

Nadine Harder
Friederike Schlegl
Stefan Albrecht
Sumeer Park
Philip Leistner

Bauphysikalische und ökologische Potenziale von adaptiven Leichtbaukonstruktionen

Univ.-Prof. (em.) Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. mult. Dr. E.h. mult. Karl Gertis zum 80. Geburtstag gewidmet

Die zunehmende Inanspruchnahme von Ressourcen und die damit einhergehenden Umweltauswirkungen rücken im Bauwesen immer weiter in Vordergrund. Derzeit sind die beiden Disziplinen für etwa 60 % des Ressourcenverbrauchs sowie für etwa 35 % des Energieverbrauchs verantwortlich [1, 2]. Dieser Anteil könnte noch steigen, wenn alle Bauten eine konventionelle Weise verlangen, da die Weltbevölkerung weiter zunimmt. Prognosen gehen von einem Anstieg der Weltbevölkerung bis 2100 von derzeit knapp 7,5 Milliarden auf etwa 11,2 Milliarden Menschen aus [3]. Um der wachsenden Weltbevölkerung sowie der großen Ressourceninanspruchnahme gerecht zu werden, sind innovative, ressourcensparende Leichtbaukonstruktionen unumgänglich. Aktuelle Forschungsarbeiten erweitern das Spektrum hin zu adaptiven Leichtbaukonstruktionen, die es erlauben, bauphysikalische Eigenschaften gezielt anzupassen, um letztlich den extensiven Baustoffeinsatz zu reduzieren. Zur Quantifizierung und Verifizierung der damit verbundenen Potenziale in puncto Nachhaltigkeit wurden die Einflüsse der Adaptivität von Leichtbaukonstruktionen auf deren bauphysikalisches Verhalten sowie deren Ökobilanz erfasst und beschrieben.

Stichworte: Leichtbau; Leichtbaukonstruktion; Gebäudehülle, adaptive, ressourcenschonende; ressourcenschonendes Bauen; Ökobilanz; Materialsysteme, durchströmte, intrinsische; Membranen

1 Motivation

Um das Ziel der Ressourceneinsparung und der Reduzierung von Umweltwirkungen bei adaptiven Leichtbaukonstruktionen im ganzheitlichen Sinne zu erreichen, ist neben den architektonischen Aspekten die Betrachtung der bauphysikalischen und ökologischen Potenziale entscheidend. Die bauphysikalische Betrachtung berücksichtigt, ob die eingesetzten Materialien wärme-, feuchte-, brandschutz- und lichttechnisch geeignet, akustisch und energetisch angemessen sowie klima- und kulturgerecht sind. Die ökologische Bilanzierung ist unabdingbar, um innovative Technologien hinsichtlich Ressourceninanspruchnahme und Umweltwirkungen bei Herstellung, Nutzung und Lebensende zu bewerten [4]. Adaptive Bauteileigenschaften bringen sowohl für die bauphysikalische als auch für die ökologische Charakteristik bislang nicht berücksichtigte Aspekte mit sich. Beispielsweise scheint der Energiebedarf

Physical and environmental potentials of adaptive lightweight constructions

The increasing use of resources and the associated environmental effects are becoming more and more important in architecture and construction. Currently, the two disciplines are responsible for about 60 % of resource consumption and about 35 % of energy consumption [1, 2]. This percentage may rise, if all men demand conventional buildings since the world population continues to increase. Forecasts predict an increase in the world population by 2100 from currently just under 7.5 billion to around 11.2 billion people [3]. Innovative, resource-saving lightweight constructions are indispensable in order to meet the growing world population and the large demand for resources. Latest research work extends the spectrum to adaptive lightweight constructions, which make it possible to manipulate building physical properties in a targeted manner. They are attributed with great potential in terms of their slimness, low mass and heat storage capacity, sustainability and the associated ecobalance. In order to be able to verify and quantify these potentials, the influences of the adaptivity of lightweight constructions on their structural-physical behaviour and their ecological balance were simulated and described for the first time.

Keywords: lightweight construction; building envelope, adaptive, resource-saving; resource-saving construction; ecobalance; material systems, flowed through, intrinsic; membranes

für die Aktorik adaptiver Leichtbaukonstruktionen bauphysikalisch in erster Näherung vernachlässigbar, für die ökologischen Potenziale können diese aber ausschlaggebend sein. Weiterhin wird es zukünftig entscheidend sein, bauphysikalische und ökologische Parameter nicht getrennt zu behandeln, sondern gerade bei adaptiven Leichtbaukonstruktionen unter vergleichbaren Randbedingungen integriert zu betrachten, um so Optimierungen zu ermöglichen. Vor diesem Hintergrund wird nachstehend das Potenzial von adaptiven Leichtbaukonstruktionen im Hinblick auf bauphysikalische und ökobilanzielle Potenziale exemplarisch aufgezeigt.

2 Hintergrund

2.1 Bestehende Materialsysteme

Leichte Konstruktionen streben nach einem geringen Eigengewicht unter optimaler Ausnutzung der Funktionali-

tät. Hierfür kommen z. B. moderne Verglasungen oder stark wärmegeämmte Konstruktionen zum Einsatz. Leichtbaukonstruktionen zeichnen sich durch ihre geringe flächenbezogene Masse, ihre Schlankheit und ihre Flexibilität aus. Sie besitzen daher oftmals geringere Wärmespeicherkapazitäten als massive Konstruktionen, weshalb es im Rauminnen an warmen Tagen aufgrund einwirkender Wärmeeinträge zu höheren Temperaturen kommt. An kalten Tagen hingegen können umgekehrt die Lufttemperaturen im Rauminnen geringer ausfallen als bei Konstruktionen mit größerer thermischer Masse. Ferner stellt sich ein Temperaturverlauf ein, der stärker alterniert als bei massiveren Konstruktionen. Durch Adaptivität lassen sich die Eigenschaften von Leichtbaukonstruktionen ändern. So können Wärmeströme gezielt zu einer erhöhten Luftdurchlässigkeit der Fassade genutzt werden, um Innenoberflächen- und Raumlufttemperaturen anzupassen. Dies führt zur Senkung des Heizenergiebedarfs. Analog dazu wird durch Abführen des Wärmestroms an der Innenoberfläche sowie im Rauminnen die Temperatur reduziert, um Aufwand für Kühlung zu reduzieren. Im Folgenden werden an Modellen verschiedenartiger adaptiver Leichtbaukonstruktionen deren bauphysikalische und ökobilanziellen Potenziale ermittelt. Die Modelle enthalten ein Massen- und Mengengerüst der betrachteten Konstruktionen sowie der für die Adaptivität (z. B. aktives Durchströmen) notwendigen Aktorik. Weiterhin werden die Aktorik und der daraus resultierende Bedarf an elektrischer Energie berücksichtigt. Dies ermöglicht sowohl bauphysikalische als auch ökobilanzielle Simulationen und Szenarien unter vergleichbaren Randbedingungen.

2.1.1 Durchströmte Konstruktionen

Durchströmte Konstruktionen profitieren maßgeblich von dem Wärmetransportphänomen der Konvektion und ermöglichen daher die Variation thermischer Merkmale in einer größeren Spanne. Nach [5] können beispielsweise bei einer durchströmten Konstruktion mit aktiven Konvektionsmitteln U-Werte von bis $3 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ erreicht werden, während die Konstruktion im nicht durchströmten Zustand einen U-Wert von $0,28 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ aufweist. Je geringer der Wärmedurchlasswiderstand einer Konstruktion ist, desto größer werden die Einflüsse der innen- und außen-seitigen Wärmeübergänge. Der U-Wert einer Konstruktion lässt sich anhand Gleichung (1) [6] bestimmen;

$$U = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_{se}} + R + \frac{1}{h_{si}}\right)} \leq 6 \quad [\text{W}/(\text{m}^2\text{K})] \quad (1)$$

mit

h_{se} : Wärmeübergangskoeffizient außen [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]

h_{si} : Wärmeübergangskoeffizient innen [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]

R: Wärmedurchlasswiderstand der Konstruktion [$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$]

Nach [6] werden für einen horizontalen Wärmestrom ein äußerer Wärmeübergangskoeffizient von $25 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ sowie ein innerer Wärmeübergangskoeffizient von $8 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ angesetzt. Der Wärmedurchgangskoeffizient nach Gleichung (1) kann rechnerisch maximal – bei einem vernachlässig-

bar geringen Wärmedurchlasswiderstand ($R \approx 0 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$) unter Voraussetzung eines horizontalen Wärmestroms – einen Wert von $6 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ annehmen. Leichtbaukonstruktionen können im Kontext der Adaptivität durchströmt werden. Hierfür lässt sich im wärmedämmenden Zustand der Wärmedurchgang mittels einer ruhenden Luftschicht verhindern, während im wärmeleitenden Zustand eine schwach oder stark durchströmte Luftschicht in Frage kommt. Des Weiteren sind für den wärmeleitenden Zustand verschiedene Fluide denkbar.

