FORSCHUNGSINITIATIVE Zukunft BAU

F 2872

vakutex

Vakuumgedämmte Fassadenelemente aus Textilbeton

Fraunhofer IRB Verlag

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung

F 2872

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlußberichtes einer vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung -BMVBS- im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2013

ISBN 978-3-8167-9110-2

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag
Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00
Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

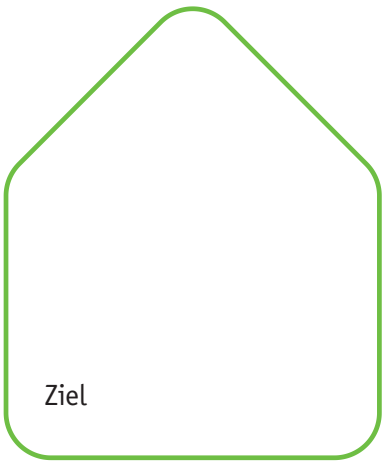
www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/bauforschung

Bitte beachten:

Fehlende Seiten sind **Leerseiten**,
die bei Erstellung
der PDF-Datei für den Download nicht
berücksichtigt wurden

Fraunhofer IRB Verlag



vaku*tex*

Vakuumgedämmte Fassaden-
elemente aus Textilbeton

Abschlussbericht
14. Juni 2013

HTWK Leipzig

energie*design*
Architektur-Institut Leipzig

Abschlussbericht Leipzig, 14. Juni 2013

Thema
vaku*tex*
Vakuumgedämmte Fassadenelemente
aus Textilbeton

Forschungsstelle
Hochschule für Technik,
Wirtschaft und Kultur Leipzig
University of Applied Sciences
ai:L Architektur-Institut Leipzig
Forschungsgruppe energie.*design*
Karl-Liebknecht-Straße 132
04277 Leipzig

Projektleiter
Frank Hülsmeier
Prof. Dipl.-Ing. | Architekt

Themenleiter
Alexander Kahnt
Dipl.-Ing. [FH] | Architekt

Projektbearbeitung
Otto Grauer
M. Sc.

Stefan Huth
M. A.

Susanne Kirmse
Dipl.-Ing. [FH] | Architektin

Matthias Tietze
Dipl.-Wirtsch.-Ing. [FH]

Koorperationspartner
CTS Composite Technologie Systeme GmbH
Mercatorstraße 43, 21502 Geesthacht

HFB Engineering GmbH
Zschortauer Straße 42, 04129 Leipzig

Variotec GmbH & Co. KG
Weißmarterstraße 3-5, 92318 Neumarkt

Externe Experten des Forschungsprojektes
Prof. M. Lange
Universität Hannover - Institut für Baukonstruktion und Entwerfen

Prof. W. Lorch | Dipl.-Ing. A. Krawczyk
TU Darmstadt - Lehrstuhl Entwerfen und Hochbaukonstruktion

Prof. H. Schneider
RWTH Aachen - Lehrstuhl Baukonstruktion

unterstützt durch
HALFEN GmbH & Co. KG,
Karl Limbach & Cie GmbH & Co. KG,
MEHLAG AG,
PAGEL Spezial-Beton GmbH & Co. KG,
RECKLI GmbH,
SIKA Deutschland GmbH,
Sto AG Deutschland

Hochschule für Technik,
Wirtschaft und Kultur Leipzig
Karl-Liebknecht-Straße 132
04277 Leipzig
Fon: +49 [0] 341|3076 6248
Fax: +49 [0] 341|3076 6630
huelsmeier@fb.htwk-leipzig.de
www.energiedesign.htwk-leipzig.de

Förderhinweis

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert.

(Aktenzeichen: SF - 10.08.18.7-09.30/II - F20-09-1-190)

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt bei den Autoren.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung 005

2. Inhalt & Ziele 009

2.1 Forschungsgegenstand 010

2.2 Ausgangslage 010

2.2.1 Klimapolitische Vorgaben 010

2.2.2 Bautechnische Voraussetzungen 010

2.2.3 Ökologische Aspekte 011

2.3 Potentiale und Grenzen 011

2.4 Ziele 013

3. Grundlagen & Vorbetrachtung 015

3.1 Methodisches Vorgehen 016

3.2 Architektonische Betrachtung 017

3.2.1 Raster 018

3.2.2 Gebäude 020

3.2.3 Fassade 021

3.3 Konstruktiv-technische Betrachtung 022

3.3.1 Textilbeton 022

3.3.2 Vakuumisolationspaneele 024

3.3.3 Glasfaserverstärkter Kunststoff 027

3.3.4 Latente Wärmespeicher - PCM 027

3.3.5 Bauphysik 028

3.3.5.1 Energiehaushalt Mensch und Gebäude 028

3.3.5.2 Thermische und Raumluftbehaglichkeit 028

3.3.5.3 Wärmetransportmechanismen 029

3.3.5.4 Feuchteschutz 030

3.4 Ökologische Betrachtung 032

3.4.1 Ökobilanzierung 033

3.4.2 Untersuchungsrahmen 033

3.4.3 Sachbilanz 033

3.4.4 Wirkungsabschätzung 033

3.5 Ökonomische Betrachtung 035

3.5.1 Begriffe 035

3.5.2 Bauwirtschaftliche Rahmenbedingungen 035
3.5.3 Der Emissionshandel und seine Funktionsweise 035
3.5.4 Methodik der Investitionsrechnung 036

4. Hypothetische Lösungsansätze 037
4.1 Architektonische Betrachtung 038
4.1.1 Gebäudetypologie und Bauteildimensionierung 038
4.1.2 Systemanalyse Fassade 039
4.1.2.1 Statisches System 040
4.1.2.2 Schalenaufbau 040
4.1.2.3 Fassadensystem 041
4.1.2.4 Konstruktionsarten 042
4.1.2.5 Rahmenvorgaben für das Fassadenelement 044
4.1.3 Beschaffenheit des Fassadenelements 045
4.1.3.1 Öffnungen 045
4.1.3.2 Verbindungen 045
4.1.3.3 Fugenausbildung und -dichtung 046
4.1.3.4 Form 047
4.1.3.5 Oberfläche und Farbe 047
4.1.4 Verdichtung urbaner Räume 049
4.1.5 Studentenentwürfe 051
4.2 Konstruktiv-technische Betrachtung 058
4.2.1 Prinzipieller Elementaufbau 058
4.2.2 Entwicklung eines Detailkataloges 059
4.2.2.1 Transportbefestigung 061
4.2.2.2 Befestigung am Bauwerk 062
4.2.2.3 Befestigung des Einhängsystems an den Fassadenelementen 063
4.2.2.4 Befestigung der äußeren Platte 063
4.2.2.5 Befestigungsmittel im GFK 065
4.2.2.6 Aussteifung der äußeren Platte 066
4.2.2.7 Formate der Vakuumdämmpaneele 067
4.2.2.8 Lagenausbildung der Vakuumdämmpaneele 068
4.2.2.9 Befestigung an der inneren Platte 069
4.2.2.10 Kopplung der Elemente in der Horizontalfuge 070
4.2.2.11 Kopplung der Elemente in der Vertikalfuge 071
4.2.2.12 Verbesserung des Schallschutzes 072

4.2.2.13 Abdichtung der Anschlussfugen ... 074
4.2.2.14 Verbesserung des Brandschutzes ... 075
4.2.3 Maßtoleranzen ... 075
4.2.4 Bauphysik ... 076
4.2.4.1 Wärmeschutz ungestörter Flächen ... 077
4.2.4.2 Formatbetrachtung Vakuumisolationspaneele ... 077
4.2.4.3 Thermische Störungen der Dämmebene ... 077
4.2.4.4 Messreihe zu unterschiedlichen Paneelstößen ... 078
4.3 Ökologische Betrachtung ... 085
4.4 Ökonomische Betrachtung ... 085
4.4.1 Ökonomische Vor- und Nachteile von vaku*tex* ... 085
4.4.2 Marktpotential ... 086
4.4.3 Bauwirtschaftliche Entwicklungen und Trends ... 088

5. Lösungsansatz ... 089
5.1 Architektonische Betrachtung ... 090
5.1.1 Oberflächengestaltung ... 090
5.1.2 Problematik durchschlagender Gelege ... 092
5.1.3 Fassadenentwürfe ... 092
5.2 Konstruktiv-technische Betrachtung ... 096
5.2.1 Konstruktion ... 096
5.2.1.1 Elementaufbau ... 098
5.2.1.2 Textilbetonplatten ... 101
5.2.1.3 Rahmen aus glasfaserverstärktem Kunststoff ... 102
5.2.1.4 Vakuumpaneele und Kunststoffwellplatten ... 103
5.2.1.5 Verklebung ... 104
5.2.1.6 Elementbefestigung ... 108
5.2.1.7 Fugenausbildung & Kopplung ... 109
5.2.2 Bauphysik ... 110
5.2.2.1 Wärmeschutz ... 110
5.2.2.2 Tauwasserschutz ... 114
5.2.2.3 Schlagregenschutz ... 117
5.2.2.4 Untersuchungen zum Brandschutz ... 120
5.2.2.5 Untersuchungen zum Schallschutz ... 123
5.3 Ökologische Betrachtung ... 127
5.3.1 Vergleichende Ökobilanzierung von Fassaden ... 127

5.3.2 Abschätzung der Umweltbelastung ... 129
5.3.2.1 Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) ... 129
5.3.2.2 Anpassung des Bewertungssystems mittels Einstufungsmatrix ... 130
5.3.2.3 Auswertung ... 131
5.4 Ökonomische Betrachtung ... 134
5.4.1 Kosten für das vaku*tex*-Element ... 134
5.4.2 Wirtschaftliche Vorteilhaftigkeit ... 134
5.4.3 Amortisation der Investitionskosten ... 135
5.4.4 Schlussfolgerung für vaku*tex* ... 137
5.4.5 Markteintrittsbarrieren und Hemmnisse ... 137

6. Fazit & Ausblicke ... 139

7. Verzeichnis ... 143
7.1 Literatur ... 144
7.2 Abbildungen ... 145

8. Anhang ... 147
8.1 Statische Bemessung ... 148
8.2 Prüfbericht zu den Verbindungsmitteln ... 177
8.3 Prüfbericht zur Bestimmung der Verbrennungswärme ... 204
8.4 Prüfbericht zur orientierenden Brandverhaltensprüfung nach dem SBI-Verfahren ... 209
8.5 Prüfbericht Schallmessung - Konstruktion mit Agraffe ... 225
8.6 Prüfbericht Schallmessung - Konstruktion mit Klebeverbindung ... 235
8.7 Prüfbericht - Haftungsprüfung mit dem SikaTack-Panel-System ... 245

1. Einleitung

Die Bevölkerung auf unserer Erde wächst rasant an. Im Jahr 1800 wurde die Schwelle zur ersten Milliarde überschritten, heute leben weltweit sieben Mrd. Menschen. Laut Datenreport der Deutschen Stiftung Weltbevölkerung werden es im Jahr 2024 bereits 8 Mrd. sein.
Ein weiterer Trend, der zu beobachten ist, ist die globale Zunahme der Urbanisierung. Auch kann eine steigende Nachverdichtung innerhalb der Städte beobachtet werden: Platz wird kostbarer, Menschen müssen auf immer engerem Raum zusammenleben. Auch ist ein starker Anstieg der Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre zu beobachten (siehe Abb. 1). Alarmierend ist zudem der weltweite Anstieg der Rohstoffentnahme auf 59 Giga-Tonnen (entspr. 59.000 Mio. t) im Jahr 2006. Im Vergleich zum Jahr 1990 bedeutet dies einer Erhöhung um ein Drittel [SERI, 2010].
Der weltweit zunehmende Energiebedarf und die steigenden Entnahmemengen von Rohstoffen sind Motivation und Ausgangspunkt der Forschungsarbeit. Denn die Frage nach Einspar- und Optimierungspotentialen von Materialien und Konstruktionen im Bauwesen ist vor diesem Hintergrund eine zentrale und mehr denn je wichtige geworden. Gebäude sind äußerst langlebige Werke, die im Laufe ihrer Existenz ein Vielfaches der Energie verbrauchen, die bei ihrer Herstellung eingesetzt wurde. Damit ist es erforderlich, eine maximale Effizienz von Gebäudehüllen anzustreben, um die Ziele der Energiewende zu erreichen. Die ökologischen und energetischen Anforderungen an Gebäudehüllen werden sich dahingehend in den nächsten Jahren noch weiter erhöhen. Unter Verwendung üblicher Materialien zieht dies eine kontinuierliche Verstärkung der Außenwandaufbauten nach sich.

Um dieser unerwünschten Entwicklung entgegenzuwirken, bieten sich neue Lösungen mit Konstruktionen aus mikro- bis nanostrukturierten Materialien an, die durch Wärmeleitfähigkeitsreduktion, Festigkeits-, Wärmekapazitäts- und Qualitätserhöhung schlankere Aufbauten ermöglichen. Mit der vorliegenden Arbeit *„vaku^tex - Vakuumgedämmte Fassadenelemente aus Textilbeton“* soll ein wesentlicher ökologischer und ökonomischer Beitrag zur nachhaltigen Betonarchitektur geleistet werden.

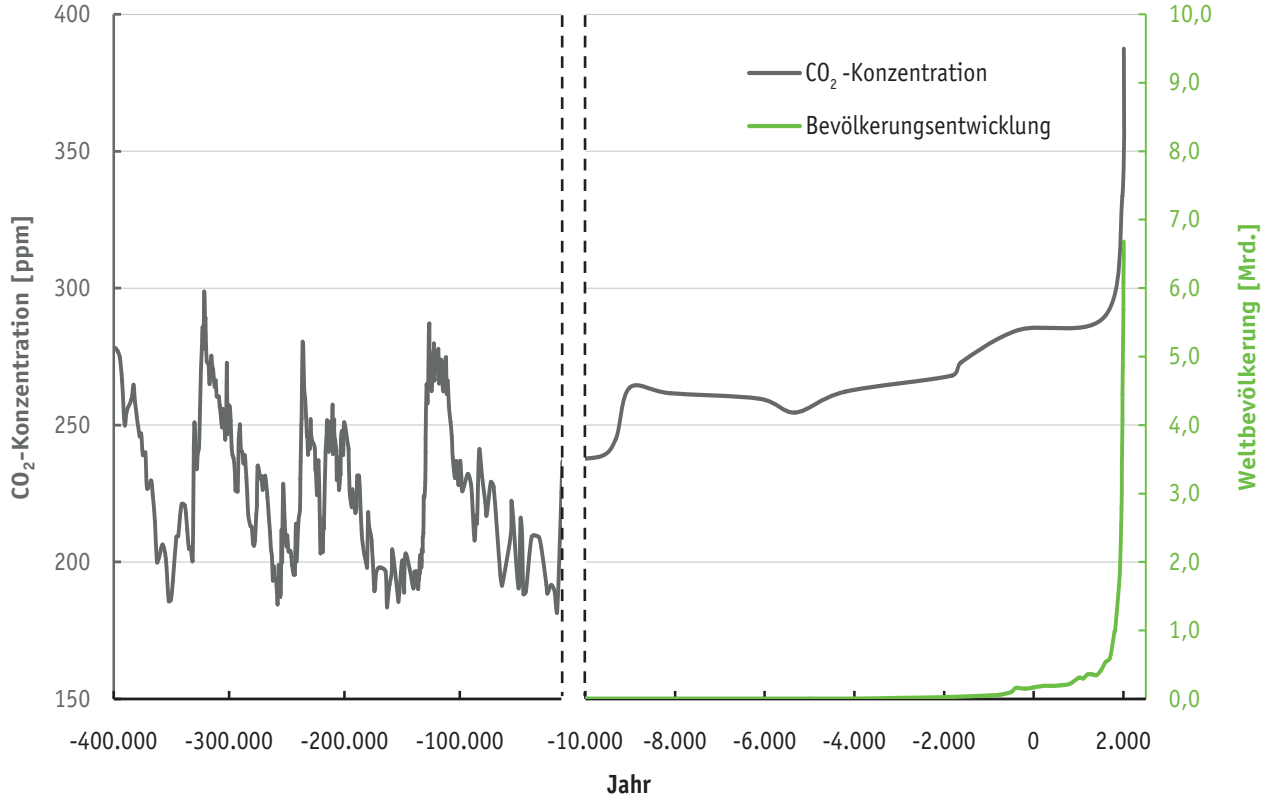


Abb. 1 Zusammenhang zwischen CO_2-Konzentration und Bevölkerungsentwicklung

2. Inhalt & Ziele

2.1 Forschungsgegenstand

Seit März 2010 widmete sich das Forschungsvorhaben *„vaku^{tex} - Vakuumgedämmte Fassadenelemente aus Textilbeton“* an der Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig dem Ziel, eine extrem leichte und energieeffiziente Gebäudehülle in Sichtbetonoptik zu entwickeln. Durch die Kombination innovativer Materialien wie Textilbeton, Vakuumisolationspaneele (VIP), Latentwärmespeichermaterialien (PCM) und glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) sollten minimale Bauteildicken von 11 cm erreicht werden. Neben bautechnischen, ökonomischen und gestalterischen Aspekten wurde der gesamte Lebenszyklus des zu entwickelnden Fassadenelements betrachtet und bewertet, sodass die Anforderungen an zukünftige Fassaden erfüllt werden.

2.2 Ausgangslage

Die Rahmenbedingungen, die die Ausgangssituation für das Forschungsprojekt vaku^{tex} bilden, sind vielgestaltig. So spielen Vorgaben aus der Politik als Wegweiser für energetische und ökologische Ziele eine ebenso wichtige Rolle wie die technischen, gestalterischen und ökonomischen Voraussetzungen, um ein Fassadenelement wie vaku^{tex} zu entwickeln.

2.2.1 Klimapolitische Vorgaben

Mit dem 2010 beschlossenen Ausstieg aus der Kernenergie hat die Bundesregierung ein neues Energiekonzept für Deutschland auf den Weg gebracht, das neben Maßnahmen zum verstärkten Einsatz Erneuerbarer Energien auch umfassende Maßnahmen zur Energieeinsparung vorsieht. So soll der gesamtdeutsche Primärenergiebedarf bis 2050 um 50 % reduziert werden, der Treibhausgasausstoß gegenüber dem Referenzjahr 1990 sogar um 80-95 % [Umweltbundesamt, 2010, S.4]. Damit werden langfristig tiefgreifende Maßnahmen nötig, um diese Klimaziele zumindest im Ansatz realisieren zu können. Das Bauwesen bietet dabei besonders große Einsparpotentiale, da dieses weltweit etwa die Hälfte der global erzeugten Energie verbraucht [Hegger, 2008, S.38].
Die Bundesrepublik Deutschland strebt an, den Wärmebedarf des Gebäudebestandes bis 2020 zunächst um 20 % zu senken, bis 2050 sollen alle Häuser nahezu klimaneutral sein [BReg, 2012a]. Mit diesem politischen Maßnahmenpaket werden die Anforderungen an die Energieeffizienz von Gebäudehüllen noch einmal drastisch verschärft. Seit der ersten Wärmeschutzverordnung 1977 steigen diese beständig (siehe Abb. 2).
Es bedarf daher neuer Produkte und Verfahren, um einerseits energieeffizient und regenerativ Nutzenergie zu erzeugen und andererseits eine Optimierung der Gebäudehülle zu erreichen.

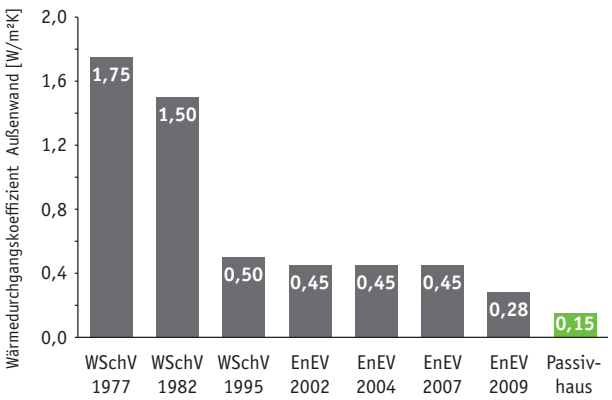


Abb. 2 Entwicklung des Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) von Außenwänden von 1977 bis 2009

2.2.2 Bautechnische Voraussetzungen

Beton ist der derzeit meistverbaute Baustoff im Bauwesen [BetonMarketing, 2011]. Diesen Erfolg hat das Material der Entdeckung der Eisenbewehrung vor mehr als 100 Jahren zu verdanken. Durch die Bewehrung von Beton mit textilem Gelege steht das Bauwesen nun erneut vor grundlegenden Veränderungen. Die Textilbewehrung des Textilbetons wird die Stahlbewehrung natürlich nicht ersetzen, aber die Einsatzmöglichkeiten von bewehrtem Beton stark erweitern. Textilbeton ist ein mit textiler Bewehrungsschicht aus alkaliresistentem Glas (AR-Glas) oder Carbon versehener Baustoff, der anders als der Stahlbeton kein basisches Milieu als Korrosionsschutz benötigt. Eine Mindestüberdeckung entfällt damit, sodass eine Bauteildicke von wenigen Millimetern realisierbar wird. Die bislang verfügbaren Produkte zur Herstellung von Textilbe-

ton befinden sich noch im Entwicklungsstadium. Auch der Einsatz von Vakuumisolation im Bauwesen ist eine relativ junge Idee. Diese Entwicklung begann vor vier Jahrzehnten mit der Herstellung von vakuumisolierten Kühl- und Tiefkühlgeräten. Später wurden die Paneele auch für den Einsatz an Gebäuden eingeführt. Vakuumisolationspaneele (VIP) bestehen aus einem porösen, druckbelastbaren Kern, der in einer Vakuumkammer in eine Hochbarrierefolie eingeschweißt und evakuiert wird.
Beide Technologien, Textilbeton und Vakuumisolationspaneel, haben im Bereich der Grundlagenforschung sowie in der anwendungsorientierten Forschung bereits erfolgreiche Projekte vorzuweisen, jedoch wurden sie bisher noch nicht zusammengeführt. Das Forschungsprojekt vaku^tex untersucht eine Symbiose beider Technologien.

2.2.3 Ökologische Aspekte

Aus ökologischer Sicht werden zukünftige Konstruktionen über den gesamten Lebenzyklus bewertet werden: Neben den Energieverbräuchen während der Nutzung wird nun auch eine Betrachtung über Herstellung, Transport, Einbau, Nutzung, Rückbau und Wiederverwertung durchgeführt. Bauteile aus Textilbeton können die Rohstoffentnahme und die Graue Energie, also die Energiemenge, die für Herstellung, Transport, Lagerung, Verkauf und Entsorgung eines Produktes benötigt wird, gegenüber gleichwertigen Stahlbetonelementen um das bis zu 5-fache senken. Dadurch werden die Treibhausemissionen gesenkt und der Primärenergiebedarf sowie das Versauerungspotential in allen Lebenszyklusphasen, in denen graue Energie anfällt, stark reduziert.
Dies ist möglich, weil der Textilbeton ohne eine Mindestüberdeckung der Bewehrung auskommt und damit bis an die Materialgrenze verschlankt werden kann. In der Folge sind Textilbetonbauteile wesentlich leichter als vergleichbare Stahlbetonkonstruktionen und vereinfachen damit den Transport. Außerdem reduzieren sie als Fassade die Last auf das Tragwerk eines Gebäudes. Im Recycling kann der Textilbeton mit textiler Bewehrung komplett geschreddert und wiederverwertet werden. Die Vakuumpaneele werden nach dem Rückbau in Hochbarrierefolie und Kernmaterial getrennt. Das Kernmaterial der Vakuumdämmung (mikroporöse Kieselsäure) kann unter Einsatz geringer Energiemengen wieder in neue Dämmpaneele eingebracht werden. Für eine sehr gute Ökobilanz bieten die vakuumgedämmten Fassadenelemente aus Textilbeton also beste Voraussetzungen.

2.3 Potentiale und Grenzen

Aus den ökologischen Vorteilen ergeben sich in allen Lebenszyklusphasen des Bauteils auch ökonomische Vorteile: Herstellung, Transport, Einbau, Nutzung, Rückbau und Wiederverwertung der Textilbetonfertigteile sind durch die Materialeffizienz und Gewichtsreduktion kostengünstiger als bei vergleichbaren Stahlbetonelementen. Noch ist es aber notwendig, die gesamten Herstellungsprozesse der Konstruktion, den Transport, das Handling auf der Baustelle, die Nutzereinflüsse und den Rückbau zu optimieren, um ein wirtschaftlich darstellbares Bauteil realisieren zu können.
Mit der Materialkombination von Textilbeton und Vakuumdämmung in einem Bauteil können minimale Wanddicken von nur 11 cm erreicht werden, die durch die Leichtigkeit und Offenheit der Konstruktion die Aufenthaltsqualität in den Wohnräumen erhöhen und einen verbesserten Ausblick ermöglichen. Durch die schlanken hochgedämmten Wände resultieren geringere Laibungstiefen und damit geringere Aufwendungen für Kunstlicht und Heizwärme. Die Flächenversiegelung kann sogar um das fünffache gegenüber einer energetisch gleichwertigen Konstruktion gesenkt werden, sodass ein Nettogrundflächengewinn bei einem freistehenden Einfamilienhaus von bis zu 15 % erreicht werden kann. So entsteht insbesondere in verdichteten Bebauungsbereichen ein ökonomischer Mehrwert (siehe Abb. 3). Da es sich bei der derzeit verfügbaren Vakuumdämmung in Form von Vakuumisolationspaneelen (VIP) voraussichtlich auch in naher Zukunft um ein Produkt im oberen Preissegment handeln wird, ist der Flächengewinn der Gesamtkonstruktion, speziell auf engen oder hochpreisigen Grundstücken, ein wichtiges Argument für den Einsatz. Zusätzliches Potential

wird im Bereich der Sanierung gesehen, da das Investitionsvolumen der Sanierung mittlerweile das der Neubauten übersteigt. Hier werden vor allem dünnwandige Dämmsysteme an Bedeutung gewinnen, weil diese denkmalgerecht appliziert werden können. Auch hier findet die Kombination von Textilbeton und Vakuumdämmung überzeugend Anwendung: Die äußere Textilbetonplatte kann dreidimensional geformt werden, sodass es beispielsweise möglich wird, Gesimse, Kapitelle oder Faschen auszubilden. Ebenso denkbar wären 3D-Fassaden, die mit dem flexiblen Bauteil realisiert werden könnten. Im Vergleich zu heutigen mit Faserzement- oder Holzplatten verkleideten Fassaden ist die Oberfläche des schlanken Fassadenelementes vaku^{tex} vielfältiger in Farbe und Struktur gestaltbar, auch größere Plattendimensionen können ausgeführt werden. Sie ist langlebig, pflegeleicht und gleichmäßig hochwertig.
Durch vollständige Werksfertigung können eine

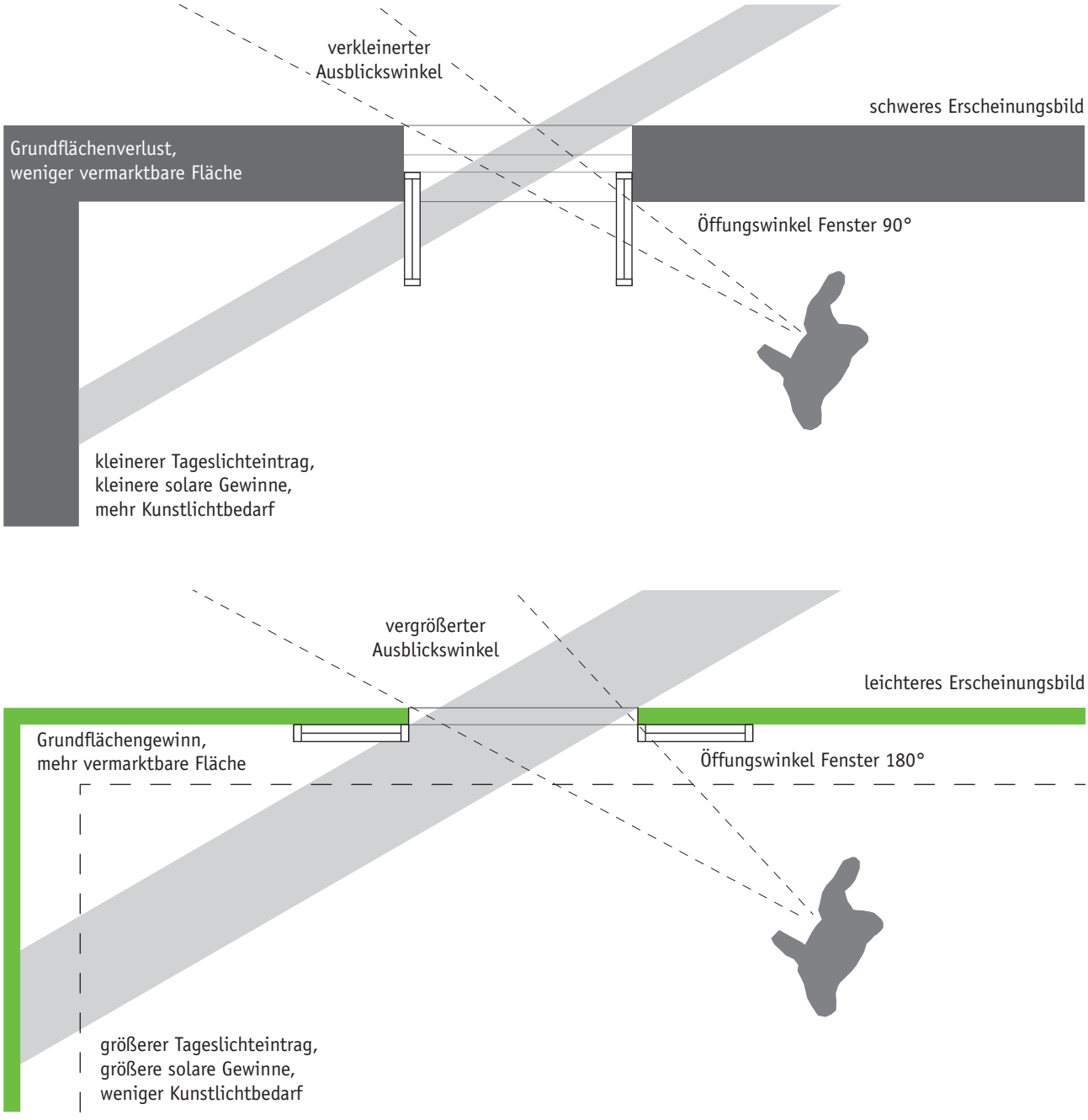


Abb. 3 Potenziale des Fassadenelements vaku^{tex}

hohe Verarbeitungsqualität garantiert und die Elemente zum idealen Zeitpunkt geliefert und verbaut werden. Das gewährleistet einen optimierten Bauablauf und verkürzt die Bauzeit.

Neben den genannten Potentialen soll an dieser Stelle auch auf die Grenzen von vaku^tex eingegangen werden. Vakuumdämmung ist das derzeit effizienteste Dämmsystem am Markt. Mit diesem können Werte erreicht werden, die um das bis zu 5-fache über herkömmlichen Dämmleistungen liegen. Einen entscheidenden Nachteil hat die Vakuumdämmung jedoch: Ihre Lebensdauer wird bisher mit lediglich 30 Jahren angesetzt, ein im Vergleich mit anderen Dämmstoffen eher kurzer Zeitraum. Diese Angabe beruht auf Hochrechnungen, da das Monitoring dieses neuartigen Materials bisher nicht über die gesamte Lebensdauer der Dämmung vorgenommen werden konnte. Es ist aber zu erwarten, dass die Lebensdauer von Vakuumdämmungen noch nach oben korrigiert werden kann. Ihre Sensibilität gegenüber mechanischer Beschädigung ist jedoch ein Punkt, dem besondere Beachtung geschenkt werden muss. Weist die umschließende Schutzfolie nur kleinste Undichtigkeiten auf, können Luftteilchen ins Kernmaterial eindringen und die Dämmleistung des Paneels erheblich herabsetzen. Hier musste deshalb ein Weg gefunden werden, zum einen die Schutzschicht selbst möglichst robust auszubilden, zum anderen die Dämmung zerstörungssicher im Bauteil einzubetten.
Die in der Vakuumdämmung eingesetzte mikroporöse Kieselsäure ist die derzeit besten Lösung als Kernmaterial für Vakuumdämmungen. Seine Herstellung ist jedoch aufwändig, weswegen der Anteil grauer Energie vergleichsweise hoch ist. Preislich liegen Vakuumdämmungen noch immer im oberen Preissegment, was durch den Einsatz von Hochleistungsmaterialien und den geringen Automatisierungsgrad zu erklären ist.

Auch die Textilbetonplatten von vaku^tex werden aktuell noch durch händische Verfahren hergestellt. Textilbeton ist ein neues Material am Markt, für das es bislang noch keine automatisierte Fertigung gibt. Schließlich erfolgt auch die Fügung der Einzelkomponenten zum vaku^tex-Bauteil noch händisch. Um in naher Zukunft wettbewerbsfähig zu werden, kann für die Produktions- und Fügeprozesse von einer Teil- bzw. Vollautomatisierung ausgegangen werden, die die Herstellungskosten, bei gleicher Qualität, merklich senken wird.

2.4 Ziele

Das Forschungsvorhaben *„vaku^tex - Vakuumgedämmte Fassadenelemente aus Textilbeton“* hatte die Entwicklung und experimentelle Erprobung einer hochgedämmten, extrem schlanken und leichten Außenwandkonstruktion in Sichtbetonoptik zum Ziel. Hintergrund ist die weltweit zunehmende Urbanisierung, die immer mehr Menschen auf engerem Raum zusammenleben lässt. Dies macht neue effiziente Bauweisen erforderlich, die sowohl platz- als auch energie- und ressourcenschonend sind. Auf regionaler Ebene sind die sich zunehmend verschärfenden Anforderungen an Gebäudehüllen zu nennen, die mit den EnEV-Novellen weiter vorangetrieben werden. Um diesen Energiestandards gerecht zu werden, ohne Bauwerke in immer dickere Dämmpakete kleiden zu müssen, bedarf es minimalistischer und energieeffizienter Gebäudehüllen. Lösungen dafür bieten neue Konstruktionen aus mikro- bis nanoporösen Materialien. Durch ihren Einsatz kommt es zur Gewichts- und Dickenreduktion der Bauteile.

Mit vaku^tex wurde die Entwicklung des dünnsten und zugleich leichtesten Fassadenelementes in Sichtbeton und Passivhausdämmstandard angestrebt, welches nur etwa 100 kg/m² Eigengewicht aufweisen sollte. Darüber hinaus war das Entwickeln brand- und schallschutztechnischer Lösungen sowie deren orientierende Prüfung ein weiteres Ziel der Forschungsarbeit. Auch sollte die Ausbildung und Anordnung der extrem dünnen Materialien sowie der Fugen geklärt werden, um z. B. Durchfeuchtung und Verformung durch Diffusion zu vermeiden. Die Untersuchung verschiedener Fassadentypologien und -systeme sollte Rückschlüsse auf Verbindungs- und Konstruktionsmittel innerhalb der Fertigteile und zum Gebäude ermöglichen.

3. Grundlagen & Vorbetrachtung

3.1 Methodisches Vorgehen

Die Anforderungen an ein Produkt, Bauteil oder Gebäude sind längst nicht mehr vorrangig konstruktiver oder ästhetischer Natur. Neben Tragverhalten und Optik spielen heute auch zunehmend wirtschaftliche und vor allem ökologische Aspekte eine entscheidende Rolle bei der Baumaterialienwahl.

Die betrachteten Themenschwerpunkte der Forschungsarbeit liegen deshalb in den Bereichen *„Architektur“*, *„Konstruktion und Technik“*, *„Ökologie“* und *„Ökonomie“*, also in Themen, die das Bauen unserer Zeit prägen. Dabei wird jedoch die Idee der Abhängigkeit und der Wechselwirkung der Themenfelder zueinander betrachtet. Im Forschungsprojekt werden daher gestalterische und konstruktive Aspekte auch mit den Aspekten der Ökologie und Ökonomie gesehen, überprüft und bearbeitet.
Diese Betrachtungsweise begleitet das Forschungsprojekt durch alle Phasen, sodass eine gesamtheitliche Betrachtung gewährleistet wird, welche den Zeichen der Zeit gerecht wird. Ausgehend von grundlegenden Betrachtungen, wurden hypothetische Lösungsansätze ermittelt und realisierbare Lösungsvarianten entwickelt. Nach einer eingehenden Analyse der jeweiligen Vor- und Nachteile wurde anschließend eine beispielhafte Lösung ausgearbeitet.

Um sich den komplexen Problematiken anzunähern, wurden in jedem Themenfeld Schwerpunkte aufgrund von typologischen Zuordnungen, bestehenden Normen und Gesetzen erarbeitet sowie mit den Schwerpunkten aus den anderen Themenfeldern überprüft und rückgekoppelt. So konnte eine nachhaltige Abschätzung und Eingrenzung der Potentiale und Probleme der daraus resultierenden Lösungsvarianten vorgenommen werden.

Durch das Abwägen und Rückkoppeln von Vor- und Nachteilen in den einzelnen Themenschwerpunkten konnten Lösungsvarianten erarbeitet werden, die ökologischen, ökonomischen, konstruktiven, technischen und ästhetischen Ansprüchen gerecht werden. Dadurch werden nicht nur Machbarkeiten und Marktchancen überprüft, sondern auch Um-

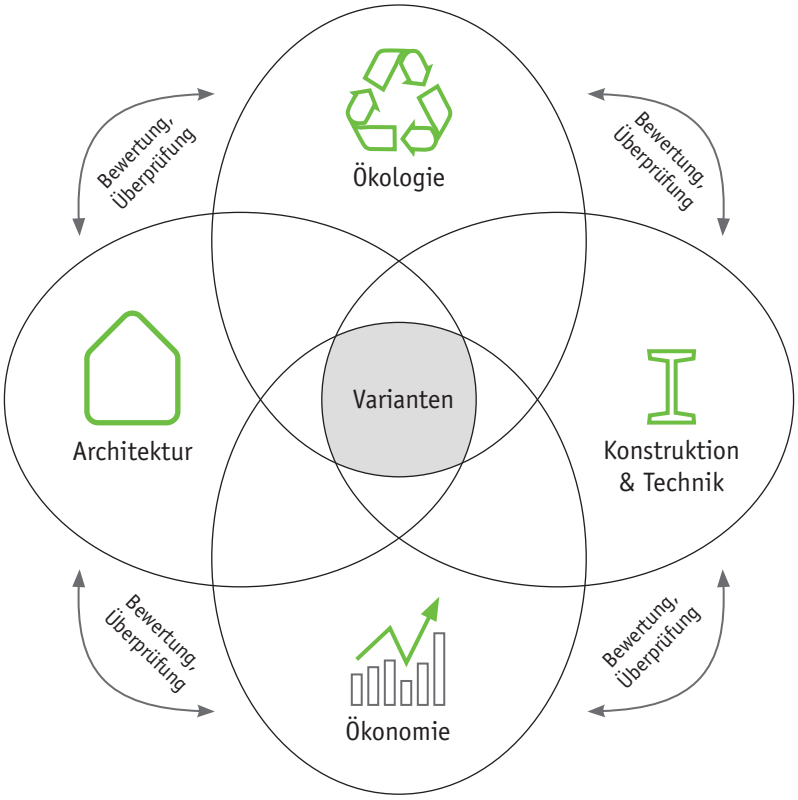


Abb. 4 Wechselwirkung der betrachteten Themenfelder

weltwirkungen abgeschätzt, um einen nachhaltigen Beitrag in der Bauwirtschaft zu leisten

3.2 Architektonische Betrachtung

Architektur ist der vom Menschen geschaffene Raum, dem über seine rein schützende Funktion hinaus auch eine soziokulturelle Rolle zukommt, denn er bildet den Lebensraum des Menschen und entscheidet darüber, ob er sich in seiner Umgebung wohl fühlt, oder nicht.
Architektur war zu allen Zeiten aber auch direkter Ausdruck des Zeitgeistes. In den Werken der Erbauer konnte - und sollte - wie in einem Buch gelesen werden: Was beispielsweise der Historismus Ende des 19./ Anfang des 20. Jh. nach außen trug, war die deutliche Rückbesinnung auf ältere, vor allem klassische Baustile. Die Folge war Stilpluralismus in den Fassaden, hier diente der Baustil ausschließlich dem Dekor. Frei nach dem Motto: *„more is more“*.
Dem entgegnete die Moderne zu Beginn des 20. Jh. mit einem Umbruch in allen hergebrachten Traditionen. Die technisch versierte, klare Architekturhaltung wurde durch die Verwendung von Stahl, Glas und bewehrtem Beton geprägt und zugleich verkörpert. Hier galt das direkt entgegengesetzte Motto: *„less is more“*.

Zu Beginn des 21. Jh. nun ist das Bauwesen an einem Punkt angelangt, an dem eine Vielzahl an Materialien zahllose Möglichkeiten zu Bauen bieten und wir schon lang nicht mehr beschränkt oder versiert auf ein bestimmtes Material oder einen Stil sein müssen. Heute sind es die *„Zeichen der Zeit“*, die unser Bauen zunehmend prägen: Klimawandel, Bevölkerungsentwicklung, Ressourcenknappheit. Auch hier muss die Architektur dem zeitlichen Kontext gerecht werden. Sie muss sich den neuen Forderungen nach Nachhaltigkeit, Flexibilität und Effizienz erfolgreich stellen können. Dies stellt ganz konkret Anforderungen an die Gebäudehülle und die technische Gebäudeausstattung. Derzeit ist die Antwort darauf z. B. der Einsatz dicker Dämmpakete an der Fassade, die allerdings ausschließlich einen Aspekt von Effizienz und Nachhaltigkeit berücksichtigt, nämlich die Einsparung von Nutzenergie während der Nutzungsphase des Gebäudes. Dabei wird jedoch der Aspekt des *„Energetischen Rucksacks“* vernachlässigt, der sich bereits bei der Herstellung eines Baustoffes bis zu seiner Entsorgung anhäuft. Es muss beim Bauen deshalb eine gesamtheitliche Betrachtung von Architektur, Ökonomie und Ökologie erfolgen. Hier braucht es ein Um- und Weiterdenken, um tatsächlich nachhaltige Gebäude zu erzeugen.

Abb. 5 Historismus - Reichsgericht Leipzig

Abb. 6 Moderne - Neue Nationalgalerie

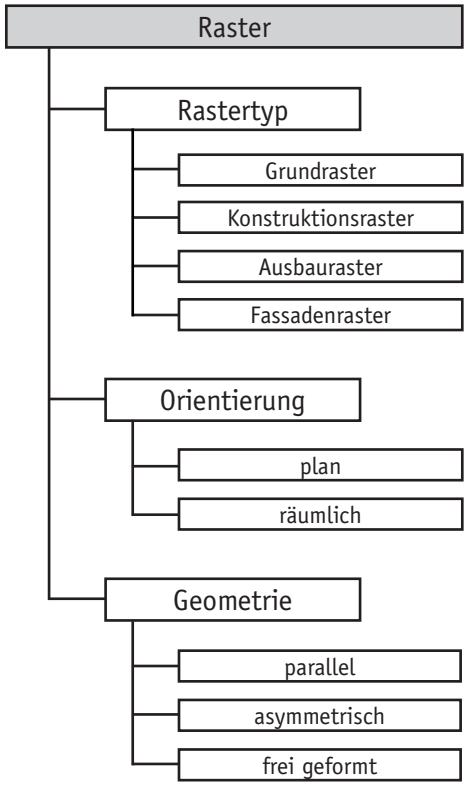
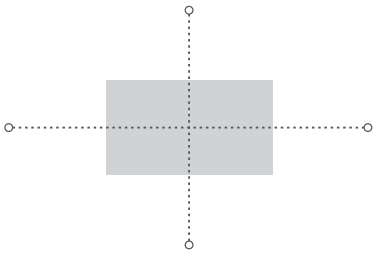


Abb. 7 Raster

3.2.1 Raster

Raster dienen in der Architektur und in konstruktiven Belangen zur Orientierung und zur Darstellung von Bezügen im und am Gebäude. Dazu bedient man sich unterschiedlicher Rastertypen, die sich ganz oder teilweise in Beziehung setzen lassen oder sogar voneinander losgelöst auf unterschiedlichen Betrachtungsebenen anwendbar sind.
So lässt sich z. B. das Fassadenraster bei einer Vorhangfassade vollkommen losgelöst vom Konstruktionsraster betrachten. Aber wiederum kann ein Konstruktionsraster auf dem Grundraster aufbauen, um z. B. eine wirtschaftliche Konstruktion mit einem wirtschaftlichen Ausbauraster zu kombinieren. Die Raster können zudem unterschiedliche Orientierungen und Geometrien aufweisen.
Grundsätzlich ist im Vorfeld zu definieren, ob es sich um Achsrasterbezüge oder Bandrasterbezüge handelt. Beim Achsraster deckt sich das grundlegende Raster mit der Achslinie eines Bauteils, die Bauteildicke wird dabei nicht berücksichtigt. Mit

Achsraster
Raster deckt sich mit den Achslinien der Bauteile; die Bauteilstärke wird nicht berücksichtigt



Bandraster
Raster bestimmt die Lage der Bauteile; die Bauteilstärke wird berücksichtigt

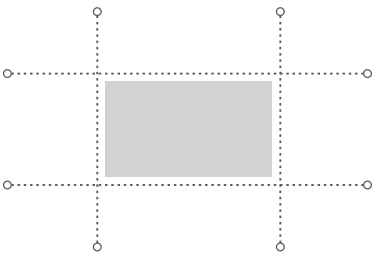
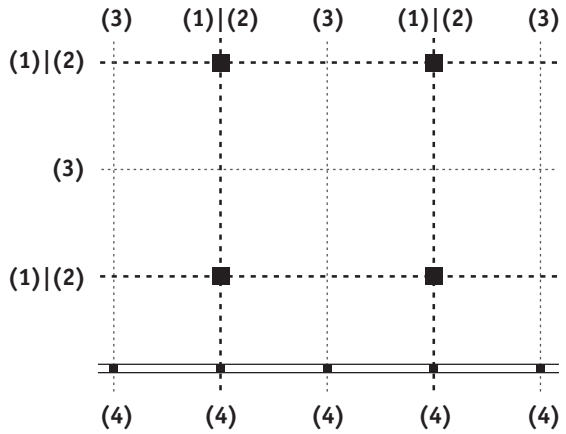


Abb. 8 Rasterarten

(1) Grundraster
Grundlegendes Raster, auf dem die weiteren Rastersysteme des Gebäude meistens basieren

(2) Konstruktionsraster
Bestimmt die Position der tragenden Teile; oft Vielfaches / deckungsgleich mit Ausbauraster

(3) Ausbauraster
Gibt die Grundmaße der Ausbauelemente an; entspricht oft dem Grundraster



(4) Fassadenraster
Meist ist es mit dem Ausbauraster abgestimmt, um Anschlüsse an der Fassade zu ermöglichen, es kann aber auch z. B. bei einer Vorhangfassade unabhängig von den anderen Rastern angewand werden

Abb. 9 Zusammenhang der Rastertypen

dem Bandraster lässt sich hingegen die Lage eines Bauteils im Gebäude unter Berücksichtigung der Bauteilstärke definieren. In der Forschungsarbeit ist unter dem Begriff Raster immer das Achsraster gemeint, sofern es nicht anders erläutert wird.

Rastertypen

Zu den Rastertypen in der Architektur zählen unter anderem das Grund-, Konstruktions-, Ausbau- und Fassadenraster. Das Grundraster definiert das Hauptintervall, auf das sich die meisten Rastersysteme beziehen. Die anderen Rastertypen stellen meist ein Vielfaches des Grundrasters dar. Das Konstruktionsraster bestimmt die Position der lasttragenden Bauteile, im Stahlbau beträgt das Konstruktionsraster z. B. 720 cm, im Holzbau meist 62,5 cm. Das Fassadenraster kann sich je nach Konstruktion am Grundraster orientieren oder sich vollkommen von den Rastergrundbezügen lösen. Es erscheint aber sinnvoll, das Fassadenraster mit dem Ausbauraster zu koordinieren, um evtl. Anschlüsse oder Öffnungen in der Fassade leichter zu ermöglichen [Staib, 2008, S. 44 f.].

Orientierung und Geometrie

Die typischen Raster im Bauwesen sind plane (zweidimensionale) Parallelraster, die auf entsprechende Ebenen, wie Grundriss oder Fassade projiziert werden. Zur Umsetzung von komplexen Formen kann es jedoch dienlich sein, die Raster räumlich (dreidimensional) anzuordnen und neben den parallelen Achsen asymmetrische oder frei geformte Achsen zu definieren. Die Bestimmung der Bezüge kann neben Linien und Kurven auch durch Punktwolken erfolgen. So wird z. B. die Raumbildung eines 3D-Voronoi durch bestimmte Abstandsbeziehungen zwischen räumlich angeordneten Punkten erzeugt. Zur Umsetzung komplexer dreidimensionaler Formen wird meist eine Vereinfachung in Form einer Triangulation vorgenommen oder neue Fertigungsmethoden wie das Rapid-Prototyping herangezogen.

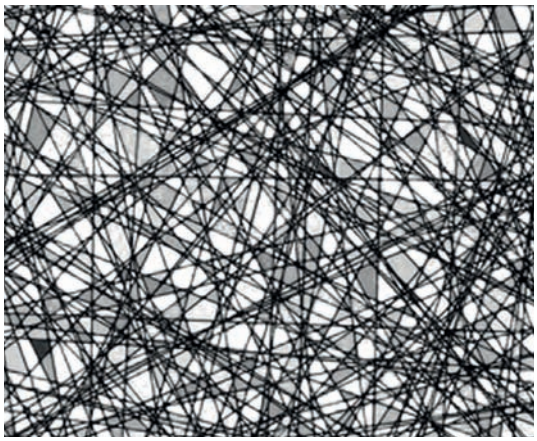


Abb. 10 Asymmetrisch planes Raster

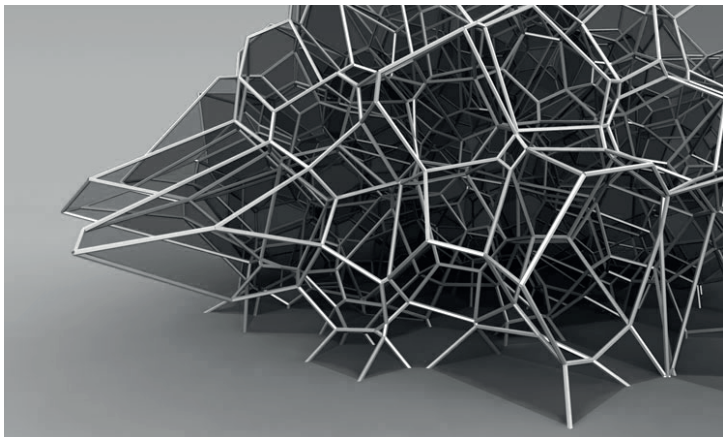


Abb. 11 3D-Voronoi auf der Grundlage einer Punktwolke

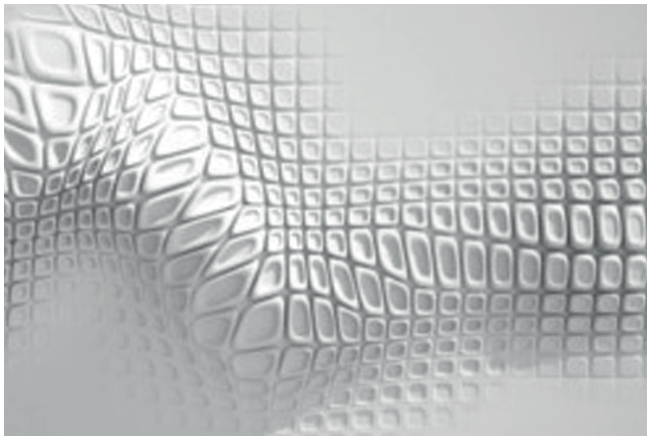


Abb. 12 2D-Parallelraster im Übergang zum 3D-Freiformraster

Abb. 13 Triangulierte Freiform (Dreidimensionales Polygonraster)

3.2.2 Gebäude

„Gebäude sind selbstständig benutzbare, überdeckte bauliche Anlagen, die von Menschen betreten werden können und geeignet [...] sind, dem Schutz von Menschen, Tieren oder Sachen zu dienen." [Musterbauordnung, 2008, S. 5] - so lautet die allgemeine Definition in den Landesbauordnungen der Bundesländer. Diese baulichen Anlagen werden auf Grund ihrer Nutzung, Höhen und Größe der Nutzungseinheiten in Gebäudeklassen unterteilt. Aus dieser Vielfalt ergeben sich unterschiedliche Gebäudetypen, vom Einfamilien- bis zum Hochhaus, die sich in unterschiedlichen Ausführung weltweit wiederfinden lassen.
Grundlegend wird im Aufbau von Gebäuden die Unterscheidung in Primär- und Sekundär- bzw. Komplementärsystem vorgenommen. Das Primärsystem ist die Ordnung der primären, also hauptsächlichen und unveränderlichen Bauteile im Gebäude (Massivwände, Decken, Stützen etc.), es lässt sich typologisch einer Bauweise zuordnen. Das Komplementärsystem stellt darüber hinaus die Ordnung der ergänzenden, nichttragenden und veränderlichen Ausbauteile im Gebäude dar (Trockenbauwände, Fassaden, Fenster etc.).
Bei der Zellenbauweise z. B. ist ein solches Komplementärsystem kaum vorhanden, das Gebäude besteht lediglich aus tragenden, unveränderlichen Bauteilen. Grundriss und Fassade sind unflexibel und fix. Bei der Skelettbauweise hingegen ist nur die Tragkonstruktion in Leichtbauweise primär, die Fassade und alle Innenausbauten sind komplementär, sie bleiben unabhängig vom Tragsystem und damit flexibel und veränderbar.
Solch eine vom Tragwerk unabhängige Fassade wird auch im Fall von vaku*tex* angestrebt, da das Bauteil damit in universellen Formaten nahezu an jedem Gebäude mit Vorhangfassadensystem eingesetzt werden kann. Dieses ist dann an bestimmte Bauweisen der Primärsysteme gekoppelt, wie z. B. Skelett- oder Schottenbau.
Im Folgenden sind die grundsätzlichen Bauweisen noch einmal beschrieben (siehe Abb. 14). Je nach Aufgabenstellung gibt es aber auch Mischformen:

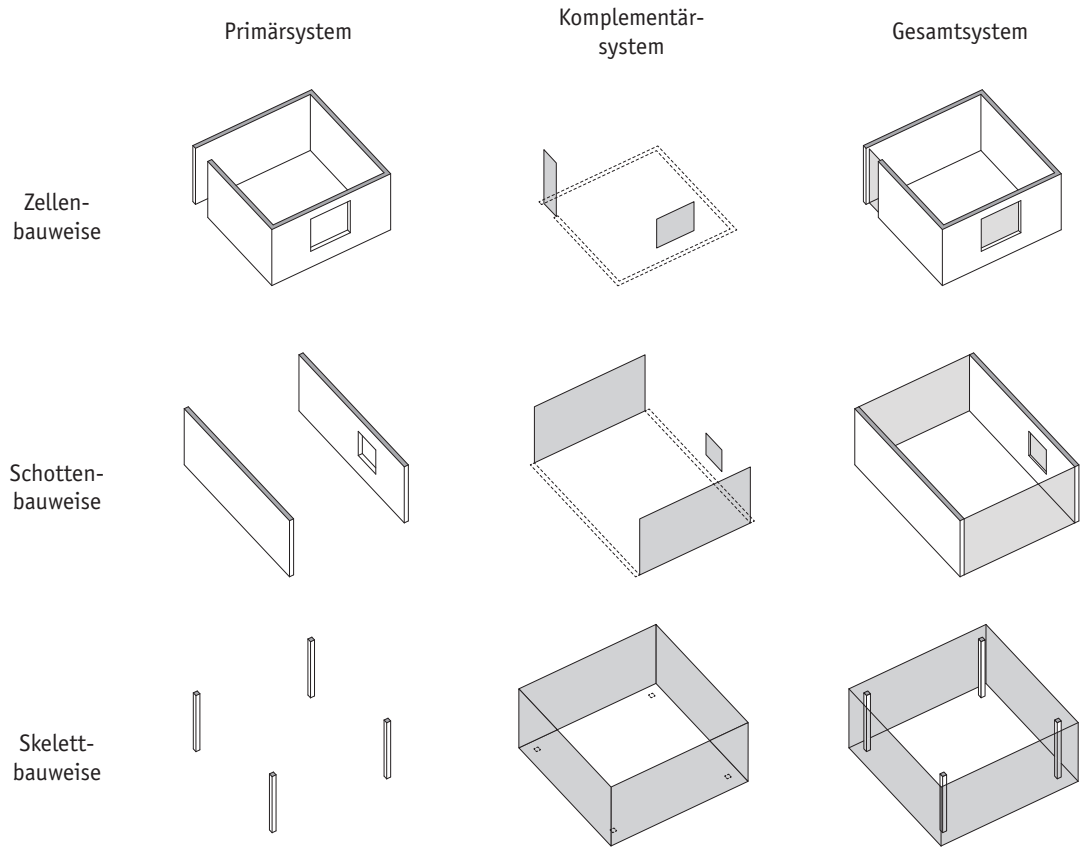


Abb. 14 Zusammenhang zwischen Primär-, Komplementärsystem und Bauweise

Zellenbauweise
Die Raumbildung erfolgt nahezu vollständig durch die tragenden Teile (z. B. massive Betonwände), sie ist starr und endgültig. Aussparungen ergeben Öffnungen in den tragenden Teilen, komplementäre Bauteile sind im geringem Umfang vorhanden.

Schottenbauweise
Der Raum entsteht durch tragende Teile in einer Richtung (z. B. massive Wandscheiben) und durch nichttragende Teile in der anderen (z. B. Vorhangfassade). Öffnungen in den tragenden Teilen entstehen durch Einschnitte und Lücken.

Skelettbauweise
Hierbei definieren Stützen als tragende Teile den umbauten Raum nur äußerst geringfügig. Diese Rolle übernehmen fast ausschließlich die nichttragenden, trennenden Komplementärteile wie Fassade und Trennwände. Die Räume sind dadurch freier gestaltbar und weniger endgültig definiert [Meijs, 2009, S. 103 ff.].

3.2.3 Fassade

Eine Fassade ist die *„Haut"* eines Gebäudes, sie trennt den Innenraum klimatisch nach Außen ab. In der visuellen Wahrnehmung eines Gebäudes spielt sie eine zentrale Rolle und übernimmt Image- und Repräsentationsaufgaben. In der Architekturgeschichte bezeichnet sie die Straßenseite bzw. die Hauptansichtsseite eines Gebäudes. Bei Kirchenbauten ist dies die Westseite, ihr wurde die größte Aufmerksamkeit gewidmet. Zu den Elementen in der Fassade zählen z. B. Fenster oder Blendsäulen. Durch die typologische Einordnung in Gestaltung, Material, Konstruktion und Funktion lässt sich das wesentliche Prinzip der Gebäudehülle erklären.

Aufgabe der Fassade
Neben Gestaltung und Repräsentation stellen Umwelteinflüsse weitere Anforderungen an die Gebäudehülle: wie z. B. Wärme- und Kälteresistenz, Wind- und Wasserdichtheit, sowie Schall- und Feuerwiderstandsfähigkeit.
Optimale Hausentwürfe berücksichtigen bereits in der Planung alle sogenannten *„passiven Maßnahmen"*, um die Energieeffizienz in der Nutzung zu steigern und mit einer reduzierten Heiztechnik (*„aktive Maßnahmen"*) auszukommen. Solche passiven Maßnahmen sind der Formfaktor eines Gebäudes selbst (A/V), der Dämmstandard, die Luftdichtheit der Gebäudehülle, die Gebäudeorientierung, der Fensterflächenanteil, der Sonnenschutz und die thermische Speichermasse.

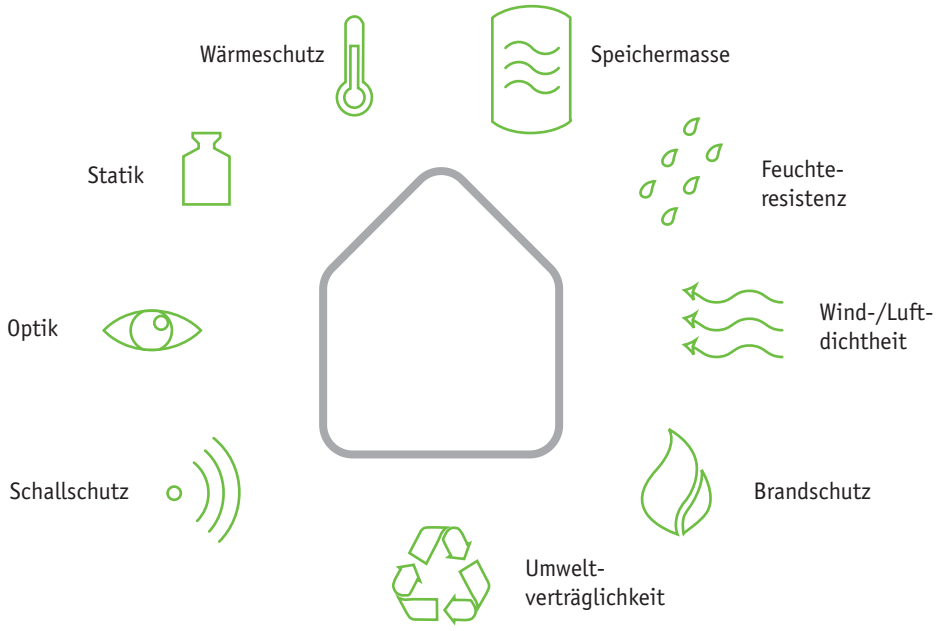


Abb. 15 Anforderungen an eine Fassade

3.3 Konstruktiv-technische Betrachtung

Die konstruktiv-technische Betrachtung beleuchtet in diesem wie auch in allen folgenden Kapiteln den Aufbau des vaku^{tex}-Fassadenelements, seine Konstruktion und Statik, die eingesetzten Materialien und wichtige bauphysikalische Aspekte. Dabei wird sie stets weiter detailliert und mit den anderen Themenschwerpunkten, der Architektur, der Ökologie und der Ökonomie, rückgekoppelt.

3.3.1 Textilbeton

Textilbeton ist ein Material, dass aus Stoffelementen wie z. B. Zement, Microsilica, Flugasche, Gesteinskörnungen, Wasser, Fließmittel und textilen Bewehrungsschichten aus alkaliresistentem Glas (AR-Glas) oder Carbon besteht. Diese textilen Gelege aus gewebten Filamentgarnen besitzen wesentlich höhere Festigkeiten als die Stahlbewehrung. Anders als der Stahl benötigen sie kein basisches Milieu als Korrosionsschutz, sodass die Mindestüberdeckung entfällt. Der Verbundwerkstoff kann dadurch mit einer Bauteildicke von wenigen Millimetern realisiert werden.

Geschichte

1993 gelang es den Forschern des Institutes für Textil- und Bekleidungstechnik der TU Dresden erstmals weltweit, aus den bis dato als nicht textil verarbeitbar geltenden Schneidrovings (Bündeln von endlosen, gestreckten Fasern) textile Strukturen für Bewehrungszwecke herzustellen, die am Lehrstuhl für Baustoffe auf Eignung untersucht wurden. Aufgrund des erkannten hohen Innovations- und Leistungspotentials des neuen Verbundbaustoffes wurden auch das Textilinstitut der RWTH Aachen und das Sächsische Textilforschungsinstitut Chemnitz in die Forschungstätigkeit mit einbezogen.
Gegenwärtig wurden und werden an der TU Dresden einzelne spezielle Verfahrens- und Erzeugnisentwicklungen für Anwendungen des textilbewehrten Betons bearbeitet. Von 1999 bis 2011 haben die Sonderforschungsbereiche 528 *„Textile Bewehrungen zur bautechnischen Verstärkung und Instandsetzung“* und der SFB 532 *„Textilbewehrter Beton – Grundlagen für die Entwicklung einer neuen Technologie“* mit Förderung durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft Grundlagen für eine breite Nutzung des Verbundwerkstoffes erarbeitet [Jesse, 2004, S. 1 ff.].

Aufbau

Die Tragfähigkeit von Beton kann durch Einlegen von textilen Gelegen verbessert werden. Eine solche textile Bewehrung aus Carbon oder alkaliresistentem Glas kann sehr genau innerhalb des Bauteils positioniert werden und auch oberflä-

Abb. 16 Textilbetonmuster

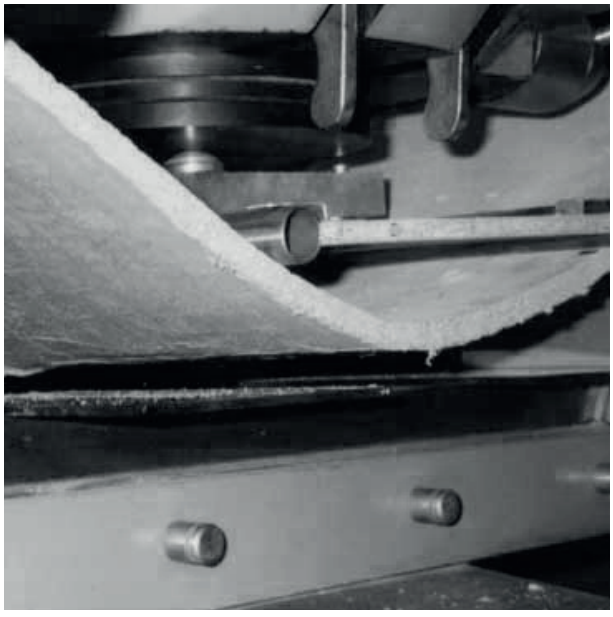


Abb. 17 Textilbetonplatte während des 4-Punkt-Biegeversuchs

chennah zum Einsatz kommen. Die Kombination unterschiedlicher Filamente (Endlosfasern) in einem Gelege ist ebenfalls möglich.
Die Hochleistungsfasern werden textiltechnisch zu flächigen Strukturen verarbeitet. Sind die Fasern entsprechend der Belastung im Bauteil ausgerichtet, wird im Vergleich zu einem Kurzfaserbeton mit gleichem Fasergehalt eine deutlich höhere Tragfähigkeit erzielt. Teures Fasermaterial kann dadurch eingespart werden. Bei der Verarbeitung als Gewebe ergibt sich eine zweidimensionale (biaxiale) Ausrichtung. Durch die Schichtung mehrerer Ebenen entstehen multiaxiale Textilien. Diese werden nicht gewebt, sondern mithilfe der Nähwirktechnik hergestellt. Diese Multiaxialgelege ermöglichen eine beliebige Ausrichtung der Rovings, um die Kräfte belastungsoptimiert einzubringen.

Eigenschaften
Textilbewehrter Beton zeigt ein ausgesprochen duktiles Verhalten. Ein Versagen solcher Bauteile kündigt sich also durch entsprechend große Verformungen an und tritt nicht plötzlich auf. Durch das Ausbleiben eines Korrisionsvorganges werden die beim Stahlbeton notwendigen dicken Betondeckschichten unnötig. Die Bauteile können also wesentlich schlanker und leichter ausgeführt werden. Die Positionierung der textilen Bewehrungsstrukturen kann an den Stellen geschehen, an denen die Belastungen (Spannungen) tatsächlich auftreten. Dadurch ist es möglich, in verschiedenen Bereichen unterschiedliche Lasten aufzunehmen. Die textilen Bewehrungen können somit auf den jeweiligen Belastungsfall ausgelegt werden. Durch die textile Bewehrung kann eine sehr gute Rissverteilung erreicht werden (viele kleine Risse anstatt weniger großer), was sich für die Dichtigkeit und Dauerhaftigkeit als sehr vorteilhaft erweist.

Anwendung
Potentielle Anwendungsfelder für Textilbeton sind sowohl die Verstärkung und Instandsetzung vorhandener Bausubstanz, als auch die Entwicklung von neuen schlanken und leichten Konstruktionen. Beispiele hierfür sind die Verstärkung von Stahl- und Spannbetonmasten, Mauerwerks- und Betonbauteilen sowie die Entwicklung, Herstellung und Anwendung von Fassaden-, Dach- und Balkonbauteilen, Lärmschutzwänden oder von Stadtmöblierungen. Auch im Behälter- und Rohrleitungsbau findet textilbewehrter Beton bereits Anwendung. Textilbeton wird als eine sinnvolle und effektive Ergänzung zum Stahl- und Spannbetonbau, nicht aber als deren Substitution gesehen. Anwendungen, bei denen hohe Lasten (Zug- und Biegezugbeanspruchungen) abzutragen sind, bleiben bis auf Weiteres dem Stahl- und Spannbeton vorbehalten.

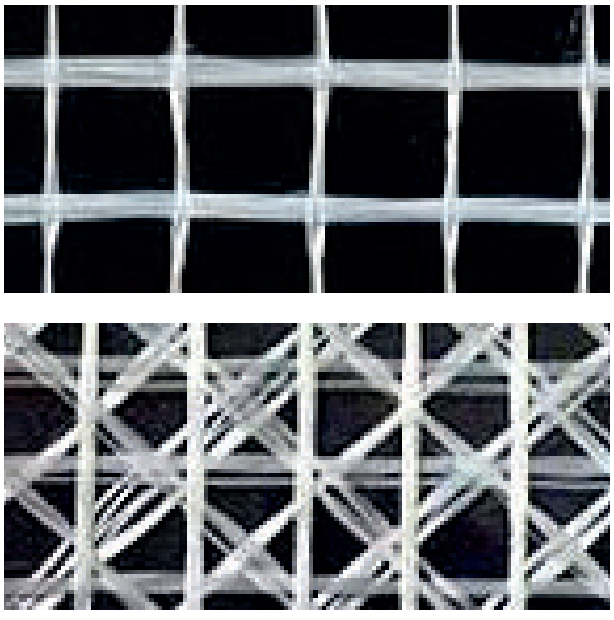


Abb. 18 Bi- und multiaxiale Textilien

Abb. 19 Oberflächengestaltung mit einer Betonmatrize

3.3.2 Vakuumisolationspaneele

Vakuumisolationspaneele (VIP) sind Wärmedämmungen, die aus einem feinkörnigen und sehr druckfesten Kernmaterialien bestehen, welche in eine Hochbarrierekunststofffolie oder in eine Edelstahlhülle eingeschweißt und evakuiert werden. Um beispielsweise den Wärmedurchlasswiderstand einer 14 cm dicken EPS-Dämmung zu erreichen, sind lediglich 2,5 cm dicke Vakuumisolationspaneele notwendig.

Geschichte

Das Prinzip, niedrige Wärmeleitfähigkeiten durch Evakuieren zu erreichen, ist von der Thermoskanne bekannt. Diese besteht aus einem doppelwandigen Glasgefäß mit einem auf 10^{-6} mbar evakuierten Zwischenraum. Die Glasoberflächen sind mit einem wärmereflektierenden Material beschichtet. Derartige Dewargefäße wurden um 1890 von dem Physiker James Dewar erfunden. Die ersten Thermoskannen stellte 1904 die deutsche Thermos GmbH her, die damit Namensgeberin wurde. Ist ein Hohlraum evakuiert, so lastet auf der Hülle der Atmosphärendruck von 1 bar (entspricht 10 t pro m²). Die Glas- oder Edelstahlhüllen in Thermoskannen oder Kryogefäßen sind aufgrund ihrer zylindrischen Form in der Lage, diese Druckkräfte aufzunehmen. In vielen anderen Anwendungen, so auch im Baubereich, werden jedoch ebene Dämmelemente gewünscht. Bei solchen flachen Elementen kann die Hülle die Druckkräfte nicht tragen, vielmehr werden diese auf das dann notwendige Füllmaterial übertragen. Solch ein Füllmaterial muss daher eine entsprechend große Druckbelastbarkeit aufweisen. Der Begriff Vakuumisolationspaneele wurde erstmals für Produkte der Firma Linde AG 1971 in Kühl- und Tiefkühlprodukten verwendet. Bei diesen Paneelen kamen erstmals nicht Glas oder Edelstahl, wie bei Thermoskannen zum Einsatz, sondern Hochbarrierefolien. Zudem konnte erstmals eine flache *„Paneelform"*, durch den Einsatz von feinkörnigen und sehr druckfesten Kernmateri-alien, erreicht werden [ZAE, 2012].

Aufbau

Vakuumisolationspaneele (VIP) bestehen aus einem porösen, druckbelastbaren, evakuierbaren Füllkern aus gepresstem Pulver, Glasfasern oder einem offenporigen Schaum, welcher in einer Vakuumkammer in eine Hochbarrierekunststofffolie oder in eine Edelstahlhülle eingeschweißt wird. Hauptanforderung an das Kernmaterial ist es, eine möglichst geringe Wärmeleitfähigkeit unter möglichst geringem Innendruck bei gleichzeitig ausreichender Druckstabilität gegenüber dem Außendruck und vollständiger Offenzelligkeit, zu ermöglichen. Diese Eigenschaften erfüllt mikroporöses Kieselsäurepulver. Das Nebenprodukt aus der Silizium-Photovoltaik-Wafer-Produktion eignet sich sehr gut als Trägermaterial, da durch die besonders kleinen Poren eine geringe Anforderung an das Vakuum gestellt wird. Bei Porenweiten kleiner als 0,5 µm liegt die Wärmeleitfähigkeit schon bei Normaldruck bei einem sehr niedrigen Wert von 0,18 bis 0,25 W/(mK). Im evakuierten Zustand erreicht das Vakuumisolationspaneel eine Wärmeleitfähigkeit von $3{,}8*10^{-3}$ W/(mK). Allerdings wird unter Einbezug von Alterungserscheinungen, z. B. durch Eindringen von Luftmolekülen und aufgrund beaufschlagter Sicherheiten (durch fehlende Langzeiterfahrungen) in den Zulassungen der Paneele ein Rechenwert von $7*10^{-3}$ W/(mK) angegeben [BBSR, 2011]. Bei den eingesetzten Folien handelt es sich um Mehrschichtsysteme, deren einzelne Schichten verschiedene Funktionen zu erfüllen haben. Die gas- und wasserdampfdichte Barriere ist in der Regel zwischen mehreren Kunststofffolien eingebettet, die zum einen Träger- und Schutzfunktion

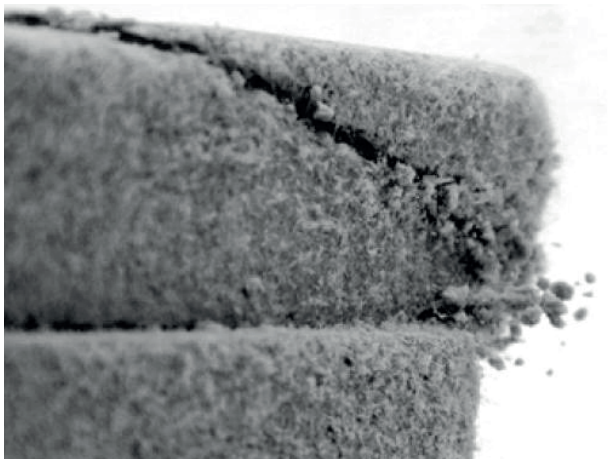


Abb. 20 Glasfaserverstärkte, gepresste, pyrogene Kieselsäure

zu übernehmen haben (Nylon, PET usw.), zum anderen als Schweißschicht (PE oder PP) dienen.

Funktionsweise
Der Wärmetransport in einem Dämmstoff besteht prinzipiell aus den Anteilen:

- Wärmeleitung über die Porenwände des porösen Feststoffes,
- Wärmestrahlung zwischen den Porenwänden,
- Konvektion und Wärmeleitung über das Gas in den Poren des Feststoffes.

Durch Verringerung jeder der Komponenten kann die Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffes reduziert werden. Die Wärmeleitung über die Porenwände kann durch den Einsatz spezieller Materialien und durch Verkleinerung des Feststoffanteils (hohe Porosität) verringert, seine Wärmestrahlung durch einen Zusatz, der Wärmestrahlung absorbiert, herabgesetzt werden. Die Konvektion und Wärmeleitung des Gases kann schließlich durch die Gasart und den Gasdruck in den Poren beeinflusst werden. Dieser Wärmetransportweg kann durch das Evakuieren weitgehend ausgeschaltet werden.

Lebensdauer
Die Lebenserwartung einer Vakuumdämmung hängt entscheidend von der Dichtigkeit der verwendeten Folienhülle ab. Gasmoleküle können durch die Folie selbst (*„Pinholes“*) und deren Schweißnähte eindringen.
Stützkörper können auch selbst Gase freisetzen, im Falle organischer Materialien auch Kohlenwasserstoffverbindungen. Untersuchungen der Firma va-Q-tec an einer Reihe von evakuierten 20 mm starken mikroporösen Kieselsäureplatten, die mit einer hochwertigen, metallisierten Hochbarrierefolie ausgerüstet waren, zeigten, dass bei Raumtemperatur der Gasdruck pro Jahr um nicht viel mehr als 1 mbar ansteigt (siehe Abb. 21). Extrapoliert man diesen Gasdruckanstieg auf die kommenden Jahre, so dürfte erst nach 50 Jahren ein Wert von 50 mbar erreicht werden. Es ist daher davon auszugehen, dass die reale Lebensdauer von 20 mm dicken Vakuumdämmplatten, anders als im Leitfaden für Nachhaltiges Bauen vom BMVBS beschrieben, über 30 Jahren liegt. Voraussetzung dafür ist eine trockene Unterbringung im Dämmsystem, denn hohe Feuchtigkeit über einen längeren Zeitraum kann die Lebensdauer der Vakuumdämmplatten stark beeinträchtigen.

Thermische Randeffekte
Für eine optimale Fügung der Elemente müssen diese untereinander gedichtet werden. Diese Fügungen erweisen sich meist als lineare Wärmebrücken, da es in diesem Bereich keine Überlappung der Vakuumdämmschichten gibt. Die Wärmebrücken müssen konsequenter als bei konventionellen Wärmedämmungen vermieden werden. Aufgrund der geringen Dämmschichtdicke und der sehr

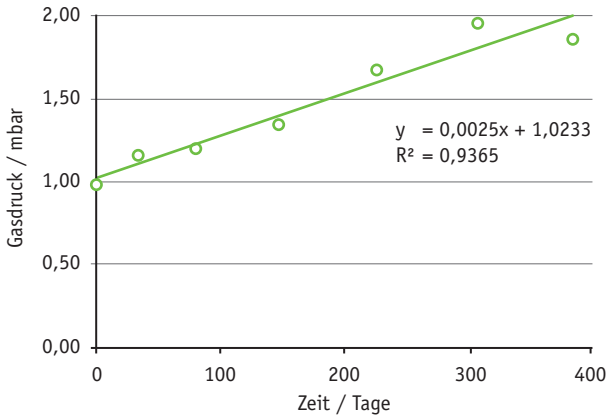


Abb. 21 Gasdruckanstieg in VIPs: bei Raumtemperatur steigt der Gasdruck um max. 1 mbar pro Jahr an

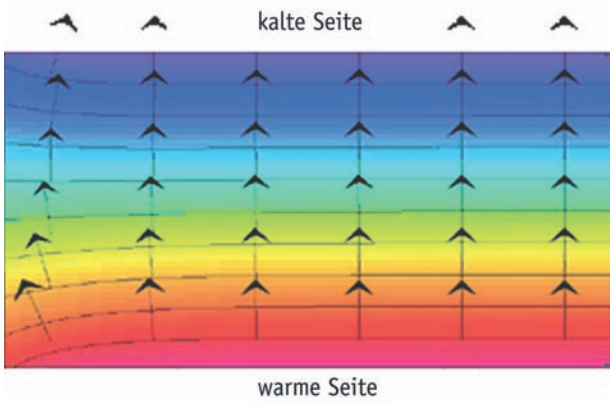


Abb. 22 Randeffekte: Querschnitt durch zwei VIPs

niedrigen Wärmeleitfähigkeit stellen neben den Fügungsstellen auch Halterungen und Durchdringungen eine verstärkte Wärmebrücke im Vergleich zu konventionellen Dämmkonstruktionen dar. Ungünstig ausgeführte Befestigungen können den Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) um ein Mehrfaches erhöhen. Daher muss jede vakuumgedämmte Konstruktion hinsichtlich des Einflusses der Wärmebrücken untersucht und optimiert werden.

Formate
Ein Hauptmerkmal aller Vakuum-Dämmsysteme ist die Unveränderlichkeit einmal gefertigter Formate. Nachträgliche Anpassungen sind nicht möglich. Dies ist bei der Planung insbesondere hinsichtlich des Umgangs mit Toleranzen von Bedeutung. Die Anforderung an die Maßhaltigkeit der Paneele sind aufgrund der verschärften Wärmebrückenproblematik besonders hoch. Aus wirtschaftlichen Gründen ist die Herstellung auf wenige Standardformate beschränkt.
Von VIP-Herstellern wird häufig nur der Wärmedurchgangskoeffizent im Paneelzentrum angegeben. Der effektive Wärmedurchgangskoeffizient ist jedoch abhängig von der Paneelgröße und der Einbauweise der VIPs. Der Wärmetransport über den Rand erhöht also den Gesamtwärmestrom durch das Paneel unter Umständen erheblich. Das bedeutet, große Paneele mit günstigen Rand-Flächen-Verhältnissen weisen im Gegensatz zu kleinen Paneelen günstigere Gesamtwärmedurchlasskoeffizienten auf.

