten-verarbeitungsempfehlung.pdf

JAVANMARDI, R. und M. PAHN, 2016. *Proceedings of the CESBP Central European Symposium on Building Physics and BauSIM. NUMERISCHE UND EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNG THERMISCH AKTIVIERTER SANDWICHWÄNDE MIT INTEGRIERTEM PARAFFIN* [online]. Kaiserslautern. Verfügbar unter: <http://www.ibpsa.org/proceedings/bausimPapers/2016/D-05-2.pdf>

JEVONS, W.S., 1866. *The Coal Question. An Inquiry concerning the progress of the nation, and the probable exhaustion of our coal-mines*. SECOND EDITION, REVISED. London: MACMILLAN AND CO.

KEHL, D., H. WEBER und S. HAUSWIRTH, 2010. Ist die Hinterlüftung von Holzfassaden ein Muss? [online]. *Bauphysik*, **32**(3), 144-148. ISSN 01715445. Verfügbar unter: doi:10.1002/bapi.201010017

KEHRER, M. und T. SCHMIDT, 2006. *Temperaturverhältnisse an Außenoberflächen unter Strahlungseinflüssen* [online].

KIPF, O., M. WIBBACH, T. FRIEDRICH, S. VIDÍ und M. PAHN, 2021. *Abschlussbericht: Großflächige, multifunktionale Bauelemente mit thermisch aktiven Bewehrungsstrukturen für energieeffiziente Gebäude, mit integriertem Wärmespeicher und geregelter Raumklimatisierung, mittels regelbarer, metallisch ummantelter Vakuum-Wärmedämmung zur verstärkten Nutzung erneuerbarer Energien*. MuFuBisS.

KNAACK, U., T. AUER, M. BILOW und T. KLEIN, 2007. *Fassaden. Prinzipien der Konstruktion* [online]. Basel: Birkhäuser Verlag AG. ISBN 978-3-7643-8319-0. Verfügbar unter: <http://link.springer.com/book/10.1007/978-3-7643-8319-0>

KNAACK, U., T. KLEIN, M. BILOW und T. AUER, 2014. *Fassaden. Prinzipien der Konstruktion*. 3. und überarb. Aufl. Basel: Birkhäuser. Prinzipien der Konstruktion. ISBN 978-3-03821-094-8.

KNACKSTEDT, J., R.-W. BODDENBERG und H. HERRMANN, 2010. Vorgehängte hinterlüftete Fassaden – Technik, Brandschutz und statische Berechnung. In: N.A. FOUAD, Hg. *Bauphysik-Kalender 2010*. Kapitel 18: Wiley, S. 485-514. ISBN 9783433029381.

KÖNIG, H., J. KREIßIG, N. KOHLER und T. LÜTZKENDORF, 2012. *Lebenszyklusanalyse in der Gebäudeplanung* [online]. München: DETAIL. DETAIL Green Books. ISBN 9783955530129. Verfügbar unter: <https://www.degruyter.com/isbn/9783955530129>

KRAMER, C., 2000. *Mikroverkapselung von Latentwärmespeichern*. Diplomarbeit. Oldenburg.

KRUSE INGENIEURGESELLSCHAFT MBH & CO. KG, 2014. Ausführungsplanung Heizungs- und Kälteinstallation, Grundriss EG im Maßstab 1:50 vom 19.05.2014.

KUHNHENNE, M., B. DÖRING, R. KOCKER, D. PYSCHNY und M. FELDMANN, 2010. Die Ökobilanz als Baustein der Nachhaltigkeitsbewertung im Industrie- und Gewerbebau [online]. *Stahlbau*, 79(6), 439-447. ISSN 00389145. Verfügbar unter: doi:10.1002/stab.201001336

KÜRTEEN, S., 2014. *Dissertation Sylvia Kürten Zur thermischen Nutzung des Untergrunds mit flächigen thermo-aktiven Bauteilen*.

LANDESAMT FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ UND LEBENSMITTELSICHERHEIT. *Obst und Gemüse – Tipps zur Lagerung* [online]. Verfügbar unter: https://www.laves.niedersachsen.de/startseite/lebensmittel/marktuberwachung/obst_und_gemuese/tipps_fur_die_lagerung/obst-und-gemuese-tipps-zur-lagerung-73079.html

LEIPFINGER BADER, 2023. *Lehmbausysteme - Ökologisch und nachhaltig Bauen und Sanieren*.

LERCHE, C., H. SIEGMUND, K. BRANDS und L. KOSSACK, 2010. *Entwicklung eines innovativen Aktiv-Kühl- und Heizboden unter Ausnutzung des Latentspeicherprinzips* [online]. *Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt, gefördert unter dem Az: 23836 - 24/2 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt*. Verfügbar unter: <https://www.dbu.de/OPAC/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-23836.pdf>

MAAS, A., Hg., 2008. *Umweltbewusstes Bauen. Energieeffizienz, Behaglichkeit, Materialien; Festschrift zum 60. Geburtstag von Gerd Hauser*. Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verl. ISBN 9783816775768.

MADLENER, R. und B. ALCOTT, 2007. Steigerung der Energieeffizienz: Problem oder Lösung? [online]. *RWTH Publications*, 2007(57 (10)). RWTH Publications. Verfügbar unter: <http://www.blakealcott.org/pdf/et-problem-oder-loesung.pdf>

- MAIER, A., 2023. *Ultraleichter, zementgebundener Schaum als Kernwerkstoff von Sandwichelementen*. Dissertation. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden; Imprint Springer Vieweg. Mechanik, Werkstoffe und Konstruktion im Bauwesen. 69. ISBN 978-3-658-41723-9.
- MAIER, A., A. GILKA-BÖTZOW und J. SCHNEIDER, 2016. An energy-active facade element from mineralized foam (MF) and micro-reinforced, ultra-high-performance concrete (mrUHPC) [online]. *Journal of Facade Design and Engineering*, **3**(3-4), 289-301. ISSN 2213302X. Verfügbar unter: doi:10.3233/FDE-160046
- MAIER, A., M. HOCHREIN, J. SCHNEIDER, A.-M. JOPPIEN und M. BECK, 2021. Energieeffizienz weitergedacht: die thermisch aktivierte Gebäudehülle als Teil einer Prozesskette [online]. *Bautechnik*, **98**(1), 29-41. ISSN 0932-8351. Verfügbar unter: doi:10.1002/bate.201900107
- MANKEL, C., 2020. *Ansatz zur Modellierung von Wärmespeichereigenschaften zementgebundener Baustoffsysteme mit integrierten Phasenwechselmaterialien*.
- MEHLING, H., M. BRÜTTING und T. HAUSSMANN, 2022. *PCM products and their fields of application - An overview of the state in 2020/2021* [online]. Verfügbar unter: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X22003784>
- MERK, H., 2023. *Digitale Ökobilanzierung von Fassaden im Industriesektor*. Bachelorthesis. Darmstadt.
- MERKER, G.P., 1987. *Konvektive Wärmeübertragung*. London: Springer. Wärme- und Stoffübertragung. ISBN 978-3-540-16995-6.
- MICROTEK LABORATORIES, INC. *MicroEncapsulation* [online]. *Temperature Control is at the core of our expertise*. Verfügbar unter: <https://www.microteklabs.com/microencapsulation-solutions/>
- MINDRUP, K., 2019. *Raumklimatisierung durch thermisch aktivierte Massivholzelemente. Konzeptentwicklung, Leistungsbetrachtung und Ableitung von Auslegungswerkzeugen*.
- MÖHLMANN, R., T. FLECK und U. KRENGEL, 2022. *Forschung kompakt - Innovative und energieeffiziente Fassadensanierung. Modulfassade mit integrierter Anlagentechnik versorgt Gebäude mit Erneuerbarer Energie*.
- MY-PV GMBH, 2022. *my-PV gewinnt Energy Globe Austria für Bauteilaktivierung mit Photovoltaik* [online]. Verfügbar unter: <https://www.solarwirtschaft.de/2022/10/25/my-pv-gewinnt-energy-globe-austria-fuer-bauteilaktivierung-mit-photovoltaik/>
- OBERGFELL, T., T. HAUSSMANN, S. GÖLZ und FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR SOLARE ENERGIESYSTEME, 2020. *PCM EVAL: Evaluierung PCM Bestandsgebäude - Langzeiterfahrungen mit Latentwärmespeichern in Gebäuden* [online]. *Berichtszeitraum: 01.09.2016-30.06.2020*. Verfügbar unter: <https://www.tib.eu/en/search/id/TIBKAT:1753320283?cHash=586a65e96866223d7dca6ee3a248359d>