2.1.2 Membrankonstruktionen

Membrankonstruktionen bestehen in der Regel aus Gewebe oder Ethylen-Tetrafluorethylen-Folien (ETFE). Membranen aus ETFE können aus einer oder mehreren Lagen bestehen und weisen eine hohe Licht- und UV-Durchlässigkeit auf. Durch gezielte Farbgebung unterschiedlicher Folienlagen können verschiedene Transparenz- und Reflexionsfähigkeiten verliehen werden. ETFE bietet aufgrund der glatten Oberfläche und der geringen Oberflächenspannung eine geringe Verschmutzbarkeit. Staub sowie andere Partikel können schlecht anhaften [7]. Zudem verfügt ETFE über ein geringes Eigengewicht und eignet sich somit insbesondere für große Spannweiten. Aufgrund der hohen Elastizität ist ETFE auch stabil bei extremeren klimatischen Einwirkungen. Zwischen den einzelnen ETFE-Lagen können durch die Be- und Entlüftung der jeweiligen Luftschicht unterschiedlich große Wärmedurchgänge erzeugt werden. Beispielsweise weist ein fünfflagiges ETFE-Membrankissen einen U-Wert von $1,1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ auf [8, 9], wohingegen eine Membranlage einen U-Wert von $5,8 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ vorgibt. Der Wärmedurchgang eines Membrankissens findet im Vergleich zu herkömmlichen Konstruktionen über einen geringen Anteil der Wärmeleitung, jedoch über einen großen Anteil an Konvektion und Strahlung statt. Der Strahlungsanteil ergibt sich maßgeblich aufgrund der Strahlungszahlen der beiden Oberflächen. Der konvektive Anteil resultiert aus der Lage und Dicke der Luftschicht(en) sowie aus der Wärmestromrichtung.

2.1.3 Intrinsische Konstruktion

Intrinsische Materialien sind in der Lage, ihre Eigenschaften aufgrund von Reaktionen im Materialinneren zu verändern. Phase Change Materials (PCM) können verschiedene Aggregatzustände annehmen und dabei unterschiedlich viel Wärme aufgrund der Schmelzenthalpie absorbieren oder emittieren. Dazu weisen sie im Vergleich zu anderen Materialien, beispielsweise Beton, eine hohe Wärmespeicherkapazität auf. Ist das PCM flüssig, kann es bei höheren Temperaturen, bis zum Aushärten, Wärme absorbieren. Bei sinkender Temperatur verflüssigt sich das PCM allmählich und gibt die latente gespeicherte Wärme wieder ab. PCM eignen sich in Leichtbaukonstruktionen daher besonders an warmen Tagen, um die thermische Masse der Bauteile zu erhöhen, was Temperaturspitzen durch Aufnahme der Raumwärme reduziert. An kalten Tagen hingegen können sie phasenverschoben absorbierte solare Wärmeenergie an den Raum abgeben, um den Raum vor zu geringen Temperaturen zu bewahren. Ziel des Einsatzes von PCM ist es, die alternierenden Temperaturspitzen

zen zu reduzieren, was Heiz- und Kühlenergie einspart sowie die thermische Behaglichkeit der Nutzer steigert [10].

2.2 Bauphysikalische Anforderungen

Adaptive Leichtbaukonstruktionen sollen natürlich wie andere Konstruktionen den bauphysikalischen Anforderungen gerecht werden. Über die bekannten Normen und Regelwerke hinaus sind für adaptive Leichtbaukonstruktionen aber keine umfassenden Dokumente dieser Art bekannt. Sie befinden sich teilweise in der Entwicklung [11] und vereinzelt gibt es bereits Normvorgaben, beispielsweise in der DIN 4108 Teil 2 [6] in Gestalt von Anhaltspunkten zum Mindestwärmeschutz für Leichtbaukonstruktionen. Weitere bauphysikalische Anforderungen werden zunächst in Anlehnung an die Bestandsnormen und Regelwerke für massive Konstruktionen betrachtet.

2.2.1 Wärme

Nach DIN 4108 Teil 2 [6] wird eine Konstruktion als Leichtbaukonstruktion bezeichnet, wenn deren flächenbezogene Masse $m' \leq 100 \text{ kg/m}^2$ beträgt. Diese lässt sich anhand von Gleichung (2) folgendermaßen ermitteln: Um die flächenbezogene Masse einer Konstruktion zu bestimmen, müssen jeweils die Rohdichten sowie die Schichtdicken der vorkommenden Materialien bekannt sein, woraus sich in Summe die flächenbezogene Gesamtmasse ergibt.

$$m' = \sum \rho \cdot d \quad [\text{kg/m}^2] \quad (2)$$

Des Weiteren ist hierfür der Mindestwärmeschutz nach [6] mittels des Wärmedurchlasswiderstandes R zu prüfen. Dies erfolgt über den Vergleich $R_{\text{vorh.}} > R_{\text{mind.}}$. Der vorhandene Wärmedurchlasswiderstand der Konstruktion muss dabei größer sein als der geforderte Mindestwärmeschutzwiderstand nach [6]. Für Leichtbaukonstruktionen ist mindestens ein Wärmedurchlasswiderstand von $1,75 \text{ m}^2\text{K/W}$ einzuhalten. Der vorhandene Wärmedurchlasswiderstand ist nach Gleichung (3) wie folgt aus der Summe der jeweiligen Dicke und jeweiligen Wärmeleitfähigkeit der Materialien zu ermitteln:

$$R = \sum_n \frac{d}{\lambda} \quad [\text{m}^2\text{K/W}] \quad (3)$$

Um eine Konstruktion hinsichtlich des Wärmedurchgangs nach [12, 13] bewerten zu können, wird der Wärmedurchgangskoeffizient herangezogen. Er ist mittels Gleichung (4) zu bestimmen:

$$U = \left(R_{\text{se}} + \sum_n \frac{d}{\lambda} + R_{\text{si}} \right)^{-1} \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (4)$$

mit:

$R_{\text{se}}, R_{\text{si}}$: Wärmeübergangswiderstand außen, innen
[$\text{m}^2\text{K/W}$]

d : Dicke der jeweiligen Materialschicht [m]

λ : Wärmeleitfähigkeit des jeweiligen Materials
[W/mK]

Nach [13] gilt für Konstruktionen wie Außenwände oder Geschossdecken gegen Außenluft ein U-Wert von $0,28 \text{ W/m}^2\text{K}$.

2.2.2 Feuchte

Eine Konstruktion, die an das Außenklima angrenzt, hat neben den wärmetechnischen Mindestanforderungen (siehe 2.2.1) ebenfalls feuchtetechnische Normanforderungen einzuhalten. Um Oberflächentauwasser an der Innenoberfläche der Konstruktion zu vermeiden, wird der Temperaturfaktor f_{Rsi} nach DIN 4108 Teil 2 [6] betrachtet. Dieser wird zur Vermeidung von Oberflächentauwasser und möglicher Schimmelpilzbildung herangezogen und soll größer als 0,7 sein. Der Temperaturfaktor wird anhand von Gleichung (5) ermittelt:

$$f_{\text{Rsi}} = \frac{\theta_{\text{si}} - \theta_{\text{e}}}{\theta_{\text{i}} - \theta_{\text{e}}} \quad [-] \quad (5)$$

Nach Normrandbedingungen [14], siehe Tabelle 1, sind die folgenden Werte in obige Gleichung (5) einzusetzen. Daraus resultiert, dass die Innenoberflächentemperatur mehr als $12,6^\circ\text{C}$ betragen muss. Damit stellt sich kein Oberflächentauwasser und voraussichtlich auch kein Schimmelpilzwachstum ein.

Anhand der hier exemplarisch genutzten thermischen und hygrischen Merkmale bzw. Anforderungen wird deren stationärer Charakter deutlich. Der vielfach instationären Realität wird damit noch zu wenig Rechnung getragen, wie es mit der Adaptivität beabsichtigt ist. Hierfür werden nachfolgend die Konstruktionen anhand von Simulationen instationär untersucht.

2.3 Ökobilanz

Ein großes Ziel der Leichtbaukonstruktionen ist es, ressourceneffizient zu bauen und Ressourcen einzusparen. Ob adaptive Leichtbaukonstruktionen prinzipiell von ökologischem Vorteil sind, ist pauschal nicht zu beantworten. Eine Methode, mit der sich dies näher untersuchen und messbar machen lässt, ist die Ökobilanz (Life Cycle Assessment, LCA). Die LCA ist eine standardisierte Methode, um Ressourcenbedarf und Umweltwirkungen von Produkten, Systemen oder Konstruktionen über deren Lebenszyklus hinweg zu quantifizieren und messbar zu machen [15, 16]. Die Ergebnisse werden in verschiedenen Wirkungskategorien beschrieben, die für Ökobilanzen im Bauwesen weitestgehend einheitlich sind [15, 16]. Im Rahmen dieser Arbeit werden ressourcenseitig der Primärenergiebedarf (PEne), der den Ressourcenverbrauch nicht erneuerbarer (fossiler) Energieträger bewertet (sowohl für die energeti-

Tabelle 1. Zugrundeliegende Normrandbedingungen des Temperaturfaktors nach [14].