Unter Beachtung folgender Kriterien können die Randeffekte auf ein Minimum beschränkt werden:
- Auswahl möglichst quadratischer und großer Paneele (mind. 50 cm x 50 cm)
- Doppellagiges Verlegen der Paneele mit einer Mindestüberlappung von 5 cm

Folgende Formate sind möglich:
- Flächenform: rechteckig, aber auch schräge Schnitte möglich
- Größen: beliebig; typischerweise 1 m x 0,5 m
- Dicken: 5 bis 80 mm

Anwendung
Bei bestimmten Anwendungen mit geringeren Anforderungen an die Lebensdauer werden Vakuumisolationspaneele bereits heute kommerziell eingesetzt, z. B. in Wärmedämmboxen, Kühltransportern und Kühlgeräten.
Auch im Baubereich ergeben sich zahlreiche Einsatzfelder für die Vakuumdämmung: Aufgrund der etwa fünfmal geringeren Dämmstärke sind VIPs immer dann vorteilhaft einzusetzen, wenn kein Platz für konventionelle Dämmung vorhanden ist oder der Flächenverbrauch kostspielig ist. Bei Altbauten ist es oft nicht möglich, konventionelle Dämmstoffe in der erforderlichen Dicke aufzubringen, z. B. bei Grenzbebauung. Weitere Anwendungsbereiche sind Dämmungen unter Fußbodenheizungen, Boden- und Deckendämmungen, Haustüren in Passivhausstandard, Brüstungselemente, Fenster und Rollladenkästen, Haustechnikkanäle oder Rohrleitungen.
Mit einem derzeitigen Preis von 55 €/m² für ein 2,5 cm dickes Vakuumisolationspaneel sind die Materialkosten jedoch viermal höher als bei Polystyroldämmplatten gleicher Dämmleistung.

Diffusion
Bei VIPs handelt es sich um dampfdichte Dämmsysteme, was bei der Planung der Schichtenreihenfolge und Schichtdicken eines Bauteils oder -systems beachtet werden muss. Vor allem den Plattenfugen muss große Beachtung beigemessen werden. Meist werden die Fugen und Ränder mit Aluminiumklebeband gedichtet, um eine durchgängige Dampfdichtigkeit zu erreichen.

Beschädigung
Vakuumisolationspaneele müssen gut vor mechanischen Beschädigungen geschützt werden. Dies gilt sowohl für funktionsbedingte (bspw. Bodenbelastung) und ungewollte Belastungen (bspw. Dilatationen) sowie für nachträgliche Manipulationen (bspw. Bildernägel). Achtzugeben ist auf die Anschlussdetails, da vorstehende Bauteile, wie Winkeleisen für Fensterbefestigung, Führungsschienen, Zargen etc. die VIPs beschädigen können.

Revision
Obwohl die bisher vorliegenden Untersuchungen und Erfahrungen darauf hindeuten, dass der Unterdruck in VIPs heutiger Technologie bei fachgerechter Handhabung über die erwarteten drei Jahrzehnte ihrer Funktionsdauer erhalten bleibt, sollte das Versagen einzelner Platten oder ganzer Flächen als Risiko in die Planung und Ausführung einbezogen werden. Wünschenswert wäre eine Strategie, die darauf abzielt, die Paneele kontrollieren und im Versagensfall ersetzen zu können.

3.3.3 Glasfaserverstärkter Kunststoff

Glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK) sind Verbundwerkstoffe aus Glasfasern und Kunststoff (z. B. Epoxidharz, Polyesterharz, Polyamid). Die Glasfasern werden lose oder als Gewebe mit dem Harz getränkt und gehärtet. GFK kann mehrlagig Schicht für Schicht aufgebaut werden. Der Herstellungsvorgang kann per Hand (Handlaminieren) oder maschinell (z. B. Injektionsverfahren oder Pultrusion) erfolgen.

Die Eigenschaften der GFK sind abhängig vom verwendetem Harz sowie vom Trägermaterial, dem Glasgewebe. Die hervorragenden elektrischen und dielektrischen Eigenschaften sowie eine hohe Flammwidrigkeit ermöglichen ein breites Anwendungsspektrum. GFK kann auf Grund seiner Festigkeiten höchsten mechanischen Anforderungen genügen [Material Archiv, 2012].

3.3.4 Latente Wärmespeicher - PCM

Bei der latenten Wärmespeicherung wird deren Änderung des Aggregatzustands (fest zu flüssig oder flüssig zu gasförmig) in Baustoffen genutzt, um Wärmeenergie aus der Umgebung aufzunehmen. Einer sommerlichen Überhitzung von Innenräumen kann damit im Zusammenspiel mit nächtlicher Wärmeabfuhr entgegengewirkt werden. Die so erzeugte innere Speicherfähigkeit steht nur im Phasenübergang zur Verfügung. Auf Grund ihrer Funktionsweise werden latente Wärmespeicher als Phasenwechselmaterialien (Phase-Change-Material, kurz PCM) bezeichnet. Typische Materialien sind Salzhydrate oder Paraffine. Da der Vorgang reversibel ist, wird beim Übergang vom flüssigen Aggregatzustand zum festen bzw. vom gasförmigen zum flüssigen Energie in Form von Wärme abgegeben. Eingesetzt werden latente Wärmespeicher z. B. in Wand- oder Deckenelemente in Innenräumen. Dabei werden sie meist als mikroverkapselter Zuschlag in andere Baustoffe gegeben, wie z. B. Gips oder Holzfaserplatten. Es kann aber auch als eigenständiger Werkstoff verwendet werden [Hegger, 2008, S. 124, 158].

Abb. 23 Profile aus Glasfaserverstärktem Kunststoff

Abb. 24 BASF Paraffine

3.3.5 Bauphysik

Gebäudehüllen müssen verschiedene bauphysikalische Anforderungen erfüllen. Ihre Hauptaufgaben können mit den Eigenschaften Dämmen, Sperren, Speichern, passiv Gewinnen, Tragen und Schützen beschrieben werden. *„Dämmen"* definiert dabei den sommerlichen und winterlichen Wärmeschutz sowie den Schallschutz. Die Vermeidung von Feuchteanfall durch Tauwasser oder Schlagregen und die Reduzierung der luftwechselbedingten Energieverluste durch Wind oder Thermik kann als *„Sperren"* bezeichnet werden. *„Speichern"* beschreibt die Fähigkeit von Materialien, Feuchte oder Temperatur abzupuffern. *„Passiv Gewinnen"* charakterisiert die Eigenschaft der Bauelemente, Energieeinträge über opake oder transparente Flächen der Gebäudehülle zu erzeugen. *„Tragen"* beschreibt die Eigenschaften einer Fassade, Winddruck- und Windsoglasten sowie Eigen- und ggf. auch Nutzlasten aufzunehmen und abzutragen. *„Schützen"* sollte eine Fassade z. B. im Brandfall. In der vorliegenden Arbeit wurde mitteleuropäisches Klima zugrunde gelegt. Alle Simulationen wurden mit der Station *„Essen"* durchgeführt.

3.3.5.1 Energiehaushalt Mensch und Gebäude

Das Umfeld des Menschen kann, wie Abb. 25 zeigt, in vier Behaglichkeitskriterien eingeteilt werden:

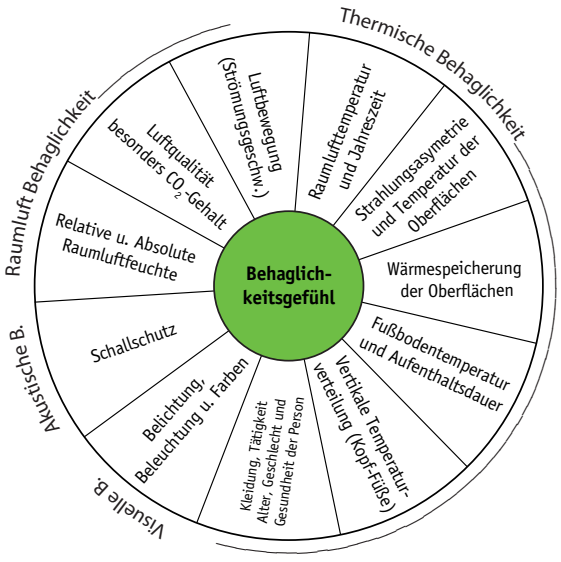


Abb. 25 Einflussgrößen auf die Behaglichkeit

- Thermische Behaglichkeit,
- Raumluftbehaglichkeit,
- Akustische Behaglichkeit,
- Visuelle Behaglichkeit

Die wichtigsten Kriterien sind die Thermische- und die Raumluftbehaglichkeit. Diese werden in diesem Kapitel kurz behandelt, damit ein Grundverständnis für den Wärmehaushalt des Gebäudes vorausgesetzt werden kann, um dann wiederum die Vakuumdämmung näher zu beleuchten. Die thermische Behaglichkeit beschreibt einen Zustand, in dem sich die im Körper produzierte Wärme im Gleichgewicht mit der Wärmeabgabe über die Körperoberfläche befindet. Dafür verantwortlich ist der Bekleidungsgrad (clo) und die Umgebung (Wandoberflächentemperaturen, Raumlufttemperatur, Strahlungsasymmetrie etc.). Der Körper kann in diesem Zusammenhang als gebäudeähnliches System angesehen werden. Die verlorene Wärme über den Kopf 30 %, die Hände 20 %, die Fußsohlen 35 % und den Rumpf 15 % muss durch Wärmeproduktion im Körper ausgeglichen werden. Gleiches vollzieht sich im Gebäude. Im Winter muss die über die Außenflächen verlorene Wärme (Wärmesenke durch Transmission) und die Lüftungswärmeverluste (Wärmesenke über Ventilation und Infiltration) über interne und solare Wärmegewinne sowie über zusätzliche Heizwärme (Wärmequellen) ausgeglichen werden.

3.3.5.2 Thermische und Raumluftbehaglichkeit

(nach DIN EN ISO 7730)

Das menschliche Wärmeempfinden wird beeinflusst durch die Art der Tätigkeit, die Art der Bekleidung, seinem Alter, seinem Geschlecht, der Gesundheit der Aufenthaltsdauer im Raum, der Jahreszeit aber hauptsächlich durch das Raumklima. Zum Raumklima gehört die *„Operative Raumtemperatur"*. Sie beschreibt die Mitteltemperatur zwischen Raumtemperatur und Oberflächentemperatur. Im Winter sollte sie sich im Bereich von 20 bis 24 °C bewegen. Im Sommer dagegen im Bereich von 22,5 bis 25,5 °C. Ebenfalls dazu gehört die *„Vertikale Temperaturverteilung"*. Sie drückt den Temperaturunterschied zwischen Fuß- und Kopfbereich aus.

Dieser sollte max. 3 K betragen. Die *„Strahlungsasymmetrie“* definiert den Temperaturunterschied zwischen gegenüberliegenden Wandflächen. Dabei sollte eine *„warme Decke“* nicht wärmer als 5 K im Vergleich zum Fußboden sein. Eine *„kalte Decke“* kann dagegen bis 14 K kälter als der Fußboden sein. Eine *„warme Wand“* kann 23 K über der Temperatur der gegenüberliegenden Wandfläche liegen aber eine *„kalte Wand“* dagegen nur 10 K unter dieser Temperatur. Die *„Fußbodentemperatur“* sollte im Bereich von 19 °C bis 29 °C liegen und schließlich spielt auch die *„Wärmespeicherfähigkeit“* der Baukonstruktion eine wichtige Rolle, um ein stark wechselndes Raumklima zu vermeiden. Die *„Luftgeschwindigkeit“* der einströmenden Luft sollte 0,19 m/s im Sommer und 0,16 m/s im Winter nicht überschreiten. Kritische Bereiche liegen dabei an Glasflächen oder Durchgängen. Die *„relative Raumluftfeuchte“* sollte im Bereich von 35 % bis 65 % liegen. Die *„absolute Raumluftfeuchte“* muss sich im Bereich von 6,5 g/kg bis 11,5 g/kg trockener Luft bewegen. Der *„max. CO_2-Gehalt“* sollte nach Pettenkofer 1000 ppm (0,1 Vol.%) oder nach DIN 1946-2 0,15 Vol% für Büroräume nicht überschreiten. Um dies zu erreichen ist die Frischluftzufuhr von 20 m³/h je Person notwendig. Werden diese Grenzwerte überschritten stuft eine Vielzahl von Bewohnern das Raumklima als unbehaglich ein [Hausladen, 2005].

3.3.5.3 Wärmetransportmechanismen

Wärmestrom

Ein Wärmestrom setzt eine Temperaturdifferenz voraus. Bezieht man die im System vorhandene Wärmemenge auf den Zeitintervall, so gelangt man zur zeitbezogenen Größe des Wärmestroms [Huhn, 2007].

$$\dot{Q} = \frac{dQ}{d\tau} \quad \text{mit} \quad \left[\dot{Q}\right] = 1\,\frac{J}{s} = 1\,W$$

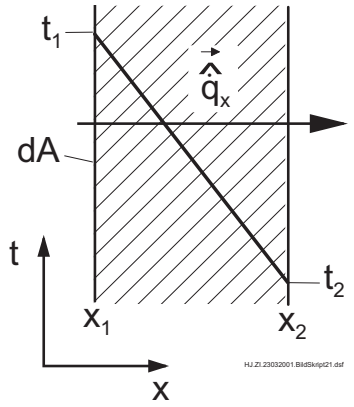
Wärmestromdichte

Ein auf die Fläche bezogener Wärmestrom wird als Wärmestromdichte bezeichnet. Die Wärmestromlinien bezeichnet man als Adiabaten. Diese stehen senkrecht zu den Isothermen (Linien gleicher Temperatur) [Huhn, 2007].

$$\hat{q} = \frac{d\dot{Q}}{dA} \quad \text{mit} \quad \left[\hat{q}\right] = 1\,\frac{W}{m^2}.$$

Wärmestromdichte durch eine ebene Wand

Vorausgesetzt wird eine ebene, homogene und isotrop aufgebaute Wand. Infolge eines Temperaturunterschiedes beider Wandflächen t_2-t_1 wird durch die Wand der Wärmestrom Q fließen. Der auf die Wandfläche bezogene Wärmestrom q (in x-Richtung) ist proportional zur Temperaturdifferenz t_2-t_1 und umgekehrt proportional zur Wandstärke x_2-x_1. Da Wärme nur von der höheren zur niedrigeren Temperatur fließt, wird ein negatives Vorzeichen eingefügt. Der Wärmeleitkoeffizient (λ) beschreibt die Eigenschaft eines Körpers Wärme zu transportieren. Diese Formel geht auf das von FOURIER im Jahr 1822 formulierte FOURIERsches Erfahrungsgesetz zurück [Huhn, 2007].



$$\vec{\hat{q}}_x = -\lambda \frac{t_2 - t_1}{x_2 - x_1}\vec{e}_x \qquad [\hat{q}] = 1\ \frac{W}{m^2}\ .$$

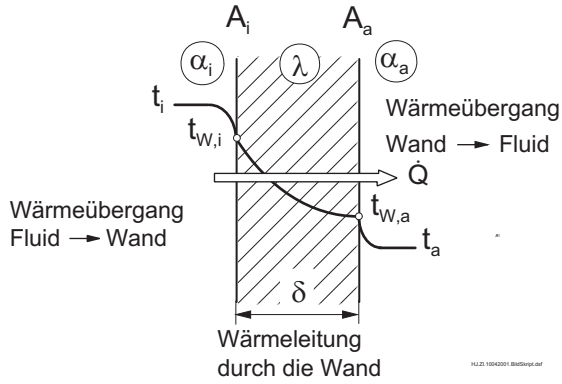
Wärmeleitkoeffizient (Wärmeleitfähigkeit)

Der Wärmeleitkoeffizient (λ) beschreibt das Vermögen eines Stoffes Wärme zu transportieren und wurde als empirischer Transportkoeffizient eingeführt. Er ist von der Temperatur und vom Druck abhängig. Bei Gasen nimmt der Koeffizient bei steigender Temperatur und Druck zu. In Flüssigkeiten und Metallen kann er mit wachsender Tempe-

ratur sowohl zu als auch abnehmen [Huhn, 2007]. Man unterscheidet zwischen:

- gute Wärmeleiter: 10 - 400 W/(mK)
- schlechte Wärmeleiter: 0,1 - 10 W/(mK)
- Wärmedämmstoffe: < 0,1 W/(mK)

Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert)
Der Wärmedurchgang beschreibt den Wärmeübergang von Fluid (hier Raumluft innen) zur Wand, den Wärmedurchlass der Wand selbst und den Wärmeübergang von der Wand zum Fluid (Außenluft) [Huhn, 2007].



Wärmedurchgangswiderstand
Widerstände können beliebig hintereinander geschalten werden (es können verschiedene Wandschichten zusammengerechnet werden) [Huhn, 2007].

$$R_k = R_{\alpha,i} + \sum_{n=1}^{N} R_{\lambda,n} + R_{\alpha,a}$$

3.3.5.4 Feuchteschutz

Zustände feuchter Luft im h_x-Diagramm:
Der Grundstein für das h_x-Diagramm von Richard Mollier wurde 1904 im Rahmen der Veröffentlichungen *„Neue Diagramme für technische Wärmelehre“* gelegt. Das h_x-Diagramm ermöglicht das Ablesen von Zustandsgrößen und -änderungen feuchter Luft. Auf der x-Achse kann der Absolute Luftfeuchtegehalt in [g/kg] und der Wasserdampfdruck in [mbar] abgelesen werden. Die y-Koordinate zeigt die Lufttemperatur in [°C]. Auf der 45°-Linie ist die Enthalpie in [kJ/kg] aufgetragen. Die Enthalpie bezeichnet den Energieinhalt von 1 kg feuchter Luft. Die zehn Hauptkurven im Diagramm zeigen die Linien mit gleicher relativer Luftfeuchte [-]. Die Kurve 1,0 stellt den Luftzustand mit 100 % rel. Luftfeuchte dar. Man spricht hierbei von der Sättigungslinie. Diese Linie trennt den ungesättigten Bereich (oberhalb der Kurve) und dem übersättigten Bereich (unterhalb der Kurve).

Beispiel (siehe Abb. 26):
Mittels zweier Zustände der feuchten Luft ist es möglich alle weiteren Zustände abzulesen. Werden beispielsweise 20 °C Lufttemperatur und 50 % rel. Luftfeuchte gemessen, so lassen sich alle weiteren Zustände ablesen.
Zum Ablesen folgt man der 20 °C-Isotherme (Linie gleicher Temperatur) nach rechts bis man auf die Kurve der rel. Luftfeuchtigkeit von 50 % stößt. Folgt man diesem Punkt nach links, so kann man die Taupunkttemperatur von 9,2 °C abgelesen werden. Geht man mit der vertikalen Linie weiter nach unten, so kann man die absolute Feuchte von 7,3 g/kg trockener Luft, sowie den Wasserdampfdruck von 11,7 mbar (1170 Pa) ablesen. Der Wasserdampfdruck liegt dabei oberhalb des atmosphärischen Luftdrucks von 101300 Pa (1013 mbar). Um den Sättigungsdampfdruck abzulesen, muss man der 20 °C-Isotherme bis zur Sättigungslinie folgen. Dabei kann jetzt der Wasserdampfsättigungsdruck von 2340 Pa abgelesen werden. Dieser Wert steht auch in der DIN 4108-3 in Tabelle A.2 und wird für die Berechnung der Bauteilfeuchte nach Glaser verwendet. Zum Ablesen der Enthalpie der feuchten Luft muss man vom Ausgangspunkt (Kreis) den 45° Linien folgen. Im Beispiel kann eine Enthalpie von 38,5 kJ/kg abgelesen werden. Ein weiterer Wert ist die sogenannte Feuchtkugeltemperatur, diese ergibt sich am Schnittpunkt von Enphalpielinie und Sättigungskurve. Im Beispiel können 13,8 °C abgelesen werden. Diese Temperatur gibt die max. durch Befeuchtung erreichbare Temperatur an [Hausladen, 2005].
Auf Meeresspiegelhöhe hat die feuchte Luft bei 20 °C ein Gewicht von 1,2041 kg/m³.

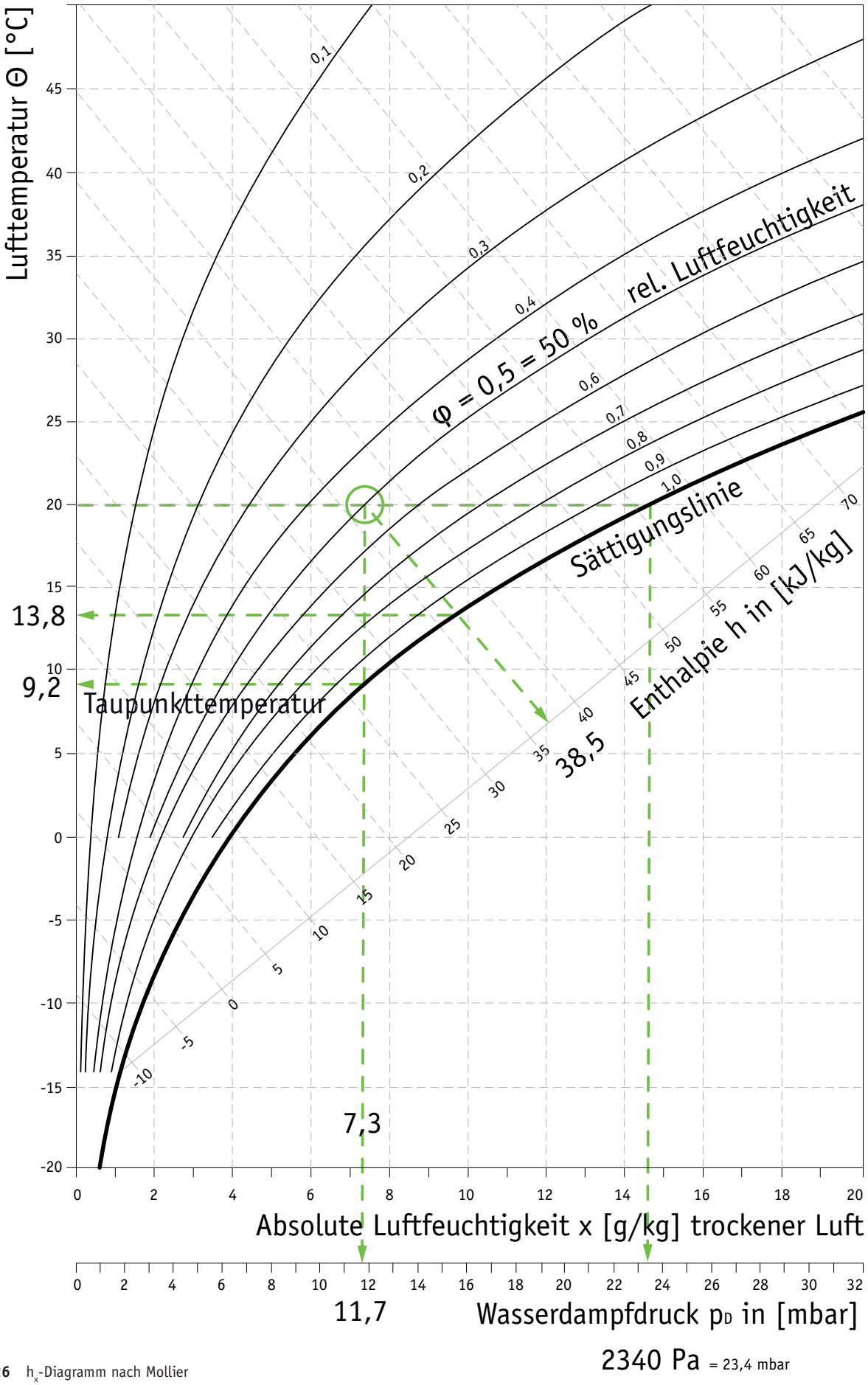


Abb. 26 h_x-Diagramm nach Mollier

3.4 Ökologische Betrachtung

Ökologie ist allgemein die Wissenschaft, die sich mit der Wechselbeziehung zwischen Organismen und ihrer Umwelt beschäftigt. Im Bauwesen stellt die Ökologie eine Wirkungsabschätzung dar, die Gebäude, Bauelemente und Materialien hinsichtlich ihrer Auswirkung auf die Umwelt hin untersucht: Wie beeinflussen z. B. Baumaterialienwahl, Dämmstandard oder Flächenversiegelungsanteil die natürliche und gebaute Umgebung?

Die Vorgehensweise, ein Gebäude auch unter umweltökologischen Gesichtspunkten zu betrachten, wird jedoch erst seit einigen Jahrzehnten praktiziert. Ökologie und Energieeffizienz bekamen erst mit der Einführung der ersten Wärmeschutzverordnung 1977 einen relevanten Stellenwert im Bauwesen. Bis dahin gab es keinerlei Bestimmungen, die die energetischen Belange regelten. Jedoch ist es auch bis heute so, dass die gesetzlichen Festlegungen nur den Primärenergiebedarf während der Nutzungsphase eines Gebäudes regulieren, d. h. die Energiemenge, die Heizung, Kühlung, Warmwasser, Lüftung und Beleuchtung benötigt wird.

Die durch Herstellung, Erneuerung und Rückbau bzw. Entsorgung eines Materials gebundene Energiemenge, die sog. *„Graue Energie“*, hat bisher kaum Beachtung gefunden. Ohne die Betrachtung des gesamten Lebenszyklusses eines Materials, Bauteils oder Gebäudes können die jeweiligen tatsächlichen Umweltauswirkungen nicht vollständig energetisch evaluiert werden.
Durch die sich in den letzten Jahren ständig verschärften Energieeinsparverordnungen besteht ein zunehmender Einsatz energetisch verbesserter Gebäudehüllen und Gebäudetechnik und damit auch ein steigender Anteil an gebundener Energie in den Gebäuden. Um ökologisch sinnvoll und verträglich zu arbeiten, bedarf es zukünftig neben einem energieeffizienten Einsatz von Materialien auch die vollständige Betrachtung des Lebenszyklusses eines Gebäudes oder Baustoffes, aus dem die Ökobilanzierung erstellt werden kann. Mit dieser lässt sich detailliert abschätzen, welche Auswirkungen das Produkt auf die Umwelt haben wird, z. B. unter den Gesichtspunkten *„Treibhauspotential“*, *„Versauerungspotential“* und *„Primärenergiebedarf“*.

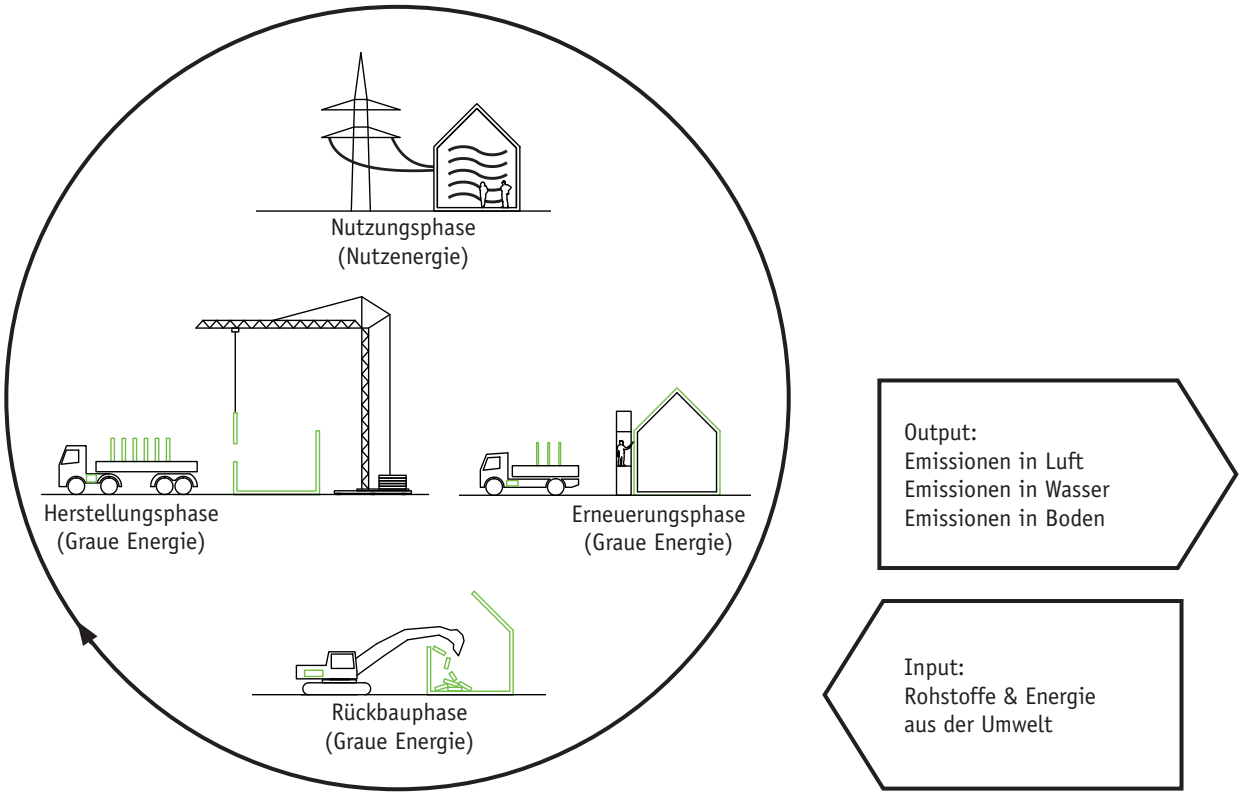


Abb. 27 Lebenszyklusphasen

3.4.1 Ökobilanzierung

Die Ökobilanzierung oder Life Cycle Assessment (LCA) betrachtet den gesamten Lebenszyklus eines Bauproduktes *„von der Wiege bis zur Bahre“*. Hier werden alle Prozesse/Phasen des Lebenszyklus eines Bauteils oder Gebäudes betrachtet, d. h.:

- Herstellung (Rohstoffgewinnung, Aufbereitung, Produktherstellung, Transport und Montage)
- Nutzung (Nutzung und Unterhaltung)
- Erneuerung (Teilerneuerung, Gesamterneuerung, Umbau)
- Rückbau- und Entsorgung (Recycling, energetische Verwertung, Deponie)

In der Ökobilanz werden der Ressourcenverbrauch, alle Umweltwirkungen wie Emissionen in Luft, Wasser und Boden sowie die Flächeninanspruchnahme erfasst und ausgegeben (siehe Abb. 27). Ökobilanzen ermöglichen es dem Planer oder Nutzer, Umweltaspekte in die Entscheidung für oder gegen ein Bauprodukt einfließen zu lassen. Die Berechnungsgrundlage bildet nach Ökobau.dat ein 50-jähriger Lebenszyklus. Unabhängig davon, ob eine Konstruktion zu diesem Zeitpunkt noch mehrere Jahrzehnte Lebensdauer besitzt, muss sie nach 50 Jahren rechnerisch verwertet (verbrannt, deponiert und/oder recycelt) werden. Die Lebensdauer eines Bauteils muss bei einer Bilanzierung nach Ökobau.dat dem *„Leitfaden für nachhaltiges Bauen“* entnommen werden. Eine Ökobilanzierung gliedert sich nach DIN ISO EN 14040/44 in vier Stufen (siehe Abb. 28):

- Festlegung des Ziels/Untersuchungsrahmens
- Erstellung einer Sachbilanz
- Wirkungsabschätzung und
- Auswertung.

3.4.2 Untersuchungsrahmen

Im Sinne der Ökobilanzierung wird eine Lebenszyklusanalyse durchgeführt, die die Phasen *„Herstellung“*, *„Nutzung“*, *„Erneuerung“* und *„Rückbau“* umfasst.

3.4.3 Sachbilanz

Die Sachbilanz umfasst die Zusammenstellung und Bezifferung von Inputs (Zuführung von Produkt-, Stoff- oder Energieflüssen zu einem Prozess) und Outputs (Abgabe von Produkt-, Stoff- oder Energieflüssen aus einem Prozess) eines Bauteils oder Gebäudes in Bezug auf seinen Lebenszyklus. Dabei werden keine direkten Umweltwirkungen dargestellt.

Primärenergiebedarf

Der Primärenergiebedarf beschreibt die benötigte Energiemenge eines Gebäudes oder Bauteils in allen Phasen seines Lebens. Dabei wird in der Sachbilanz zwischen nicht erneuerbaren energetischen Ressourcen wie Erdöl, Kohle, etc. und den erneuerbaren Ressourcen wie Wasser- und Windkraft unterschieden [König, 2009, S. 42 ff.].

3.4.4 Wirkungsabschätzung

Die Wirkungsabschätzung ist der Teil der Ökobilanz, in dem die Ergebnisse aus der Sachbilanz auf ihre potenziellen Umweltwirkungen hin beurteilt werden. Dabei werden die Sachbilanzdaten mit spezifischen Umweltproblemfeldern (Wirkungskategorien) verknüpft. Es wird versucht, die hieraus resultierenden potenziellen Wirkungen zu erkennen. Die Wirkungsabschätzung erfolgt meist in den folgenden fünf Umweltproblemfeldern:

- Treibhauspotential
- Versauerungspotential
- Ozonabbaupotential
- Eutrophierungspotential
- Sommersmogpotential

In den einzelnen Problemfeldern werden die sog. Wirkungsindikatoren für ein Bauteil oder Gebäude ermittelt. Diese beschreiben die Umweltwirkung bezogen auf eine Referenzsubstanz, z. B. CO_2-Äquivalent beim Treibhauspotential. Im Forschungsprojekt wurden die Umweltproblemfelder für das vaku^tex-Fassadenelement bestimmt, gewichtet und mit anderen Konstruktionen verglichen.

Treibhauspotential (GWP)
Der Prozess des natürlichen Treibhauseffektes stellt die Grundvoraussetzung für die durchschnittliche Erdoberflächentemperatur dar. Zusätzlich zum natürlichen Treibhauseffekt kommt es durch Aktivitäten des Menschen noch zu einer Verstärkung des Treibhauseffekts. Zu den anthropogen freigesetzten Treibhausgasen zählen z. B. Kohlendioxid, Methan und FCKW. Das Treibhauspotential oder Global Warming Potential (GWP) beschreibt, welche Menge eines Treibhausgases in einer bestimmten Zeit (meist 100 Jahre) zur Erderwärmung beiträgt. Als Vergleichsgröße dient dabei Kohlendioxid. Die Emissionen werden nach ihrem potenziellen Treibhauseffekts mit CO_2 ins Verhältnis gesetzt und das sich ergebende Treibhauspotential als Kohlendioxid-Äquivalent (CO_2-Äq.) angegeben. Relevante Einflussgrößen zur Bestimmung des GWP-Faktors eines Treibhausgases sind dessen Absorptionsverhalten und Verweildauer in der Atmosphäre [König, 2009, S. 42 ff.].

Versauerungspotential (AP)
Die Versauerung von Böden und Gewässern geschieht durch die Umwandlung von Luftschadstoffen in Säure. Anthropogene Emissionen von Schwefeldioxid und Stickoxiden reagieren mit der Luft zu Schwefel- und Salpetersäure (Saurer Regen), welche zu Schädigungen in Böden und Gewässern sowie bei Gebäuden und Lebewesen führt. Das Versauerungspotential oder Acidification Potential (AP) bewertet, wieviel eine Emission zur Versauerung beträgt. Das Maß des Umweltindikators wird als Schwefeldioxid-Äquivalent (SO_2-Äq.) angegeben [König, 2009, S. 42 ff.].

Ozonabbaupotential (ODP)
Ozon entsteht in der Stratosphäre (15-50 km Höhe) durch die Bestrahlung von Sauerstoffmolekülen mit kurzwelligem UV-Licht. Dies führt zur Bildung der Ozonschicht, welche für das Leben auf der Erde von wichtiger Bedeutung ist. Das Ozon absorbiert kurzwellige UV-Strahlung und gibt diese mit einer größeren Wellenlänge richtungsunabhängig wieder ab. Dabei gelangt nur ein Teil der UV-Strahlung auf die Erde. Anthropogene Emissionen wie Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) und Stickoxide (NO_x) führen zum Abbau der Ozonschicht. Ein direkter Effekt des Abbaus sind Erderwärmung, Wachstumsveränderungen oder Tumorbildungen bei Menschen, Tieren und Pflanzen, die empfindlich auf UV-Strahlen reagieren.
Das Ozonabbaupotential oder Ozon Deplention Potential (ODP) ist ein Maß für den relativen Abbau der Ozonschicht. Es wird als R11-Äquivalent (FCKW-11) angegeben [König, 2009, S. 42 ff.].

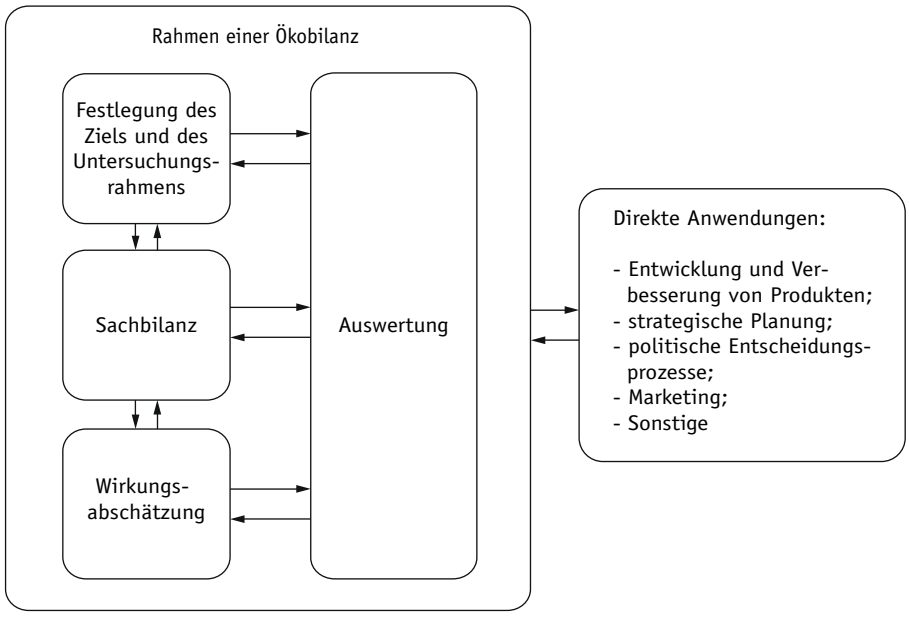


Abb. 28 Unterteilung und Wirkung einer Ökobilanzierung

3.5 Ökonomische Betrachtung

Die deutsche Bauwirtschaft wird in den nächsten Jahren vor enorme Herausforderungen gestellt: Nur geringe Zuwächse im Bauvolumen, eine Verschärfung des Wettbewerbs, die Verteuerung der Rohstoffe und eine zunehmende Konkurrenz durch Mitbewerber aus dem europäischen Ausland sind zu beobachten [Schober, 2011]. Daher ist es notwendig, den Innovationsvorsprung der deutschen Wirtschaft durch neue Ideen und Produkte voranzutreiben.
Die weltweit zunehmende Urbanisierung, die Verdichtung der Stadträume und ein steigender Bedarf an energieeffizienten Gebäudehüllen stellen auch weltweit ein großes Marktpotential dar.

3.5.1 Begriffe

Bauinvestition
Investitionen in bauliche Anlagen für Neubauten, Umbauten oder Erweiterungsbauten und für werterhöhende Reparaturen in einem definierten Zeitraum werden als Bauinvestitionen definiert. Sie sind eine entscheidende Größe zur Beurteilung der Bauwirtschaft [BBSR, 2009].

Bauvolumen
Das Bauvolumen ist definiert als die Summe aller Leistungen, die auf die Herstellung und Erhaltung von Bauwerken gerichtet sind. Es umfasst neben den Bauinvestitionen auch Reparaturen und Instandsetzungen. Es setzt sich aus den drei Bereichen Wohnungsbau, Wirtschaftsbau (gewerblicher Hoch- und Tiefbau) und Öffentlicher Bau (öffentl. Hochbau, Straßenbau, sonstiger Tiefbau) zusammen [DIW, 2010, S. 7 ff.].

3.5.2 Bauwirtschaftliche Rahmenbedingungen

Seit 1995 ist zu beobachten, dass sich die Entwicklung der Bauwirtschaft signifikant vom Wachstum des Bruttoinlandsprodukts (BIP) abgekoppelt hat. Eine erneute Synchronisation des Rhythmus zeichnet sich, wenn auch auf einem wesentlich niedrigerem Niveau, langsam ab [Schober, 2011]. Des Weiteren kam es in den letzten Jahren zu großen Verschiebungen in der Struktur der Bauinvestition und der Verteilung des Bauvolumens. Die Entwicklung zeigte im Wohnungsbau einen Trend weg vom Neubau hin zum Bestandsbau und der Sanierung. Im Jahr 2011 hat sich der Rückgang jedoch abgeschwächt und es zeichnet sich eine Erholung ab, die als stabil anzusehen ist.
Die verfügbaren Mittel im Jahr 2010 für den Wohnungsbau beliefen sich auf 156,33 Mrd. €. Diese teilten sich zu 78,1 % (122,19 Mrd. €) in Bestandsbaumittel und mit 21,9 % (34,14 Mrd. €) in Neubaumittel auf [Schober, 2011]. Beginnend mit dem Jahr 2012 wurden Fördermaßnahmen für energieeffizientes Bauen durch Zuschüsse aus dem Energie- und Klimafonds (EKFG) gespeist. Dieser Fond generiert seine Mittel vollumfänglich aus den Versteigerungserlösen der CO_2-Zertifikate, die an der Energiebörse EEX in Leipzig gehandelt werden. Das Finanzvolumen dieses Fonds soll mit der stetigen Verknappung der Menge der Emissionsrechte zukünftig steigen. Ab 2013 hat die Bundesregierung ein Volumen von ca. drei Milliarden Euro aus dieser Quelle eingeplant.

3.5.3 Der Emissionshandel und seine Funktionsweise

Seit 2005 bestehen durch das Kyoto-Protokoll und das dazu in Kraft getretene Abkommen verbindliche Ziel- und Grenzwerte für die Emission von Treibhausgasen. Konkret haben sich die Vertragsparteien verpflichtet, die Gesamtemissionen der Treibhausgase bis 2012 um 5 % gegenüber 1990 zu senken, wobei sich die EU zur Senkung um 8 % bereit erklärt hat [Oberthür, 2000, S. 78 ff.]. Diesen Zielsetzungen sind derzeit 193 Nationen nachgekommen. Die Europäische Union hat durch die Einführung des European Union Emission Trading System (EU ETS) ein ambitioniertes System vorgelegt, wie Emissionen durch den Markt ein reeller Wert zugeordnet werden kann, ohne andere interventionistische Maßnahmen und Instrumente (Steuern/Zölle) einführen zu müssen [UniCredit, 2012]. Der Emissionshandel räumt Emittenten die Flexibilität ein, ihre Reduktionsverpflichtungen entweder aus eigener Kraft zu erreichen oder diese durch den Zukauf von Emissionszertifikaten zu erfüllen. Gemäß der ökonomischen Theorie soll der

Handel mit Emissionsberechtigungen sicherstellen, dass die Reduktionsleistung dort erbracht wird, wo die Vermeidung von einer Tonne an Schadstoffemissionen am kostengünstigsten erreicht werden kann. Damit soll das Instrument unter Ausnutzung des Marktmechanismus die volkswirtschaftlichen Gesamtkosten aller Vermeidungsmaßnahmen minimieren [Schüle 2008].

3.5.4 Methodik der Investitionsrechnung

Um eine Betrachtung der Wirtschaftlichkeit für ein Bauelement vorzunehmen, wird das Werkzeug der Investitionsrechnung herangezogen. Im Allgemeinen sind die Verfahren zur Beurteilung der Vorteilhaftigkeit von Investitionsentscheidungen untergliedert in statische und dynamische Verfahren. Diese Gliederung stellt auf den Aspekt ab, dass der Zahlungszeitpunkt berücksichtigt wird.

Statisches Verfahren der Investitionsrechnung
Dieses ist aufgrund seiner Einfachheit und Kostengünstigkeit in manchen Unternehmen noch im Einsatz. Es lassen sich dabei vier Verfahren unterscheiden [Rolfes, 2003, S. 9 ff.]:

- Kostenvergleichsrechnung
- Gewinnvergleichsrechnung
- Rentabilitätsvergleichsrechnung
- Amortisationsrechnung

Die Verfahren werden als statisch bezeichnet, weil sie die Bestimmungsgrößen wie Kosten oder Gewinne nur als Durchschnittswerte einer Periode, z. B. eines Jahres, berücksichtigen. Zeitliche Unterschiede im Auftreten der Zahlungsströme können nicht oder nur unvollkommen betrachtet und bewertet werden. Deshalb ist diese Methode für die Betrachtungen in diesem Projekt ungeeignet.

Dynamisches Verfahren der Investitionsrechnung
Das dynamische Verfahren zeichnet sich durch die folgenden Charakteristika aus: Die Durchschnittsbetrachtung, die den statischen Verfahren zugrunde liegt, wird zugunsten einer exakten Erfassung der Ein- und Auszahlungen während der gesamten Nutzungsdauer der zu beurteilenden Investitionen aufgegeben. Da die Ein- und Auszahlungsströme nach Höhe oder zeitlichem Anfall unterschiedlich sein können, wird eine Vergleichbarkeit dadurch hergestellt, dass man die Zahlungsströme entweder auf den Zeitpunkt unmittelbar vor Investitionsbeginn, dem Zeitpunkt null, abzinst oder auf den Zeitpunkt am Ende der Investitionsdauer aufzinst [Rolfes, 2003, S. 9 ff.]. Die folgenden Ausführungen behandeln die wichtigsten Grundbegriffe:

Aufzinsung (Askontierung)
Gibt an, wieviel eine Zahlung, die zu einem früheren Zeitpunkt erfolgte, am Ende einer Investition wert ist.

Abzinsung (Diskontierung)
Gibt an, wieviel eine Zahlung, die zu einem späteren Zeitpunkt erfolgte, zu Beginn einer Investition wert ist.

Endwert
Stellt den gesuchten Wert dar, der sich durch Aufzinsung des Zeitwertes ergibt.

Barwert
Stellt den gesuchten Wert dar, der sich durch Abzinsung des Zeitwertes ergibt.

Diskontierungszinssatz
Höhe des Kapitalmarktzinses einer risikolosen Anlage, die um einen Risikozinssatz korrigiert wird (z. B. bei Mietausfall oder Leerstand).

4. Hypothetische Lösungsansätze

4.1 Architektonische Betrachtung

In den hypothetischen Lösungsansätzen wurden hinsichtlich der architektonischen Entwicklung Festlegungen zur gebäude- und fassadentypologischen Einordnung des vaku*tex*-Elements getroffen. Dabei wurden Eingrenzungen bezüglich der Bauteildimensionierung, des Fassadensystems und der Konstruktionsart vorgenommen.
Untersuchungen zu Formen und Oberflächen sowie zur Integration von Öffnungen sollten Gestaltungsmöglichkeiten des vaku*tex*-Fassadenelements aufzeigen. Diese umfassten auch studentische Entwürfe.

4.1.1 Gebäudetypologie und Bauteildimensionierung

Eine allgemeinverständliche und anschauliche Art Architektur und Gebäude zu beschreiben ist, dies mithilfe von Typologien zu tun. Eine Typologie ist allgemein eine wissenschaftliche Beschreibung oder Einteilung eines Gegenstandsbereichs nach Gruppen mit einheitlichen Merkmalskomplexen [Munzinger, 2012]. In der Architektur sind es z. B. Gebäude, die nach bestimmten Merkmalen wie Gebäudealter, Nutzungsart, konstruktiven Merkmalen, Materialien, etc. eingeordnet werden können.
In dieser Arbeit erfolgte über eine solche typologische Untersuchung die Annäherung an die Dimensionierung des Bauteils. Der Betrachtungsfokus lag dabei auf der Nutzungsart von Gebäuden sowie ihrer Konstruktion, da eine möglichst universelle Abmessung gefunden werden sollte, die in der Praxis auch nutzungsübergreifend in vielen Gebäudearten eingesetzt werden kann.

In empirischen Untersuchungen wurden beispielhaft Büro- und Wohnbauten sowie Bildungseinrichtungen mit den Baujahren 1945 bis heute beleuchtet. Konstruktionsraster, Raumtiefe, Fassadenraster und Raumhöhe sollten Aufschluss über das Spektrum üblicher Raster und Dimensionen in den einzelnen Gebäudetypen geben. Auftretende Häufungen in den Abmaßen von Fassadenrastern wurden bei 0,90 m, 1,25 m und 1,50 m festgestellt (siehe Abb. 30). Da 1,50 m ein Vielfaches häufig auftretender Konstruktionsraster sowohl bei Bildungseinrichtugen als auch im Büro- und Wohnungsbau ist (siehe Abb. 29), wurde dies als Elementbreite für die weitere Bearbeitung gewählt. Die Elementhöhe wurde mit 3,20 m geschosshoch angenommen, um auf die häufigsten lichten Raumhöhen von 2,45 m bis 3,00 m einzugehen. Beide Maße sind in Abhängigkeit von Gestaltungswünschen veränderbar.

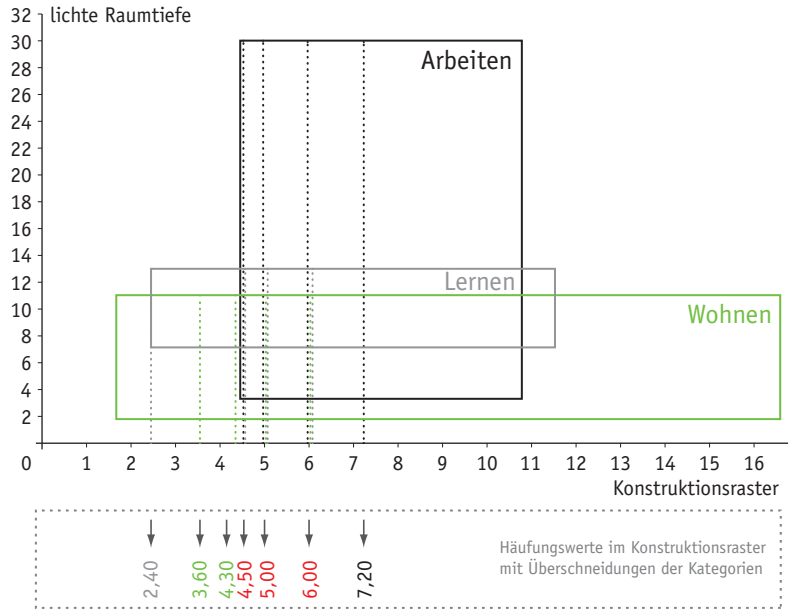


Abb. 29 Zusammenhang zw. Konstruktionsraster, lichter Raumtiefe und Gebäudenutzungen

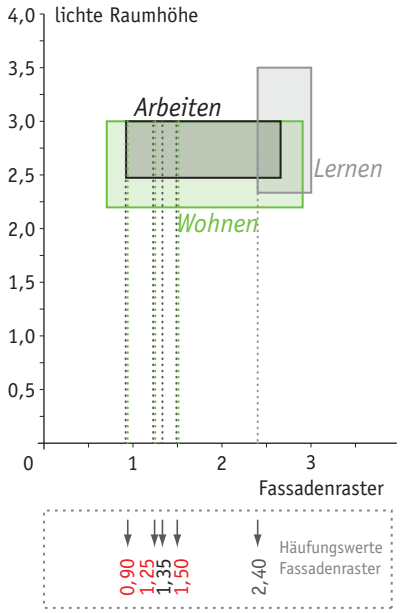


Abb. 30 Zusammenhang zw. Fassadenraster, lichter Raumhöhe und Gebäudenutzung

4.1.2 Systemanalyse Fassade

Auf Grundlage einer Systemanalyse und typologischen Einordnung der Fassade sollten die Rahmenbedingungen für das vaku^tex-Element zur weiteren Bearbeitung festgelegt werden. Dabei wurde eine Eingrenzung aus einer Vielzahl von Umsetzungsmöglichkeiten vorgenommen.
In der Analyse unterteilt sich das Gesamtsystem *„Gebäude“* in einer hierarchischen Ordnung in Gebäudeelemente, Materialemenente bis zu den Stoffelementen, welche die kleinsten Komponenten im System darstellen.

Die Fassade, als Bestandteil der Gebäudeelemente, kann typologisch in *„statisches System“*, *„Schalenaufbau“*, *„Fassadensystem“* und *„Konstruktionsart“* eingeteilt werden. Eine Bewertung und Einschränkung dieser Kriterien erfolgte aufgrund konstruktiver Notwendigkeiten sowie ökologischen und ökonomischen Vorgaben aus Diskussionen mit Projektpartnern und Experten. Diese Vorgaben bildete zusammen mit den Erkenntnissen aus der gebäudetypologischen Untersuchung und den gewählten Materialelementen Textilbeton, VIP, GFK und PCM die Rahmenvorgaben für das vaku^tex-Element.

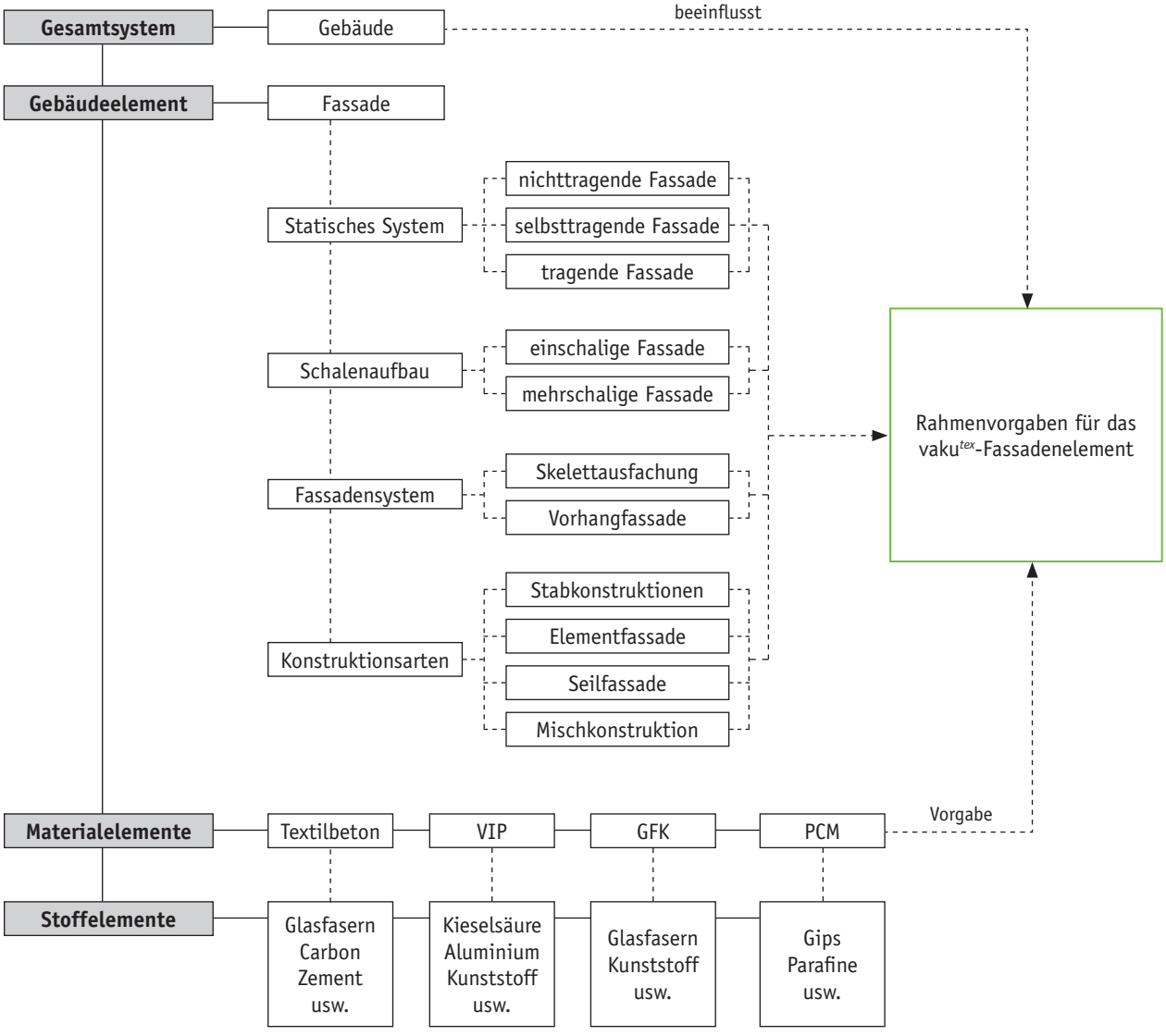


Abb. 31 Struktur zur Herleitung der Rahmenvorgaben

4.1.2.1 Statisches System

Fassadentypen lassen sich bezogen auf die Gebäudekonstruktion nach ihren Trageigenschaften wie folgt unterscheiden:

Tragende Fassaden
Diese gehören zum Tragwerk eines Bauwerks und nehmen nicht nur äußere Lasten wie Winddruck und -sog auf, sondern tragen auch Eigen- und Nutzlasten ab. Dafür müssen sie statisch entsprechend ausgelegt sein. Ihr Fassadenraster ist direkt abhängig vom Konstruktionsraster.

Selbsttragende Fassaden
Sie tragen die eigenen Lasten über die gesamte Höhe ab und leiten diese nicht ins Bauwerk ein. So kann die Tragkonstruktion des Gebäudes geringer ausfallen. Selbsttragende Fassaden nehmen Lasten von außen auf und geben diese ggf. an das Bauwerk weiter. Das Fassadenraster kann unabhängig vom Konstruktionsraster entwickelt werden, jedoch ist diese Form der Fassade zwingend stehend.

Nichttragende Fassaden
Zu diesem Typ zählt z. B. die Vorhangfassade. Sie nimmt die äußeren Lasten auf und gibt diese zusammen mit ihren Eigenlasten an das Tragwerk des Gebäudes weiter. Das Fassadenraster kann dabei unabhängig vom Konstruktionsraster sein.

Schlussfolgerung für die Entwicklung von vaku^{tex}
Um eine flexible und unabhängige Gestaltung zu ermöglichen, ist die Ausführung von vaku^{tex} als nichttragende Fassade vorgesehen. Dabei muss das Bauteil bezüglich einwirkender Kräfte wie Eigen- und Windlasten so ausgelegt sein, dass es durch die auftretenden Spannungen nicht zu Beschädigungen kommt. Aufgrund der schlanken Bauteile und den daraus resultierenden geringen Eigenlasten kann die Primärtragstruktur des Gebäudes, z. B. in Skelett- oder Schottenbauweise, filigraner ausgeführt werden.

4.1.2.2 Schalenaufbau

Fassaden können in einschalige und mehrschalige Systeme unterteilt werden. Während einschalige Fassaden Funktionen wie Schall- und Brandschutz, Statik oder Außenwirkung in einer Schale unterbringen, sind die Funktionen bei der mehrschaligen Fassade entsprechend auf mehrere Schalen verteilt. Durch z. B. den Einsatz einer Festverglasungsebene vor der thermischen Hülle eines Gebäudes kann beispielsweise der Schallschutz, bei geöffneten Fenster, an einer stark befahrenen Straße deutlich erhöht werden. Nachteil dieser Konstruktion ist meist der erhöhte Platzbedarf. Ein mehrschaliger Aufbau einer Fassade darf nicht mit einem mehrschichtigen Aufbau verwechselt wer-

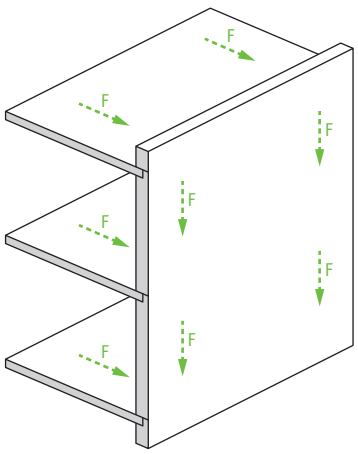


Abb. 32 tragende Fassade

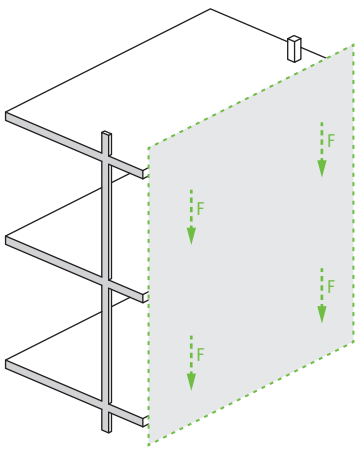


Abb. 33 selbsttragende Fassade

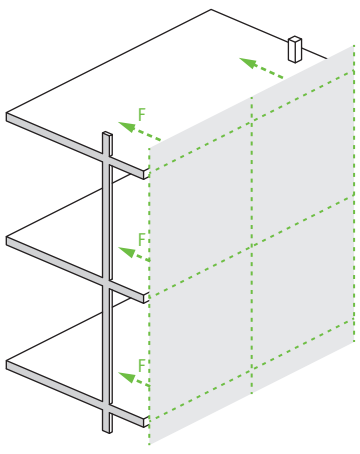


Abb. 34 nichttragende Fassade

den, der lediglich das innere Gefüge einer Schale bezeichnet. [Moro, 2009]

Schlussfolgerung für vaku^tex

Zur Realisierung eines derart schlanken Bauteils wie vaku^tex wird ein einschaliges Fassadensystem entwickelt. Dieses erfüllt, in unterschiedlichen Funktionsschichten aufgeteilt, alle Aufgaben einer Fassade.

4.1.2.3 Fassadensystem

Nichttragende Fassaden werden in zwei Kategorien eingeteilt: In die Skelettausfachung und die Vorhangfassade. Neben den gezeigten Varianten in Abb. 35 sind konstruktiv und gestalterisch weitere Zuordnungen realisierbar. Diese können unter Umständen gewisse Vorteile bieten, sind aber durch zunehmende Wärmebrücken aufwendiger zu realisieren.

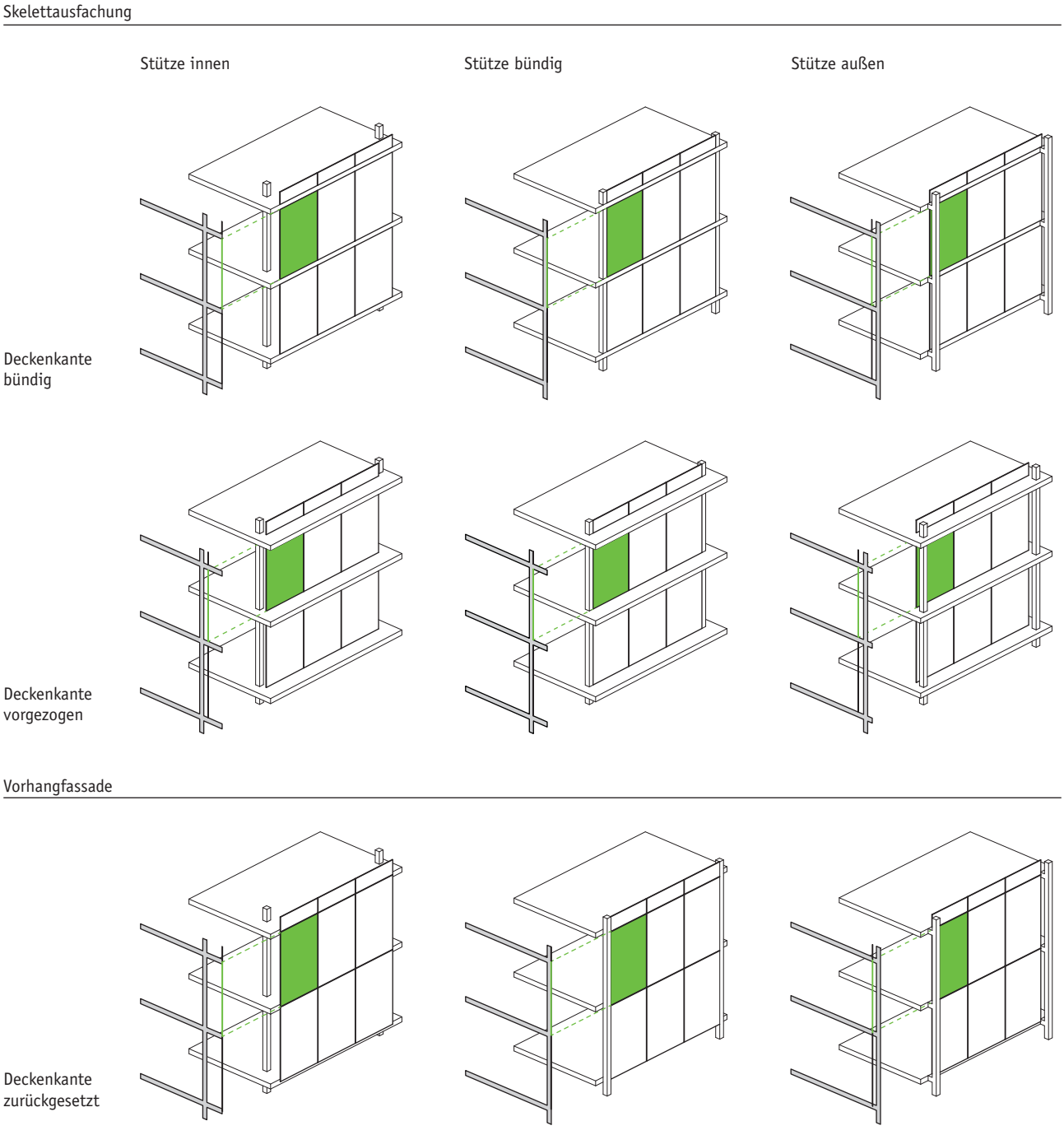


Abb. 35 Beziehung zwischen Primärsystem (Stütze und Decke) und Fassadenelemente

Skelettausfachung
Strukturell gesehen ist die Skelettausfachung eine Zwischenstufe zur Vorhangfassade. Die Fassadenelemente sind meist an allen vier Seiten, zumindest aber an den zwei sich jeweils gegenüberliegenden Seiten am Primärsystem (Skelett) befestigt. Damit wird das gesamte Skelett zwischen den Fassadenelementen bzw. die Deckenplatten oder Stützen sichtbar. Eigen- und Windlasten werden auf das Skelett übertragen.

Vorhangfassade
Vorhangfassaden sind nichttragende Gebäudehüllen, die am Primärsystem befestigt werden. Das tragende Skelett wird meist nicht betont, die Lasteintragung von Eigen- und Windlast erfolgt überwiegend punktförmig. Das Anbringen der Lastabtragungspunkte auf bzw. vor der Geschossdecke ermöglicht das höchste Maß an Flexibilität, sodass die Unabhängigkeit vom Stützenraster gegeben ist. Nicht zu verwechseln ist die Vorhangfassade mit einer vorgehängten hinterlüfteten Fassade. [Gockell, 1964]

Schlussfolgerung für vaku^{tex}
Für das zu entwickelnde Bauteil kommen prinzipiell beide Fassadensysteme in Frage. Um die Flexibilität in der Fassade zu gewährleisten und eine Vielzahl von Anwendungsfällen zu ermöglichen, ist die Variante der Vorhangfassade jedoch zu bevorzugen. Eine konstruktive und statische Prüfung muss klären, ob das Element hängend ausgeführt werden kann. Optimale Montageverhältnisse bieten Lastaufnahmepunkte auf der Decke, da die Montage ohne zusätzliche Gerüste erfolgen kann.

4.1.2.4 Konstruktionsarten

Die nachfolgend erläuterten Konstruktionsarten beziehen sich auf das Fassadensystem *„Vorhangfassade“*.

Stabkonstruktionen
Diese Systeme bestehen aus vertikalen Pfosten und horizontalen Riegeln. Die in ihrem Inneren entstehenden Flächen können mit verschiedenen Funktionen und Materialen belegt werden und bilden den Raumabschluss. Im Normalfall sind die Pfosten mit dem Skelett verbunden und übertragen die auftretenden Kräfte wie Eigen- und Windlasten auf das Primärsystem. Übernehmen jedoch die Riegel die Hauptlast, können die Pfosten dünner dimensioniert werden und sind nur noch aussteifender Art. Zu den Stabkonstruktionen gehören die Pfosten-Riegel-Fassade, Pfostenfassade, Riegelfassade und jeweilige Mischformen in Konstruktion und Gestaltung. Es soll schematisch auf die verbreitetsten Varianten eingegangen werden.

- Pfosten-Riegel-Fassade

Das System besteht aus hängenden, meist geschosshohen Pfosten und eingesetzten Riegeln. Die entstehenden Flächen werden mit Glaselementen oder Paneelen gefüllt. Die Funktion der Pfosten besteht darin, Windlasten und Eigenlast abzutragen und die Konstruktion auszufachen.

- Pfostenfassade

Die Pfostenfassade ist eine Weiterentwicklung aus der Pfosten-Riegel-Fassade, um die Filigranität der Fassade durch Einsparung von Konstruktionselementen zu verbessern. Dadurch kann eine Leichtigkeit der Fassade erzielt werden. Beschränkt wird die Konstruktion lediglich durch Maximalabmessungen der Ausfachung. Das System trägt die Wind- und Eigenlasten ab.

- Riegelfassade

Hierbei handelt es sich um ein hängendes System, das das Eigengewicht der Konstruktion z. B. mittels Zugstangen nach oben ableitet. Dadurch wird jedoch eine aufwendige Überzugkonstruktion notwendig. Die Riegel nehmen lediglich Horizontalkräfte (Windlasten) auf. Durch diese Bauweise kann Konstruktionsmasse eingespart werden.

Elementfassade
Alleiniger Konstruktionsbestandteil ist ein Paneel, das imstande ist, die auftretenden Lasten auf das Primärtragwerk (Skelett) zu übertragen. Wichtiges konstruktives Merkmal ist die fugenlose, geschlossene Oberfläche. Eine Gliederung erfolgt über die Fugen an den Stößen der Paneele. Die Elemente werden meist vorgefertigt und als Gesamtelement

vor Ort installiert. Durch diesen hohen Vorfertigungsgrad sind verkürzte Montagezeiten, geringerer Personalaufwand und eine gesicherte Qualität der Bauteile möglich.

Seilfassade
Die Fassadenelemente werden mittels punktförmiger Halterungen an den Eckpunkten mit dem Sekundärtragsystem, dem Seil, verbunden. Dieses ist wiederum mit dem Primärsystem verbunden und leitet die Wind- und Eigenlasten ab.

Mischkonstruktionen
Mischformen der Konstruktionen werden zur Umsetzung verschiederner Aufgaben und Probleme in der Fassade eingesetzt. So wird z. B. der Vorteil des Seils, in vertikale Richtung große Höhen zu überbrücken, mit einem Riegelsystem kombiniert, um auf Punkthalter verzichten zu können. Als weiteres Beispiel kann ein Elementrahmen genannt werden, der die Montagevorteile der Elementfassade mit den vielseitigen Paneelfüllungen einer Pfosten-Riegel-Fassade kombiniert. [Knaack, 2007]

Schlussfolgerung für vaku^tex
Um die Konstruktion möglichst einfach zu halten und auf zusätzliche Elemente in der Fassade verzichten zu können, wird die Entwicklung als Elementfassade gewählt. Diese hat den Vorteil, dass sie in einem Stück montiert werden kann. Der Montageaufwand ist insgesamt geringer, die Logistik auf der Baustelle einfacher und die Fassadenelemente können unter geschützten Werkstattbedingungen in hoher Qualität vorgefertigt werden.

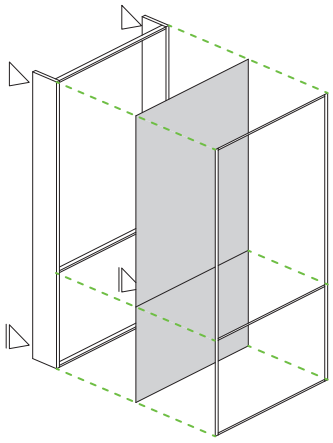


Abb. 36 Pfosten-Riegel-Fassade (Stabsystem)

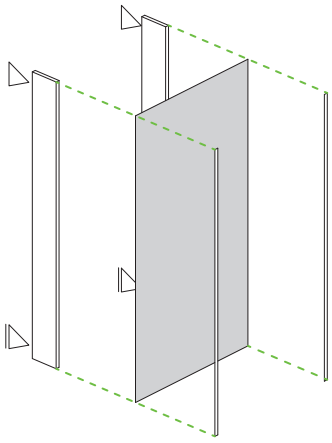


Abb. 37 Pfostenfassade (Stabsystem)

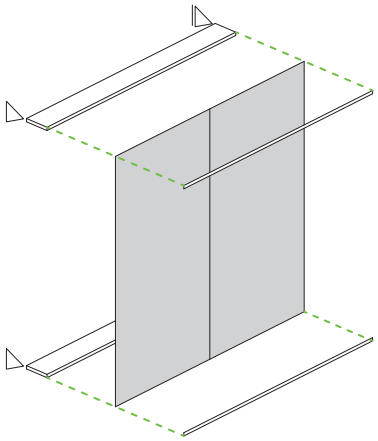


Abb. 38 Riegelfassade (Stabsystem)

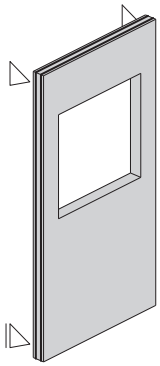


Abb. 39 Elementfassade

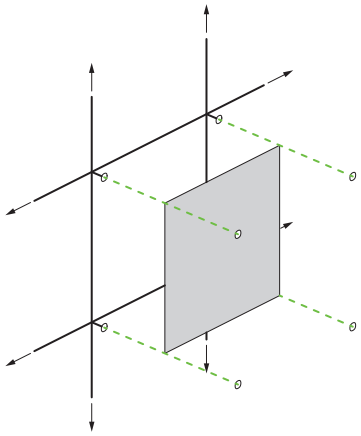


Abb. 40 Seilfassade

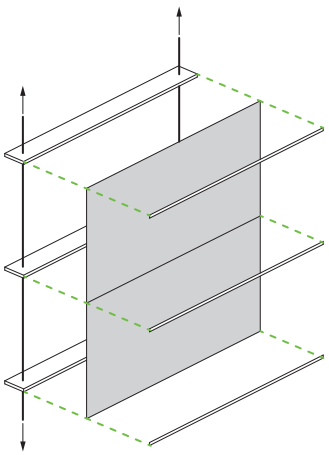


Abb. 41 Mischkonstruktion (Seil-Riegel-Fassade)

4.1.2.5 Rahmenvorgaben für das Fassadenelement

Durch die architektonisch-typologischen Untersuchungen und deren Eingrenzung auf mögliche Konstruktions- und Gestaltungskriterien wurden für vaku*tex* folgende Rahmenvorgaben festgelegt:

- Die Fassade soll als nichttragende Vorhangfassade ausgeführt werden
- Die gewählten Elementabmessungen betragen:
  Höhe: 320 cm (geschosshoch)
  Breite: 150 cm
  Tiefe: 11 cm (entspr. Passivhaus-Fensterstärke)
- Das Bauteil soll als einschalige Elementfassade (hoher Vorfertigungsgrad) entwickelt werden

Durch den hohen Vorfertigungsgrad der Konstruktion, die Ausführung als Vorhangfassade und die schlanke Bauweise sind schnelle Montagezeiten und ein einfacher Transport zur und auf der Baustelle möglich. Die definierten Rahmenvorgaben standen dabei in Wechselwirkung mit der weiteren Arbeit, sodass durch iterative Prozess eine ganzheitliche und sinnvolle Bearbeitung gewährleistet werden konnte.

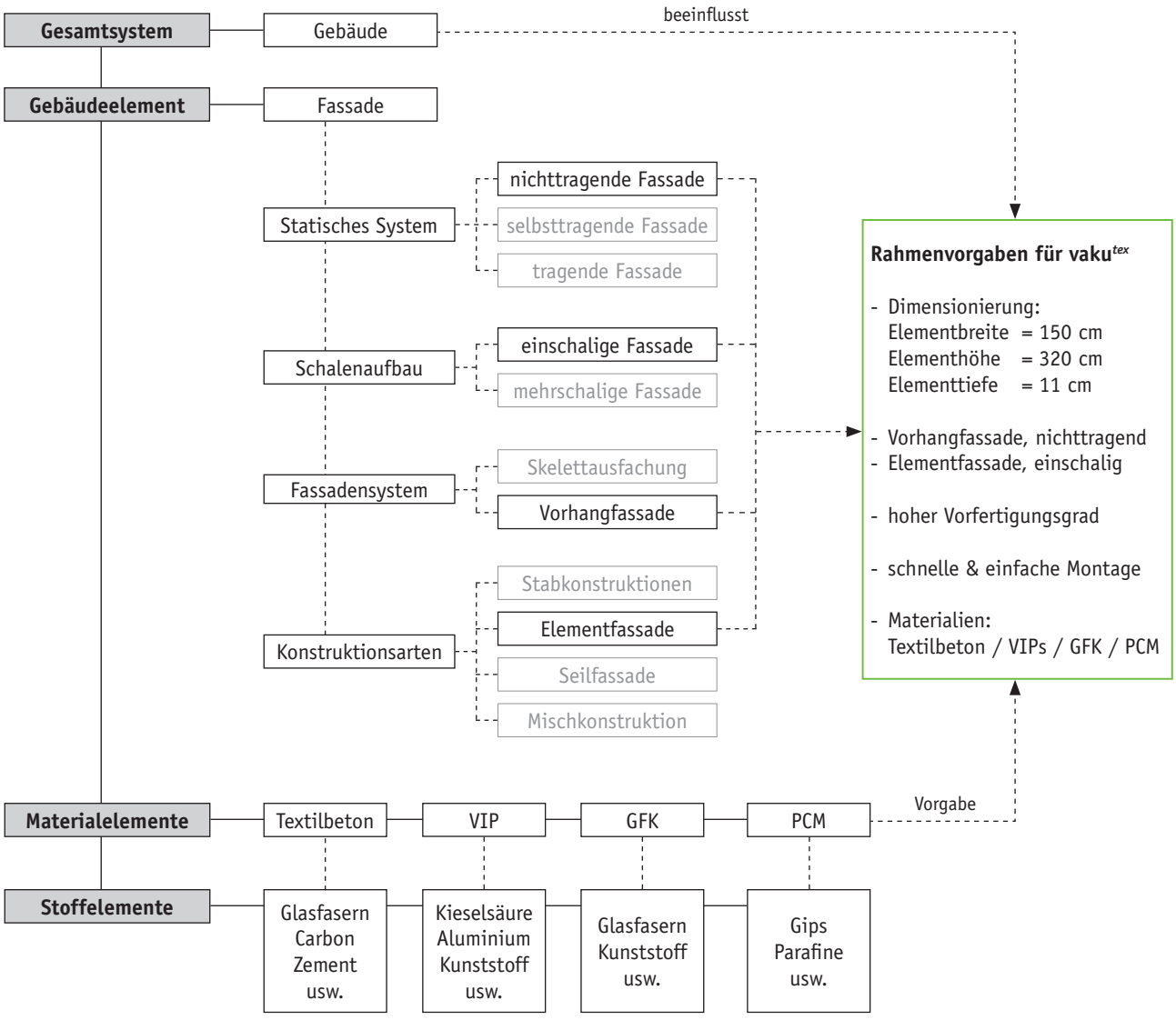


Abb. 42 Zusammenfassung der typologischen Untersuchungen und die daraus resultierenden Rahmenvorgaben

4.1.3 Beschaffenheit des Fassadenelements

Mit den zuvor definierten Rahmenvorgaben kann in der weiteren Betrachtung eine Untersuchung konstruktiv-gestalterischer Aspekte erfolgen. Die untersuchten Punkte sind:

- Öffnungen
- Verbindungen
- Fugenausbildung und -dichtung
- Form
- Oberflächen- und Farbgestaltung

Diese ermöglichen eine Vielzahl an gestalterischen Varianten für das Fassadenelement, die hier dargestellt werden sollen. In den kommenden Kapiteln werden sie weiter eingegrenzt und einer detaillierteren konstruktiven und bauphysikalischen Untersuchung unterzogen, um praxistaugliche Lösungen zu ermöglichen.

4.1.3.1 Öffnungen

Öffnungen in einer Elementfassade können auf unterschiedliche Weise erzeugt werden: Elementweise oder in Form von Aussparungen innerhalb einer Fassadenplatte. Neben gestalterischen Erwägungen spielen hierzu vor allem Statik und Bauphysik eine Rolle. Während bei elementweiser Öffnung oder Verglasung lediglich der Anschluss zwischen den Bauteilen geklärt werden muss, stellt sich eine bauteilinterne Aussparung schwieriger dar. Sie schwächt die Statik des Elements und erfordert deswegen neue Lösungen der Elementaussteifung. Zudem erhöht sich der Fugenanteil, sodass das Element einen schlechteren Wärmedurchgangswert als im ungestörten Fall aufweist.
Bei Fenster- und Türöffnungen wird es durch die dünnen Wandaufbauten von vaku^tex möglich, einen bündigen Übergang zwischen Rahmen und Wand zu realisieren. Dies schafft eine neue Ästhetik im Innen- und Außenraum.