- ONE CLICK LCA LTD., 2023. *One Click LCA* [online] [Zugriff am: 24. Juli 2023]. Verfügbar unter: <https://www.oneclicklca.com/construction/life-cycle-assessment-software/>
- ORÓ, E., L. MIRÓ, M.M. FARID, V. MARTÍN und L.F. CABEZA, 2014. Energy management and CO2 mitigation using phase change materials (PCM) for thermal energy storage (TES) in cold storage and transport [online]. *International Journal of Refrigeration*, 42, 26-35. ISSN 01407007. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.ijrefrig.2014.03.002
- OSD - OFFICE FOR STRUCTURAL DESIGN, 2014. Wärmeschutznachweis ETA-Fabrik vom 01.08.2014.
- P.V. BETONFERTIGTEILWERKE GMBH, 2016. Schlussrechnung Nr. 908734 vom 15.03.2016.
- PEHNT, M., Hg., 2010. *Energieeffizienz. Ein Lehr- und Handbuch*. Berlin: Springer. ISBN 978-3-642-14250-5.
- PELVAY, P., 2020. *Vorgehängte Fassaden unter außergewöhnlicher Belastung*.
- PETERSEN, S.M. und L.-E. HARDERUP, 2011. Comparison of measured and calculated temperature and relative humidity with varied and constant air flow in the facade air gap [online]. *Proceedings of the 9th Nordic Symposium on Building Physics - NSB 2011*, 147-154. Proceedings of the 9th Nordic Symposium on Building Physics - NSB 2011. Verfügbar unter: <https://portal.research.lu.se/en/publications/comparison-of-measured-and-calculated-temperature-and-relative-hu>
- PICHT, H.-P., R. BEYER und K. NEUMANN, 2008. *Abschlussbericht "Unverglaste Metalldach- Sonnenkollektoren in Wärmeversorgungssystemen: Systemkonzepte und Auslegung" (UMSys)*.
- POLYMEHR GMBH, 2015. *Produktinformationen PP* [online]. Verfügbar unter: <https://3faktor.com/wp-content/uploads/2018/07/technisches-datenblatt-pp.pdf>
- PRO KÜHLSOLE GMBH, 2003. *GLYKOSOL N* [online]. *Kälte- und Wärmeträgerflüssigkeit auf Basis Monoethylenglykol für technische Anwendungen*.
- PURETEMP LLC, 2023. *PureTemp technical and safety data sheets* [online]. Verfügbar unter: <https://puretemp.com/?p=220>
- QUACK, D., 2001. *Einfluss von Energiestandard und konstruktiven Faktoren auf die Umweltauswirkungen von Wohngebäuden - eine Ökobilanz* [online]. Verfügbar unter: <https://www.oeko.de/oekodoc/40/2001-002-de.pdf>
- RECKLI GMBH. 2-63-wisla_503 [online] [Zugriff am: 11. Juli 2023]. Verfügbar unter: https://www.reckli.com/fileadmin/product_sheets/de/2-63-wisla_503.pdf
- REINECK, K.-H., S. GREINER, H.-W. REINHARDT und M. JOOß, 2004. *Dichte Heißwasser-Wärmespeicher aus ultrahochfestem Faserfeinkornbeton*. [online].

Baustoffversuche und Versuche zur Dichtigkeit von (Ultra)Hochleistungsbeton.
Verfügbar unter: <https://edocs.tib.eu/files/e01fb05/490048722.pdf>

RIB RÖSER INGENIEURBETON, 2015. Schlussrechnung Nr. 150831 vom 30.12.2015.

ROBERING LAGERSYSTEME GMBH & CO. KG. *Neubau einer Produktionshalle* [online]. Verfügbar unter: <https://www.robering-regale.de/>

RUBITHERM TECHNOLOGIES GMBH, 2020. Techdata_-RT18HC_DE_09102020 [online] [Zugriff am: 11. Juli 2023]. Verfügbar unter: https://www.rubitherm.eu/media/products/datasheets/Techdata_-RT18HC_DE_09102020.PDF

RUBITHERM TECHNOLOGIES GMBH, 2023. *CSM-Makroverkapselung* [online]. *PCM in Aluminiumhülle.* Verfügbar unter: <https://www.rubitherm.eu/produktkategorie/makroverkapselung-csm>

RUISINGER, U. und P. KAUTSCH, 2019. Über die Notwendigkeit dreidimensionaler, hygrothermischer Simulationen [online]. *Bauphysik*, **41**(6), 295-301. ISSN 01715445. Verfügbar unter: doi:10.1002/bapi.201900024

SAUER, A., E. ABELE und H.U. BUHL, Hg., 2019. *Energieflexibilität in der deutschen Industrie. Synchronisierte und energieadaptive Produktionstechnik zur flexiblen Ausrichtung von Industrieprozessen auf eine fluktuierende Energieversorgung (SynErgie).* Stuttgart: Fraunhofer Verlag. Energieflexibilität in der deutschen Industrie / Alexander Sauer, Eberhard Abele, Hans Ulrich Buhl. 1. ISBN 978-3-8396-1479-2.

SCHAUBE, H. und H. WERNER, 1986. *Wärmeübergangskoeffizient unter natürlichen Klimabedingungen* [online]. Verfügbar unter: <https://www.irbnet.de/daten/rswb/87059002020.pdf>

SCHMIDT, L., 2022. Solarthermisch aktivierte funktionsintegrierte Metallfassade [Zugriff am: 1. August 2023]. Verfügbar unter: <https://www.ingenieurmagazin.com/bauen-immobilien-stadt/solarthermische-fassade/6426/>

SCHMIDT, M., F. PAWELZ und E. KIESERITZKY, 2016. EnEV Baupraxis [online]. Phase Change Material – Einsatzbeispiele am Objekt, Dezember 2016(32). Verfügbar unter: https://www.pcm-ral.org/pcm/wp-content/uploads/2016/12/PCM-Einsatz_am_Objekt-EnEV_Baupraxis_2016.pdf

SCHMIDT, T., 2006. *Willkommen bei WUFI* [online]. *Online-Hilfe für WUFI-pro4.01 (d).* Verfügbar unter: https://wufi.de/download/WUFI41_Hilfe_d.pdf

SCHNEIDER, PFOH und GRIMM. *Projektplattform Energie. Leitfaden 01 - Ökologische Kenndaten, Baustoffe und Bauteile.*

SCHÖNFELDER, M., 2023. Videocall am 06. Juni 2023 mit AUMA-TEC.

- SCHWEIZER, A., 2022. *Formelsammlung und Berechnungsprogramme Maschinen- und Anlagenbau* [online]. *Wärmekapazität verschiedener Materialien*. Verfügbar unter: https://www.schweizer-fn.de/stoff/wkapazitaet/wkapazitaet_baustoff_erde.php
- SEDLBAUER, K., W. ZILLIG und M. KRUS, 2001. *Isoplethensysteme ermöglichen eine Abschätzung von Schimmelpilzbildung* [online]. Verfügbar unter: https://www.ibp.fraunhofer.de/content/dam/ibp/ibp-neu/de/dokumente/ibpmitteilungen/1-400/301-400/388_IBPmitteilung.pdf
- SKOLAUT, W., Hg., 2018. *Maschinenbau. Ein Lehrbuch für das ganze Bachelor-Studium*. 2., aktualisierte und überarbeitete. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg. SpringerLink Bücher. ISBN 978-3-662-55881-2.
- SOREMBÄ GMBH. *Papier richtig lagern – 5 einfache Tipps* [online]. Verfügbar unter: <https://www.soremba.eu/drucktechnik-news/papier-richtig-lagern-5-tipps>
- SOULTANA, F., 2014. *Bestimmung des Standes der Technik der Energieeffizienz und des Energiemanagements im Bereich des Maschinenbau*. Fachwissenschaftliche Projektarbeit. Dortmund.
- TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT. *Standort Lichtwiese (L)* [online]. Verfügbar unter: https://www.tu-darmstadt.de/universitaet/campus/lichtwiese_2/index.de.jsp
- THOMAS, S. und W. IRREK, 2007. Wie 20 Prozent Endenergieeinsparung möglich werden können : Vorschläge des Wuppertal Instituts zum deutschen Energieeffizienz-Aktionsplan und zu Maßnahmen im Industriebereich. *VIK-Mitteilungen*, (3), 16-18. VIK-Mitteilungen.
- TRÄNKLER, H.-R. und L.M. REINDL, Hg., 2014. *Sensortechnik. Handbuch für Praxis und Wissenschaft*. 2., völlig neu bearbeitete Auflage. Berlin: Springer Vieweg. Technik. ISBN 978-3-642-29942-1.
- UMWELTBUNDESAMT, 2023a. Indikator: Energieverbrauch für Gebäude [Zugriff am: 1. August 2023]. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umweltindikatoren/indikator-energieverbrauch-fuer-gebaeude#die-wichtigsten-fakten>
- UMWELTBUNDESAMT, 2023b. Indikator: Globale Lufttemperatur. Abweichung der globalen Lufttemperatur vom Durchschnitt der Jahre 1850 bis 1900 [Zugriff am: 1. August 2023]. Verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/384/bilder/dateien/de_indikator_klim-02_globale-lufttemperatur_2023-04-21.pdf
- UNIPOR ZIEGEL MARKETING GMBH, 2019. *UNITHERM Flächen-Heizelemente*.
- VDI 2078, 2015. *Berechnung der thermischen Lasten und Raumtemperaturen (Auslegung Kühllast und Jahressimulation)*.