Table 1. Underlying standard boundary conditions of the temperature factor according to [14].

Fall	Lufttemperatur	Relative Luftfeuchte	Wärmeübergangswiderstand
Außen	$\theta_{\text{e}} = -5^\circ\text{C}$	$\varphi_{\text{e}} = 80\%$	$R_{\text{se}} = 0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$
Innen	$\theta_{\text{i}} = 20^\circ\text{C}$	$\varphi_{\text{i}} = 50\%$	$R_{\text{si}} = 0,25 \text{ m}^2\text{K/W}$

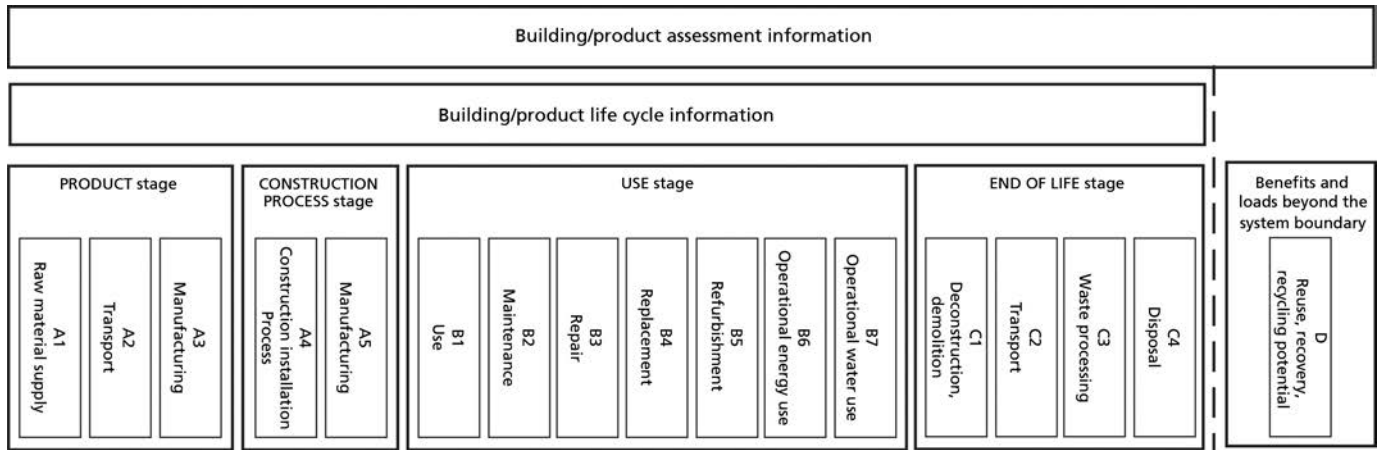


Bild 1. Schematische Darstellung des Lebenszyklus eines Gebäudes [17].

Fig. 1. Schematic representation of the life cycle of a building [17].

sche als auch für die werkstoffliche Nutzung), und emissionsseitig das Treibhauspotenzial (GWP) ausgewertet. Das Treibhauspotenzial sagt aus, welchen Betrag ein Produkt oder System zur Erderwärmung beiträgt; es wird dabei in der Einheit kg CO₂-Äquivalente messbar gemacht. Die Ergebnisse werden auf den Lebenszyklus von Gebäuden bzw. Konstruktionen bezogen (Bild 1). Bei leichten und adaptiven Konstruktionen werden im Vergleich zu konventionellen Konstruktionen Verschiebungen und Wechselwirkungen zwischen der Herstellungs- und Nutzungsphase erwartet. Beispielsweise könnte dies eine Verschiebung eines Großteils des Ressourcenbedarfs und der Umweltwirkungen von der Herstellungsphase zur Nutzungsphase hervorrufen, da in der Herstellungsphase stark an Masse eingespart werden soll. In der Nutzungsphase ist dagegen mit höheren Ressourcenbedarfen und Umweltwirkungen in Form von Energie für die Aktuierung wie beispielsweise durch Windlasten zu rechnen ist, die sowohl für die Gebäudehülle als auch für die Gebäudestruktur einen Bedarf an Aktuierungsenergie hervorrufen [1].

3 Untersuchte adaptive Leichtbaukonstruktionen

Die untersuchten adaptiven Leichtbaukonstruktionen werden zunächst mittels der Programme WUFI Pro [18] und WUFI Plus [19] thermisch sowie hygrothermisch auf Bauteilebene über einen Simulationszeitraum von jeweils drei Jahren simuliert. Die Klimadaten stammen aus den TRY-Datensätzen 2011 des Programmes Metronorm [20]. Als Innenraumklima wird die Sinuskurve mit normaler Feuchtelast herangezogen. Die ökologischen Potenziale werden anhand des Programmes GaBi [21] untersucht und beziehen sich auf einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren. Die Konstruktionen werden für den Standort Stuttgart untersucht mit Ausrichtung der Konstruktion in Richtung Süd-Westen, da hier die höchste Schlagregenbelastung auftritt.

Für die ökologische Untersuchung wird für alle Konstruktionen ein funktionelles Äquivalent von 1 m² Bauteilfläche als Referenzgröße gewählt. Die Dicke der Konstruktionen ist abhängig von deren Aufbau, welcher folgend je beschrieben wird. Die Systemgrenze der Ökobilanz beläuft sich auf die Produktionsphase (A1–A3), die Aktuierung (Betrieb B6) und das Lebensende (C3, C4, D), da hier die

ausschlaggebenden Lasten anfallen. Für die Nutzungsphase (B6) werden abhängig von der Konstruktion verschiedene Szenarien der Aktuierung betrachtet. Für die Ergebnisse der Ökobilanzierung werden der Primärenergiebedarf aus nicht erneuerbare Ressourcen (PEne) sowie das Treibhauspotenzial (GWP) ausgewertet. Um den betrachteten Nutzungsphasen gerecht zu werden und auch deren Zukunftsfähigkeit stärker als bislang zu berücksichtigen, werden die Betriebsaufwendungen zur Aktuierung zum einen mit dem heutigen Umweltprofil der Stromerzeugung berechnet, zum anderen zusätzlich mit dem Umweltprofil zukünftiger Stromerzeugung (Jahr 2050). Diese Umweltprofile wurden auf Basis des Leitszenarios einer Szenarienstudie der Europäischen Kommission zur zukünftigen Energieerzeugung in der EU [22] entwickelt und für Ökobilanzen verfügbar (bis 2050) gemacht. Demnach verursacht die aktuelle Stromerzeugung in Deutschland etwas mehr als 0,5 kg CO₂-Äq./kWh an treibhausrelevanten Emissionen. Bis zum Jahr 2050 wird eine Absenkung auf rund 0,2 CO₂-Äq./kWh erwartet. Für die Stromerzeugung in Deutschland werden derzeit rund 7 MJ/kWh an nicht erneuerbaren (fossilen) Ressourcen aufgewendet (PEne), bis 2050 wird eine Absenkung auf unter 4 MJ/kWh erwartet.

3.1 Durchströmte Konstruktion

Die durchströmte Konstruktion wird anhand einer Holzrahmenbauweise mit hinterlüfteter Luftschicht im ruhenden sowie im stark belüfteten Zustand untersucht. Im isolierenden Zustand verfügt die Konstruktion über eine ruhende Luftschicht, siehe Tabelle 2, während der leitende Zustand eine stark belüftete Luftschicht betrachtet. Die Luftschicht wird von zwei OSB-Platten begrenzt. Es gelten die Randbedingungen für ruhende und stark belüftete Luftschichten nach DIN EN ISO 6946 [12]. Die Wärmeleitfähigkeit der ruhenden Luftschicht (Tabelle 2, Zeile 6) resultiert nach [12] aus dem Wärmedurchlasswiderstand von 0,18 m²K/W einer 50 mm dicken Luftschicht mit horizontalem Wärmestrom. Der U-Wert der Konstruktion beträgt 0,24 W/m²K. Die Dicke der Konstruktion ergibt sich zu 25 cm, die flächenbezogene Masse beträgt 60 kg/m². Für den leitenden Zustand werden die Luftgeschwindigkeiten

Tabelle 2. Aufbau (von außen nach innen) der durchströmten Konstruktion [12, 18].

Table 2. Construction (from outside to inside) of the flow-through construction [12, 18].