4.1.3.2 Verbindungen

Grundlegend müssen zur Entwicklung eines Fassadenelements drei Kategorien untersucht werden:

- Verbindungen zum Tragwerk
- Verbindung zwischen den Elementen
- Verbindungen im Element

Ihnen kommt eine wichtige Rolle innerhalb der Forschungsarbeit zu, da sie entscheidenden Einfluss auf Konstruktion, Bauphysik, Aussehen

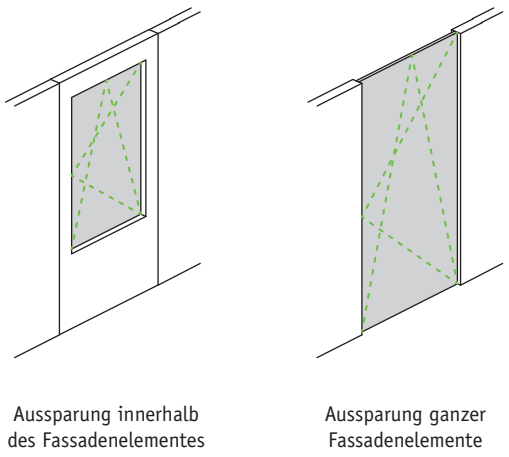


Abb. 43 Öffnungsprinzipien

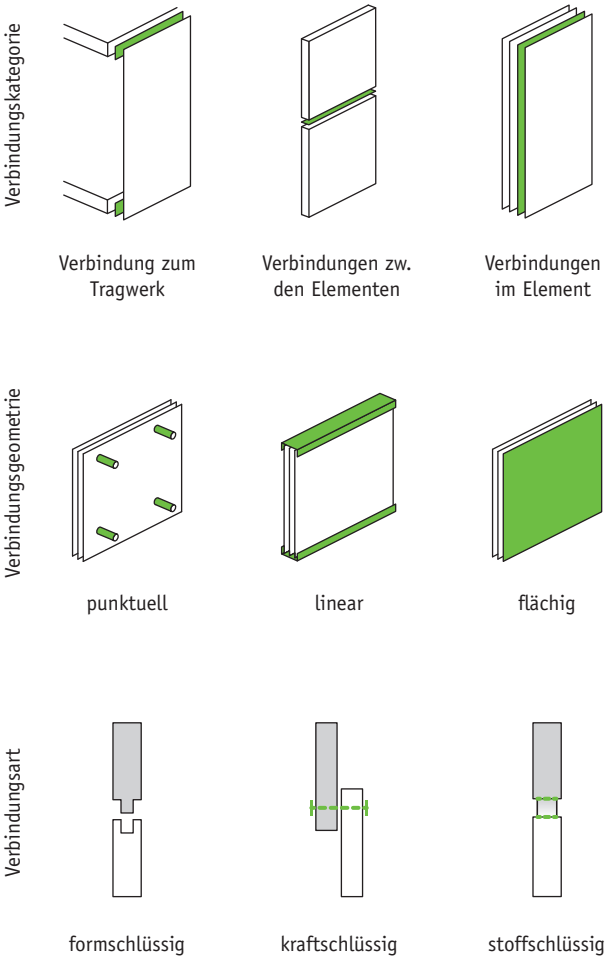


Abb. 44 Verbindungen

und Handling des Bauteils nehmen. Den unterschiedlichen Einsatzgebieten und Anforderungen entsprechend gibt es verschiedene Möglichkeiten, Verbindungen auszuführen (siehe Abb. 44). Eine Eingrenzung für das vaku*tex*-Element wird im Verlauf der Forschungsarbeit durch die Rückkopplung mit Konstruktion, Statik, Gestaltung und Bauphysik vorgenommen. Diese entscheidet letztendlich über die Verbindungsgeometrie und -art.

4.1.3.3 Fugenausbildung und -dichtung

Fugen sind gewollte oder toleranzbedingte Zwischenräume und entstehen immer dort, wo Bauelemete aufeinandertreffen. Da sie sich nie lückenlos stoßen, prägen sie sehr deutlich die Gestalt einer Fassade. Ihr Raster wird von den Abmessungen der Bauelemente bestimmt, die sich durch Herstellung, Gestaltung und Maximalabmaße für den Transport ergeben.
Fugen bedeuten eine Unterbrechung der Fassadenhaut und sind damit potentielle Schwachstellen. Außenseitig sind sie der Witterung in vollem Umfang ausgesetzt und müssen je nach Anforderungen Strahlungs-, Feuchte-, Wind-, Wärmeschutz etc. gewährleisten. Längen- und Volumenänderungen der angrenzenden Bauelemente durch Last, Temperaturschwankungen und Wasseraufnahme bzw. -abgabe beanspruchen sie zusätzlich. Entsprechend ihrer Erscheinung können sie in offene, überlappende, stoffschlüssige und gestoßene Fugen (mit Dichtelement) unterschieden werden (siehe Abb. 45).

Dichtungsarten
Je nach Art und Beschaffenheit der Fuge muss sie unterschiedliche Funktionen erfüllen. Bei der Auswahl des Dichtungssystems ist ausschlaggebend, in welchem Maße und in welcher Richtung Bewegungen der Bauelemente zu erwarten sind. Die Ausbildung von Fugendichtungen kann jedoch auf wenige Grundprinzipien zurückgeführt werden:

- Berührungsfreies Dichtungssystem

Bauelemente werden in einem bestimmten Abstand zueinander gehalten und so ausgebildet, dass Strömungen in der Fuge durch Verwirbelungen erschwert werden. In einem mehrschichtigen

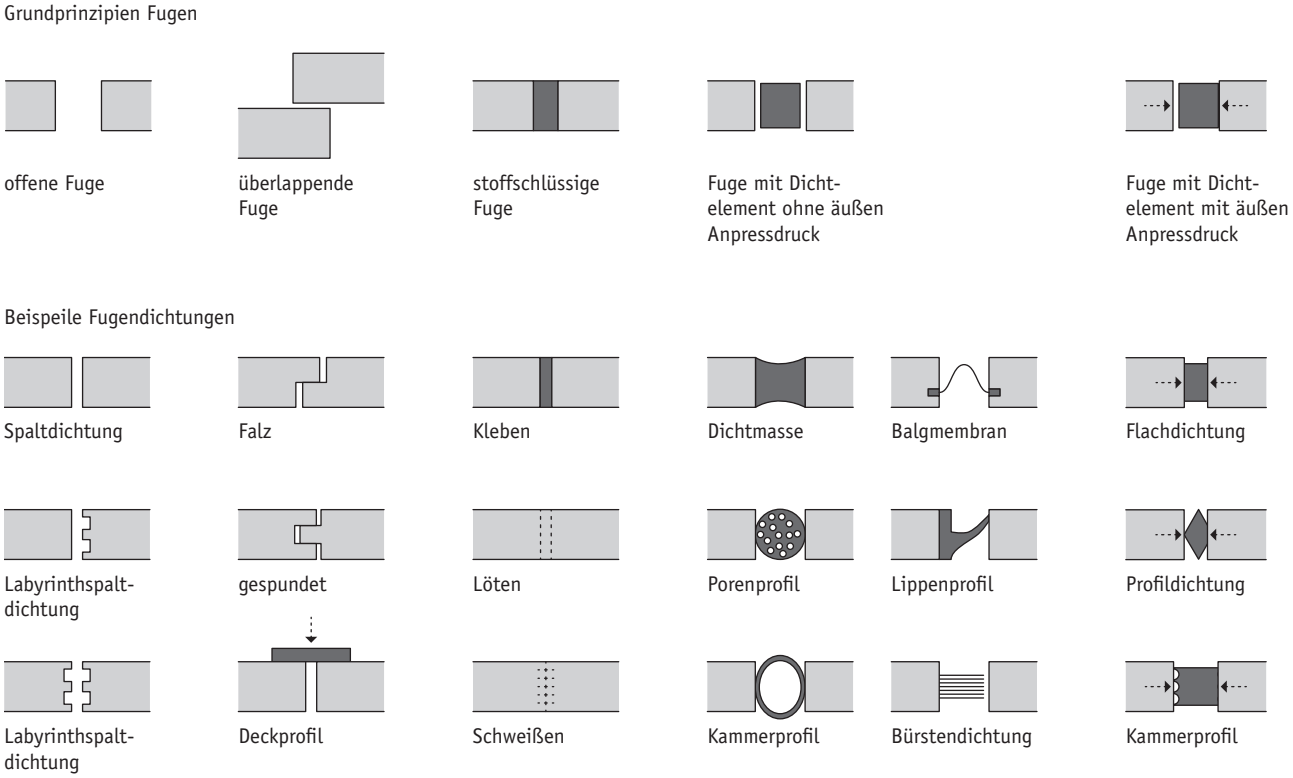


Abb. 45 Grundprinzipien von Fugen und Fugendichtungen

Dichtungssystem eignet es sich besonders als erste Ebene. Die offene Fuge ermöglicht es, Verformungen der Bauelemente auszugleichen.

- Überlappung

Einfachstes und zugleich wirkungsvollstes Prinzip, das sich in vielen Dichtungssystemen wiederfindet. Die Anordnung der Überlappung muss entsprechend der Fließrichtung des Wassers an der Fassade ausgerichtet werden.

- Stoffschlüssige Dichtung

Verbindung mit vollständiger Dichtigkeit (Kleben, Schweißen, etc.), Bewegungen sind jedoch nicht oder nur eingeschränkt möglich.

- Dichtelemente ohne äußeren Anpressdruck

Hier werden unterschiedliche Arten differenziert. Für unebene Flächen sind besonders die plastisch oder elastisch verformbaren Dichtmassen geeignet, die geringe Bewegungen aufnehmen können. Poren- und Kammerprofile lassen kleine Bewegungen quer zur Fugenachse zu, gegen Längsverschiebung müssen sie jedoch gesichert werden. Für größere Translationsbewegungen eignen sich besonders Lippenprofile und Balgmembranen.

- Dichtelemente mit äußerem Anpressdruck

Durch Krafteinwirkung von außen erfolgt eine flächenschlüssige Verbindung, Bewegungen sind kaum möglich.

Die genannten Dichtungsprinzipien lassen sich auch untereinander kombinieren, sodass leistungsfähige Fugen ausgebildet werden können.
[Herzog, 2004]

4.1.3.4 Form

Grundlegend kann in der Ausbildung von Fassadenelementen zwischen 2D- und 3D-Elementen unterschieden werden. 2D-Elemente bleiben in der Ebene der Fassade und sind entweder parallel oder asymmetrisch zugeschnitten (siehe Abb. 46). Die meist standardisierten Produkte finden ihren Einsatz in üblichen Vorhangfassaden-Gestaltungen. Bei 3D-Elementen, die aus der Ebene der Fassade hervortreten und inzwischen nahezu jede beliebige Form annehmen können, kann dagegen nicht auf Standarddetails zurückgegriffen werden. Sie bedürfen einer individuellen Planung und sind dadurch entsprechend zeitaufwändiger und kostenintensiver in der Ausführung.
Für das vaku[tex]-Bauteil wird zunächst der Standardfall eines 2D-Fassadenelements in Parallelzuschnitt entwickelt, um grundlegende Entwicklungsentscheidungen auf Funktionalität und Praxistauglichkeit zu prüfen. Ist diese Basis geschaffen, kann in der weiteren Forschungsarbeit im 2D- wie 3D-Element die Vielseitigkeit des Textilbetons genutzt werden und mit Oberflächenmodellierung und -gestaltung experimentiert werden.

4.1.3.5 Oberfläche und Farbe

Durch den Einsatz von Textilbeton in der Deckschicht des Bauteils ist eine vielfältige Oberflächengestaltung möglich. Durch Zugabe von Pigmenten oder Aufbringen von Strukturen mittels gesäuerten Flächen oder Matrizen kann ein glattes oder strukturiertes Äußeres erzeugt werden. Da Textilbeton in Sichtbetonqualität gefertigt wird, kann das vaku[tex]-Element ohne Weiterbehandlung belassen oder durch Lasuren eingefärbt werden. Selbst Bilddarstellungen sind möglich, die mittels Chemikalien oder Matrizen auf die Oberfläche übertragen werden.

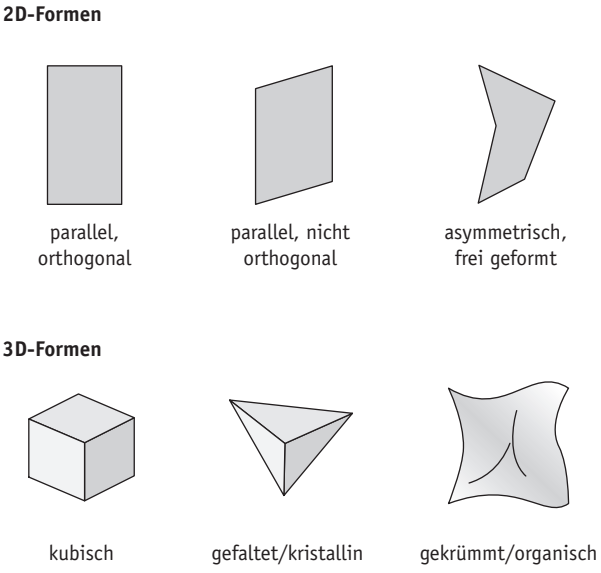


Abb. 46 Formenarten

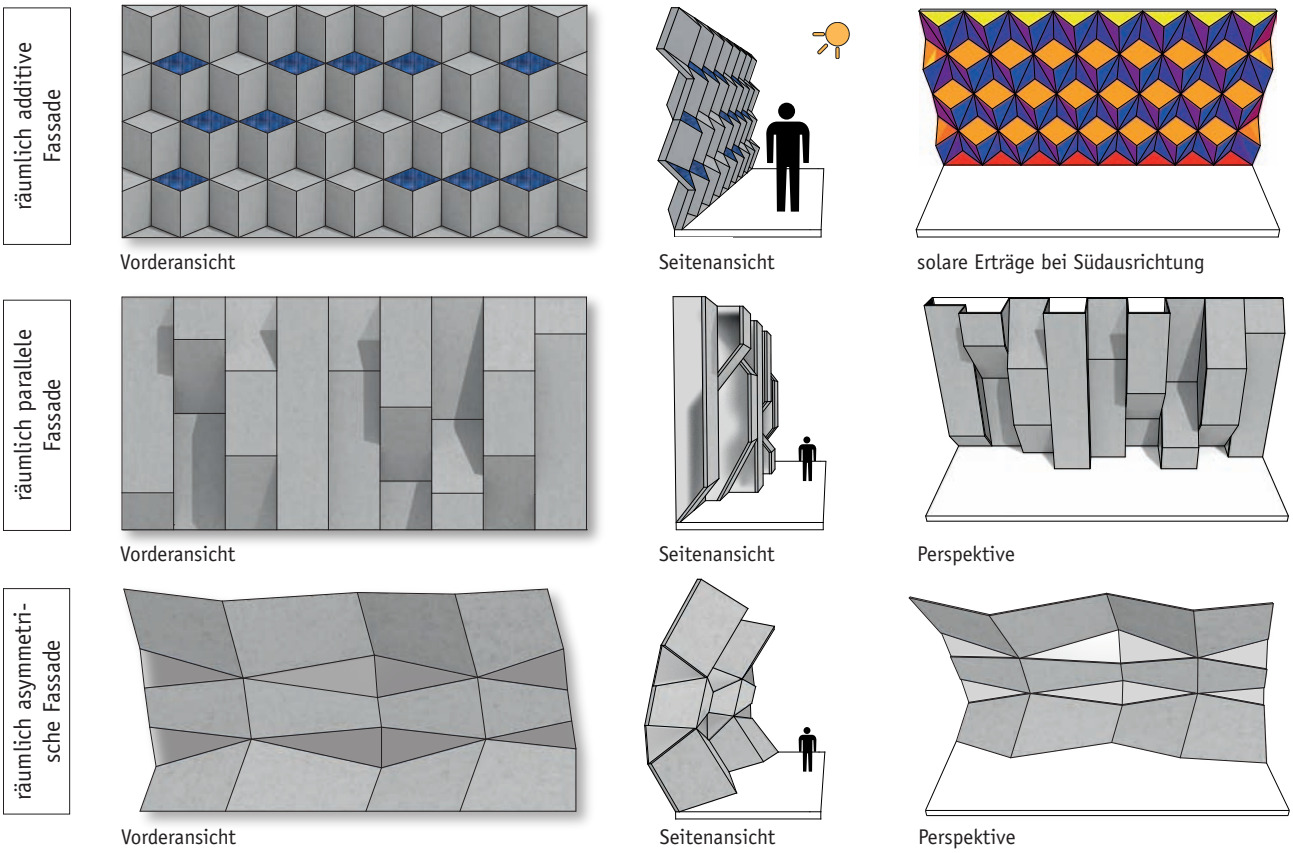


Abb. 47 Beispiele möglicher Formausbildungen

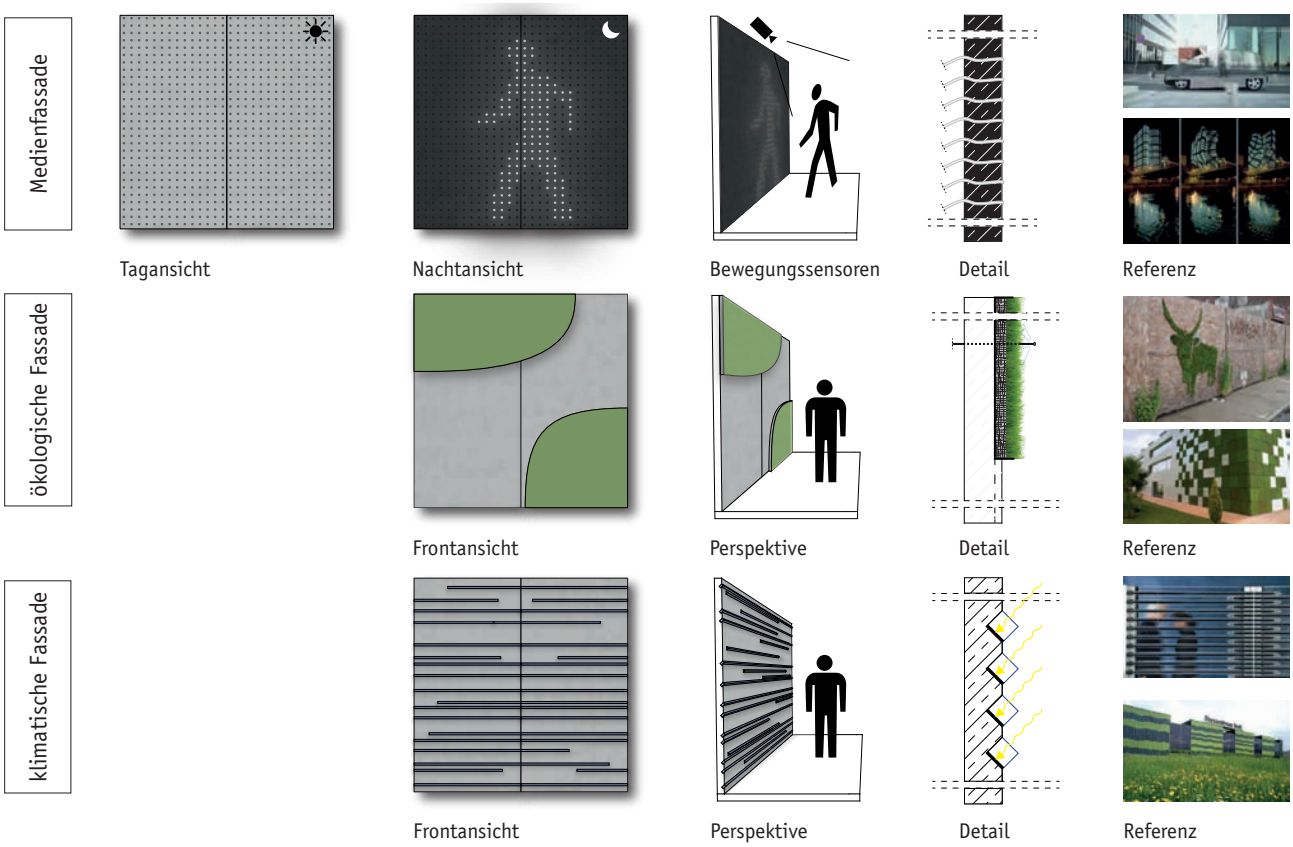


Abb. 48 Beispiele möglicher Oberflächengestaltungen und -nutzungen

4.1.4 Verdichtung urbaner Räume

In den nächsten Jahrzehnten ist gerade in den Städten, unabhängig auf welchem Kontinent, mit einem großen Bauboom zu rechnen. Dabei spielen zwei unterschiedliche Faktoren eine Rolle: Zum einen die weiter stark wachsende Weltbevölkerung und zum anderen der Urbanisierungstrend. Als Konsequenz besteht in den Städten ein wachsender Bedarf an Grundstücksflächen, was wiederum die Grundstückspreise enorm in die Höhe treibt. An dieser Stelle muss das Bauwesen Lösungen für flächeneffizientere Bauweisen zur Verfügung stellen.

Weltbevölkerungswachstum

Seit 4,5 Millionen Jahren wächst die Zahl der Menschen auf der Erde. Von ein paar tausend in Afrika auf heute sieben Milliarden. In der ersten Hälfte des 19. Jhds. wurde die Schwelle zur ersten Milliarde durchbrochen [McEvedy, 1978, S. 342-351]. Im Jahr 2000 waren es bereits sechs Milliarden Menschen. Vorerst wird das exponentielle Wachstum weiter anhalten, dabei wächst die Bevölkerung prognostiziert auf 9,5 Milliarden Menschen an. Dieser Bevölkerungshöhepunkt wird voraussichtlich Mitte des 21. Jhds, erreicht [UN, 2012]. Allein in Indien und China werden zu diesem Zeitpunkt jeweils 1,5 Milliarden Menschen leben.

In den letzten 10.000 Jahren ist die Bevölkerung um den Faktor 2000 gewachsen, auch nahm das Konsumniveau, das sich grob am Energieverbrauch messen lässt, massiv zu. Aus diesen beiden Faktoren lässt sich eine Zunahme der Gesamtbelastung für unseren Planeten berechnen. Sie stieg in den vergangenen 10.000 Jahren um den Faktor 1 Million an [Radermacher, 2007].

In Deutschland bestimmt die Diskussion über Schrumpfung und Rückbau die Debatte im Bauwesen. Betrachtet man jedoch die weltweite Entwicklung, so kann man feststellen, dass es sich um eine nur lokale und vermutlich auch zeitlich begrenzte Entwicklung handelt.
Weltweit ist ein Bevölkerungswachstum zu beobachten, zudem wird diese Entwicklung durch die steigende Lebensqualität pro Kopf begleitet. Dafür werden mehr energetische Ressourcen und auch ein vergrößerter Wohnflächenbedarf notwendig. Bis 2050 wird das größte Wachstum in Regionen zu verzeichnen sein, die ihre Altersabsicherung hauptsächlich durch die Anzahl ihrer Nachkommen sicherstellen. Dabei wird Afrika die größten relativen Zuwachsraten verzeichnen (siehe Abb. 49). Unabhängig von der Gesamtentwicklung eines Landes ist eine allgemeine Schrumpfung der Landbevölkerung und eine Zunahme der Stadtbevölkerung (Urbanisierung) zu beobachten.

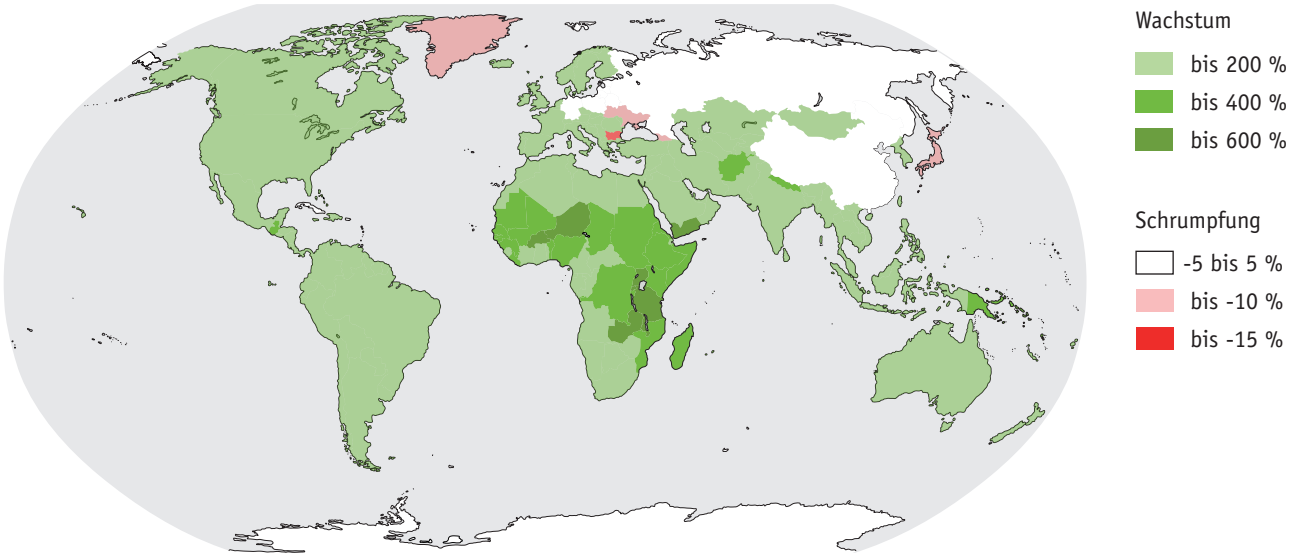


Abb. 49 Bevölkerungsentwicklung von 2010 bis 2050

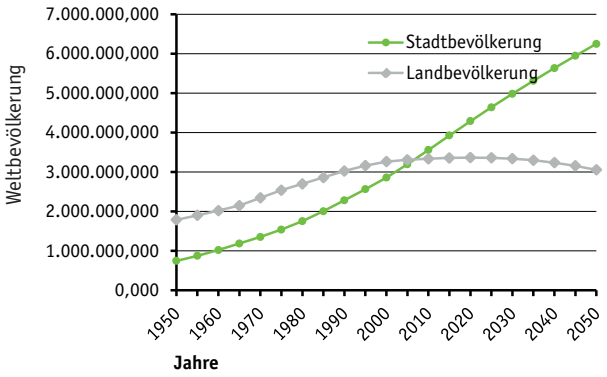


Abb. 50 Weltweite Entwicklung der Stadt- und Landbevölkerung

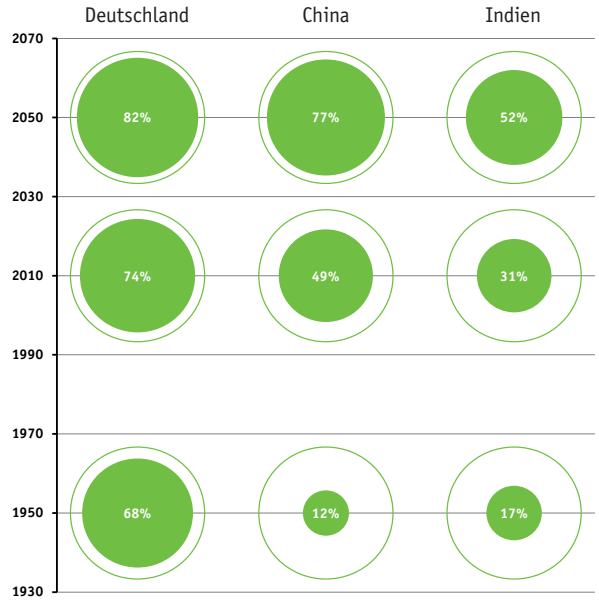


Abb. 51 Vgl. des Urbanisierungsgrades unterschiedlicher Länder

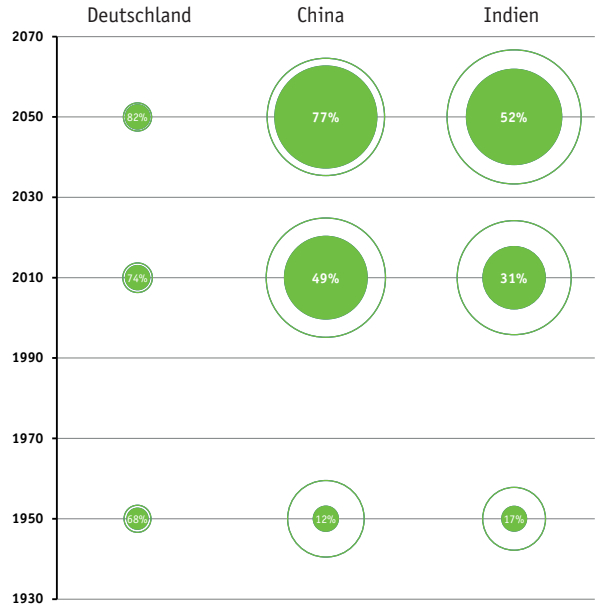


Abb. 52 Stadtbevölkerung im Verhältnis zur Gesamtbevölkerung

Urbanisierungsgrad (relativ)

Der Urbanisierungsgrad (Verstädterungsgrad) beschreibt das Verhältnis zwischen Stadt- und Landbevölkerung. Während die Urbanisierung 1950 in Deutschland bereits sehr weit fortgeschritten war, hatte diese in Indien und China gerade erst begonnen (siehe Abb. 51). Während sich der Urbanisierungsgrad in Deutschland bis zum Jahr 2050 nur noch um 8 % gegenüber 2010 verändert, sieht diese Entwicklung in China und Indien ganz anders aus. Indien kann dabei einen relativen Zuwachs von 21 %, China sogar von 28 % verzeichnen. In diesen Schwellenländern eröffnet sich ein sehr großer Markt für das Bauwesen.
Heute erleben fast alle Länder eine starke Urbanisierung, da ca. 80 % des weltweiten Bruttoinlandsproduktes in Städten erwirtschaftet wird.

Urbanisierungsgrad (absolut)

Absolut gesehen verschärft sich die Situation der Urbanisierung weiter. Während in Deutschland die Stadtbevölkerung im Jahr 2050 um ca. eine halbe Million Menschen gegenüber 2010 anwächst, sind es im selben Zeitraum in China ca. 341 Millionen Menschen, die zusätzlich in die Städte ziehen. Das wirkliche Potential wird also erst im absoluten Vergleich richtig sichtbar [UN, 2012].

Problematik Flächenbedarf

Das enorme Bevölkerungswachstum führt zu einem stark wachsenden Bedarf an Nahrungsmitteln. Prognosen gehen von einer Verdopplung des Lebensmittelbedarfs im Jahr 2050 aus, da neben der Bevölkerung auch der Lebensstandard steigt. Dadurch werden mehr landwirtschaftliche Nutzflächen, speziell für die Nahrungsmittelproduktion, benötigt.
In Deutschland beispielsweise konkurrieren diese wiederum mit den Flächen, die für Biokraftstoffe und für die stoffliche Nutzung z. B. als Baumaterial benötigt werden (siehe Abb. 53). Eine zunehmende Bodenversieglung durch Bau- und Verkehrsflächen schränken die landwirtschaftlichen Nutzflächen weiter ein. Daher strebt die Bundesregierung das Ziel an, die Flächenversiegelung bis zum Jahr 2020 auf 30 ha pro Tag zur begrenzen. Im Jahr 2010 betrug diese im Vergleich noch

87 ha pro Tag. Stark angestiegen ist dabei die Siedlungsfläche, die von privaten Haushalten beansprucht wird. Dies ist auf den steigenden Wohnflächenbedarf zurückzuführen, der im Zeitraum von 1993 bis 2006 von 36 m² auf 43 m² Wohnfläche pro Kopf angestiegen ist [BReg, 2012b].

Schlussfolgerung

Die wachsende Weltbevölkerung mit ihrem steigenden Energie-, Lebensmittel- und Lebensraumbedarf in Verbindung mit dem globalen Urbanisierungstrend erzeugt einen Bedarf an energieeffizienten, ressourcenschonenden und flächeneffizienten städtischen Bauweisen.

Die vaku^tex-Fassadenelemente werden insbesondere auf diese Anforderungen in den folgenden Untersuchungen optimiert.

4.1.5 Studentenentwürfe

Die Problematik der zunehmenden Urbanisierung und der Nachverdichtung des Stadtraums war Ausgangspunkt studentischer Entwürfe an der HTWK Leipzig. Die Aufgabe bestand darin, eine parasitäre Architektur zu entwickeln, die sich an den Gebäudekörper eines Hochschulgebäudes anlagert bzw. sich in ihn hineinschiebt. Der Konzeptentwurf sollte die Vorteile des geringen Gewichts und der geringen Bauteilstärke der vaku^tex-Elemente nutzen. Nachfolgend sind drei Arbeiten dargestellt.

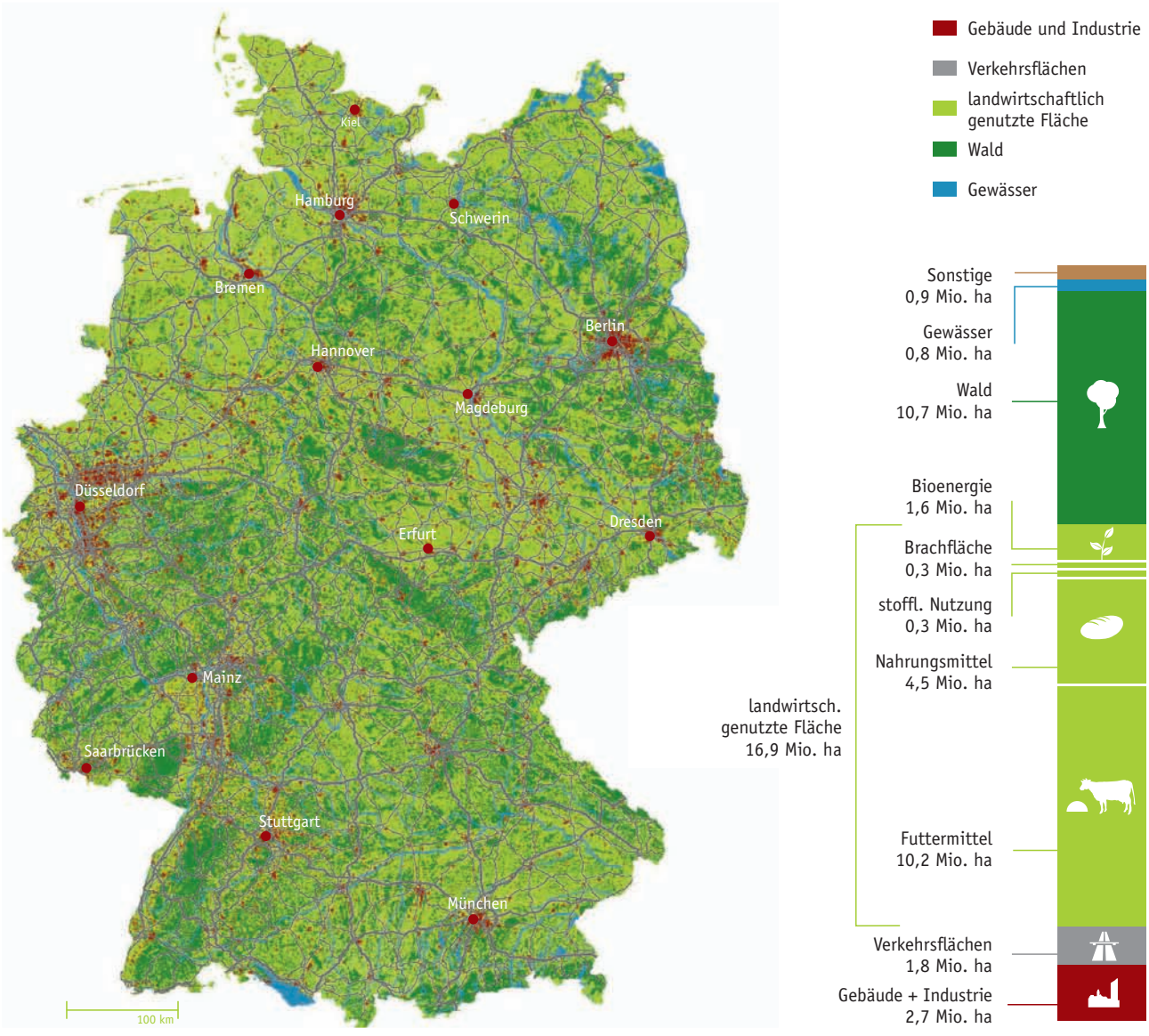


Abb. 53 Flächennutzung in Deutschland 2008

Studentenentwurf I

para^{tex} - parasitäres Bauen
Susanne Boß

Die Entwurfsarbeit von Susanne Boß platziert sich im Zwischenraum von Geutebrück-Neubau und Geutebrück-Altbau. Der Baukörper gewinnt durch seine Formensprache und die asymmetrische Lage über dem Eingangsportal an Eigenständigkeit. Die repräsentative Wirkung des Parasiten kann aus beiden Richtungen der Karl-Liebknecht-Straße wahrgenommen werden, da er ca. 3 m in die Straßenflucht kragt.
Der Raum kann als Besprechungsraum sowie als Veranstaltungsraum multifunktional genutzt werden. Die kurzen Wege zu wichtigen Orten, wie zu den Hörsälen oder dem Rektorat sprechen für die geplante Nutzung. Zudem wird durch den Entwurf die Dachfläche erschlossen und das 5. OG an das Treppenhaus des 4. OG angebunden.
Der Entwurf bietet sehr großes Potenzial für eine Realisierung des geplanten Vorhabens.

Zugänge

Der Para^tex kann aus dem Innenhof sowie von der Kreuzung Richard-Lehmann-/Karl-Liebknecht-Straße erreicht werden. Die Erschließung erfolgt dabei über eine neu angelegte Treppe ins 5. OG sowie einem barrierefreien Zugang vom Südtreppenhaus.

Möblierung

Die Möblierung besteht aus drei Elementen: der Bücherwand, der Bar und modularen Sitzelementen. Der Bartresen lässt sich einklappen, sodass er komplett in der Wand verstaut ist. Die festinstallierte Küchenzeile kann durch die Nähe zum Versorgungsschacht im Altbau mit Wasser versorgt werden. Die Sitzelemente können nach Belieben im Raum angeordnet, zusammengeschoben oder vereinzelt werden. Aus den Lehnen lassen sich Arbeitsplatten herausziehen und auf den Lehnen installieren.

Grundriss 4.OG

Der neue Zugang zum 5. Obergeschoss entsteht durch eine Treppe an der Terrasse zwischen Alt- und Neubau, deren Ausläufer den Eingang zum Para^tex akzentuieren und auf den neuen Gebäudeteil aufmerksam machen. Die aktuellen Bestände der Bibliothek ziehen in den Para^tex um, der nun leere Bibliotheksraum kann als Archiv genutzt werden.

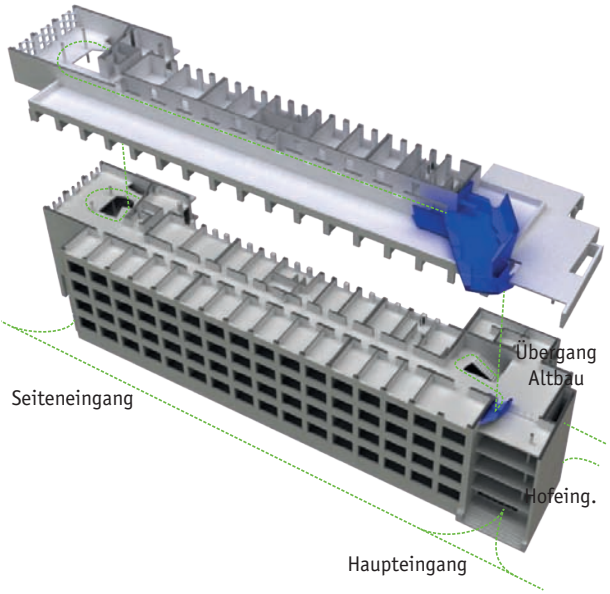


Abb. 54 Sitz im Gebäude + Erschließung

Grundriss 5.OG

Der Baukörper befindet sich auf dem Dach des 4. Obergeschosses und kragt über die Brüstung des Geutebrückbaus in den Stadtraum. Durch einen Ausgang auf das Dach nach Süden wird eine große Dachterasse erschlossen, die intensiv mit Rasen begrünt wird. Weiterhin stehen die Sanitäranlagen des 5. Obergeschosses auch für den para^tex zur Verfügung.

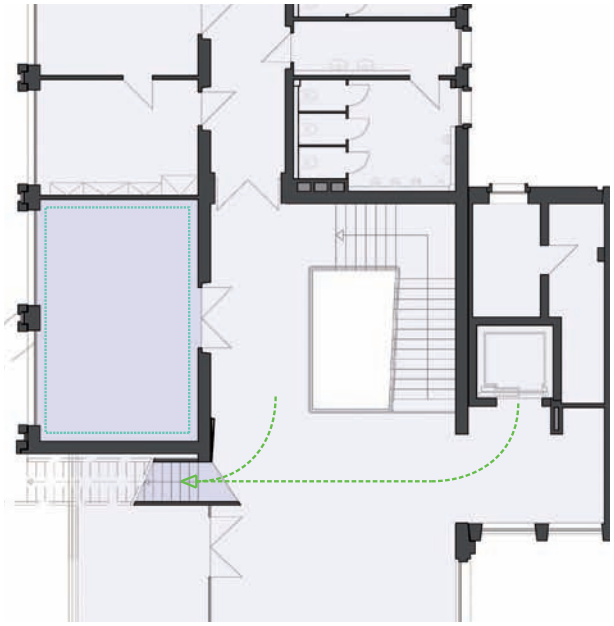


Abb. 55 Grundriss 4. OG

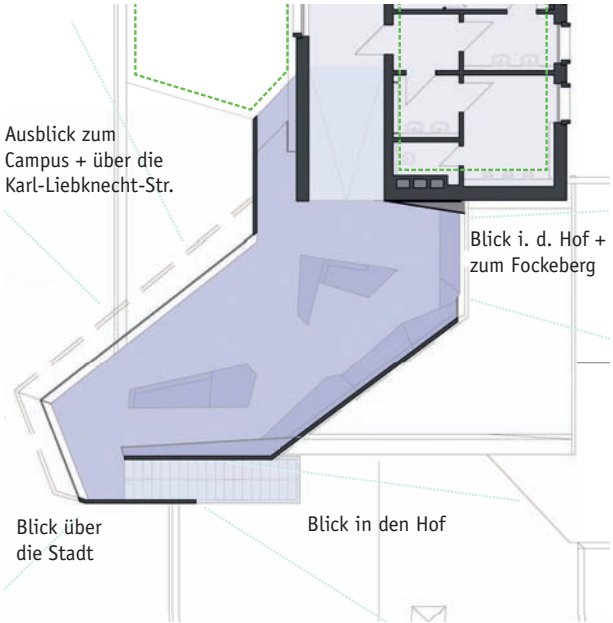


Abb. 56 Grundriss 5. OG

Studentenentwurf II

para^{tex} - parasitäres Bauen
Jana Reise, Adrian Heller

Die Entwurfsarbeit von Jana Reise und Adrian Heller wählt einen anderen Ort am Geutebrück-Bau. Der Parasit wird auf der Südseite des Geutebrück-Neubaus im 5.OG platziert. Seine repräsentative Wirkung entfaltet der Baukörper nicht nur nach Außen sondern auch nach Innen. In der Überarbeitung soll die Außenwirkung besser mit dem Innenraum verknüpft werden. Der Baukörper kann sich auch auf das Dach erweitern.
Die Nutzung des Südtreppenhauses als multifunktionaler Raum für Studenten schafft neue Flächen im ansonsten ungenutzten Bereich. Durch die zentrale Lage mit dem Blick über den HTWK-Campus wird ein Ort der Hochschulkommunikation geschaffen. Im Überarbeitungsschritt werden jetzt zusätzliche Möblierungsprinzipien und -varianten aufgezeigt.
Durch die Entwicklung des Baukörpers vom Außen- in den Innenraum bzw. von Außenwand zu Mobiliar kann das Thema der Betonfertigteile umfassend abgebildet werden.

Der Entwurf

Der Treppenraum des 5. Obergeschosses funktioniert weiter als Durchgangs- und Fluchtbereich, erhält jedoch zahlreiche zusätzliche Funktionen, z. B. mit den Glaswänden zum Treppenauge, an denen Präsentationen abgehalten werden können und die als Whiteboards dienen, vor allem aber als Schallbarriere.

Der Weg des Besuchers wird von der Treppe her an Arbeitsplätzen und der Bar vorbei zum Panoramablick und weiter auf die Dachterrasse und den Besprechungsbereich geleitet, bzw. zum Energiedesign-Institut, welches mit dem Parasiten einen angenehmen Besprechungs- und Pausenbereich erhält.

Durch die unterschiedlichen räumlichen Situationen, die der Parasit ausbildet, sind vielfältige Nutzungsszenarien möglich. So kann er als abgetrennter Besprechungsbereich genauso funktionieren wie als Ort für Empfänge oder andere repräsentative Veranstaltungen.

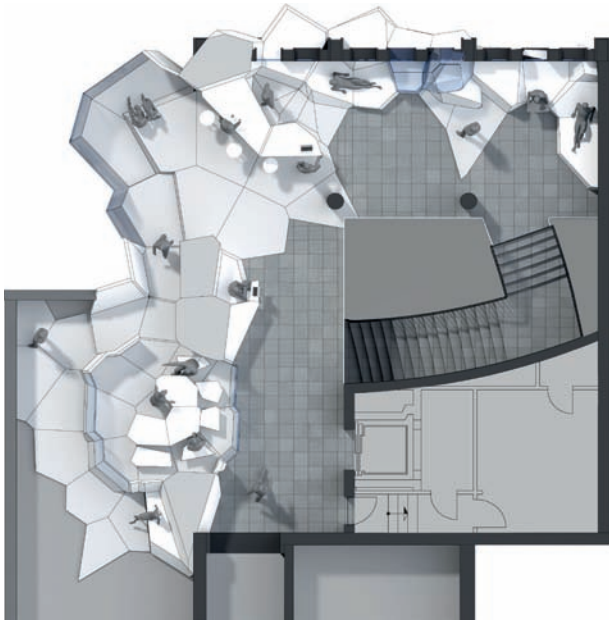


Abb. 57 Grundriss 5. OG

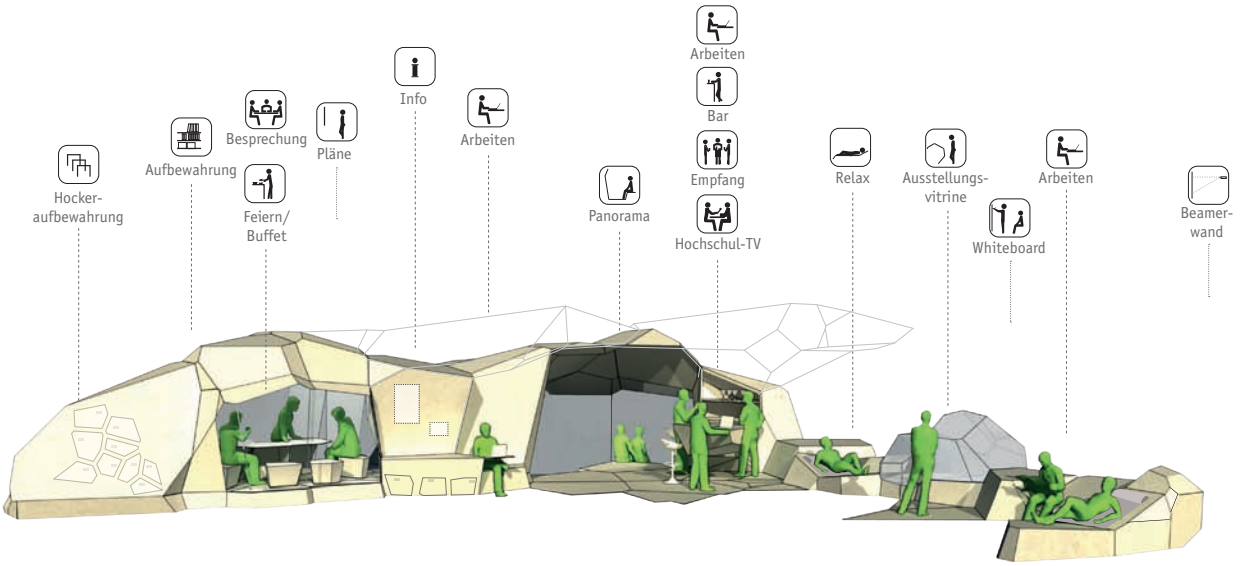


Abb. 58 Funktionsbelegung

Abb. 59 Innenraumperspektive

Abb. 60 Panoramablick Campus

Studentenentwurf III

para^{tex} - parasitäres Bauen
Henry Fenzlein

Die Entwurfsarbeit von Henry Fenzlein wählt keinen konkreten Ort am Geutebrück-Bau. Der Parasit wird vielmehr am gesamten Campus verortet. Seine repräsentative Wirkung entfaltet der Baukörper durch seine einfache, klare Formsprache, dem archetypischen nach Außen und dem minimalistischen nach Innen. Hierbei verbindet er klare Formensprache mit Funktionalität und setzt die gegensätzlichen Materialien (Holz und Beton) bewusst ein, um Kontraste zu schaffen und Gegensätze zu erzeugen. In diesem gezeigten Fall, bildet er eine Miniatursiedlung auf dem Dach des Geutebrück Baues in südlicher Ausrichtung mit Blick auf die Karl-Liebknecht-Straße und dem gesamten Campus der HTWK. Die vielseitigen Nutzungsmöglichkeiten machen diesen Entwurf zu einem potentiellen Demonstrationsbau.

Flexibilität

Größe, Gewicht und Konstruktion der Pavillons sind für den Transport optimiert, somit können sehr flexibel positioniert werden und sind keine „starren" Körper.

Vernetzung

Die fehlende Zusammengehörigkeit der einzelnen Gebäude des HTWK Campus wird durch den wiederkehrenden Symbol-Charakter der Pavillons hergestellt.

Multifunktion

Die Pavillons widmen sich den fehlenden Nutzungen der HTWK, wie Ausstellungsräumen, Info, Ruhezonen, Kombinationen untereinander z. B. Bar und Ausstellung multipliziert die Möglichkeiten.

Typologie

Das Bauwesen, Standbein und Tradition der HTWK ist Leitmotiv für das Entwurfsbild. Der Archetypus Haus, allgemeinverständlich, symbolkräftig als vertrautes Bildnis im Kontext der Hochschule.

Minimalismus

Filigranität und Leichtigkeit sollen dem Material Respekt zollen, die schlanke Bauteildimensionierung wird optimal ausgenutzt. Prinzipien und Material sollen wirken und nicht überblendet werden.

Effizienz

Eine einfache Form ermöglicht die Vervielfältigung der Pavillons, gleichzeitig ist das Gebäude durch die hohen Dämmeigenschaften und die geringe Größe thermisch autark, flexibel, günstig und sehr effizient.

Abb. 61 Entwurfsparameter

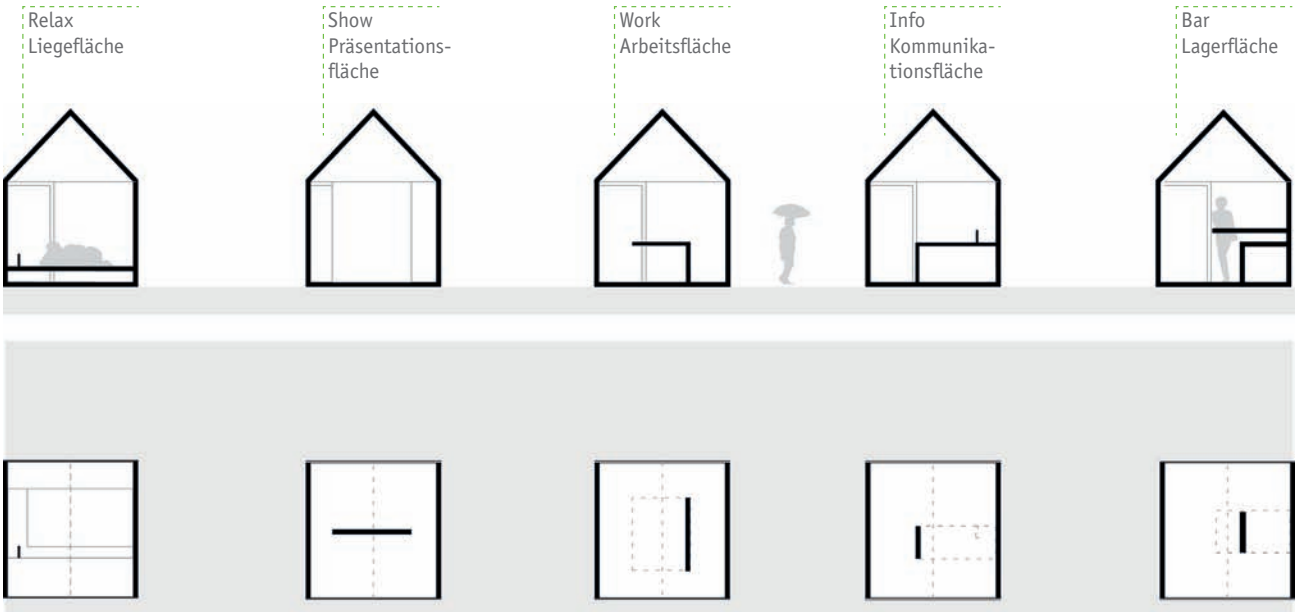


Abb. 62 Funktionsvarianten

Abb. 63 Relaxen, Reflektieren, Lernen

Abb. 64 Info, Aushänge, Fragen, Flyer

4.2 Konstruktiv-technische Betrachtung

Nach dem grundsätzlichen Festlegen der allgemeinen Rahmenbedingungen für das Fassadenelement (Materialien, Elementmaße, Fassadentypologie) erfolgte das stufenweise Erarbeiten von konstruktiven und bauphysikalischen Lösungen. Auftretende Fragestellungen wurden durch Versuche, Simulationen und Diskussionen mit Experten und Herstellern geklärt. Die Auseinandersetzung mit auftretenden Maßtoleranzen stellt sicher, dass ein praxisnahes Element entwickelt werden kann.

4.2.1 Prinzipieller Elementaufbau

Da das Fertigteil eine Sichtbetonoberfläche erhalten soll, werden die innere und äußere Deckschicht in Textilbeton ausgeführt. Dazwischen bilden Vakuumisolationspaneele die Dämmebene. Ein umlaufendes GFK-Rahmenprofil verbindet die einzelnen Schichten miteinander, sodass ein mehrschichtiges Fassadenelement entsteht. Diese Kombination bildet den Ausgangspunkt für detailliertere Untersuchungen, die das Hinzufügen weiterer Funktionsschichten jedoch nicht ausschließen.

Abb. 65 Prinzipieller Aufbau des vaku^{tex}-Fertigteils

4.2.2 Entwicklung eines Detailkataloges

Um eine ganzheitliche Betrachtung zu konstruktiven Lösungsmöglichkeiten für die Bauteilentwicklung anstellen zu können, wurde eine allgemeine, breit angelegte Recherche zu Fassadenkonstruktionen duchgeführt. Diese ergab in erster Stufe eine umfangreiche Sammlung möglicher Varianten sowie das Darstellen realisierbarer Konstruktionsdetails in einem Detailkatalog (siehe Abb. 67), der nach Themenbereichen wie Transportbefestigung, Elementbefestigung, Befestigung der äußeren Platte usw. geordnet wurde.
Im nächsten Schritt wurden die Details einer mehrstufigen Bewertung nach relevanten Kriterien wie Maßtoleranzen, Wirtschaftlichkeit, Statik, Revisionierbarkeit, architektonischen und bauphysikalischen Aspekten unterzogen. Dies geschah im Team und zusammen mit den Kooperationspartnern (im Rahmen des 2. vaku^tex-Workshops 12|2011) sowie externen Spezialisten, sodass auf einen umfangreichen Erfahrungsschatz zurückgegriffen werden konnte. Die Bewertung der einzelnen Konstruktionsdetails beruhte auf den spezifischen Erfahrungen aller Beteiligten. Die Bewertungsrunde ergab für den jeweiligen Themenbereich die Auswahl und Entscheidung für ein Detail.
In den folgenden Abschnitten werden tabellarisch die wichtigsten Kriterien aufgeführt. Für die jeweiligen Details wurden Bewertungen in Form von [+], [o] und [-] vergeben. Bei der Auswahl des jeweils optimalen Details war zum einen die Summe dieser Einzelbewertung von Bedeutung, zum anderen die Priorität einzelner Kriterien. Diese dienten als Grundlage in der weiteren Bearbeitung.

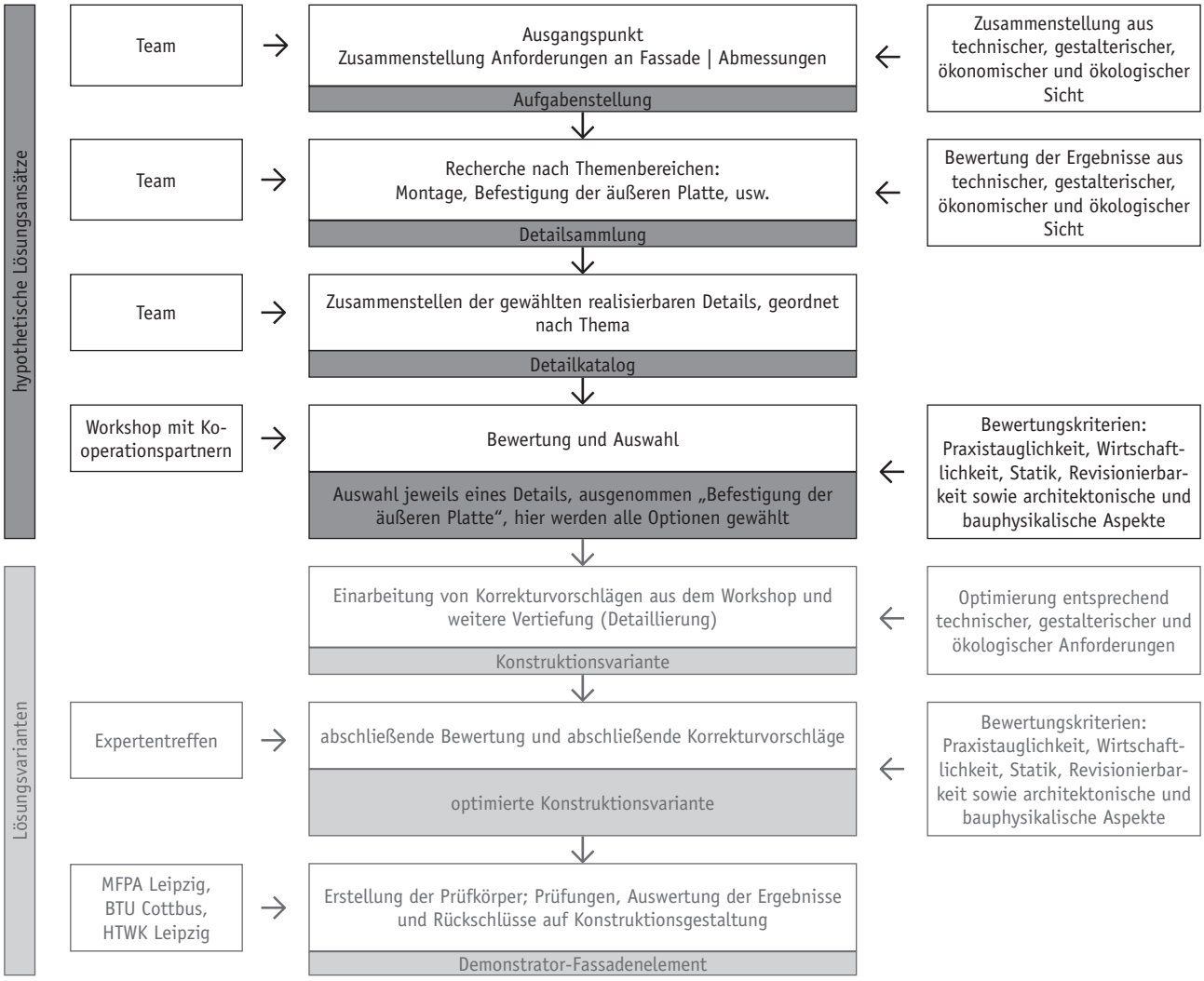


Abb. 66 Darstellung der Schritte zur Entwicklung der optimalen konstruktiven Gestaltung

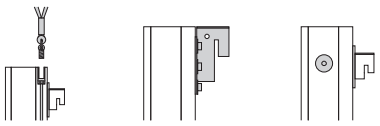
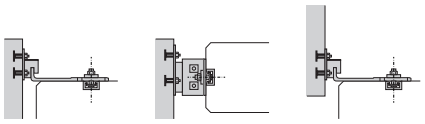
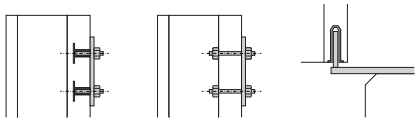
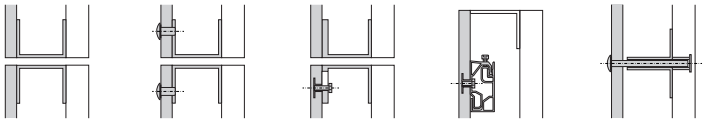
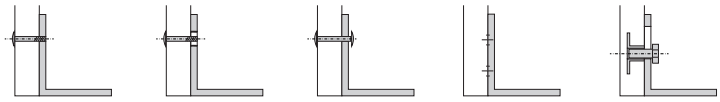
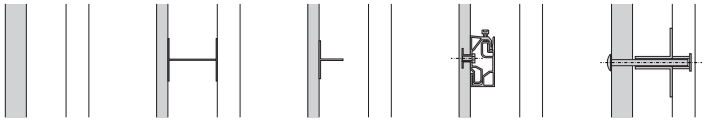
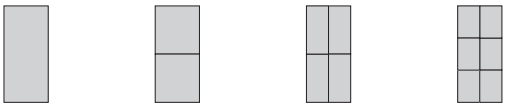
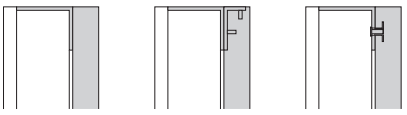
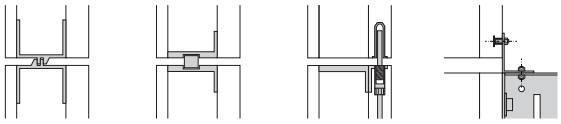
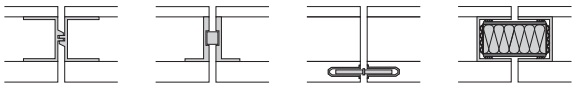
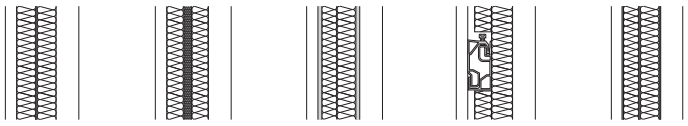
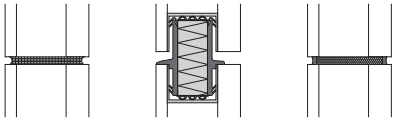
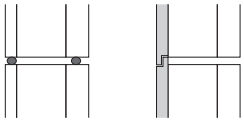
Themenbereich	Detailvarianten
Transportbefestigung	
Befestigung am Bauwerk	
Befestigung des Einhängsystems an den Elementen	
Befestigung der äußeren Platte	
Befestigungsmittel im GFK	
Aussteifung der äußeren Platte	
Formate der Vakuumdämmpaneele	
Lagenausbildung der Vakuumdämmpaneele	
Befestigung an der inneren Platte	
Kopplung der Elemente in der Horizontalfuge	
Kopplung der Elemente in der Vertikalefuge	
Verbesserung des Schallschutzes	
Abdichtung der Anschlussfugen	
Verbesserung des Brandschutzes	

Abb. 67 Detailkatalog

4.2.2.1 Transportbefestigung

Ein wichtiges Ziel war es, den Einbau der Elemente mit geringem Aufwand zu ermöglichen. Deshalb soll die Montage mittels Kran erfolgen, ohne die Notwendigkeit, das Gebäude aufwändig einzurüsten. Im Folgenden werden die Möglichkeiten der Transportbefestigung der Elemente beschrieben.

Detail 1. Transporthülse

In die innere, 3 cm dicke Textilbetonplatte werden beim Betoniervorgang Hülsen eingelegt. Nach dem Transport zur Baustelle werden passende Haken eingeschraubt, in die der Montagekranhaken eingehängt werden kann.

[+] Die Transporthülsen sind zusätzlich zur Kopplung der Elemente nutzbar, allerdings kann für diese Anwendung nicht auf zugelassene Produkte zurückgegriffen werden.

[-] Es fallen zusätzliche Kosten für das Transportsystem an. Die Textilbetonplatte ist zu dünn, um die Hülse mit ausreichend Überdeckung einzubringen (Risiko von Abplatzungen). Am Kran ergibt sich ein Schräghang des Elements, da sich die Transporthülse nicht im Schwerpunkt befindet.

Detail 2. Öffnung an der Elementbefestigung

In der stählernen Elementbefestigung kann ein zusätzliches Loch zum Einhängen des Krankhakens vorgesehen werden.

[+] Aus technischer und wirtschaftlicher Sicht ist diese Variante durch ihren geringen Aufwand optimal. Die Transportbefestigung befindet sich nicht in der Ebene des Fertigteiles, sondern wird separat bedient. Somit werden Beschädigungen vermieden.

[-] Am Kran ergibt sich ein Schräghang.

Detail 3. Einhangmöglichkeit im GFK-Profil

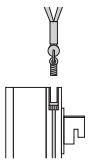
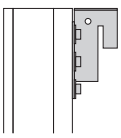
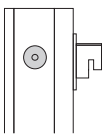
Ein speziell zu entwickelndes Einhängelement bzw. eine Öffnung wird im umlaufenden GFK-Rahmen in mittiger Sandwichebene zum Einhängen des Kranhakens eingebracht.

[+] Es entsteht kaum Schräghang.

[-] Hinsichtlich des Materials ist die Krafteinleitung schwierig. Hinzu kommt der zusätzliche Herstellungsaufwand. Das metallene Einhängelement ist eine zusätzliche Wärmebrücke in der Dämmebene.

Schlussfolgerung

Das Detail 2 *„Öffnung an der Elementbefestigung“* wurde am besten bewertet. Ausschlaggebend sind speziell die statischen und wirtschaftlichen Vorteile. Mit einem sehr geringen technischen und ökonomischen Aufwand ist die Öffnung für den Kranhaken realisierbar.

Bewertungskriterien - negativ o neutral + positiv	Detail 1	Detail 2	Detail 3
			
Technik Statik	-	+	-
Technik Schräghang	o	o	+
Bauphysik Wärmebrücken	+	+	-
Ökonomie Herstellung	-	+	-
Ökonomie Transport + Montage	+	o	o
Technik | Ökonomie Revisionierbarkeit	+	+	+
Ökologie Zusätzliche Graue Energie	-	+	-

4.2.2.2 Befestigung am Bauwerk

Da die Elemente nichttragend sind, können sie unabhängig vom Primärtragwerk mit einem eigenen Raster geplant werden. Beispielsweise kann an eine vorhandene Skelettkonstruktion die Elementbefestigung angebracht werden, die das Eigengewicht und die Windlasten auf die Geschossdecken überträgt. Dazu wurde eine dreidimensional justierbare Befestigungslösung angepasst.

Detail 4. Befestigung auf der Rohdecke; hängende Montage

Auf der Innenseite des Elements werden mittels Flanschmuttern Hakenplatten aufmontiert. Deckenseitig werden Gegenhaken auf Ankerschienen montiert, z. B. Halfen Curtain Wall System.
[+] Ein positiv zu bewertender Sicherheitsaspekt ist, dass das Element im Falle eines Erdbebens oder beim Versagen der Kopplung am Tragwerk hängen bleibt (entsprechende Bemessung für den Erdbebenfall sind erforderlich). Die Befestigung auf der Rohdecke vereinfacht die Montage. Nach dem Einhängen am oberen Fertigteilende wird am unteren Ende die Kopplung direkt ausgeführt, somit ist keine Montagehalterung notwendig.
[-] Die Achse der horizontalen Elementfugen befindet sich etwa auf Höhe der Fertigfußbodenoberkante. Dies muss bei der Gestaltung des Bodenaufbaus berücksichtigt werden. Unebene Oberflächen können zu ungünstigen Toleranzen führen.

Detail 5. Befestigung an der Deckenstirnseite; hängende Montage

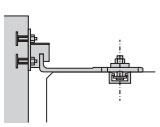
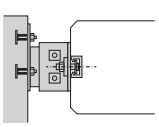
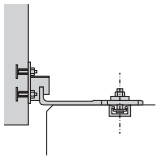
Das Element wird an der Stirnseite der Decke mittels eines elementseitigen und eines deckenseitigen Hakens eingehängt.
[+] Die Höhe der Elementfuge kann flexibler festgelegt werden.
[-] Die Montage wird erschwert, da wenig Platz zwischen Stirnseite der Rohdecke und Fassade zur Verfügung steht. Der verbleibende Zwischenraum wird durch die Einhängkonstruktion unterbrochen, sodass durchgängige Installationen im Zwischenraum schwieriger zu realisieren sind.

Detail 6. Befestigung auf der Rohdecke; stehende Montage

Das Element wird über zwei Haken oder Einschiebsysteme aufgestellt (ähnlich wie Fassadenschuh).
[+] Diese Lastableitung ist günstiger für den Beton (geringere Rissgefahr).
[-] Eine Montagehalterung wird notwendig, da die Kopplung erst in einem späteren Arbeitsschritt erfolgen kann. Hinsichtlich der Sicherheit ist diese Variante ungünstig – im Fall von Erdbeben und Kopplungsversagen fallen die Elemente ab. Die Lage der Fugen unterhalb der Ebene der Deckeoberfläche ist ungünstig, z. B. bei elementgroßen Fenstern.

Schlussfolgerung

Speziell die Unterscheidung *„hängend“* und *„stehend“* war bei der Bewertung bedeutsam. Die unkomplizierte Montage auf der Rohdecke ist positiver einzuschätzen als die Montage an der Deckenstirnseite. Daher wurde das Detail 4 *„Befestigung auf der Rohdecke; hängende Montage“* am positivsten bewertet.

Bewertungskriterien - negativ o neutral + positiv	Detail 4 	Detail 5 	Detail 6 
Technik Standsicherheit	+	+	-
Technik geringe Rissgefahr im Beton	-	-	+
Ökonomie Transport + Montage	+	o	-

4.2.2.3 Befestigung des Einhängsystems an den Fassadenelementen

Durch die Schlankheit der inneren Textilbetonplatte ergab sich die Frage nach der Befestigung der Elementaufhängung. Für diese Anwendung sind keine zugelassenen Produkte auf dem Markt erhältlich. Statische Versuche sind in jedem Fall notwendig.

Detail 7. Flanschmuttern in der inneren Platte
Während des Betoniervorgangs werden Flanschmuttern in die innere Textilbetonplatte eingebracht. Anschließend werden Gewindestangen eingeschraubt und verschweißt, mit denen die Stahlplatte der Elementaufhängung auf die Fertigteile aufgeschraubt wird.
[+] Ein schneller Montageprozess und eine statisch optimale Lösung für den Lastabtrag sind hierbei möglich.
[-] Durch die Flanschmuttern ist der Betoniervorgang aufwendiger.

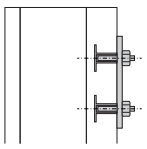
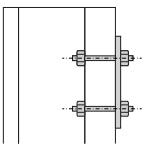
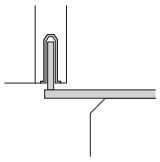
Detail 8. Durchschrauben in der inneren Platte
Die innere Textilbetonplatte wird durchbohrt. Anschließend wird die Stahlplatte der Elementaufhängung mittels durchgehender Gewindestangen und Muttern auf der Fertigteilinnenseite befestigt.
[+] Der Betoniervorgang wird vereinfacht.
[-] Für die Muttern wird mehr Platz hinter der inneren Betonplatte benötigt, was die Schlankheit des Fertigteils jedoch nicht zulässt.

Detail 9. Dornsystem in den Fugen
Auf der Rohdecke werden Flacheisen mit Dornen montiert, auf die das Element mittels einbetonierter Hülsen aufgesteckt wird. Die nach unten weisenden Dorne dienen der Befestigung der unteren Elemente (horizontale Kopplung).
[+] Die Kopplung ist sehr unkompliziert realisierbar, allerdings kann für die schlanken Platten auf kein zugelassenes System zurückgegriffen werden.
[-] Aus statischer Sicht ist diese Variante ungünstig: Die Textilbetonplatten sind zu dünn, um die Horizontalkräfte derart konzentriert aufzunehmen.

Schlussfolgerung
Das Detail 7 *„Flanschmuttern in der inneren Platte“* wurde aus Gründen der Lasteinleitung, der einfachen Montage und der Schlankheit der Fassadenelemente am positivsten bewertet. Allerdings sind die Auszugsversuche an der BTU Cottbus unerlässlich, um Auswahl, Menge und Anordnung mit hinreichender Sicherheit abschätzen zu können. Ein Rückgriff auf marktübliche bzw. zugelassene Systeme ist mangels Verfügbarkeit nicht möglich.

4.2.2.4 Befestigung der äusseren Platte

Um ein gestalterisches Spektrum aufzuzeigen, wurden sowohl sichtbare als auch nicht sichtbare Befestigungsvarianten entwickelt. Die innenliegenden Vakuumpaneele sind durch eine revisionierbare Befestigung zum Teil austauschbar.

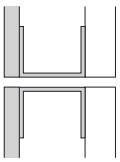
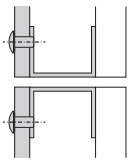
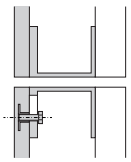
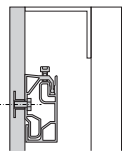
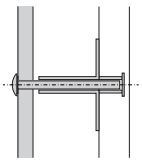
Bewertungskriterien - negativ o neutral + positiv	Detail 7 	Detail 8 	Detail 9 
Technik Statik	o	+	-
Ökonomie Herstellung	o	+	-
Ökonomie Montage	+	-	o
Gestaltung Elementdicke	+	-	-

Detail 10. Verklebung
Die äußere Betonplatte wird auf den GFK-Rahmen geklebt. Somit ist die Variante nicht revisionierbar. Die Befestigungsmittel sind nicht sichtbar.
[+] Ein schlanker Aufbau sowie eine schnelle und unkomplizierte Montage sind realisierbar. Die Nutzung eines zugelassenen Systems (Sika Tack Panel, ohne zusätzliche mechanische Sicherung bis 22 m) ist möglich.
[-] Der Beton darf vor dem Kleben eine bestimmten Restfeuchte nicht überschreiten, eine Trockenzeit von mind. 28 Tagen muss eingehalten werden. Das Trennen der Schichten - und somit das Recycling - wird durch die Verklebung erschwert.

Detail 11. Verschraubung am Rand
Die Verbindung der äußeren Textilbetonplatte mit dem GFK-Rahmen erfolgt über Schraubverbindungen, die an den Fertigteilrändern vorgesehen werden. Diese Variante ist revisionierbar. Die Schraubenköpfe sind von außen sichtbar.
[+] Durch die revisionierbare Verbindung wird der Recyclingprozess erleichtert und das Austauschen der VIPs ermöglicht.
[-] Die punktuelle Schraubverbindung ist für das Material GFK ungünstig und es wird zusätzlich Platz hinter dem Profil benötigt. Das Risiko der VIP-Beschädigung besteht.

Detail 12. Schlüssellöcher
Die mit Einhangelementen versehene äußere Betonplatte wird in die im GFK-Rahmen eingefrästen Schlüssellöcher eingehängt. Die Verbindung ist revisionierbar und von außen nicht sichtbar.
[+] Durch die Befestigung am Rand bleibt das Feld frei von Befestigungspunkten, so werden die VIPs nicht beschädigt und die Formate sind freier wählbar. Durch die revisionierbare Verbindung wird der Recyclingprozess erleichtert und das Austauschen der VIPs ermöglicht.
[-] Um die Fertigteildicke von 11 cm zu erhalten, müssen die VIPs an den Einhangstellen ausgespart werden, da Platz hinter dem Profil für das Einhängen notwendig ist.

Detail 13. Agraffensystem
Die mit Agraffenschienen versehene äußere Textilbetonplatte wird in das mit Tragprofilen versehene Fertigteil eingehängt. Die Befestigung des Tragprofils am GFK-Profil kann z. B. mittels verschraubter Winkel erfolgen. Die Variante ist revisionierbar und die Befestigung von außen nicht sichtbar.

Bewertungskriterien - negativ o neutral + positiv	Detail 10	Detail 11	Detail 12	Detail 13	Detail 14
					
Technik Statik	+	o	o	+	-
Technik Brandschutz	-	+	+	+	+
Technik Recycling	-	+	o	o	o
Technik | Ökonomie Herstellung	+	o	-	-	-
Technik | Ökonomie Revisionierbarkeit	-	+	o	o	+
Ökologie Wärmebrücken	o	o	o	-	+
Ökologie Graue Energie	+	o	o	-	-
Gestaltung Verdeckte Befestigung	+	-	+	+	-

[+] Durch die revisionierbare Verbindung wird der Recyclingprozess erleichtert und das Austauschen der VIPs ermöglicht. Die Variante ist schallschutztechnisch günstig (getrenntes Schwingen).
[-] Eine VIP-Lage muss in den Bereichen der Agraffenschienen ausgespart werden, was ungünstig für den Wärmeschutz ist.

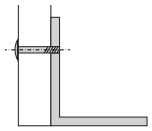
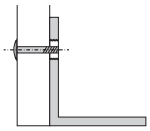
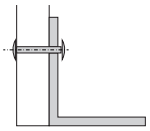
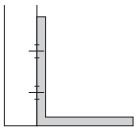
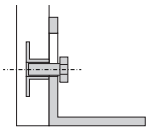
Detail 14. Verschraubung im Feld
Mittels spezieller Hülsen (mit tellerförmigen Füßen) wird die äußere Textilbetonplatte im Feld auf das Fertigteil aufgeschraubt. Die Verbindung ist revisionierbar, die Schraubenköpfe sichtbar.
[+] Die Revisionierbarkeit erleichtert das Recycling und den Austausch der VIPs.
[-] Die Schraubverbindung ist statisch nur realisierbar, wenn die Dicke des Textilbetons erheblich erhöht wird. Durch die Anordnung im Feld sind die VIP-Formate nicht frei wählbar. Durchstoßpunkte ergeben ein größeres Ausfallrisiko der VIPs bzw. sind innerhalb der Paneele nicht realisierbar.

Schlussfolgerung
Die fünf Details wurden als sehr unterschiedlich eingeschätzt, allerdings wird an dieser Stelle keine Auswahl vorgenommen. Jedes Detail hat seine eigenen Qualitäten und noch zu lösenden Probleme. Stellvertretend wird das Detail 10 *„Verklebung“* im Kapitel *„Lösungsvariante“* weiter bearbeitet und geprüft. Die vier anderen Vorschläge sind - nach ähnlicher Bearbeitung - im gleichen Maße realisierbar und für die vaku^tex-Fassade einsetzbar.

4.2.2.5 Befestigungsmittel im GFK
Um verschiedene Befestigungsvarianten der äußeren Platte mit dem GFK-Profil realisieren zu können, wurden mögliche Befestigungsformen untersucht und im Folgenden zusammengestellt.

Detail 15. Selbstbohrschraube
Durch Einsatz einer Selbstbohrschraube kann eine sichtbare, allerdings nicht revisionierbare Verbindung geschaffen werden.
[+] Die Erstellung dieser Verbindung ist schnell und unkompliziert.
[-] In das selbst geschnittene Gewinde sollte nur einmal eingedreht werden, bei einer eventuellen Revisionierung ist die optimale Funktion nicht mehr gewährleistet.

Detail 16. Rampamuffe
Rampamuffen haben zwei Gewinde - ein äußeres für das Eindrehen der Muffe in das GFK-Profil und ein inneres zum Eindrehen der Schraube, welche die äußere Textilbetonplatte befestigt.
Die Verbindungsmöglichkeit ist sichtbar und revisionierbar.
[+] Die Textilbetonplatte kann mehrmals ab- und angeschraubt werden, somit können die Dämmlagen ausgetauscht werden.
[-] Für die Rampamuffe ist eine Mindestprofildicke notwendig. Da die statisch notwenige Flanschdicke des Profils unter dieser Dicke liegt, müsste eine Verdickung des Profils erfolgen. Auch das gesamte Fertigteil würde dicker werden.