VDI 3789, 2019. *VDI 3789:2019-04: Umweltmeteorologie - Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre und Oberflächen - Berechnung der spektralen kurz- und der langwelligen Strahlung. VDI 3789.*

VDI 6007 BLATT 3, 2015. *VDI 6007 Blatt 3, Berechnung des instationären thermischen Verhaltens von Räumen und Gebäuden - Modell der solaren Einstrahlung. VDI 6007 Blatt 3 [online].* 2015. Verfügbar unter:

<https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-6007-blatt-3-berechnung-des-instationaeren-thermischen-verhaltens-von-raeumen-und-gebaeuden-modell-der-solaren-einstrahlung>

VDI-Wärmeatlas. Mit 320 Tabellen, 2013a. 11., bearb. und erw. Aufl. Berlin: Springer Vieweg. VDI/-Buch]. ISBN 978-3-642-19980-6.

VDI-Wärmeatlas. Mit 320 Tabellen, 2013b. 11., bearb. und erw. Aufl. Berlin: Springer Vieweg. VDI/-Buch]. ISBN 978-3-642-19981-3.

VISUAL CROSSING, 2023. Total Weather Data. History & forecast data in CSV or JSON. Verfügbar unter: <https://www.visualcrossing.com/weather-data>

VOLLEN, J.O., 2020. *Countercurrent heat exchange building envelope using ceramic components*. Delft: BK Books. A+BE Architecture and the Built Environment. 2020/05. ISBN 9789463662680.

WALSDORF-MAUL, M., 2017. *Reduzierung sommerlicher Wärmeeinträge durch vorgehängte hinterlüftete Bekleidungen*.

WANG, J., J.K. CARSON, M.F. NORTH und D.J. CLELAND, 2006. A new approach to modelling the effective thermal conductivity of heterogeneous materials [online]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **49**(17-18), 3075-3083. ISSN 00179310. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.02.007

WELLER, B., Hg., 2013. *Glasbau 2013. Bauten und Projekte, Bemessung und Konstruktion, Forschung und Entwicklung, Energieeffizienz und Nachhaltigkeit*. Berlin: Ernst. ISBN 3-433-60294-8.

WEMHÖNER, C., A. GENKINGER und T. AFJEI, 2011. *Kühlen über thermisch aktivierte Außenflächen [online]. Potenzialstudie*.

WTA, 2014. WTA-Merkblatt 6-2: Simulation wärme- und feuchtetechnischer Prozesse, 6-2.

WTA, 2022. Leitfaden für hygrothermische Simulationsberechnungen. WTA Merkblatt E-6-1-22/D. Entwurf. Deutsche Fassung. Stand Juli 2022. Referat 6 Bauphysik. Verfügbar unter: <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:24-epflicht-2030081>

ZIMMERMANN, J. und M. REISER, 2021. Prognose des Verbrauchs grauer Energie über die Lebensdauer von Gebäuden [online]. *Mauerwerk*, **25**(3), 120-130. ISSN 1432-3427. Verfügbar unter: doi:10.1002/dama.202110015

ZÜRCHER, C. und T. FRANK, 2018. *Bauphysik. Bau und Energie* [online]. 5., überarbeitete Auflage. Zürich: vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich. Bau und Energie. ISBN 9783728138873. Verfügbar unter: <https://enbau-online.ch/bauphysik/>