Schicht	Material (von außen nach innen)	Dicke [m]	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl [-]	Rohdichte [kg/m ³]
1	Mineralischer Außenputz	0,007	0,8	25	1.900
2	Holzfaserdämmplatte	0,02	0,04	2,9	165
3	MDF	0,015	0,10	12	528
4	Mineralfaser	0,12	0,04	1,3	60
5	OSB-Platte	0,015	0,13	165	595
6	Luftschicht ruhend	0,05	0,28	0,32	1,3
7	OSB-Platte	0,015	0,13	165	595
8	Gipskartonplatte	0,0125	0,20	8,3	850



Bild 2. Aufbau der fünf-schichtigen Membrankonstruktion. Links: leitender Zustand, rechts: dämmender Zustand.

Fig. 2. Structure of the five-layer membrane construction. Left: conductive state, right: insulating state.

bei der Simulation zwischen 1 m/s und 10 m/s variiert. Während der Nutzungsphase wird neben der Variation der Luftgeschwindigkeit angenommen, dass pro Jahr eine Durchlüftung von 826 Stunden stattfindet. Diese Annahme ergibt sich durch die Addition von 5 Stunden Durchlüftung am Tag für die Sommermonate und 2 Stunden in den Frühjahr- und Herbstmonaten.

3.2 Membrankonstruktion

Die Membrankonstruktion besteht aus vier mit ruhender Luft gefüllten Membrankammern. Die fünf Membranfolien bestehen jeweils aus Ethylen-Tetrafluorethylen (ETFE). Die Randbedingungen für Luftschichten werden hier ebenfalls nach [12] entsprechend berücksichtigt. In Bild 2 ist der Aufbau der fünf-schichtigen Membrankonstruktion abgebildet. Im dämmenden Zustand (Bild 2, rechts) sind alle Membrankammern mit Luft befüllt, um so einen größeren Wärmedurchlasswiderstand zu erzielen. Im leitenden Zustand hingegen (Bild 2, links) wird ein großer Wärmedurchgang benötigt, weshalb nur eine Membrankammer mit Luft gefüllt ist. Die Materialkenndaten von ETFE sind in Tabelle 3 dargestellt. Um die optimale Dicke der luftgefüllten Membrankammern festzustellen, werden zuvor anhand einer zweilagigen ETFE-Membrankonstruktion Si-

mulationen durchgeführt. Hierzu variieren die Luftschichtdicken zwischen 0,005 m und 0,150 m. Anschließend sind bei der fünf-schichtigen Membrankonstruktion verschiedene Szenarien mit unterschiedlich vielen luftgefüllten Membrankammern zu vergleichen. Ferner wird für bestimmte Szenarien zusätzlich ein Aerogel [23] verwendet, um so im dämmenden Zustand einen noch geringeren Wärmedurchgang zu erhalten. Die hier größte zu untersuchende flächenbezogene Masse ergibt sich bei der Untersuchung der fünf-schichtigen Membrankonstruktion zu 7,9 kg/m². Dazu werden fünf Lagen ETFE von je 200 µm, vier Luftschichten von je 5 cm sowie 4 cm Aerogel [23] untersucht. Die größte Dicke der Konstruktion ergibt sich für den isolierenden Zustand zu 24 cm. Während der Nutzungsphase der Membrankonstruktion wird angenommen, dass in den Sommermonaten pro Tag einmal aktuiert und die Membrankonstruktion befüllt wird. In den Frühlings- und Herbstmonaten wird alle drei Tage einmal aktuiert und im Winter nie. So wird die Membrankonstruktion pro Jahr 153 Mal befüllt und wieder entleert.

3.3 Intrinsische Konstruktion – PCM

Die intrinsische Konstruktion wird mittels eines organischen mikroverkapselten Phase Change Materials (PCM)

Tabelle 3. Materialkenndaten von ETFE [24].

Table 3. Material characteristics of ETFE [24].

Materialkenndaten	Rohdichte [kg/m ³]	Porosität [m ³ /m ³]	Dicke [m]	Wärmekapazität trocken [J/kgK]	Wärmeleitfähigkeit trocken [W/mK]	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl [-]
ETFE	1.700	0,001	0,0002	1.000	0,24	100.000
Aerogel	146	0,92	0,004	1.000	0,014	4,7

Tabelle 4. Aufbau der intrinsischen Konstruktion ohne PCM [18].

Table 4. Structure of the intrinsic design without PCM [18].

Schicht	Material (von außen nach innen)	Dicke [m]	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	Wasserdampfdiffusionswi- derstandszahl [-]	Rohdichte [kg/m ³]
1	Mineralischer Außenputz	0,007	0,8	25	1.900
2	Holzfaserdämmplatte	0,02	0,04	2,9	165
3	MDF	0,015	0,10	12	528
4	Mineralfaser	0,12	0,04	1,3	60
5	OSB-Platte	0,015	0,13	165	595
6	Gipskartonplatte	0,0125	0,20	8,3	850

untersucht. Hierfür wird zunächst die Konstruktion nach Tabelle 4 im Referenzzustand ohne PCM hygrothermisch simuliert [18]. Die Konstruktion besteht (von außen nach innen) aus mineralischem Außenputz, Holzfaserdämmplatte, MDF, Mineralfaser, OSB-Platte und Gipskartonplatte. Sie weist einen U-Wert von 0,26 W/m²K und eine flächenbezogene Masse von 51,3 kg/m² auf. Für die Konstruktion mit PCM werden mittels WUFI Plus [19] das Material RT 25 für die Kühlperiode sowie für die Heizperiode das Material RT 21 und zum Vergleich das RT 25 getestet. Das PCM ist dabei mit einer gängigen Aluminiumschicht zur Lagerung verkleidet. Dabei wird jeweils eine 1 cm dicke Schicht des PCM an verschiedenen Positionen der Konstruktion untersucht, um so den Einfluss auf den jeweiligen Kühl- und Heizbedarf zu ermitteln. Das Material RT 25HC [25] ist ein organisches Paraffin mit einem Schmelzbereich von 25 °C und einer Schmelzenthalpie von 230 kJ/kg [25]. Der Schmelzbereich für das PCM RT 21 liegt zwischen 20 °C und 23 °C [25]. Der Raum besitzt ein Volumen von 90 m³ und wird als Mehrpersonenbüro in einem Bürogebäude angenommen. Des Weiteren wird ein 3 m² großes Fenster auf der Südseite sowie ein 1 m² großes Fenster in Richtung Westen berücksichtigt. Die Fenster sind jeweils dreifachverglast und weisen einen U-Wert von 0,8 W/m²K sowie einen g-Wert von 0,6 auf. Für ein Mehrpersonenbüro wird nach DIN 18559-10 [26] von ei-

ner Nutzungszeit zwischen 7 Uhr und 18 Uhr und einer Fünftagewoche ausgegangen. Tagsüber wird eine Luftwechselzahl von 1,6 1/h sowie nachts – um die Temperaturen zu verringern – eine erhöhte nächtliche Lüftung von 3 1/h angenommen.

4 Ergebnisse

4.1 Durchströmte Konstruktion

Die durchströmte Konstruktion weist im dämmenden Zustand (5 cm ruhende Luftschicht) einen U-Wert von 0,24 W/m²K auf, welcher nach [13] eingehalten ist. Im leitenden Zustand hingegen werden für die 5 cm dicke Luftschicht unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeiten untersucht. Die Ergebnisse sind in Bild 3 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der U-Wert im Bereich 0 m/s bis 1 m/s deutlich auf 2,76 W/m²K ansteigt. Bei einer Luftgeschwindigkeit von bis zu 3 m/s erhöht sich der U-Wert auf 3 W/m²K, danach bis 10 m/s steigt der U-Wert nicht mehr stark an (3,3 W/m²K). Daher lässt sich schlussfolgern, dass für den leitenden Zustand dieser Konstruktion der U-Wert ab einer Luftgeschwindigkeit von 3 m/s nicht mehr wesentlich gesteigert werden kann.

Tabelle 5 zeigt die Ergebnisse für eine durchströmte Konstruktion in Abhängigkeit von verschiedenen Luftgeschwindigkeiten sowie dem Verhältnis des U-Wertes

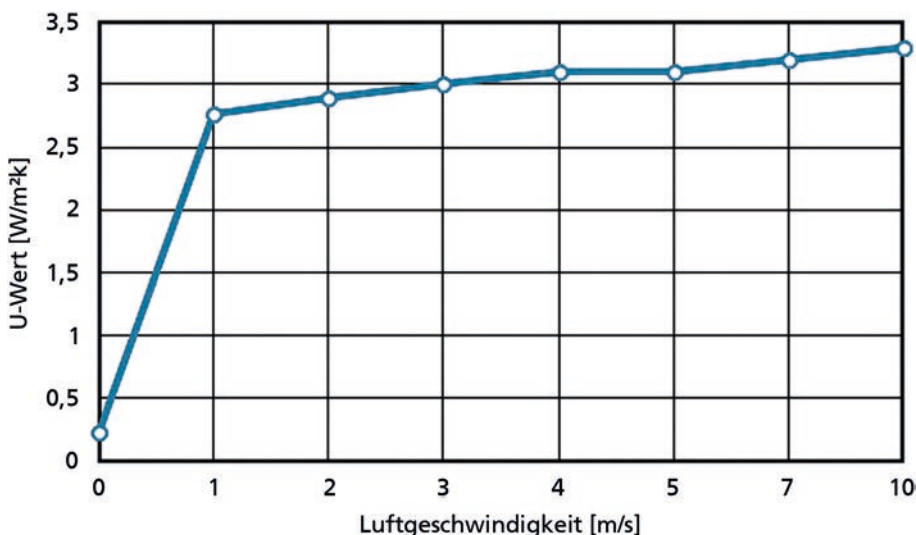


Bild 3. U-Wert der durchströmten Konstruktion im leitenden Zustand bei Variation der Luftgeschwindigkeiten [18].