Bewertungskriterien - negativ o neutral + positiv	Detail 15	Detail 16	Detail 17	Detail 18	Detail 19
					
Technik Statik	o	o	o	+	-
Technik | Ökonomie Herstellung	o	-	o	+	-
Technik | Ökonomie Revisionierbarkeit	o	+	o	-	+
Gestaltung Verdeckte Befestigung	-	-	-	+	+

Detail 17. Nietverbindung
Nieten schaffen eine sichtbare sowie revisionierbare Verbindung, die durch Zerstörung der benutzten und Einsatz einer neuen Niete zustande kommt.
[+] Das Nieten ist für GFK-Profile eine sehr gebräuchliche Verbindungsart und günstig für das Material.
[-] Die Nietverbindung schließt nicht bündig mit der Oberfläche des GFK-Profils ab, sondern benötigt zusätzlich Platz hinter dem Profil.

Detail 18. Verklebung
Durch die Verklebung der Textilbetonplatte auf einen GFK-Rahmen wird eine nicht sichtbare und nicht revisionierbare Verbindung geschaffen.
[+] Die Verbindung ist relativ schnell und unkompliziert erstellbar. Die Lasteinleitung in die GFK-Profile ist optimal. Ungleichmäßige Dicken der Betonplatte (Toleranzen) können über die Dicke der Klebefuge ausgeglichen werden. Die Verklebung eignet sich besonders für das Material GFK.
[-] Die Verbindung ist nicht revisionierbar. Über 22 m Höhe muss zusätzlich mechanisch befestigt werden.

Detail 19. Einhangöffnung
Durch schlüssellochförmige Einhangöffnungen und einbetonierte Haken oder Schrauben an der Textilbetonplatte kann eine nicht sichtbare, aber revisionierbare Verbindung realisiert werden.
[-] Die großen Öffnungen und der Lasteintrag durch das Einhängen sind für das GFK-Profil ungünstig.

Schlussfolgerung
Die Potentiale der Varianten sind sehr unterschiedlich verteilt. Dennoch wurde das Detail 18 *„Verklebung“* als am besten eingeschätzt, zum einen aus optischen Gründen - die Befestigung ist nicht sichtbar - und zum anderen aus statischen Gründen. Für die Materialeigenschaften des GFK-Profils ist diese Verbindung optimal.

4.2.2.6 Aussteifung der äusseren Platte

Die Aussteifung der äußeren Textilbetonplatte kann direkt durch die Befestigungsmittel realisiert werden (Detail 23 und 24) oder durch zusätzliche Maßnahmen erfolgen.

Detail 20. Keine Zusatzmittel
Um eine Aussteifung ohne Zusatzmittel zu erreichen, ist rechnerisch eine Textilbetonstärke von ca. 2 cm erforderlich. Dieser Wert ist noch nicht mit einem Sicherheitsbeiwert beaufschlagt, was zu einer Dicke von ca. 3 cm führen würde.
[+] Das Fertigteilinnere bleibt ungestört, die VIP-Formate sind frei wählbar und das Risiko der Beschädigung sinkt.
[-] Durch die stärkere Plattendicke sind die angestrebten 11 cm Gesamtdicke für das Bauteil nicht erreichbar.

Detail 21. Durchgängiges GFK-Profil
Ein vertikal verlaufendes, sowohl mit der inneren als auch mit der äußeren Textilbetonplatte verklebtes I-Profil aus GFK übernimmt die Aufgabe der Aussteifung.
[+] Die VIPs können beim Verklebungsvorgang von einer offen gelassenen Seite eingeschoben werden, so verringert sich das Risiko von Beschädigungen an den Paneelen. Aus statischer Sicht ist für das Demonstratorelement mit 320 x 150 cm ein vertikal laufender Aussteifer ausreichend.
[-] Es entsteht eine 320 cm lange zusätzliche Wärmebrücke. Durch die beidseitige Verklebung der GFK-Profile wird das Trennen der Materialien für das Recycling erschwert. Diese Aussteifungsmöglichkeit ist nicht für revisionierbare Varianten anwendbar.

Detail 22. GFK-Stege horizontal oder vertikal
Die Aussteifung kann durch horizontale oder vertikale GFK-Profile in T-Form realisiert werden, der Steg reicht dabei nur bis in die erste VIP-Lage. In statischen Berechnungen wurden die unterschiedlichen Möglichkeiten der Anordnung, Anzahl und Abmessungen der T-Profile zusammengestellt. Beispielsweise könnten fünf horizontal verlaufende T-Profile mit einer Höhe von 34 mm gleichmäßig über die 320 cm verteilt werden, wobei eine Stegdicke von 5 mm vorzusehen ist.
[+] Die innere VIP-Lage bleibt ungestört, die Formate sind frei wählbar.

[-] Die Formate der VIPs sind in der äußeren Ebene nicht frei wählbar, sondern müssten entsprechend der GFK-Aussteifer angepasst werden.

Detail 23. Agraffenschiene
Die für die Befestigung der äußeren Textilbetonplatte zuständigen Agraffen- und Tragprofile übernehmen zugleich die aussteifende Funktion.
[+] Die doppelte Funktion des Agraffensystems ist sehr vorteilhaft.
[-] Aufgrund der Schraubverbindung zwischen Agraffe und Textilbetonplatte entsteht kein Verbundquerschnitt, was statisch ungünstiger ist. Eine kontinuierliche Verbindung ist aufgrund der Zwängungsspannungen (die Aluminiumprofile haben einen doppelt so großen Temperaturausdehnungskoeffizienten) nicht realisierbar. Das Aushängen wird durch die geringe Fugengröße (1 cm) erschwert.

Detail 24. Schrauben im Feld
Die äußere Platte ist mit dem restlichen Element mittels Schrauben und speziell entwickelter Hülsen verbunden. Diese Verbindungsmittel dienen gleichzeitig der Aussteifung der äußeren Platte.
[+] Es sind keine weiteren Aussteifer notwendig.
[-] Mit den gewählten Bauteildicken ist diese Aussteifungsvariante aus statischer Sicht nicht umsetzbar. Es müssen Anpassungen sowie die Entwicklung geeigneter Hülsen erfolgen.

Schlussfolgerung
Die Varianten 20 bis 23 haben verschiedene Potentiale. Da die Wahl des Aussteifungssystems in engem Zusammenhang mit dem gewählten Befestigungssystem der äußeren Platte steht, wird deshalb das Detail 21 *„Durchgängiges GFK-Profil“* gewählt. Dieses kann in der Konstruktionsvariante *„Verklebung“* eingesetzt werden, welche stellvertretend weiterbearbeitet wird.

4.2.2.7 Formate der Vakuumdämmpaneele

Die 320 cm hohen und 150 cm breiten Elemente können mit verschiedenartig dimensionierten VIPs versehen werden. Da die Herstellung der Paneele noch manuell erfolgt, ergeben sich hinsichtlich der Formatwahl Einschränkungen.

Bewertungskriterien - negativ o neutral + positiv	Detail 20	Detail 21	Detail 22	Detail 23	Detail 24
Technik Statik	o	+	+	+	-
Technik Schallschutz	+	-	+	+	o
Technik Revisionierbarkeit	+	-	+	+	+
Technik Recycling	+	-	o	+	o
Technik | Ökonomie Herstellung	+	o	o	-	-
Technik | Ökonomie Montage + Rückbau	-	-	-	+	+
Ökologie Wärmebrücken	+	o	-	-	+
Ökologie Graue Energie	o	+	+	-	o
Gestaltung Elementdicke	-	+	+	+	-
Gestaltung nicht sichtbare Aussteifung	+	+	+	+	-

Detail 25. Ein Vakuumpaneel pro Lage
Die Größe des VIPs entspricht den Maßen des Elementes abzüglich der Stegdicke der GFK-Profile.
[+] Da keine Paneelstöße im Feld vorhanden sind, werden Wärmebrücken reduziert. Ökonomisch vorteilhaft ist, dass die Herstellungsprozesse im Verhältnis zur Fläche minimiert sind.
[-] Das beim Zusammenbau eingeschobene Paneel ist nicht revisionierbar (Ausnahme: Abnehmbarer Rahmen). Jedoch sind Großformate derzeit durch die manuellen Herstellungsprozesse nur begrenzt sinnvoll, da das Handling der Paneelen nur noch schwer möglich ist.

Detail 26. Zwei Vakuumpaneele pro Lage
Eine Lage besteht aus zwei 160 cm x 150 cm großen Vakuumisolationspaneelen.
[+] Zur Herstellung sind relativ wenig Arbeitsschritte notwendig. Die Paneelgröße ist für eine Person gerade noch handlich.
[-] Das Revisionieren der VIPs ist im GFK-I-Profil nicht möglich (Ausnahme: Abnehmbarer Rahmen).

Detail 27. Vier Vakuumpaneele pro Lage
Die Dämmlage wird mit vier 75 cm x 160 cm großen Paneelen erstellt.
[+] Zur Herstellung sind relativ wenige Arbeitsschritte notwendig. Die Größe ist für eine Person handlich, aber nicht so ökonomisch wie Detail 26.
[-] Der Aufwand ist durch die vielen Arbeitsschritte unökonomisch und technisch ungünstiger.

Detail 28. Sechs Vakuumpaneele pro Lage
Eine Anordnung von sechs Paneelen in den Abmaßen 75 cm x 106 cm bilden eine Dämmlage.
[+] Das Revisionieren der Paneele ist möglich. Falls ein Schaden an einem Paneel erfolgt, z. B. durch Anbohren, kann dieser auf eine geringe Fläche eingeschränkt werden.
[-] Zur Herstellung sind viele Arbeitsschritte notwendig und es besteht ein höheres Beschädigungsrisiko. Es ergeben sich höhere lineare Wärmebrücken.

Schlussfolgerung
Detail 27 *„Vier Vakuumpaneele pro Lage“* eignet sich aufgrund der möglichen Revisionierbarkeit und der günstigen manuellen Herstellungsformate zur Weiterbearbeitung. Die linearen Wärmebrücken im Feld können durch eine zweilagige Verlegung der Paneele stark reduziert werden.

4.2.2.8 Lagenausbildung der Vakuumdämmpaneele

Die erforderliche Dicke der VIPs kann durch einlagige oder zweilagige Verlegung realisiert werden. Beide Varianten sind in der Praxis üblich.

Detail 29. Einlagige Verlegung
Die notwendige Dämmstoffdicke wird mittels einlagig verlegter Paneele realisiert.
[+] Der technische und ökonomische Aufwand bei der Herstellung ist gering. Durch das kleinere Ver-

Bewertungskriterien - negativ o neutral + positiv	Detail 25	Detail 26	Detail 27	Detail 28
Technik Lebensdauer	+	o	o	-
Technik Probleme durch Schäden	-	o	o	+
Technik | Bauphysik Wärmebrücken	+	o	-	-
Technik | Ökonomie Revisionierbarkeit	-	-	o	+
Technik | Ökonomie Herstellung	-	+	o	o

hältnis von Oberfläche zu Volumen ist das Risiko geringer, dass Luftmoleküle eindiffundieren.
[-] Toleranzen bei der Herstellung ergeben im Stoßbereich größere Wärmebrücken. Bei Beschädigung des Paneels verschlechtert sich der U-Wert durch die Belüftung erheblich.

Detail 30. Zweilagige Verlegung, direkter Stoß
Die erforderliche Dämmstoffdicke wird durch eine zweilagige, direkt gestoßene Verlegung erreicht.
[+] Sollte ein Paneel belüftet werden, gewährleistet das benachbarte Paneel einen Mindestwärmeschutz. Es ergibt sich damit ein besserer Wärmedurchgangskoeffizient als im Beschädigungsfall einer einlagigen Ausführung.
[-] Durch den direkten Stoß werden Toleranzen in den Abmaßen nicht ausgeglichen. Das größere Verhältnis von Oberfläche zu Volumen senkt die Lebensdauer. Der direkte Stoß ergibt größere Wärmebrücken.

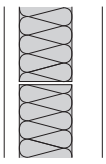
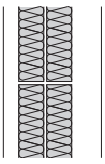
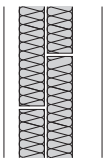
Detail 31. Zweilagige Verlegung, versetzter Stoß
Die erforderliche Dämmstoffdicke wird durch zweilagige Verlegung erreicht. Die entstehenden Stöße in den Lagen werden versetzt angeordnet, sodass eine Überlappung entsteht.
[+] Wärmebrücken, die durch Maßtoleranzen beim direkten Stoß nicht vermeidbar sind, werden durch das Versetzen der Stöße stark reduziert. Bei der zweilagigen Verlegung bleibt auch beim Ausfall eines Paneels ein Mindestwärmeschutz erhalten.
[-] Die zweilagige Verlegung ist kosten- und arbeitsintensiver als die einlagige Ausführung.

Schlussfolgerung
Durch die Möglichkeit, Toleranzen besser ausgleichen zu können, Wärmebrücken der Paneelstöße zu minimieren und bei Beschädigung eines Paneels den Mindestwärmeschutz aufrecht zu erhalten, fiel die Entscheidung zugunsten des Details 31 *„Zweilagige Verlegung, versetzter Stoß“*.

4.2.2.9 Befestigung an der inneren Platte

Die Profile aus glasfaserverstärktem Kunststoff, die das Elementinnere rahmen, müssen kraftschlüssig an der inneren Textilbetonplatte befestigt werden. Dazu sind verschiedene Verbindungsformen möglich.

Detail 32. Verklebung der GFK-Profile auf Textilbeton
Die GFK-Profile werden nach entsprechender Vorbehandlung (Anschleifen, Primer) auf die Textilbetonplatte aufgeklebt.
[+] Ein uneingeschränkter Betonierablauf ist möglich, Unebenheiten der Textilbetonoberfläche können durch die Klebefugendicke ausgeglichen werden.
[-] Die Aushärtungszeit des Klebers (1 bis 2 Tage) muss im Bauablauf eingeplant werden. In Deutschland besteht noch Skepsis gegenüber geklebten Verbindungen in Fassadenbauteilen.

Bewertungskriterien - negativ o neutral + positiv	Detail 29 	Detail 30 	Detail 31 
Technik Toleranzen	-	-	+
Technik Beschädigungen	-	+	+
Technik | Bauphysik Wärmebrücken	-	-	+
Technik |Ökologie Lebensdauer	+	-	-
Ökonomie Herstellung	+	-	-

Detail 33. Verklebung von GFK-Profil auf GFK-Profil
Während des Betonierens der inneren Textilbetonplatte wird ein GFK-Profil eingelegt. So kann auf einfache und schnelle Weise eine saubere Klebefläche geschaffen werden.
[+] Die Verklebung kann noch während des Trocknungsprozesses der Betonplatte stattfinden. Die Maßnahmen der Vorbehandlung sind weniger aufwendig.
[-] Das Einbetonieren des zusätzlichen GFK-Profils erschwert den Betonierprozess (z. B. beim Einlegen des Textils).

Detail 34. Verschraubung
Durch das Einlegen von Flanschmuttern während des Betonierens können die GFK-Profile auf den Textilbeton geschraubt werden.
[+] Der Aufwand der Vorbehandlung und eine Wartezeit, z. B. zur Trocknung des Klebers, entfallen.
[-] Vor dem GFK-Profil wird Platz benötigt, der Schraubenkopf kann zu Beschädigungen an den VIPs führen. Vertiefungen für Senkkopfschrauben hingegen schwächen den Profilquerschnitt, eine Erhöhung der Materialstärke benötigt zusätzlichen Platz.

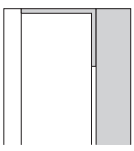
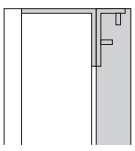
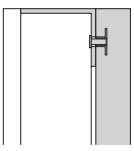
Schlussfolgerung
Das Detail 32 *„Verklebung der GFK-Profile auf Textilbeton“* zeigt viele Vorzüge (Ausgleich von Unebenheiten, keine Störung des Betonierablaufes usw.) und wird daher weiter bearbeitet.

4.2.2.10 Kopplung der Elemente in der Horizontalfuge

Ein eingehängtes Fassadenelement muss an seinem unteren Ende am Bauwerk befestigt werden. Diese Kopplung in der horizontalen Fuge überträgt 50 % der Windlasten. Im Folgenden werden mögliche Kopplungsformen erläutert.

Detail 35. Verzahnung
Die stranggepressten GFK-Profile werden mit einer zahnförmigen Kopplungsgeometrie versehen. Beim Einhängen des oberen Fertigteils wird die Kopplung durch Verzahnung wirksam. Ein genaues Einpassen erfolgt über die Justiermöglichkeit der Elementbefestigung.
[+] Diese Form der Kopplung kann sowohl horizontal als auch vertikal erfolgen. Es sind keine zusätzlichen Konstruktionen notwendig.
[-] Eine Realisierbarkeit der Kopplung setzt voraus, dass keine Toleranzen bei der Erstellung der Fertigteile auftreten. Da dies ist nur schwer umsetzbar ist, schätzen die Kooperationspartner diese Kopplungsart als nicht praxistauglich ein. Auch aus statischer Sicht ist die Lastübertragung in den minimierten GFK-Zähnen fraglich.

Detail 36. Kopplungsklötze
In die entsprechend ausgeformten GFK-Profile werden abschnittsweise Kopplungsklötze eingesetzt, auf die die GFK-Profile des jeweils oberen Elementes beim Einbau gesetzt werden.
[+] Diese Kopplungsart kann auch in der vertika-

Bewertungskriterien - negativ o neutral + positiv	Detail 32	Detail 33	Detail 34
			
Technik Statik	+	+	-
Technik Toleranzen	+	+	-
Technik | Ökonomie Herstellung Betonplatte	+	-	o
Technik | Ökonomie Herstellung Bauelement	-	+	+
Ökologie Graue Energie	+	-	o

len Fuge umgesetzt werden.
[-] Durch die nötige Handarbeit wird die Montage erschwert. Maßtoleranzen können nicht aufgenommen werden. Die Koppelungsklötze müssen separat mitgeführt werden, was zu einem erhöhten logistischen Aufwand führt.

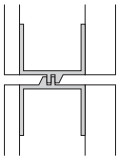
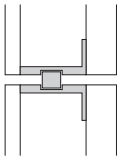
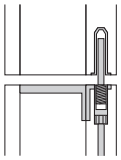
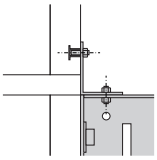
Detail 37. Dornsystem
Im oberen Teil der inneren Textilbetonplatte werden Hülsen eingelegt. Die in diese Hülsen eingeschraubten Montagehaken werden nach dem Einbau des Elements entfernt und durch Kopplungsdorne ersetzt. Die zur Kopplung notwendigen Öffnungen an den unteren Plattenenden werden ebenfalls über einbetonierte Hülsen realisiert.
[+] Die Hülsen können sowohl für die Montage als auch für die Kopplung verwendet werden.
[-] Die Dicke der Textilbetonplatte ist nicht ausreichend, um eine Hülse einzulassen. Es besteht eine erhöhte Riss- und Abplatzgefahr. Für den Textilbeton ist die punktuelle Kopplung aus statischer Sicht ungünstig.

Detail 38. Kopplung an der Elementbefestigung
An den Elementbefestigungen werden zusätzlich Winkel aufgeschraubt, durch die das obere mit dem unteren Fertigteil nach dem Einhängen verbunden wird. Dafür müssen beim Betonieren im unteren Teil der inneren Textilbetonplatte Flanschmuttern eingebracht werden.
[+] Durch das Vorsehen von Langlöchern können Toleranzen ausgeglichen werden. Die Variante fügt sich zudem sehr gut in den Montageablauf ein.
[-] Die Elementbefestigung muss möglichst bündig an der oberen Kante der Fertigteile angebracht werden, nur so kann die Länge der Befestigungswinkel möglichst kurz gehalten und ein Fußbodenaufbau ohne sichtbare Kopplung realisiert werden. Die Fugenachse ist damit stets vordefiniert.

Schlussfolgerung
Hinsichtlich statischer und montagetechnischer Aspekte ist Detail 38 *„Kopplung an der Elementbefestigung“* am günstigsten einzuschätzen. Mit diesem Detail können Toleranzen ausgeglichen und Bewegungen aufgenommen werden. Die Erstellung der Kopplung ist auf einfachem Wege realisierbar.

4.2.2.11 Kopplung der Elemente in der Vertikalfuge

Da es in der vertikalen Fuge zu minimalen Bewegungen kommen kann, muss die Kopplung zwischen den Elementen so hergestellt werden, dass Bewegungen (kleiner 2 mm) durch ein flexibles Abdichtungssystem aufgenommen oder unterbunden werden können.

Bewertungskriterien - negativ o neutral + positiv	Detail 35	Detail 36	Detail 37	Detail 38
				
Technik Statik	o	o	-	+
Technik Toleranzen	-	-	-	+
Technik Revisionierbarkeit	o	o	-	+
Technik | Ökonomie Herstellung	o	o	-	+
Technik | Ökonomie Montage + Rückbau	-	-	-	+
Gestaltung Fußbodenaufbau	+	+	+	-

Detail 39. Verzahnung
Siehe Erläuterungen und Beurteilung zu Detail 35.

Detail 40. Koppelklötze
Siehe Erläuterungen und Beurteilung zu Detail 36.

Detail 41. Dornsystem
An den seitlichen Rändern der inneren Textilbetonplatte werden Hülsen eingelegt. Danach erfolgt einseitig das Einschrauben von Kopplungsdornen, die beim Einbau in die Hülsen des Nachbarelementes eingeschoben werden.
[-] Es kann auf kein bestehendes und für diese Anwendung zugelassenes System zurückgegriffen werden. Die Dicke der Textilbetonplatte ist nicht ausreichend, um eine Hülse einzulassen, wodurch eine erhöhte Riss- und Abplatzgefahr besteht. Für den Textilbeton ist die punktuelle Kopplung aus statischer Sicht ungünstig.

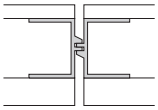
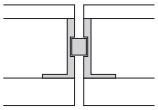
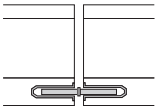
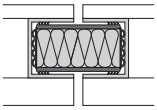
Detail 42. Fugenverbinder
In den vertikalen Fugen werden VIP-Sonderstücke angeordnet, die mit einem mehrstufigen Dichtungssystem versehen sind. Dazu werden die Rand-C-Profile aus GFK so gefertigt, dass eine Nut entsteht. Diese nimmt den leistungsstarken Fugendicht- und -dämmstreifen auf, der einfach zu montieren ist.
[+] Die Kopplung in der Elementfuge erfüllt gleichzeitig Dicht- und Dämmfunktionen.
[-] VIP-Sonderteile müssen angefertigt werden.

Schlussfolgerung
Das Detail 42 *„Fugenverbinder“* stellt eine leistungsstarke Multifunktionslösung für die Fugen dar und wird deshalb im nächsten Schritt weiterbearbeitet. Die maximalen Bewegungen benachbarter Elemente liegen unter 2 mm und sind damit gering. Diese kann der alterungsresistente Fugenverbinder aufnehmen, sodass Beschädigungen am Dichtsystem vermieden werden können.

4.2.2.12 Verbesserung des Schallschutzes

Das nur 11 cm dicke Bauteil muss für einen vielseitigen Einsatz einen guten Schalldämmwert aufweisen. Um die schlanke und relativ leichte Konstruktion dahingehend zu optimieren, werden verschiedene Möglichkeiten beleuchtet, die das Schalldämmmaß erhöhen können. Durch das Vorsehen von zwei unterschiedlich dicken Paneel- sowie Textilbetonlagen wird die Erzeugung von Eigenfrequenzen in allen Varianten reduziert.

Detail 43. Metallplatte
Eine Möglichkeit, ein verbessertes Schalldämmmaß zu erhalten ist, das Gewicht der Elemente zu erhöhen. Dazu wird zwischen die beiden VIP-Lagen eine Metallplatte (z. B. Stahl) eingebracht.
[+] Da bereits dünne Metallschichten eine Wirkung zeigen, wird die Gesamtdicke von 11 cm nur minimal erhöht.
[-] Das zusätzliche Gewicht erschwert die Mon-

Bewertungskriterien - negativ o neutral + positiv	Detail 39	Detail 40	Detail 41	Detail 42
				
Technik Statik	o	o	-	+
Technik Toleranzen	-	-	-	+
Technik | Bauphysik Schlagregenschutz	o	o	-	+
Technik | Ökonomie Herstellung	o	o	-	+
Technik | Ökonomie Montage + Rückbau	o	o	-	+

tage, durch die Metallplatte wird der Anteil der grauen Energie der vaku[tex]-Fertigteile vergrößert und dadurch die Ökobilanz verschlechtert.

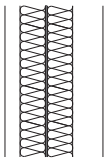
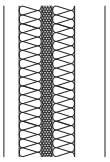
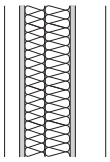
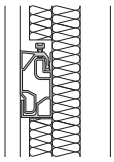
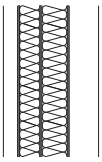
Detail 44. Mineralwolleschicht
Zwischen die VIP-Lagen wird zusätzlich eine 1 cm dicke Schicht Mineralwolle eingebracht.
[+] Die weichfedernde Lage trennt die harten Dämmpaneele und wirkt schallabsorbierend.
[-] Eine Mindestdicke von 1 cm ist bei der Mineralwolle erforderlich, um eine nennenswerte Schalldämmwirkung zu erzielen. Damit erhöht sich aber auch die Dicke des Fertigteils.

Detail 45. Luftschichten und unterschiedliche VIP-Dicken
Zwischen den Textilbetonplatten und den jeweiligen VIPs werden Luftschichten vorgesehen. Diese wirken entkoppelnd, wodurch die Lagen nicht gemeinsam schwingen.
[+] Aus wirtschaftlicher, ökologischer und herstellungstechnischer Sicht ist dies die beste Lösung.
[-] Es ist anzunehmen, dass die Schallschutzwirkung der Luftschichten gegenüber der einer Metallplatte oder Mineralwollschicht geringer ist.

Detail 46. Agraffen mit Zellkautschukeinlage
Für die Befestigung der äußeren Textilbetonplatte wird eine Agraffenvariante gewählt. Zusätzliche Entkopplung erfolgt durch Zellkautschukeinlagen an allen Auflagepunkten der Agraffenprofile.
[+] Die äußere Textilbetonplatte kann frei schwingen und überträgt den Schall nur an den weich gefederten Auflagepunkten des Agraffensystems. Es wird von einer wesentlichen Erhöhung des Schalldämmmaßes ausgegangen.
[-] Montage- und Kostenaufwand sind höher einzustufen. Die oberer Dämmlage wird geschwächt.

Detail 47. Gummilagen
Auf die VIPs werden vollflächig 2 mm dicke Gummilagen aufgeklebt.
[+] Dem relativ geringen Aufwand steht eine große Wirksamkeit gegenüber. Die Gummilage ist ein zusätzlicher Schutz für die VIPs.
[-] Die als Puffer dienende Luftschicht zwischen Textilbetonplatte und VIP wird jeweils um 2 mm schmaler.

Schlussfolgerung
Die Details 45 *„Luftschichten und unterschiedliche VIP-Dicken“* und 47 *„Gummilagen“* werden kombiniert und in den Lösungsvarianten weiter bearbeitet, da diese Maßnahmen nicht zur Vergrößerung der Elementdicke beitragen. Es soll geprüft werden, ob diese Kombination der einzelnen Maßnahmen auch zu einer wesentlichen Verbesserung des Schalldämmmaßes beitragen kann.

Bewertungskriterien - negativ o neutral + positiv	Detail 43	Detail 44	Detail 45	Detail 46	Detail 47
					
Technik Schalldämmung	o	o	-	+	+
Technik Revisionierbarkeit	-	-	-	+	-
Technik | Bauphysik Wärmebrücken	+	+	+	-	+
Technik | Ökonomie Herstellung	o	o	+	-	+
Ökologie Graue Energie	-	+	+	o	-
Gestaltung Elementdicke	+	-	+	o	+

Alternativ dazu wird auch Detail 46 *„Agraffen mit Zellkautschukeinlage“* einer Schallprüfungen unterzogen, um Vergleichswerte zu erhalten. Es wird davon ausgegangen, dass die entkoppelte vordere Textilbetonplatte schallschutztechnisch günstiger als die oben genannte Kombination ist.

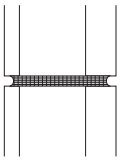
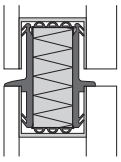
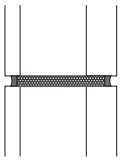
4.2.2.13 Abdichtung der Anschlussfugen

Durch Setzungs- und Schwindvorgänge sowie Wärmedehnungen kommt es zu horizontalen und vertikalen Bewegungen sowohl zwischen Tragwerk und Fassade als auch zwischen den Elementen. Die Fugendichtungssysteme in Elementfassaden müssen in der Lage sein, diese Bewegungen aufzunehmen. Es werden deshalb hohe Anforderungen an eine dauerhafte Elastizität gestellt.

Detail 48. Vorkomprimierte, imprägnierte Schaumkunststoffbänder
Kurz vor dem Einhängen eines Elementes werden vorkomprimierte Dichtungsbänder, welche innen diffusionsdichter als außen sind, auf die GFK-Profile geklebt.
[+] Eingedrungenes Wasser kann herausdiffundieren. Eine relativ einfache Montage ist möglich.
[-] Durch die vorkomprimierten Dichtungsbänder muss der Einbau nach Anbringung ohne Verzögerung erfolgen.

Detail 49. Horizontale und vertikale Fugensonderstreifen mit Dichtungen
Im Randbereich der Elemente werden die C-Profile aus GKF so eingebaut, dass Platz für einen Dämmstreifen mit Dichtungssystem entsteht. Das vertikale Fugenstück wird bereits werksseitig vormontiert, der horizontale Dämm- und Dichtstreifen nach dem Einhängen angebracht.
[+] Die Fugen und vor allem das Fugenkreuz werden dauerhaft und sicher geschlossen. Bei der Montage ist kein Gerüst notwendig. Bautoleranzen sowie Bewegungen können aufgenommen werden.
[-] Die VIP-Sonderteile müssen angefertigt werden und verursachen Zusatzkosten.

Detail 50. Spritzbare Dichtstoffe
Im Fugenbereich wird werksseitig ein Dämmstreifen aus Mineralwolle vorgesehen. Nach dem Einbau werden die Fugen mit einem spritzbaren Dichtstoff gefüllt.
[+] Bei einer Fugendicke von ca. 1 cm wäre eine Dichtstofftiefe von nur 0,5 cm notwendig. Die

Bewertungskriterien - negativ o neutral + positiv	Detail 48 	Detail 49 	Detail 50 
Technik Toleranzen	o	+	o
Technik Schall	+	+	+
Technik Revisionierbarkeit	+	-	+
Technik | Bauphysik Dauerhaftigkeit	o	+	-
Technik | Bauphysik Schlagregendichtigkeit	+	+	o
Technik |Bauphysik Feuchteführung aus Bauteil	+	+	-
Technik | Ökonomie Herstellung	+	-	+
Technik | Ökonomie Montage + Rückbau	+	o	o

Fugendämmung kann somit sehr gut ausgebildet werden, die Wärmebrücke wird reduziert.
[-] Elementbewegungen können nur in geringem Maße aufgenommen werden. Die Dichtung ist weniger dauerhaft und leistungsstark als Dichtungsbänder.

Schlussfolgerung
Das Detail 49 *„horizontale und vertikale Fugensonderstreifen mit Dichtungen“* schneidet in der Bewertung am besten ab. Neben vielen anderen Vorzügen ergeben sich keine Einschränkungen hinsichtlich der Gebäudehöhe, ein Gerüst ist bei der Montage nicht notwendig. Darüber hinaus wird davon ausgegangen, dass diese Variante leistungsstark und alterungsbeständig ist.

4.2.2.14 Verbesserung des Brandschutzes

Um im Fall von erhöhten Brandschutzanforderungen reagieren zu können, wurde nach Möglichkeiten gesucht, die Fugenausbildung zu optimieren.

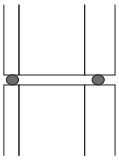
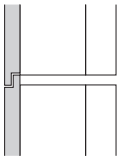
Detail 51. Brandschutz-Fugenschnur
In dem nach außen grenzenden Fugenbereich werden Brandschutzschnüre eingelegt, die einen Fugenverschluss mit einer Feuerwiderstandsklasse von F 90 gewährleisten. Da diese feuchteempfindlich sind, müssen sie in Verbindung mit einem Dichtungssystem ausgeführt werden.
[+] Das System kann im Brandfall einen Funktionserhalt über einen langen Zeitraum gewährleisten. Die Fugen werden zugleich gedämmt.
[-] Die Funktion der Fugenschnüre kann auch bei geringfügiger eingedrungener Feuchte nicht mehr gewährleistet werden.

Detail 52. Verzahnung
Die äußeren Textilbetonplatten verschließen die Elementfuge durch eine Nut-Feder-Verbindung.
[+] Beton ist nicht brennbar. Die Verbindung dient zugleich dem Witterungsschutz der Fuge.
[-] Durch die vorhandenen Bautoleranzen ist die Funktionstüchtigkeit dieser Variante fraglich, Plattenbewegungen können nur bedingt aufgenommen werden.

Schlussfolgerung
Aufgrund der größeren Flexibilität hinsichtlich Maßtoleranzen, der Möglichkeit der Revisionierbarkeit und durch die Zusatzfunktion der Fugendämmung wurde das Detail 51 *„Fugenschnur“* gewählt.

4.2.3 Masstoleranzen

Toleranzen im Hochbau werden von den DINs 18202 und 18203 geregelt. DIN 18202 gilt für Bauwerke und dessen Teile, auch solche, die räumlich und/oder zeitlich getrennt von der Baustelle gefertigt und zu einem späteren Zeitpunkt in das

Bewertungskriterien - negativ o neutral + positiv	Detail 51 	Detail 52 
Technik | Bauphysik Wärmebrücken	+	-
Technik |Bauphysik Brandschutz	+	-
Technik | Ökonomie Herstellung	+	-
Technik | Ökonomie Revisionierbarkeit	+	-
Gestaltung Fuge	-	+

Gebäude integriert werden. Die Norm gilt baustoffunabhängig, sodass Maßtoleranzen der Bauwerke und Bauteile nur durch ihre vorgesehene Funktion und Größe beeinflusst werden. Die Genauigkeitsanforderungen beziehen sich auf die Ausführung von Bauwerken oder Bauteilen, jedoch nicht auf zeit- und lastabhängige Verformungen, welche nach Fertigstellung auftreten können. Dies sind beispielsweise Formänderungen durch Quellen, Schwinden oder Windlasten [Ertl, 2006].
DIN 18203 bezieht sich ausschließlich auf vorgefertigte Bauteile, wobei zwischen den Materialien Beton, Stahl und Holz unterschieden wird.

Toleranzen am Bauwerk
Die Tabellen 1 – 3 der DIN 18202 2005-10 regeln die maximal zulässigen Grenzabweichungen von Maßen (Abweichungen zwischen Soll- und Höchst- bzw. Mindestmaß) sowie Winkel- und Ebenheitsabweichungen im Bauwerk. Auf diese Toleranzen muss das vaku^{tex}-Element reagieren können, wenn es als nichttragende Fassade nachträglich im Gebäude eingebracht wird.
Da vaku^{tex} als Vorhangfassadesystem konzipiert werden soll, muss es auf Maßtoleranzen im Grundriss und Aufriss reagieren können. Lichte Maße spielen eine untergeordnete Rolle.
Nach DIN 18202 Tab. 1 müssen im Grundriss je nach Länge und Breite des Gebäudes Abweichungen im Rohbau von bis zu 30 mm einkalkuliert werden. Da das Element geschosshoch geplant ist, kann die Toleranz in der Vertikalen bis zu 16 mm betragen. Um die Grenzwerte nach DIN 18202 Tab. 3 einzuhalten, darf bei Erstellung der vaku^{tex}-Fassade je nach Länge und Höhe eine Ebenheitsabweichung von 3 - 20 mm nicht überschritten werden. Diese Fertigung- und Bauwerkstoleranzen müssen über die Fugen und Befestigungselemente, z. B. durch Stellschrauben oder Langlöcher, ausgeglichen werden können.

4.2.4 Bauphysik
Ziel ist es, ein Fassadenbauteil mit einem Wärmedurchgangskoeffizienten von 0,15 W/(m²K) in einer nur 11 cm dicken Fassade zu realisieren. Dieser Wert liegt weit unter den nach EnEV 09 geforderten 0,28 W/(m²K) und entspricht dem Passivhausstandard. Um ein in allen Punkten optimiertes Bauteil zu entwickeln, müssen verschiedenste materialspezifische Untersuchungen durchgeführt werden.

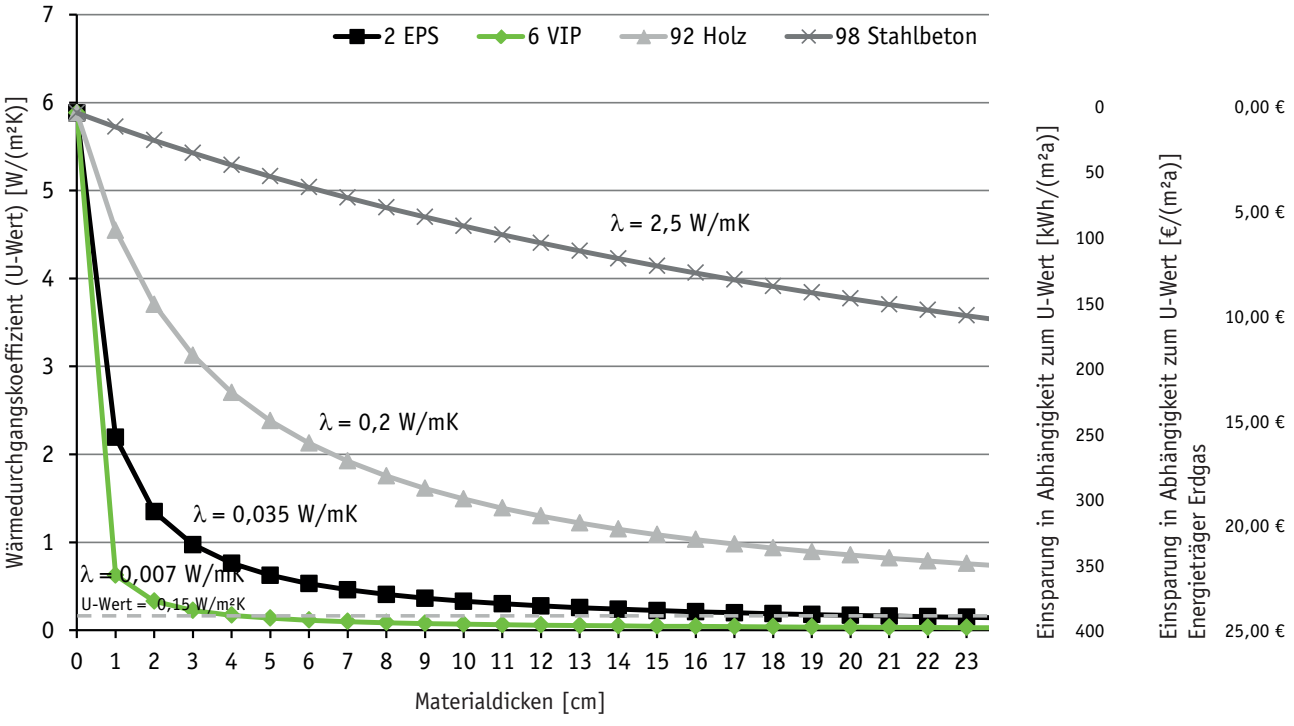


Abb. 68 Abhängigkeit des U-Wertes von der Dämmschichtdicke (Quelle: HTWK Leipzig, Energiepreise BMWi 2010)

4.2.4.1 Wärmeschutz ungestörter Flächen

Um zu ermitteln, welche Materialien für schlanke Fassaden geeignet sind, wurden verschiedene Werkstoffe bezüglich ihres Wärmedurchgangskoeffizienten verglichen. Dabei wurden zwei Dämmstoffe, Expandiertes Polystyrol (EPS) und Vakuumisolationspaneele (VIP) sowie zwei Konstruktionsmaterialien, Stahlbeton und Holz, gegenübergestellt. Während Stahlbeton eine hohe Wärmeleitfähigkeit besitzt (λ = 2,5 W/(mK)), erweist sich Holz bereits als wesentlich günstiger (λ = 0,2 W/(mK)). EPS (λ = 0,035 W/(mK)) sollte stellvertretend für konventionelle Dämmstoffe mit ähnlicher Wärmeleitfähigkeit, wie Mineralwolle oder Extrudiertes Polystyrol, untersucht werden. Als Hochleistungsdämmstoff wurden VIPs (λ = 0,007 W/(mK)) betrachtet, die die derzeit geringste einer bauaufsichtlich zugelassenen Wärmedämmung aufweisen.
In Abb. 68 wird die Abhängigkeit des Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) von der Dämmstoffdicke deutlich. Als Startpunkt wurde für alle Materialien der Wert 5,9 W/(m²K) gewählt. Er berücksichtigt lediglich die beiden Wärmeübergangswiderstände R_i = 0,013 (m²K)/W und R_e = 0,04 (m²K)/W, dies entspricht in etwa einer einfach verglasten Scheibe (Konstruktion mit sehr schlechten Dämmeigenschaften). Mit einem nur 1 cm dicken VIP kann bereits eine Verbesserung des U-Wertes von ca. 90 % erreicht werden, bei EPS sind es nur ca. 60 %. Holz erreicht noch eine ca. 20-prozentige Verbesserung, Stahlbeton gerade einmal ca. 3 %. Um den aktuellen Dämmstandard einer Außenwand zu erreichen, ist also eine Kombination von Konstruktions- und Dämmmaterialien erforderlich.
Die Grafik zeigt, dass bei den VIPs die Einsparung nach 2 cm ca. 94 %, nach 5 cm ca. 98 % und nach 10 cm ca. 99 % beträgt. Damit wird deutlich, dass eine weitere Erhöhung der Dämmstoffstärke nur noch einem geringen Einfluss auf die Transmissionsverluste von Heiz- und Kühlenergie hat. Der letzte Zentimeter kostet ebensoviel wie der erste, hat jedoch kaum noch einen Einsparungseffekt. Ökonomisch können diese Einsparungen als Erdgasverbrauchskosten quantifiziert werden. Berechnungsgrundlage bildet der Gradtagszahlfaktor nach EnEV 2004 mit 66000 Kh/a (Temperaturunterschied zwischen innen und außen in Stunden im Jahr mit Nachtabsenkung für den Neubau).Mit dem ersten Zentimeter der VIPs können demnach 350 kWh/(m²a) eingespart werden. Auf den zweiten entfallen lediglich noch 16 kWh/(m²a).

Zur Realisierung dünner Fassaden im Passivhausstandard (dargestellt als graue gestrichelte Linie), sind entsprechend Abb. 68 4,5 cm dicke VIPs notwendig. Konventionelle Dämmstoffe wie EPS erreichen diesen Wert erst bei 22,5 cm Materialstärke. Diese Werte beziehen sich auf den ungestörten Querschnitt ohne Wärmebrücken.

4.2.4.2 Formatbetrachtung Vakuumisolationspaneele

In Abb. 69 ist der Zusammenhang zwischen VIP-Paneelformaten und den resultierenden Wärmedurchgangskoeffizienten dargestellt. Es wird deutlich, dass große Formate wärmeschutztechnisch prinzipiell günstiger sind als kleinere. Im Diagramm grün dargestellt ist der U-Wert für den ungestörten Fall eines 5,5 cm starken VIP-Paneels. Dieser beträgt 0,128 W/(m²K). Hinzu kommen die Zuschläge für Fugen, deren Länge bei gleicher Gesamtfläche in Abhängigkeit vom Format variiert (grau dargestellt). Beispielsweise ergibt sich bei einem Format von 0,5 m x 0,5 m zum Ausgangs-U-Wert von 0,128 W/(m²K) ein Fugenaufschlag von 0,019 W/(m²K). Bei einem Format von 2 m x 2 m hingegen werden nur 0,005 W/(m²K), ca. ein Viertel dieses Wertes, beaufschlagt.
Ein zusätzlicher Vorteil von großen Plattenformaten ist, dass diese wesentlich kostengünstiger sind. Allerdings eignen sich kleinere Platten eher für den händischen Transport und erleichtern den Einbau auf der Baustelle, die Gefahr der Beschädigung der Hochbarrierefolie im Gebäude und auf dem Gerüst sinkt [BBSR, 2011].

4.2.4.3 Thermische Störungen der Dämmebene

Hochgedämmte dünne Bauelemente sind im Vergleich zu konventionellen Dämmstoffen sehr empfindlich bei Störungen wie z. B. Durchdringungen, da über die entstehenden Wärmebrücken in den

ersten Zentimetern eine größere Wärmemenge abfließt. Um die Auswirkung von Störungen einer Dämmebene aus VIPs abschätzen zu können, wurden Simulationen und eine Messreihe in der Klimaprüfkammer durchgeführt. Diese untersuchten geometrisch unterschiedliche Paneelstöße und variierende Paneeldurchdringungen aus verschiedenen Materialien.

4.2.4.4 Messreihe zu unterschiedlichen Paneelstössen

Die durchgeführte Messreihe untersucht Paneelstöße von Vakuumisolationspaneelen mit unterschiedlichen Geometrien. Relativ früh wurde die Entscheidung getroffen, die Dämmschicht zweilagig auszuführen. Dies bedeutet, nicht eine Paneelschicht mit 5 cm zu verbauen, sondern zwei Schichten à 2,5 cm einzusetzen. Bei Beschädigung einer Dämmlage muss nicht zwingend revisioniert werden, da der Wärme- und Feuchteschutz mit einer Lage immer noch gewährleistet ist. Zudem ergibt sich die Möglichkeit, die Paneellagen an den Stoßpunkten zu verschieben, sodass eine Überlappung entsteht. Dies kann sich als günstig erweisen, da die notwendige Aluminiumbedampfung der Hochbarrierefolie, die mit 2 x 80 nm die Permeationssicherheit (Dichtheit) sicherstellt, für einen starken Wärmetransport an den Paneelrändern verantwortlich ist. Aluminium hat mit 160 W/(mK) eine 8000 mal höhere Wärmeleitfähigkeit als das Kernmaterial aus mikroporöser Kieselsäure mit 0,020 W/(mK) [Spitzner, 2009].
Bei Vakuumisolationspaneelen unterscheidet man grundsätzlich zwei unterschiedliche Kantenausbildungen: Paneelkanten mit einer einschichtigen homogenen Folienschicht oder verschweißte und umgeschlagene Paneelkanten. Bei der zweiten Variante tritt ein zusätzlicher Wärmestrom infolge der doppelten Folie auf. Paneele die sich derzeit am Markt befinden haben je zwei Seiten mit einer homogenen Kannte und je zwei Seiten mit einer umgelegten Paneelkannte. In dieser Untersuchung wird ausschließlich die homogene Kantenausführung betrachtet (siehe Abb. 70).

Messinstrumente und Messverfahren

Nachfolgend werden die für die Messungen notwendige Technik und allgemeine Grundlagen zur Durchführung der Versuche dargestellt.

Klimaprüfkammer

Die Klimaprüfkammer der Firma Feutron Typ

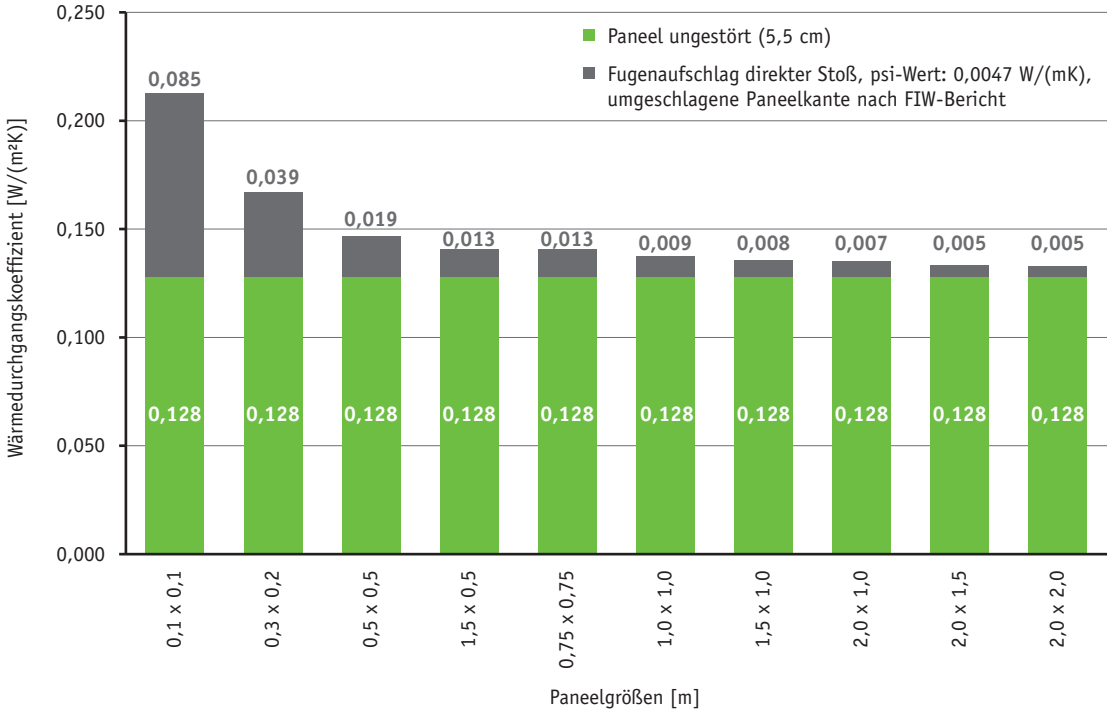


Abb. 69 Zusammenhang zw. Paneelgröße von VIPs und Wärmedurchgangskoeffizient

3523/17 hat ein Nutzraumvolumen von 400 Litern. Bauelemente mit einer Größe von 54 x 64 cm können in die Prüfraumtür eingebaut werden.
Die klimatischen Eigenschaften des Bauelements wurden zwischen Kammerklima und Innenraumklima des Labors gemessen, welches ebenfalls klimatisiert war. Im Versuch betrug die Raumtemperatur ca. 25 °C. Das Kammerklima wurde auf -35 °C eingestellt, sodass eine nahezu konstante Temperaturdifferenz von 60 K hergestellt werden konnte. Diese Temperaturdifferenz wurde als einzige Variable benötigt, die relative Raumluftfeuchte war für die Messung nicht erforderlich.

Temperaturmessung mittels Thermodrähten
Für die Temperaturbestimmungen im und am Messkörper wurden Thermodrähte eingesetzt. Diese funktionieren nach dem Messprinzip der *„Thermoelemente"*. Diese Elemente bestehen aus zwei punktverschweißten Metallen und Metalllegierungen. Durch den thermoelektrischen Effekt kann die Temperatur an der Kontaktfläche gemessen werden. Dieser Effekt ruft eine kleine Thermospannung hervor, die von der Temperaturdifferenz zwischen den Anschlussklemmen und der Messstelle abhängt. Für die Messungen wurden folgende Thermodrähte verwendet:

- Hersteller: Ahlborn
- Thermodraht: NiCr-Ni, Kl. 2 (nach DIN/IEC 584-2)
- Isolierung: Silikon (Adern und Mantel)
- Einsatztemperatur: -45°C bis +200°C
- Aderndurchmesser: 0,5 mm
- Außendurchmesser: ca. 4 mm

homogene Paneelkante (einlagig)

verschweißte und umgeschlagene Paneelkante (mehrlagig)

Abb. 70 Randausbildungen der VIPs

Wärmeflussbestimmung mittels Wärmeflussplatte
Die Wärmestromdichte im Messkörper wurde mit einer Wärmeflussplatte gemessen. Die Wärmeflussdichte einer Außenwand berechnet sich allgemein mit folgender Formel:

$q = U \times (T_{Li} - T_{La})$

q	... Wärmestromdichte	[W/m²]
U	... Wärmedurchgangskoeffizient	[W/(m²K)]
T_{Li}	... Temperatur Luft innen	[°C]
T_{La}	... Temperatur Luft außen	[°C]

Im Gleichgewichtszustand von Innen- und Außentemperatur fließt durch ein Bauteil die immer gleiche Wärmemenge (Wärmestrom der Dichte q). Die Wärmeflussplatte (aus Epoxidharz) kann dabei als Wand angesehen werden, da sie ebenfalls einen Wärmewiderstand darstellt. Wird die Platte nun in einem Plattenmessgerät (Einplattenapparatur) mit einem definierten Wärmefluss kalibriert, so kann eine Kalibrierkonstante (C) abgelesen werden, die zum Temperaturgefälle proportional ist. Damit kann in allen Messungen nur über das vorliegende Temperaturgefälle auf den Wärmefluss in den Bauelementen (in W/m²) geschlossen werden.
Das Messprinzip zur Bestimmung der Wärmestromdichte basiert auf folgender Grundlage:

$q = C \times U_{th}$

q	... Wärmestromdichte	[W/m²]
C	... Kalibrierkonstante	[W/(m²mV)]
U_{th}	... Messspannung	[mV]

In der Epoxidharzplatte liegt ein Mäander, der ein Netz aus gegeneinander geschalteten Thermoelementen beinhaltet. Bei Temperaturunterschied erzeugen diese Thermoelemente eine Gleichspannung, die einer Temperaturdifferenz entspricht. Folgende Wärmeflussplatte wurde verwendet:

- Hersteller: Ahlborn, Typ 119
- Isolierung: Epoxidharz
- Einsatztemperatur: -40°C bis +80°C
- Abmessungen: 250 x 250 x 1,5 mm
- Mäandergröße: 180 x 180 mm mit Thermoelementkette aus Cu-CuNi44
- Kalibrierwert: < 8 W/m² ~ 1 mV

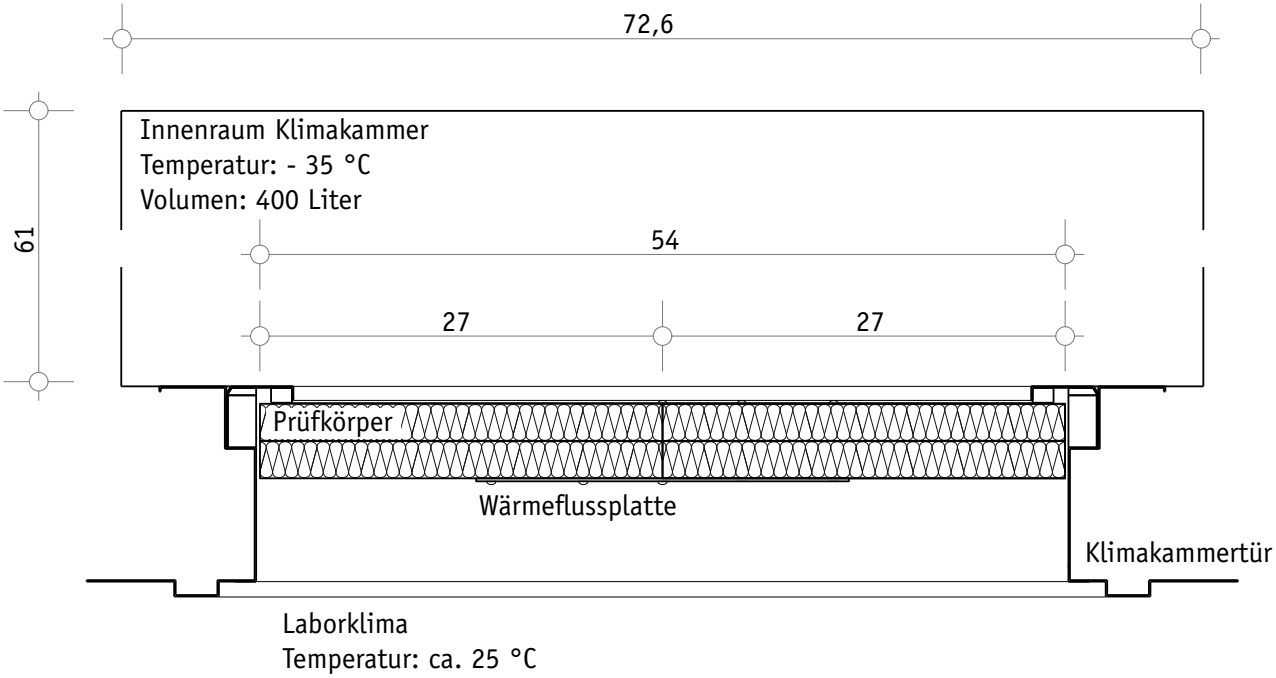


Abb. 71 Horizontalschnitt der Klimakammer M 1:5

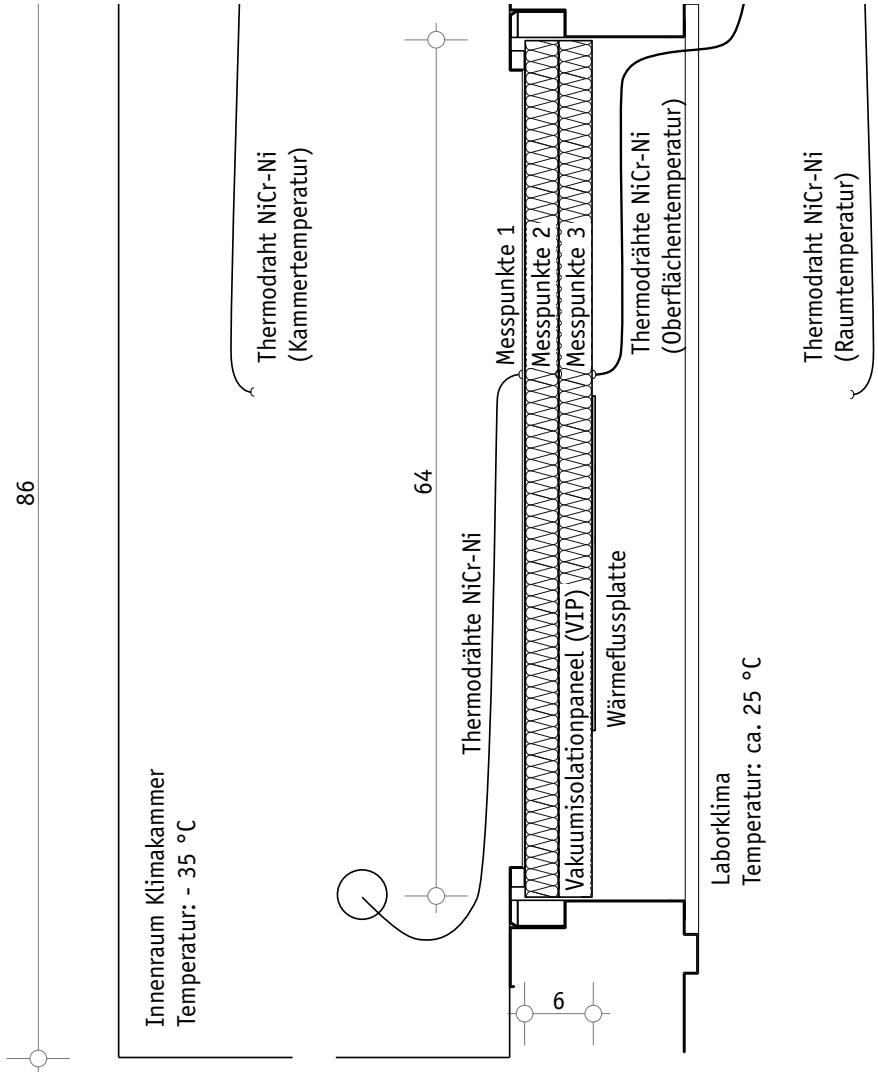


Abb. 72 Vertikalschnitt der Klimakammer M 1:5

Versuchsaufbau und Durchführung
In die Klimakammer werden Prüfkörper von 54 x 64 cm eingebaut. Diese bestehen aus zwei Lagen VIPs à 2,5 cm Dicke. Insgesamt werden sieben Varianten geprüft:

- ungestörte VIPs
- stumpfer Stoß
- Überlappungen des Fugenstoßes mit 2, 4, 6, 8 und 10 cm Länge

Die in der Messreihe ermittelten Wärmestromdichten und Temperaturen bilden die Grundlage für die weiteren Berechnungen. Aus ihnen lassen sich der Wärmedurchlasskoeffizient sowie die Wärmeübergangskoeffizienten innen und außen ermitteln. Die Wärmeleitfähigkeit der Paneele kann aus dem Wärmedurchlasskoeffizient zusätzlich bestimmt werden. Die Messwerte werden mithilfe eines Netzes aus neun Temperaturpunkten (Thermodrähten) im Bauelemet, zwei Temperaturpunkten

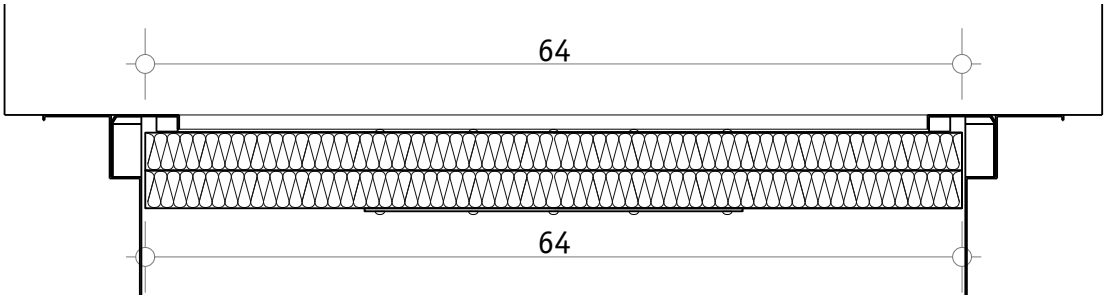


Abb. 73 Standard, M 1:5

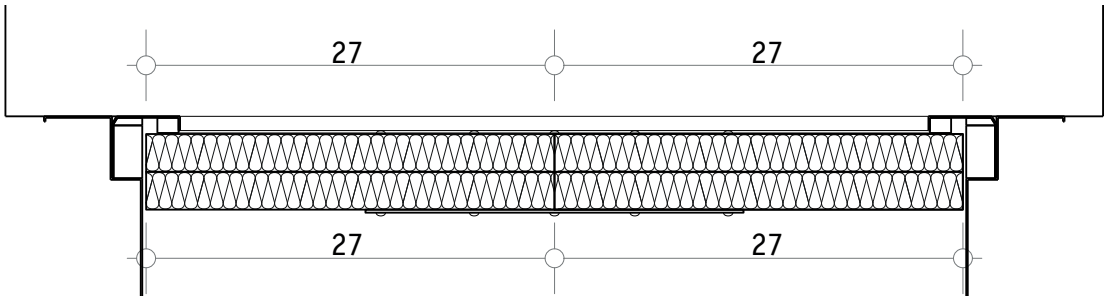


Abb. 74 Variante 1.1, Stumpfer Stoß, M 1:5
Linearer Wärmebrückenverlustkoeffizient Ψ: 0,00379 W/(mK)

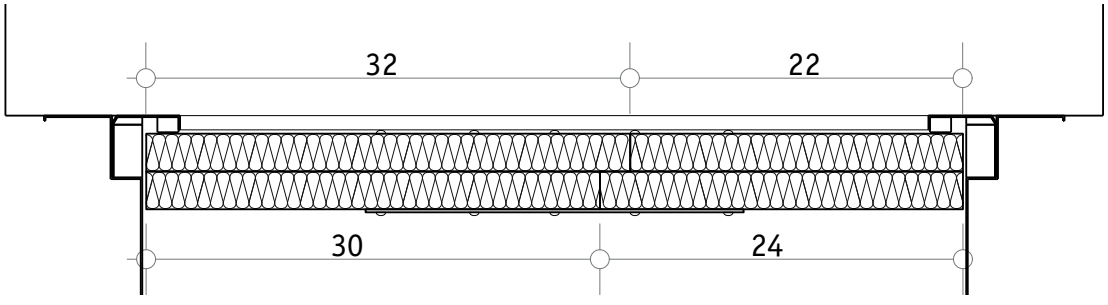


Abb. 75 Variante 1.2, 2 cm Überlappung, M 1:5
Linearer Wärmebrückenverlustkoeffizient Ψ: 0,00265 W/(mK)

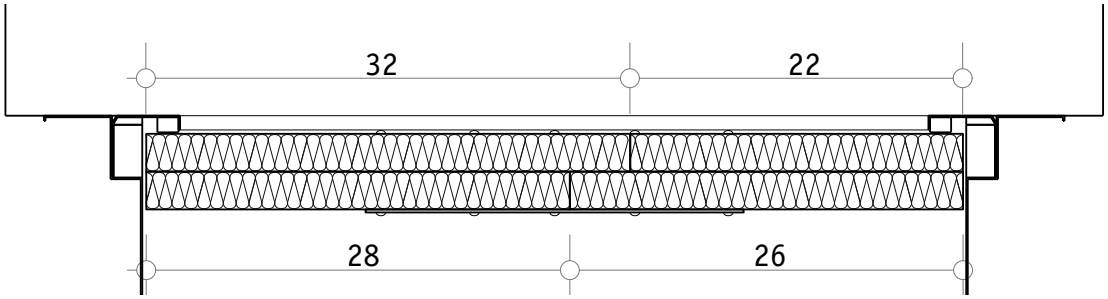


Abb. 76 Variante 1.3, 4 cm Überlappung, M 1:5
Linearer Wärmebrückenverlustkoeffizient Ψ: 0,00221 W/(mK)

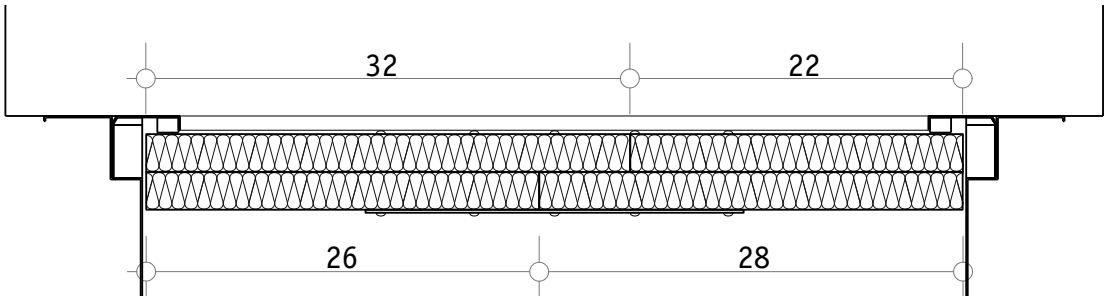


Abb. 77 Variante 1.3, 6 cm Überlappung, M 1:5
Linearer Wärmebrückenverlustkoeffizient Ψ: 0,00159 W/(mK)

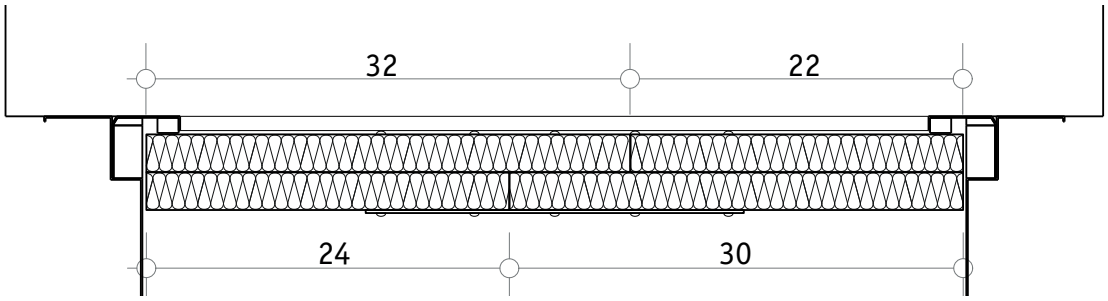


Abb. 78 Variante 1.5, 8 cm Überlappung, M 1:5
Linearer Wärmebrückenverlustkoeffizient Ψ: 0,00129 W/(mK)

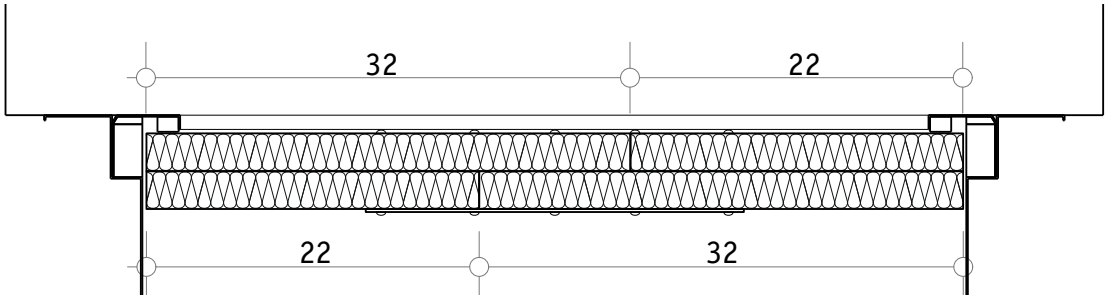


Abb. 79 Abb. 15: Variante 1.6, 10 cm Überlappung, M 1:5
Linearer Wärmebrückenverlustkoeffizient Ψ: 0,00108 W/(mK)

in der Labor- und Klimakammerraumluft sowie einer Wärmeflussplatte auf der warmen Seite der VIPs (außerhalb der Kammer) bestimmt. Um eine Taupunktbildung am Übergang zur Tür der Klimaprüfkammer zu vermeiden, ist ein beheizter Rahmen an den Außenkanten notwendig. Die Heizung erzeugt nicht unerhebliche Randeffekte, daher ist für die Messung immer ein ausreichender Abstand zu wählen.
Von den neun Thermodrähte im und am Bauelement sind jeweils drei auf einer Ebene angebracht (siehe Abb. 72): Auf der Innenseite des Bauteils in der Kammer (Messebene 1), auf der Raumseite des Bauelementes (Messebene 3) und in der Mitte zwischen den Paneelen (Messebene 2). Der erste Thermodraht liegt dabei genau auf der Fuge, der zweite ca. 2 cm neben dem Stoß und der dritte liegt insgesamt ca. 10 cm vom Stoß entfernt. Durch diese Anordnung der Messpunkte kann der zum Stoß zunehmende Wärmefluss dargestellt werden.
Zur Ermittlung der Ergebnisse wurden jeweils drei Messungen durchgeführt. Ihr Durchschnittswert wurde für die weitere Berechnung genutzt.

Thermografie
Um die Wärmebrücken an den Stößen zu visualisieren, wurde eine Thermografie des Versuchsaufbaus vorgenommen. Die dazu verwendete Thermokamera IC 60 von Throtec wurde raumseitig positioniert. Deutlich sichtbar sind der beheizte Rahmen der Klimakammertür an der Außenkante der Bauelemente und die entstandenen Wärmebrücken (siehe Abb. 81, Abb. 83).

Berechnungsformeln

Wärmedurchlass − und übergangskoeffizienten $\left[\frac{W}{m^2K}\right]$:

$$Wärmeübergangskoeffizient\ \alpha_i = \frac{Wärmestromdichte\ q}{(Wandinnentemperatur\ T_{Wi} - Luftinnentemperatur\ T_{Li})}$$

$$Wärmeübergangskoeffizient\ \alpha_a = \frac{Wärmestromdichte\ q}{(Wandaußentemperatur\ T_{Wa} - Luftaußentemperatur\ T_{La})}$$

$$Wärmedurchlasskoeffizient\ \Lambda = \frac{Wärmestromdichte\ q}{(Wandinnentemperatur\ T_{Wi} - Wandaußentemperatur\ T_{Wa})}$$

Wärmedurchgangskoeffizient $[\frac{W}{m^2K}]$:

$$Wärmedurchgangskoeffizient\ U = \frac{1}{(R_i + R + R_a)} = \frac{1}{(\frac{1}{\alpha_i} + \frac{1}{\Lambda} + \frac{1}{\alpha_a})}$$

Wärmeleitfähigkeit $\boldsymbol{\lambda}$ $[\frac{W}{mK}]$:

$$Wärmedurchlasskoeffizient\ \Lambda = \frac{1}{Wärmedurchlasswiderstand\ R\ der\ Wandschicht}$$

$$Wärmedurchlasswiderstand\ R = \frac{1}{Wärmedurchlasskoeffizient\ U} = \frac{Wanddicke\ d}{Wärmeleitfähigkeit\ \lambda}$$

$$Wärmeleitfähigkeit\ \lambda = Wanddicke\ d * Wärmedurchlasskoeffizient\ \Lambda$$

Wärmebrückenverlustkoeffizient $\boldsymbol{\psi}$ $[\frac{W}{mK}]$:

$$Wärmebrückenverlustkoeffizient\ \psi = \frac{Wärmedurchlassskoeffizient\ \Lambda\ mit\ Stoß\ -\ Wärmedurchlassskoeffizient\ \Lambda\ \text{ohne Stoß}}{5{,}55\ (Faktor\ der\ Wärmeflussplatte)}$$

Der Vergleich der stumpf gestoßenen Variante mit der Variante 10 cm Überlappung zeigt die unterschiedlich starken Wärmeflüsse. Während in der stumpf gestoßenen Variante nur 5 cm Übertragungsweg zur Verfügung stehen, sind es in der überlappten Variante bereits 15 cm (5 cm Bauelementdicke plus 10 cm Überlappung). Die Thermografien zeigen eine erheblich reduzierte Oberflächentemperatur bei Überlappung der Paneele, was Rückschlüsse auf den Wärmestrom zulässt. Durch den verlängerten Übertragungsweg reduziert sich der Wärmestrom am Stoß erheblich, wodurch es zu weniger Verlusten kommt. Dabei leitet nicht nur die Aluminiumschicht Wärme, sondern auch maßgeblich die zwischen den Paneelen verbleibende Luftschicht. Dieser Einfluss stellt gerade unter Baustellenbedingungen (Toleranzen) ein noch größeres Problem dar.

Ergebnisse der Messung

Die unter Laborbedingungen ermittelten längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten (Wärmebrückenverlustkoeffizient) erreichen ähnliche Werte wie die in der FIW Studie [Spitzner, 2009]. Die Ergebnisse der Messreihe weisen den charakteristischen längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten Ψ in W/(mK) aus. Dieser Koeffizient beschreibt die Wärmemenge, die über 1 m Fugenstoß zusätzlich zum ungestörten Wärmedurchlasskoeffizienten transportiert wird. Die Variante mit den stumpf gestoßenen Paneelen verzeichnet den größten Energieverlust durch die Fuge. Der direkte Fugenstoß ermöglicht es der Wärme, sich *„auf dem kürzesten Weg“* durch das Bauelement zu bewegen. Der Wert erreicht im Mittel 0,00379 W/(mK). Bei weiterer Verschiebung der beiden Paneellagen erhält man einen deutlich reduzierten Verlustkoef-

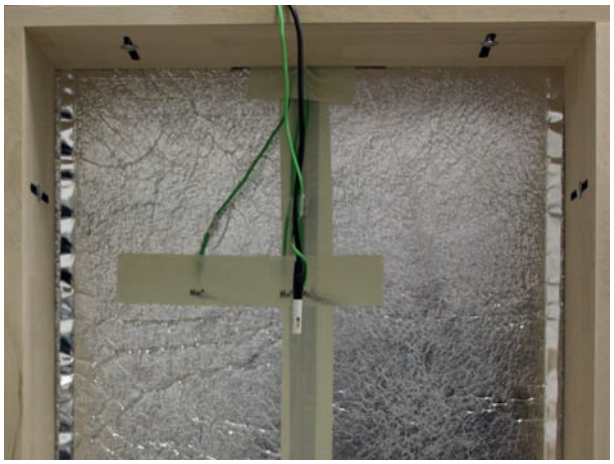


Abb. 80 Ansicht Dämmpaneele, Variante Stumpfer Stoß

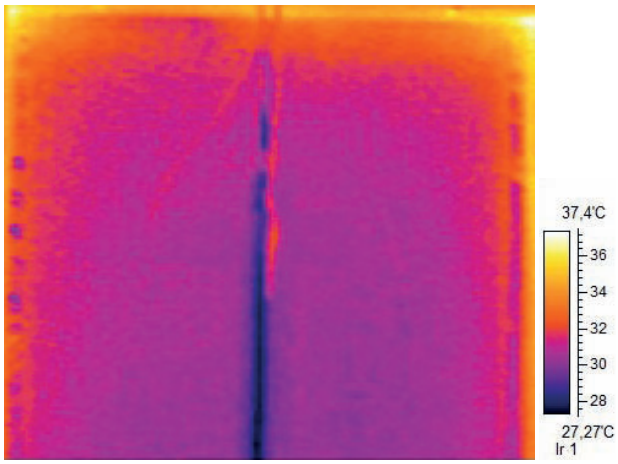


Abb. 81 Thermografie, Variante Stumpfer Stoß

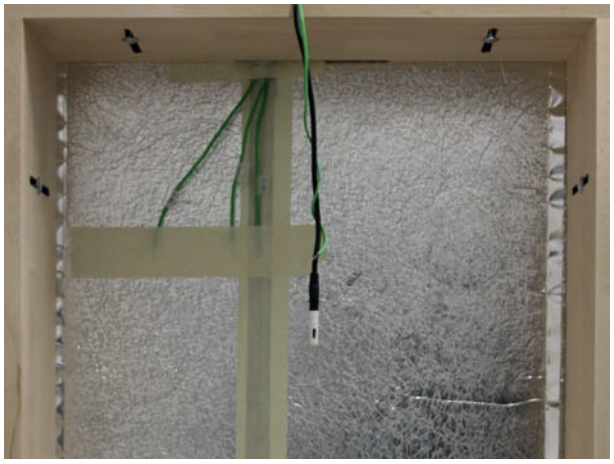


Abb. 82 Ansicht Dämmpaneele, Variante 10 cm Überlappung

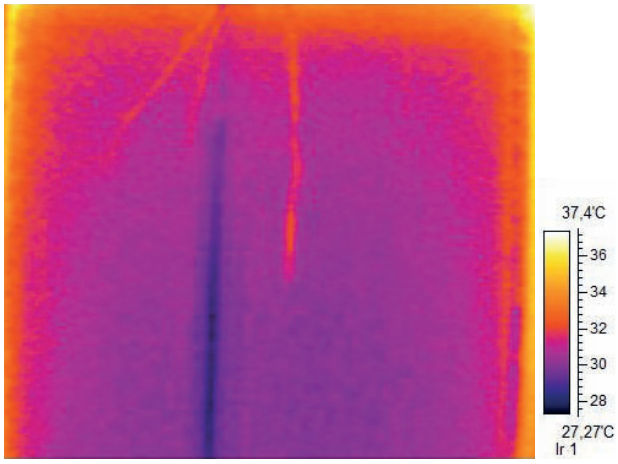


Abb. 83 Thermografie, Variante 10 cm Überlappung

fizienten. Vergrößert sich die Überlappung kontinuierlich um 2 cm, nimmt der Wärmebrückenverlustkoeffizent exponentiell ab und nähert sich der Null an (siehe Abb. 84). Wie erwartet hat sich der größte Versatz zwischen den Paneelstößen (Variante mit einer Überlappung von 10 cm) als sehr günstig herausgestellt. Mit nur 0,00108 W/(mK) fällt der längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizient etwa 3,5 mal geringer als bei der Variante *„Stumpfer Stoß"* aus.
Selbst bei heute nahezu verschwindend geringen Aluminiumbedampfungsschichten wird eine zweilagige Ausführung der Paneelschichten empfohlen, um Wärmebrücken zu reduzieren.

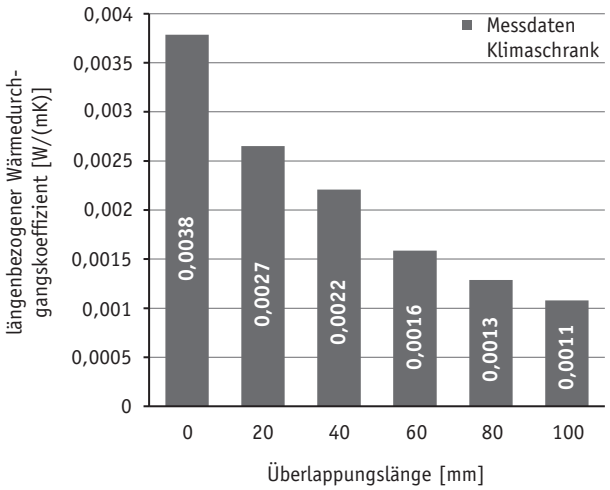


Abb. 84 Ergebnisse der gemessenen VIP-Überlappungsvarianten

4.3 Ökologische Betrachtung

Eine gesamtheitliche ökologische Betrachtung der vaku[tex]-Fassade sowie ein Vergleich mit energetisch gleichwertigen Fassadenkonstruktionen wird in Kapitel 5 *„Lösungsansatz"* vorgenommen.

4.4 Ökonomische Betrachtung

Da das vaku[tex]-Element in seiner derzeitigen Konfiguration als Fertigteil für den Neubau konzipiert ist, werden im Folgenden Potentiale und Trends der Bauwirtschaft für ein solches Fassadenelement auf dem deutschen Markt untersucht.