Anlagen

A1. Weitere statische Auswertungen - ENOB:dataNWG

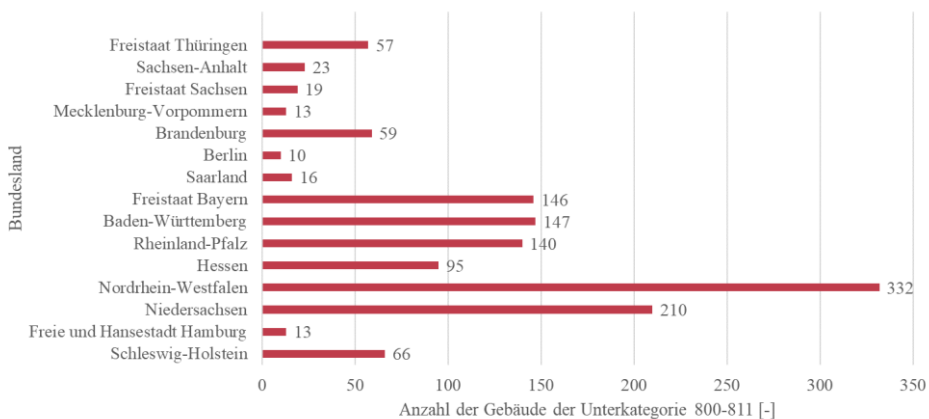


Abbildung A1.1: Aufteilung der Gebäudekategorie 8 auf Bundeslandebene

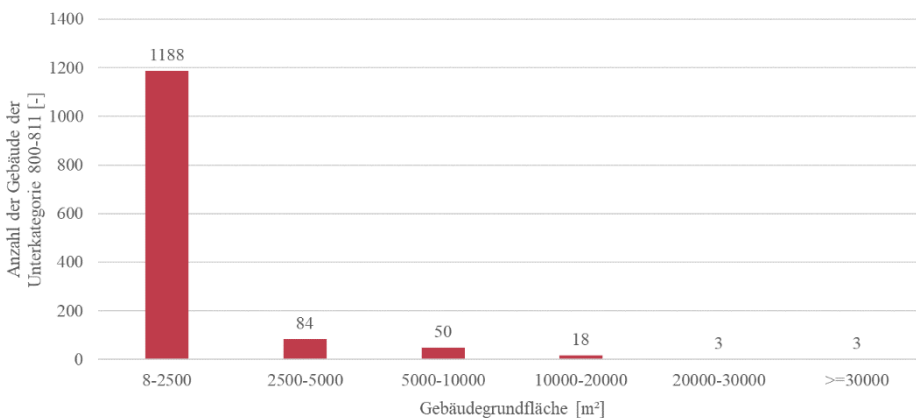


Abbildung A1.2: Gebäudegrundfläche - Zuordnung Gebäudekategorie 8

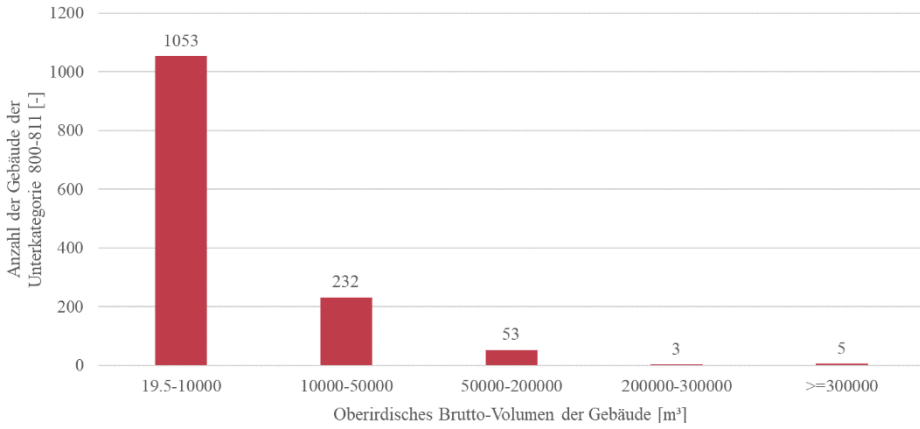


Abbildung A1.3: Oberirdisches Brutto-Volumen - Zuordnung Gebäudekategorie 8

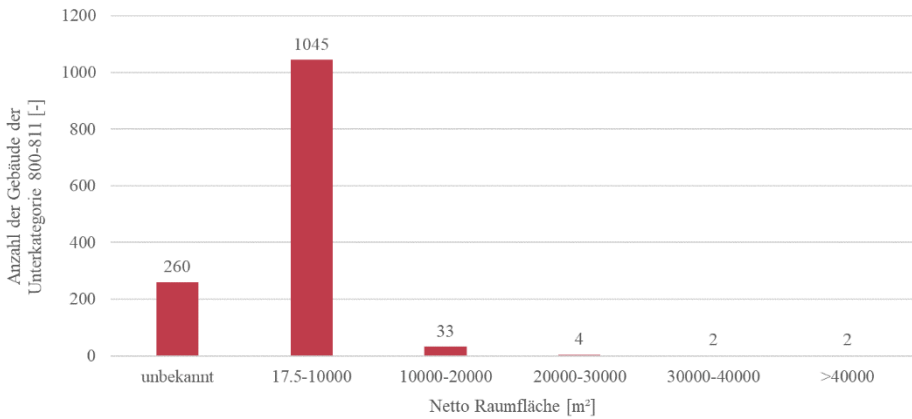


Abbildung A1.4: Netto-Raumfläche - Zuordnung Gebäudekategorie 8

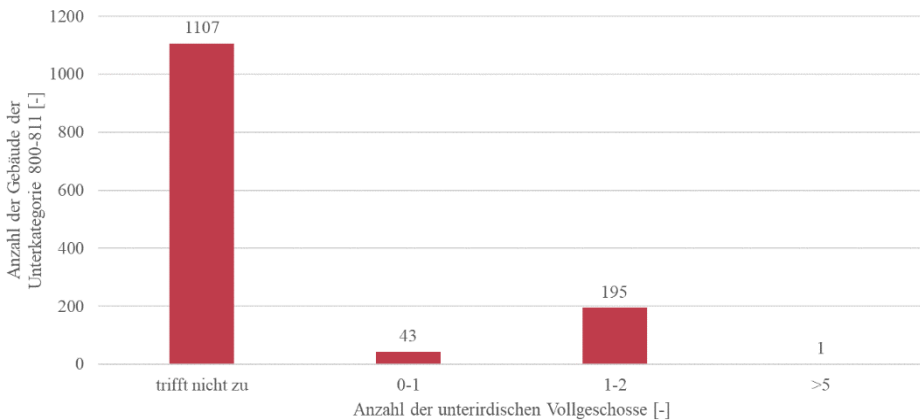


Abbildung A1.5: Oberirdisches Brutto-Volumen - Zuordnung Gebäudekategorie 8

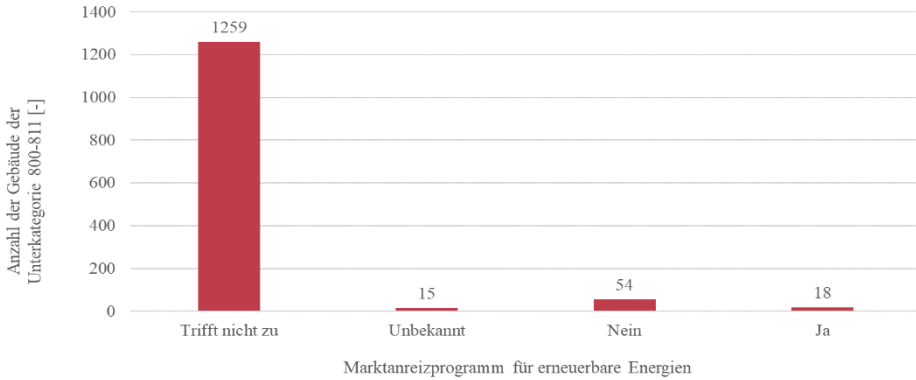


Abbildung A1.6: Marktanreize für EE - Zuordnung Gebäudekategorie 8

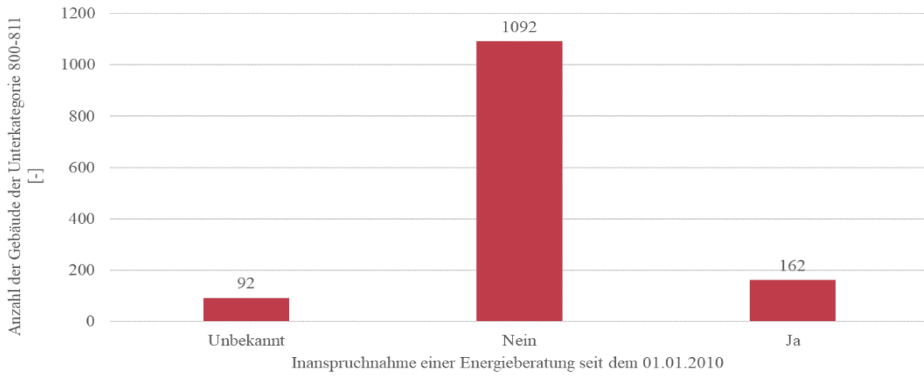


Abbildung A1.7: Energieberatung seit 01.01.2010 - Zuordnung Gebäudekategorie 8

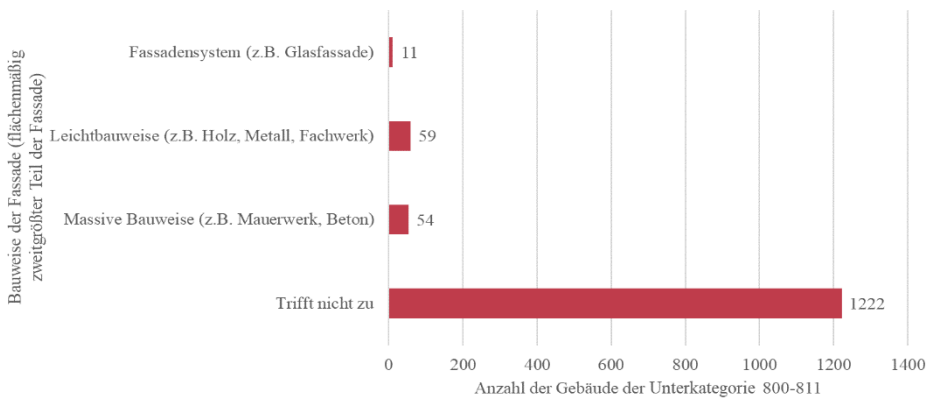


Abbildung A1.8: Fassadenbauweise der flächenmäßig zweitgrößten Fassade

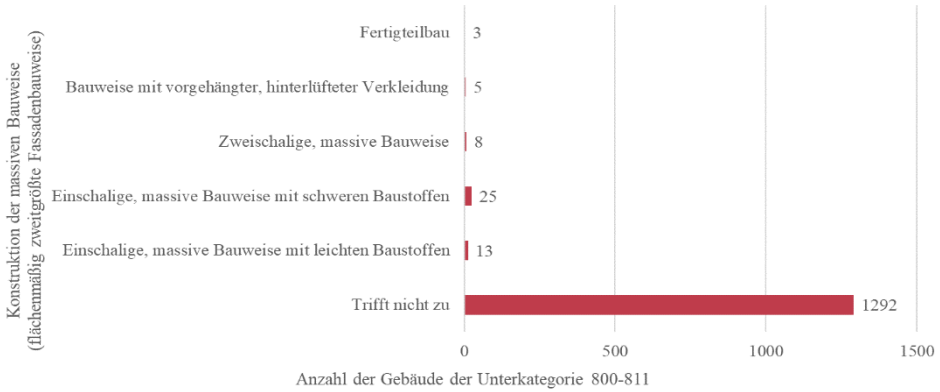


Abbildung A1.9: Konstruktion der Massivbauweise der flächenmäßig zweitgrößten Fassade

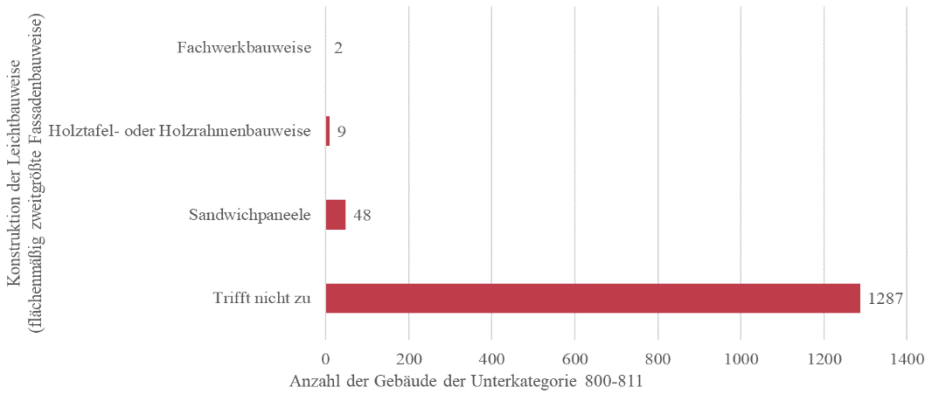


Abbildung A1.10: Konstruktion der Leichtbauweise der flächenmäßig zweitgrößten Fassade

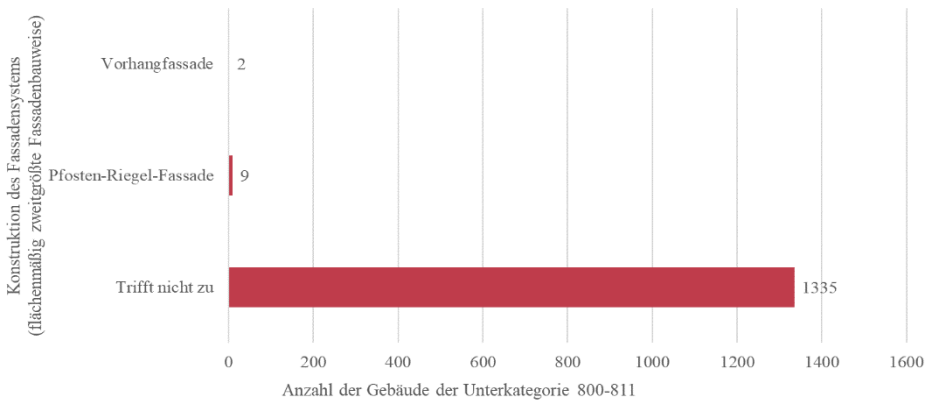


Abbildung A1.11: Konstruktion des Fassadensystem der flächenmäßig zweitgrößten Fassade