Fig. 3. U-value of the flow-through construction in the conductive state with variation of the air velocities [18].

Tabelle 5. Ergebnisse der durchströmten Konstruktion verschiedener Luftgeschwindigkeiten für das Jahr 2018 [18].

Table 5. Results of the flow-through construction of different air velocities for the year 2018 [18].

Schaltbereich	Zustand	Luftgeschwindigkeit [m/s]	Luftschichtdicke[m]	U-Wert [W/Km ²]	GWP [kg CO ₂ -Äq./a]	PEne [MJ/a]
1:11,5	dämmend	0	0,05	0,24	1,2	-9,5
	leitend	1	0,05	2,76	27,6-54,9	330,7-682,3
1:12,0	dämmend	0	0,05	0,24	1,2	-9,5
	leitend	2	0,05	2,90	54,0-108,6	670,9-1374,0
1:12,5	dämmend	0	0,05	0,24	1,2	-9,5
	leitend	3	0,05	3,01	80,4-162,2	1011,1-2065,8
1:13,0	dämmend	0	0,05	0,24	1,2	-9,5
	leitend	4	0,05	3,11	106,8-215,9	1351,4-2757,6
1:13,0	dämmend	0	0,05	0,24	1,2	-9,5
	leitend	5	0,05	3,11	133,2-269,6	1697,6-3449,3
1:13,3	dämmend	0	0,05	0,24	1,2	-9,5
	leitend	7	0,05	3,20	186-376,9	2372-4832,9
1:13,8	dämmend	0	0,05	0,24	1,2	-9,5
	leitend	10	0,05	3,30	265,2-537,9	3392,6-6908,2

zwischen dem jeweils dämmenden und leitenden Zustand (Schaltbereich). Der größte Schaltbereich 1 : 13,8 ergibt sich für die Variante mit dem höchsten U-Wert von 3,30 W/m² bei einer Luftgeschwindigkeit von 10 m/s im Vergleich zu 0,24 W/m²K bei ruhender Luftschicht. Bei einer Luftgeschwindigkeit von 1 m/s ergibt sich ein Schaltbereich von 1:11,5 für einen U-Wert leitend von 2,76 W/m²K. Hohe Luftgeschwindigkeiten erfordern besondere Maßnahmen bezüglich der Dichtheit und technischen Ausführung. Zudem sind in Tabelle 5 das Treibhauspotenzial (GWP) sowie der Primärenergiebedarf aus nicht erneuerbaren Ressourcen (PEne) der verschiedenen Schaltbereiche für das Jahr 2018 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass für die dämmenden Zustände nur Aufwendungen und Gutschriften zustande kommen, die sich aufgrund der Konstruktion ergeben. Die Phase Konstruktion ergibt sich aus der Herstellung (A1–A3) sowie dem Lebensende (C3, C4, D). Für die leitenden Zustände kommen

zusätzlich Aufwendungen durch den Betrieb (Be- und Entlüften der Luftschicht) zustande. Die Differenzen ergeben sich durch die Energieeffizienz des eingesetzten Lüfters.

In Bild 4 und Bild 5 sind die Ergebnisse des GWP und PEne grafisch aufbereitet. Die Ausgangswerte von 1,23 kg CO₂-Äq. und -9,5 MJ stellen die Umweltauswirkungen der Konstruktion dar. Die negativen Werte des PEne in Bild 5 bei der Konstruktion ergeben sich, da sie zu großen Teilen aus Holz besteht, welches am Lebensende zu großen Gutschriften führt. Die vier verschiedenen Verläufe zeigen die Auswirkungen, die in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit verursacht werden. In blau ist dies für einen standardmäßigen Lüfter und in schwarz für einen energieeffizienten Lüfter mit dem heutigen deutschen Strommix abgebildet. Die gestrichelten Linien zeigen, wie die Aufwendungen durch die Veränderungen des Strommix im Jahr 2050 perspektivisch aussehen werden. Es wird somit aufgezeigt, welches Feld an Umweltaufwendungen sich bei

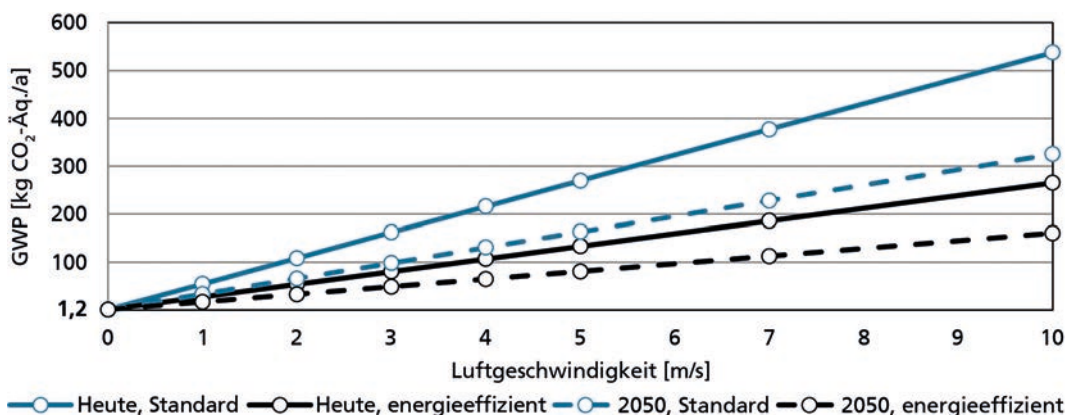


Bild 4. GWP der durchströmten Konstruktion im leitenden Zustand pro Jahr in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit, dem Strommix und der Art des Lüfters.

Fig. 4. GWP of the construction in conductive state per year depending on the air velocity, the current mix and the type of fan.

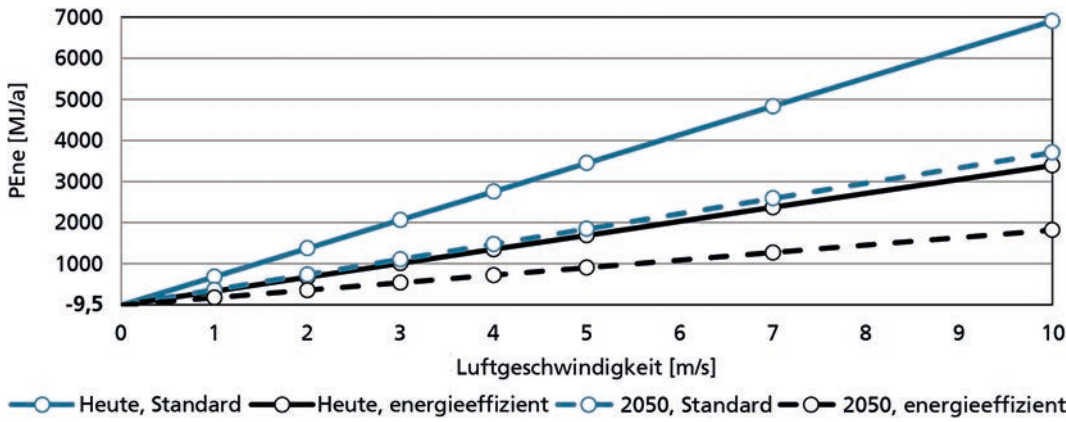


Bild 5. PEne der durchströmten Konstruktion im leitenden Zustand pro Jahr in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit, dem Strommix und der Art des Lüfters.

Fig. 5. PEne of the flow-through construction in conductive state per year depending on the air velocity, the current mix and the type of fan.

den unterschiedlichen Luftgeschwindigkeiten aufspannt und mit welchen Umweltaufwendungen zukünftig zu rechnen ist.

4.2 Membrankonstruktion

Bei den Membrankonstruktionen wurde zunächst anhand einer zweilagigen Membrankonstruktion (siehe Bild 6) die geeignete Luftschichtdicke eines mit Luft gefüllten Membrankissens untersucht. In Bild 6 ist zu erkennen, dass der U-Wert für einen horizontalen sowie aufwärts gerichteten Wärmestrom mit steigender Luftschichtdicke zunächst (bis etwa 2 cm) abnimmt und anschließend (ab 2 cm) bei etwa 3 W/m²K stagniert. Für einen abwärts gerichteten Wärmestrom ergibt sich bei einer Luftschichtdicke von bis zu 5 cm ein sinkender U-Wert, der sich ab ca. 5 cm Luftschichtdicke konstant zu 2,2 W/m²K einstellt.