4.4.1 Ökonomische Vor- und Nachteile von vaku[TEX]

Durch die schlanke und gewichtsreduzierte Bauweise der vaku[tex]-Elemente lassen sich neben ökologischen auch wirtschaftliche Vorteile ableiten. Neue Produkte und Verfahren sind meist aber auch mit höheren Kosten in der Entwicklungphase verbunden.

Herstellung

Die Herstellung der einzelnen Komponenten für das Fassadenelement werden derzeit noch in händischen Verfahren (Textilbeton), teilautomatisiert (VIP) oder vollautomatisiert (GFK) durchgeführt. Dies ist den noch sehr kleinen Stückzahlen geschuldet, aber auch der Qualitätssicherung der Halbzeuge dienlich. Speziell beim Textilbeton führt dies zu einem Kostenanteil von über 60 % an den Gesamtelementkosten (siehe Kapitel 5, Kosten für das vaku[tex]-Element). Durch die Umstellung von manufakturartiger Kleinserienfertigung auf eine automatisierte Produktion im industriellen Maßstab könnten erhebliche Einsparpotentiale erschlossen werden.Das anschließende Zusammenfügen der Einzelkomponenten zum Endprodukt erfolgt manufakturartig. Dadurch wird ein hoher Vorfertigungsgrad erreicht, der einen vorgegegebenen Qualitätsstandard sichert und fehlerhafte Verarbeitung auf ein Mindestmaß reduziert. Darüber hinaus wird auf der Baustelle eine schadfreie, einfache und schnelle Montage der Fassadenelmente mit ihren sensiblen Einzelkomponenten ermöglicht.

Transport

Der Transport der nur 11 cm dicken Fassadenelemente zur Baustelle birgt weitere Kostenvorteile. Der Vergleich mit einem energetisch gleichwertigen Stahlbetonsandwich von 44 cm Dicke zeigt, dass vier Mal mehr Fassadenfläche mit einer Wechselbrücke transportiert werden kann, woraus sich Kostensenkungspotentiale von bis zu 75 % ergeben.

Montage

Durch das geringere Elementgewicht wird das Entladen und Montieren der Fertigteile auf der Baustelle nun mit reduzierter Krantechnik möglich, was weitere Kostenvorteile bringt.

Schlussfolgerung
Obwohl mit dem vaku^{tex}-Element zahlreiche Kostenvorteile bei Transport und Montage erzielt werden können, wiegen sie die Mehrkosten der Herstellung nicht auf. Um das Fassadenelement am Markt dennoch konkurrenzfähig zu machen, ist es notwendig, die Herstellkosten deutlich zu senken. Dazu bedarf es schnellerer und kostengünstigerer Fertigungsmethoden, z. B. durch einen teil- bzw. vollautomatisierten Herstellungsprozess. Weitere Kosteneinsparungen sind bei der Gestaltung der Gebäudekonstruktion möglich. So lassen sich z. B. durch leichtere Bauteile schlankere und materialsparendere Konstruktionen planen und umsetzen. Durch die momentan noch hohen Erstinvestitionskosten (Stand 2013) lohnt sich der Einsatz der nur 11 cm dünnen vaku^{tex}-Fassade vor allem in hochpreisigen Lagen, wie z. B. innerstädtischen Baulücken und Blockrandbebauungen. Gegenüber einem Gebäude mit vergleichbarer Stahlbetonfassade lässt sich, bei gleichbleibender Kubatur und Außenabmessung, ein Gewinn von bis zu 15 % der Nettogeschossfläche erzielen (siehe Kap. 5.4.2 Wirtschaftliche Vorteilhaftigkeit). Diese Fläche kann zusätzlich vermarktet werden.

4.4.2 Marktpotential

Zur Abschätzung vorhandener Marktpotentiale, die das vaku^{tex}-Fassadenelement erreichen kann, wurden verschiedene Betrachtungen angestellt.
Im ersten Schritt erfolgte eine Untersuchung der Bauvolumina und Baugenehmigungen im Bereich des Wohnungs-und Nichtwohnungsneubaus. 2010 konnte für den Wohnungsneubau (Eigenheime, Geschosswohnungsbau) ein Bauvolumen von 32,9 Mrd. € erwirtschaftet werden, dies ist ein Zuwachs von 8,8 % im Vergleich zum Vorjahr. Die Neubauleistungen im Nichtwohnungsbau für das Jahr 2010 beliefen sich auf 27,32 Mrd. €. Baugenehmigungen für den Wohnungsbau haben sich im Jahr 2010 bundesweit auf ein Niveau von 188.000 Wohnungen p. a. oder 94.596 Gebäude mit stabil positiver Tendenz in 2011 und 2012 entwickelt. Dem gegenüber stehen die Baugenehmigungen im Nichtwohnungsbau mit 31.058 Gebäuden absolut, hier konnte vor allem der Bereich des Industriebaus stark positive Impulse setzen [Heinze, 2012].
Die 2010 in Deutschland neu installierte Fassadenfläche im Neubau und in der Sanierung betrug 138,71 Mio. m², die sich zu etwa 30 % in Wohnungsbau und ca. 70 % in Nichtwohnungsbau aufteilen. Da vaku^{tex} für den Neubau konzipiert ist, wird in der weiteren Betrachtung die Fassaden-Neubaufläche im Wohnungs- und Nichtwohnungsbau betrachtet. Diese hatte einen Umfang von 53 % bzw. 73,57 Mio. m² (siehe Abb. 85).
Der Vorteil einer extrem schlanken Konstruktion macht sich speziell dort bemerkbar, wo Baufläche knapp und teuer ist. Aus disem Grund wurde eine weitere Differenzierung nach Gebäudenutzung und verwendeter Fassadenmaterialien vorgenommen. Damit soll ein mögliches Marktpotential im innerstädtischen Bereich abgeschätzt werden.

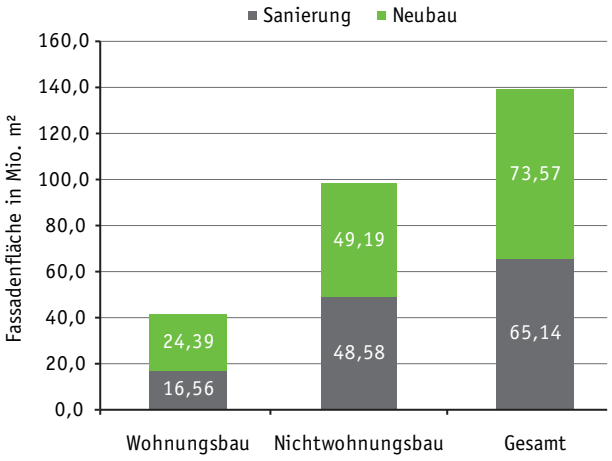


Abb. 85 Verteilung der neu installierten Fassadenfläche bei Sanierug und Neubau in Deutschland 2010

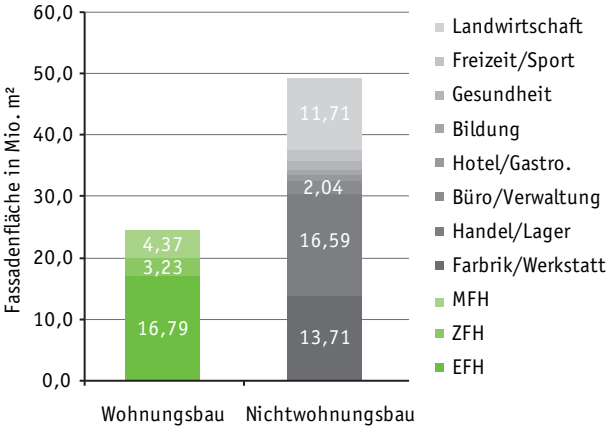


Abb. 86 Verteilung der Neubau-Fassadenfläche nach Gebäudenutzung in Deutschland 2010

Wohnungsbau
Die Betrachtung der Neubau-Fassadenfläche im Wohnungsbau zeigt, dass der größte Teil im Bereich der Einfamilienhäuser (EFH) installiert ist. Dieser Sektor bietet jedoch nur ein geringes Potential für das vaku^tex-Element, z. B. durch Bebauungen von Baulücken mit Stadthäusern. Weit mehr Potential besitzen die Mehrfamilienhäuser (MFH), da diese überwiegend im städtischen Kontext zu finden sind. Die 2010 verbaute Fassadenfläche bei MFH betrug 4,37 Mio. m², dies entspricht ca. 6 % der neu installierten Fassadenfläche von Wohnungs- und Nichtwohnungsbau (siehe Abb. 86).

Nichtwohnungsbau
Neugebaute Fassaden im Nichtwohnungsbau machen derzeit zwei Drittel der Neubau-Fassadenfläche aus. Davon bilden die Bereiche Fabriken/Werkstätten, Handel/Lager sowie die Landwirtschaft mit 42 Mio. m² mehr als die Hälfte der neu installierten Fassadenfläche. Die restlichen 7,18 Mio. m² verteilen sich auf Freizeit/Sport, Gesundheit, Bildung, Hotel/Gastronomie und Büro/Verwaltung. Ein großes Potential wird im Bereich des Bürobaus und des Handels gesehen. Der Anwendungsbereich Büro/Verwaltung umfasst 2,04 Mio m² oder 2,8 % der gesamten Neubau-Fassadenfläche (siehe Abb. 86). Handelsflächen finden sich hingegen nur zum Teil im innerstädtischen Bereich. In Städten mit mehr als einer Mio. Einwohner liegt der Anteil in Deutschland bei 17,2 %. In Städten von 500.000 bis einer Mio. Einwohner bei 25,4% [Comfort, 2013]. Mit einem Durchnittswert von 20 % für Handelsflächen im verdichteten urbanen Kontext ergibt sich ein Fassadenanteil von 3,32 Mio. m² bzw. 4,5 %

Verwendete Fassadenmaterialien
Die Untersuchung der Materialien, die in der äußeren Deckschicht von Fassaden im Jahr 2010 verbaut wurden, soll die möglichen Einsatzgebiete konkretisieren. Da vaku^tex ein Textilbetonfertigteil ist, liegt es nahe, die Potentialfelder bei den Marktanteilen Beton- und Faserzementfassaden zu sehen. Die Vorteile der schlanken Elementbauweise können jedoch auch Argumente sein, weitere Anwendungsbereiche zu erschließen, die derzeit noch von anderen Materialien abgedeckt werden.
Die Betrachtung der Materialien lässt erkennen, dass der Werkstoff Beton einen Anteil von 7 %, der Faserzement von 2 % der gesamten Neubau-Fassadenfläche hatte. Diese 9 % können als direktes Potentialgebiet angesehen werden. Weitere Potentiale können im Bereich anderer Fassadenmaterialien erschlossen werden. Dazu zählt auch der mit 42 % Marktanteil größte Bereich der Putzfassaden.

Schlussfolgerung
Die Untersuchungen zeigen, dass am Markt ein reales Potential für das vaku^tex-Fassadenelement besteht, welches anteilig erschlossen werden kann.

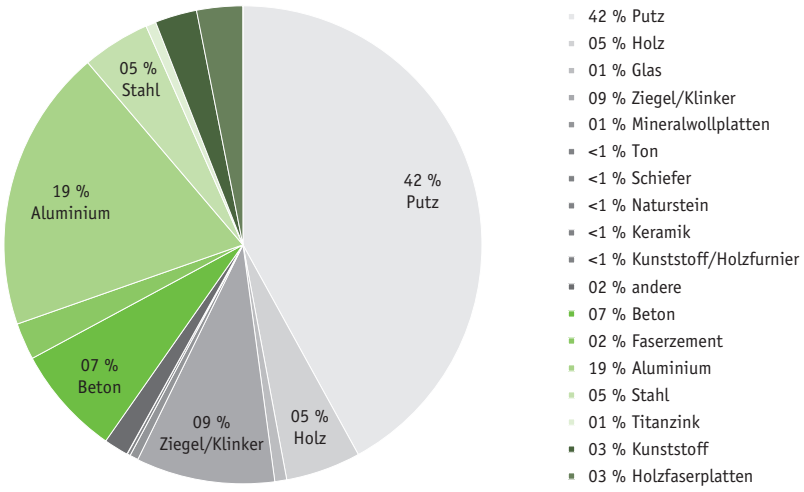


Abb. 87 Anteil unterschiedlicher Fassadenmaterialien (letzte nach außen abschließenden Schicht) am deutschen Neubau-Fassadenmarkt 2010

Es wird angenommen, dass sich im Wohnungs- und Nichtwohnungsbau ein Marktsegment im Bereich Fassade mit einem Marktvolumen von 10 - 15 % oder 7,36 Mio. - 11,0 Mio. m² Fassadenfläche pro Jahr auftut. Unter Beachtung der untersuchten Fassadenmaterialien kann ein realisierbares Absatzvolumen von insgesamt 1,47 Mio. - 2,20 Mio. m² Neubau-Fassadenfläche pro Jahr bzw. 2,0 - 3,0 % geschlussfolgert werden. Die resultierenden Anteile stellen aber lediglich den zur Verfügung stehenden Absatzmarkt für die neue Fassadentechnologie dar. Welche zusätzlichen Teilgebiete noch erschlossen werden können, ist aufgrund verschiedener Einflussfaktoren schwierig vorraussagbar.

Weitere Potentiale

Neben den Neubaufassaden stellt auch die Bestandssanierung ein großes Potential dar. Die derzeit noch energetisch unsanierte Fassadenfläche in Deutschland beträgt 1,8 Mrd. m² [WDV, 2011]. Durch Anpassung der vaku^{tex}-Konstruktion an die Gegebenheiten von Bestandsbauten könnten weitere Märkte erschlossen werden.

4.4.3 Bauwirtschaftliche Entwicklungen und Trends

Vor dem Hintergrund des Klimawandels und der Energiewende wird die Bauwirtschaft zukünftig Veränderungen erfahren. Diese betreffen z. B. die Weise wie gebaut wird, aber auch die Ökologie von Materialien, Konstruktionen und Gebäuden, die zunehmend in den Fokus tritt. Auch die Ökonomie ist von diesem Einfluss nicht ausgenommen. Diese sich bereits abzeichnende Entwicklung ist Motor für neue Materialentwicklungen sowie Planungs-, Kosten- und Gebäudekonzepte.
Um zukunftsweisende Gebäude zu erstellen, muss neben der Herstellungsphase auch die Betriebs-, Instandsetzungs- und Rückbauphase in den Prozess der Gebäudeplanung und die Kalkulationen einfließen. Dieser integrale Ansatz, der bereits von Großinvestoren eingefordert wird, erlaubt es, ökologisch sinnvolle Gebäude zu den besten wirtschaftlichen Konditionen auch im Kleinen zu realisieren. Durch die Einbeziehung des gesamten Gebäudelebenszyklus in die Planung wird es möglich, die nachfolgenden Kosten und Umweltbelastungen eines Gebäudes frühzeitig einzuschätzen und die Planung entsprechend abzustimmen. Auch können dadurch neue ökologische und Hochleistungsmaterialien Eingang in die Gebäude der Zukunft erhalten. Diese Materialien entfalten ihre Vorteilhaftigkeit meist nicht bei der Erstinvestition, da sie um ein Vielfaches preisintensiver sind als die herkömmlichen Materialien, sondern in den weiteren Lebenszyklusphasen, z. B. durch Energieeinsparungen, verbesserten Wohnkomfort, Recyclingfähigkeit, Flächengewinne etc.

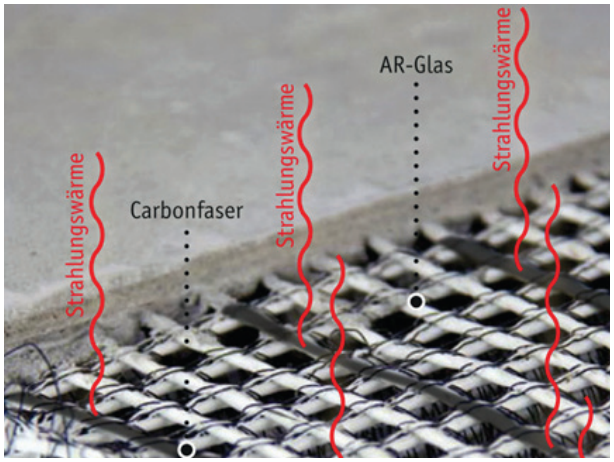


Abb. 88 Integration einer Strahlungsheizung mit Carbonfasern im Textilbeton, Forschungsprojekt smart^{tex} am ai:L

Die Integration und Verschmelzung von derzeit noch getrennten Funktionen und Systemen zu multifunktionalen Materialien ermöglicht neue Bauweisen sowie eine Verringerung der Schnittstellen (Gewerke). Dies führt zu einer Vereinfachung und Beschleunigung der Abstimmungsprozesse. Ein mögliches Szenario wäre, die Bereiche Gebäudehülle und Gebäudetechnik in ihren Funktionen zu verschmelzen, dadurch Materialien zu reduzieren und die Gebäudeinfrastruktur zu optimieren (siehe Abb. 88). Die systemische Zusammenführung eröffnet die Möglichkeit, Gebäude, Komponenten und Nutzer miteinander zu vernetzen. Durch diese Innovationen können im Bauwesen neue Wertschöpfungsketten erschlossen werden. Hier hat Deutschland die Chance, das erzeugte Know-how und die Technologien aus Forschung und Entwicklung in marktreife Produkte zu überführen und diese als Leitanbieter (leading country) zu vermarkten und zu exportieren.

5. Lösungsansatz

5.1 Architektonische Betrachtung

Ausgangspunkt der architektonischen Betrachtung ist die Entwicklung von vaku^{tex} als planares Fassadenelement. Auf dieser Grundlage wurden Gestaltungsvarianten einzelner Elemente sowie ganzer Fassaden entwickelt.

5.1.1 Oberflächengestaltung

Neben der Ästhetik des unbehandelten grauen Sichtbetons können mit verschiedenen Maßnahmen weitere Gestaltungen der Textilbetonplatten erzeugt werden.
Untersucht wurde, wie sich der Beton durch Beimischen unterschiedlicher Pigmente verändert und welche Farbgebung sich einstellt. In Zusammenarbeit mit dem Projektpartner HFB Engineering wurden neben den betongrauen auch weiße und schwarze Textilbetonplatten hergestellt (siehe Abb. 89 bis Abb. 92). Auch ist es möglich, Abbildungen mittels texturierter Schalungseinlagen in 20 mm starke Betonplatten einzubringen. Dazu wurden Matrizen der Firma Reckli GmbH eingesetzt (siehe Abb. 93 bis Abb. 98). Darüber hinaus ist z. B. das Ansäuern, Sandstrahlen, Lasieren oder Polieren der Flächen möglich, sodass sich bereits in der Ebene eine Vielzahl von Gestaltungsmöglichkeiten für die vaku^{tex}-Elemente ergibt.

Abb. 89 Ansicht einer weiß durchgefärbten Textilbetonplatte

Abb. 90 Unterschiedliche Färbung der inneren und äußeren Platte

Abb. 91 Ansicht einer schwarz durchgefärbten Textilbetonplatte

Abb. 92 Gleichmäßige Färbung der inneren und äußeren Platte

Abb. 93 Ansicht einer Bambustextur im Textilbeton

Abb. 94 Perspektive der unregelmäßigen Bambustextur

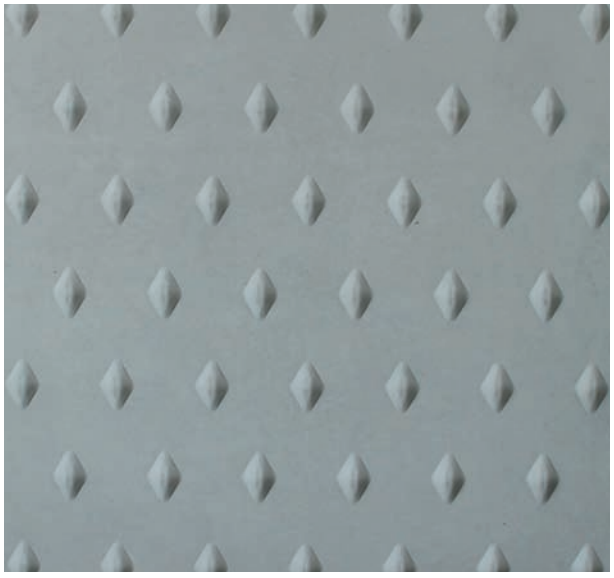


Abb. 95 Ansicht einer Rautenmusterung im Textilbeton

Abb. 96 Perspektive der regelmäßigen Rautenmusterung

Abb. 97 Ansicht einer Bildgestaltung im Textilbeton

Abb. 98 Veränderte Bildwahrnehmung durch Blickwinkelveränderung

Durch die getrennte innere und äußere Textilbetonplatte kann die Gestaltung im Innen- und Außenraum variiert werden.

5.1.2 Problematik durchschlagender Gelege

Ein momentanes Problem des Textilbetons ist es, dass sich die textile Bewehrung an der Sichtoberfläche abzeichnet, wenn eine zu geringe Betondeckung vorhanden ist. Dieses optische Problem wurde in der Textilbetonforschung bisher nicht untersucht. Hierzu besteht deshalb noch Klärungsbedarf. Um dennoch eine qualitativ hochwertige Textilbetonoberfläche für die vaku^{tex}-Elemente zu gewährleisten, wurden Versuche zu unterschiedlichen Gelegetiefen durchgeführt. Diese sollten klären, wie tief die Gelege eingebracht werden müssen, damit sie sich nicht auf der Oberfläche abzeichnen.

Betonieren der Musterplatten

Für den Versuch wurden 300 x 300 x 30 mm große Musterplatten mit Pagel TF 10-Beton und einem AR-Glasgelege mit einer Maschenweite von 15 x 15 mm angefertigt. Beim Betonieren wurden die Gelege in unterschiedlichen Tiefen eingelegt. Der Abstand von der Sichtoberfläche betrug 2,5/ 5,0/ 7,5/ 10,0/ 12,5 und 15,0 mm. Die Nachbehandlung erfolgte durch Abdecken und regelmäßiges Befeuchten der Betonflächen. Nach 7 Tagen wurde die Nachbehandlung eingestellt, die Platten ausgeschalt und weitere 21 Tage im im Trockenraum bei 23 °C und 50 % rel. Luftfeuchte gelagert.

Ergebnisse

Die Begutachtung der Oberflächen nach dem Aushärten ergab, dass sich die textile Bewehrung je nach Betondeckung unterschiedlich abzeichnet. Je tiefer die Gelege eingebracht wurden, desto weniger ist ein *„Durchschlagen"* der Textur zu erkennen (siehe Abb. 99 bis Abb. 104). Bei einer Betondeckung von 10 mm sind kaum noch Spuren an der Oberfläche sichtbar, ab 12,5 mm sind sie gänzlich verschwunden.

5.1.3 Fassadenentwürfe

Um das Erscheinungsbild des vaku^{tex}-Fassadenelements in einen realen Bezugsrahmen zu bringen und seine Wirkung in der Fassade zu zeigen, wurde mittels Fotomontage eine Fassadentransformation eines bestehenden Gebäudes vorgenommen. Dafür fiel die Wahl auf das KPMG-Gebäude in Leipzig (siehe Abb. 105). Auf Grundlage dieser Eckbebauung im gründerzeitlichen Blockrand ergab sich die Möglichkeit, gleich zwei Fassaden im urbanen Kontext darzustellen.

Geschosshohe Plattenformate

Für den Entwurf wurden rechteckige geschosshohe Formate für die Fassadengestaltung gewählt. Diese wechseln sich in einem variierenden Rhythmus mit geschosshohen Veglasungen ab. Durch das Spiel mit den Elementbreiten wird dieses Thema noch unterstützt. Die Farbgestaltung der Fassadenplatten ist entsprechend der Gebäudeteile unterschiedlich gewählt (siehe Abb. 106).

Variierende Plattenformate

In diesem Fassadenentwurf steht das Spiel mit unterschiedlichen Plattenformaten und -anordnungen im Vordergrund. Dabei wurden Plattengrößen bis über zwei Geschosse einbezogen (siehe Abb. 107).

Kristalline Fassadenstrukturen

Mit planaren Elementen ist es ebenso möglich, Fassaden von kristallinen Gebäudestrukturen zu entwerfen. Durch die unregelmäßigen, nicht orthogonal zueinander stehenden Flächen sowie die individuellen Einschnitte in der Gebäudehülle des Entwurfes ergeben sich speziell an den Kanten trapezförmige Elemente. Dies stellt einen konstruktiven Mehraufwand dar, der sich jedoch mit relativ geringen Mitteln umsetzen lässt (siehe Abb. 108).

Die Entwürfe zeigen, dass mit dem vaku^{tex}-Element nicht nur verschiedene Oberflächengestaltung realisiert werden können, sondern durch die Kombination von Formaten und Öffnungen auch eine Vielzahl von Fassadenlösungen möglich ist.

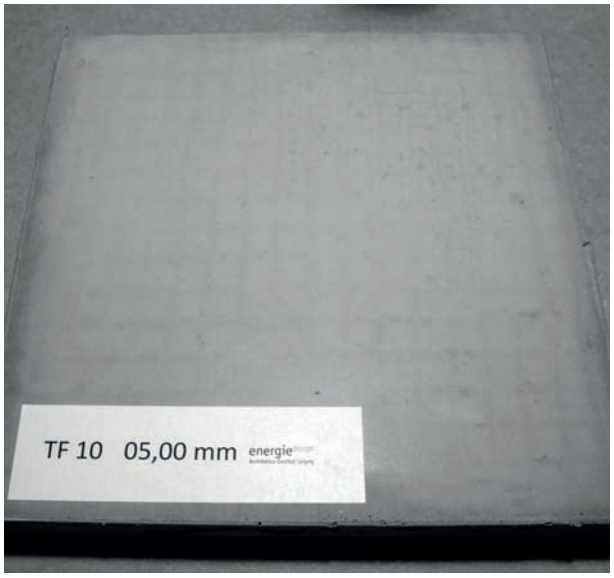


Abb. 99 Oberfläche Musterplatte: TF 10 / 5,0 mm Gelegetiefe

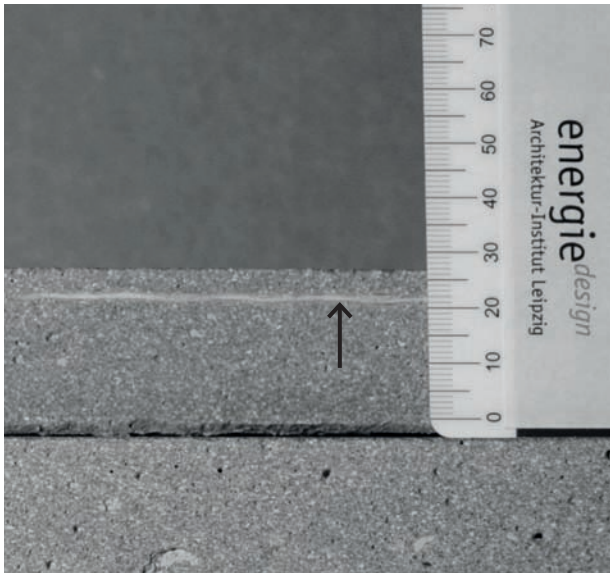


Abb. 100 Schnitt Musterplatte: TF 10 / 5,0 mm Gelegetiefe

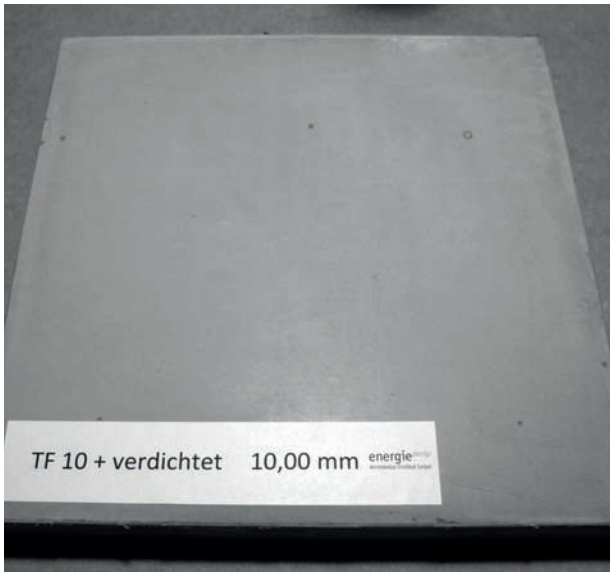


Abb. 101 Oberfläche Musterplatte: TF 10 / 10,0 mm Gelegetiefe

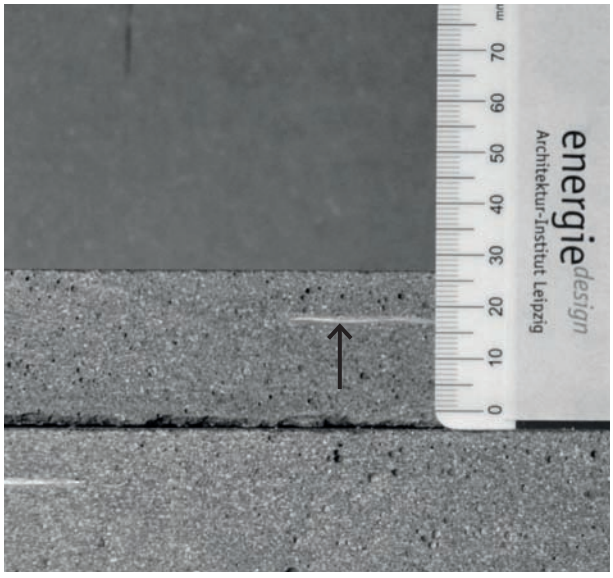


Abb. 102 Schnitt Musterplatte: TF 10 / 10,0 mm Gelegetiefe

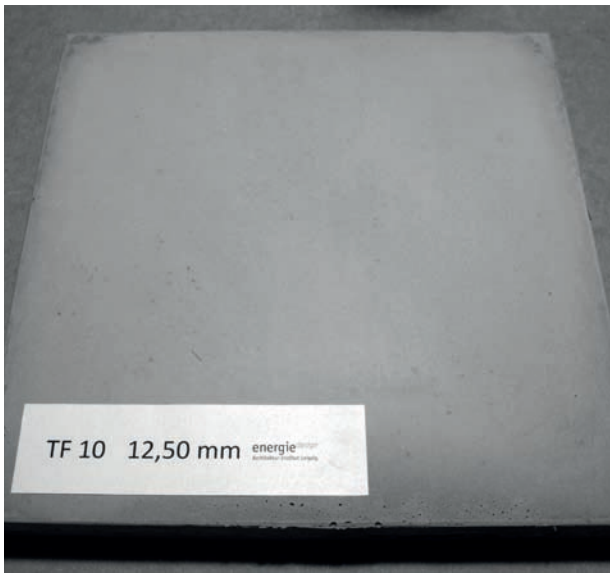


Abb. 103 Oberfläche Musterplatte: TF 10 / 12,5 mm Gelegetiefe

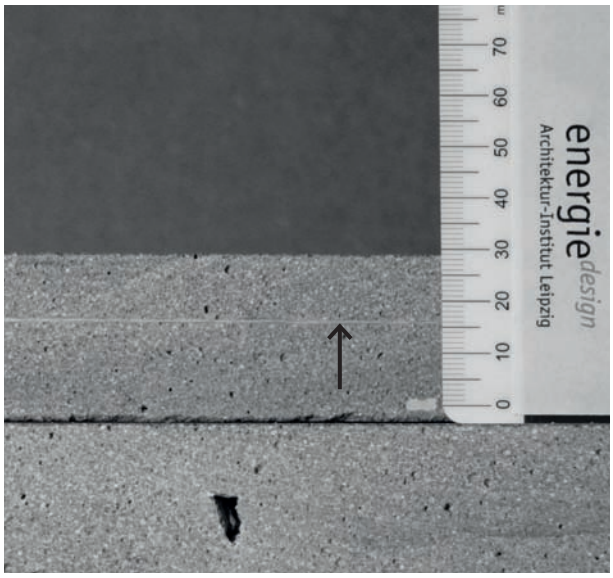


Abb. 104 Schnitt Musterplatte: TF 10 / 12,5 mm Gelegetiefe

Abb. 105 Grundlage der Fotomontage: KPMG-Gebäude Leipzig

Abb. 106 Fotomontage: Fassade mit geschosshohen Plattenformaten

Abb. 107 Fotomontage: Fassade mit variierenden Plattenformaten

Abb. 108 Fotomontage: Kristalline Gebäudestruktur mit unregelmäßigen Flächen

5.2 Konstruktiv-technische Betrachtung

Nach Klärung ausgewählter konstruktiver und bauphysikalischer Aspekte in den hypothetischen Lösungsansätzen konnte eine Lösungsvariante des vaku*tex*-Fertigteils erarbeitet werden. Auch sollte neben der Detailentwicklung eine Simulation das Verhalten des Eelements bei Wärme- und Feuchteeinwirkungen klären. Parallel dazu erbrachte die BTU Cottbus statische Nachweise in Form von Simulationen und Berechnungen sowie Versuche zu Befestigungsmitteln und Verbindungen. An der Materialforschungs- und Prüfungsanstalt Leipzig GmbH (MFPA) wurden im späteren Verlauf orientierende Brand- und Schallprüfungen durchgeführt. Durch die Auswertung der Prüfergebnisse mit Partnern und Experten konnten Rückschlüsse auf die konstruktive Gestaltung und die Planung gezogen werden. Ein Datenblatt fasst die Ergebnisse abschließend zusammen.

5.2.1 Konstruktion

Mit den zuvor ausgewählten Details der jeweiligen Themenbereiche (siehe Abb. 110) wurden Konstruktionsvarianten des Fassadenelements erstellt und in einer erneuten Bewertungsrunde im Rahmen eines Treffens mit den Projektexperten diskutiert (2. Expertentreffen, 03|2012). Durch die gewonnenen Erkenntnisse konnte eine optimierte Konstruktionsvariante entwickelt werden, aus der im Anschluss Prüfkörper für Brand- und Schallmessungen erstellt wurden.

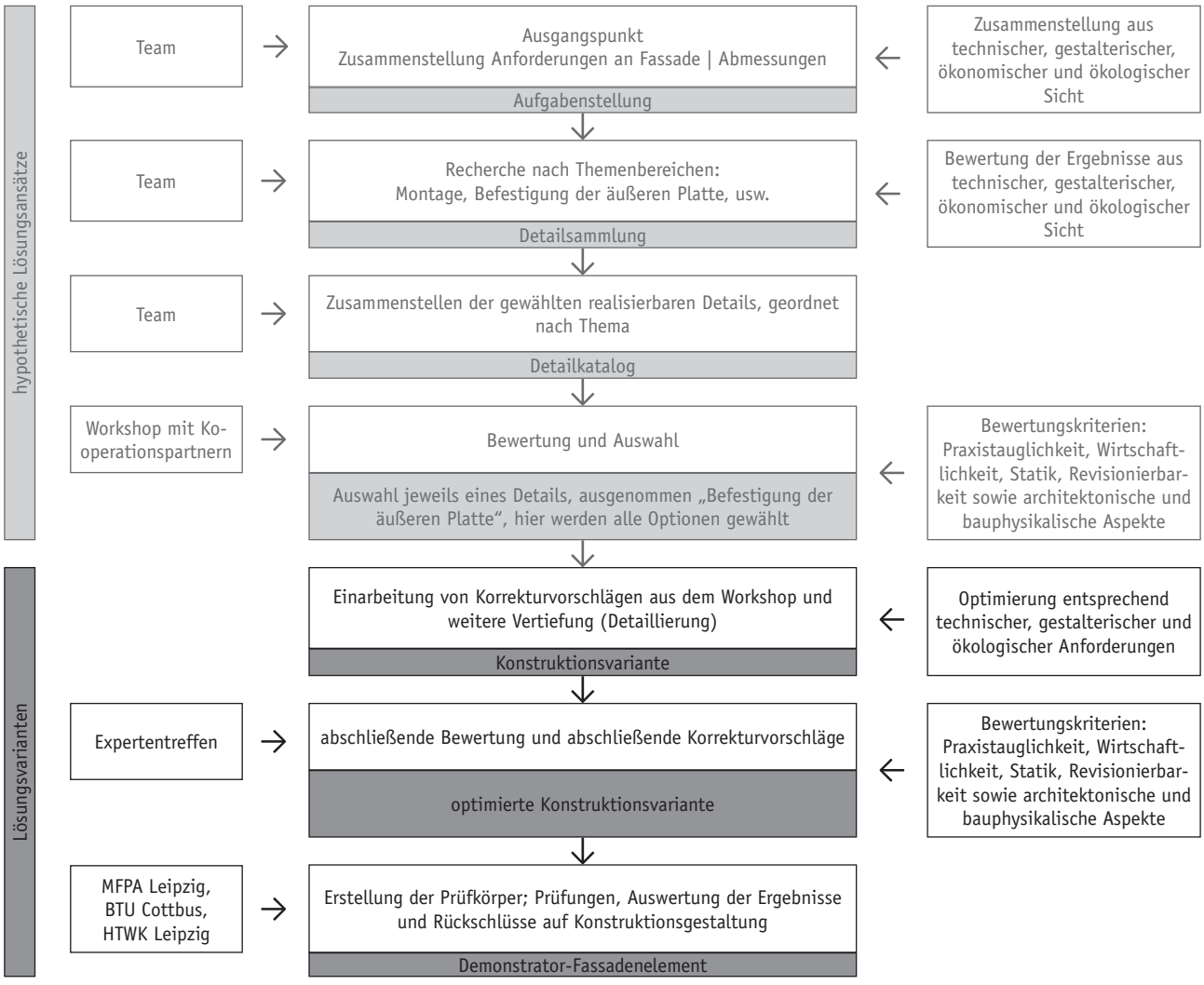
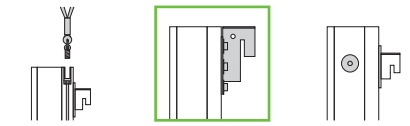


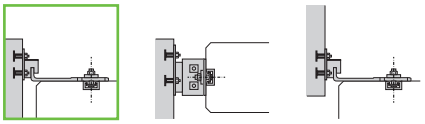
Abb. 109 Darstellung der Schritte zur Entwicklung der optimalen konstruktiven Gestaltung

Themenbereich	Detailkatalog
Auswahlvariante	ausgewählte Details

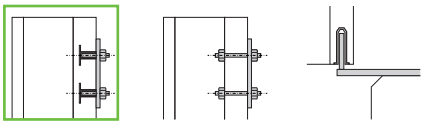
Transportbefestigung
Öffnung an der Elementbefestigung



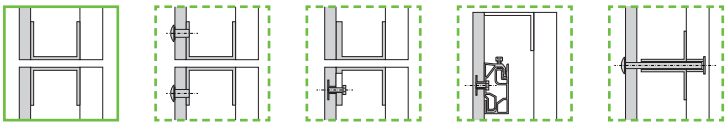
Befestigung am Bauwerk
Befestigung auf der Decke, hängende Montage



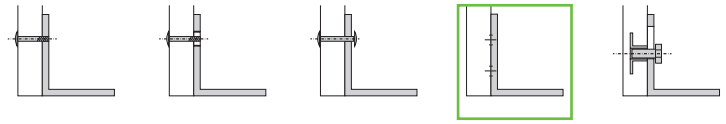
Befestigung des Einhängsystems an den Elementen
Flanschmuttern in der hinteren Platte



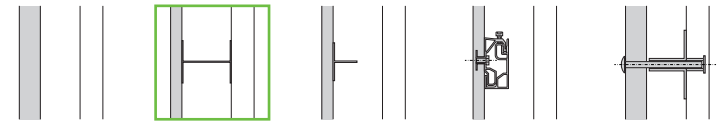
Befestigung der äußeren Platte
(1) Verklebung (2) Schrauben am Rand
(3) Schlüssellöcher (4) Agraffensystem
(5) Verschraubung im Feld



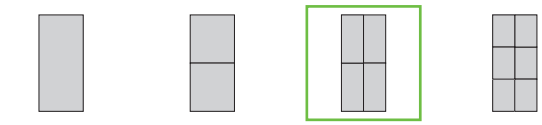
Befestigungsmittel im GFK
Verklebung



Aussteifung der äußeren Platte
Durchgängiges GFK-Profil

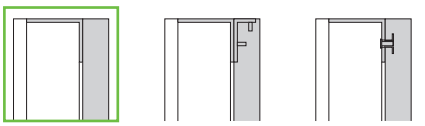


Formate der Vakuumdämmpaneele
Ein Vakuumpaneel pro Lage

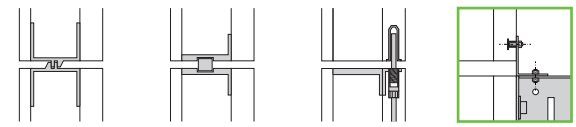


Lagenausbildung der Vakuumdämmpaneele
Zweilagige Verlegung, versetzter Stoß

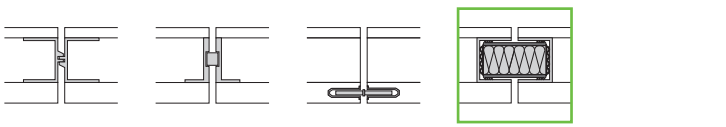
Befestigung an der inneren Platte
Verklebung der GFK-Profile auf Textilbeton



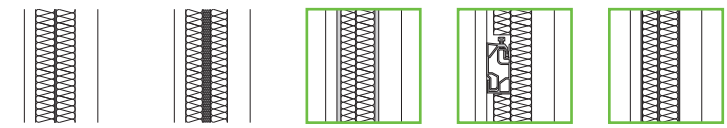
Kopplung der Elemente in der Horizontalfuge
Kopplung an der Elementbefestigung



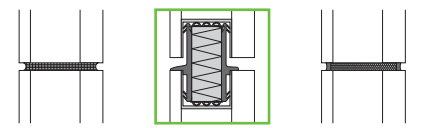
Kopplung der Elemente in der Vertikalfuge
Fugenverbinder



Verbesserung des Schallschutzes
Kombination aus Luftschichten, unterschiedliche VIP-Dicken, Agraffen mit Zellkautschukeinlage, Gummilagen



Abdichtung der Anschlussfugen
Fugensonderstück mit Dichtungen



Verbesserung des Brandschutzes
Brandschutz-Fugenschnur

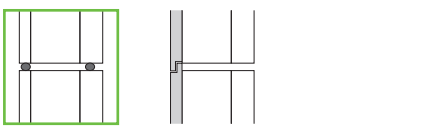


Abb. 110 Darstellung der Schritte zur Entwicklung der optimalen konstruktiven Gestaltung

5.2.1.1 Elementaufbau

Ausgehend von den architektonischen Rahmenvorgaben der hypothetischen Lösungsansätze wird vaku*tex* als geschosshohes Vorhangfassadenelement mit einer Höhe von 320 cm geplant. Die Elementbreite wurde auf 150 cm festgelegt. Beide Maße sind in Abhängigkeit von Gestaltungswünschen veränderbar, Elementbreiten bis 300 cm können realisiert werden. Die für die Entwicklung festgelegte Elementstärke beträgt 11 cm und entspricht damit der typischen Dicke von Passivhausfenstern. Von außen nach innen ist das Element folgendermaßen aufgebaut:

- 15 mm Textilbeton
- 5 mm Kunststoffwellplatte
- 30 mm Vakuumisolationspaneel
- 25 mm Vakuumisolationspaneel
- 5 mm Kunststoffwellplatte
- 30 mm Textilbeton

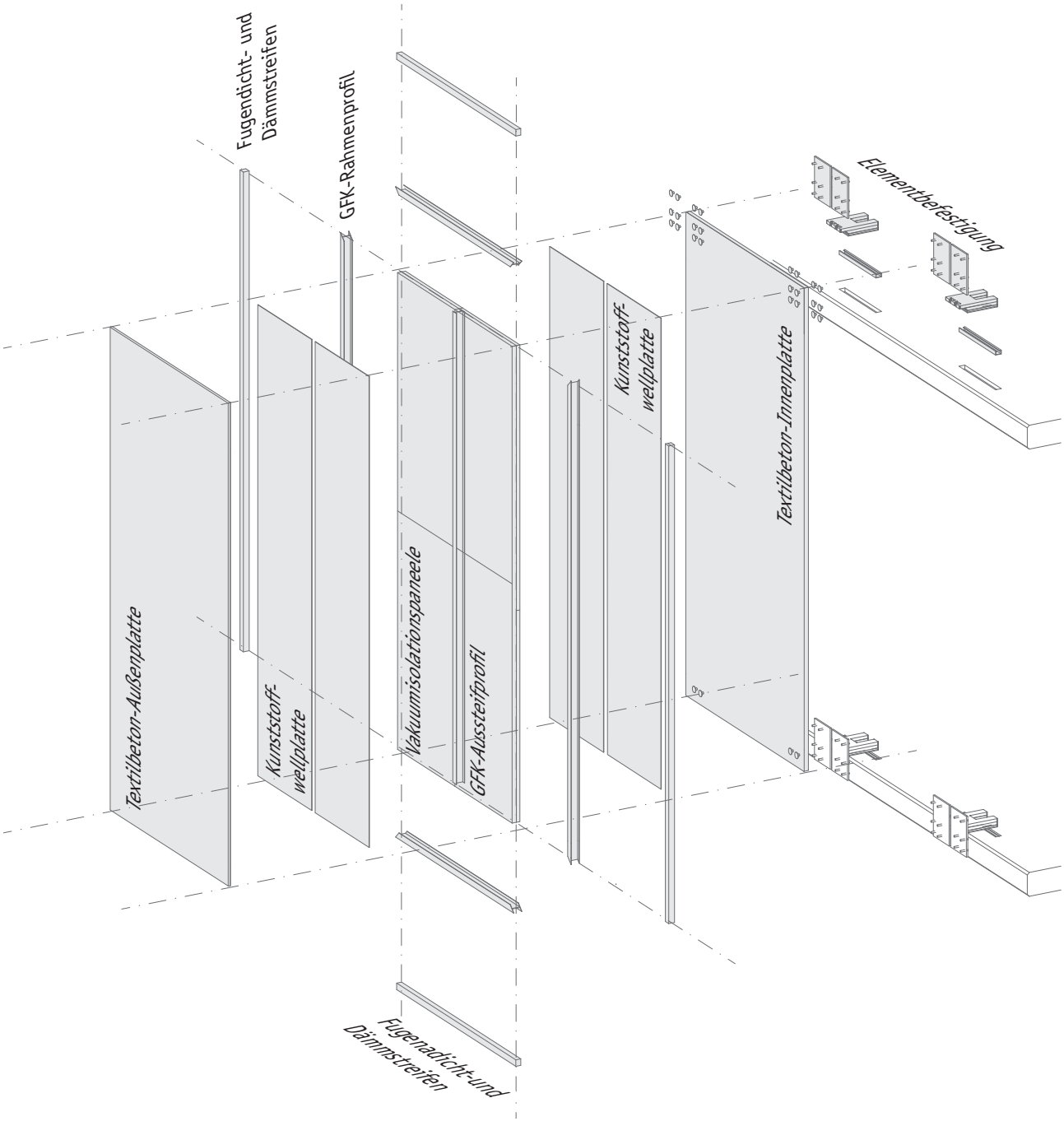


Abb. 111 Isometrische Explosionszeichnung des vaku*tex*-Elementes

Die innere und äußere Textilbetonplatte sind umlaufend mit GFK-Rahmen aus I-Profilen und zusätzlich durch ein in der Elementmitte vertikal verlaufendes I-Profil verbunden. In der gewählten Variante werden GFK-Profile und Textilbetonplatten verklebt. Sie ist somit nicht revisionierbar.

Grundannahmen zur statischen Betrachtung
Die nachfolgenden konstruktiven Annahmen bilden die Grundlage für die statischen Nachweise des vaku[tex]-Elements und seiner Komponenten durch die BTU Cottbus (siehe Anhang *„8.1 Statische Bemessung“*).

Die Befestigung des Fassadenelements an der tragenden Struktur des Gebäudes (i. d. R. Deckenplatten) erfolgt durch je zwei Ankerpunkte am oberen und unteren Elementrand. Da das Element hägend realisiert wird, müssen alle Vertikallasten (Eigenlasten aus dem Elementgewicht) über die oberen beiden Ankerpunkte aufgenommen werden. Winddruck-, Windsog- und Ersatzlasten werden zu gleichen Teilen auf alle vier Ankerpunkte verteilt.

Am oberen Rand wird die Verankerung durch Ankerplatten aus Stahl realisiert. Diese werden kraftschlüssig mit den einbetonierten Flanschmuttern oberflächenbündig an der inneren Textilbetonplatte befestigt. Zudem werden sie nach oben hin verlängert, sodass eine Kopplung zum darüber liegenden Element hergestellt werden kann.
Zur Abtragung der Vertikallasten ist das Element am oberen Rand an zwei Punkten statisch bestimmt aufgehängt. Für die Abtragung horizontaler Einwirkungen kann das Element als oben und unten gelenkig gelagert betrachtet werden. Außen angreifende Windlasten werden von der äußeren Textilbetonplatte zunächst auf die GFK-Profile übertragen. Durch den angenommenen Verbundquerschnitt können diese zum oberen bzw. unteren Rand des Elements abgeleitet werden. Für die Einleitung der Kräfte in die Ankerpunkte sind lokale Betrachtungen erforderlich. Da der E-Modul der GFK-Profile mit dem des Betons nahezu identisch ist, brauchen unterschiedliche E-Module in der Ermittlung der Querschnittswerte nicht berücksichtigt zu werden.

Statisch nachgewiesene Punkte
Die im statischen Nachweis erbrachten Ergebnisse werden in den folgenden Beschreibungen der Einzelkomponenten detaillierter erläutert. Als Beanspruchung wurden Eigenlast, Winddruck und -sog sowie die Horizontalkraft von Innen (Ersatzlast) in jeweils maßgebender Kombination berücksichtigt. Folgende Punkte wurden statisch nachgewiesen.

äußere Betonplatte
- in horizontaler Tragrichtung:
  Risskriterium, textile Bewehrung, Querkrafttragfähigkeit
- in vertikaler Tragrichtung:
  Risskriterium

innere Betonplatte
- in horizontaler Tragrichtung:
  Risskriterium, textile Bewehrung, Querkrafttragfähigkeit

GFK-I-Profil, mittig
- Spannungsnachweise

GFK-I-Profil, Ränder
- Spannungsnachweise
- Risskriterium in der äußeren Betonplatte in horizontaler Richtung infolge Windsog

Klebefugen
- Spannungsnachweise

Gesamtelement
- Verformungen

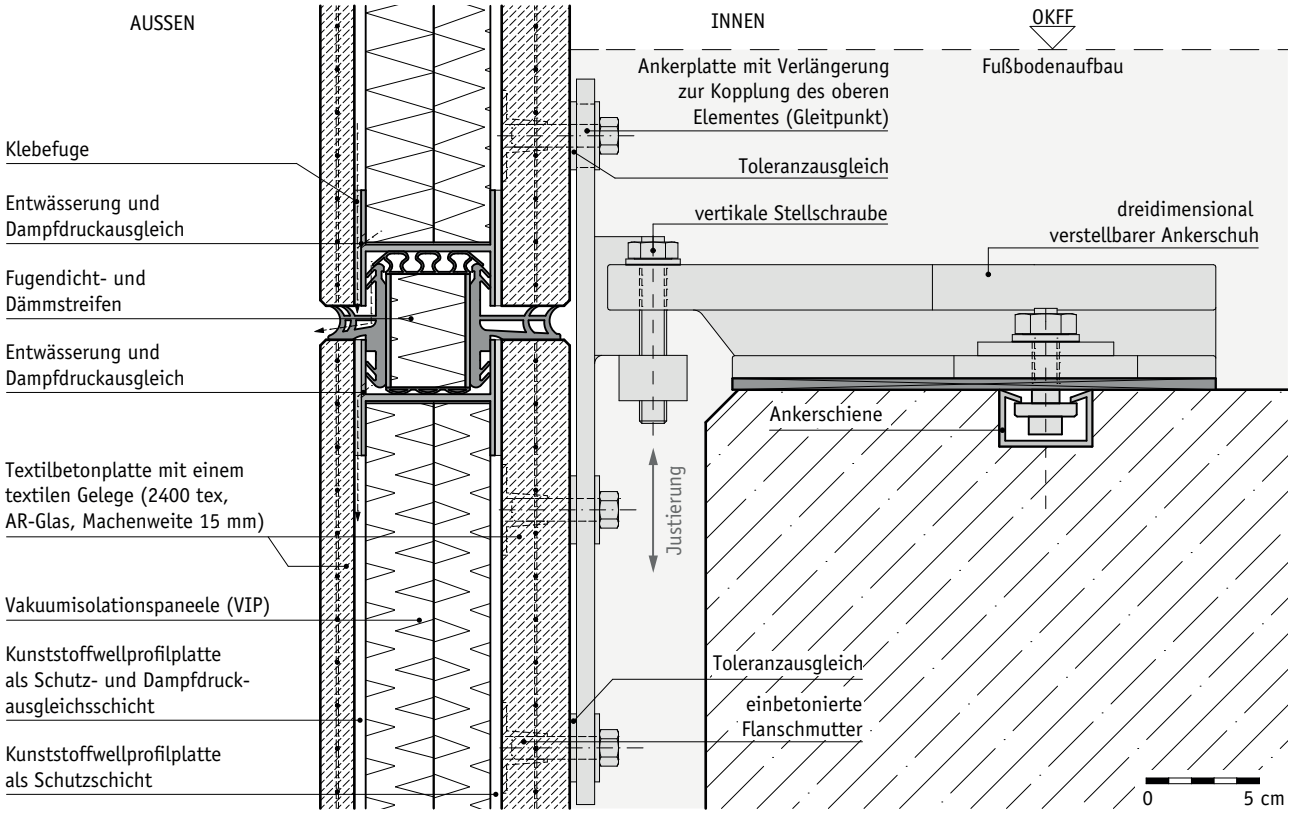


Abb. 112 Detailschnitt vertikal, unmaßstäblich

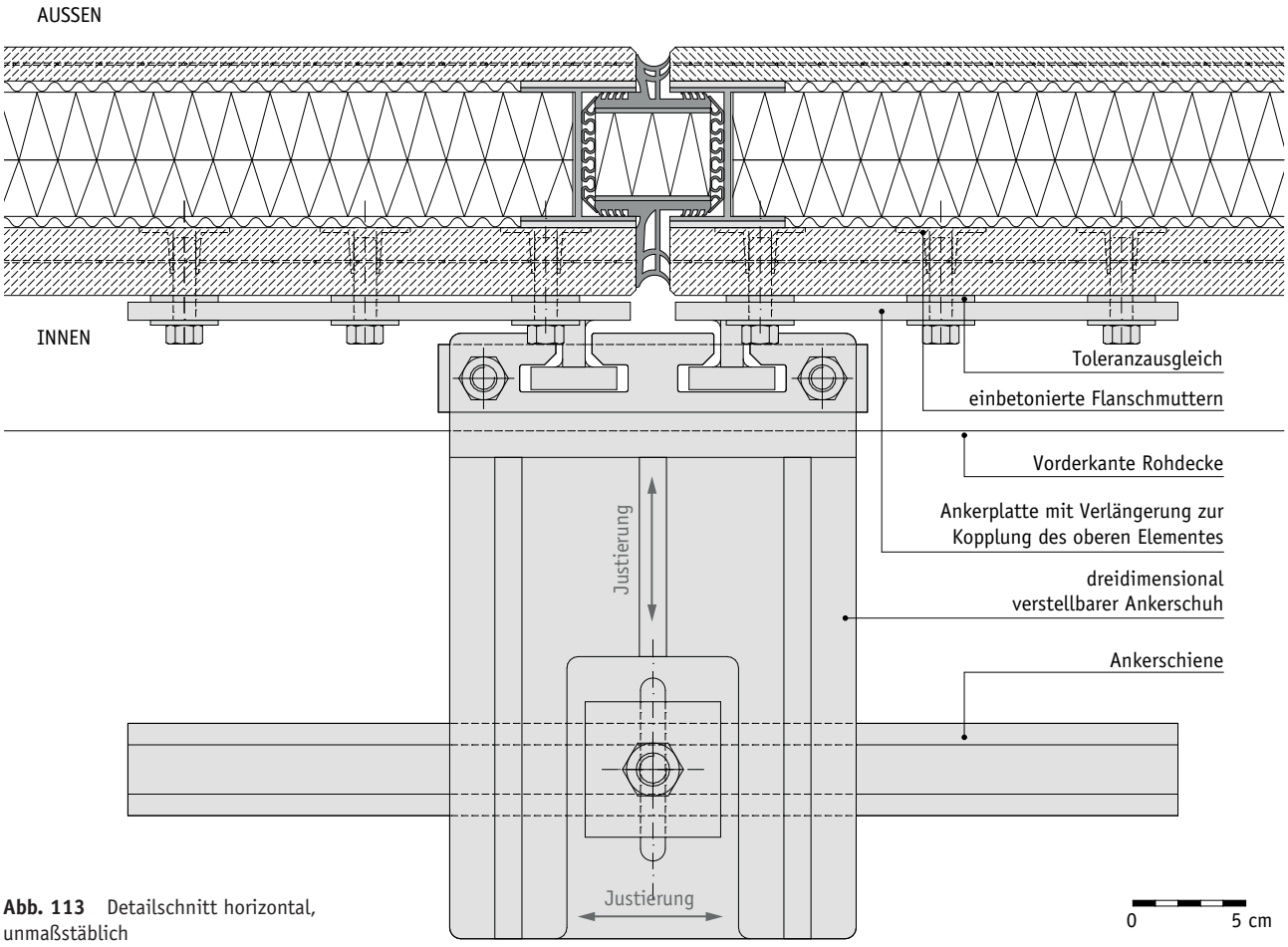
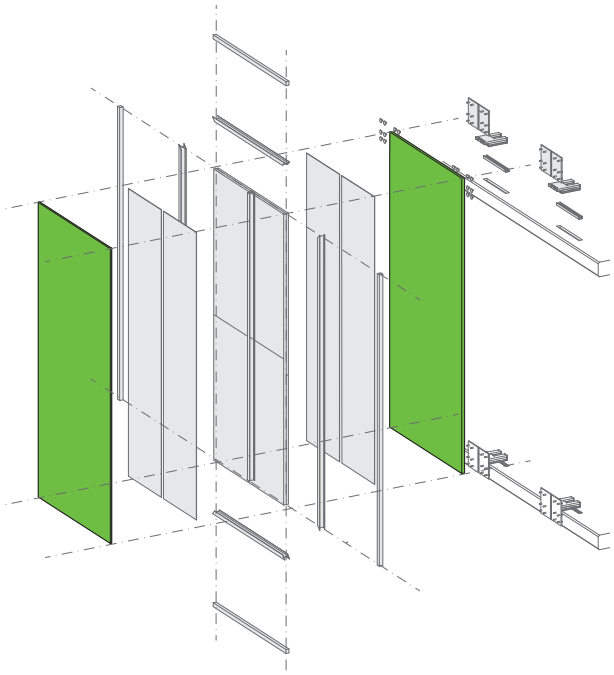


Abb. 113 Detailschnitt horizontal, unmaßstäblich

5.2.1.2 Textilbetonplatten



Den inneren und äußeren Abschluß der Elemente bilden Textilbetonplatten unterschiedlicher Dicke. Für die Prüfbauteile wurde der Feinbeton TF 10 der Firma Pagel verwendet. Für die Großelemente ist ein Feinbeton mit einer Mindestdruckfestigkeit von 60 N/mm² und einer Mindestbiegezugfestigkeit von 10 N/mm² einzusetzen.
Nach dem Betonieren werden die Platten je nach Größe zwei bis sieben Tage in der Schalung belassen. In den ersten sieben Tagen des Abbindeprozesses ist eine Lagerung im Wasserbad oder mit entsprechender Nachbehandlung und Lagerung im Trockenraum (z. B. bei konstant 20 °C und 50 % Luftfeuchte) empfehlenswert. Das Abbinden an der Luft erfordert ein Abdecken der Platten mit Folie sowie tägliches Befeuchten. Bei der Nachbehandelung und dem Transport muss darauf geachtet werden, dass sich diese nicht durchbiegen. Eine unsachgemäße Handhabung kann zu Rissen bzw. zum Brechen der Platte führen, da die Endfestigkeit in den ersten Wochen noch nicht erreicht ist. Im Verlauf des Projektes wurden mehrere Probebetonagen mit unterschiedlichen Methoden durchgeführt, um eine exakte Lage der textilen Bewehrung zu erreichen und damit den statischen Anforderungen an die Platte zu entsprechen. Eine zu geringe Betondeckung ist zu vermeiden, da diese momentan noch zu optischen Einbußen (Durchscheinen des Geleges) führt.

In die innere 30 mm starke Textilbetonplatte sind im oberen und unteren Randbereich Flanschmuttern der Firma Limbach einbetoniert (Bezeichnung: L-Flanschmutter M8-A4, Karl Limbach Cie. GmbH & Co. KG, Solingen). Mittig ist ein Textil aus AR-Glas mit 2400 tex und einer Maschenweite von 15 mm eingelegt. In die äußere 15 mm dicke Platte wird beim Betoniervorgang ebenfalls mittig eine textile Lage aus AR-Glas mit 2400 tex und einer Maschenweite von 15 mm eingebracht. Die zur Schalung weisende Seite entspricht der späteren Sichtseite der Platten.

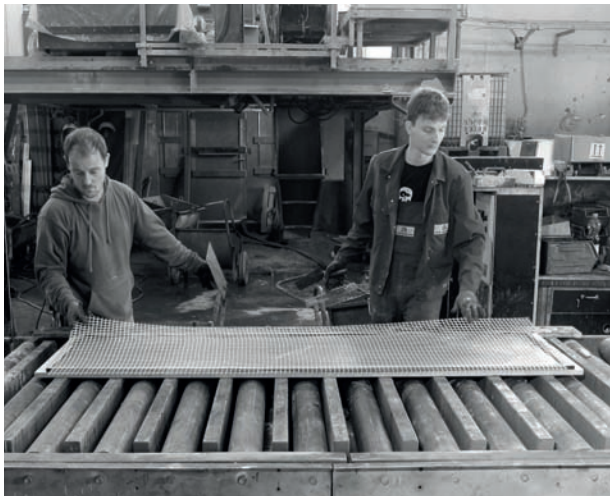
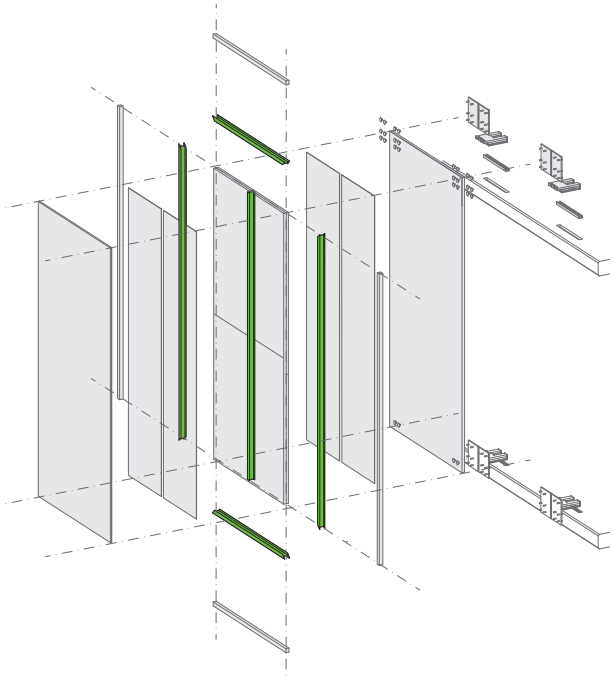


Abb. 114 Einlegen der textilen Bewehrung während des Betonierprozesses beim Projektpartner HFB Engineering

Abb. 115 Frisch betonierte Textilbetonplatten auf dem Herstelltisch beim Projektpartner HFB Engineering

5.2.1.3 Rahmen aus glasfaserverstärktem Kunststoff



Ein Rahmen aus GFK-I-Profilen dient der Verbindung der inneren und äußeren Textilbetonplatte. Darüber hinaus steift ein mittig im Element liegende GFK-I-Profil die Elemente aus. Rahmen und Betonplatten werden, nach entsprechender Vorbehandlung, verklebt. Die Gesamthöhe der Profile liegt bei 59 mm. Bei den erstellten Demonstratoren und Prüfelementen wurden Profile auf Basis von Venylesterharzen eingesetzt, um die Temperaturbeständigkeit zu erhöhen.

Umlaufendes Rahmenprofil
Die Dimensionierung der I-Profile erfolgte hauptsächlich unter statischen und bauphysikalischen Gesichtspunkten. Die auf 3 mm festgelegte Stegdicke der umlaufenden Profile liegt über dem statisch erforderlichen Mindestmaß von 2,8 mm. Sind Fensterflächen in den Elementen vorgesehen, müssen die Stege entsprechend der statischen Berechnungen mindestens 3,2 mm (besser 3,5 mm) dick ausgebildet werden.
Die Flanschdicke entspricht mit 2 mm dem durch den Hersteller der Profile (Kooperationsunternehmen CTS Composite GmbH) angegebenen Mindestwert. Die Flanschbreite ergibt sich durch die statisch notwendige Breite der Klebefuge sowie aus dem Herstellprozess der Verklebung (z. B. Anordnung der Kleberaupen usw.). Vorgesehen wird daher eine Flanschbreite von 45 mm.

Vertikalaussteifer
Der mittige Vertikalaussteifer wurde nach ähnlichen Kriterien bemessen. Die statisch notwendige Stegdicke wurde, inklusive Sicherheitsaufschlag, auf 2 mm festgelegt. Die Flansche des I-Profils sind 2 mm dick und 45 mm breit. Die Verbindung zur inneren und äußeren Textilbetonplatte wird durch die Verklebung der Profilflansche realisiert.

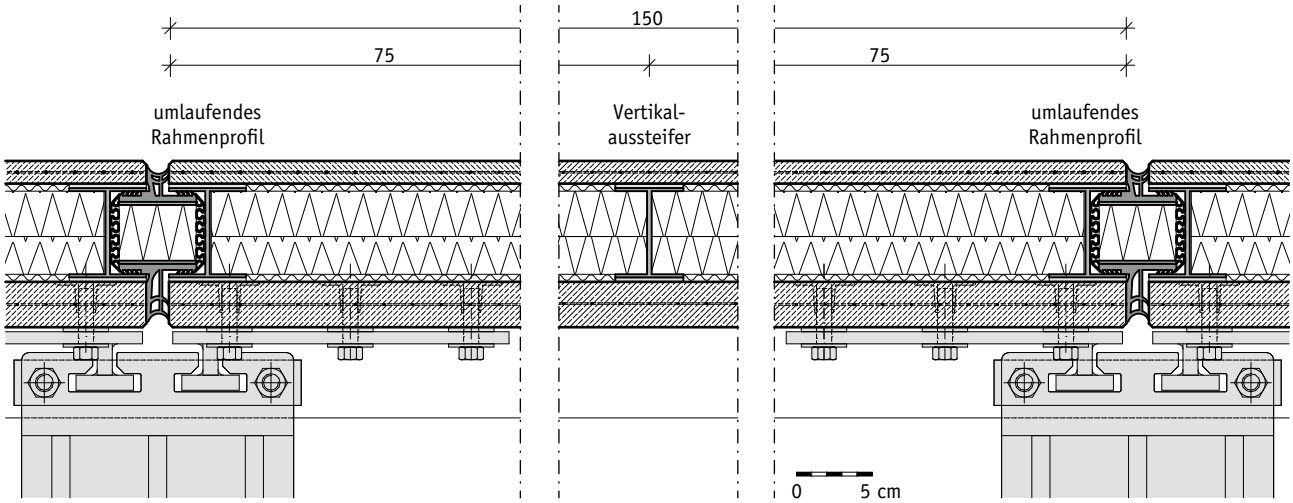
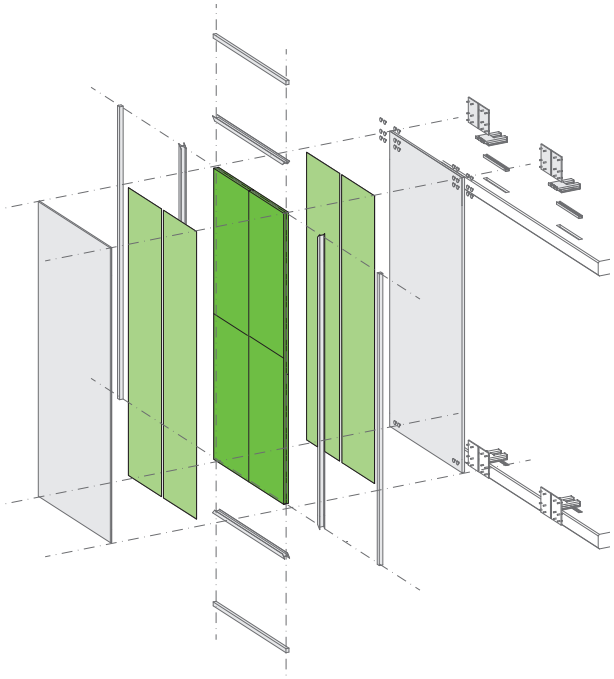


Abb. 116 Horizontalschnitt M 1:5

5.2.1.4 Vakuumpaneele und Kunststoffwellplatten



Aufgrund der Ergebnisse von bauphysikalischen Untersuchungen (siehe 5.2.2) und ökologischen Bewertungen (siehe 5.3) wurde für die Dämmebene aus VIPs eine Gesamtdicke von 55 mm vorgesehen. Diese werden aus Sicherheitsgründen zweilagig ausgeführt. Sollte ein Paneel ausfallen, wird ein Mindestwärmeschutz durch das belüftete und das Nachbarpaneel gewährleistet. Die beiden VIP-Ebenen werden vor dem Verkleben der Textilbetonplatten in die Profile geschoben.

Paneelstöße

Die Dämmebene wird unter Berücksichtigung der produktionstechnisch maximal möglichen Herstellungsmaße aus mehreren VIPs zusammengesetzt. Dabei ist darauf zu achten, dass im Feld keine direkt durchgehenden Stöße entstehen. Durch Überlappungen von mindestens 10 cm lassen sich Wärmebrücken durch Paneelstöße weitestgehend vermeiden. In Abb. 117 ist ein 320 cm hohes und 150 cm breites vaku[tex]-Element dargestellt, bei dem die Paneelaufteilung in den beiden Dämmlagen markiert ist. Dabei sind innere und äußere Lage über die Höhe zweigeteilt und die Stöße verschoben. Durch die damit erzeugten Überlappungen von mindestens 10 cm können, bis auf die durchgehenden, unvermeidbaren Stöße an den GFK-Profilen, Wärmebrücken der Paneelstöße wesentlich reduziert werden.

Paneelschutz und Kunststoffwellplatte

Um auf die Problematik der hohen Sensibilität der VIPs gegenüber kleinsten Beschädigungen zu reagieren, wurden bei den vaku[tex]-Elementen verschiedene Maßnahmen ergriffen. So sind die Stirnseiten der VIPs in die GFK-I-Profile eingeschoben, um speziell die verschweißten Foliennähte zu schützen (siehe Abb. 116). Da es beim Einbau auf der Baustelle oft zu Beschädigungen der Dämmpaneele kam - vor allem verursacht durch unzureichend geschultes Personal oder durch nicht immer ideale Baustellenbedingungen - ist eine Werksfertigung des Gesamtelementes vorgesehen. Hier herrschen optimale Bedingungen für einen schadfreien Einbau. Zudem werden die VIPs in den fertigen Elementen noch einmal geprüft. Zum Schutz der Paneele wird zusätzlich eine 5 mm starke Kunststoffwellplatte zwischen der jeweiligen Textilbetonplatte und dem Dämmpaneel angeordnet. Diese schafft eine schützende Pufferzone und entkoppelt die Deckschichten vom Kern, zudem wird eine positive Wirkung hinsichtlich des Schalldämmmaßes erreicht. Bei erhöhten Schalldämmanforderungen sind darüber hinaus zusätzliche Gummilagen auf die VIPs aufzukleben.

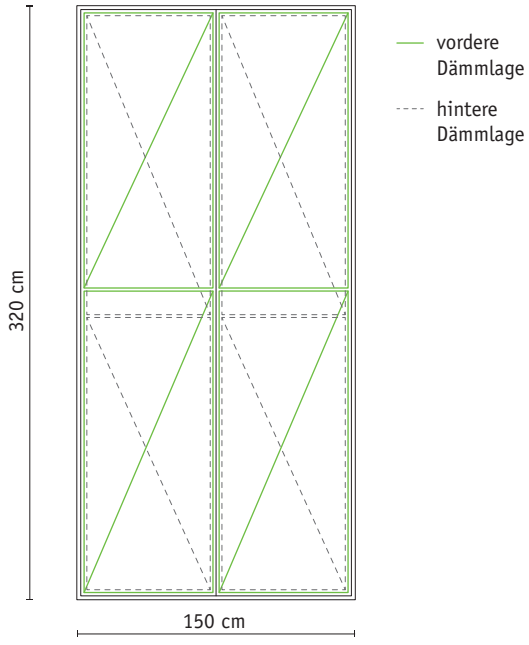
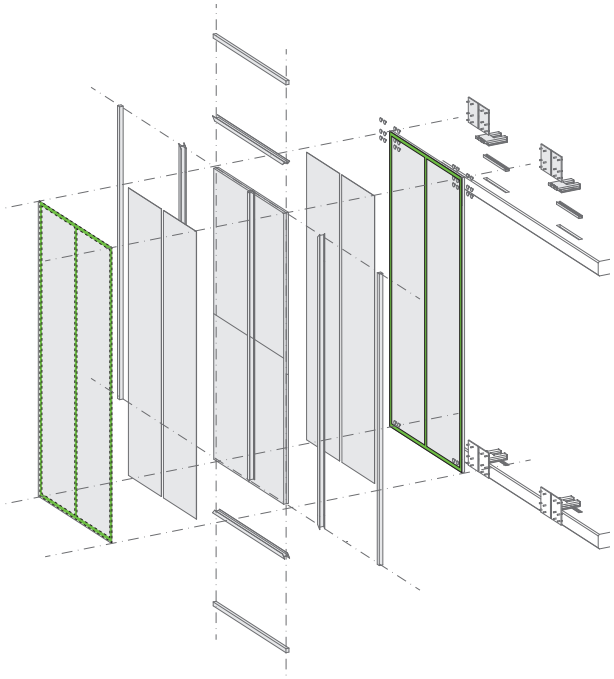


Abb. 117 Verlegung der VIPs im vaku[tex]-Element

5.2.1.5 Verklebung



Zur Befestigung der vorderen und hinteren Textilbetonplatte mit dem Fertigteilinneren wurde die Variante *„Verklebung"* für die weitere Bearbeitung gewählt.
Ähnlichkeiten der gewählten vaku^{tex}-Variante bestehen zu geklebten Ganzglasfassaden, die als Structural-Glazing (SG) oder Structural-Sealant-Glazing (SSG) bezeichnet werden. Rechtlich werden die Kriterien dieser Fassaden in der europäischen Leitlinie ETAG 002 geregelt. Prinzipiell muss in Deutschland im Bereich Structural-Glazing das Fassadeneigengewicht mechanisch abgetragen und ab einer Montagehöhe von 8 m eine zusätzliche Kippsicherung vorgesehen werden.
Bei dem für die vaku^{tex}-Elemente verwendeten und zugelassenen Tack-Panel-System der Firma Sika Deutschland GmbH & Co. KG handelt es sich um eine der wenigen Ausnahmen dieser Regelung. Hier ist eine Verklebung im Fassadenbereich bis 22 m Höhe ohne mechanische Zusatzsicherung möglich.Beim Einsatz geklebter Fassadenkonstruktionen an höheren Gebäuden sind Haltevorrichtungen (z. B. Metallwinkel oder -klemmen) zu integrieren, die im Fall des Versagens der Klebverbindung ein Herabfallen von Elementteilen verhindern.

SikaTack-Panel-System
Da es kein zugelassenes Verklebungssystem für die neuartige vaku^{tex}-Fassade gibt, musste auf ein zugelassenes System für eine vergleichbare Baukonstruktion zurückgegriffen werden, das SikaTack-Panel-System. Dieses dient im Sinne der Zulassung der verdeckten und wirtschaftlichen Montage von hinterlüfteten, außenliegenden Fassadenplatten. Das System besteht aus einem dauerelastischen Klebstoff und einem doppelseitig klebenden Montageband zur Fixierung der Platten sowie entsprechenden Produkten zur Vorbehandlung des Untergrundes. Die Aushärtezeit des 1-Komponenten Polyurethan-Klebers beträgt 24 Stunden. Die Brandklassifizierung nach DIN 4102 Teil 1 ist B2 [Sika, 2011].

Anwendung für vaku^{tex}
Die Haftungsprüfungen der Firma Sika für den Textilbeton und das GFK, die in Anlehnung an das DVS Merkblatt 1618 und DIN 54457 durchgeführt wurden, ergaben ausschließlich sehr gute Haftungswerte. Die Klebeflächen müssen sauber, trocken und fettfrei sein. Bei den Betonplatten ist auf eine maximale Feuchte von 2,5 % zu achten. Empfohlen wurde hinsichtlich der Vorbehandlung:

- Textilbeton: Anschleifen der Haftflächen z. B. mit Drahtbürsten; Reinigung mit ölfreier Druckluft; Auftragen von SikaTack-Panel-Primer
- GFK-Profil: Anschleifen des Profils mit Schleifvlies (Körnung 360); Reinigung mit Sika Aktivator-205; Einsatz von Sika Tack-Panel-Primer

Darüber hinaus wurden Haftungsprüfungen durch das Institut für Massivbau der BTU Cottbus durchgeführt. Diese ergaben sehr gute Hafteigenschaften für Textilbeton und GFK.
Aufgrund des Temperaturausdehnungsverhaltens der GFK-Profile und des Textilbetons sowie der Abmaße des Prototypen besitzt die Klebefuge eine Höhe von 3 mm. Diese wird zum einen durch das 3 mm hohe Montageband gewährleistet, zum anderen sind beim Zusammenbau der Elemente entsprechende Abstandhalter einzusetzen. Die statisch notwendige Breite der Klebefuge wurde, inklusive

Sicherheitsaufschlag, auf 45 mm festgelegt. Die Verklebung ist unter kontrollierten Umgebungsbedingungen der Werksfertigung von geschultem Personal durchzuführen.

Feuchtemessung

Wie zuvor bereits erwähnt, beträgt die vom Hersteller angegebene Maximalfeuchte für die Betonplatten 2,5 %. Allerdings wurden in der Vergangenheit auch Ausnahmen akzeptiert, z. B. Feuchten von bis zu 8 % im Fall von Glasfaserbetonplatten. Da noch keine Studien zum Austrocknungsverhalten von Textilbetonplatten vorlagen, wurde dieses an eigenen Prüfkörpern gemessen und dokumentiert. Bestimmt wurde dabei der Feuchtegehalt in Masse % von bis zu 28 Tage alten Proben. Untersucht wurde die Feinbetonmischung TF 10 von Pagel Spezialbeton GmbH & Co. KG mit einem AR-Glasgelege (2400 tex) von V. Fraas Solutions in Textile GmbH. Die Lagerung dieser Messproben erfolgte unter kontrollierten Bedingungen in einem Trockenraum mit 20 °C Lufttemperatur und einer relativen Luftfeuchte von 50 %. Die Ergebnisse der Messungen mit dem CM-Gerät und der Darr-Methode wurden in der Auswertung vergleichend gegenübergestellt.

- Darr-Methode

Das Durchführen einer Messung nach der sogenannten gravimetrischen oder Darr-Messmethode besteht darin, ein Probestück des zu prüfenden Materials zu entnehmen und anschließend zu wiegen. Dieses wird über einen längeren Zeitraum hinweg (24 Stunden) bei hoher Temperatur (bis 105 °C, je nach Werkstoff) bis zur Gewichtskonstanz ausgetrocknet und nochmals gewogen. Aus der festgestellten Gewichtsdifferenz errechnet sich der ursprüngliche Feuchtigkeitsgehalt wie folgt:

$f_{darr} = (m_{nass} - m_{trocken})/m_{nass} * 100$

f_{darr}	... massebezogener Feuchtegehalt	[M-%]
m_{nass}	... Masse des Prüfkörpers feucht	[g]
$m_{trocken}$	... Masse des Prüfkörpers trocken	[g]

Allerdings ist diese - theoretisch optimale - Messmethode auf Baustellen nur schwierig anwendbar.