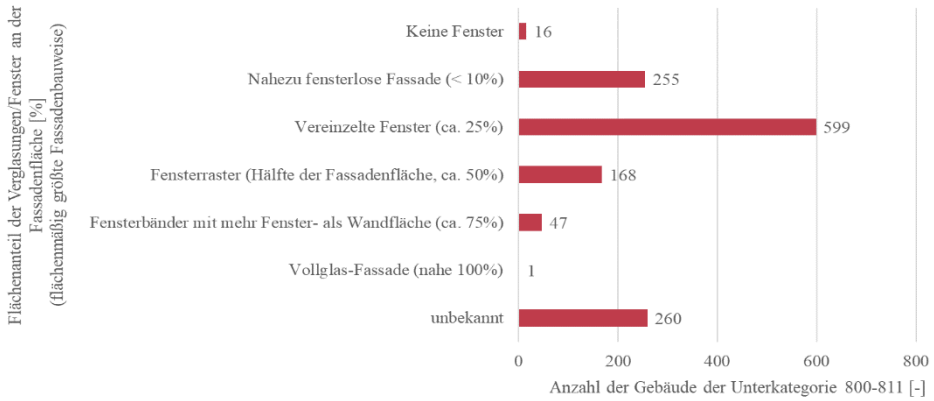


Abbildung A1.12: Verglasungsanteil der der flächenmäßig größten Fassade

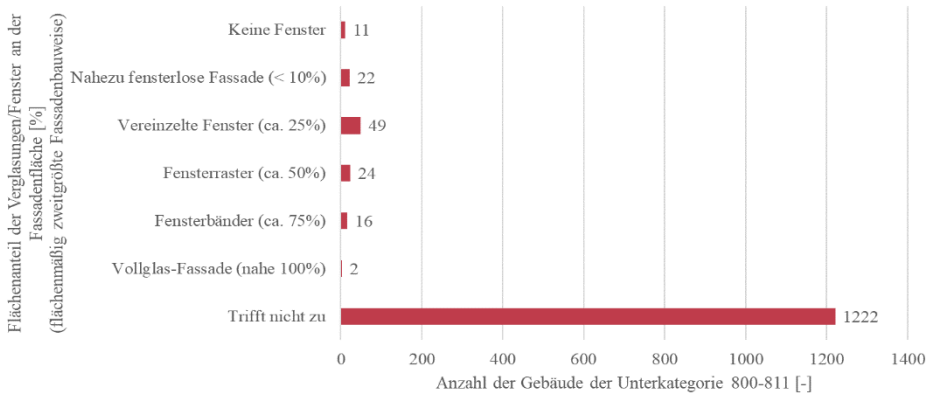


Abbildung A1.13: Verglasungsanteil der der flächenmäßig zweitgrößten Fassade

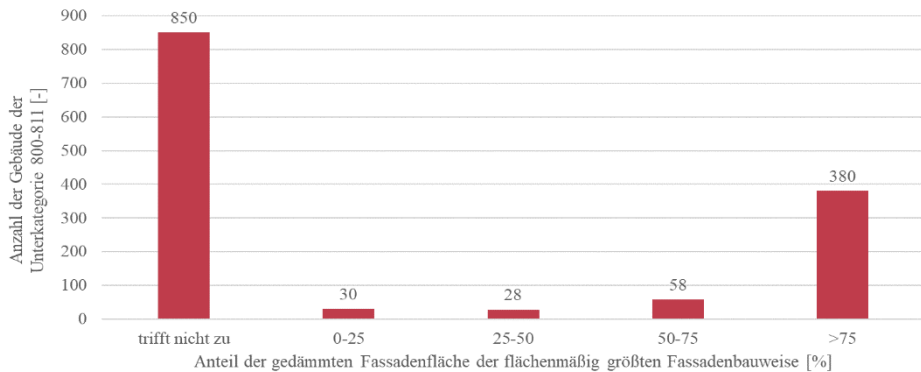


Abbildung A1.14: Dämmanteil der flächenmäßig größten Fassade

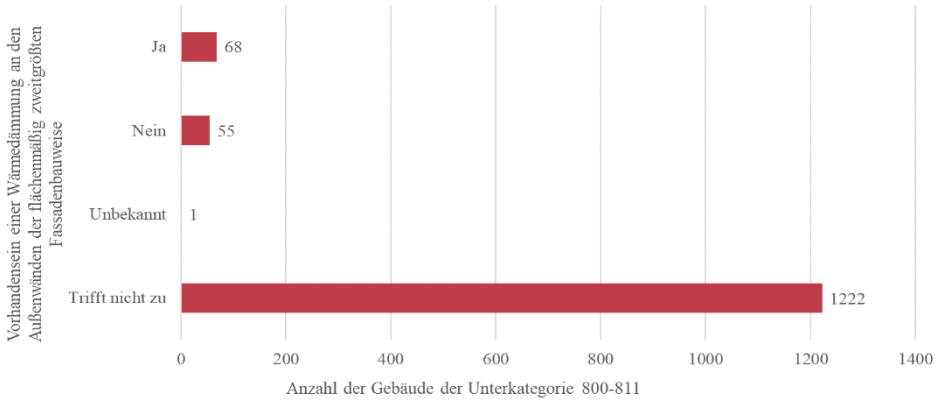


Abbildung A1.15: Vorhandensein einer Wärmedämmung an der flächenmäßig zweitgrößten Fassade