Anhand dieser Erkenntnis wurden für den Fall des horizontalen Wärmestroms die weiteren Untersuchungen der Membrankonstruktion mit 5 cm dicken luftgefüllten Membrankammern vorgenommen. Nach Tabelle 6 sind die Ergebnisse der verschiedenen Szenarien mit den jeweiligen U-Werten, GWP und PEne der Schaltbereiche zwischen dem dämmenden und leitenden Zustand für das Jahr 2018 dargestellt. Ein Schaltbereich von 1:2,5 ergibt sich für eine fünfplagige Membrankonstruktion, bei der im dämmenden Zustand alle vier Membrankammern mit 5 cm ruhender Luft befüllt werden. Daraus resultiert ein U-Wert von 1,13 W/m²K. Im leitenden Zustand hingegen wird nur eine der vier Membrankammern mit 5 cm Luft befüllt, verbunden mit einem U-Wert von 2,84 W/m². Nach [13] wird ein U-Wert von 0,28 W/m² gefordert, weshalb das fünfplagige Membrankissen im dämmenden Zustand zusätzlich mit einer 0,5 cm dicken Aerogelschicht versehen wird. Dadurch kann der U-Wert weiter auf 0,82 W/m² gesenkt werden. Erhöht man die Dicke der Aerogelschicht auf 4 cm, kann sogar im dämmenden Zustand der nach geforderte U-Wert von 0,28 W/m² exakt erfüllt werden.

Ausgehend von den GWP- und PEne-Werten aus Tabelle 6 sind in Bild 7 die beiden dämmenden Schaltbereiche 1:1,2 sowie 1:2,6 jeweils für Aerogel heute und 2050 zu erkennen. Die dämmende Variante mit dem Schaltbe-

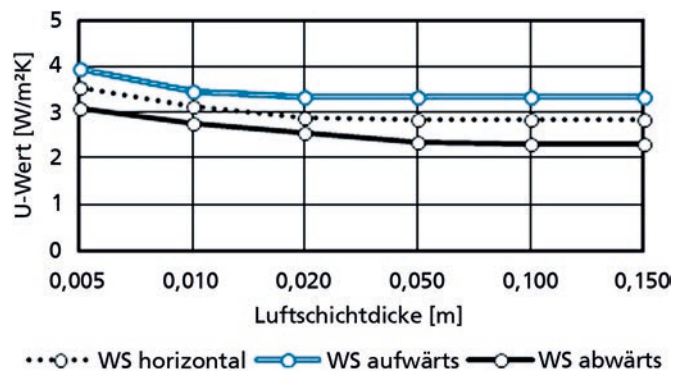


Bild 6. Untersuchung der geeigneten Luftschichtdicke eines zweilagigen Membrankissens in Abhängigkeit von der Wärme-stromrichtung [18].

Fig. 6. Investigation of the suitable air layer thickness of a two-layer membrane cushion as a function of the heat flow direction [18].

reich 1:1,2 ist links in Bild 7 dargestellt, der rechte Bildteil zeigt den dämmenden Zustand für den Schaltbereich 1:2,6. Dabei ist zu erkennen, dass die leicht höheren Aufwendungen für die Konstruktion mit der Aerogelschicht den höheren Betriebsauswirkungen der Luft-Variante nicht nachstehen. Vor allem die Werte des PEne können durch die Veränderung des Strommix stark gesenkt werden.

4.3 Intrinsische Konstruktion – PCM

Für die intrinsische Konstruktion mit PCM sind in Tabelle 7 sind die Ergebnisse der Simulation dargestellt, ausgehend von einer maximalen Auslegungstemperatur für den Raum von 26°C nach [26]. Es ist zu erkennen, dass sich das größte Einsparpotenzial des Kühlbedarfs ergibt, wenn das PCM innenseitig angebracht ist. Des Weiteren ist festzustellen, dass der Kühlbedarf ohne PCM mit 117 kWh (siehe Tabelle 7) gering ist, was zum einen auf die maximale Auslegungstemperatur von 26°C, zum anderen auf die geringen internen Lasten zurückzuführen ist. Der Kühlergiebedarf kann mit dem PCM RT 25 [25] somit um knapp 50% reduziert werden, da es sich unmittelbar mit

Tabelle 6. Ergebnisse der Membrankonstruktionen mit unterschiedlichen Schaltbereichen für das Jahr 2018 [18].
 Table 6. Results of membrane designs with different switching ranges for the year 2018 [18].

Schaltbereich	Zustand	Anzahl Folien	Anzahl befüllte Kissen	Anzahl entlüftete Kissen	Luftschichtdicke [m]	Aerogel Schicht [m]	U-Wert [W/Km ²]	GWP [kg CO ₂ -Äq./a]	PEne [MJ/a]
1:1,5	dämmend	3	2	0	0,05	–	1,89	0,7	9,3
	leitend	3	1	1	0,05	–	2,85	0,4	6,4
1:2,0	dämmend	4	3	0	0,05	–	1,41	1,2	16,2
	leitend	4	1	2	0,05	–	2,84	0,6	8,6
1:1,5	dämmend	4	3	0	0,05	0,005	0,96	1,4	19,2
	leitend	4	1	2	0,05	0,005	1,45	0,6	9,7
1:2,1	dämmend	4	3	0	0,05	–	1,41	1,2	16,2
	leitend	4	1	2	0,10	–	2,92	0,9	12,4
1:2,5	dämmend	5	4	0	0,05	–	1,13	1,8	25,1
	leitend	5	1	3	0,05	–	2,84	0,7	10,7
1:1,8	dämmend	5	4	0	0,05	0,005	0,82	1,8	25,2
	leitend	5	1	3	0,05	0,005	1,45	0,7	10,9
1:2,6	dämmend	5	4	0	0,05	–	1,13	1,8	25,1
	leitend	5	1	3	0,10	–	2,91	1,1	15,5
1:1,2	dämmend	5	4	0	0,05	0,04	0,28	1,5	26,1
	leitend	5	1	3	0,05	0,04	0,33	0,4	11,7

der Raumluft im Austausch befindet. Bei Überschreitung der maximalen Auslegungstemperatur von 26°C absorbiert das PCM RT 25 [25] mit einem Schmelzbereich von 25°C die Wärme. Anschließend wird diese durch Entladung wieder freigesetzt. Befindet sich das PCM hingegen mittig in der Konstruktion, lassen sich 43% der Kühlenergie einsparen. Es konnte gezeigt werden, dass die Anwendung des PCM im untersuchten Fall für den Innenbereich das größte Energieeinsparpotenzial ergibt.

Des Weiteren wurde die Änderung der sich einstellenden Raumlufttemperaturen betrachtet. Mittels des PCM RT 25 [25] ist eine Reduzierung der maximalen Raumlufttemperatur von bis zu 7% bzw. 2,3°C möglich. Zum Ver-

gleich wurden dieselben Simulationen auch mit dem PCM RT 21 durchgeführt, das über einen niedrigeren Schmelzbereich zwischen 20°C und 23°C verfügt. Die Innentemperaturen lagen in der Kühlperiode meist über 23°C, d.h. durch das PCM RT 21 wurde keine Verbesserung erzielt. Zeitweise fand sogar ein minimaler Anstieg der Innenlufttemperaturen statt. Bei Verwendung sowohl von PCM RT 21 als auch von RT 25 kann verhältnismäßig wenig Heizenergie eingespart werden. Zudem ergeben sich für die Innenoberflächentemperaturen durch den Einsatz von PCM kaum Verbesserungen.