- CM-Methode

Für die CM-Messmethode wird ebenfalls ein Teil des zu untersuchenden Materials entnommen. Die Probe wird anschließend so fein zerkleinert, dass die Bruchstücke einen Durchmesser von 2 mm nicht überschreiten. Je nach zu erwartendem Feuchtegehalt wird eine exakt bestimmte Menge des Messguts (20 g, 50 g oder 100 g) zusammen mit Carbidkapseln und Stahlkugeln in eine Probenflasche aus Stahl gefüllt, die dann gut verschlossen wird. Ein zweiminütiges kraftvolles Schütteln

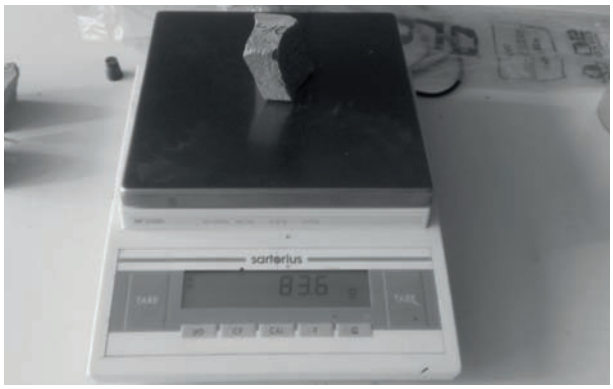


Abb. 118 Darr-Messung: Wiegen der Probe vor dem Trocknen

Abb. 119 Darr-Messung: Lagerung der Probe in einer Klimakammer

Abb. 120 Darr-Messung: Wiegen der Probe nach dem Trocknen

der Flasche bewirkt die Zerstörung der Carbidampullen durch die Stahlkugeln. Aufgrund einer entstehenden chemischen Reaktion baut sich in der Probenflasche ein Druck auf, der auf der eingebauten Anzeige abgelesen werden kann. Dieser lässt Rückschlüsse auf die Feuchtigkeit der in der Flasche befindlichen Materialprobe zu. Allerdings entsprechen die gemessenen CM-Prozentwerte nicht den tatsächlichen Gewichtsprozenten. Ein Korrekturfaktor ist durch eine Vergleichsmessung (Darr) zu bestimmen. Die Feuchtigkeitsbestimmung allein nach der CM-Methode ist aufgrund der Ungenauigkeit nicht ausreichend, sondern sollte immer mit einem anderen Messverfahren ergänzt werden. Die im Vergleich zur Darr-Messung geringeren (ungenaueren) Messwerte sind auf die vorhandenen Betonbruchstücke zurückzuführen, da das Wasser in diesen Bruchstücken nicht mit gemessen werden kann. Je nach Feinheit der Bruchstücke variiert also der Messwert. Die Messung sollte daher immer von der gleichen Person durchgeführt werden.

Messungen und Ergebnisse
In Abb. 121 ist das Austrockungsverhalten der Textilbetonproben dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Restfeuchte bei der Darr-Messung eine Woche nach dem Betonieren knapp 6,5 M-%, nach 28 Tagen ca. 5 M-% beträgt. Mit der CM-Methode ergaben sich wesentlich niedrigere Messwerte. Durch Gegenüberstellung der beiden Messreihen konnte ein durchschnittlicher Korrekturwert für die CM-Methode von 1,8 ermittelt werden. Dieser ist mit den CM-Messwerten zu addieren, um die tatsächliche Restfeuchte zu ermitteln.
Die für den Einsatz des SikaTack-Panel-Systems erforderlichen 2,5 % Restfeuchte konnte nicht erreicht werden. Da die Firma Sika aber bereits Erfahrungen beim Verkleben von Betonplatten gesammelt hat, wird die Restfeuchte dennoch als unkritisch eingeschätzt. Auch der Zusammenbau unter Werksbedingungen, ohne frühzeitige Belastung durch Eigengewicht und Wind, wirkt sich günstig auf den Klebeprozess aus. Die Versuche an der BTU Cottbus zu den Hafteigenschaften der Verklebung ergaben ebenfalls sehr gute Ergebnisse. Es wird daher davon ausgegangen, dass die höhere Feuchte keinerlei Beeinträchtigungen der Klebeleistung bewirkt.

Verklebung von Textilbeton und GFK-Profilen
Die Verklebung stellt den letzten Schritt der Werksfertigung dar. Abb. 122 bis Abb. 127 zeigen den Zusammenbau der vaku^{tex}-Prüfelemente und Demonstratoren in einer Tischlerei. Durch hohe Sorgfalt und Genauigkeit konnten die gewünschten Außenmaße ohne wesentliche Toleranzen (maximal 1 mm) erreicht werden.

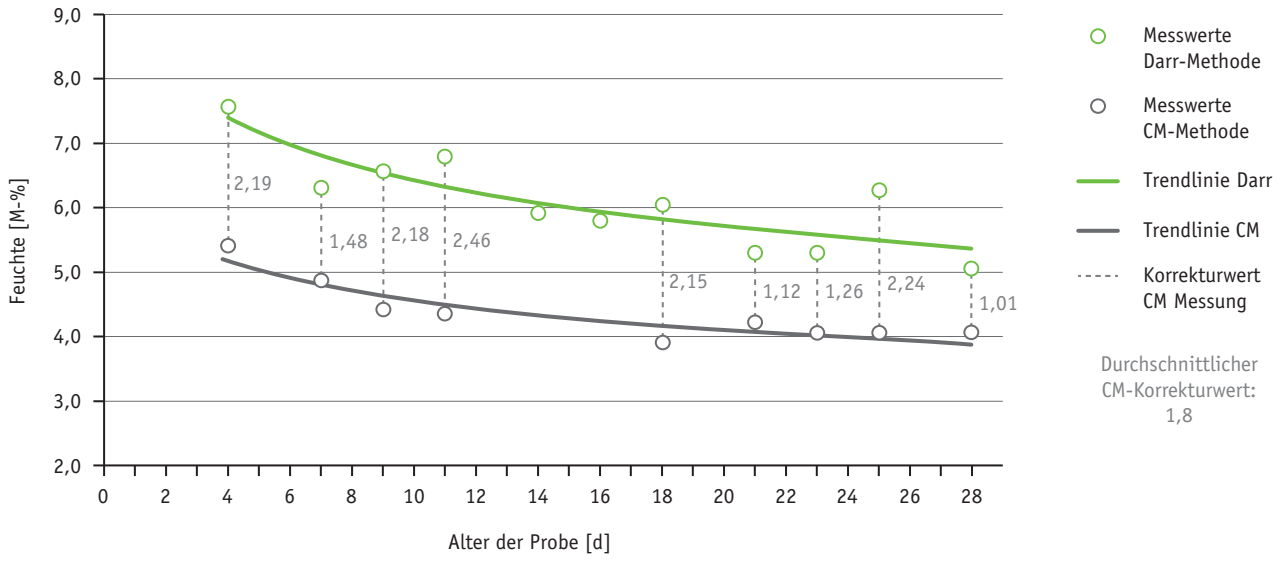


Abb. 121 Austrocknungsverhalten eines Textilbetonprüfkörpers

Abb. 122 Die Klebeflächen an den Rändern der inneren und äußeren Betonplatten sowie die GFK-Profile werden mit Primer versehen

Abb. 123 Nachdem der Primer getrocknet ist, wird der Elementkern zusammengefügt, die VIPs werden in den GFK-Rahmen eingesteckt

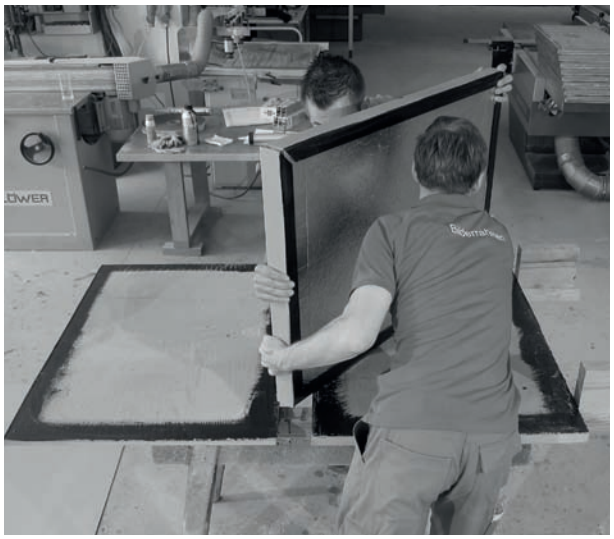


Abb. 124 Der Elementkern ist vollständig zusammengestellt

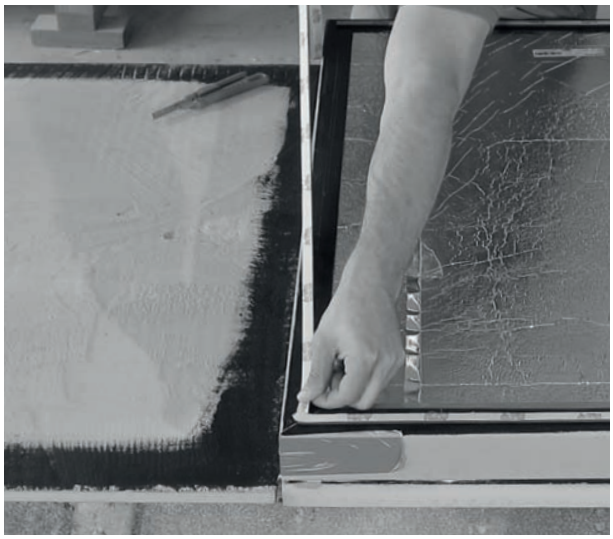


Abb. 125 Das Montageband wird mittig aufgebracht

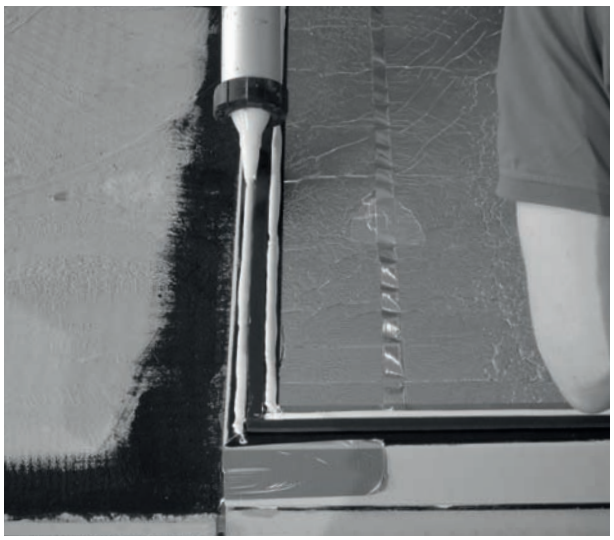
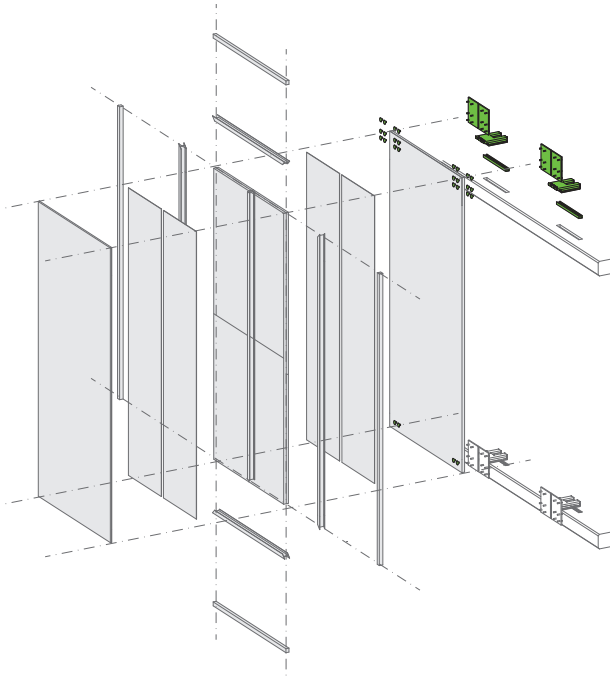


Abb. 126 Seitlich des Montagebandes werden zwei Kleberaupen gezogen

Abb. 127 Nach der Trocknung des Klebers kann der Transport zur Baustelle erfolgen

5.2.1.6 Elementbefestigung



Von großer konstruktiver Bedeutung in der Planung war das Berücksichtigen von Längenänderungen und Verformungen sowie Herstelltoleranzen des Fassadenelements. Bewegungen der Elemente wie auch der Aufhängungen müssen kontrolliert und beschädigungsfrei in alle Richtungen möglich sein. Ein wichtiger Punkt war es außerdem, die Elementaufhängung so zu gestalten, dass der Einbau der Elemente auf der Baustelle einfach und unkompliziert möglich ist.

Haltevorrichtung
Um auf die horizontalen und vertikalen Maßtoleranzen des Rohbaus eingehen zu können, wurde eine dreidimensional einstellbare Elementbefestigung entwickelt. Ausgangspunkt waren bewährte Produkte aus der Praxis. So wurde das *„Halfen Support System for Curtain Wall“* an die Anforderungen der vaku^{tex}-Fassade angepasst und in die konstruktiven Details aufgenommen.
Durch die Anordnung nur eines Festpunktes im Aufhängsystem und eine ausreichende Fugenbreite sind kontrollierte spannungsfreie Bewegungen der Elemente möglich. Die übrigen Befestigungspunkte werden als Lospunkte ausgebildet. Sie werden durch eine Verschraubung im Langloch ausgeführt. Zur Vermeidung von Geräuschen an der Haltevorrichtung, die durch Bewegungen der Elemente verursacht werden können, sind Kunststoffeinlagen vorgesehen. Die Elementbefestigungen bestehen aus korrosionsbeständigen Materialien, um Schäden durch Korrosion zu verhindern.

Montage
Mit dem komplett vorgefertigten Fassadenelementen ist ein optimaler Montageablauf möglich.
Der gesamte Einbau kann ohne Gerüst erfolgen, da die Elemente nur noch in die Haltevorrichtung eingehängt werden müssen. Dazu können in hohen Gebäuden die vorhandenen Turmdrehkräne des Rohbauers oder in niedrigen Gebäuden ein mobiler Autokran zum Einsatz kommen. Die Elemente werden mittels Einhangöffnungen der Elementbefestigungen am Montagekran befestigt. Am Einbauort erfolgt das Einhängen, indem die Ankerplatten am Fassadenelement in die dafür vorgesehenen Haltevorrichtungen auf den Rohdecken eingeschoben werden. Anschließend ist ein dreidimensionales Ausrichten möglich.
Grundlage dieser Befestigung bilden in die Decken einbetonierte Ankerschienen, auf die Ankerschuhe aufgeschraubt werden. Über diese Schraubverbindung kann die Abstandsjustierung sowie das seitliche Justieren erfolgen. Die vertikale Justierung der Fassadenelemente erfolgt über separate Schrauben am Ankerschuh.

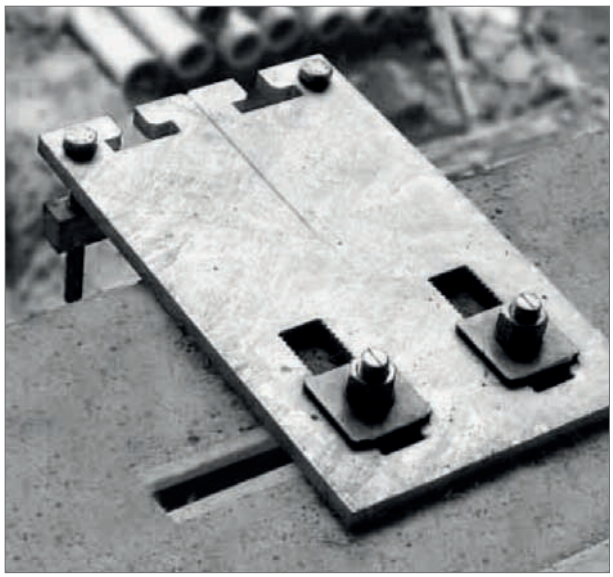
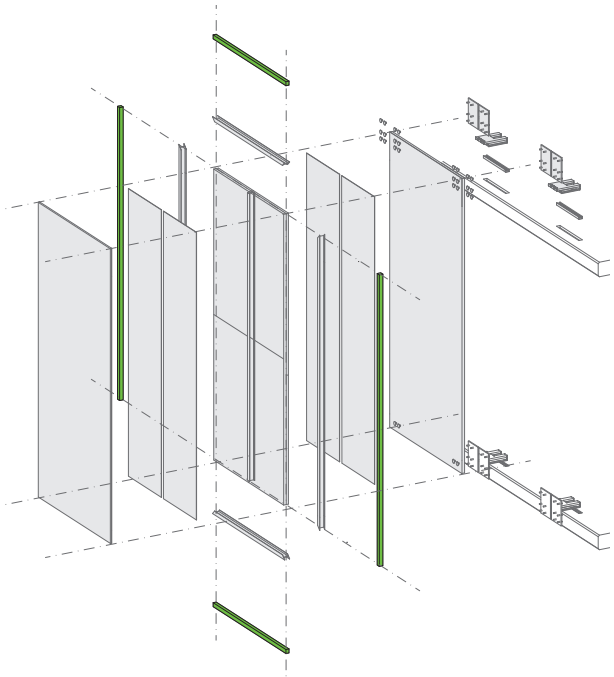


Abb. 128 Beispiel für eine Befestigung von Vorhangfassaden

5.2.1.7 Fugenausbildung & Kopplung



Bei der Fugengestaltung ist eine sorgfältige Vorgehensweise notwendig, da die Elementfugen mehrere technische Anforderungen gleichzeitig erfüllen müssen. Witterungsbedingte Einflüsse können zu unterschiedlichen Durchbiegungen nebeneinander angeordneter Elemente führen. Auch temperaturbedingte Längenänderungen müssen beachtet werden. Im Sommer liegt die maximale Verlängerung eines 320 cm hohen und 150 cm breiten Elementes bei 1,44 mm, im Winter beträgt die maximale Verkürzung 1,41 mm. Zur Aufnahme der horizontalen und vertikalen Längenänderungen sowie der Toleranzen wurde die Fugenbreite auf 15 mm festgelegt. Dazu wurden zwei Fugenvarianten mit verschiedenartigen Fugendicht- und -dämmstreifen entwickelt.

Fugendicht- und Dämmstreifen, Variante bündig
Für niedrigere Gebäude wurde eine Variante der Fugenausbildung entwickelt, welche zur Montage ein Gerüst erfordert. Hierbei wird das Rahmenprofil als C-Profil ausgeführt, sodass eine bündige Kante entsteht (siehe Abb. 129, Abb. 130). Flanschbreite und Verklebungssystem entsprechen den bisherigen Beschreibungen. Die 15 mm breiten Fugen werden mit einem Dichtungsband geschlossen, welches aus imprägnierten PU-Schaum besteht (beispielhaftes Produkt: Dichtungsband VKP Trio, Fa. Würth). Dieses hat die Eigenschaft, innen dichter als außen zu sein, sodass es nicht zur Kondensation von Wasserdampf in der Dämmebene kommen kann. Weiterhin verbindet das Dichtungsband die Funktionen dichten und dämmen bei einer Wärmeleitfähigkeit von 0,048 W/(mK).
Zur Montage wird das vorkomprimierte Band kurz vor dem Einbau einseitig an die bereits eingebauten und justierten Elemente angebracht. Danach muss das neu einzubauende Element zügig einge-

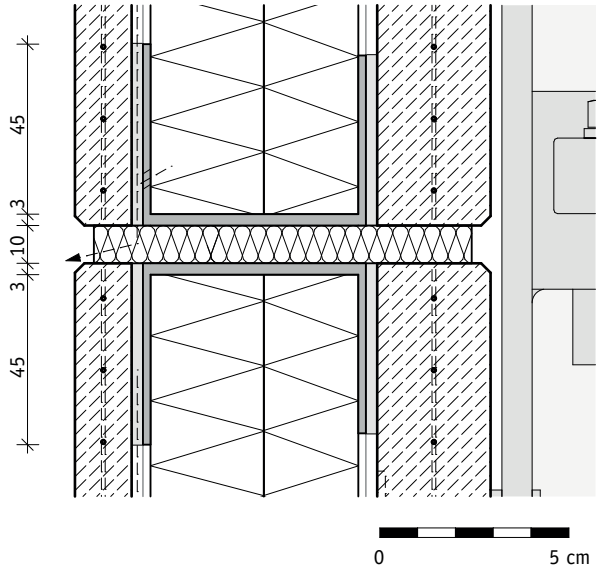


Abb. 129 Vertikalschnitt Fugenausbildung bündig

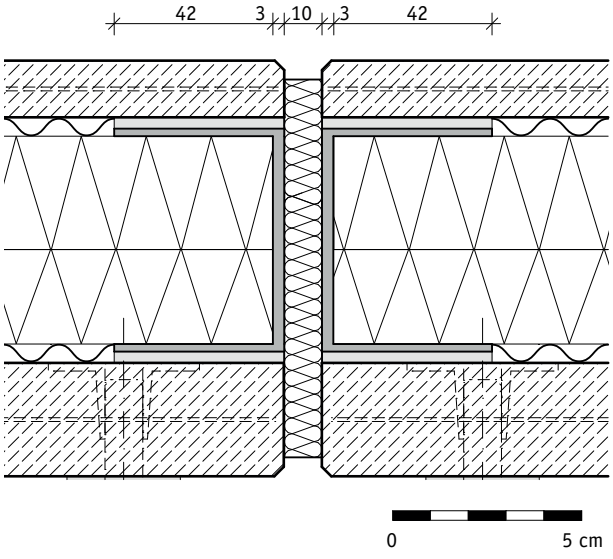


Abb. 130 Horizontalschnitt Fugenausbildung bündig

hängt und justiert werden.
Nachdem das Fugenband komplett aufgegangen ist (ab Einklebung ca. 30 Min.) dürfen keine Bewegungen mehr stattfinden, ansonsten kommt es zur Beschädigung des Dichtungsbandes [Würth, 2011]

Fugendicht- und Dämmstreifen, Variante Nut-Feder
Um die Längenänderungen der Elemente unter Berücksichtigung des Wärme- und Feuchteschutzes sowie der Wind- und Luftdichtheit aufzunehmen, wurden für höhere Gebäude ein individuelles Dichtungsprofile für die Vertikal- und Horizontalfugen entwickelt. Beim Einbau der Fugendicht- und Dämmstreifen ist kein Gerüst notwendig. Beim Einheben der Elemente mit dem Kran werden die Fugenstreifen vorab zweiseitig eingesteckt und während des Einhängvorganges in die Rahmenprofile der bereits montierten Nachbarelemente eingeschoben. Er besteht aus drei Ebenen (siehe Abb. 131, Abb. 132):

- Inneres Dichtungsprofil aus EPDM
- VIP-Dämmkern mit seitlichen GFK-Einfassungen und Dichtungsprofilen aus EPDM
- Äußeres Dichtungsprofil aus EPDM

Entwässerungs- und Druckausgleichsöffnungen
Die vaku*tex*-Fassadenelemente besitzen Öffnungen, die der Ableitung von evtl. anfallenden Kondensaten oder Fremdwasser und dem Druckausgleich dienen. Diese Öffnungen werden im Bereich der Klebefuge ausgespart. Die Luftschicht in den Kunststoffwellplatten zwischen der äußeren Textilbetonplatte und den VIPs gilt als nicht belüftet, da die Ausgleichsöffnungen unter 5 cm² pro m Elementbreite liegen.

5.2.2 Bauphysik
Die entwickelte vaku*tex*-Fassadenkonstruktion wurde in Simulationen hinsichtlich Wärme- und Feuchteschutz geprüft. Außerdem konnten an der MFPA Leipzig orientierende Messungen zu Brand- und Schallschutzeigenschaften durchgeführt werden.

5.2.2.1 Wärmeschutz
Da das Element Passivhausstandard erfüllen soll, wurden die für den Nachweis benötigten Wärmedurchgangskoeffizienten und längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten des vaku*tex*-Elementes mit der Software Delphin simuliert.

Zuerkennungskriterien nach PHPP
Folgende Anforderungen sind für die Zertifizierung von Wand- und Bausystemen im Geltungsbereich eines kühl-gemäßigten Klimas einzuhalten:

- $f \times U_{opak} \leq 0{,}15\ W/(m^2K)$
  f ... Temperaturkorrekturfaktor

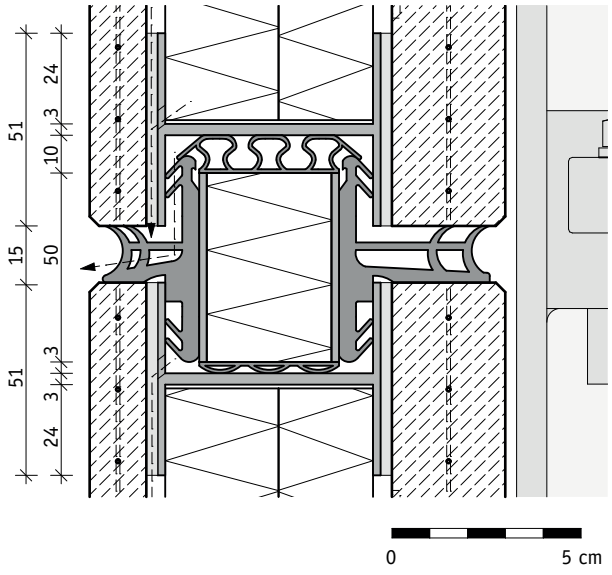


Abb. 131 Vertikalschnitt Fugenausbildung Nut und Feder

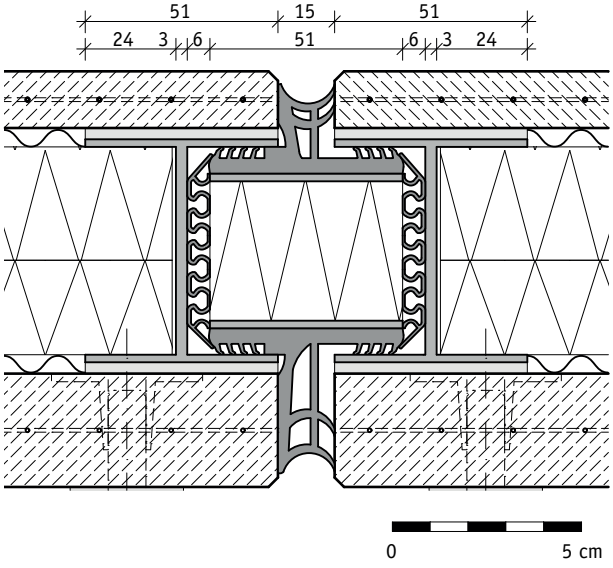


Abb. 132 Horizontalschnitt Fugenausbildung Nut undFeder

(1,0 für Außenwände)

- $\Psi_a \leq$ 0,01 W/(mK)
  Ψ_a ... außenmaß- und längenbezogener Wärmedurchgangskoeffizient für wesentliche Anschlussdetails, wie Anschlusspunkte zu Dach, Innenwänden, Geschossdecken, Fenstern, Rollladenkästen und sonstige systemabhängige Details
- Innenoberflächentemperaturen ≥ 17°C
- Luftdichtheit aller Regelbauteile und aller Anschlussdetails
- weitere Nachweise zu Durchdringungen, Fenstereinbau, Brandverhalten und Dämmstoffen

Beim Einhalten der geforderten Kriterien ist die Einstufung als *„passivhausgeeignete Komponente"* durch das Passivhaus Institut möglich. Der Wert U_{opak} bezieht sich bei vaku^tex auf die Elementfläche einschließlich sämtlicher Einflüsse aus Elementfugen (nur Anteil Rahmenprofil), Innenprofilen und VIP-Stößen. Die Fuge zwischen den Elementen muss der Anforderung $\Psi_a \leq 0{,}01$ W/(mK) gerecht werden [PHI, 2012].

Simulationsgrundlagen
Die in Tab. 1 aufgeführten Materialeigenschaften bilden die Grundlage für die Delphin-Simulation. Anstelle der mehrlagigen Hüllfolie der VIPs wird eine Ersatzschicht angenommen. Die Diskretisierung, also die Aufteilung des zu simulierenden Objektes erfolgte variabel in insgesamt 125 Teilungen. Die Mindestbreite der Teilstücke betrug 1 mm. Simuliert wurden zwei Fassadenvarianten mit unterschiedlichen Fugenlösungen.

- Variante 1: Bündige Fugenlösung mit Kompribändern für niedrige Gebäude (siehe Abb. 133 und Abb. 134)
- Variante 2: Nut-Feder-Fugenlösung mit Fugendicht- und Dämmstreifen für höhere Gebäude (siehe Abb. 135 und Abb. 136)

Nachweis 1: $U_{opak} \leq 0{,}15$ W/(m²K)
Die Simulation beider vaku^tex-Varianten mit ungestörtem Schichtaufbau (ohne Wärmebrücken) ergab einen U-Wert von 0,1244 W/(m²K).
Zur Ermittlung des U-Wertes inkl. Wärmebrücken werden die Einflüsse des jeweiligen Rahmenprofils, Innenprofils (Vertikalaussteifer) und der VIP-Stöße bestimmt und mit dem ungestörten Fall addiert. Ein Vergleich der ermittelten U-Werte mit dem maximal zulässigen U-Wert für die opake Wandfläche zeigt, dass diese eingehalten werden (siehe Tab. 2 und Tab. 3). Somit ist die erste Bedingung für die Zertifizierung *„passivhaustaugliche Komponente"* in beiden Varianten erfüllt.

Material	Schichtdicke [m]	Wärmeleitfähigkeit [W/(mK)]	Dichte [kg/m³]	spez. Wärmekapazität [J/(kgK)]	spez. Wärmekapazität [MJ/(m³K)]
Textilbeton	0,030 (innen) 0,015 (außen)	0,75 bis 0,91 (je nach Ausgleichfeuchte)	2.906,0	880,0	2.185,1
Sika-Tack PU-Klebefuge	0,003	0,700	1.150,0	1.000,0	1.150,0
Pyrogene Kieselsäure evakuiert	0,025 (1. Dämmlage) 0,030 (2. Dämmlage) 0,032 (Fugenstreifen)	0,007	190,0	840,0	159,6
Dichtung EPDM	0,001 0,0015 0,003	0,250	1.150,0	1.000,0	1.150,0
Ersatzschicht für metallisierte Verbundfolie	0,001	0,160	100,0	1.170,0	117,0
GFK	0,002 0,003	0,190	1.500,0	1.400,0	2.030,0
Mineralwolle	0,010	0,035	40,0	1.030,0	41,2
Kompriband PU	0,010	0,048	95,0	1.000,0	100,0

Tab. 1 Eigenschaften der simulierten Materialien einer vaku^tex-Fassade

Nachweis 2: $\Psi_a \leq 0{,}01$ W/(mK)
Während bei der bündigen Fugenvariante der Ψ-Wert von 0,004 W/(mK) weit unter dem Maximalwert von 0,01 W/(mK) liegt, überschreitet der ermittelte Ψ-Wert der Nut-Feder-Fugenlösung mit 0,029 W/(mK) den geforderten Wert deutlich (siehe Tab. 2 und Tab. 3). Somit erfüllt nur die Variante 1 (Fuge bündig) die zweite Bedingung für die Zertifizierung *„passiv-haustaugliche Komponente"*.

Einfluss der GFK-Profile
Die Berechnungen machen deutlich, dass bereits minimale Wärmebrücken einen großen Einfluss auf die Dämmeigenschaften der schlanken vaku^{tex}-Fassade haben. Die GFK-Profile, aus denen der umlaufende Rahmen sowie das vertikale Innenprofil (Vertikalaussteifer) gefertigt sind, zeigen dies besonders deutlich. Bereits die wärmetechnischen Kennwerte des zu ihrer Herstellung verwendeten Harzes beeinflussen den U-Wert der gesamten Fassade: Schon eine minimale Änderung des λ-Wertes vom verwendeten GFK kann Einfluss auf das Erreichen der PHPP-Zertifizierung nehmen. Abhängigkeit des Wärmedurchgangskoeffizienten von der Wärmeleitfähigkeit des GFKs:

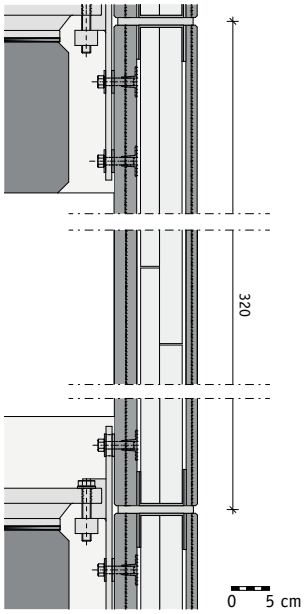


Abb. 133 Vertikalschnitt Fugenvariante bündig

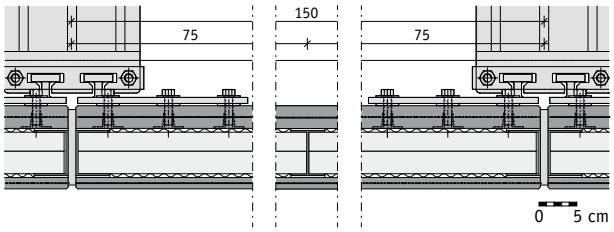


Abb. 134 Horizontalschnitt Fugenvariante bündig

Reines vaku^{tex}-Element, bei Fugenvariante „bündig" (mit C-Rahmen)	U-Wert [W/m²K]	Psi-Wert [W/mK]	Breite [m]	Länge [m]	Fläche [m²]	Wärmeverlust [W/K]	Anteil [%]
Schichtaufbau ungestört	0,124		1,500	3,200	4,800	0,597	81,0
Wärmebrücke Rahmenprofil		0,010		9,400		0,095	12,9
Wärmebrücke Innenprofil		0,013		3,130		0,040	5,4
Wärmebrücke 30er-VIP-Stoss und 25er-VIP-Stoss (mind. 10 cm versetzt)		0,003		1,491		0,005	0,7
Gesamtes Element	**0,153 ~ 0,15**				**4,800**	**0,737**	**100,0**
davon Wärmebrückenaufschlag	0,029						19,0
Nachweis 1 für Passivhauskomponente: $U_{opak} \leq 0{,}15$ W/(m²K)	0,15 ≤ 0,15 **Nachweis erfüllt!**						
Einbaufuge*		**0,004**		**4,700**		**0,019**	
Nachweis 2 für Passivhauskomponente: $\Psi_a \leq 0{,}01$ W/(mK)		0,004 < 0,01 **Nachweis erfüllt!**					
Gesamte Fassade	**0,158 ~ 0,16**						100,0
davon Wärmebrückenaufschlag	0,034						21,5
Nachweis nach EnEV 2009	0,16 < 0,28 **Nachweis erfüllt!**						
*zur Berechnung des anteiligen Wärmeverlustes über die Einbaufugen wird der volle Ψ-Wert aneinandergrenzender Fassadenelemente mit dem halben Elementumfang multipliziert							

Tab. 2 Nachweis einer vaku^{tex}-Fassade mit bündiger Fugenlösung

λ_{GFK} [W/mK]	U_{opak} (Elementvariante 1) [W/m²K]	PHPP-Nachweis $U_{opak} \leq 0,15$
0,20	0,1553 ~ 0,16	nicht erfüllt
0,19	0,1535 ~ 0,15	erfüllt
0,17	0,1522 ~ 0,15	erfüllt

Bis zu einer Wärmeleitfähigkeit der GFK-Profile von 0,19 W/(mK) ist der Nachweis für den U-Wert nach PHPP erfüllbar. Ab einem λ-Wert von 0,20 W/(mK) wird der Nachweis mit der Elementvariante 1 (bündige Fuge) nicht mehr erfüllt.

Fazit

Die Simulation der Konstruktionsvariante 1 (bündige Fuge) ergab, dass der U-Wert für die gesamte Fassade bei 0,16 W/(m²K) liegt. Konstruktionsvariante 2 (Nut-Feder-Fuge) erreicht einen Wert von 0,18 W/(m²K). Somit liegen beide Varianten unter dem in der EnEV 2009 festgelegten maximalen Wärmedurchgangskoeffizienten für Außenwände von 0,28 W/(m²K).

In den momentanen Konstruktionsausführungen erfüllt nur das Element mit bündiger Fuge auch die Anforderungen vom PHPP an passivhaustaugliche

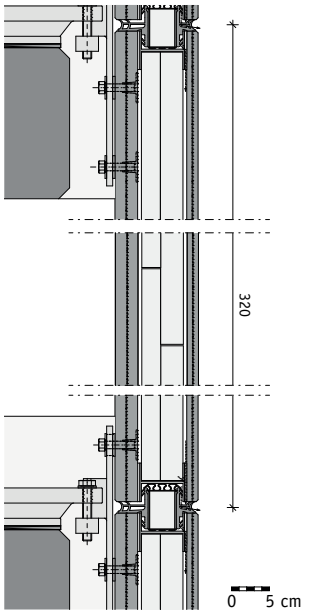


Abb. 135 Vertikalschnitt Fugenvariante Nut-Feder

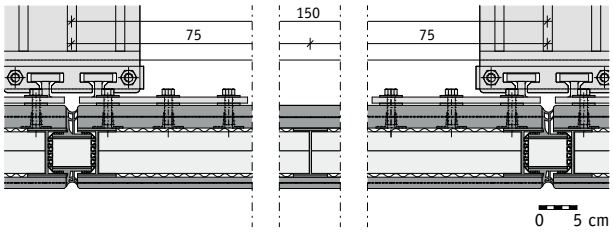


Abb. 136 Horizontalschnitt Fugenvariante Nut-Feder

Reines vaku*tex*-Element, bei Fugenvariante „Nut und Feder" (mit I-Rahmen)	U-Wert [W/m²K]	Psi-Wert [W/mK]	Breite [m]	Länge [m]	Fläche [m²]	Wärmeverlust [W/K]	Anteil [%]
Schichtaufbau ungestört	0,124		1,500	3,200	4,800	0,597	80,5
Wärmebrücke Rahmenprofil		0,011		9,400		0,100	13,4
Wärmebrücke Innenprofil		0,013		3,130		0,040	5,4
Wärmebrücke 30er-VIP-Stoss und 25er-VIP-Stoss (mind. 10 cm versetzt)		0,003		1,443		0,005	0,7
Gesamtes Element	**0,154 ~ 0,15**				**4,800**	**0,742**	**100,0**
davon Wärmebrückenaufschlag	0,030						19,5
Nachweis 1 für Passivhauskomponente: $U_{opak} \leq 0,15$ W/(m²K)	0,15 ≤ 0,15 **Nachweis erfüllt!**						
Einbaufuge*		**0,029**		**4,700**		**0,136**	
Nachweis 2 für Passivhauskomponente: $\Psi_a \leq 0,01$ W/(mK)		0,029 > 0,01 **Nachweis nicht erfüllt!**					
Gesamte Fassade	**0,183 ~ 0,18**						100,0
davon Wärmebrückenaufschlag	0,059						32,2
Nachweis nach EnEV 2009	0,18 < 0,28 **Nachweis erfüllt!**						
*zur Berechnung des anteiligen Wärmeverlustes über die Einbaufugen wird der volle Ψ-Wert aneinandergrenzender Fassadenelemente mit dem halben Elementumfang multipliziert							

Tab. 3 Nachweis einer vaku*tex*-Fassade mit Nut-Feder-Fugenlösung

Komponenten. Die Nut-Feder-Variante hingegen weist einen zu hohen längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten der Fuge auf. Im Bereich der GFK-Profile ist eine erhöhte Wärmestromdichte zu verzeichnen (siehe Abb. 139), hier besteht für die Fugenlösung noch Optimierungspotential. Trotz dieser Tatsache stellt das Element mit der Nut-Feder-Lösung die Vorzugsvariante für die vaku^{tex}-Fassade dar, da diese erhebliche Vorteile vor allem im mehrgeschossigen Gebäudebereich bringt. Der Fugendicht- und Dämmstreifen ermöglicht eine schnelle und unkomplizierte Montage.

5.2.2.2 Tauwasserschutz

Um Schäden im vaku^{tex}-Fassadenelement durch Wasserdampfdiffusion zu vermeiden, wurde eine Diffusionsberechnung nach DIN 4108-3 erstellt.

Konstruktionsaufbau und Simulation

Zur Bestimmung der diffusionsbedingten Tauwasser- und Verdunstungsmassen wurde das Perioden-Bilanzverfahren herangezogen. Simuliert wurde der Elementaufbau mit seinen materialspezifischen Parametern (siehe Abb. 140) mithilfe der Software COND des Instituts für Bauklimatik der TU Dresden. Diese Software berücksichtigt neben dem Wärme- auch den Feuchtetransport in kapillarporösen Baustoffen wie Beton. Alle simulierten Materialien wurden im Labor des Instituts für Bauklimatik untersucht. Der Textilbeton stammt von der Pagel Spezialbeton GmbH, die Vakuumisolationspaneele von der Variotec GmbH & Co. KG.

Randbedingungen

Für den Nachweis wurden vereinfachte Klimadaten angenommen.

<u>Tauperiode/Winter (60 Tage)</u>

Außenklima:	Temperatur θ_e	= -10°C
	rel. Luftfeuchte ϕ_e	= 80 %
Innenklima:	Temperatur θ_i	= 20°C
	rel. Luftfeuchte ϕ_i	= 50 %

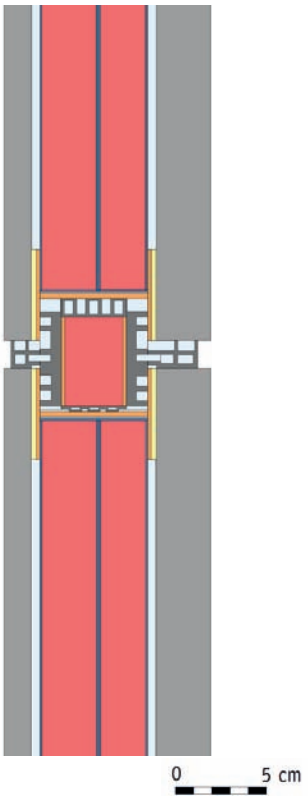


Abb. 137 Konstruktionsaufbau der Elementvariante mit Nut-Feder-Fugenlösung

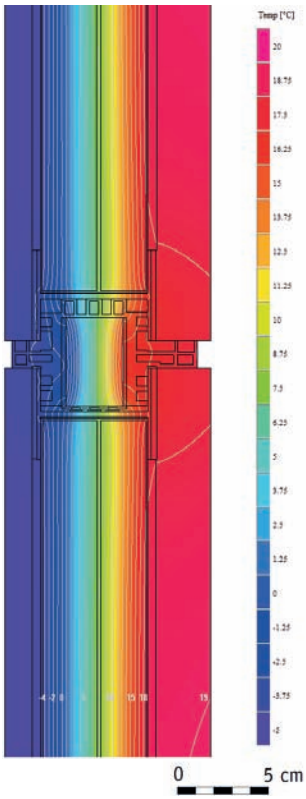


Abb. 138 Darstellung der Isothermen im Fassadenelement

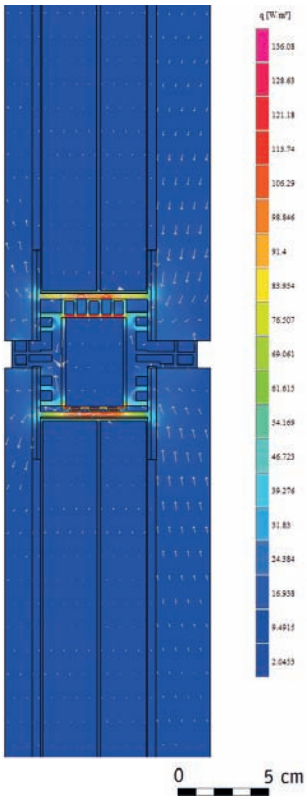


Abb. 139 Darstellung der Wärmestromdichten im Fassadenelement

Verdunstungsperiode/Sommer (90 Tage)

Außenklima: Temperatur θ_e = 12°C
rel. Luftfeuchte ϕ_e = 70 %

Innenklima: Temperatur θ_i = 12°C
rel. Luftfeuchte ϕ_i = 70 %

Folgende Wärmeübergangswiderstände wurden angesetzt:

Außenklima: R_{se} = 0,130 m²K/W
Innenklima: R_{si} = 0,040 m²K/W

Simulationsergebnisse

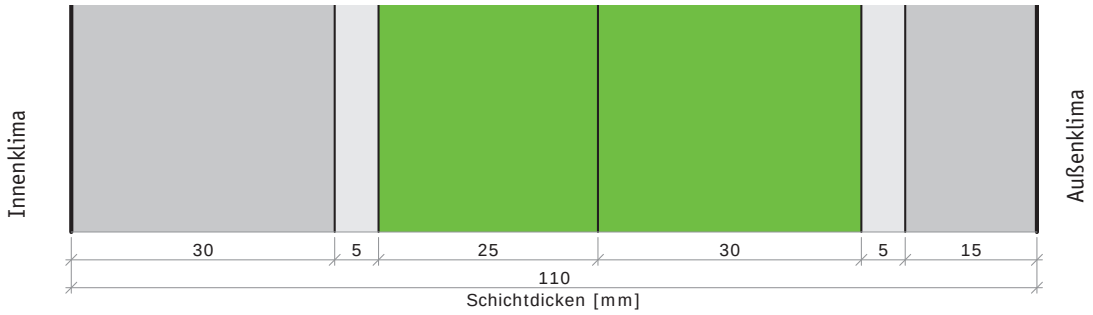
In Tab. 4 sind die Wärmedurchgangswiderstände der einzelnen Bauteilschichten dargestellt. Diese sind proportional zum Temperaturgradienten (siehe Tab. 5, Tab. 6). Den einzelnen Temperaturen in Tab. 5 werden die zugehörigen Wasserdampfsättigungsdrücke P_{sat} [Pa] zugeordnet. Zudem werden die Wasserdampfteildrücke P [Pa] berechnet. Liegt der Wasserdampfteildruck, wie hier, in jedem Punkt unter dem Wasserdampfsättigungsdruck kommt es nicht zum Ausfallen von Kondensat. Damit ist der Nachweis nach DIN 4108 (Glaser-Verfahren) erfüllt.

Beurteilung der vaku^tex-Konstruktion

Die Feuchteanforderungen nach DIN 4108-3 konnten eingehalten werden, da es während der Tauperiode zu keiner Tauwasserbildung im Bauteilinneren kommt. Zudem konnten die Bedingungen nach DIN 4108-2 an die Wärmedurchlasswiderstände eingehalten werden.

In der Grafik *„Temperatur und Feuchteprofil"* erkennt man die dünnen blauen Linien. Sie geben den für jede Schicht den charakteristischen maximalen hygroskopischen Feuchtegehalt. In COND entspricht der maximale hygroskopische Gehalt der Ausgleichsfeuchte bei 95% relativer Luftfeuchte. Die hellblauen Flächen geben den aktuellen hygroskopischen Luftfeuchtegehalt an. In der Innenschale beträgt die Ausgleichsfeuchte ca. 6 V.-% und ca. 3 M.-%. Das entspricht nur 50 % des möglichen Speichervermögens der inneren Platte und kann daher als unproblematisch angesehen werden.

Da die Hochbarrierefolie des Vakuumisolationspaneels dampfdicht ist, kommt es zu keinem Kondensatausfall innerhalb der Konstruktion. Im Ergebnis kann das Bauteil als langfristig schadfrei beurteilt werden.



	Material	d [mm]	λ[W/mK]	μ [---]	w_{80} [m³/m³]	w_{sat} [m³/m³]	A_w [kg/m²s½]
1	2.0 Pagel Feinbeton	30	0,745	483,2	0,102	0,250	0,004
2	Luftschicht 05 mm (vertikal)	5	0,045	0,8	0,000	1,000	0,000
3	Vakuumisolationspaneel	25	0,007	2E06	0,001	0,001	0,000
4	Vakuumisolationspaneel	30	0,007	2E06	0,001	0,001	0,000
5	Luftschicht 05 mm (vertikal)	5	0,045	0,8	0,000	1,000	0,000
6	2.0 Pagel Feinbeton	15	0,745	483,2	0,102	0,250	0,004

d: Schichtdicke; λ: Wärmeleitfähigkeit; μ: Wasserdampfdiffusionswiderstand; w_{80}/w_{sat}: Feuchtegehalt bei rel. Luftfeuchte/Sättigung; A_w: Wasseraufnahmekoeffizient

Abb. 140 Konstruktionsskizze und Materialparameter

	Schicht/Material	R [m²K/W]	r_v [m/s]	r_w [m²s/kg]
1	2.0 Pagel Feinbeton	0,040	7,828E+10	7,727E+04
2	Luftschicht 05 mm (vertikal)	0,110	2,160E+07	1,000E+16
3	Vakuumisolationspaneel	3,571	2,700E+14	-5,892E+01
4	Vakuumisolationspaneel	4,286	3,240E+14	-8,260E+01
5	Luftschicht 05 mm (vertikal)	0,110	2,160E+07	1,000E+16
6	2.0 Pagel Feinbeton	0,020	3,914E+10	3,864E+04
	Summe der Widerstände (feuchteabhängig)	**8,137**	**5,941E+14**	

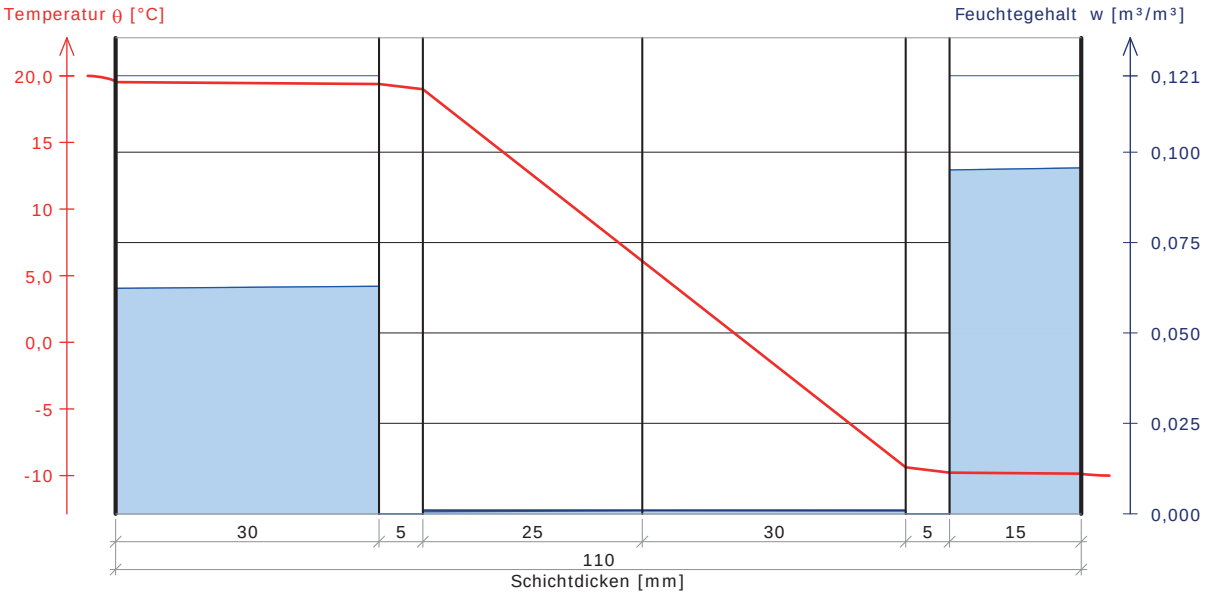
Wärmedurchgangswiderstand (feuchteabhängig): R_T = 8,307 m²K/W
Wärmedurchgangskoeffizient (feuchteabhängig): U = 0,120 W/m²K

Tab. 4 Wärmeleit-, Dampfdiffusions- und Kapillarwasserleitwiderstände

	Schicht/Material	θ[°C]	P_{sat} [Pa]	P [Pa]	w [m³/m³]	d_c [mm]	M_c [kg/m²]
	Luftschicht (Warmseite)	20,0	2338	1169			
1	2.0 Pagel Feinbeton	19,5	2271	1169			
		19,4	2251	1169			
2	Luftschicht 05 mm (vertikal)						
		19,0	2196	1169			
3	Vakuumisolationspaneel						
		6,1	942	732			
4	Vakuumisolationspaneel						
		-9,4	274	208			
5	Luftschicht 05 mm (vertikal)						
		-9,8	265	208			
6	2.0 Pagel Feinbeton						
		-9,9	263	208			
	Luftschicht (Kaltseite)	-10,0	260	208			

θ: Temperatur P_{sat}: Sättigungsdampfdruck P: Dampfdruck w: Tauwassermenge d_c: Breite der durchfeuchteten Schicht M_c: Feuchtemasse

Tab. 5 Temperaturen, Dampfdrücke und Kondensatanfall



Kondensat (überhygroskopische Feuchte) ist dunkel eingefärbt!

Abb. 141 Temperatur und Feuchteprofil

5.2.2.3 Schlagregenschutz

Fassaden und Außenwände sind bei Regen und gleichzeitiger Windanströmung schlagregenbeansprucht. Das dabei anfallende Regenwasser kann über kapillare Saugwirkung oder durch den Staudruck z. B. über Risse oder fehlerhafte Abdichtungen in die Wandkonstruktion gelangen. Deshalb muss eine Begrenzung der kapillaren Wasseraufnahme und eine ausreichende Verdunstung des aufgenommenen Wassers gewährleistet sein. Dies kann durch konstruktive Maßnahmen oder durch Putze bzw. Beschichtungen erreicht werden. Je nach Intensität ist die Schlagregenbeanspruchung, die durch Wind, Niederschlag, örtliche Lage und Gebäudeart beeinflusst ist, in Gruppen (gering, mittel, stark) eingeteilt [E DIN 4108-3, 2012].

Einsatzbereich der vaku[tex]-Fassade

In Tabelle 3 der DIN 4108-3 sind Wandbauarten in Abhängigkeit von der Schlagregenbeanspruchung aufgeführt. Da die vaku[tex]-Fassade über eine gefügedichte Betonaußenschicht verfügt, erfüllt es die Anforderungen aller Beanspruchungsgruppen (siehe Abb. 142) und ist diesbezüglich in ganz Deutschland einsetzbar. Dies bildet eine gute Voraussetzung, um auch internationalen Anforderungen zu genügen.

Simulation schlagregenbeanspruchter Wandschichten

Um zu ermitteln, wie sich Fassadenmaterialien unter Schlagregeneinfluss verhalten, wurde eine Simulation mit der Software Delphin durchgeführt. Dabei wurde eine Textilbetonplatte mit einem gebräuchlichen Kalkzementputz und einer Vollholzplatte aus Fichte verglichen. Alle Materialien wurden unbeschichtet in einer Größe von 1 m² und einer Dicke von 15 mm betrachtet. Ihre Eigenschaften sind in Tab. 6 dargestellt.
Die Simulation untersuchte, welchen Einfluss der Schlagregen auf die Feuchte der Materialien nimmt und ob es über einen längeren Zeitraum zu einem Auffeuchten im Material kommt. Auch wurden die anfallenden Kondensatmengen in einer 5 mm starken Luftschicht hinter den Platten betrachtet. Der Simulationszeitraum betrug in beiden Untersuchungen vier Jahre (Standort Essen).

<table>
<tr><th rowspan="2">Zeile</th><th>Beanspruchungsgruppe I</th><th>Beanspruchungsgruppe II</th><th>Beanspruchungsgruppe III</th></tr>
<tr><th>geringe Schlagregenbeanspruchung</th><th>mittlere Schlagregenbeanspruchung</th><th>starke Schlagregenbeanspruchung</th></tr>
<tr><td>1</td><td>Außenputz nach DIN EN 998-1 in Verbindung mit DIN V 18550 ohne besondere Anforderungen an den Schlagregenschutz auf</td><td>Wasserhemmender Außenputz nach DIN EN 998-1 in Verbindung mit DIN V 18550 auf</td><td>Wasserabweisender Außenputz nach DIN EN 998-1 in Verbindung mit DIN V 18550 oder Kunstharzputz nach DIN 18558 auf</td></tr>
<tr><td></td><td colspan="3">- Außenwänden aus Mauerwerk, Wandbauplatten, Beton u. ä.
- sowie verputzten außenseitigen Wärmebrückendämmungen</td></tr>
<tr><td>2</td><td>Einschaliges Sichtmauerwerk nach DIN 1053-1 mit einer Dicke von 31 cm (mit Innenputz)</td><td>Einschaliges Sichtmauerwerk nach DIN 1053-1 mit einer Dicke von 37,5 cm (mit Innenputz)</td><td>Zweischaliges Verblendmauerwerk nach DIN 1053-1 mit Luftschicht und Wärmedämmung oder mit Kerndämmung (mit Innenputz)</td></tr>
<tr><td>3</td><td colspan="2">Außenwände mit im Dickbett oder Dünnbett angemörtelten Fliesen oder Platten nach DIN 18515-1</td><td>Außenwände mit im Dickbett oder Dünnbett angemörtelten Fliesen oder Platten nach DIN 18515-1 mit wasserabweisendem Ansetzmörtel</td></tr>
<tr><td>4</td><td colspan="3">Außenwände mit gefügedichter Betonaußenschicht nach DIN EN 206-1 bzw. DIN 1045-2 sowie DIN 1045-1</td></tr>
<tr><td>5</td><td colspan="3">Wände mit hinterlüfteten Außenwandbekleidungen nach DIN 18516-1, DIN 18516-3 und DIN 18516-4 [a]</td></tr>
<tr><td>6</td><td colspan="3">Wände mit Außendämmung durch ein Wärmedämmputzsystem nach DIN EN 998-1 in Verbindung m DIN V 18550 oder durch ein nach DIN EN 13499 oder DIN EN 13500 genormtes bzw. bauaufsichtlich zugelassenes WDVS</td></tr>
<tr><td>7</td><td colspan="3">Außenwände in Holzbauart mit Wetterschutz nach DIN 68800-2</td></tr>
<tr><td colspan="4">[a] Offene Fugen zwischen den Bekleidungsplatten beeinträchtigen den Regenschutz nicht.</td></tr>
</table>

Abb. 142 DIN 4108-3 Tab. 3 - Beispiele für die Zuordnung von wandbauarten und Beanspruchungsgruppen

Simulationsergebnisse
Während die Textilbetonplatte mit einem Wasseraufnahmekoeffizienten $A_w \leq 0{,}5$ kg/(kg/m²h^{0,5}) in die Gruppe *„Wasserabweisende Schicht"* eingeordnet werden kann, werden die beiden anderen Werkstoffe mit $A_w \geq 2{,}0$ kg/(kg/m²h^{0,5}) als *„Wassersaugende Schicht"* klassifiziert. Dies zeigt sich auch in den Diagrammen der Simulationsergebnisse. Textilbeton nimmt während und nach Schlagregenereignissen nur geringe Wassermengen auf. Im Vergleich dazu reagieren die beiden anderen Materialien sehr sensibel: Die 1 m² große Textilbetonplatte weist im Jahresdurchschnitt eine Wassenmassendichte von ca. 1,5 kg/m² auf (siehe Abb. 143). Im Kalkzementputz ändert sich diese von ca. 0,5 kg/m² im Sommer auf ca. 1,5 kg/m² im Winter (siehe Abb. 145). Die Veränderungen sind bei der Vollholzplatte noch ausgeprägter. Die Wassenmassendichte schwankt hier zwischen ca. 1,5 kg/m² im Sommer und 6 kg/m² im Winter (siehe Abb. 147) und führt zu erheblichen Quell- und Schwinderscheinungen im Jahresgang. Es kann daher von starkem Schüsseln (Beulen) und nicht unerheblichen Längenänderungen ausgegangen werden. Bei keinem der untersuchten Werkstoffe konnte ein Auffeuchten während der simulierten vier Jahre beobachtet werden.
Ein Problem der Fassadenplatte aus Textilbeton stellt jedoch der geringe Wasseraufnahmekoeffizent dar. Der auf der Oberfläche verbleibende Niederschlag erzeugt stehende Feuchte, was einen idealen Nährboden für Algen- und Pilzbefall entstehen lässt. In diesem Fall sind Werkstoffe mit hohem Wasseraufnahmekoeffizienten wie der Kalkzementputz oder die Fichtenplatte wesentlich günstiger. Hier sollte nach Lösungen gesucht werden. Mit diesem Thema beschäftigt sich derzeit eine Dissertation am Institut für Bauklimatik der TU Dresden.

Die Betrachtung der anfallenden Kondensatmengen in der Luftschicht hinter den Fassadenplatten (siehe Abb. 144, Abb. 146 und Abb. 148) ergab, dass alle drei Konstruktionen als unkritisch bezeichnet werden können. Nach einem größeren Schlagregenereignis kommt es bei der Vollholzplatte kurzzeitig zu einem Kondensatausfall von 2,5 g/m², das Kondensat kann jedoch schnell wieder von der Platte aufgenommen werden.

Schlussfolgerung für vaku^{tex}
Die für das vaku^{tex}-Fassadenelement verwendeten Textilbetonplatten erweisen sich durch den vergleichsweise geringen Wasseraufnahmekoeffizenten als positiv gegenüber Beulen und Längenänderungen. Negativ erscheint hier die Gefahr von Algen- und Pilzwachstum, durch stehende Feuchteschichten an der Oberfläche der Bauelemente.

Schlagregenbeanspruchung der Fugen
Die vaku^{tex}-Fassadenelemente erfüllen die Anforderungen der Fugenabdichtung nach DIN 4108-3 Tab. 4, da die Fugen nach DIN 18540 *„Abdichten von Außenwandfugen im Hochbau mit Fugendichtstoffen"* oder DIN 18541 *„Fugenbänder aus thermoplastischen Kunststoffen zur Abdichtung von Fugen in Ortbeton"* oder *„DIN 18542 Abdichten von Außenwandfugen mit imprägnierten Fugendichtungsbändern aus Schaumkunststoff"* ausgeführt werden können. Nach DIN 18540 Tab. 1 sind Fugenbreiten für das vaku^{tex}-Element mit einem Nennmaß von 15 mm und einem Mindestmaß von 10 mm einzuhalten. Dies wurde im Lösungsvorschlag berücksichtigt.

	Trockenrohdichte [kg/m³]	Wärmekapazität [kJ/kg]	Wärmeleitfähigkeit (trocken) [W/(mK)]	Wasseraufnahmekoeffizient [kg/(m²h^{0,5})]
Textilbeton	1906	880	0,75	0,24
Kalkzementputz	1800	1050	1,05	3,12
Vollholzplatte Fichte	528	2000	0,13	3,49

Tab. 6 Eigenschaften der simulierten Materialien

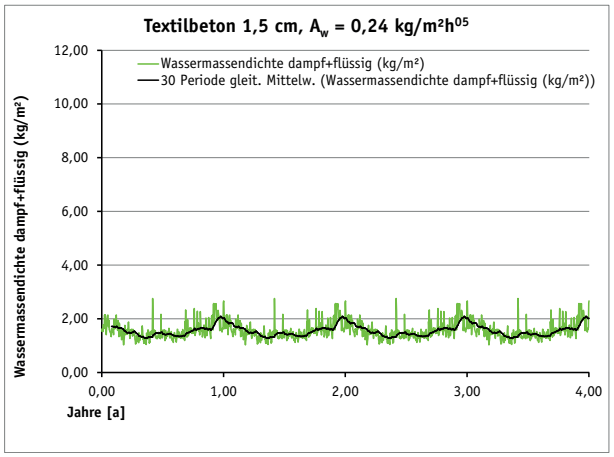


Abb. 143 Wassermassendichte Fassadenplatte Textilbeton (Software: Dephin)

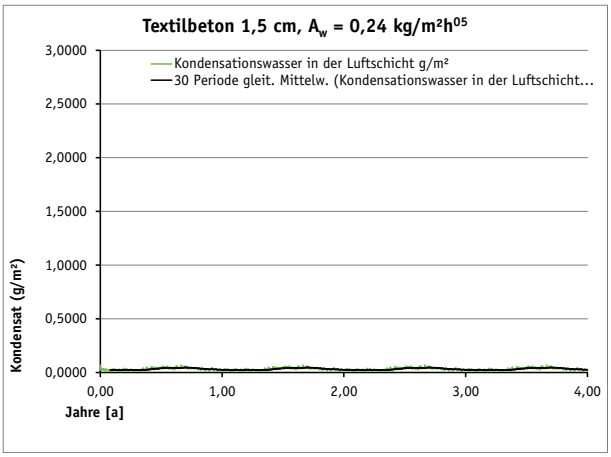


Abb. 144 Kondensatbildung in der Luftschicht hinter derFassadenplatte Textilbeton (Software: Dephin)

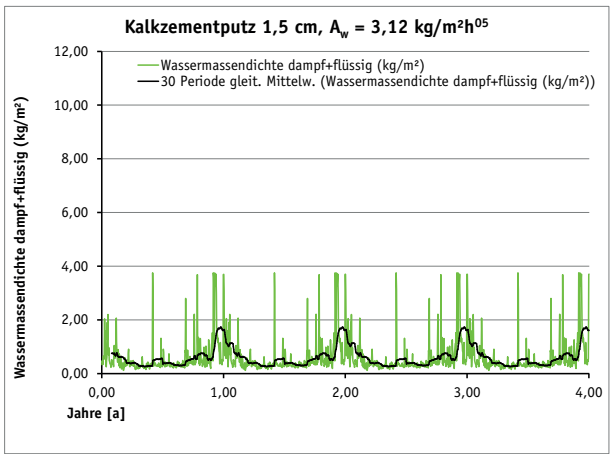


Abb. 145 Wassermassendichte Kalkzementputz (Software: Dephin)

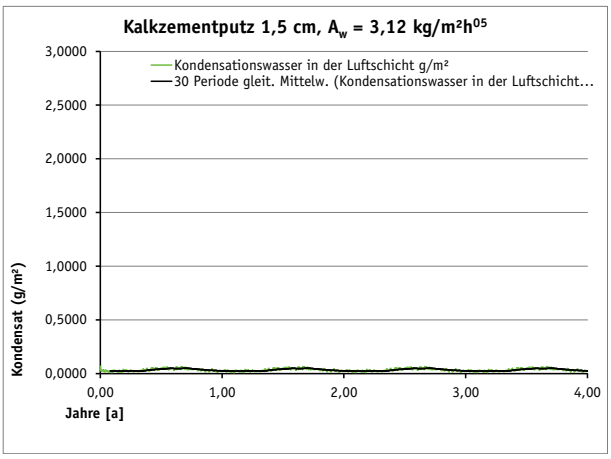


Abb. 146 Kondensatbildung in der Luftschicht hinter dem Kalkzementputz (Software: Dephin)

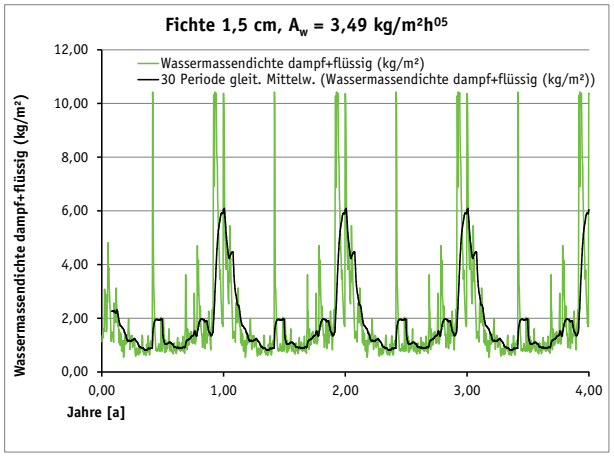


Abb. 147 Wassermassendichte Fassadenplatte Fichte (Software: Dephin)

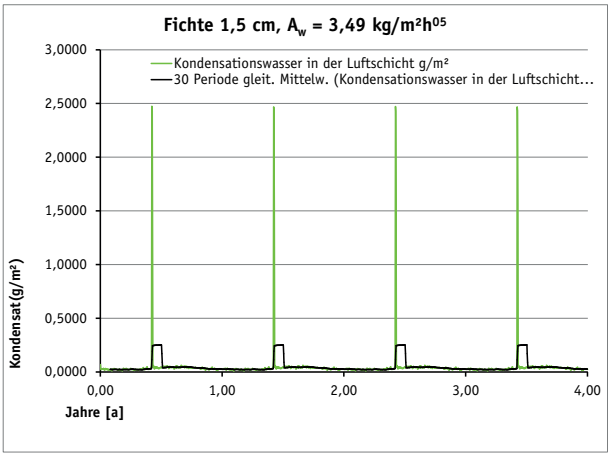


Abb. 148 Kondensatbildung in der Luftschicht hinter der Fassadenplatte Fichte (Software: Dephin)

5.2.2.4 Untersuchungen zum Brandschutz

Der Brandschutz für bauliche Anlagen ist in den Landesbauordnungen geregelt. Sie beinhalten Brandschutzanforderungen für die Gebäudeklassen 1 - 5, wie z. B. Baustoff- und Bauteilanforderungen, Abstandsregelungen oder Rettungswegführung. Für Sonderbauten bestehen spezielle Verordnungen und Richtlinien, z. B. die Hochhausrichtlinie für Gebäude oberhalb der Hochhausgrenze (Höhe > 22 m).
Das den Bauordnungen zugrunde gelegte nationale Klassifizierungssystem wird nach DIN 4102 definiert. Die Baustoffe werden nach DIN 4102-1 entsprechend ihrer Brennbarkeit in Baustoffklassen eingeteilt (siehe Abb. 149). Bauteile werden gemäß DIN 4102-2 in Feuerwiderstandsklassen von F 30 bis F 180 eingestuft.
Neben dem nationalen Klassifizierungssystem existiert das komplexere europäische System nach DIN EN 13501. Hier werden neben der Entzündbarkeit, der Flammenausbreitung und der freiwerdenden Wärme auch die Rauchentwicklung und das brennende Abfallen von Baustoffen klassifiziert.

Anforderungen an die vaku^{tex}-Fassade

Das vaku^{tex}-Fassadenelement besteht aus brennbaren und nicht brennbaren Materialien. Die äußere und innere Textilbetonplatte bilden nicht brennbare Deckschichten. Der Elementkern hingegen besteht mit GFK und den Deckfolien der VIP aus brennbaren Materialien. Die GFK-Profile von CTS Composites GmbH sind nach DIN 4102 als B2, nach ASTM E84 in Class II und nach UL94 als V1 klassifiziert. Bei Verwendung von Phenolharz ist die Eingruppierung der Profile nach DIN EN 13501 in B-s1, d0 möglich. Die Vakuumisolationspaneele sind normal entflammbar, was nach DIN 4102 der Baustoffklasse B2 entspricht.
Um zu prüfen, ob das mehrschichtige vaku^{tex}-Element insgesamt die Forderungen der A-Klassifizierung erfüllt, wurden orientierende Prüfungen an der MFPA Leipzig durchgeführt.

1. Prüfung: Bestimmung der PCS-Werte

Da vaku^{tex} aus brennbaren und nicht brennbaren Baustoffen besteht, kann eine A1-Klassifizierung für das Element nicht erreicht werden. Jedoch

Bauaufsichtliche Anforderung	Zusatzanforderung „kein Rauch“	Zusatzanforderung „kein brennendes Abtropfen/Abfallen“	Europäische Klasse nach DIN EN 13501		Klasse nach DIN 4102-1
Nicht brennbar (ohne brennbare Baustoffe)	•	•	A1		A1
Nicht brennbar (im Wesentlichen aus nicht brennbaren Baustoffen)	•	•	A2	-s1, d0	A2
Schwer entflammbar	•	•	B, C	-s1, d0	B1
Schwer entflammbar		•	A2, B, C A2, B, C	-s2, d0 -s3, d0	B1
Schwer entflammbar	•		A2, B, C A2, B, C	-s1, d1 -s1, d2	B1
Schwer entflammbar			A2, B, C	-s3, d2	B1
Normal entflammbar		•	D E	-s1/s2/s3, d0	B2
Normal entflammbar			D E	-s1/s2/s3, d1 -s1/s2/s3, d2 -d2	B2
Leicht entflammbar			F		B3

Abb. 149 Klassifizierung des Brandverhaltens von Bauprodukten nach DIN 4102-1 und DIN EN 13501

können Bauteile, die im Wesentlichen aus nicht brennbaren Materialien bestehen, die Baustoffklasse A2 erreichen. Um die Einstufung für das Fassadenelement zu bestimmen, wurde die Verbrennungswärme nach DIN EN ISO 1716:2010-11 ermittelt. Die PCS-Werte der Materialien Beton, textiles Gelege, Hochbarrierefolie und Kieselsäurestützkern erfüllten dabei alle die zulässigen Grenzwerte. Die Ergebnisse der orientierenden Prüfung zeigen, dass die vaku[tex]-Konstruktion A2 erreichen kann (siehe Anhang *„8.3 Prüfbericht zur Bestimmung der Verbrennungswärme“*).

2. Prüfung: SBI-Test
Für eine Zulassung der Fassadenelemente sind Prüfungen nach DIN EN 13823:2010-12 erforderlich. Für das vaku[tex]-Element wurde eine orientierende Prüfung nach dem Single-Burning-Item-Test, kurz SBI-Test, durchgeführt (siehe Anhang *„8.4 Prüfbericht zur orientierenden Brandverhaltensprüfung nach dem SBI-Verfahren“*). Dabei wird eine Raumecke mit den zu prüfenden Bauteilen ausgebildet, die in der Prüfkammer beflammt wird. Der Brandherd befindet sich dabei in einem definierten Abstand zur Ecke. Zwei Prüfungen wurden durchgeführt, bei denen die Prüfobjekte folgende Abmaße besaßen:

- schmaler Probenflügel 495 x 1500 x 110 mm
- breiter Probenflügel 1000 x 1500 x 110 mm

Bei der ersten Prüfung war die Element-Innenseite (3 cm dicke Textilbetonplatte) der Beflammung ausgesetzt, in der zweiten Prüfung die Element-Außenseite (1,5 cm dicke Textilbetonplatte). Die Fugen wurden mit Steinwolle ausgefüllt und zusätzlich mit einer Brandschutzschnur (Fa. MEHLAG AG, Hürth - Gleuel) versehen.
Für den SBI-Test wurde das jeweilige Prüfbauteil auf dem Probeträgerwagen aufgestellt, in den Prüfraum gefahren und ohne Abstand mit CaSi-Platten hinterlegt. Anschließend erfolgte eine 20-minütige Beflammung der Prüfkörperecke durch einen Brenner (31 kW, ca. 1000°C). Während des Tests wurden folgende Daten erfasst:

- Energiefreisetzung (THR)
- Flammenausbreitung (LFS)
- Geschwindigkeit d. Brandausbreitung (FIGRA)
- Rauchentwicklung (SMOGRA)
- Brennendes Abfallen bzw. Abtropfen

Das Ergebnis der ersten Prüfung (3 cm dicke Textilbetonplatte auf Beflammungsseite) ist positiv zu bewerten, da alle Messwerte innerhalb der

Abb. 150 SBI-Test: Prüfkörper, brandzugewandte Seite

Abb. 151 SBI-Test: Prüfkörper auf Probeträgerwagen, Rückseite

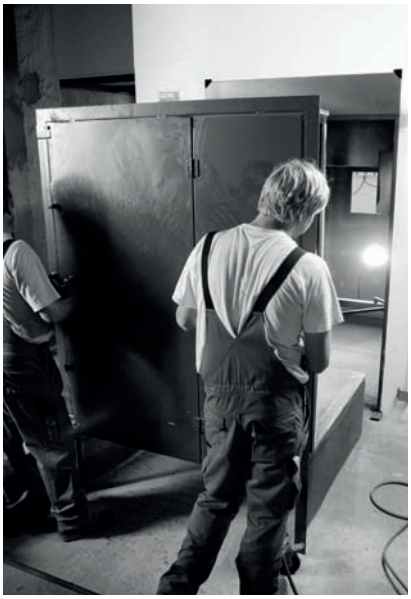


Abb. 152 SBI-Test: Probeträgerwagen wird in den Prüfraum gefahren

gestellten Grenzwerte lagen. Während der Prüfzeit wurden Schwarzfärbungen auf der Oberfläche im Bereich der Brennerflamme beobachtet. Das Prüfobjekt wurde über die geforderten 20 Minuten hinaus beflammt, um sein Verhalten über eine längere Beflammungsdauer hinweg zu beobachten. Nach ca. 25 Minuten kam es zu starken Abplatzungen im unteren Bereich (siehe Abb. 155).

Auch bei der zweiten Prüfung (1,5 cm dicke Textilbetonplatte auf Beflammungsseite) lagen alle gemessenen Werte innerhalb der Grenzwerte und es wurden Schwarzfärbungen beobachtet (siehe Abb. 156). Diese Variante wurde ebenfalls über den geforderten Zeitraum hinaus beflammt. Nach 27 Minuten wurde die Beflammung eingestellt, bis dahin kam es zu keinerlei Abplatzungen der Oberfläche. Zu einem brennenden Abfallen von Elementteilen kam es in keiner der Prüfungen.

Auswertung
Die Ergebnisse der orientierenden Prüfungen ergaben für beide Prüfgegenstände eine Eingruppierung in die Klasse A2-s1, d0.

Abb. 153 SBI-Test: Beginn der zwanzigminütigen Beflammung

Abb. 154 SBI-Test: Abnahme der Messdaten alle 3 Sekunden

Abb. 155 SBI-Test: Prüfobjekt 1 nach der Beflammung

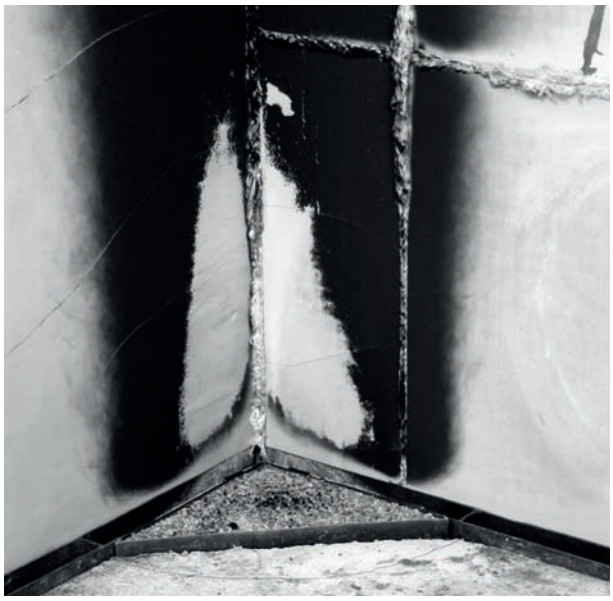


Abb. 156 SBI-Test: Prüfobjekt 2 nach der Beflammung

5.2.2.5 Untersuchungen zum Schallschutz

Die Qualität der akustischen Dämmwirkung eines trennenden Bauteils wird durch das Schalldämm-Maß ausgedrückt. Während das Laborschalldämm-Maß R Nebenweg- und Flankenübertragungen nicht berücksichtigt, werden diese beim Bau-Schalldämm-Maß R' einbezogen. Zur Kennzeichnung der Luftschalldämmung eines Bauteils wird in der Praxis das bewertete Schalldämm-Maß R_w bzw. R_w' angegeben. Dieses entspricht einer Einzahlangabe, die sich durch den Vergleich der frequenzabhängigen Messkurve (Pegelmessungen von 90 Hz bis 3550 Hz) mit einer Bezugskurve ergibt [Werner, 2009].

Schallschutzprüfung der vaku^tex-Elemente

An der MFPA Leipzig wurden orientierende Messungen zur Luftschalldämmung des Fassadenelements in Anlehnung an die DIN EN ISO 10140-2 im Türenprüfstand durchgeführt. Hierbei wurden zwei Prüfkörper mit verschiedenen Unterkonstruktionen gemessen:

Bei der ersten Variante ist die innere Textilbetonplatte an den GFK-Rahmen geklebt, die äußere durch ein Agraffenschienensystem befestigt. Die Tragprofile dieses Systems sind punktuell am GFK-Rahmen fixiert. An den Berührungspunkten der Agraffen- und Tragprofile wurden schalldämpfende Zellkautschuklagen zur zusätzlichen Entkopplung eingelegt (Bezeichnung: RB 20 EPDM der Firma HIRI, Kirchgellersen). Zusätzlich wurden die VIPs vollflächig mit 2 mm starken Gummischichten verklebt (siehe Abb. 157).

Bei der zweiten Bauteilvariante sind die innere und äußere Textilbetonplatte auf den GFK-Rahmen geklebt. Zwischen den Betonplatten und dem innenliegenden Dämmkern befinden sich Luftschichten (siehe Abb. 158).

Beide Prüfelemente wurden in einem 1 x 2 m großen Türenprüfstand gemessen (entsprechend DIN EN ISO 10140-5, Maximaldämmung des Prüfstandes: 61 dB). Um den realen Fugenanteil der Fassade abzubilden, wurde mittig eine durchlaufende senkrechte Fuge vorgesehen. Die Fugenfüllung erfolgte mit Glaswollestreifen und Brandschutzschnur. Die Fugen zwischen Prüfkörper und Prüfstand wurden mit Mineralwolle ausgefüllt und mit plastischer Dichtmasse (Terostat IX) verspachtelt. Bei beiden Messungen wies die 15 mm dicke Textilbetonplatte (Außenseite) zum Senderaum.

Zur Ermittlung des Schalldämm-Maßes wurde ein Breitbandrauschen im Frequenzbereich von 50 bis 5000 Hz eingesetzt.