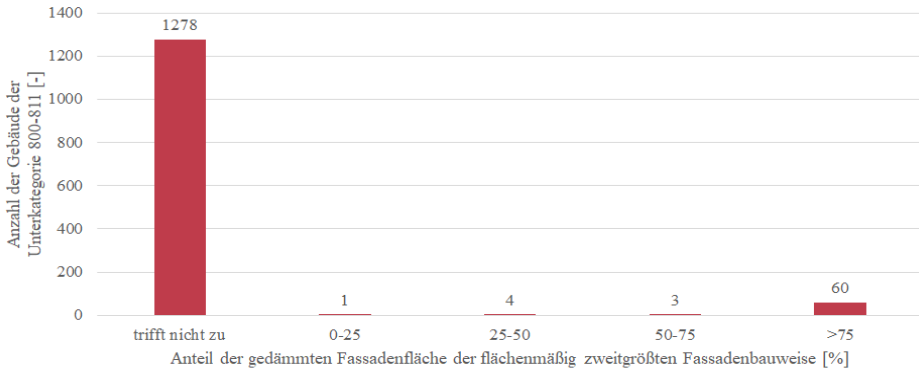


Abbildung A1.16: Dämmanteil der flächenmäßig zweitgrößten Fassade

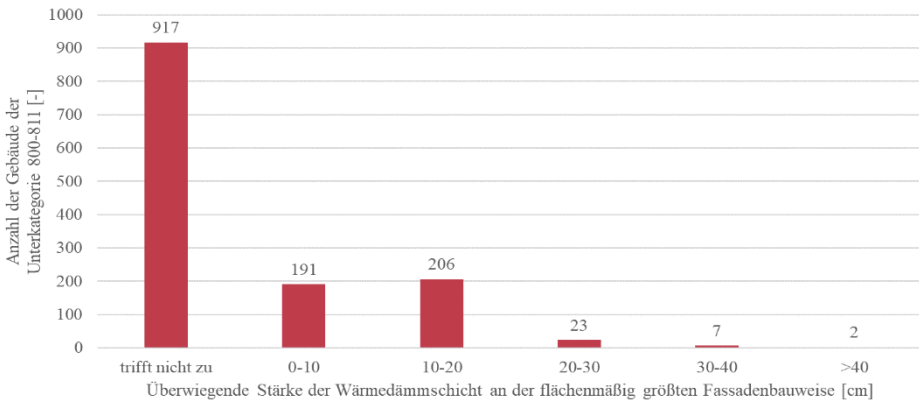


Abbildung A1.17: Dämmstärke der flächenmäßig größten Fassade

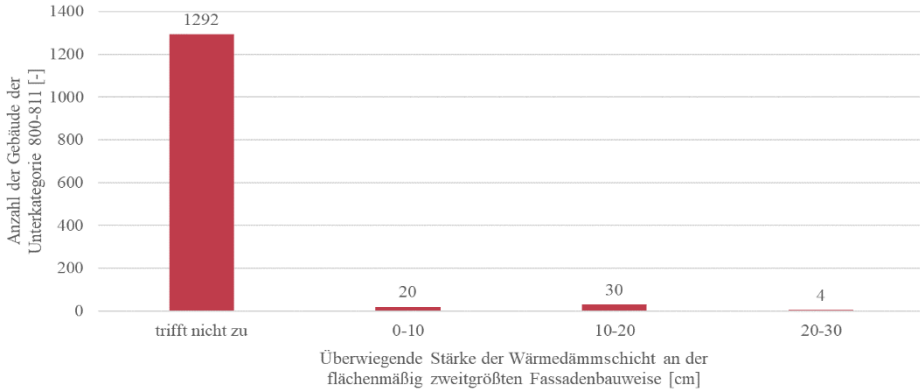


Abbildung A1.18: Dämmstärke der flächenmäßig zweitgrößten Fassade

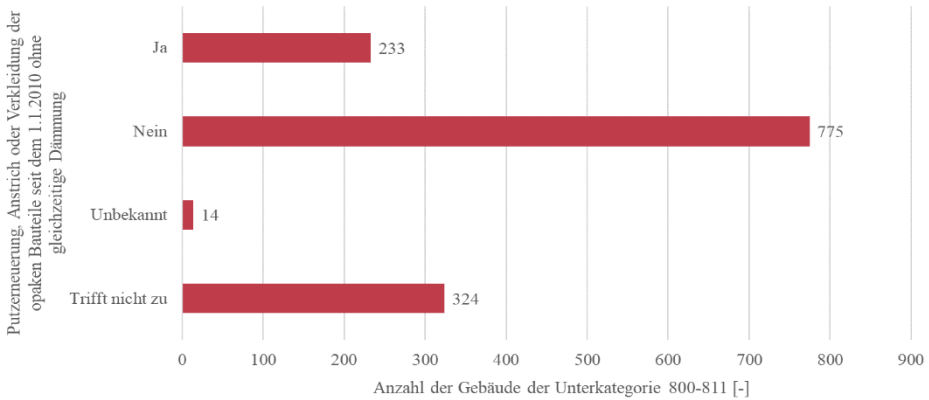


Abbildung A1.19: Putz erneuerung seit dem 01.01.2010 - Zuordnung Gebäudekategorie 8

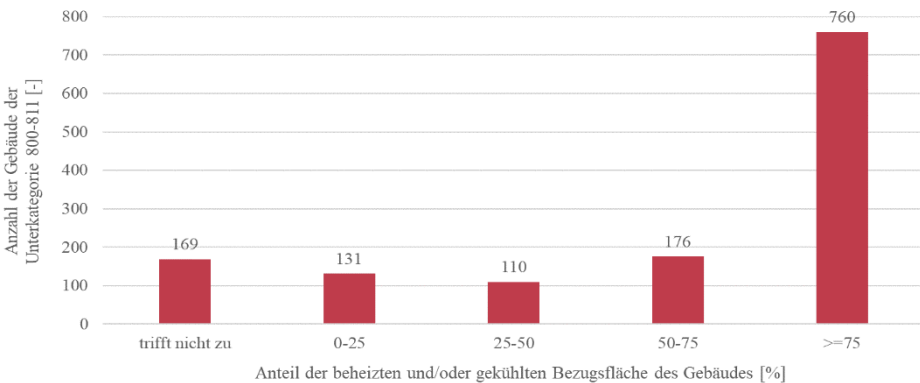


Abbildung A1.20: Anteil an konditionierter Bezugsfläche - Zuordnung Gebäudekategorie 8