Die Reihenfolge der verwendeten Materialien der Konstruktion bewirkt bei den Ergebnissen der Ökobilanz keine

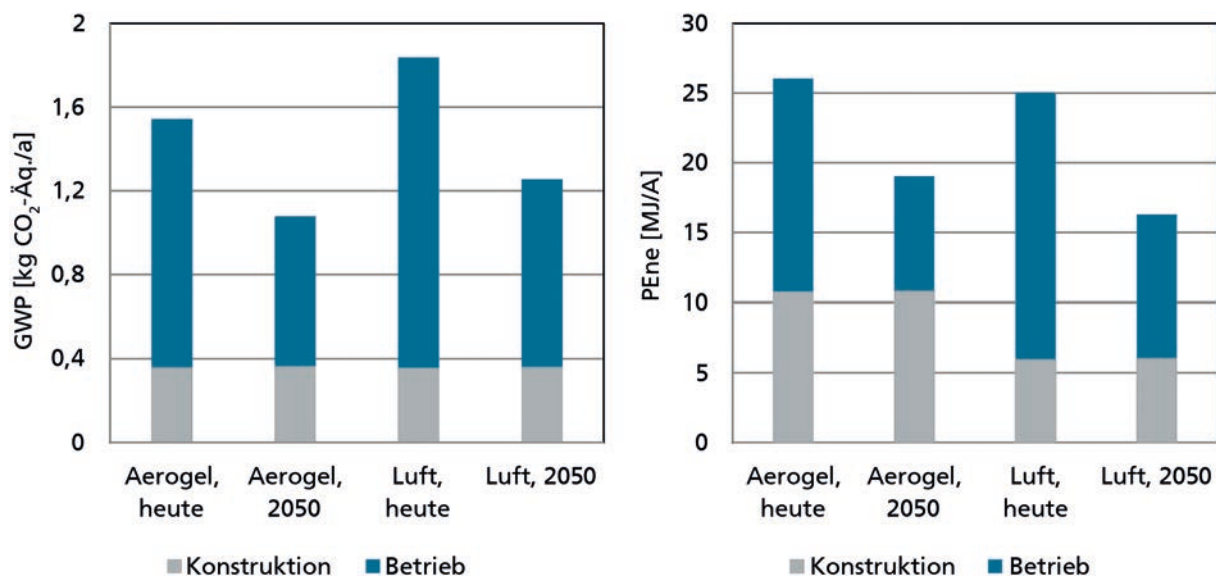


Bild 7. GWP (links) und PEne (rechts) zu verschiedenen Varianten der Membrankonstruktion [21].
 Fig. 7. GWP (left) and PEne (right) for different variants of the diaphragm design [21].

Tabelle 7. Einsparung des Kühlbedarfs mittels PCM in Abhängigkeit von der Position in der Konstruktion [19].

Table 7. Saving of cooling requirements by PCM depending on the position in the construction [19].

PCM RT 25		max. Auslegungstemperatur [°C]		Kühlbedarf [kWh]	Einsparung Kühlenergie [%]
Art	Ort	5 bis 18 Uhr	18 bis 5 Uhr	–	–
–	–	26	26	117,0	–
pur 1 cm	innenseitig	26	26	59,1	49,7
pur 1 cm	mittig (hinter GKP)	26	26	67,0	42,9

Veränderung. Ebenso fallen für die Nutzungsphase keine Emissionen an, da hier keine Aufwendungen, z. B. durch einen Lüfter, nötig sind. Der Schaltvorgang der PCM ergibt sich aufgrund der intrinsischen Reaktion. Berechnet wurden für den GWP und PEne auf den ganzen Lebenszyklus hinweg folgende Werte [21]:

- GWP: 1,39 kg CO₂-Äq. pro Jahr
- PEne: 7,78 MJ pro Jahr

Dabei teilt sich der GWP mit 1,43 kg CO₂-Äq. pro Jahr auf die Herstellung und mit –0,04 kg CO₂-Äq. pro Jahr auf das Lebensende auf. PEne erbringt in der Herstellung 24,1 MJ und im Lebensende –16,32 MJ. Die hohen Gutschriften im Bereich des Lebensende gehen etwa zur Hälfte auf die PCM-Platte zurück und damit auf die Aluminiumverkleidung der PCM-Platte.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die Untersuchungen der bauphysikalischen Potenziale der durchströmten Konstruktion, der Membrankonstruktion und der intrinsischen Konstruktion mittels PCM haben gezeigt, dass leichte und adaptive Konstruktionen durch geeignete Materialwahl durchaus thermisches, hygrothermisches sowohl als auch ökobilanzielles Potenzial aufweisen und sich in Anlehnung an bestehende Normenwerke für massive Konstruktionen eignen. Die flächenbezogenen Massen lagen für die drei untersuchten Konstruktionen zwischen 7,9 kg/m² und 60 kg/m², also nach [6] alle im Leichtbaubereich. Die Berechnung der Umweltwirkungen durch die Aktuierung zeigt die Relevanz im Lebenszyklus. Die szenarische Berücksichtigung eines zukünftigen Umweltprofils der Stromerzeugung (Strommix 2 050) hebt deutlich hervor, dass große Einsparungen im Bereich des GWP zu erwarten sind. Die Art und Häufigkeit der Aktuierung (in Abhängigkeit der auftretenden Lasten) sowie der daraus resultierende Energiebedarf müssen weiter erforscht werden, um diesen Aspekt in die Planung integrieren zu können.

Die durchströmte Konstruktion weist im dämmenden Zustand mit ruhender Luftschicht einen U-Wert von 0,24 W/m²K auf sowie im leitenden Zustand bei einer stark hinterlüfteten Luftschicht von 3 m/s einen U-Wert von 3,0 W/m²K. Hierbei konnte ein Schaltbereich von 1:13,8 erzielt werden. Der U-Wert im dämmenden Zustand erfüllt die Anforderungen von DIN 4108 Teil 2 [6] und EnEV 2014 [13], wodurch es nach [14] zu keinem Oberflächentauwasser kommt. Bei Betrachtung des GWP und des PEne fällt auf, dass vor allem der Betrieb große Auswir-

kungen mit sich bringt und hier auf Einsparungen durch energieeffiziente Lüfter zu achten ist.

Für die Membrankonstruktion wurde der Wärmedurchgang einer fünfflagigen ETFE-Konstruktion im dämmenden und leitenden Zustand untersucht. Im dämmenden Zustand wurden die vier Membrankammern mit jeweils 5 cm ruhender Luft befüllt, woraus ein U-Wert von zunächst 1,13 W/m² resultiert. Dieser konnte mittels einer 4 cm starken Aerogelschicht [23] auf den geforderten U-Wert nach [13] von 0,28 W/m²K gesenkt werden. Im leitenden Zustand war eine der vier Membrankammern mit Luft gefüllt, woraus sich hierfür ein U-Wert von 2,84 W/m²K und somit ein Schaltbereich von 1:2,52 ergibt. Membrankonstruktionen können dauerhaft nur tauwasserfrei gehalten werden, wenn ein regelmäßiger Austausch der Stützluft mit trockener Luft gewährleistet wird. Durch die Membrankonstruktion fallen auch unter Einsatz des Aerogels ein geringes GWP sowie ein niedriger PEne an, sodass sich hierbei die größten Aufwendungen beim Betrieb ergeben. Bezüglich des Wärme- und Feuchteschutzes ist daher zusätzlich der Einsatz des Aerogels vorzuziehen.

Die Untersuchung der intrinsischen Konstruktion mit 1 cm PCM ist für die Kühl- als auch Heizperiode betrachtet worden. Danach weist ein innenseitig angebrachtes PCM das größte Potenzial zur Energieeinsparung auf. Es steht in diesem Fall unmittelbar mit der Raumluft in Kontakt und kann Wärme absorbieren und wieder emittieren. Die Simulation lässt darauf schließen, dass eine proportionale Abhängigkeit der sich einstellenden Raumtemperaturen von der verbauten Masse bzw. Menge des PCM und der Höhe der Enthalpie besteht. Das untersuchte PCM erzielte in der Kühlperiode eine Reduzierung der Innentemperaturen um ca. 2 K. Dies wird möglich, wenn das gewählte PCM bzw. deren Schmelz- und Erstarrungsbereich gut auf die Raumtemperaturen abgestimmt ist. In der Heizperiode hingegen wird verhältnismäßig wenig Heizenergie eingespart. In diesem Zeitraum sollten PCM mit einem niedrigeren Phasenübergangstemperaturbereich zum Einsatz kommen, um eine größere Einsparung zu erzielen. Um das Potenzial von PCM sinnvoll im Kontext von adaptiven Leichtbaukonstruktionen zu nutzen, ist deren Menge sinnvoll und ressourcenschonend zu wählen. Durch den Einsatz von PCM kann die fehlende thermische Masse bei derartigen Konstruktionen kompensiert werden. Ziel der Anwendung von PCM sollte es daher sein, diese zur Reduzierung von hohen Temperaturen und somit zur Einsparung von Kühlenergie einzusetzen. Ökobilanziell erweist sich diese Konstruktion als insgesamt

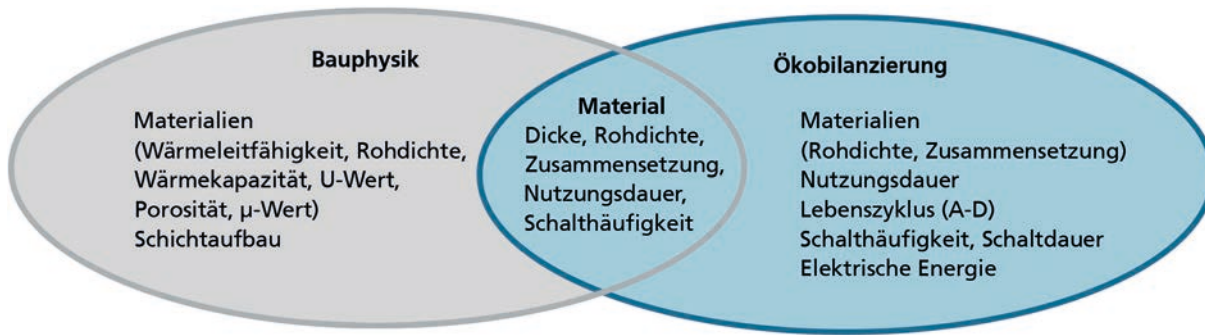


Bild 8. Schnittmenge der bauphysikalischen Aspekte sowie der ökobilanziellen Aspekte der Lebenszyklusanalyse auf Bauteilebene.