Als Messergebnis der Variante mit Agraffeneinhängung wurde ein bewertetes Schalldämm-Maß $R_{w,P}$

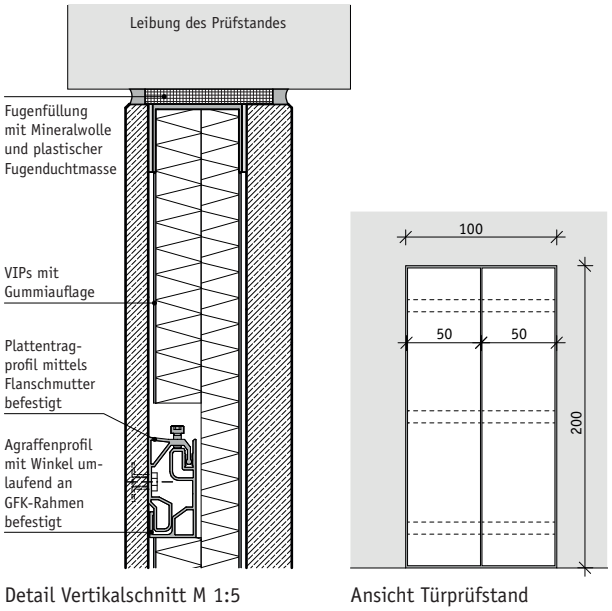


Abb. 157 Schallschutz: Variante mit Agraffenschienensystem

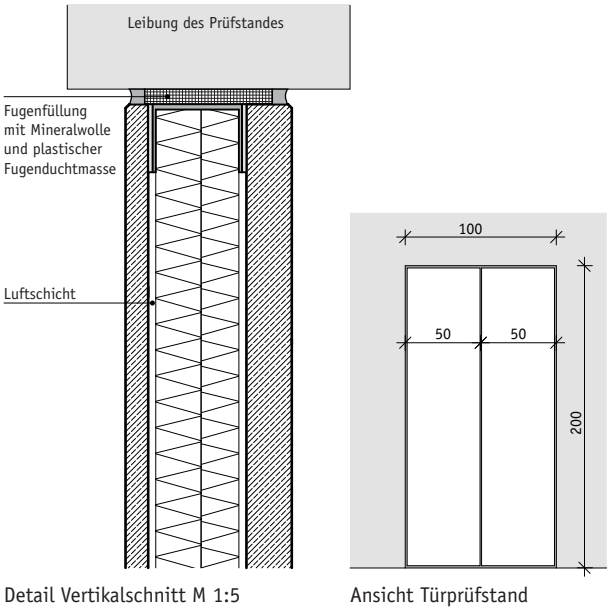


Abb. 158 Schallschutz: geklebte Variante

Abb. 159 leerer Prüfstand

Abb. 160 eingestellte Prüfbauteile

Abb. 161 Lagesicherung durch Holzkeile

Abb. 162 Verfüllung der umlaufenden Fuge mit Mineralwolle

Abb. 163 Verfüllung der mittigen Fuge mit Fugendämmung

Abb. 164 Verspachteln der umlaufenden Fuge

Abb. 165 prüffertige Einbausituation

Abb. 166 Meßgerät im Senderaum

Abb. 167 Meßgerät im Empfangsraum

von 56 dB ermittelt (siehe Anhang *„8.5 Prüfbericht Schallmessung - Konstruktion mit Agraffe“*). Der Prüfwert der geklebten Variante lag bei 47 dB (siehe Anhang *„8.6 Prüfbericht Schallmessung - Konstruktion mit Klebeverbindung“*).

Einschätzung der Prüfung
Da die Schallmessung im Türenprüfstand erfolgte, sind die Werte als orientierend einzuschätzen. Eine Messung im 10 m² großen Fassadenprüfstand würde realistischere Werte liefern. Das Prüfobjekt muss dabei der tatsächlichen Einbausituation (Fugenanteil, Elementbefestigung) entsprechen. Zwischen den Prüfwerten vom Türenprüfstand und denen vom Fassadenprüfstand sind deshalb Abweichungen wahrscheinlich. Dabei ist jedoch nicht abschätzbar, ob diese positiv oder negativ sind.

Ermittlung des Rechenwertes der Prüfergebnisse
Damit die im Prüfstand gemessenen $R_{w,P}$ -Werte auf die Praxis übertragbar sind, muss nach DIN 4109 ein Vorhaltemaß von 2 dB berücksichtigt werden. Daraus ergeben sich für die Praxis folgende Rechenwerte:

- Agraffenvariante
  $R_{w,R} = R_{w,P}$ - 2 dB = 56 dB - 2 dB = **54 dB**

- geklebte Variante
  $R_{w,R} = R_{w,P}$ - 2 dB = 47 dB - 2 dB = **45 dB**

Lärmpegelbereich	maßgeblicher Außenlärmpegel [dB(A)]	Anforderungen an erf. $R'_{w,res}$ [dB]
I	unter 55	-
II	56 bis 60	30
III	61 bis 65	30
IV	66 bis 70	35
V	71 bis 75	40
VI	76 bis 80	45
VII	über 80	50

Tab. 7 Anforderungen an die Luftschalldämmung von Außenbauteilen für Bürogebäude nach DIN 4109 Tabelle 8

Beispielrechnung
Nach DIN 4109 ist für Gebäude entsprechend der jeweiligen Nutzung ein erforderliches bewertetes Schalldämm-Maß R'_w einzuhalten. Abhängig von einem maßgeblichen Außenlärmpegel werden die Anforderungen an die Schalldämmung von Außenwänden festgelegt.
Nachdem das Schalldämm-Maß für das Einzelbauteil ermittelt wurde, soll in einer beispielhaften Rechnung abgeschätzt werden, bis zu welchen Lärmpegelbereichen eine vaku^tex-Fassade eingesetzt werden kann. Angenommen wird dafür eine Büronutzung. Ausgangspunkt ist ein Büroraum in den Abmaßen 4,5 x 4,5 m mit einer Außenwand. Die lichte Raumhöhe beträgt 2,80 m. Diese Maße ergeben sich aus der konstruktiven Gestaltung der vaku^tex-Elemente. In Tab. 7 werden die Mindestanforderungen an Außenwände von Bürogebäuden entsprechend der Lärmpegelbereiche dargestellt. Die Werte für erf. $R'_{w,res}$ entsprechen dem bewerteten Schalldämm-Maß in dB einschließlich der Schallübertragung über die flankierenden Bauteile.

Ermittlung des Korrekturwertes:
Da der Schallpegel von der Raumgeometrie beeinflusst wird, ist eine Korrektur des erf. $R'_{w,res}$ vorzunehmen. Nach DIN 4109 Tabelle 9 ergibt sich folgender Korrekturwert:

- $S_{(W+F)} / S_G$ = 12,6 m² / 20,25 m² = 0,62
  $S_{(W+F)}$ ... Gesamtfläche des Außenbauteils
  S_G ... Grundfläche des Aufenthaltsraums

- Korrekturwert = **-1 dB**

Resultierendes Schalldämm-Maß der Fassade:
Da die Gebäudehülle viele Gestaltungsmöglichkeiten bezüglich Fenster- und Wandflächen zulässt, wurde in der Beispielrechnung von einem Mittelwert von 50 % Fensterfläche und 50 % Wandfläche ausgegangen. Für die Fassade wurden passivhaustaugliche Fenster vom Kooperationspartner Variotec GmbH & Co. KG herangezogen, die ein geprüftes Schalldämm-Maß $R_{w,P}$ von 41 dB aufweisen (ohne Flankenübertragung). Für die Rechnung muss hier ebenfalls das Vorhaltemaß von 2 dB abgezogen werden:

$R_{w,R\,(F)}$ = $R_{w,P\,(F)}$ - 2 dB
= 41 dB - 2 dB
= **39 dB**

Zur Ermittlung des resultierenden Schalldämm-Maßes der Fassade wurde nach DIN 4109 Beiblatt 1 folgende Formel verwendet:

$R'_{w,R,res} = -10lg[1/100(S_F*10^{-Rw,R(F)/10}+S_W*10^{-Rw,R(W)/10})]$
S_F ... Fensterflächeanteil in %
S_W ... Wandflächenanteil der Fassade in %
$R_{w,R\,(F)}$ ... bewertetes Schalldämm-Maß (Rechenwert) der Fenster
$R_{w,R\,(W)}$ ... bewertetes Schalldämm-Maß (Rechenwert) der vaku*tex*-Elemente

- Agraffenvariante

$R'_{w,R,res}$ = -10 lg [1/100*(50*$10^{-3,9}$ + 50*$10^{-5,4}$)]
= **42 dB**

- geklebte Variante

$R'_{w,R,res}$ = -10 lg [1/100*(50*$10^{-3,9}$ + 50*$10^{-4,5}$)]
= **41 dB**

Aufgrund der punktuellen Befestigung mittels Einhängelementen auf den Deckenplatten und deren Schallentkopplung z. B. durch Neopren ergibt sich nur eine geringfüge Schallübertragung, die vernachlässigbar ist.

Einordnung der Rechenergebnisse:
Unter Berücksichtigung des Korrekturwertes können beide vaku*tex*-Fassaden entsprechend den Anforderungen für Bürogebäude nach DIN 4109 bis zum Lärmpegelbereich V eingesetzt werden. Dieser entspricht maßgeblichen Außenlärmpegeln von 71 bis 75 dB(A), wie sie an innerstädtischen Hauptverkehrsstraßen auftreten.

*Einsatzmöglichkeiten der vaku*tex*-Fassade*
Geplante Einsatzorte der vaku*tex*-Fassade sind vor allem innerstädtische Bereiche. Hier liegen die maximalen Außenlärmpegel zwischen 65 dB (verkehrberuhigte Zone) und 70-75 dB (Hauptverkehrslinien und wichtige Knotenpunkte). Durch die in den orientierenden Schallprüfungen nachgewiesene gute Schalldämmwirkung beider Elementvarianten ist ihr Einsatz in diesen Bereichen ohne weiteres möglich. An außerordentlich lauten Verkehrknotenpunkten mit extremen Lärmpegeln von bis zu 80 dB müssten entsprechend zusätzliche Schallschutzmaßnahmen vorgesehen werden.

5.3 Ökologische Betrachtung

Durch die stetig steigenden Energiekosten und Entnahmemengen von Rohstoffen gewinnt die ökologische Betrachtung immer mehr an Bedeutung. Bereits bei Neuentwicklungen spielt deshalb neben den Kosten, der Qualität und der Benutzerfreundlichkeit der ökologische Aufwand eine zunehmende Rolle. Die Auswirkungen der vaku^tex-Fassade auf die Umwelt sollen dazu in einer vergleichenden Ökobilanzierung ermittelt werden.

tragende Fassadenkonstruktionen	Leichtbeton	120,0 cm
	120,0 cm	Leichtbeton
	Stahlbeton	55,5 cm
	8,0 cm	Stahlbeton
	4,0 cm	Hinterlüftung
	26,0 cm	Wärmedämmung EPS
	17,5 cm	Stahlbeton
	Ziegel & WDVS	50,5 cm
	1,0 cm	Putz
	24,0 cm	Wärmedämmung EPS
	24,0 cm	Kalksandsteinziegel
	1,5 cm	Gipsputz
	Dämmziegel	51,5 cm
	1,0 cm	Putz
	49,0 cm	Poroton-Ziegel T7
	1,5 cm	Gipsputz
	Holzständer	32,9 cm
	2,1 cm	Dreischichtplatte Lärche
	4,0 cm	Hinterlüftung
	4,0 cm	Holzfaserdämmplatte
	20,0 cm	Zellulose
	1,5 cm	Holzfaserplatte (OSB)
	1,3 cm	Gipskartonplatte
nicht tragende Fassadenkonstruktionen	Stahlsandwich (inkl. Anteil Tragkonstruktion)	26,0 cm
	26 cm	Sandwich mit PUR Hartschaumkern
	Textilbetonsandwich (inkl. Anteil Tragkonstruktion)	22,0 cm
	1,5 cm	Textilbeton
	19 cm	PU-Dämmplatte
	1,5 cm	Textilbeton
	Holzsandwich (inkl. Anteil Tragkonstruktion)	12,4 cm
	2,1 cm	Dreischichtplatte Lärche
	0,5 cm	Schutzlage
	3,0 + 2,5 cm	Vakuumisolationspaneel
	0,5 cm	Schutzlage
	2,5 cm	Holzfaserplatte (OSB)
	1,25 cm	Gipsfaserplatte
	vaku^tex (inkl. Anteil Tragkonstruktion)	11,0 cm
	1,5 cm	Textilbeton
	0,5 cm	Schutzlage
	3,0 + 2,5 cm	Vakuumisolationspaneel
	0,5 cm	Schutzlage
	3,0 cm	Textilbeton

Tab. 8 Aufbau und Dimensionierung der zu vergleichenden tragenden und nicht tragenden Fassadenkonstruktionen, U = 0,15 W/(m²K)

5.3.1 Vergleichende Ökobilanzierung von Fassaden

Um eine vergleichende Ökobilanzierung der vaku^tex-Fassade mit anderen Fassadenkonstruktionen zu erstellen, bedarf es einer Betrachtung unterschiedlicher Umweltwirkungen. Diese entsprechen den Nachhaltigkeitskriterien der Ökologischen Qualität im *„Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen“* (siehe Abb. 177). Zusätzlich werden die Eigengewichte der Konstruktionen einander gegenübergestellt. Vaku^tex wird dabei mit praxisüblichen, aber auch neuartigen Fassadenkonstruktionen verglichen. Nähere Angaben zu ihrem Aufbau, insbesondere zu den Dimensionen der Einzelkomponenten, können Tab. 8 entnommen werden. Die gewählten Konstruktionen Leicht- und Stahlbetonbau, Ziegelbau mit WDVS, Ziegelbau mit Perlitfüllung und Holzständerbau mit Zellulosedämmung stehen dabei exemplarisch für tragende Konstruktionen. Für nicht tragende Fassaden wurden beispielhaft Sandwichsysteme mit Polyurethan-Kern und Stahl- bzw. Textilbetondeckschichten, Holz mit Vakuumdämmung sowie das vaku^tex-Fassadenelement gewählt. Diese nicht tragenden Konstruktionen werden mit einem Stahltragskelett kombiniert, um eine Vergleichbarkeit mit den Massivbauvarianten herzustellen. Alle Fassaden besitzen einen Wärmedurchgangskoeffizienten von 0,15 W/(m²K), der dem Passivhausstandard entspricht.

Randbedingungen

In der Bilanzierung wird von jeder Fassadenkonstruktion eine Fläche von 1 m² betrachtet und nach Ökobau.dat ein Lebenszyklus von 50 Jahren zugrunde gelegt, unabhängig davon, ob ihre maximale Nutzungsdauer bereits erreicht ist. Sie werden dann rechnerisch durch Deponieren, thermische Verwertung und/oder Recycling verwertet. Die Lebensdauer der Bauteile wurde dem *„Leitfaden für nachhaltiges Bauen“* entnommen [BMVBS, 2011a].

Vergleich der Fassadenkonstruktionen

Die in Abb. 168 bis Abb. 176 dargestellten Diagramme zeigen einen quantitativen Vergleich der Fassadenkonstruktionen zu jedem Nachhaltigkeitskriterium der Ökobilanz. Dabei werden die Konstruktionen in jeder Umweltwirkung separat betrachtet, sodass ein Vergleich der absoluten Werte möglich ist. Aus den Einzelkriterien kann jedoch noch kein ökologisches Gesamtbild der einzelnen Fassaden erstellt werden.

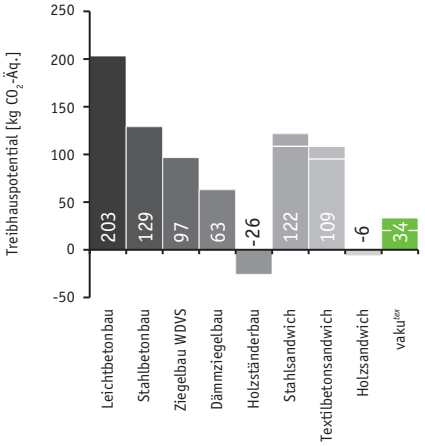


Abb. 168 Vgl. des Treibhauspotentials

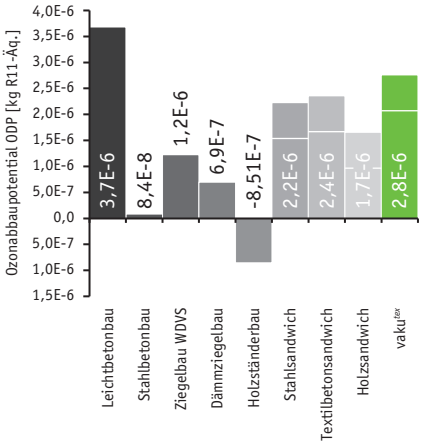


Abb. 169 Vgl. des Ozonabbaupotentials

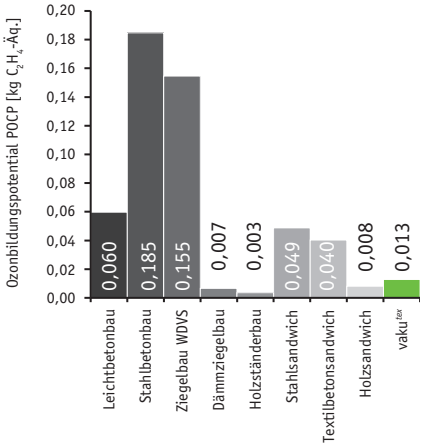


Abb. 170 Vgl. des Ozonbildungspotentials

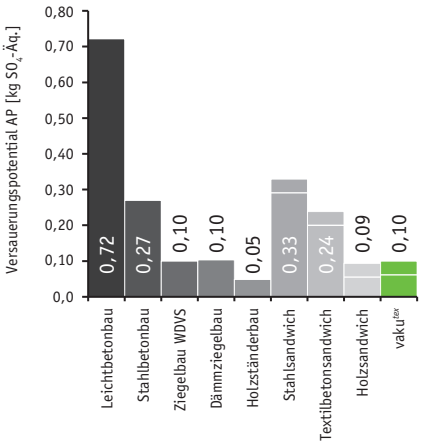


Abb. 171 Vgl. des Versauerungspotentials

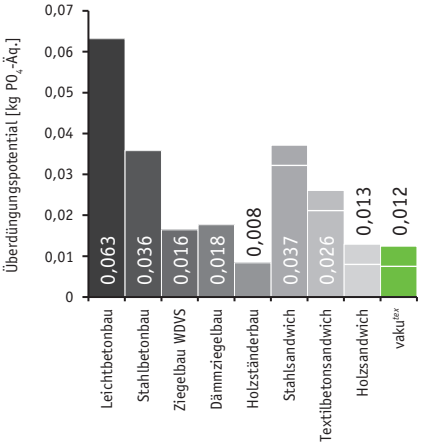


Abb. 172 Vgl. des Überdüngungspotentials

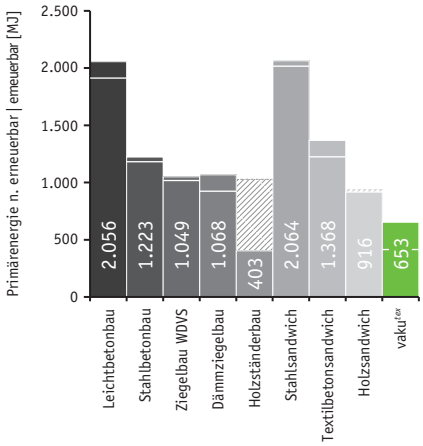


Abb. 173 Vgl. Primärenergie erneuerbar und nicht erneuerbar

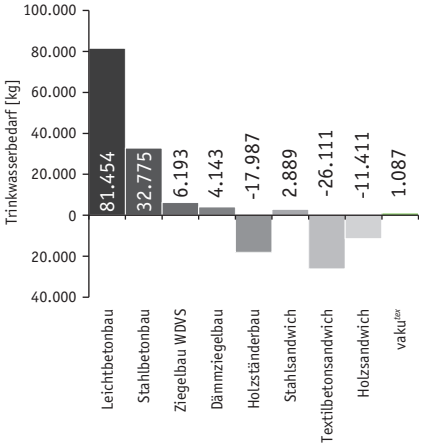


Abb. 174 Vgl. des Trinkwasserbedarfs

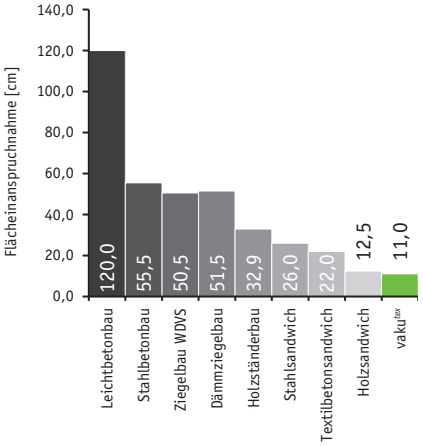


Abb. 175 Vgl. der Flächeninanspruchnahme

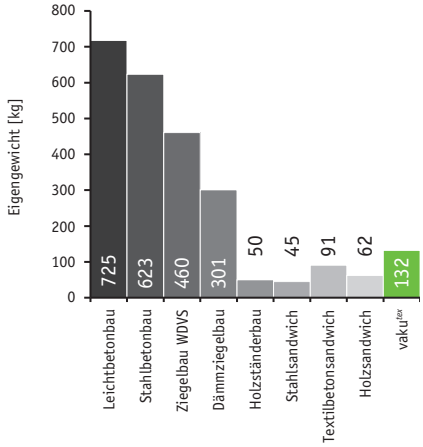


Abb. 176 Vgl. der Eigengewichte

5.3.2 Abschätzung der Umweltbelastung

Zur Erstellung einer ökologischen Gesamteinschätzung wird das *„Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen 2011_1 (BNB)"* herangezogen.

5.3.2.1 Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB)

Das sogenannte *„Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen"* stellt als Ergänzung zum *„Leitfaden für Nachhaltiges Bauen"* des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) ein ganzheitliches Bewertungsverfahren für Büro- und Verwaltungsbauten dar. Hintergrund dieser Entwicklung ist das Ziel der Bundesregierung, ein wissenschaftlich fundiertes, planungsbasiertes Bewertungssystem für Gebäude zu schaffen. Der BNB-Leitfaden zeichnet sich durch die umfassende Betrachtung des gesamten Lebenszykluses von Gebäuden aus. Dabei berücksichtigt er folgende Hauptkriteriengruppen in unterschiedlicher Wichtung:

- Ökologische Qualität 22,5 %
- Ökonomische Qualität 22,5 %
- Soziokulturelle & funktionale Qualität 22,5 %
- Technische Qualität 22,5 %
- Prozessqualität 10,0 %
- Standortmerkmale -- %

Aus den gewichteten Kriterien ergeben sich Teilerfüllungsgrade, die schließlich zu einem Gesamterfüllungsgrad zusammengefasst werden. Dieser entspricht der Gesamtbeurteilung eines Gebäudes [BMVBS, 2011b].

Hauptkriteriengruppe Ökologische Qualität

In der Gesamtbewertung beträgt der maximale Erfüllungsgrad der Ökologischen Qualität 22,5 %. Er setzt sich aus den Bewertungen der Nachhaltigkeitskriterien zusammen: So werden das Treibhauspotential, der Bedarf an nicht erneuerbarer Primärenergie und die Risiken für die lokale Umwelt dabei mit jeweils 3,375 % gewichtet, andere Aspekte hingegen mit 2,250 % bzw. 1,125 % (siehe Abb. 177). Eingestuft werden die Kriterien mit Hilfe eines festgelegten Punktesystems. Dieses reicht von 0 bis 100 Punkte, die einem äquivalenten Wert der Kategorie entsprechen. Nach BNB

Nachhaltigkeitskriterien	Gewichtung Einzelkriterien	Punktzahl (Bewertung) Ist	Punktzahl (Bewertung) Ziel	Bedeutungsfaktor	Erfüllungsgrad	Erfüllungsgrad	Gewichtung Hauptkriteriengruppen	Erfüllungsgrad gesamt
Ökologische Qualität							**22,5 %**	**0,0 %**
Wirkung auf die globale Umwelt						0 %		
1.1.1 Treibhauspotential (GWP)	3,375 %		100	3	0 %			
1.1.2 Ozonschichtabbaupotential (ODP)	1,125 %		100	1	0 %			
1.1.3 Ozonbildungspotential (POCP)	1,125 %		100	1	0 %			
1.1.4 Versauerungspotential (AP)	1,125 %		100	1	0 %			
1.1.5 Überdüngungspotential (EP)	1,125 %		100	1	0 %			
1.1.6 Risiken für die lokale Umwelt	3,375 %		100	3	0 %			
1.1.7 Nachhaltige Materialgewinnung/Holz	1,125 %		100	1	0 %			
Ressourceninanspruchnahme								
1.2.1 Primärenergiebedarf n. erneuerbar (PE_{ne})	3,375 %		100	3	0 %			
1.2.2 Gesamtenergiebedarf (PE_{ges}) & Anteil erneuerbare Primärenergie (PE_e)	2,250 %		100	2	0 %			
PE_{ges}			100					
Anteil PE_e			50					
1.2.3 Trinkwasserbedarf & Abwasseraufkommen	2,250 %		100	2	0 %			
1.2.4 Flächeninanspruchnahme	2,250 %		100	2	0 %			

Abb. 177 Bewertungsmatrix des BNB: Ökologische Qualität

wird z. B. beim Gesamtprimärenergiebedarf folgende Punktzuordnung angesetzt [BMVBS, 2011c]:

- 100 Pkt. entspr. 125,20 [kWh/(m²NGFa * a)]
- 90 Pkt. entspr. 143,98 [kWh/(m²NGFa * a)]

  .....
- 10 Pkt. entspr. 344,30 [kWh/(m²NGFa * a)]
- 0 Pkt. entspr. 406,90 [kWh/(m²NGFa * a)]

Zwischenwerte sind durch lineare Interpolation zu berechnen. Die ermittelten Erfüllungsgrade der Einzelkriterien werden anschließend summiert.

5.3.2.2 Anpassung des Bewertungssystems mittels Einstufungsmatrix

Da das BNB nur für die Einstufung gesamter Gebäude ausgelegt ist, kann es zur angestrebten Bewertung einzelner Positionen, wie z. B. Fassaden, nicht herangezogen werden. Aus diesem Grund wurde eine eigene Bewertungsmatrix, basierend auf dem BNB, erstellt. Diese berücksichtigt nur die ökologischen Aspekte. Es werden alle Nachhaltigkeitsaspekte und ihre Bedeutungsfaktoren, die in der Hauptkriteriengruppe *„Ökologische Qualität"* des BNB aufgeführt sind, einbezogen. Um einen

Nachhaltigkeitskriterien	Bedeutungsfaktor	Gewichtung der Einzelkriterien	Vergleichsgrenzen Min.	Vergleichsgrenzen Max.	Ist-Wert	Umweltbelastung der Einzelkriterien	Umweltbelastung gesamt
Ökologische Bewertung einer Konstruktion							**0,0 %**
01. Treibhauspotential (GWP)	3	15,0 %	0 %	15 %		0 %	
02. Ozonabbaupotential (ODP)	1	5,0 %	0 %	5 %		0 %	
03. Ozonbildungspotential (POCP)	1	5,0 %	0 %	5 %		0 %	
04. Versauerungspotential (AP)	1	5,0 %	0 %	5 %		0 %	
05. Überdüngungspotential (EP)	1	5,0 %	0 %	5 %		0 %	
06. Risiken für die lokale Umwelt*	3	15,0 %	0 %	15 %		0 %	
07. Nachhaltige Materialgewinnung/Holz*	1	5,0 %	0 %	5 %		0 %	
08. Primärenergiebedarf n. erneuerbar (PE_{ne})	3	15,0 %	0 %	15 %		0 %	
09. Gesamtenergiebedarf (PE_{ges}) & Anteil erneuerbare Primärenergie (PE_e)	2	10,0 %				0 %	
9.1 PE_{ges}			0 %	6,67 %			
9.2 Anteil PE_e*			0 %	3,33 %			
10. Trinkwasserbedarf & Abwasseraufkommen	2	10,0 %	0 %	10 %		0 %	
11. Flächeninanspruchnahme	2	10,0 %	0 %	10 %		0 %	

* Minimalwert entspricht hier dem größtmöglichen Anteil

Abb. 178 Angepasste Bewertungsmatrix zur relativen Abschätzung der Gesamtumweltbelastung einer Konstruktion

aussagekräftigen Vergleich von Einzelkonstruktionen zu ermöglichen, wird das vorhandene Punktesystem des BNB folgendermaßen abgeändert (siehe Abb. 178):

1. Ausgangspunkt bilden die bilanzierten Werte der Nachhaltigkeitskriterien (Treibhauspotential, Primärenergiebedarf, etc.), die sich auf 1 m² Bauteilfläche beziehen.

2. Da nur die Kriterien der Ökologischen Qualität bewertet werden, ergeben sich unter Beibehaltung der Bedeutungsfaktoren folgende neue Wichtungen für die Matrix:

- 3,375 % im BNB entspr. 15 %
- 2,500 % im BNB entspr. 10 %
- 1,125 % im BNB entspr. 5 %

3. Der Zwischenschritt einer Punktevergabe entfällt, die Wichtung erfolgt sofort prozentual.

4. Zur Beurteilung werden nicht mehr festgelegte Anforderungsniveaus zugrunde gelegt, sondern relative Werte, die abhängig von den für den jeweiligen Vergleich gewählten Konstruktionen sind.

5. Minimal- und Maximalwerte jedes Kriteriums definieren Vergleichsgrenzen und damit die niedrigste und höchste zu vergebende Prozentzahl. Zwischen diesen Grenzen wird mittels linearer Interpolation die relative Umweltbelastung jeder Konstruktion bestimmt. Dabei sind niedrige Prozentangaben als bestmögliche Wichtung zu sehen, hohe Prozentangaben hingegen als schlechteste.

6. Durch die Addition der ermittelten Prozentzahlen ergibt sich die Gesamtumweltbelastung einer Konstruktion. Diese stellt lediglich ein relatives Bewertungsverfahren dar, dass sich auf einen direkten Vergleich von Einzelkonstruktionen bezieht.

5.3.2.3 Auswertung

Tab. 9 zeigt die Bewertungsmatrix nach angepasstem System. Dabei werden die ermittelten Umweltwerte jeder Konstruktion eingetragen und relativ gewichtet. Die Summierung ergibt die Gesamtumweltbelastung jeder einzelnen Fassadenkonstruktion und ist in Abb. 179 vergleichend dargestellt.

- Leichtbeton

Um den Passivhausstandard zu erreichen, ist eine Wandstärke von 120 cm notwendig. Dementsprechend viel Zement (37 M.-%) und Blähton als Beimischung (22 M.-%) werden verarbeitet [Bonnen, 2010]. Aufgrund des hohen Material- und Platzbedarfs ist die Konstruktion in fast allen Bewertungskriterien als schlechteste einzustufen.

- Stahlbeton

Prinzipiell ist Stahlbeton in der Bilanzierung besser einzustufen als Leichtbeton. Dennoch summieren sich auch hier die Umweltindikatoren aufgrund des hohen Materialbedarfs, sodass sich die Konstruktion mit ca. 54 % unter den Letzten einreiht.

- Ziegel mit WDVS

Die im Wohnungsbau oft genutzte Konstruktionsvariante des Hochlochziegels mit WDVS kann sich durch Gewichtseinsparung gegenüber der Stahlbetonkonstruktion verbessern. Jedoch schlägt sich der im WDVS enthaltene Anteil an Polystyrol, dessen Herstellung auf Erdöl basiert, extrem negativ auf die Bilanz der Umweltindikatoren nieder.

- Dämmziegel

Mit Perlit gefüllte Dämmziegel ermöglichen es, geringere Eigengewichte zu realisieren. Aufgrund der Materialeinsparung halbiert sich das Treibhauspotential im Vergleich zum Stahlbeton. Dennoch fällt der Energiebedarf wegen dem hohen Anteil von Perlit als Füllmaterial nur geringfügig positiver aus als beim Stahlbeton.

- Holzständerbau

Den Abschluss der tragenden Fassadenkonstruktionen bildet der Holzständerbau. In diesem Sektor fällt er zum einen durch die stark dezimierte Flächenversiegelung auf, zum anderen durch die Negativwerte bei der Summierung von Treibhauspotential und Primärenergie. Grund dafür ist die besondere Sachbilanz von nachwachsenden

Rohstoffen. Ihr Lebenszyklus beginnt nicht erst mit dem Abbau der Rohstoffe, sondern bereits mit dem Wachstum der Pflanze. Diese wandelt beim Vorgang der Photosynthese treibhauswirksames Kohlendioxid in Sauerstoff um. Dieser positive Effekt wird bei der Bilanz mitbetrachtet, da er sich in einem kurzfristigen Intervall wiederholen lässt.

- Stahlsandwich

Die energetisch aufwendigste nicht tragende Konstruktion ist das Stahlsandwich. Grund dafür ist das erdölbasierende Dämmmaterial Polyurethan (PUR) und die Edelstahlblech-Ummantelungen. Der hohe Energieaufwand bei der Herstellung schlägt sich negativ auf die Bilanz der Umweltbelastung aus.

	Nachhaltigkeitskriterien		Vergleichs-Grenzen		Konstruktionen, tragend					Konstruktionen, nicht tragend			
			Min.	Max.	Leichtbeton	Stahlbeton	Ziegel & WDVS	Dämmziegel	Holzständer	Stahlsandwich (inkl. Anteil Tragkonstr.)	Textilbetonsandwich (inkl. Anteil Tragkonstr.)	Holzsandwich (inkl. Anteil Tragkonstr.)	$vaku^{tex}$ (inkl. Anteil Tragkonstr.)
1.	Treibhauspotential	[kg CO_2-Äq]	-25,6	203,3	203,3	129,2	96,7	63,0	-25,6	121,6	108,5	-6,3	33,6
	Umweltbelastung	[%]	0,0	15,0	15,0	10,1	8,0	5,8	0,0	9,6	8,8	1,3	3,9
2.	Ozonabbaupotential	[kg R11-Äq]	-8,5E-07	3,7E-06	3,7E-06	8,4E-08	1,2E-06	6,9E-07	-8,5E-07	2,2E-06	2,4E-06	1,7E-06	2,8E-06
	Umweltbelastung	[%]	0,0	5,0	5,0	1,0	2,3	1,7	0,0	3,4	3,5	2,8	4,0
3.	Ozonbildungspotential	[kg C_2H_4-Äq]	0,003	0,185	0,060	0,185	0,155	0,007	0,003	0,049	0,040	0,008	0,013
	Umweltbelastung	[%]	0,0	5,0	1,6	5,0	4,2	0,1	0,0	1,2	1,0	0,1	0,3
4.	Versauerungspotential	[kg SO_4-Äq]	0,048	0,722	0,722	0,270	0,100	0,104	0,048	0,329	0,239	0,094	0,100
	Umweltbelastung	[%]	0,0	5,0	5,0	1,6	0,4	0,4	0,0	2,1	1,4	0,3	0,4
5.	Überdüngungspotential	[kg PO_4-Äq]	0,008	0,063	0,063	0,036	0,016	0,018	0,008	0,037	0,026	0,013	0,012
	Umweltbelastung	[%]	0,0	5,0	5,0	2,5	0,7	0,8	0,0	2,6	1,6	0,4	0,4
6.	Risiken f. lokale Umwelt*		5	1	5	4	4	4	3	4	4	3	4
	Umweltbelastung	[%]	0,0	15,0	0	3,75	3,75	3,75	7,5	3,75	3,75	7,5	3,75
7.	Nachhaltige Materialgewinnung/Holz*		3	0	1	1	1	1	3	1	1	3	1
	Umweltbelastung	[%]	0,0	5,0	3,33	3,33	3,33	3,33	0,0	3,33	3,33	0,0	3,33
8.	Primärenergie n. erneuerbar	[MJ]	-646,9	2.011,5	1.911,2	1.181,7	1.016,7	913,1	-646,9	2.011,5	1.231,7	-11,5	423,1
	Umweltbelastung	[%]	0,0	15,0	14,4	10,3	9,4	8,8	0,0	15,0	10,6	3,6	6,0
9.	Gesamtenergiebedarf & Anteil erneuerbare Primärenergie												
	Umweltbelastung	[%]	0,0	10,0	9,8	6,6	5,9	5,6	0,0	10,0	6,9	2,1	3,2
	9.1 PE_{ges}	[MJ]	403,2	2.063,5	2.055,7	1.223,1	1.049,1	1.067,8	403,2	2.063,5	1.367,8	916,1	653,3
	Umweltbelastung	[%]	0,0	6,67	6,63	3,29	2,59	2,67	0,0	6,67	3,87	2,06	1,00
	9.2 Anteil PE_e*	[%]	100,0	2,5	7,0	3,4	3,1	14,5	100,0	2,5	9,9	100,0	35,2
	Umweltbelastung	[%]	0,0	3,33	3,17	3,30	3,31	2,92	0,0	3,33	3,07	0,00	2,20
10.	Trinkwasserbedarf	[kg]	-26.111	81.454	81.454	32.775	6.193	4.143	-17.987	2.889	-26.111	-11.411	1.087
	Umweltbelastung	[%]	0,0	10,0	10,0	5,5	3,0	2,8	0,8	2,7	0,0	1,4	2,5
11.	Flächenanspruch	[cm]	11,0	120,0	120,0	55,5	50,5	51,5	32,9	26,0	22,0	12,5	11,0
	Umweltbelastung	[%]	0,0	10,0	10,0	4,1	3,6	3,7	2,0	1,4	1,0	0,1	0,0
Umweltbelastung gesamt		**[%]**	**0,0**	**100,0**	**79,1**	**53,9**	**44,6**	**36,9**	**10,3**	**55,1**	**42,0**	**19,6**	**27,7**

* Minimalwert entspricht hier dem größtmöglichen Anteil

Tab. 9 Matrix zur Bestimmung der Gesamtumweltbelastung unterschiedlicher Fassadenkonstruktionen (relatives Bewertungsverfahren)

- Textilbetonsandwich

Trotz des Einsatzes von Textilbeton kann der Gesamtprimärenergiebedarf gegenüber dem Stahlsandwich um nur ca. 25 % reduziert werden. Der eingesetzte PUR-Dämmstoff ist für etwa 80 % des Energieaufwandes verantwortlich.

- Holzsandwich

Ähnlich wie bei der Holzständerwand ergeben sich durch den früheren Beginn des Lebenszyklus bei einer Holzsandwichkonstruktion negative Bilanzierungswerte für Treibhauspotential und Primärenergie. so kann die Konstruktion als xxx-beste eingestuft werden.

- vaku^tex

Mit Ausnahme der beiden Holzkonstruktionen kann die vaku^tex-Fassade das geringste Treibhauspotential sowie den geringsten Energiebedarf während des Lebenszyklus aufweisen. Somit lässt sich diese als bestes Fassadenelement ohne Einsatz nachwachsender Rohstoffe einstufen. Durch den Verzicht auf diese Rohstoffe tritt die Konstruktion nicht in Konkurrenz zur Land- und Forstwirtschaft.

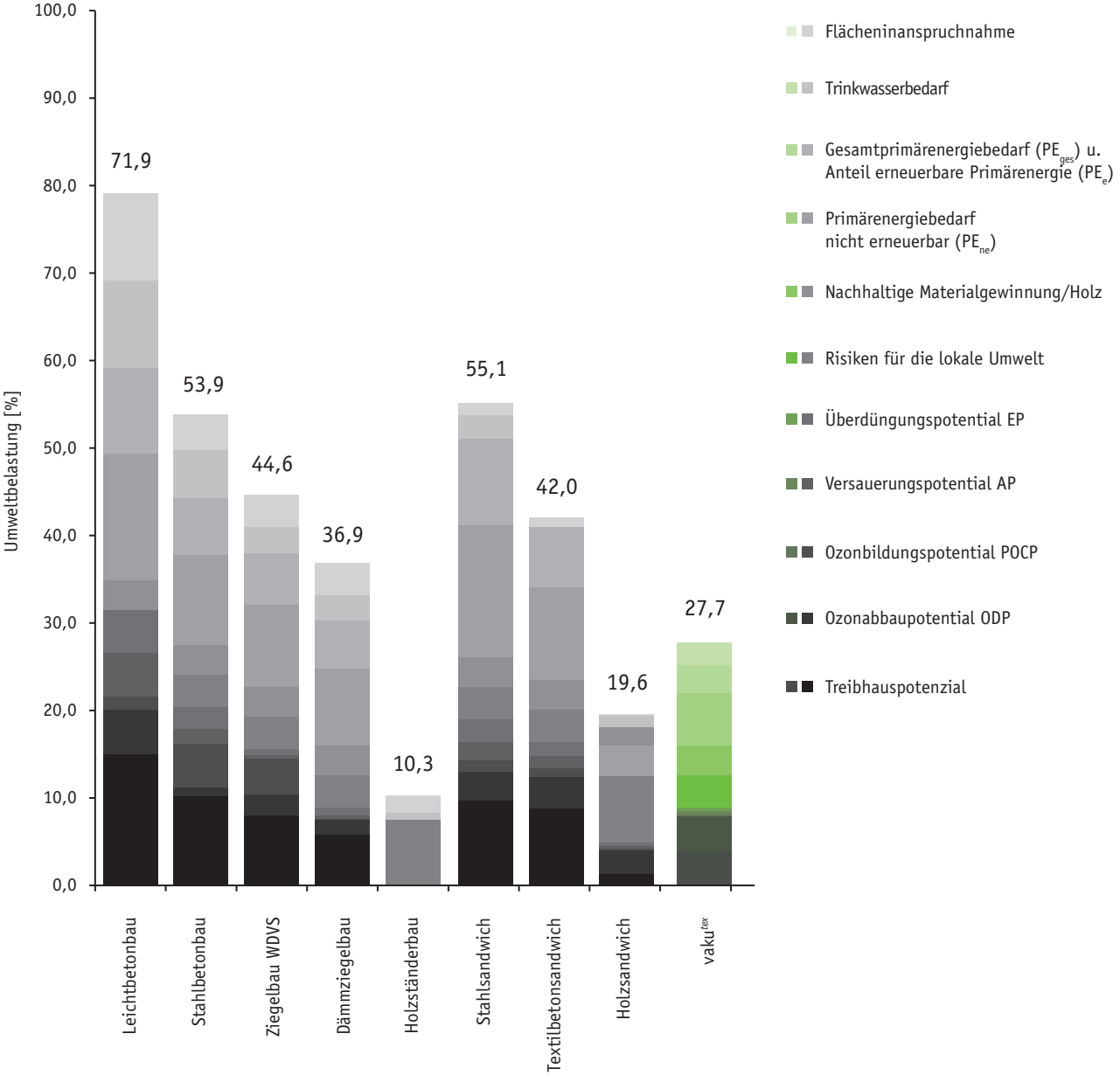


Abb. 179 Vgl. der Umweltbelastung unterschiedlicher Fassadenkonstruktionen

5.4 Ökonomische Betrachtung

Im folgenden Kapitel werden die Kosten für das vaku^{tex}-Bauteil sowie die Amortisationszeiträume für Investitionen beleuchtet. Zudem soll für das vaku^{tex}-Element geklärt werden, welche Hemmnisse und Markteintrittsbarrieren bestehen, um es in ein konkurrenzfähiges Produkt zu überführen.

5.4.1 Kosten für das vaku^{TEX}-Element

Bei den eingesetzten Einzelkomponenten des vaku^{tex}-Fassadenelements - Textilbeton, GFK und VIP - handelt es sich um konventionell bestellbare Produkte. In ihrer Kombination jedoch ergeben die einzelnen Baustoffe und Halbzeuge ein neues innovatives Fassadensystem. Die Preise für die Komponenten sind, verglichen mit energetisch gleichwertigen Stahlbeton-Sandwichelementen mit XPS Dämmkern, um bis zu 50 % höher (siehe Tab. 10). Dies ist vor allem den Produktionskosten für Vakuumisolationspaneele und Textilbeton anzurechnen, die durch den derzeit noch hohen Handarbeitsanteil ein entsprechendes Preisniveau verursachen. Sie bergen jedoch großes Kostensenkungspotential: Bei der VIP-Herstellung kann perspektivisch der gesamte Produktionsprozess durch Automatisierung des Vakuumierens und des Zuschnitts der Hochbarrierefolie beschleunigt und somit die Stückzahlen je Zeiteinheit signifikant erhöht werden. So lassen sich die Fixkosten, bei gleichzeitiger Erhöhung der produzierten Mengen, auf eine größere Stückzahl verteilen. Daneben kann ein kostengünstigeres Kern- und Folienmaterial eingesetzt werden. Insgesamt führt dies zu deutlich niedrigeren Herstellkosten, die auf diese Weise um ca. 10 – 15 % je m² gesenkt werden können.

An den Produktionsmengen des Projektpartners Variotec GmbH & Co. KG wird deutlich, dass diese stetig wachsen: Im Jahr 2011 lag die VIP-Produktion bei 15.000 m², 2012 bereits bei 18.500 m². Es kann also von einem wachsenden Markt ausgegangen werden, der Investitionen in technische Optimierung der Produktionsprozesse zunehmend attraktiver macht.

5.4.2 Wirtschaftliche Vorteilhaftigkeit

Die wirtschaftliche Vorteilhaftigkeit von vaku^{tex} gegenüber anderen Konstruktionen soll am Beispiel des Flächengewinns gezeigt werden. Dabei wird eine Stahlbetonfassade mit der vaku^{tex}-Fassade verglichen. Als Vergleichsgrundlage dient ein eingeschossiges Gebäude mit einer Bruttogeschossfläche (BGF) von 100 m². Bei gleicher Außenabmessung des Gebäudes (12,5 m x 8,0 m) wurde der Passivhausstandard (U = 0,15 W/(m²K)) angesetzt. Das Stahlbeton-Sandwichelement erreicht beim angesetzten Energiestandard eine Bauteildicke von 44 cm, das vaku^{tex}-Element mit 11 cm genau ein Viertel davon.

Vergleich der Nettogrundfläche

Verglichen werden nun die jeweiligen Nettogrundflächen (NGF): Die Stahlbetonvariante kann aus den gegebenen 100 m² BGF 82,7 m² NGF je Geschoss generieren. Dies bedeutet, dass 17,3 % Nutzfläche für den Wandaufbau beansprucht werden. Vaku^{tex} hingegen erreicht eine NGF von 95,5 m², sodass lediglich 4,5 % der BGF durch Konstruktionsfläche eingenommen werden. Im Vergleich zur Stahlbetonvariante bedeutet dies 12,8

Aufbau Stahlbeton-Sandwichelement (d = 44 cm)		**Kosten [€/m²]**
8 cm	Stahlbeton (außen)	120
24 cm	XPS-Dämmung	80
12 cm	Stahlbeton (innen)	155
Gesamtkosten		**355**

Aufbau vaku^{tex}-Fassadenelement (d = 11 cm)		**Kosten [€/m²]**
1,5 cm	Textilbeton (außen)	150
3,0 cm	Vakuumisolationspaneel	90
2,5 cm	Vakuumisolationspaneel	80
3,0 cm	Textilbeton (innen)	170
Gesamtkosten		**490**

Tab. 10 Vergleich der Herstellungskosten zwischen einer herkömmlichen Stahlbeton- und vaku^{tex}-Konstruktion

% Flächengewinn; die gewonnene Fläche könnte beispielsweise der Vermarktung zugeführt werden. Hierbei muss erwähnt werden, dass es sich beim Vergleichsgebäude um ein idealisiertes Modell handelt. Auf die Berücksichtigung verschiedener Einflussgrößen, wie z. B. Tragkonstruktion oder Zwischenwände, wurde bewusst verzichtet, um das Modell einfach und verständlich zu halten. In einer zukünftigen Gebäudeplanung könnten diese dennoch so miteinander kombiniert werden, dass der Flächengewinn möglichst maximiert wird.

Einfluss des Seitenverhältnisses

Wie in Abb. 181 deutlich wird, hängt die NGF eines Gebäudes zu einem nicht unerheblichen Teil vom Verhältnis der Wandlängen zueinander ab. Die zu erzielende Fläche nimmt kontinuierlich ab, je mehr sich das Verhältnis Länge zu Breite ins Ungleichgewicht kehrt. In der Grafik sind die verschiedenen Möglichkeiten, vom quadratischen Grundriss (Seitenverhältnis 1:1) bis hin zu einem Seitenverhältnis von 1:4, aufgezeigt. In der Gegenüberstellung der Fassadenkonstruktionen ist bei der Stahlbetonvariante ein zusätzlicher Flächenverlust von bis zu 4,4 % durch Veränderung des Seitenverhältnisses bei gleichbleibender Bruttogeschossfläche zu erkennen. Hier zeigt sich ein weiterer Vorteil der vaku[tex]-Elemente, denn durch ihre Schlankheit hat das Seitenverhältnis bei dieser Fassadenvariante weit weniger Einfluss. Hier beläuft sich der zusätzliche Verlust lediglich auf 1,1 %. Um die größtmögliche vermarktbare Fläche aus der vorgegebenen BGF zu erzielen, kann dieser Fakt berücksichtigt werden.

Schlussfolgernd kann gesagt werden, dass mit der vaku[tex]-Fassade bei einem freistehenden Gebäude und einem Seitenverhältnis von 1:1 gegenüber einer energetisch gleichwertigen Stahlbetonkonstruktion 12,4 % mehr vermarktbare Fläche zur Verfügung stehen. Durch Veränderung des Seitenverhältnisses auf 1:4 lässt sich der Flächengewinn bis auf 15,8 % erhöhen.

5.4.3 Amortisation der Investitionskosten

Zur Berechnung der wirtschaftlichen Vorteilhaftigkeit der zu tätigenden Investition wird für vaku[tex] die sogenannte Kapitalwertmethode genutzt. Dabei wird aufgezeigt, ab welchem Zeitpunkt die Mehrinvestition in vaku[tex] ausschließlich durch den Flächengewinn zurückgeführt wird. Für die Berechnung wird die Differenz aus den Investitionssummen für beide Varianten gebildet, welche der Anfangsinvestition entspricht. Der Diskontierungszinssatz wurde aus der Grenzrendite einer Investitions- und Finanzierungsmöglichkeit abgeleitet und liegt bei 2,5 %. Zur Berechnung wird folgende Formel herangezogen:

$$\sum K_n = K_0 * (1 + p/100)^{(-n+1)}$$

K_n ... Barwert (Wert der Miete zum heutigen Tag)

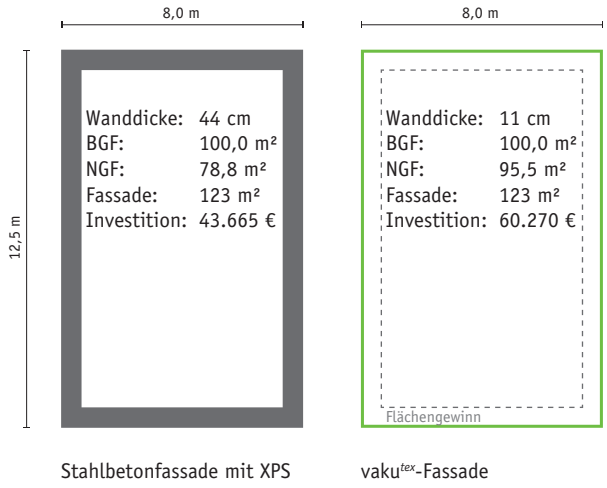


Abb. 180 Referenzfläche mit unterschiedlichen Fassaden

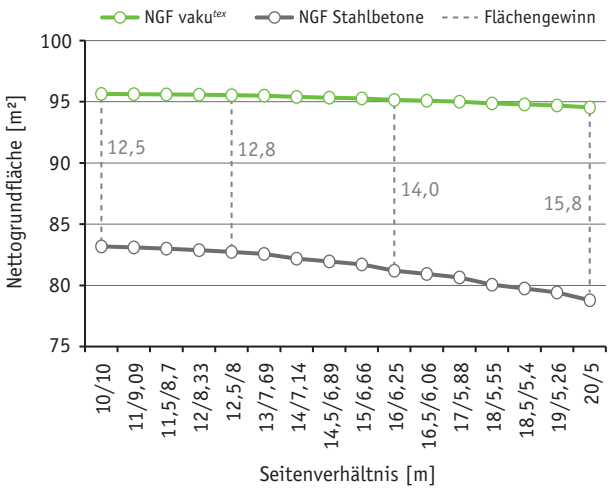


Abb. 181 Einfluss des Seitenverhältnises auf den Flächengewinn

K_0 ... Einzahlungen (Miete zum Tag der Einzahlung)
p ... Diskontierungszinssatz
n ... Jahre

Die Betrachtung wird für drei repräsentative Standorte in Deutschland durchgeführt: Leipzig, München und Frankfurt am Main. Diese stellen einen Querschnitt deutscher Städte dar. Die Einwohnerzahl in Leipzig beläuft sich auf 515.000, in München auf 1,4 Mio. und in Frankfurt auf 673.000. Das Bruttoinlandsprodukt beträgt in Leipzig pro Kopf 23.300 €, in München 49.100 € und in Frankfurt 66.300 € [Siemens, 2011]. Es werden jeweils Innenstadtlagen für ein beispielhaftes Büro- und Wohngebäude gewählt, an denen die zu erzielenden Nettokaltmieten aus dem jeweiligen Mietspiegel abgelesen werden können. Diese dienen als Ausgangswerte (Einzahlungen) für die angestrebte Berechnung.

Auswertung
Es kann nun abgelesen werden, nach welcher Zeitspanne sich die jeweilige Variante (Büro oder Wohnen) am jeweiligen Standort als vorteilhaft erweist. Das ist der Fall, wenn die in den Grafiken für Büro und Wohnen aufgetragenen Linien die x-Achse schneiden.

- Bürovariante

Im ersten Schritt werden die Büromieten an den Standorten verglichen. Diese sehen in den Top-Lagen wie folgt aus. Leipzig: 11,1 €/m², München 29,2 €/m² und Frankfurt: 33,6 €/m² [DG HYP, 2012]. Wie in der Grafik zu sehen, wird durch den generierten Flächengewinn die Mehrinvestition für die Standorte Frankfurt und München innerhalb von vier bzw. fünf Jahren sehr schnell wieder zurückgeführt. In Leipzig ist die Zeitspanne mit 14 Jahren etwa dreimal so lang. Dennoch kann es als ein akzeptables Ergebnis angesehen werden, da sich die Amortisationszeit im normalen Rahmen eines Investitionshorizonts befindet. Abgetragen als gestrichelte Linie ist zudem die Mindestmiete die nötig ist, um im Anlagehorizont die Investition zurückzuführen. Nachfolgend sind exemplarisch einige Werte aufgeführt, die zeigen, welche Mietmehreinnahmen über die Zeit zu erzielen sind:

Jahre	Mietmehreinnahmen nach Jahren (kumuliert)		
	Frankfurt a. M.	München	Leipzig
4	646,28 €	--	--
5	4.673,26 €	1.886,82 €	--
14	36.771,79 €	29.781,97 €	1.028,40 €
20	54.532.84 €	45.217,17 €	6.895,89 €
30	78.867,98 €	66.365,49 €	14.935,15 €

In der Tabelle sind kumulierte Barwerte der diskontierten Einzahlungen (Mieten) nach 4 bis 30 Jahren aufgeführt. Anhand des Beispielgebäudes kann auch gezeigt werden, dass es möglich ist, am Standort Frankfurt nach 20 Jahren durchgängiger

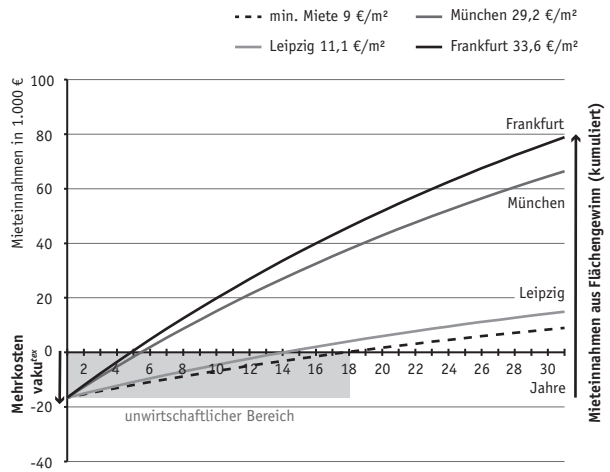


Abb. 182 Bürovariante: Mieteinnahmen aus Flächengewinn

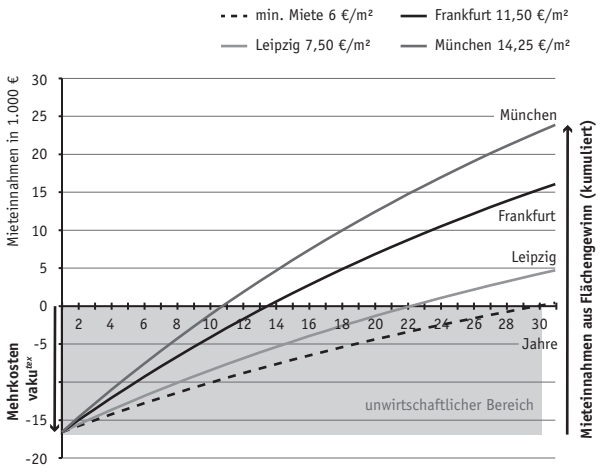


Abb. 183 Wohnvariante: Mieteinnahmen aus Flächengewinn

Vermietung und abzüglich der Investitionsmehrkosten von 16.605 €, das 3,3-fache dieser Investition wieder einzuspielen.

- Wohnvariante

Für die Wohnungsvariante zeigt sich das Bild der Mieten an den gewählten Standorten wie folgt: Leipzig: 7,50 €/m², München: 14,4 €/m², Frankfurt: 11,5 €/m². Für diese Einzahlungen würde sich die Amortisationsdauer über 11 - 22 Jahre erstrecken. Mit der angesetzten Mindestmiete von 6 €/m² wird sogar erst nach 30 Jahren eine Rückzahlung der Investition erreicht.

5.4.4 Schlussfolgerung für vaku^tex

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass durch die Flächeneinsparung der vaku^tex-Fassade im Vergleich zu herkömmlichen hochgedämmten Fassadenkonstruktionen bis zu 16 % mehr vermarktbare Fläche bereitgestellt werden kann. Aus diesem Grund ist die Amortisation einer Investition in vaku^tex-Fassaden bereits ab einem Mietpreis von 6 €/m² innerhalb von 30 Jahren, einem durchaus gängigen Anlagezeitraum, möglich. Seine wirklichen Potentiale entfaltet die vaku^tex-Fassade allerdings, wenn die generierter Mehrfläche möglichst hochpreisig vermarktet werden kann. Durch eine (Teil-) Automatisierung in der Elementherstellung wird es möglich, weitere Kostensenkungen zu erreichen. Als Einsatzorte für vaku^tex werden vor allem Stadtlagen mit Büro- oder optimalerweise Handelsnutzung (zehnmal höherer Mietpreis als Büroflächenmiete) vorgeschlagen, da diese entsprechend den örtlichen Mietpreisspiegeln die größte Rendite je Quadratmeter und damit die schnellsten Amortisationszeiten versprechen.

5.4.5 Markteintrittsbarrieren und Hemmnisse

Um das beschriebene Potential nutzen zu können, müssen unterschiedliche Voraussetzungen erfüllt sein. Mit neuen Bauprodukten bzw. Bauarten in den deutschen Markt einzutreten, lässt sich generell als schwierig bezeichnen. Grundvoraussetzung ist es, eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (AbZ), eine Zustimmung im Einzelfall, ein allgemeines bauaufsichtliches Prüfzeugnis (AbP) oder eine europäische technische Zulassung (ETA) zu erlangen. Diese sind notwendig, da viele neue Verfahren und Produktentwicklungen im Bereich der Bautechnik erhebliche Abweichungen von allgemein anerkannten technischen Regeln aufweisen oder zur Gruppe der *„ungeregelten Bauprodukte“* gehören [Fraunhofer, 2012].
Alle diese Zulassungen und Prüfzeugnisse stellen zunächst eine Barriere für ein neues Produkt dar, da ihre Erlangung umfangreiche Prüfungen und Tests am Deutschen Institut für Bautechnik (DiBT) voraussetzen. Neben dem Zeitaufwand, den diese Prüfungen erfordern, sind sie auch mit sehr hohen Kosten verbunden. Kleine und mittelständische Unternehmen können diese Kosten allein meist nicht tragen, hier kann nur in einem Interessenverband gemeinsam mit anderen Unternehmen die Finanzkraft erzeugt werden. Die Gebühren für eine Zulassung belaufen sich dabei von 50.000 bis zu 150.000 €. Die erlangte Zulassung ist zeitlich auf fünf Jahre befristet.
Um das vaku^tex-Element konkurrenzfähig zu machen, ist, wie bereits erwähnt, eine automatisierte Herstellung anzustreben. Diese ist ohne umfangreiche Investitionen in entsprechende Fertigungsanlagen jedoch nicht möglich. Unternehmer beispielsweise tätigen Investitionen aber nur dann, wenn neben den Vorteilen der Technologie auch eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung zeitnah herbeigeführt werden kann. Im Fall von vakutex könnte der TUDALIT-Markenverband als Initiator für eine solche Zulassung genutzt werden, da dieser bereits Erfahrungen mit der Zulassung von Textilbetonverarbeitungs- und Anwendungsverfahren hat. Erst, wenn eine Zulassung vorliegt und die Kosten für Unternehmen in einem vertretbaren Rahmen liegen, z. B. durch ein Lizenzmodell als Nutzungsrecht über die TUDALIT, wird die Technologie auch den breiten Markt erreichen können.

6. Fazit & Ausblicke

Fazit

Am Ende der zweijährigen Forschungsarbeit stand die Erstellung eines Prototyps in den Abmessungen 1,50 m x 3,20 m als nichttragende vorgehängte Elementfassade, welcher wie folgt aufgebaut ist (von außen nach innen):

- 1,5 cm Textilbetonplatte
- 0,5 cm Kunststoffwellplatte
- 3,0 cm Vakuumisolationspaneel
- 2,5 cm Vakuumisolationspaneel
- 0,5 cm Kunststoffwellplatte
- 3,0 cm Textilbetonplatte
- Gesamt: 11,0 cm

Das Fertigteil erreicht einen Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) von 0,15 W/(m²K) und ist damit für den Einsatz im Passivhaus geeignet. Durch die festgelegte Fugensituation des Demonstrator-Fassadenelements und die daraus resultierenden beaufschlagten Wärmebrücken erhöht sich der U-Wert in der Fassade auf 0,16 W/(m²K). Auf eine Erhöhung der Dämmstoffdicke beim Demonstrator wurde jedoch verzichtet, da sich dies unökologisch und -ökonomisch auf das Gesamtbauteil auswirken würde. Für die Herstellung der stärkeren Vakuumdämmung wäre mehr graue Energie notwendig, als Nutzenergie durch diese eingespart werden kann.

Durch den ressourcenschonenden Einsatz von Materialien in den schlanken und leichten Elementen (Gewicht: rd. 100 kg/m²) kann der Primärenergiebedarf um 60 %, das Treibhauspotential um 75 % gegenüber einer energetisch vergleichbaren Stahlbeton-Vorhangfassade reduziert werden. Je nach Gebäudegeometrie ergibt sich durch die schlanke Konstruktion ein Nettogrundflächengewinn von bis zu 15 %, woraus insbesondere in gehobenen

Abb. 184 Axonometrie Fassadenausschnitt

Innenstadtlagen ein ökonomischer Mehrwert entsteht. Durch den Einsatz anorganischer Materialien tritt das Produkt in keinerlei Konkurrenz zu Land- und Forstwirtschaft. Entwicklungsbedarf besteht für das Element in der Optimierung der Elementfugen, der Herstellungsprozesse und der Haltbarkeit der Vakuumisolationspaneele.

Das vaku[tex]-Fassadenelement wurde an der MFPA Leipzig einer orientierenden brandschutztechnischen Prüfung unterzogen. Im Ergebnis konnte das Element in die Baustoffklasse A2 (nicht brennbar) eingruppiert werden. Ein Test der Feuerwiderstandsdauer erfolgte nicht, dies bedarf einer weiteren Prüfung im Einzelfall. Bei einer orientierenden Schallschutzmessung in der selben Einrichtung konnte ein bewertetes Schalldämm-Maß $R_{w,P}$ von 47 dB für geklebte Außenplatten ermittelt werden. Eine zweite Variante, bei der die äußere Textilbetonplatte mit Agraffen am Element befestigt wurde, erreichte ein $R_{w,P}$ von 56 dB. Damit genügen die Elemente selbst den Schallschutzanforderungen hoher Außenlärmpegelbereiche von innerstädtischen Bereichen oder großen Straßenkreuzungen (Lärmpegelbereich V).

Das gestalterische Potential der schlanken vaku[tex]-Elemente liegt in der Verbesserung von Wohnqualität und Ästhetik eines Bauwerks. Das leichte Erscheinungsbild und ein erweiterter Ausblickswin-

Technische Daten

System	nichttragende vorgehängte Elementfassade
Maße	bis 1,50 m x 3,20 m
Gewicht	107 kg/m² (Außenplatte geklebt) 120 kg/m² (Außenplatte mit Agraffen befestigt)
U-Wert	0,12 W/(m²K) (ungestört) 0,15 W/(m²K) (nur Fassadenelement) 0,16 W/(m²K) (inkl. Fugen, Variante bündig) 0,18 W/(m²K) (inkl. Fugen, Variante Nut und Feder)
Brandklasse	A2
bewertetes Schalldämm-Maß (in Anlehnung an DIN EN ISO 10140-2)	$R_{w,P}$ = 47 dB (Außenplatte geklebt) $R_{w,P}$ = 56 dB (Außenplatte mit Agraffen befestigt)
Oberflächen	schalungsglatt gesäuert gewaschen Strukturmatrize Fotobeton etc.

Ökologische Daten

Gesamtumweltbelastung	27,7 % (nach relativem Bewertungsverfahren, siehe Kap. 5.3 Ökologische Betrachtung)
Treibhauspotential	34 kg CO_2-Äq/m² (entspricht 25 % einer energetisch gleichwertigen Stahlbeton-Vorhangfassade)
Gesamtprimärenergiebedarf	653 MJ/m² (entspricht 40% einer energetisch gleichwertigen Stahlbeton-Vorhangfassade)

Abb. 185 Technische und Ökologische Kennwerte des vaku[tex]-Fassadenelementes

kel durch die schlanken Wände erhöhen die Aufenthaltsqualität der Räumen, es resultieren höhere Tageslicht- und solare Wärmegewinne. Das Fassadenelement selbst ist langlebig, pflegeleicht und gleichmäßig hochwertig. Zudem kann der Textilbeton in der Deckschicht vielfältig in Form, Struktur und Farbe variiert werden, wie z. B. durch Zugabe von Pigmenten oder Aufbringen von Strukturen mittels gesäuerten Flächen oder Matrizen. Mögliche Plattendimensionen reichen von Kleinformaten bis zur Großtafelbauweise, selbst Elemente über zwei Geschosse sind bei statisch entsprechend bemessenen Textilbetonplatten denkbar.

Ausblick

Durch Rationalisierung der momentan händisch ausgeführten Produktion von vaku*tex* ließe sich bereits mittelfristig eine Voll- oder Teilautomatisierung der Herstellung, auch bei den Zulieferbetrieben, realisieren, was die Produktionskosten erheblich reduzieren würde. Eine bauaufsichtliche Zulassung des Elementes ist in der Folge sehr gut denkbar.

Mit dem Einsatz von vaku*tex* im Gebäudebestand lassen sich durch das ökologische und gestalterische Potential der Elemente neue Anwendungsgebiete erschließen: Derzeit fließen 40 % der in Deutschland eingesetzten Energie in die Bewirtschaftung von Bestandsgebäuden. Darüber hinaus sind in den vergangenen zehn Jahren die Heizkosten in Deutschland um 50 % gestiegen [Stat. BA, 2011], ein Zustand, der dringenden Handlungsbedarf im Bereich der energetischen Gebäudesanierung aufzeigt. Der Gesetzgeber ist daher bestrebt, die enormen energetischen Einsparpotentiale im Baubestand zu aktivieren. Bisher besitzen 70 bis 75 % aller Gebäudehüllen im Bestand noch keinen verbesserten Wärmeschutz. Bei einer jährlichen Modernisierungsrate von 1,1 %, wie sie sich derzeit zeigt, braucht es für die vollständige Modernisierung des Gebäudebestandes 65 -70 Jahre [IWU, 2010]. Hier besteht enormes Potential für Neuentwicklungen auf dem Dämmsektor, wie vaku*tex* sie bereits für Neubauten darstellt.

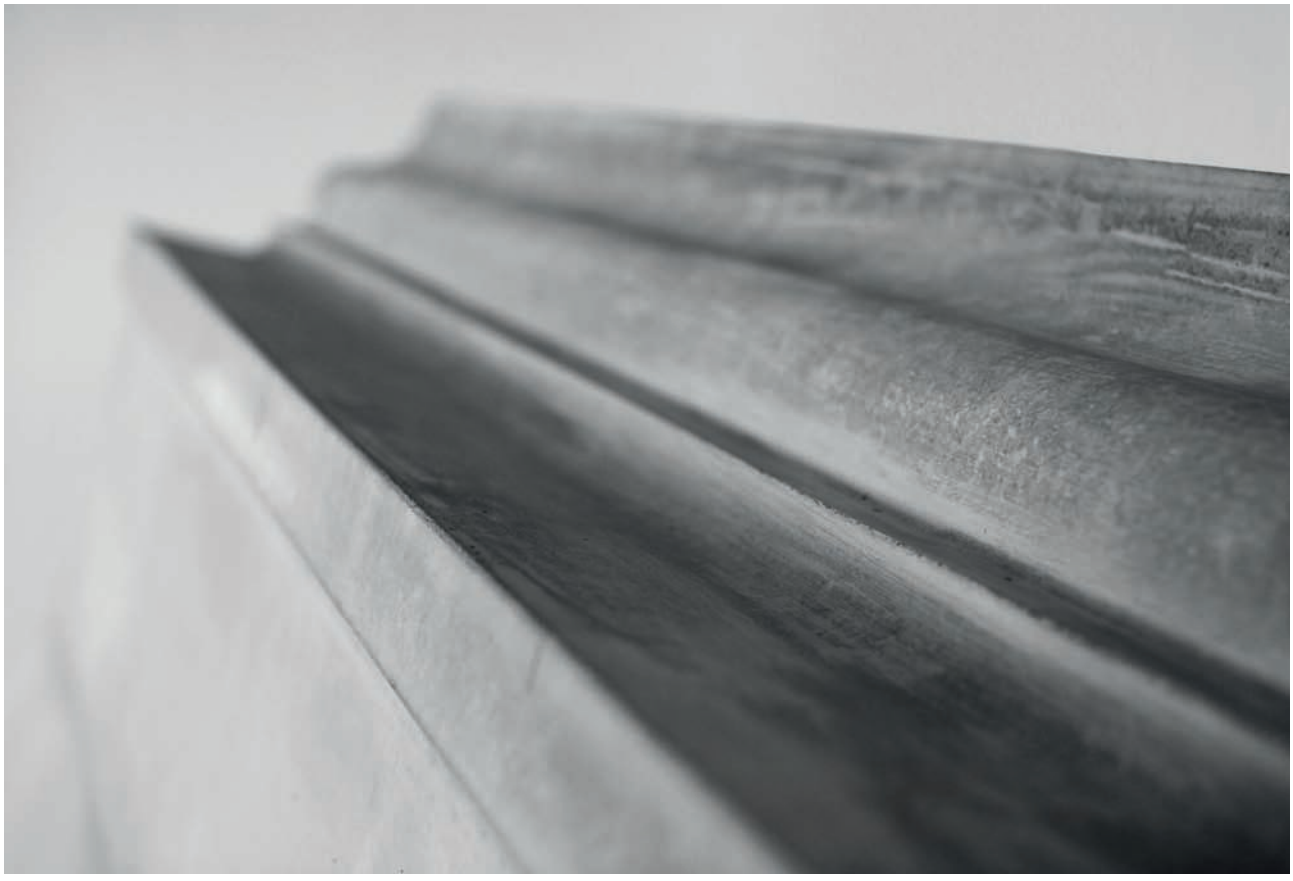


Abb. 186 Gesims aus Textilbeton

7. Verzeichnis

7.1 Literatur

BBSR, 2009
Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (2009). *Bericht zur Lage und Perspektive der Bauwirtschaft 2009*. Bonn. Aufgerufen am 20.03.2012 unter http://www.bbsr.bund.de/nn_21272/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/Sonderveroeffentlichungen/2009/DL__Bauwirtschaft2009,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/DL_Bauwirtschaft2009.pdf

BBSR, 2011
Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (2011). *Vakuumisolationspaneele (VIP) in der Baupraxis, Bd. 3*. Bonn

BetonMarketing, 2011
BetonMarketing Deutschland GmbH (2011). *Nachhaltiges Bauen mit Beton*. (2. Aufl. ed.). Erkrath

Bläsi, 2008
Bläsi, W. (2008). *Bauphysik* (7. Aufl. ed.). Haan-Gruiten: Europa-Lehrmittel

BMVBS, 2011a
Bundesministerium f. Verkehr, Bau u. Stadtentwicklung (2011). *Leitfaden Nachhaltiges Bauen*. Berlin

BMVBS, 2011b
Bundesministerium f. Verkehr, Bau u. Stadtentwicklung (2011). *Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen für Bundesgebäude (BNB) - Version 2011_1*: *Gewichtung und Bedeutungsfaktoren*. Abgerufen am 11.08.12 unter http://www.nachhaltigesbauen.de/bewertungssystem-nachhaltiges-bauen-fuer-bundesgebaeude-bnb/bnb-bewertungsmethodik.html

BMVBS, 2011c
Bundesministerium f. Verkehr, Bau u. Stadtentwicklung (2011). *Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen für Bundesgebäude (BNB). Version 2011_01: 1.2.2 Gesamtprimärenergiebedarf (PE_{ges}) und Anteil erneuerbarer Primärenergie (PE_e)*. Abgerufen am 11.08.12 unter http://www.nachhaltigesbauen.de/bewertungssystem-nachhaltiges-bauen-fuer-bundesgebaeude-bnb/bnb-buerogebaeude/steckbriefe-bnb-2011-1.html

Bonnen, 2010
Bonnen, C. u. a. (2010). *Monolithische Bauweise mit Infraleichtbeton*. Wien: Zement + Beton Handels- u. Werbeges.m.b.H.

BReg, 2012a
Deutsche Bundesregierung (2012). *Energiewende - Die Maßnahmen. Energie sparen und Wirkungsgrad erhöhen*. Abgerufen am 20.06.12 unter http://www.bundesregierung.de/Content/DE/StatischeSeiten/Breg/Energiekonzept/0-B%C3%BChne/ma%C3%9Fnahmen-im-ueberblick.html?nn=392516#doc133618bodyText7

BReg, 2012b
Deutschland Bundesregierung (2012). *Nationale Nachhaltigkeitsstrategie*. Fortschrittsbericht. Berlin: Presse- und Informationsamt der Bundesregierung.

Busch, 2009
Busch, J. (2009). *Schallschutz im Hochbau* - Vorlesungsskript. Leipzig: HTWK Leipzig [34]

Comfort, 2013
Comfort Holding GmbH (2013). *Marktbericht - Jahrbuch 2013*. Abgerufen am 25.04.2013 unter http://www.comfort.de/fileadmin/user_upload/pdf/broschueren/COMFORT-marktbericht-2013_web.pdf

DG HYP, 2012
Deutsche Genossenschafts-Hypothekenbank (2012). *Regionale Immobilienzentren Deutschland 2012 - Studie*. Abgerufen am 07.07.12 unter http://www.dghyp.de/fileadmin/media/dg_hyp_deutsch/downloads/broschueren_marktberichte/marktberichte/Regionale_Immobilienzentren_2012.pdf

DIW, 2010
Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (2010). *Strukturdaten zur Produktion und Beschäftigung im Baugewerbe – Berechnungen 2010*. Berlin

Ertl, 2006
Ertl, R. (2006). *Toleranzen kompakt - Bautabellen zur DIN 18202*. (1. Aufl. ed). Köln: Rudolf Müller

Fraunhofer, 2012
Fraunhofer Institut (2012). *Bauaufsichtliche Zulassungen und Prüfzeugnisse*. Abgerufen am 07.07.12 unter http://www.irb.fraunhofer.de/bzp/about.jsp

Gockell, 1964
Gockell, B. (1964). *Über die Verwendung von vorgehängten Fassaden (Curtain Walls) in Gestalterischer, konstruktiver und technischer Hinsicht*. Dissertation, Darmstadt

Hausladen, 2005
Hausladen, G. (2005). *ClimaDesign: Lösungen für Gebäude, die mit weniger Technik mehr können*. München: Callwey

Huhn, 2007
Huhn, J. (2007). *Wärmeübertragung* - Vorlesungsskript der LV Technische Thermodynamik. Dresden: Fakultät Maschinenwesen, Institut für Thermodynamik und Technische Gebäudeausrüstung

Hegger, 2008
Hegger, M. (2008). *Energie Atlas: Nachhaltige Architektur* (1. Aufl. ed.). Basel: Birkhäuser

Heinze, 2012
Heinze GmbH (2012). *Bauen in Deutschland 2011. Struktur, Entwicklung, Vergleich*. Celle

Herzog, 2004
Herzog u. a. (2004). *Fassaden Atlas* (1. Aufl. ed.). Basel: Birkhäuser

IWU, 2010
Institut Wohnen und Umwelt (2010). *Datenbasis Gebäudebestand* (1. Aufl. ed.). Darmstadt

Jesse, 2004
Jesse, F. (2004). *Tragverhalten von Filamentgarnen in zementgebundener Matrix*. Dissertation, TU Dresden

Knaack, 2007
Knaack, U. u. a. (2007). *Fassaden - Prinzipien der Konstruktion*. Basel: Birkhäuser

König, 2009
König, H. (2009). *Lebenszyklusanalyse in der Gebäudeplanung: Grundlagen, Berechnung, Planungswerkzeuge* (1. Aufl. ed.). München: Inst. für Int. Architektur-Dokumentation

Material Archiv, 2012
Material Archiv (2012). *GFK - Glasfaserverstärkter Kunststoff*. Abgerufen am 14.06.2012 unter http://www.materialarchiv.ch/#/detail/106/glasfaserverstaerkter-kunststoff

McEvedy, 1978
McEvedy, C. (1978). *Atlas of World Population History*. New York: Facts on File

Meijs, 2009
Meijs, M. u. a. (2009). *Bauteile und Verbindungen - Prinzipien der Konstruktion*. Basel: Birkhäuser

Moro, 2009
Moro, J. L. u. a (2009). *Baukonstruktion - vom Prinzip zum Detail, Band 2 - Konzeption*. Berlin: Springer

Munzinger, 2012
Munzinger Online (2012). Eintrag *Typologie*. Brockhaus - Enzyklopädie in 30 Bänden. (21. Aufl. ed.). Abgerufen am 11.06.12 unter http://www.munzinger.de/document/12022052811.

Musterbauordnung, 2008
Musterbauordnung (2008). §2 Abs. 2

Oberthür, 2000
Oberthür, S. u. a. (2000). *Das Kyoto-Protokoll*. Opladen: Leske + Budrich

PHI, 2012
Passivhaus Institut (2012). *Anforderungen – Zertifizierung von Wand- und Bausystemen*. Abgerufen am 22.06.12 unter http://www.passiv.de/downloads/03_zertifizierungskriterien_bausysteme.pdf

Radermacher, 2007
Radermacher, F. J. u. a. (2007). *Welt mit Zukunft - Überleben im 21. Jahrhundert* [Bericht an die Global Marshall Plan Initiative] (1. Aufl. ed.). Hamburg: Murmann

Rolfes, 2003
Rolfes, B. (2003) *Moderne Investitionsrechnung* (3. Aufl. ed.). München: Oldenbourg

Schober, 2011
Schober, K.-S. u. a. (2011). *Strategien der deutschen Bauwirtschaft: Chancen nutzen, Risiken meistern, Studie*. München

Schüle 2008
Schüle, R. (2008). *Grenzenlos Handeln? Emissionsmärkte in der Klima- und Energiepolitik*. (1. Aufl. ed.). München: oekom

SERI, 2010
Sustainable Europe Research Institute - SERI (2010). *Daten zur weltweiten Rohstoffentnahme 1980-2006*

Siemens, 2011
Siemens AG (2011). *German Green City Index - Studie*. Abgerufen am 05.07.12 unter http://www.siemens.com/entry/cc/features/greencityindex_international/all/de/pdf/report_german_gci.pdf

Sika, 2011
Sika Deutschland GmbH & Co. KG (2011). *SikaTack-Panel-System, Version Nr. 5*. Produktdatenblatt

Spitzner, 2009
Forschungsinstitut für Wärmeschutz e. V. (2009). *Rechnerische Bestimmung des Wärmebrückeneffektes an Vakuum-Wärmedämmelementen* [...] *Untersuchungsbericht: No. B3-08/09*. München

Sprengard, 2011
Sprengard, C. u. a. (2011). *Untersuchungen zu Alterung und Wärmebrücken bei Vakuum-Isolations-Paneelen (VIP) für Bauanwendungen*. Berlin: Ernst & Sohn

Staib, 2008
Staib, G. u. a. (2008). *Elemente + Systeme - Modulares Bauen: Entwurf, Konstruktion, neue Technologien* (1. Aufl. ed.). Basel: Birkhäuser

Stat. BA, 2011
Statistisches Bundesamt (2011). *Klassifikation der Verwendungszwecke des Individualverbrauchs (COICOP)*. Wiesbaden

Umweltbundesamt, 2010
Umweltbundesamt (2010). *Energieziel 2050: 100% Strom aus erneuerbaren Quellen*. Dessau-Roßlau. Abgerufen am 20.06.12 unter http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3997.pdf

UN, 2012
United Nations, Department of Economic and Social Affairs (2012). *World Urbanization Prospects: The 2011 Revision*. Abgerufen am 18.06.12 unter http://esa.un.org/unup/

UniCredit, 2012
UniCredit Bank (2012). *CO_2 ist noch nicht in der Sommerpause*. Abgerufen am 21.07.12 unter https://www.research.unicreditgroup.eu/DocsKey/economics_docs_2012_127876.ashx?KEY=C814QI31EjqIm_1zIJDBJOhXcaHx7fJ47LhpuFsS5g8%3D&EXT=pdf

WDV, 2011
Fachverband Wärmedämmverbundsysteme e.V. (2011). *Presse-Information*. Kaufering

Werner, 2009
Werner, U.-J. (2009). *Schallschutz und Raumakustik*. Berlin: Bauwerk

Würth, 2011
Adolf Würth GmbH & Co. KG (2011). *Dichtungsband VKP® Trio*. Produktdatenblatt, Ausgabe 05/11

ZAE, 2012
Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V. (2012). *Vakuumisolationspaneele*. Abgerufen am 14.06.12 unter http://www.vip-bau.de/d_pages/technik/vip/vip.htm

7.2 Abbildungen

Sämtliche Grafiken und Diagramme dieser Arbeit wurden für die Veröffentlichung grafisch aufbereitet. Wenn nicht anders vermerkt, liegen die Rechte aller Abbildungen beim ai:L Leipzig.