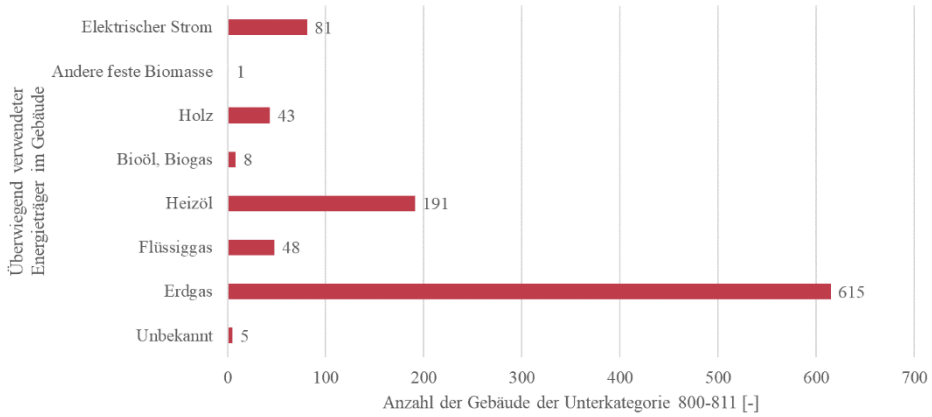


Abbildung A1.21: Haupt-Energieträger - Zuordnung Gebäudekategorie 8

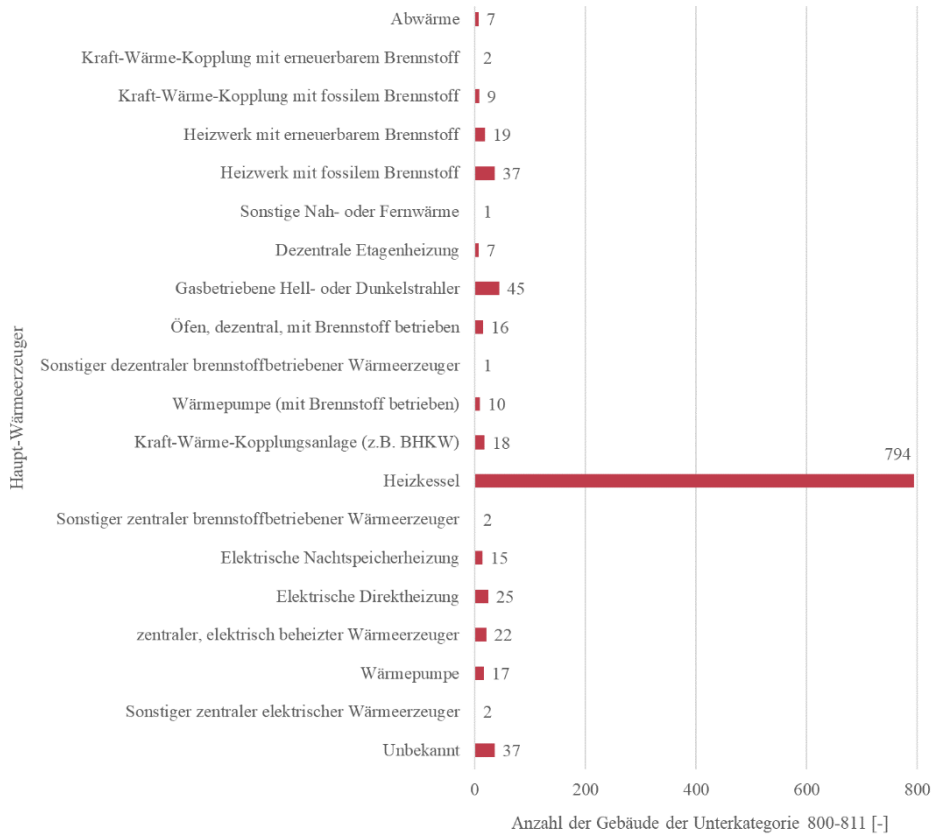


Abbildung A1.22: Haupt-Wärmeerzeuger - Zuordnung Gebäudekategorie 8

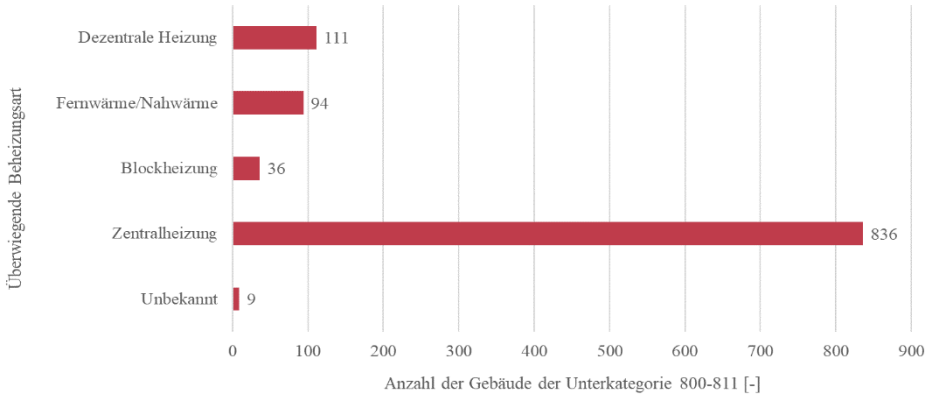


Abbildung A1.23: Haupt-Beheizungsart - Zuordnung Gebäudekategorie 8

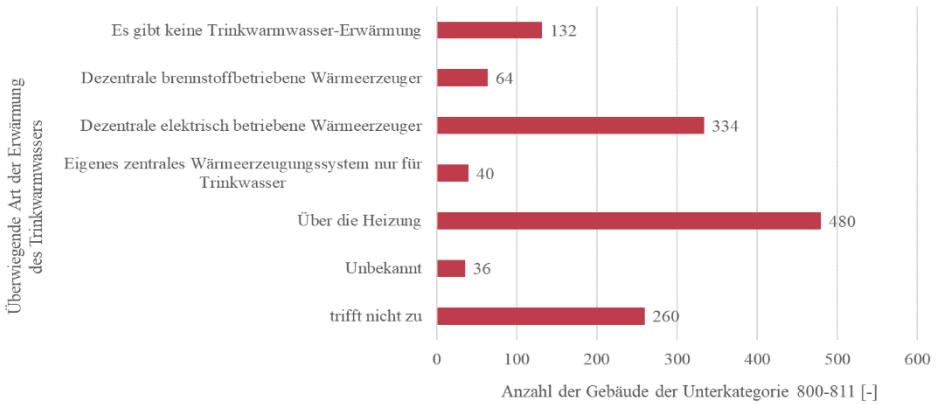


Abbildung A1.24: Haupt-Erwärmungsart - Zuordnung Gebäudekategorie 8

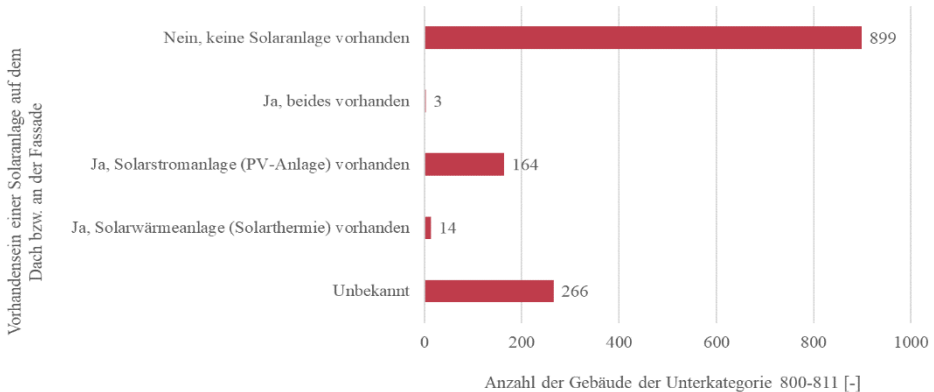


Abbildung A1.25: Vorhandensein einer Solaranlage - Zuordnung Gebäudekategorie 8

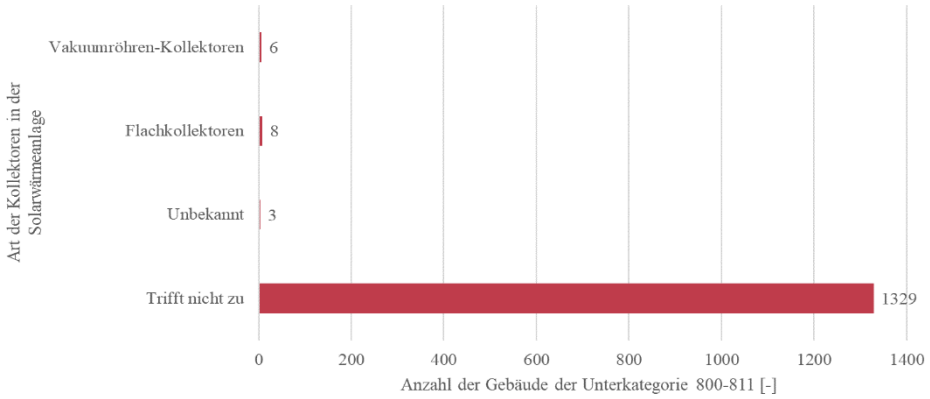


Abbildung A1.26: Art der Kollektoren (Solaranlage) - Zuordnung Gebäudekategorie 8

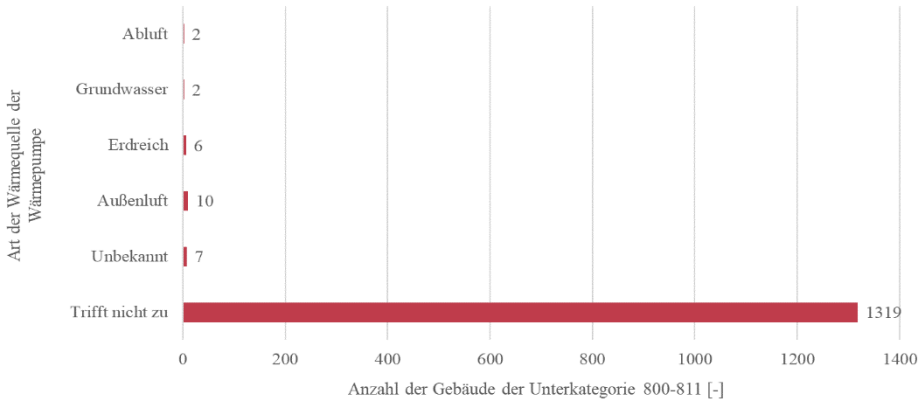


Abbildung A1.27: Art der Wärmequelle der Wärmepumpe - Zuordnung Gebäudekategorie 8

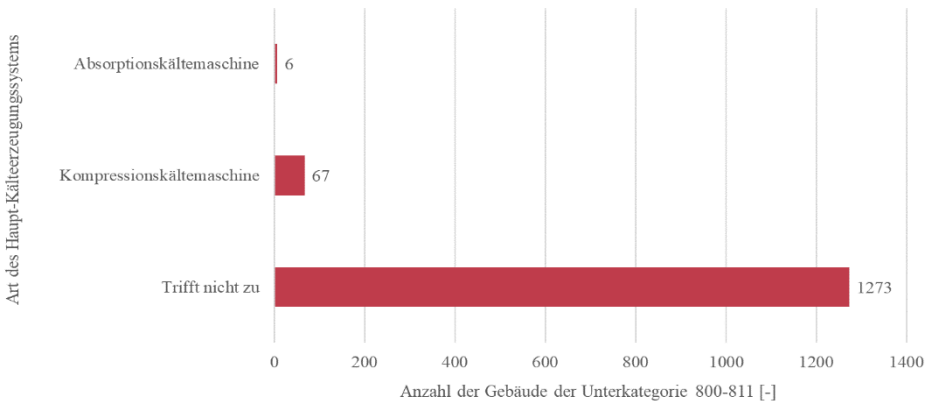


Abbildung A1.28: Art des Haupt-Kälteerzeugungssystem - Zuordnung Gebäudekategorie 8

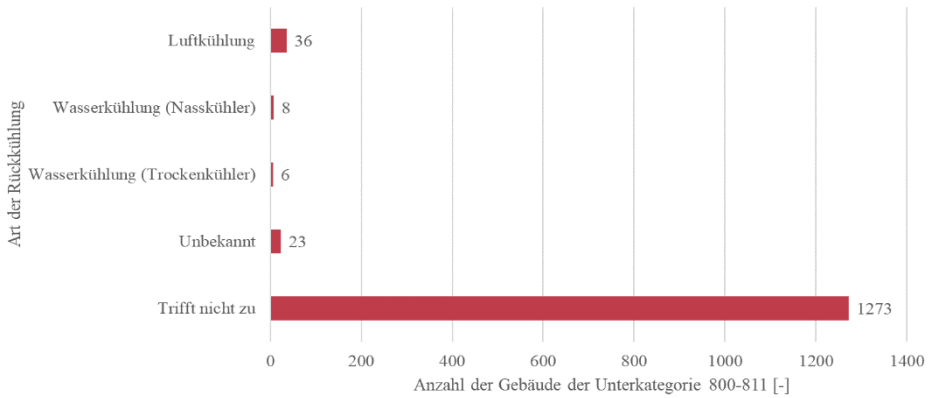


Abbildung A1.29: Art der Rückkühlung - Zuordnung Gebäudekategorie 8

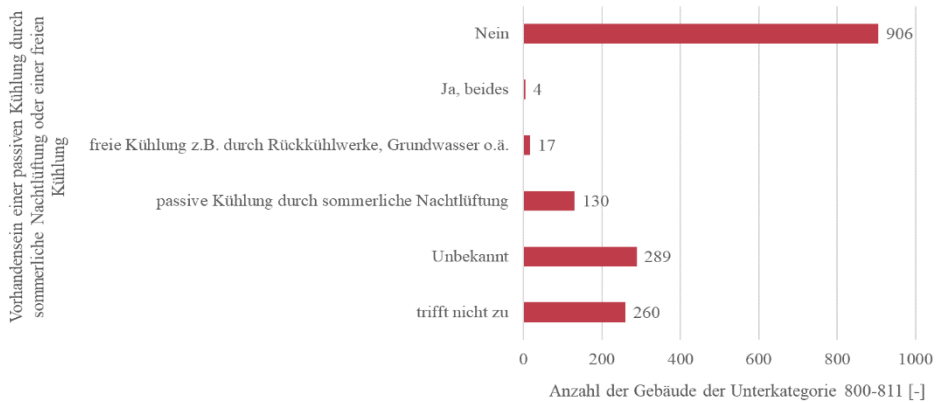


Abbildung A1.30: Vorhandensein einer passiven Kühlung - Zuordnung Gebäudekategorie 8