Fig. 8. Intersection of the building physics aspects as well as the life cycle analysis's ecobalance aspects on component level.

unkritisch, ungeeignet ist jedoch die Verwendung von Aluminium als Packmaterial für das PCM. Durch Optimierung dieses Aspektes könnte die Konstruktion auch hinsichtlich des ökobilanziellen Potenzials optimiert werden.

Die Konstruktionen wurden bezüglich des bauphysikalischen sowie des ökobilanziellen Potenzials getrennt voneinander untersucht und ausgewertet. Um Konstruktionen auf Bauteilebene ganzheitlich zu betrachten, sind beide Potenziale relevant. Dabei hat sich anhand der obigen Ergebnisse gezeigt, dass sich für die beiden unterschiedlichen Betrachtungsweisen anhand gemeinsamer Parameter wie beispielsweise der Materialdicke, der Rohdichte, der Zusammensetzung sowie der Nutzungsdauer und Schalzhäufigkeit nach Bild 8 eine Schnittmenge ergibt.

Im Sinne der Bauphysik ist die Dicke des Materials dafür entscheidend, wie gut das Material die Wärme leitet und welche feuchtetechnischen Auswirkungen sich daraus ergeben. Die Ökobilanz benötigt zudem Informationen zur Masse bzw. Rohdichte der Materialien sowie deren Zusammensetzung und Herstellung. Ebenso hervorzuheben sind die Schalzhäufigkeiten und -zeiten sowie der daraus resultierende Bedarf an elektrischer Energie in der Nutzungsphase der Konstruktionen. Diese Parameter stehen besonders im Blick auf die Herstellung in Wechselwirkung. Die gemeinsame Betrachtungsweise der bauphysikalischen und ökobilanziellen Potenziale ist nicht nur auf Bauteilebene von Signifikanz, sondern im erweiterten Kontext auch auf Raumebene. Hierbei spielen natürlich weitere bauphysikalische Aspekte eine Rolle, beispielsweise das Lüftungsverhalten und die internen Lasten des Raumes. Ferner sind ebenso die ökobilanziellen Aspekte wie der Energieverbrauch des Raumes durch Heizen, Lüften und Kühlen sowie dessen Nutzungsdauer relevant. Künftig sind derartige Untersuchungen auf Raumebene anzustreben, die eine gemeinsame Betrachtung mittels erweiterter Parameter von bauphysikalischen und ökobilanziellen Potenzialen ermöglichen.

Danksagung

Die Arbeiten wurden im Rahmen des SFB1244 „Adaptive Hüllen und Strukturen für die gebaute Umwelt von morgen“, gefördert von der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG“, in den Teilprojekten C05 und D02 durchgeführt.

Literatur

- [1] Sobek, W., Wittmüß, P., et al.: Adaptive Hüllen und Strukturen für die gebaute Umwelt von morgen – Geplanter Sonderforschungsbereich SFB 1244. Universität Stuttgart (2016).
- [2] Sobek, W.: Ultraleichtbau. Stahlbau 83 (2014), H. 11, S. 784–788.
- [3] Ohne Verfasser: Prognose zur Entwicklung der Weltbevölkerung von 2010 bis 2100. Statista.com (2018).
- [4] Albrecht, S., Bollhöfer, E., et al.: Ressourceneffizienzpotenziale von Innovationen in rohstoffnahen Produktionsprozessen. Chemie-Ingenieur-Technik 84 (2012) 10, S. 1651–1665.
- [5] Nestle, N., Daiss, A., et al.: Integriertes Wärmemanagement-Fassadenelement (WaMaFat). Schlussbericht 03ET1032B, Forschungsinitiative EnOB. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Berlin (2014).
- [6] DIN 4108-2: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Mindestanforderungen an den Wärmeschutz. Beuth-Verlag, Berlin (2013).
- [7] Lehnert, S.: Innovative Gebäudehüllen. Eigenschaften von ETFE-Folienkissen. DBZ 4, Deutsche Bauzeitschrift, Bremen (2015).
- [8] Holm, A., Kaufmann, A., et al.: Bauphysikalisch optimierte Abstimmung von Membran-Umschließungsflächen auf den Innenraum. IBP-Abschlussbericht RKB-10/2007. Fraunhofer-Institut für Bauphysik (2007).
- [9] Kaufmann, A., Sedlbauer, K., et al.: Wärmetechnische Besonderheiten von Membrankissenkonstruktionen. Bautechnik 90 (2013), H. 7, S. 395–401.
- [10] Kauert, S.: Phase Change Materials – Erfahrungen aus EnOB-Modellprojekten und einem internationalen Hochschulwettbewerb. Forschung für Energieoptimiertes Bauen, Bergische Universität Wuppertal (2010).
- [11] Ohne Verfasser: SFB 1244 Homepage: Adaptive Hüllen und Strukturen für die gebaute Umwelt von morgen. Universität Stuttgart (2018).
- [12] DIN EN ISO 6946: Bauteile – Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient – Berechnungsverfahren. Beuth-Verlag, Berlin (2018).
- [13] EnEV 2014: Energieeinsparverordnung – Zweite Verordnung zur Änderung der Energieeinsparverordnung. Bundesgesetzblatt, Bonn (2014).
- [14] DIN 4108-3: Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden – Klimabedingter Feuchteschutz – Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung. Beuth-Verlag, Berlin (2014).
- [15] DIN EN ISO 14040: Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen. Beuth-Verlag, Berlin (2009).

- [16] Wittstock, B., Albrecht, S., et al.: Gebäude aus Lebenszyklusperspektive – Ökobilanzen im Bauwesen. Bauphysik 31 (2009), H. Gebäude aus Lebenszyklusperspektive – Ökobilanzen im Bauwesen. Bauphysik 31 (2009), H. 1, S. 9–17.
- [17] EeBGuide Guidance Document: Part B: Buildings. Energy Efficient-Building European Initiative (EeB) (2011).
- [18] WuFi Pro: Software zur Berechnung von Wärme und Feuchte instationär. Version 6.1. Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Stuttgart (2018).
- [19] WuFi Plus: Software zur Berechnung des Raumklimas. Version 3.1.1. Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Stuttgart (2018).
- [20] Meteonorm: Globale und meteorologische Datenbank für Ingenieure, Planer und Universitäten (2008).
- [21] GaBi 8.2: Software und Datenbanken zur Ganzheitlichen Bilanzierung. Thinkstep AG, Echterdingen (2018).
- [22] Capros, P., Vita, A. de, et al.: Reference Scenario – Energy, transport and GHG emissions Trends to 2050. European Commission, Brüssel (2016).
- [23] Aspen Aerogels: Spaceloft Datenblatt, Northborough (2017).
- [24] Nowofol: NOWOFOL ET 6235 Z-IR. NOWOFOL® Kunststoffprodukte GmbH & Co. KG (2018).
- [25] Rubitherm: Produktkategorie organische PCT RT-Serie, Berlin (2018).
- [26] DIN 18599-10: Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten. Beuth-Verlag, Berlin (2016).

Autoren dieses Beitrages:

Dipl.-Ing. Nadine Harder, nadine.harder@iabp.uni-stuttgart.de
Prof. Dr.-Ing. Philip Leistner, philip.leistner@iabp.uni-stuttgart.de

Beide:

Universität Stuttgart
Institut für Akustik und Bauphysik
Pfaffenwaldring 7
70569 Stuttgart

M.Sc. Friederike Schlegl, friederike.schlegl@iabp.uni-stuttgart.de
Universität Stuttgart
Institut für Akustik und Bauphysik
Abteilung Ganzheitliche Bilanzierung (GaBi)
Wankelstr. 5
70563 Stuttgart

Dr.-Ing. Stefan Albrecht, stefan.albrecht@ibp.fraunhofer.de
Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP,
Abteilung Ganzheitliche Bilanzierung GaBi
Wankelstr. 5
70563 Stuttgart

Dr.-Ing. Sumeer Park, sumee.park@ibp.fraunhofer.de
Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP
Fraunhoferstraße 10
83626 Valley



Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP

Stuttgart

Postfach 80 04 69 – 70504 Stuttgart
Nobelstraße 12 – 70569 Stuttgart

Holzkirchen

Postfach 11 52 – 83601 Holzkirchen
Fraunhoferstraße 10 – 83626 Valley

www.ibp.fraunhofer.de