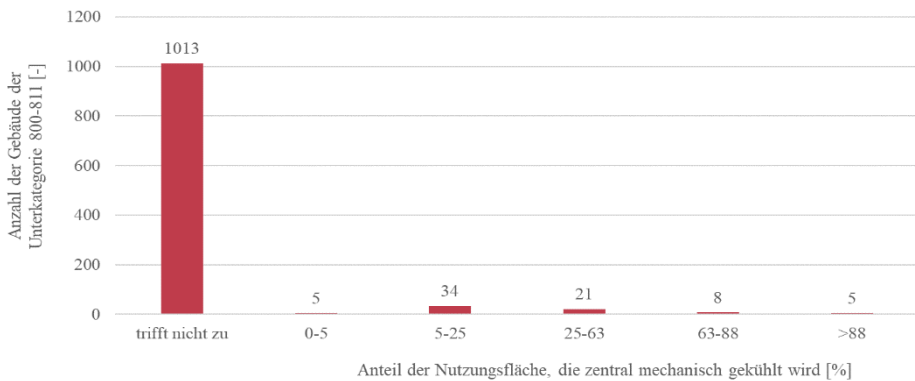


Abbildung A1.31: Zentral mechanisch gekühlte Nutzfläche - Zuordnung Gebäudekategorie 8

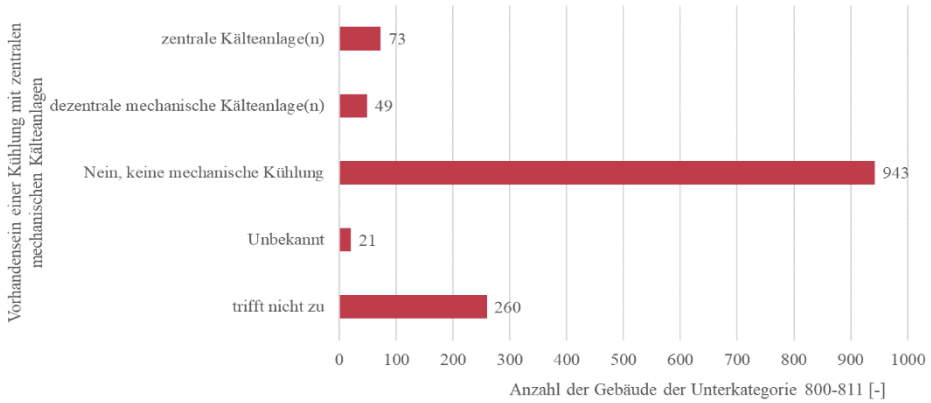


Abbildung A1.32: Vorhandensein einer zentral mech. Kühlung - Zuordnung Gebäudekategorie 8

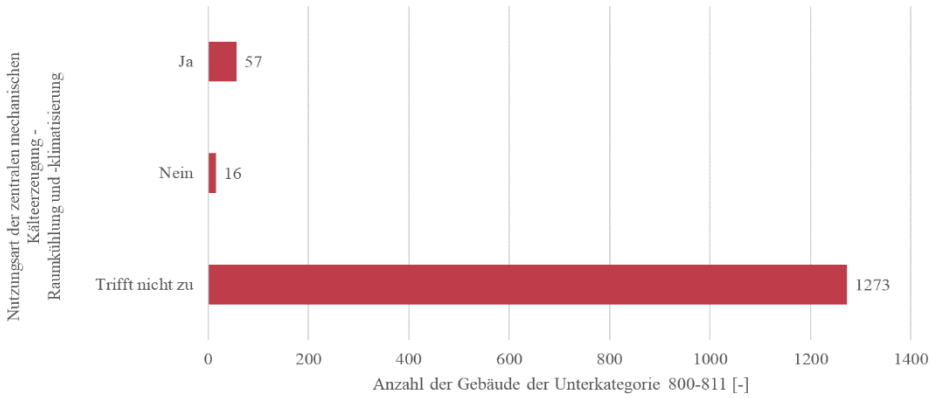


Abbildung A1.33: Kälteerzeugung Raumkühlung - Zuordnung Gebäudekategorie 8

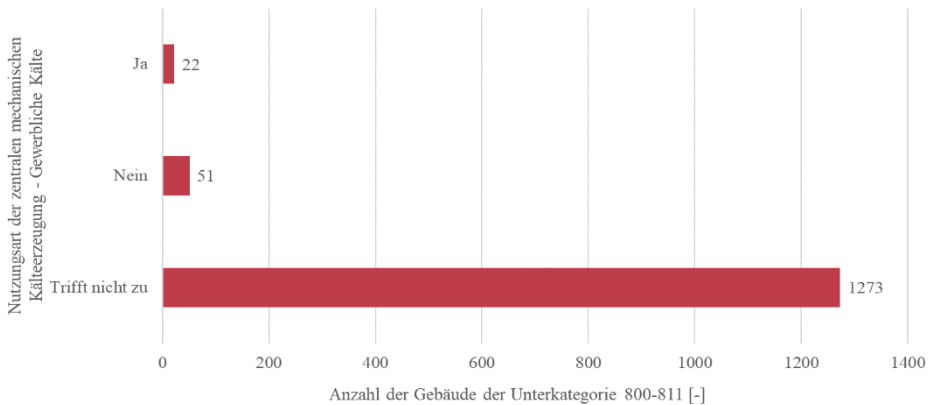


Abbildung A1.34: Kälteerzeugung Gewerbliche Kälte - Zuordnung Gebäudekategorie 8

A2. Thermografiebilder – Messung am 21.03.18

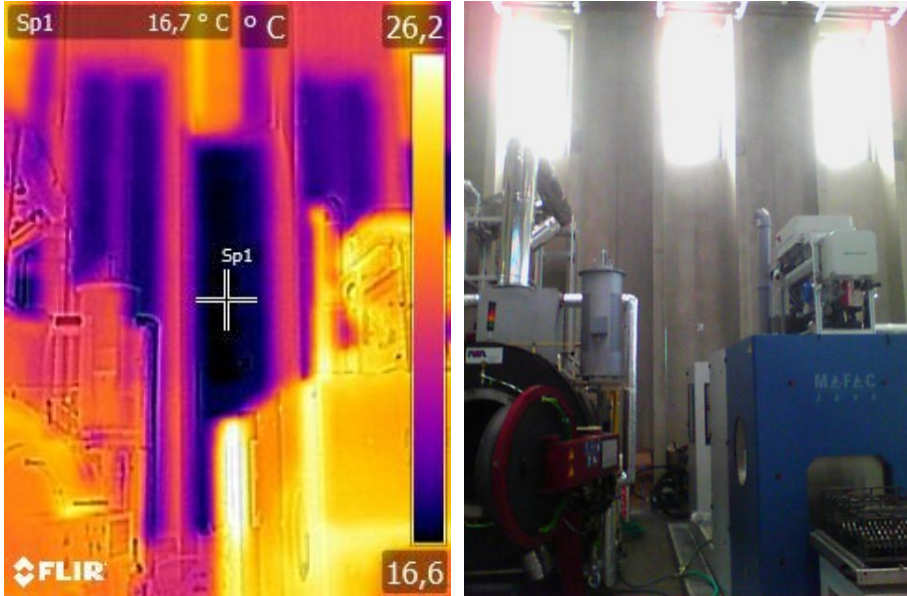


Abbildung A2.1: Thermografie – 21.03.2018 um 10:22 Uhr - Ostseite

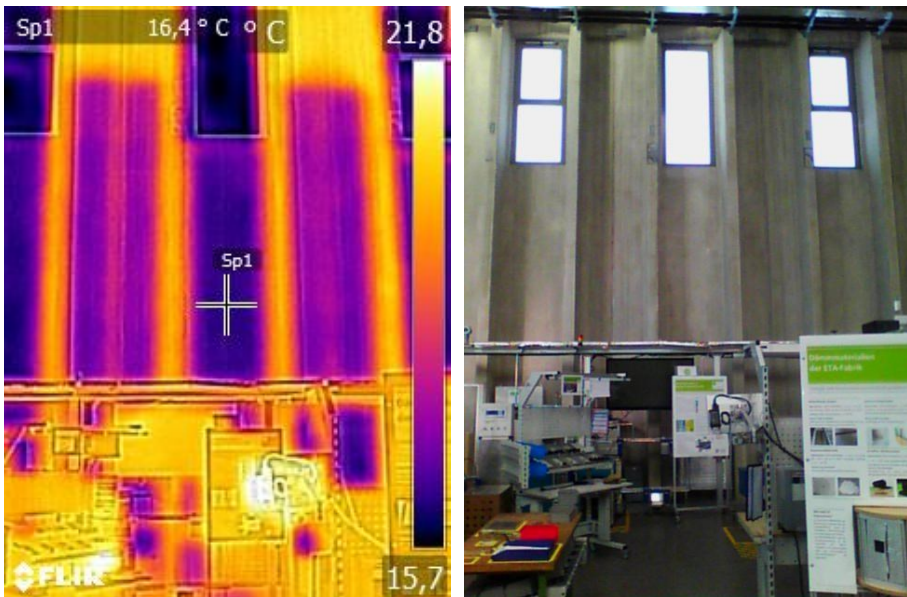


Abbildung A2.2: Thermografie – 21.03.2018 um 10:24 Uhr – Westseite