Abb. 1 auf Seite 007
Daten aus: McEvedy, C. *Atlas of World Population History*. (1978) & U.S. Census Bureau, International Data Base. *Population for the World*.

Abb. 5 auf Seite 017
Goldhahn, D. *Reichsgericht Leipzig*. (2005) http://img.dooyoo.de/DE_DE/orig/0/3/8/7/0/387048.jpg

Abb. 6 auf Seite 017
Siener, M. *Neue Nationalgalerie*. (2007) http://www.flickr.com/photos/manuelasiener/393480841/

Abb. 8 auf Seite 018
aus: Staib, G. u. a. *Elemente + Systeme - Modulares Bauen: Entwurf, Konstruktion, neue Technologien* (2008). S. 44

Abb. 11 auf Seite 019
Case, A. *Voronoi cell structures*. (2009) http://www.flickr.com/photos/caseorganic/3586092793/in/photostream/

Abb. 12 auf Seite 019
Morabito, I. *Real Flex by Ora-Ito*. (2011) http://www.contemporist.com/wp-content/uploads/2011/08/oraito_310811_03.jpg

Abb. 13 auf Seite 019
Breuckmann. *Bodymetrie & Life Science*. (2009) http://www.breuckmann.com/uploads/pics/bild_4_08.jpg

Abb. 14 auf Seite 020
TU Delft, nach Zeichnungen von Ronner, H. aus: Meijs, M. u. a. *Bauteile und Verbindungen - Prinzipien der Konstruktion*. (2009). S. 102/103

Abb. 16 auf Seite 022
TU Dresden

Abb. 17 auf Seite 022
TU Dresden

Abb. 18 auf Seite 023
TU Dresden

Abb. 20 auf Seite 024
Wacker Chemie. *Pyrogene Kieselsäure*. (2012)

Abb. 21 auf Seite 025
va-Q-tec. *Messung des Gasdruckanstiegs*. (2012) http://www.va-q-tec.com/de/Messung-Gasdruckanstieg-31.html

Abb. 22 auf Seite 025
ZAE Bayern. *Randeffekte im VIP*. (2012)

Abb. 23 auf Seite 027
Arthur Krüger GmbH. *Profile aus GFK*. (2012) http://www.arthur-krueger.de/html/img/pool/gfk_abz.jpg?sid=62320fa3993af7f8967d6c751a5a1ab1

Abb. 24 auf Seite 027
Deutscher Zukunftspreis. *Micronal PCM der BASF*. (2012) http://www.basf.com/group/corporate/de/function/conversions:/publish/content/news-and-media-relations/science-around-us/micronal/images/micronal-170x170.jpg

Abb. 25 auf Seite 028
aus: Bläsi, W. *Bauphysik*. (2008)

Abb. 26 auf Seite 031
aus: Hausladen, G. *Climadesign*. (2005)

Abb. 28 auf Seite 034
aus: *DIN EN ISO 14040:2009-11. Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen*. (2009)

Abb. 35 auf Seite 041
aus: Moro, J. L. u. a. *Baukonstruktion - vom Prinzip zum Detail, Band 3 - Umsetzung*. (2009). S. 277

Abb. 36 bis Abb. 41 auf Seite 043
aus: Knack, U. u. a. *Fassaden - Prinzipien der Konstruktion*. (2007)

Abb. 45 auf Seite 046
aus: Herzog u. a. *Fassaden Atlas* (1. Aufl. ed.). (2004). S. 33

Abb. 48 auf Seite 048
Medienfassade - Referenz 1: news.de. *Screenshot/YouTube*. (2012) http://www.news.de/gesellschaft/855281772/verrueckte-werbe-aktion-mercedes-schickt-unsichtbares-auto-durch-hamburg/1/

Medienfassade - Referenz 2: Massard, H. *Twists and turns*. (2007) http://webblick.de/twists_and_turns/twists_and_turns_indexEN.html

Ökologische Fassade - Referenz 1: blog.schoener-waers.de. *Moss Graffiti/Moss Stencil + Tutorial*. (2009) http://blog.schoener-waers.de/2009/02/18/moss-graffiti-moss-stencil-tutorial/

Ökologische Fassade - Referenz 2: Ceracasa. *Facade BIONICTILE grass*. (2011) http://www.flickr.com/photos/ceracasa/5903818401/

Klimatische Fassade - Referenz 1: Universität Stuttgart. *Gebäudeintegrierte Solarkollektoren*. (2012) http://www.baunetzwissen.de/standardartikel/Solar-Gebaeudeintegrierte-Solarkollektoren_2316819.html?img=6&layout=galerie

Klimatische Fassade - Referenz 2: Thyssen-Solartec. *Neue Thyssen-Fassade in Duisburg*. (2013) http://www.energieportal24.de/fachberichte_artikel_17.htm

Abb. 49 bis Abb. 52 ab Seite 049
Daten aus: United Nations, Dpt of Economic and Social Affairs. *World Urbanization Prospects: The 2011 Revision*. (2012) http://esa.un.org/unup/

Abb. 53 auf Seite 051
aus: Argentur für erneuerbare Energie. *Erneuerbare Energien 2020 - Potentialatlas Deutschland*. (2009). S. 39 http://www.unendlich-viel-energie.de/fileadmin/content/Wirtschaft/Potenziale/Potenzialatlas_2020_online.pdf

Abb. 65 auf Seite 058
Foto: Tobias Krettek, filmaton STUDIO

Abb. 90, Abb. 92 auf Seite 090
Foto: Tobias Krettek, filmaton STUDIO

Abb. 93 bis Abb. 98 auf Seite 091
Foto: Tobias Krettek, filmaton STUDIO

Abb. 85 bis Abb. 87 ab Seite 086
Daten aus: BauInfoConsult GmbH. *Fassadenmonitor 2012*. (2012).

Abb. 128 auf Seite 108
aus: Halfen GmbH & Co. KG. *Halfen Support Systems for Curtain Wall: Product Information - Technical*. (2006). S. 6 http://www.halfen.it/d/25_3122/de/media/catalogues/curtainwall/hcw-e.pdf

Abb. 177 auf Seite 129
aus: Bundesministerium f. Verkehr, Bau u. Stadtentwicklung. *Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen für Bundesgebäude (BNB). Version 2011_01: Gewichtung und Bedeutungsfaktoren*. (2011)

Abb. 186 auf Seite 142
Foto: Tobias Krettek, filmaton STUDIO

8. Anhang

8.1 Statische Bemessung

Brandenburgische Technische Universität Cottbus
Fakultät 2
Lehrstuhl Massivbau
Gastprof. Dr.-Ing. Frank Jesse

Statische Nachweise und Auslegung für Vakutex-Fassadenelemente

Aufsteller:

Lehrstuhl Massivbau
Brandenburgische Technische Universität Cottbus
Frank Jesse
Konrad-Wachsmann-Allee 2
03046 Cottbus

E massivbau@tu-cottbus.de

T +49 (0)355 69 28 24
F +49 (0)355 69 24 78

Auftraggeber:

energie design
Architektur-Institut Leipzig
Herr Alexander Kahnt
HTWK Leipzig
Karl-Liebknecht-Str. 132
04277 Leipzig

Diese Standsicherheitsberechnungen umfassen 29 Seiten.

Cottbus, den 17.8.2012

BTU Cottbus
Fakultät 2
LS Massivbau

Inhaltsverzeichnis

1 Erläuterung der Lastabtragung und des Nachweiskonzeptes 3

2 Bemessungsgrundlagen 4
2.1 Teilsicherheitsbeiwerte Einwirkungsseite nach DIN 1045-1 4
2.2 Lastannahmen 4
2.3 Bemessungswerte Feinbeton 6
2.4 Bemessungswerte textile Bewehrung 7
2.5 Bemessungswerte GFK (Rahmen) 7

3 Bemessung 9
3.1 Nachweis des vertikalen aussteifenden Doppel-T-Profils 9
3.2 Nachweis der Klebeverbindung 11
3.3 Äußere Textilbetonplatte horizontal 12
3.4 Innere Platte horizontal 14
3.5 Innere Platte vertikal 16
3.6 Äußere Textilbetonplatte vertikal 17
3.7 Vertikale C-Profile 19
3.8 Vertikale C-Profile für Elemente mit Fenster 22
3.9 Verankerung der Elemente an der Tragkonstruktion 25

4 Quellen 28

BTU Cottbus
Fakultät 2
LS Massivbau

Datum: 17.08.2012
Aufsteller: Frank Jesse

1 Erläuterung der Lastabtragung und des Nachweiskonzeptes

Innere und äußere Platte sind umlaufend am GFK-Rahmen aus Doppel-T-Profilen und zusätzlich in vertikaler Richtung mittig durch ein durchlaufendes Doppel-T-Profil miteinander verbunden. Die Variante ist nicht revisionierbar. Das Fassadenelement ist am oberen und unteren Rand durch je zwei randnahe Ankerpunkte mit der tragenden Struktur des Gebäudes (i.d.R. die Deckenplatten) verbunden. Im Regelfall sind die vier an einem Kreuzungspunkt zusammen stoßenden Fassadenelemente über Einbauelemente in der inneren Textilbetonplatte mit einer Stahlplatte verbunden, die die Lasten schließlich über eine in drei Raumachsen verstellbare Mechanik in die Tragkonstruktion einleitet. Die Stahlplatte ist oberflächenbündig mit der inneren Textilbetonplatte angeordnet. Zugkräfte zwischen Stahlplatte und innerer Textilbetonplatte werden durch stähleren Bolzen und spezielle Betondübel übertragen, Druckkräfte durch Flächenpressung. In der vorliegenden Form ist die Verbindung nicht vollständig zwängungsfrei, aber im Rahmen der prototypischen Entwicklung stellt dies eine akzeptable Lösung dar.

Betrachtet man die Abtragung der Vertikallasten, so ist das Element am oberen Rand an zwei Punkten statisch bestimmt aufgehängt. Für die Abtragung horizontaler Einwirkungen kann das Element als oben und unten an 4 Punkten gelenkig gelagert betrachtet werden.

Außen angreifende Windlasten werden von der äußeren Platte zunächst auf die umlaufenden GFK-Profile übertragen. Für die globale Ableitung der Windlasten zum oberen bzw. unteren Rand kann das Element als Verbundquerschnitt betrachtet werden. Für die Einleitung der Kräfte in die Ankerpunkte werden wieder lokale Betrachtungen erforderlich.

Der E-Modul der GFK-Profile ist mit dem des Betons nahezu identisch. Unterschiedliche E-Module brauchen daher bei der Ermittlung der Querschnittswerte nicht berücksichtigt werden.

Nachgewiesen werden folgende Details:

1. äußere Betonplatte
   horizontale Tragrichtung
      Risskriterium
      textile Bewehrung
      Querkrafttragfähigkeit
   vertikale Tragrichtung
      Risskriterium
      textile Bewehrung
2. innere Betonplatte
   horizontale Tragrichtung
      Risskriterium
      textile Bewehrung
      Querkrafttragfähigkeit
3. mittleres GFK-Profil
      Spannungsnachweise
4. umlaufendes GFK-Profil
      Spannungsnachweise
      Risskriterium in der äußeren Betonplatte in horizontaler Richtung infolge Windsog
5. Klebefugen
      Spannungsnachweise
6. Gesamtelement
      Verformungen

Als Beanspruchung werden in jeweils maßgebender Kombination berücksichtigt:
1. Eigengewicht
2. Winddruck und -sog
3. Horizontalkraft von innen (Ersatzlast)

BTU Cottbus
Fakultät 2
LS Massivbau

Winddruck wird nicht weiter verfolgt, da davon ausgegangen wird, dass dieser über Flächenpressung in der Fuge zwischen Fassadenschuh und innerer Platte aufgenommen wird.

2 Bemessungsgrundlagen

2.1 Teilsicherheitsbeiwerte Einwirkungsseite nach DIN 1045-1

$\gamma_{E.q} := 1.5$ $\gamma_{E.g} := 1.35$

2.2 Lastannahmen

2.2.1 Eigengewicht nach DIN 1045-1

Da die effektive Dichte der Bewehrung unter Berücksichtigung der Packungsdichte unter der des Betons liegt, wird für den Feinbeton das Eigengewicht wie folgt angenommen:

$$\gamma_{Feinbeton} := 22\frac{kN}{m^3}$$

2.2.2 Windlast nach DIN 1055-4

Annahmen nach Vorgabe des Auftraggebers:

- Gebäudehöhe bis 25 m
- Windzone II
- Binnenland (Mischprofil der Geländekategorie II und III

Bezugshöhe: $z_e := 25m$

Geschwindigkeitsdruck nach DIN 1055-4, Anh. A: $q_{ref} := 0.39\frac{kN}{m^2}$

Abmessungen des Fassadenelements:

Breite: $a_{Element} := 1.5m$ Höhe: $b_{Element} := 3.2m$

Ermittlung des Böengeschwindigkeitsdrucks nach DIN 1055-4, Gl. (11) für Binnenland (Mischprofil der Geländekategorie II und III):

für 7 m < z < 50 m: $q(z) := 1.7 \cdot q_{ref} \cdot \left(\frac{\frac{z}{m}}{10}\right)^{0.37}$ $q(z_e) = 0.931 \cdot \frac{kN}{m^2}$

Aerodynamischer Beiwert (konservative Annahme)

$A_F = a_{Element} \cdot b_{Element} = 1.5 \cdot m \cdot (3.2 \cdot m) = 1.5 \cdot m\,(3.2 \cdot m)$

$A_F = 4.8\,m^2$

Windsog: $c_{pe.1} := -1.7$ $c_{pe.10} := -1.3$ DIN 1055-4, Tab. 3, dort ungünstigste Werte

$$c_{pe} := c_{pe.1} + (c_{pe.10} - c_{pe.1})\log\left(\frac{A_F}{m^2}\right) = -1.428$$

BTU Cottbus
Fakultät 2
LS Massivbau

Seite: 5
Datum: 17.08.2012
Aufsteller: Frank Jesse

$$w_{e.s} := c_{pe} \cdot q(z_e) = -1.33 \cdot \frac{kN}{m^2}$$

Winddruck: $c_{pe.1} := 1.0$ $c_{pe.10} := 0.8$ DIN 1055-4, Tab. 3, dort ungünstigste Werte

$$c_{pe} := c_{pe.1} + (c_{pe.10} - c_{pe.1}) \log\left(\frac{A_F}{m^2}\right) = 0.864$$

$$w_{e.d} := c_{pe} \cdot q(z_e) = 0.80 \cdot \frac{kN}{m^2}$$

Tangentiale Windlast (Reibung durch vorbeiströmenden Wind)

$c_{fr} := 0.01$ für glatten Beton nach DIN 1055-4, Tab. 15

$A_{fr} := A_F = 4.8\,m^2$

$F_{fr} := c_{fr} \cdot q(z_e) \cdot A_{fr} = 44.7\,N$

Anmerkung: Windkräfte infolge Reibung können vernachlässigt werden.

2.2.3 Temperatureinwirkungen

Für die äußere Platte wird eine zwängungsfreie Lagerung angenommen. Lineare und nichtlineare Temperaturverläufe werden daher im folgenden nicht berücksichtigt.

DIN 1055-7:

6.2.3 Fassadenverkleidungen
(1) Wenn in einem Tragwerk verschiedene Formen der Fassadenverkleidung zur Anwendung kommen, so müssen die Unterschiede zwischen den Materialeigenschaften (wie Ausdehnungs- und Erwärmungsverhalten) erfasst werden.
(2) Bei der Bemessung der Fassadenverkleidung und deren Befestigungen sind sowohl die Schwankung der Außenlufttemperatur als auch die Sonneneinstrahlung zu berücksichtigen.

6.2.4 Ermittlung der Temperaturprofile
(1) Im Allgemeinen darf die minimale Außenlufttemperatur zu – 24 °C und die maximale Außenlufttemperatur zu + 37 °C angenommen werden. Zusätzliche Effekte aus der Sonneneinstrahlung sind zu berücksichtigen, wenn diese wesentlich sind.
(2) Für Gebäude, bei denen eine Berechnung notwendig wird, kann in der Regel eine konstante Temperaturverteilung in den Bauteilen vorausgesetzt werden.

Für die Längsausdehnung der äußeren Platte werden unter direkter Sonneneinstrahlung + 65 °C angenommen, da wesentlich für die maßgebenden Verformungen.

konstanter Temperaturanteil

Aufstelltemperatur:	$T_{ref} := 20 \cdot K$	
Temperatur (max):	$T_{max} := 65K$	(Temperatur äußere Platte unter direkter Sonneneinstrahlung)
Temperatur (min):	$T_{min} := -24K$	(Temperatur der äußeren Platte im Winter gleich Außenluft)

BTU Cottbus
Fakultät 2
LS Massivbau

$\Delta T_1 := T_{max} - T_{ref} = 45\,K$ bei Erwärmung

$\Delta T_2 := T_{ref} - T_{min} = 44\,K$ bei Abkühlung

$\Delta T_{max} := \Delta T_1 + \Delta T_2 = 89\,K$

linearer Ausdehnungskoeffizient: $\alpha_T := 10 \cdot 10^{-6} \cdot K^{-1}$ (Textilbeton, Schätzwert)

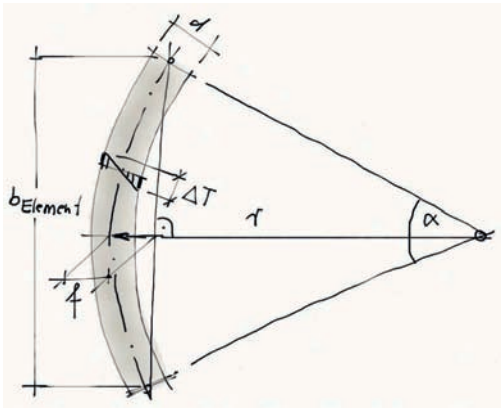
maximale Verlängerung:

$\Delta l_1 := \alpha_T \cdot \Delta T_1 \cdot b_{Element} = 1.44 \cdot mm$ bei Erwärmung

$\Delta l_2 := \alpha_T \cdot \Delta T_2 \cdot b_{Element} = 1.41 \cdot mm$ bei Abkühlung

$\Delta l_{max} := \Delta l_1 + \Delta l_2 = 2.85 \cdot mm$

Bei der angestrebten statisch bestimmten Lagerung und unter der Annahme, dass die verklebten GFK-Elemente einen kontinuierlichen -- wenn auch teilweise nicht-linearen -- Temperaturverlauf bewirken, entstehen keine nennenswerten Zwangsspannungen im System, aber entsprechende Verformung bzw. Verkrümmung der Elemente.



Temperaturdehnung infolge linearem Temperaturgradienten

$\varepsilon_{\Delta T} := \Delta T_1 \cdot \alpha_T = 4.5 \times 10^{-4}$

Abstand der Plattenebenen $d := 92.5mm$

Krümmungsradius infolge linearem Temperaturgradienten

$r := \frac{1}{\kappa}$ $r := \frac{d}{\varepsilon_{\Delta T}} = 206\,m$

Plattenverformung entspricht dem Stich des Krümmungskreises

$\alpha := atan\left(\frac{b_{Element}}{r}\right) = 0.016$

$f := r - r \cdot cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) = 6.23 \cdot mm$ $f_1 := \frac{f}{\Delta T_1} = 0.138 \cdot \frac{mm}{K}$ $f_{10} := f_1 \cdot 10K = 1.384 \cdot mm$

Wird im Sinne einer Grenzwertbetrachtung angenommen, dass sich bei einem Element bspw. aufgrund direkter Sonneneinstrahlung die maximale Außentemperatur von 65 ℃ erreicht wird, die Innenseite jedoch bei 20 ℃ verbleibt, ergibt sich aus dem linearen Temperaturgradienten ein Stich der sich einstellenden Krümmung von ca. 6 mm. Das ist jedoch praxisfern. Ansätze für anzunehmende Temperaturdifferenzen für benachbarte Elemente in einschlägigen Vorschriften sind nicht bekannt. Je 10 K Unterschied in den Temperaturdifferenzen ergibt sich eine Verformungsdifferenz von ca. 1,4 mm. Dies ist bei der Auswahl des Dichtwerkstoffs zu berücksichtigen.

2.3 Bemessungswerte Feinbeton

2.3.1 Druckfestigkeit

Für die Druckfestigkeit werden folgende Werte konservativ geschätzt:

$f_{ck} := 60 \frac{N}{mm^2}$ $\gamma_C := 1.5$ $f_{cd} := 0.85 \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_C} = 34 \cdot \frac{N}{mm^2}$

BTU Cottbus
Fakultät 2
LS Massivbau

Seite: 7
Datum: 17.08.2012
Aufsteller: Frank Jesse

2.3.2 Biegezugfestigkeit

Für den Feinbeton wird mit einem Mittelwert der Biegezugfestigkeit von ca. 10 N/mm², einem Variationskoeffizienten von 20 % ausgegangen. Unter Annahme einer Normalverteilung ist der Bemessungswert der Zugfestigkeit als 5 %-Quantil wie folgt:

$$f_{ctm} := 10\frac{N}{mm^2} \qquad COV_{ct} := 0.2 \qquad f_{ctk} := f_{ctm} - 1.65\cdot\left(COV_{ct}\cdot f_{ctm}\right) = 6.7\cdot\frac{N}{mm^2}$$

$$f_{ctd} := \frac{f_{ctk}}{\gamma_C} = 4.5\cdot\frac{N}{mm^2}$$

Bei Verwendung anderer Rezepturen mit abweichenden Biegezugfestigkeiten sind die Auswirkungen auf das Risskriterium zu berücksichtigen.

2.3.3 Elastizitätsmodul

$$E_{cm} := 28500\frac{N}{mm^2}$$

2.3.4 Wichte

$$\rho_{TRC} := 22\frac{kN}{m^3}$$

2.4 Bemessungswerte textile Bewehrung

Die textile Bewehrung besteht aus AR-Glas. Aufgrund der kurzen Belastungszeit bei Wind und Horizontalstoß wird die Abminderung infolge Dauerstandfestigkeit vernachlässigt. Der Einfluss der Dauerhaftigkeit wird pauschal mit einer Abminderung um 50 % berücksichtigt.

$$f_{ttk} := 1000\frac{N}{mm^2} \qquad \gamma_T := 1.5 \qquad \alpha_{dur} := 0.5 \text{ (Dauerhaftigkeit)} \qquad \alpha_{sus} := 1.0 \text{ (Dauerstandfestigkeit)}$$

$$f_{ttd} := \alpha_{dur}\cdot\alpha_{sus}\cdot\frac{f_{ttk}}{\gamma_T} = 333\cdot\frac{N}{mm^2}$$

Bei Druckbeanspruchung wird die textile Bewehrung vernachlässigt.

2.5 Bemessungswerte GFK (Rahmen)

Es wird das Bemessungskonzept der BÜV-Empfehlung TKB [BUEV-TKB:2010] angewandt:

$$\gamma_{GFK} := 1.2$$

Nach Herstellerangaben liegen folgende Informationen zu den GFK-Profilen vor (Mindestwerte = charakteristische Werte):

Zug parallel zur Faser $f_{GFK.tk} := 250\frac{N}{mm^2}$

Druck parallel zur Faser $f_{GFK.ck} := 150\frac{N}{mm^2}$

BTU Cottbus
Fakultät 2
LS Massivbau

Biegung

$$f_{GFK.bk.0.05} := 472\frac{N}{mm^2} - 2.18\cdot 20\frac{N}{mm^2} = 428\cdot\frac{N}{mm^2}$$

Werte nach [CTS748230877/1, S. 6f]

Querbiegung

$$f_{GFK.qbk} := 40\frac{N}{mm^2}$$

Elastizitätsmodul

$$E_{GFK} := 14000\frac{N}{mm^2}$$

Schub

$$f_{GFK.\tau k.0.05} := 27.9\frac{N}{mm^2} - 2.18\cdot 0.97\frac{N}{mm^2} = 25.8\cdot\frac{N}{mm^2}$$

Werte nach [CTS748230877/1, S. 8]

Die Beschränkung auf Kurzzeitbeanspruchung ergibt sich aus dem Fakt, dass die bemessungsrelevante Leiteinwirkung die Windböe von 2-4 Sekunden Dauer darstellt. Deshalb kann auf die Berücksichtigung von Dauerfestigkeitseinflüssen verzichtet werden. Es ergeben sich folgende Schätzwerte für die Bemessungsfestigkeiten von GFK:

$A_1 := 1.0$ Einfluss der Belastungsdauer (sehr kurze Einwirkungsdauer)

$A_2 := 1.3$ Medieneinfluss (Aufstellen im Freien)

$A_3 := 1.4$ Temperatureinfluss (Zeitweise 60 °C)

$$A_{mod} := A_1\cdot A_2\cdot A_3 = 1.82$$

$$f_{GFK.td} := \frac{f_{GFK.tk}}{\gamma_{GFK}\cdot A_{mod}} = 114\cdot\frac{N}{mm^2} \qquad f_{GFK.cd} := \frac{f_{GFK.ck}}{\gamma_{GFK}\cdot A_{mod}} = 69\cdot\frac{N}{mm^2}$$

$$f_{GFK.bd} := \frac{f_{GFK.bk.0.05}}{\gamma_{GFK}\cdot A_{mod}} = 196\cdot\frac{N}{mm^2} \qquad f_{GFK.\tau d} := \frac{f_{GFK.\tau k.0.05}}{\gamma_{GFK}\cdot A_{mod}} = 11.8\cdot\frac{N}{mm^2}$$

$$f_{GFK.qbd} := \frac{f_{GFK.qbk}}{\gamma_{GFK}\cdot A_{mod}} = 18.3\cdot\frac{N}{mm^2}$$

BTU Cottbus Fakultät 2 LS Massivbau	Seite: 9 Datum: 17.08.2012 Aufsteller: Frank Jesse

3 Bemessung

3.1 Nachweis des vertikalen aussteifenden Doppel-T-Profils

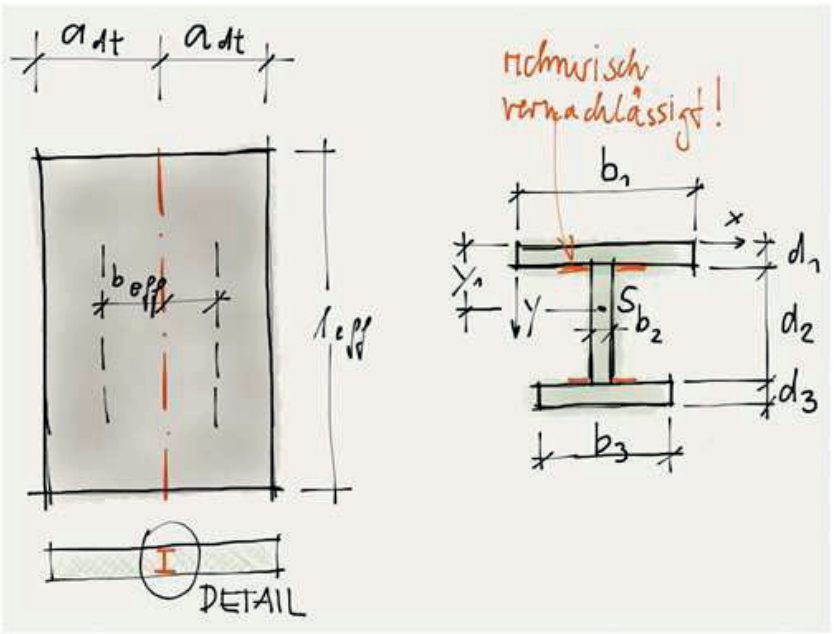
3.1.1 Querschnittswerte

$l_{eff} := b_{Element} = 3.2\,m$ $\quad d_{Platte.1} := 15mm$ $\quad d_{Platte.2} := 30mm$

mitwirkende Plattenbreite des Verbundquerschnitts in Anlehnung an DIN 1045-1:

$$b_{eff.1} := \min\left(l_{eff}\cdot 0.2, \frac{a_{Element}}{4}\right) = 0.375\,m$$

Stegabstände $a_{dt} := \frac{a_{Element}}{2} = 0.75\,m$ (1 vertikales Aussteifungselement)



$b_1 := 2b_{eff.1} = 0.75\,m$ $\quad d_1 := d_{Platte.1} = 0.015\,m$ $\quad A_1 := b_1 \cdot d_1 = 112.5\cdot cm^2$ $\quad I_{y1} := \frac{b_1 \cdot d_1^{\,3}}{12} = 21.1\cdot cm^4$

$b_2 := 2.8mm$ $\quad d_2 := 65mm$ $\quad A_2 := b_2 \cdot d_2 = 1.82\cdot cm^2$ $\quad I_{y2} := \frac{b_2 \cdot d_2^{\,3}}{12} = 6.41\cdot cm^4$

$b_3 := 2\cdot b_{eff.1} = 0.75\,m$ $\quad d_3 := d_{Platte.2} = 0.03\,m$ $\quad A_3 := b_3 \cdot d_3 = 225\cdot cm^2$ $\quad I_{y3} := \frac{b_3 \cdot d_3^{\,3}}{12} = 169\cdot cm^4$

Verbundquerschnitt:

$$A_G := A_1 + A_2 + A_3 = 0.034\,m^2$$

$$y_1 := \frac{A_1 \cdot \frac{d_1}{2} + A_2 \cdot \left(d_1 + \frac{d_2}{2}\right) + A_3 \cdot \left(d_1 + d_2 + \frac{d_3}{2}\right)}{A_G} = 65.7\cdot mm$$

$$y_{1s} := \frac{d_1}{2} - y_1 = -58.2\cdot mm \qquad y_{2s} := \left(d_1 + \frac{d_2}{2}\right) - y_1 = -18.2\cdot mm$$

$$y_{3s} := \left(d_1 + d_2 + \frac{d_3}{2}\right) - y_1 = 29.265\cdot mm$$

$$I_y := I_{y1} + A_1\cdot {y_{1s}}^2 + \left(I_{y2} + A_2\cdot {y_{2s}}^2\right) + \left(I_{y3} + A_3\cdot {y_{3s}}^2\right) = 5.9\times 10^3\cdot cm^4$$

$$W_o := \frac{I_y}{y_1} = 904.3\cdot cm^3 \qquad W_u := \frac{I_y}{\left(d_1 + d_2 + d_3 - y_1\right)} = 1343\cdot cm^3$$

$S_{12} := A_1\cdot\left(-y_{1s}\right) = 655.1\cdot cm^3$ Fuge äußere Platte - GFK

$S_{23} := A_3\cdot y_{3s} = 658.5\cdot cm^3$ Fuge innere Platte - GFK

3.1.2 Schnittgrößen

Belastung Winddruck/-sog als Flächenlast

$w_{e.s} = -1.328\cdot\frac{kN}{m^2}$ (Windsog maßgebend)

Bemessungsschnittgrößen GZT:

Belastung aus äußerer Textilbetonplatte als Mittelauflager eines 2-Feld-Trägers

$$V_{Platte.1} := -w_{e.s}\cdot 1.25 a_{dt} = 1.245\cdot\frac{kN}{m}$$

$$M_{Ek} := V_{Platte.1}\cdot\frac{{l_{eff}}^2}{8} = 1.59\cdot kN\cdot m \qquad V_{Ek} := V_{Platte.1}\cdot\frac{l_{eff}}{2} = 1.99\cdot kN$$

$$M_{Ed} := \gamma_{E.q}\cdot M_{Ek} = 2.39\cdot kN\cdot m \qquad V_{Ed} := \gamma_{E.q}\cdot V_{Ek} = 2.99\cdot kN$$

Belastung Eigengewicht der äußeren Platte

$$G_{Platte.1} := \rho_{TRC}\cdot a_{Element}\cdot b_{Element}\cdot d_{Platte.1} = 1.58\cdot kN$$

Bemessungsschnittgrößen GZT:

Belastung des Steges entsprechend der anteiligen Stegdicke näherungsweise 50 %.

$$N_{Ek.G1} := \gamma_{E.g}\cdot\frac{G_{Platte.1}}{2} = 1.07\cdot kN$$

3.1.3 Spannungsnachweise für GFK

Normalspannungen im GFK-Steg/Flansch sind irrelevant, da kleiner als Betonzugspannungen, siehe unten.

Querzugspannungen im Steg aus Windsog:

$\sigma_{Eqt} := \gamma_{E.q}\,1.25\left(-w_{e.s}\right)\cdot\frac{a_{dt}}{b_2} = 0.667\cdot\frac{N}{mm^2}$ $\frac{\sigma_{Eqt}}{f_{GFK.qbk}} = 0.017$ Nachweis erfüllt, aber nicht maßgebend.

BTU Cottbus Fakultät 2 LS Massivbau	Seite: 11 Datum: 17.08.2012 Aufsteller: Frank Jesse

Schubspannungen im Steg an äußerer Platte aus Biegung:

$$\tau_{12} := \frac{V_{Ed} \cdot S_{12}}{I_y \cdot b_2} = 11.8 \cdot \frac{N}{mm^2} \qquad \frac{\tau_{12}}{f_{GFK.\tau d}} = 1.00$$

Nachweis erfüllt, maßgebend für Stegbreite.

Schubspannungen im Steg an innerer Platte aus Biegung:

$$\tau_{23} := \frac{V_{Ed} \cdot S_{23}}{I_y \cdot b_2} = 11.8 \cdot \frac{N}{mm^2} \qquad \frac{\tau_{23}}{f_{GFK.\tau d}} = 1.00$$

Nachweis erfüllt, maßgebend für Stegbreite.

Schubspannungen im Steg aus Eigengewicht der äußeren Platte

$$\tau_{11} := \frac{N_{Ek.G1}}{b_{Element} \cdot b_2} = 0.119 \cdot \frac{N}{mm^2} \qquad \frac{\tau_{11}}{f_{GFK.\tau d}} = 0.01$$

Nachweis erfüllt, nicht maßgebend.

Anmerkung: Hinsichtlich der Schubspannungen sind Profile mit 3 mm Wandstärke als vertikale Aussteifung ausreichend.

Nicht geprüft werden konnte das Stegbeulen, da [Trumpf:2006] zwar Knickspannungslinien für GFK-Profile enthält, aber eben da ausdrücklich betont wird, dass diese nur für die dort untersuchten Laminate Gültigkeit besitzen.

Der Rechnung wurden über die gesamte Elementhöhe durchlaufende Aussteifungselemente zugrunde gelegt. Der Verbundquerschnitt erreicht aus Windlasten selbst im GZT nicht das Risskriterium der inneren oder äußeren Platte (lokale Lasteinleitung an den Aufhängepunkten der inneren Platte ausgenommen).

Bei nur abschnittsweiser Anordnung der Aussteifungselemente können die Ergebnisse vereinfacht wie folgt übertragen werden:

- Bezüglich der Schubspannungen können die Ergebnisse näherungsweise übernommen werden.
- Bezüglich der Querdruck- und Querzugspannungen im GFK und der Biegespannungen in der Betonplatte nähert sich die innere und äußere Platte mit zunehmender Unterbrechung der punktförmigen (ungünstigen) Lagerung an.
- Die erforderliche Querschnittsfläche steigt bei kürzeren Abschnitten an, in welchem Maße genau, kann mit den vereinfachten Berechnungen auf Basis von Stabstatik und Plattentafeln nicht ermittelt werden. Dazu muss das System auf innerer, äußerer Platte und verbindenden Stegabschnitten mit der FEM modelliert werden.

3.2 Nachweis der Klebeverbindung

Klebefuge mit einer zulässigen (Schub-)Spannung von $zul_\tau := 1 \frac{N}{mm^2}$

gewählte Flanschbreite $b_{12} := 35mm$

Schubspannungen aus Biegung infolge Windsog

$$\tau_{12} := V_{Ed} \cdot \frac{S_{12}}{I_y \cdot b_{12}} = 0.941 \cdot \frac{N}{mm^2}$$

Schubspannungen aus Eigengewicht der äußeren Textilbetonplatte

$$\tau_{11} := \frac{N_{Ek.G1}}{b_{Element} \cdot b_{12}} = 0.01 \cdot \frac{N}{mm^2}$$

(praktisch vernachlässigbar)

Zugspannungen infolge Windsog

$$\sigma_{11} := \frac{V_{Platte.1}}{b_{12}} = 0.036 \cdot \frac{N}{mm^2}$$ (praktisch vernachlässigbar)

Spannungsnachweis

$$\frac{\tau_{12}}{1\,\frac{N}{mm^2}} = 0.94$$ Nachweis erfüllt, maßgebend für Festigkeit der Klebefuge bzw. Flanschbreite.

3.3 Äußere Textilbetonplatte horizontal

3.3.1 Geometrie

Die äußere Textilbetonplatte trägt in horizontaler Richtung als 2-Feld-Träger. Sie ist auf den GFK-Profilen aufgelagert und wird für Windsog bemessen. Winddruck ist nicht maßgebend. Bemessung erfolgt am 1-m-Streifen.

$$l := \frac{a_{Element}}{2} = 0.75\,m \qquad d_{Platte.1} := 15mm \qquad b := 1m$$

$$W := \frac{b \cdot d_{Platte.1}^{\,2}}{6} = 37.5 \cdot cm^3$$

3.3.2 Schnittgrößen

Belastung aus Winddruck/-sog als Flächenlast

$$w_{e.s} = -1.328 \cdot \frac{kN}{m^2}$$

Belastung aus äußerer Textilbetonplatte als Mittelauflager eines 2-Feld-Trägers

$$M_{Ek} := -w_{e.s} \cdot 0.125 \cdot b \cdot l^2 = 0.0934 \cdot kN \cdot m$$

$$M_{Ed} := \gamma_{E.q} \cdot M_{Ek} = 0.140 \cdot kN \cdot m$$

$$V_{Ek} := -w_{e.s} \cdot 0.625 \cdot b \cdot l = 0.623 \cdot kN$$

$$V_{Ed} := \gamma_{E.q} \cdot V_{Ek} = 0.934 \cdot kN$$

3.3.3 Nachweis Biegung im GZG

Maßgebend für den Nachweis des Risskriteriums ist das Stützmoment am 2-Feld-Träger.

$$\sigma_{ct} := \frac{M_{Ed}}{W} = 3.736 \cdot \frac{N}{mm^2} \qquad \frac{\sigma_{ct}}{f_{ctd}} = 0.836$$ Nachweis erfüllt, Risskriterium nicht erreicht.

Anmerkung: Der Nachweis der Rissfreiheit gelingt auf dem Niveau eines Tragfähigkeitsnachweises (unter Vernachlässigung von Zwangeinwirkungen, die aber horizontal vernachlässigbar sind).

BTU Cottbus Fakultät 2 LS Massivbau	Seite: 13 Datum: 17.08.2012 Aufsteller: Frank Jesse

Trotzdem wird im folgenden Abschnitt entsprechend den Grundlagen der DIN 1045-1 eine Biegezugbewehrung bemessen.

3.3.4 Bemessung für Biegung im GZT

Geometriewerte: $d_1 := 7.5mm$ (Lage der äußeren Bewehrung)

$h := 15mm$ (äußere Platte)

$d := h - d_1 = 7.5 \times 10^{-3} m$

$b := 1m$ (Bemessung am 1-m-Plattenstreifen)

$l_{eff} := \frac{a_{Element}}{2} = 0.75\,m$ (Fassade in horizontaler Richtung)

Schnittgrößen: $M_{Ed} = 0.14 \cdot kN \cdot m$ (Stützmoment 2-Feld-Träger)

$V_{Ed} = 0.934 \cdot kN$ (Querkraft 2-Feld-Träger)

Bemessung: $M_{Eds} := M_{Ed}$ (keine Normalkraft)

$\mu_{Eds} := \frac{M_{Eds}}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = 0.073$

$z := \left(1 - 0.6 \cdot \mu_{Eds}\right) \cdot d = 7.17 \cdot mm$ [Quast, BUST 97 (2002), S. 576-583]

$erf_A_t := \frac{1}{f_{ttd}} \cdot \left(\frac{M_{Eds}}{z}\right) = 59 \cdot mm^2$

Bei AR-Glas mit 1100 tex $A_{t1} := \frac{2400 \frac{g}{km}}{2.74 \frac{g}{cm^3}} = 0.876 \cdot mm^2$

$erf_a_{t1} := 1m \cdot \frac{A_{t1}}{erf_A_t} = 14.943 \cdot mm$

gewählt: 1 Lage Textil mit 2400 tex AR-Glas, beschichtet, mit Achsabstand a.t1 < 15 mm.

Anmerkung: Bei Wahl einer Carbonbewehrung würde sich ein geringerer Bewehrungsmenge ergeben, allerdings ist ohnehin mindestens eine Lage Bewehrung erforderlich.

3.3.5 Nachweis Querkraft im GZT

Nachweis erfolgt in Anlehnung nach DIN EN 1992-1, da für Textilbeton keine spezifischen Nachweise vorliegen.

$\kappa := \min\left(2,1 + \sqrt{\frac{200}{\frac{d}{mm}}}\right) = 2$ $\eta_1 := 1.0$ $\rho_l := \min\left(0.02, \frac{erf_A_t}{b \cdot d}\right) = 0.0078$

BTU Cottbus
Fakultät 2
LS Massivbau

$$V_{Rd.c} := \left[\frac{0.15}{\gamma_C}\cdot\kappa\cdot\eta_1\cdot\left(100\cdot\rho_l\cdot\frac{f_{ck}}{\frac{N}{mm^2}}\right)^{\frac{1}{3}}\right] b\cdot d\cdot\frac{N}{mm^2} = 5.41\cdot kN$$

$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd.c}} = 0.173$ Nachweis erfüllt, nicht maßgebend.

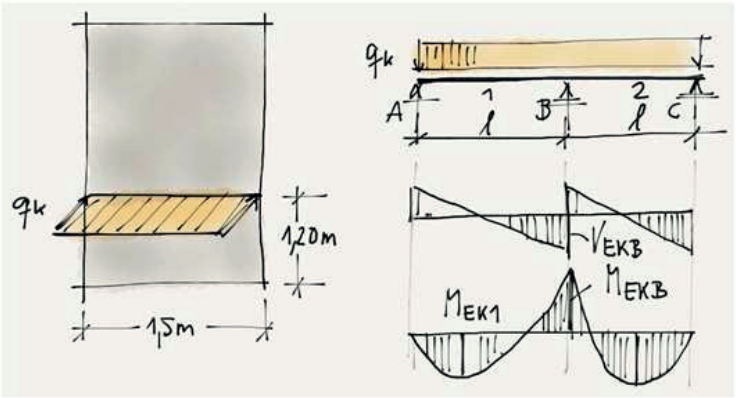
3.4 Innere Platte horizontal

3.4.1 Horizontallast nach DIN EN 1991-1-2, 6.4

DIN EN 1991-1-2, 6.4 nennt Horizontallasten auf Zwischenwände und Absturzsicherungen. Es ist eine horizontale Streckenlast in einer Höhe bis zu 1,20 m anzusetzen. Nach Tabelle 6.12DE ist für die Nutzungskategorien A und B1 q.k = 0,5 kN/m, für B2, B3, C1-C4 q.k = 1 kN/m anzusetzen.

Nach DIN EN 1991-1-7 sind in Hochbauten ohne Fahrzeugverkehr keine Anpralllasten als außergewöhnliche Einwirkungen anzusetzen.

Die Horizontalkraft q.k = 1,0 kN/m wird in Höhe 1,20 m über OK Fußboden angesetzt.



3.4.2 Schnittgrößen

$q_k := 1.0\frac{kN}{m}$ $l := \frac{a_{Element}}{2} = 0.75\,m$ $x := 0.5\cdot l = 0.375\,m$ $t_y := 0.05$

Lastverteilungsbreite bei einachsig gespannter Platte nach DAfStb-Heft 240.

$b_{eff.1} := 1.04\cdot l = 0.78\,m$ (im Feld)

$b_{eff.B} := 0.65\cdot l = 0.488\,m$ (Stütze)

$b_{eff.V} := 0.05m + 0.3\cdot x = 0.162\,m$ (Querkraft an der Mittelstütze)

$M_{Ek.1} := q_k\cdot\frac{l^2}{8}\cdot\frac{1m}{b_{eff.1}} = 0.090\cdot kN\cdot m$ (Moment im Randfeld, Last im Randfeld)

$M_{Ek.B} := q_k\cdot 0.125\cdot l^2\cdot\frac{1m}{b_{eff.B}} = 0.144\cdot kN\cdot m$ (Stützmoment am 2-Feld-Träger, Volllast)

BTU Cottbus
Fakultät 2
LS Massivbau

Seite: 15
Datum: 17.08.2012
Aufsteller: Frank Jesse

$V_{Ek.B} := q_k \cdot 1.25 \cdot l = 0.938 \cdot kN$ (Stützkraft am 2-Feld-Träger, Volllast)

3.4.3 Nachweis Biegung im GZG

Geometriewerte: $h := 30mm$ (innere Platte)

$b := b_{eff.B} = 0.488\,m$ (innere Platte, Biegung Stützquerschnitt)

$W := \frac{b \cdot h^2}{6} = 73.1 \cdot cm^3$

Spannungsnachweis: $\sigma := \frac{M_{Ek.B}}{W} = 1.97 \cdot \frac{N}{mm^2}$ $\frac{\sigma}{f_{ctd}} = 0.442$ Nachweis erfüllt, Risskriterium nicht erreicht.

3.4.4 Bemessung für Biegung im GZT

Beanspruchung:

$M_{Ed.B} := \gamma_{E.q} \cdot M_{Ek.B} = 0.216 \cdot kN \cdot m$ (Stützmoment am 2-Feld-Träger, Volllast)

Geometriewerte: $h := 30mm$

$d_1 := 15mm$ (mittige Lage der Bewehrung)

$d := h - d_1 = 0.015\,m$

$b := b_{eff.B} = 0.488\,m$ einschnürende Wirkung der Streckenlast

Biegebemessung: $M_{Eds} := M_{Ed} = 0.14 \cdot kN \cdot m$

$\mu_{Eds} := \frac{M_{Eds}}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = 0.038$

$z := \left(1 - 0.6 \cdot \mu_{Eds}\right) \cdot d = 14.7 \cdot mm$

$erf_A_t := \frac{1}{f_{ttd}} \cdot \left(\frac{M_{Eds}}{z}\right) = 28.7 \cdot mm^2$

Bei AR-Glas mit 1100 tex $A_{t1} := \frac{2400 \frac{g}{km}}{2.74 \frac{g}{cm^3}} = 0.876 \cdot mm^2$

$erf_a_{t1} := 1m \cdot \frac{A_{t1}}{erf_A_t} = 30.6 \cdot mm$

gewählt: 1 Lage Textil mit 2400 tex AR-Glas, sekundärbeschichtet, mit Achsabstand a.t1 < 30 mm.

3.4.5 Nachweis Querkraft im GZT

Beanspruchung: $V_{Ed} := \gamma_{E.q} \cdot V_{Ek.B} = 1.406 \cdot kN$

Geometriewerte: $b := b_{eff.V} = 0.162\,m$ einschnürende Wirkung der Streckenlast

sonst wie 3.3.4

Nachweis: $\kappa := \min\left(2,1 + \sqrt{\frac{200}{\frac{d}{mm}}}\right) = 2$ $\eta_1 := 1.0$ $\rho_l := \min\left(0.02, \frac{erf_A_t}{b \cdot d}\right) = 0.0118$

$$V_{Rd.ct} := \left[\frac{0.15}{\gamma_C} \cdot \kappa \cdot \eta_1 \cdot \left(100 \cdot \rho_l \cdot \frac{f_{ck}}{\frac{N}{mm^2}}\right)^{\frac{1}{3}}\right] b \cdot d \cdot \frac{N}{mm^2} = 2.01 \cdot kN$$

$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd.ct}} = 0.698$ Nachweis erfüllt.

3.5 Innere Platte vertikal

3.5.1 Schnittgrößen

In vertikaler Richtung besteht das wirksame Tragsystem aus einem Verbundquerschnitt (innere, äußere Textilbetonplatte und GFK-Stege). Global betrachtet handelt es sich um einen 1-Feld-Träger, der am oberen und unteren Rand mit der tragenden Konstruktion des Gebäudes verbunden ist. Als Belastung sind Windbeanspruchung und Horizontallast wesentlich für die Bemessung.

Die innere Textilbetonplatte wird bei Windsog und bei der horizontalen Stoßbelastung zum Druckflansch des Verbundquerschnitts. Dieser Fall ist nicht maßgebend und wird nicht nachgewiesen.

Bei Winddruck wird die innere Platte zum Zugflansch des Verbundquerschnitts. Dieser Fall ist wegen der Rissgefahr und der notwendigen Bewehrung maßgebend für die Bemessung und wird im Folgenden betrachtet.

Geometrie

$l := b_{Element} = 3.2\,m$ $W_u = 1343 \cdot cm^3$ (aus Abschn. 3.1.1)

mitwirkende Plattenbreite des Verbundquerschnitts in Anlehnung an DIN 1045-1:

$b_{eff.1} := \min\left(l \cdot 0.2, \frac{a_{Element}}{4}\right) = 0.375\,m$ $b_{eff} := 2 \cdot b_{eff.1} = 0.75\,m$

Beanspruchung: $w_{e.d} = 0.804 \cdot \frac{kN}{m^2}$ Winddruck maßgebend

$q := w_{e.d} \cdot 1.25 \cdot \frac{a_{Element}}{2} = 0.754 \cdot \frac{kN}{m}$ aus Stützkraft am 2-Feld-Träger als Linienlast auf Doppel-T-Profil

$M_{Ek} := q \cdot \frac{l^2}{8} = 0.96 \cdot kN \cdot m$ Feld-Moment am 1-Feld-Träger

$M_{Ed} := \gamma_{E.q} \cdot M_{Ek} = 1.45 \cdot kN \cdot m$

3.5.2 Nachweis Biegung GZG

BTU Cottbus
Fakultät 2
LS Massivbau

Seite: 17
Datum: 17.08.2012
Aufsteller: Frank Jesse

$\sigma_{ct} := \frac{M_{Ed}}{W_u} = 1.08 \cdot \frac{N}{mm^2}$ $\frac{\sigma_{ct}}{f_{ctd}} = 0.241$ Nachweis erfüllt, Risskriterium nicht erreicht.

Anmerkung: Nachweis gelingt auf dem Niveau eines Tragsicherheitsnachweises.

3.5.3 Bemessung Biegung GZT

Geometriewerte:

$h := 110mm$

$d_1 := 15mm$ (mittige Lage der Bewehrung)

$d := h - d_1 = 0.095\,m$

$b := b_{eff} = 0.75\,m$

Biegebemessung:

$M_{Eds} := M_{Ed} = 1.45 \cdot kN \cdot m$

$\mu_{Eds} := \frac{M_{Eds}}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = 0.00629$

$z := \left(1 - 0.6 \cdot \mu_{Eds}\right) \cdot d = 94.6 \cdot mm$

$erf_A_t := \frac{1}{f_{ttd}} \cdot \left(\frac{M_{Eds}}{z}\right) = 45.9 \cdot mm^2$

Bei AR-Glas mit 1100 tex $A_{t1} := \frac{2400 \frac{g}{km}}{2.74 \frac{g}{cm^3}} = 0.876 \cdot mm^2$

$erf_a_{t1} := 1m \cdot \frac{A_{t1}}{erf_A_t} = 19.1 \cdot mm$

gewählt: 1 Lage Textil mit 2400 tex AR-Glas, sekundärbeschichtet, mit Achsabstand a.t1 < 19 mm.

3.5.4 Nachweis Querkraft im GZT

Entfällt, da in die GFK-Profile die Abtragung der Querkräfte übernehmen.

3.6 Äußere Textilbetonplatte vertikal

In vertikaler Richtung wird die äußere Textilbetonplatte als Zug- bzw. Druckgurt des Verbundquerschnitts beansprucht. Für die maßgebende Zugbeanspruchung muss die Beanspruchung unter Windsog und der im Inneren angreifenden Horizontallast angesetzt werden. Maßgebend ist der Bereich des mittleren Aussteifungsprofils.

3.6.1 Geometrie

$l := b_{Element} = 3.2\,m$

mitwirkende Plattenbreite des Verbundquerschnitts in Anlehnung an DIN 1045-1:

$b_{eff.1} := \min\left(l \cdot 0.2, \frac{a_{Element}}{4}\right) = 0.375\,m$ $b_{eff} := 2 \cdot b_{eff.1} = 0.75\,m$

BTU Cottbus
Fakultät 2
LS Massivbau

$W_o = 904 \cdot cm^3$

3.6.2 Schnittgrößen

aus Wind:

$q := -w_{e.s} \cdot 1.25 \cdot \frac{a_{Element}}{2} = 1.25 \cdot \frac{kN}{m}$ $A_w := q \cdot \frac{l}{2} = 1.99 \cdot kN$

$M_{Ek.w} := q \cdot \frac{l^2}{8} = 1.59 \cdot kN \cdot m$ $M_{Ek.w}(x) := A_w \cdot x - q \cdot \frac{x^2}{2}$ $M_{Ek.w}\left(\frac{l}{2}\right) = 1.59 \cdot kN \cdot m$

$V_{Ek.w} := A_w = 1.99 \cdot kN$

aus Horizontallast: $V_{Ek.B} = 0.938 \cdot kN$ bei $x := 1m$ $A_Q := V_{Ek.B} \cdot \frac{x}{l} = 0.293 \cdot kN$

$M_{Ek.Q} := V_{Ek.B} \cdot \frac{x \cdot (l - x)}{l} = 0.645 \cdot kN \cdot m$ $M_{Ek.Q}(x) := A_Q \cdot x$ $M_{Ek.Q}\left(\frac{l}{2}\right) = 0.469 \cdot kN \cdot m$

$V_{Ek.Q} := V_{Ek.B} \cdot \frac{l - x}{l} = 0.645 \cdot kN$

Einwirkungskombinationen GZT:

$M_{Ed.1}(x) := \gamma_{E.q} \cdot \left(M_{Ek.w}(x) + 0.6 \cdot M_{Ek.Q}(x)\right)$ Wind als Leiteinwirkung

$M_{Ed.2}(x) := \gamma_{E.q} \cdot \left(M_{Ek.Q}(x) + 0.7 \cdot M_{Ek.w}(x)\right)$ Horizontalkraft als Leiteinwirkung

$M_{Ed.1}\left(\frac{l}{2}\right) = 2.81 \cdot kN \cdot m$ maßgebend für Bemessung

$M_{Ed.2}\left(\frac{l}{2}\right) = 2.38 \cdot kN \cdot m$ nicht maßgebend für Bemessung

3.6.3 Nachweis Biegung im GZG

$\sigma_{außen} := \frac{M_{Ed.1}(0.5 \cdot l)}{W_o} = 3.11 \cdot \frac{N}{mm^2}$ $\frac{\sigma_{außen}}{f_{ctk}} = 0.464$ Nachweis erfüllt, Risskriterium nicht erreicht.

Anmerkung: Nachweis der Rissefreiheit gelingt auf dem Niveau eines Tragsicherheitsnachweises.

3.6.4 Nachweis Verformungen im GZG

Verformungen des maßgebenden Aussteifungsprofils in Feldmitte:

$M_{Ed.rare} := M_{Ek.w}(0.5 \cdot l) = 1.59 \cdot kN \cdot m$

Innere Betonplatte bleibt nach 3.7.3 ungerissen, daher Verformungsberechnung mit Steifigkeiten des Zustand I:

$\omega := \frac{5}{384} \cdot \frac{q \cdot l^4}{E_{cm} \cdot I_y} = 1.00 \cdot mm$ $\frac{l}{\omega} = 3188$

Anmerkung: Die Verformungen liegen mit l/3188 weit im zulässigen Bereich. Bei abwechselndem Windsog

BTU Cottbus Fakultät 2 LS Massivbau	Seite: 19 Datum: 17.08.2012 Aufsteller: Frank Jesse

und -druck "flattert" die Fassade um etwa 1 bis 2 mm.

3.6.5 Bemessung für Biegung im GZT

Geometriewerte:

$h := 100mm$

$d_1 := 7.5mm$ (mittige Lage der Bewehrung)

$d := h - d_1 = 0.093m$

$b := b_{eff} = 0.75m$

Biegebemessung:

$M_{Eds} := M_{Ed.1}(0.5 \cdot l) = 2.81 \cdot kN \cdot m$

$$\mu_{Eds} := \frac{M_{Eds}}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = 0.013$$

$z := \left(1 - 0.6 \cdot \mu_{Eds}\right) \cdot d = 91.8 \cdot mm$

$$erf_A_t := \frac{1}{f_{ttd}} \cdot \left(\frac{M_{Eds}}{z}\right) = 91.9 \cdot mm^2$$

Bei AR-Glas mit 1100 tex $A_{t1} := \dfrac{2400 \frac{g}{km}}{2.74 \frac{g}{cm^3}} = 0.876 \cdot mm^2$

$$erf_a_{t1} := 1m \cdot \frac{A_{t1}}{erf_A_t} = 9.5 \cdot mm$$

gewählt: 1 Lage Textil mit 2400 tex AR-Glas, sekundärbeschichtet mit Achsabstand a.t1 < 9mm.

alternativ 2 Lagen mit Achsabstand a.t1 < 18 mm

Bemerkungen:
Aufgrund des Bewehrungsgrades scheint die Verwendung einer Carbon-Bewehrung eine sinnvolle Alternative. Dann kann auf eine zweilagige Bewehrung verzichtet werden.

3.6.6 Nachweis Querkraft im GZT

Entfällt, da die GFK-Profile die Abtragung der Querkräfte übernehmen.

3.7 Vertikale Doppel-T-Profile

Durch die kontinuierliche Verklebung mit den Textilbetonplatten kann von einem Verbundquerschnitt ausgegangen werden. Da der E-Modul der GFK-Elemente nicht genau bekannt ist, aber offenbar dem Beton weitgehend gleicht, wird für die Berechnung vereinfachend ein homogener Querschnitt zugrunde gelegt.

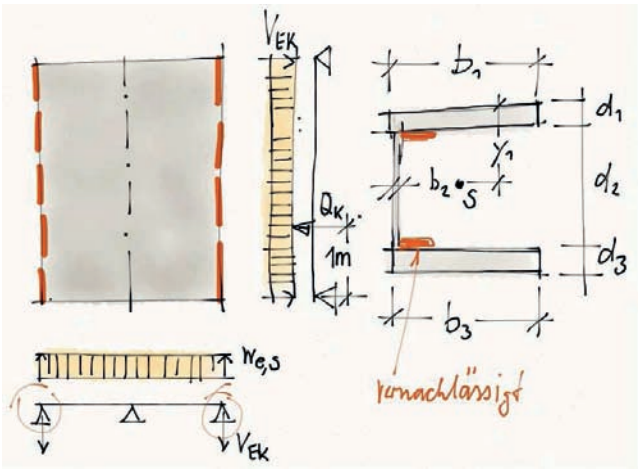
3.7.1 Querschnittswerte

$l_{eff} := b_{Element} = 3.2m$ $\quad d_{Platte.1} = 15 \cdot mm$ $\quad d_{Platte.2} = 30 \cdot mm$

mitwirkende Plattenbreite des Verbundquerschnitts in Anlehnung an DIN 1045-1:

$$b_{eff.1} := \min\left(l_{eff} \cdot 0.2, \frac{a_{Element}}{4}\right) = 0.375m$$

BTU Cottbus
Fakultät 2
LS Massivbau



$b_1 := b_{eff.1} = 0.375\,m$ $\quad d_1 := d_{Platte.1} = 0.015\,m$ $\quad A_1 := b_1 \cdot d_1 = 56.25 \cdot cm^2$ $\quad I_{y1} := \frac{b_1 \cdot d_1^3}{12} = 10.547 \cdot cm^4$

$b_2 := 1.6mm$ $\quad d_2 := 65mm$ $\quad A_2 := b_2 \cdot d_2 = 1.04 \cdot cm^2$ $\quad I_{y2} := \frac{b_2 \cdot d_2^3}{12} = 3.66 \cdot cm^4$

$b_3 := b_{eff.1} = 0.375\,m$ $\quad d_3 := d_{Platte.2} = 0.03\,m$ $\quad A_3 := b_3 \cdot d_3 = 112.5 \cdot cm^2$ $\quad I_{y3} := \frac{b_3 \cdot d_3^3}{12} = 84.375 \cdot cm^4$

Verbundquerschnitt:

$$A_G := A_1 + A_2 + A_3 = 0.017\,m^2$$

$$y_1 := \frac{A_1 \cdot \frac{d_1}{2} + A_2 \cdot \left(d_1 + \frac{d_2}{2}\right) + A_3 \cdot \left(d_1 + d_2 + \frac{d_3}{2}\right)}{A_G} = 65.7 \cdot mm$$

$$y_{1s} := \frac{d_1}{2} - y_1 = -58.2 \cdot mm \qquad y_{2s} := \left(d_1 + \frac{d_2}{2}\right) - y_1 = -18.2 \cdot mm$$

$$y_{3s} := \left(d_1 + d_2 + \frac{d_3}{2}\right) - y_1 = 29.279 \cdot mm$$

$$I_y := I_{y1} + A_1 \cdot y_{1s}^2 + \left(I_{y2} + A_2 \cdot y_{2s}^2\right) + \left(I_{y3} + A_3 \cdot y_{3s}^2\right) = 3 \times 10^3 \cdot cm^4$$

$$W_o := \frac{I_y}{y_1} = 452.4 \cdot cm^3 \qquad W_u := \frac{I_y}{\left(d_1 + d_2 + d_3 - y_1\right)} = 671 \cdot cm^3$$

$S_{12} := A_1 \cdot \left(-y_{1s}\right) = 327 \cdot cm^3$ Fuge äußere Platte - GFK bzw. Steg

$S_{23} := A_3 \cdot y_{3s} = 329 \cdot cm^3$ Fuge innere Platte - GFK bzw. Steg

3.7.2 Schnittgrößen

Auflagerkraft der äußeren Platte als Randauflager 2-Feld-Träger aus Windsog

$$V_{Ek.w} := -w_{e.s} \cdot 0.375 \cdot \frac{a_{Element}}{2} = 0.374 \cdot \frac{kN}{m}$$

BTU Cottbus Fakultät 2 LS Massivbau	Seite: 21 Datum: 17.08.2012 Aufsteller: Frank Jesse

Auflagerkraft der inneren Platte aus Horizontallast

$q_k = 1 \cdot \frac{kN}{m}$ $Q_k := 0.438 q_k \cdot a_{Element} = 0.657 \cdot kN$ $x = 1\,m$ $l = 3.2\,m$

Bemessungsschnittgrößen der vertikalen Profile GZT:

$M_{Ek.w} := V_{Ek.w} \cdot \frac{l_{eff}^2}{8} = 0.478 \cdot kN \cdot m$ Biegung aus Wind

$M_{Ek.Q} := Q_k \cdot x \cdot \frac{l - x}{l} = 0.452 \cdot kN \cdot m$ Biegung aus Horizontalkraft

$V_{Ed.w} := \gamma_{E.q} \cdot V_{Ek.w} \cdot \frac{l_{eff}}{2} = 0.897 \cdot kN$ Querkraft aus Wind

$V_{Ed.Q} := Q_k \cdot \frac{l - x}{l} = 0.452 \cdot kN$ Querkraft aus Horizontalkraft

Maßgebende Einwirkungskombinationen

$M_{Ed} := \gamma_{E.q} \cdot \left(M_{Ek.w} + 0\right) = 0.717 \cdot kN \cdot m$ (vereinfacht)

$V_{Ed} := \gamma_{E.q} \cdot \left(V_{Ed.w} + 0.6 \cdot V_{Ed.Q}\right) = 1.75 \cdot kN$

$N_{Ed} := \gamma_{E.g} \cdot \frac{G_{Platte.1}}{4} = 0.535 \cdot kN$ Eigengewicht der äußeren Platte

3.7.3 Spannungsnachweise GFK

Normalspannungen im Steg/Flansch sind irrelevant, da kleiner als Betonzugspannungen, siehe unten.

Querzugspannungen im Steg aus Windsog:

$\sigma_{Eqt} := \gamma_{E.q} \cdot V_{Platte.1} \cdot \frac{1}{b_2} = 1.168 \cdot \frac{N}{mm^2}$ $\frac{\sigma_{Eqt}}{f_{GFK.qbd}} = 0.064$ Nachweis erfüllt, nicht maßgebend.

Schubspannung im GFK-Steg an äußerer Platte

$\tau_{12.N} := \frac{N_{Ed}}{b_2 \cdot l_{eff}} = 0.10 \cdot \frac{N}{mm^2}$ (aus Eigengewicht, im Weiteren vernachlässigt)

$\tau_{12.V} := \frac{V_{Ed} \cdot S_{12}}{I_y \cdot b_2} = 12.06 \cdot \frac{N}{mm^2}$ $\frac{\tau_{12.V}}{f_{GFK.\tau d}} = 1.021$ Nachweis erfüllt, maßgebend für Stegdicke.

Schubspannung im GFK-Steg an innerer Platte

$\tau_{23.V} := \frac{V_{Ed} \cdot S_{23}}{I_y \cdot b_2} = 12.13 \cdot \frac{N}{mm^2}$ $\frac{\tau_{23.V}}{f_{GFK.\tau d}} = 1.027$ Nachweis erfüllt, nicht maßgebend.

Anmerkung: Hinsichtlich der Schubspannungen sind Profile mit 1.6 mm Wandstärke ausreichend.

3.7.4 Klebefuge zwischen GFK und Textilbetonplatte

Klebefuge mit einer angenommenen zulässigen (Schub-)Festigkeit von $zul_\tau := 1\,\frac{N}{mm^2}$

Flanschbreite gewählt: $b_{12} := 20mm$

$\tau_{12} := \frac{V_{Ed} \cdot S_{12}}{I_y \cdot b_{12}} = 0.965 \cdot \frac{N}{mm^2}$ $\qquad \frac{\tau_{12}}{zul_\tau} = 0.965$ Nachweis erfüllt, nicht maßgebend.

$\tau_{23} := \frac{V_{Ed} \cdot S_{23}}{I_y \cdot b_{12}} = 0.970 \cdot \frac{N}{mm^2}$ $\qquad \frac{\tau_{23}}{zul_\tau} = 0.97$ Nachweis erfüllt, nicht maßgebend.

Bemerkung: Eine Flanschbreite von 20 mm wäre rechnerisch ausreichend einschließlich notwendiger Reserven für nichtlineare Spannungsverteilung in der Klebefuge. Die tatsächliche Breite sollte mit Hinblick auf die Ausführbarkeit ggf. größer gewählt werden.

Es sei wiederholt darauf hingewiesen, dass Stegbeulen nicht nachgewiesen werden konnte und keine Schwächungen durch Anschlusspunkte berücksichtigt wurden.

3.8 Vertikale C-Profile für Elemente mit Fenster

Bei den Elementen mit Fenster trägt das GFK-Profil im maßgebenden Schnitt die Beanspruchungen ohne Unterstützung durch die Betonplatten ab. Ein Verbundquerschnitt kann nicht angesetzt werden. Außerdem müssen in vertikaler Richtung zwischen den Auflagern alle Beanspruchungen nur durch die beiden GFK-Profile am linken und rechten Elementrand aufgenommen werden.

3.8.1 Querschnittswerte

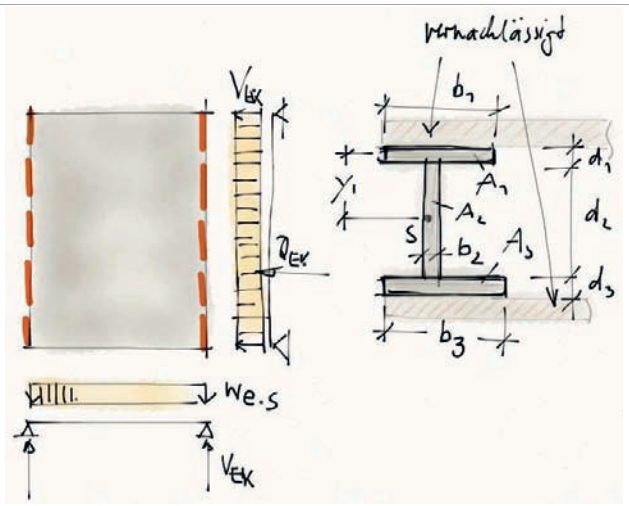
$l_{eff} := b_{Element} = 3.2\,m$ $\qquad d_{Platte.1} = 15 \cdot mm$ $\qquad d_{Platte.2} = 30 \cdot mm$

mitwirkende Plattenbreite des Verbundquerschnitts in Anlehnung an DIN 1045-1:

$b_{eff.1} := \min\left(l_{eff} \cdot 0.2, \frac{a_{Element}}{4}\right) = 0.375\,m$

BTU Cottbus
Fakultät 2
LS Massivbau

Seite: 23
Datum: 17.08.2012
Aufsteller: Frank Jesse



$b_1 := 45mm$ $d_1 := 3mm$ $A_1 := b_1 \cdot d_1 = 1.35 \cdot cm^2$ $I_{y1} := \frac{b_1 \cdot d_1^3}{12} = 0.01 \cdot cm^4$

$b_2 := 4.5mm$ $d_2 := 59mm$ $A_2 := b_2 \cdot d_2 = 2.655 \cdot cm^2$ $I_{y2} := \frac{b_2 \cdot d_2^3}{12} = 7.70 \cdot cm^4$

$b_3 := 45mm$ $d_3 := d_1 = 3 \cdot mm$ $A_3 := b_3 \cdot d_3 = 1.35 \cdot cm^2$ $I_{y3} := \frac{b_3 \cdot d_3^3}{12} = 0.01 \cdot cm^4$

Verbundquerschnitt:

$A_G := A_1 + A_2 + A_3 = 5.355 \times 10^{-4} m^2$

$$y_1 := \frac{A_1 \cdot \frac{d_1}{2} + A_2 \cdot \left(d_1 + \frac{d_2}{2}\right) + A_3 \cdot \left(d_1 + d_2 + \frac{d_3}{2}\right)}{A_G} = 32.5 \cdot mm$$

$y_{1s} := \frac{d_1}{2} - y_1 = -31.0 \cdot mm$ $y_{2s} := \left(d_1 + \frac{d_2}{2}\right) - y_1 = 0.0 \cdot mm$

$y_{3s} := \left(d_1 + d_2 + \frac{d_3}{2}\right) - y_1 = 31 \cdot mm$

$I_y := I_{y1} + A_1 \cdot y_{1s}^2 + \left(I_{y2} + A_2 \cdot y_{2s}^2\right) + \left(I_{y3} + A_3 \cdot y_{3s}^2\right) = 33.7 \cdot cm^4$

$W_o := \frac{I_y}{y_1} = 10.4 \cdot cm^3$ $W_u := \frac{I_y}{\left(d_1 + d_2 + d_3 - y_1\right)} = 10 \cdot cm^3$

$S_{12} := A_1 \cdot \left(-y_{1s}\right) = 4 \cdot cm^3$ Fuge äußere Platte - GFK bzw. Steg

$S_{23} := A_3 \cdot y_{3s} = 4 \cdot cm^3$ Fuge innere Platte - GFK bzw. Steg

3.8.2 Schnittgrößen

Auflagerkraft der äußeren Platte als Randauflager 1-Feld-Träger aus Windsog

$$V_{Ek.w} := -w_{e.s} \cdot \frac{a_{Element}}{2} = 0.996 \cdot \frac{kN}{m}$$

Auflagerkraft der inneren Platte aus Horizontallast

$q_k = 1 \cdot \frac{kN}{m}$ $Q_k := 0.438 q_k \cdot a_{Element} = 0.657 \cdot kN$ $x = 1\,m$ $l = 3.2\,m$

Bemessungsschnittgrößen der vertikalen Profile GZT:

$M_{Ek.w} := V_{Ek.w} \cdot \frac{l_{eff}^2}{8} = 1.275 \cdot kN \cdot m$ Biegung aus Wind

$M_{Ek.Q} := Q_k \cdot x \cdot \frac{l - x}{l} = 0.452 \cdot kN \cdot m$ Biegung aus Horizontalkraft

$V_{Ed.w} := \gamma_{E.q} \cdot V_{Ek.w} \cdot \frac{l_{eff}}{2} = 2.391 \cdot kN$ Querkraft aus Wind

$V_{Ed.Q} := Q_k \cdot \frac{l - x}{l} = 0.452 \cdot kN$ Querkraft aus Horizontalkraft

Maßgebende Einwirkungskombinationen

$M_{Ed} := \gamma_{E.q} \cdot \left(M_{Ek.w} + 0\right) = 1.913 \cdot kN \cdot m$ (vereinfacht)

$V_{Ed} := \gamma_{E.q} \cdot \left(V_{Ed.w} + 0.6 \cdot V_{Ed.Q}\right) = 3.99 \cdot kN$

$N_{Ed} := \gamma_{E.g} \cdot \frac{G_{Platte.1}}{4} = 0.535 \cdot kN$ Eigengewicht der äußeren Platte

3.8.3 Spannungsnachweise GFK

Normalspannungen im Steg/Flansch sind irrelevant, da kleiner als Betonzugspannungen, siehe unten.

Querzugspannungen im Steg aus Windsog:

$\sigma_{Eqt} := \gamma_{E.q} \cdot V_{Platte.1} \cdot \frac{1}{b_2} = 0.415 \cdot \frac{N}{mm^2}$ $\frac{\sigma_{Eqt}}{f_{GFK.qbd}} = 0.023$ Nachweis erfüllt, nicht maßgebend.

Biegespannung im GFK-Flansch

$\sigma_{11} := \frac{M_{Ed}}{W_o} = 185 \cdot \frac{N}{mm^2}$ $\frac{\sigma_{11}}{f_{GFK.bd}} = 0.941$ Nachweis erfüllt, maßgebend für Flansch.

$\sigma_{33} := \frac{M_{Ed}}{W_u} = 185 \cdot \frac{N}{mm^2}$ $\frac{\sigma_{33}}{f_{GFK.bd}} = 0.941$ Nachweis erfüllt, maßgebend für Flansch.

Schubspannung im GFK-Steg an äußerer Platte

$\tau_{12.N} := \frac{N_{Ed}}{b_2 \cdot l_{eff}} = 0.04 \cdot \frac{N}{mm^2}$ (aus Eigengewicht, im weiteren vernachlässigt)

$\tau_{12.V} := \frac{V_{Ed} \cdot S_{12}}{I_y \cdot b_2} = 11.0 \cdot \frac{N}{mm^2}$ $\frac{\tau_{12.V}}{f_{GFK.\tau d}} = 0.934$ Nachweis erfüllt, maßgebend für Stegdicke.

Schubspannung im GFK-Steg an innerer Platte

BTU Cottbus
Fakultät 2
LS Massivbau

Seite: 25
Datum: 17.08.2012
Aufsteller: Frank Jesse

$\tau_{23.V} := \frac{V_{Ed} \cdot S_{23}}{I_y \cdot b_2} = 11.0 \cdot \frac{N}{mm^2}$ $\frac{\tau_{23.V}}{f_{GFK.\tau d}} = 0.934$ Nachweis erfüllt, nicht maßgebend.

Anmerkung: Hinsichtlich der Schubspannungen sind Doppel-T-Profile mit den angenommenen Wandstärken ausreichend.

3.8.4 Klebefuge zwischen GFK und Textilbetonplatte

Für die Klebefuge wird im auflagernahen Bereich näherungsweise der Verbundquerschnitt aus 3.7 wirksam. Da die Klebefuge bereits in 3.7.4 vollständig ausgelastet war, muss deren Breite nun im Verhältnis der einwirkenden Querkräfte vergrößert werden.

$erf_b := \frac{3.99}{1.75} \cdot b_{12} = 45.6 \cdot mm$ mit $b_{12} = 20 \cdot mm$

Die gewählte Profilbreite von 45 mm scheint damit ausreichend.

3.9 Verankerung der Elemente an der Tragkonstruktion

Die Kräfte aus Eigengewicht werden über zwei Ankerkonstruktionen nahe der Oberseite der Fassadenelemente in die tragende Konstruktion des Gebäudes eingeleitet.

Die Kräfte aus Wind und Horizontalkraft werden über je zwei Ankerkonstruktionen nahe der Oberseite und an der Unterseite der Fassadenelemente in die tragende Konstruktion eingetragen.

Global ergibt sich als statisches System vertikal als auch horizontal ein 1-Feld-Träger. Zwängungen können vernachlässigt werden.

3.9.1 Geometrie

$a_{Element} = 1.5\,m$ Breite $b_{Element} = 3.2\,m$ Höhe

$A_{Element} := a_{Element} \cdot b_{Element} = 4.8\,m^2$

3.9.2 Schnittgrößen

Belastung

$G_{Platte.1} = 1.58 \cdot kN$ Eigengewicht äußere Platte

$G_{Platte.2} := a_{Element} \cdot b_{Element} \cdot d_{Platte.2} \cdot \rho_{TRC} = 3.17 \cdot kN$ Eigengewicht innere Platte

$G_k := \left(G_{Platte.1} + G_{Platte.2}\right) \cdot 1.2 = 5.7 \cdot kN$ 20 % Zuschlag für GFK-Rahmen und Dämmung

$w_{e.s} = -1.328 \cdot \frac{kN}{m^2}$ Windsog

$q_k = 1 \cdot \frac{kN}{m}$ Horizontallast bei $x = 1\,m$

charakteristische Schnittgrößen je Befestigungspunkt

$V_{k.G} := \frac{G_k}{2} = 2.85 \cdot kN$ Vertikallast

$H_{k.w} := -w_{e.s} \cdot \frac{A_{Element}}{4} = 1.59 \cdot kN$ Horizontalkraft aus Wind

$H_{k.Q.u} := q_k \cdot a_{Element} \cdot \frac{l - x}{2l} = 0.516 \cdot kN$ Horizontalkraft aus Horizontallast unten

$H_{k.Q.o} := q_k \cdot a_{Element} \cdot \frac{x}{2l} = 0.234 \cdot kN$ Horizontalkraft aus Horizontallast oben

Maßgebende Einwirkungskombination

$V_d := \gamma_{E.g} \cdot V_{k.G} = 3.85 \cdot kN$

$H_{d.u} := \gamma_{E.q} \cdot \left(H_{k.w} + 0.7 \cdot H_{k.Q.u}\right) = 2.93 \cdot kN$

$H_{d.u.min} := \gamma_{E.q} \cdot H_{k.w} = 2.39 \cdot kN$

$H_{d.o} := \gamma_{E.q} \cdot \left(H_{k.w} + 0.7 \cdot H_{k.Q.o}\right) = 2.64 \cdot kN$

Verbindungsmittel werden üblicherweise mit einem Teilsicherheitsbeiwert von ca. 2-3 bemessen. Daraus ergeben sich folgende notwendige experimentell nachzuweisende Bruchlasten für die Verbindungsmittel:

$V_{Rk} := 3 \cdot V_d = 11.5 \cdot kN$

$H_{Rk.u} := 3 \cdot H_{d.u} = 8.80 \cdot kN$

$H_{Rk.o} := 3 \cdot H_{d.o} = 7.91 \cdot kN$

An den oberen beiden Ankerpunkten wird die Belastung durch je 4 Verbindungsmittel aufgenommen. Diese leiten die Kraft von der Betonplatte in die stählerne Ankerschuhkonstruktion ab. Die genannten Kräfte gelten daher für die 4er-Gruppe der Verbindungsmittel. Als charakteristischer Wert des Widerstandes gilt hier ein rechnerisches 5 % Quantil mit 75 % Vertrauensintervall (Annahme Normalverteilung), das experimentell nachgewiesen werden muss.

3.9.3 Untere Ankerpunkte

Die horizontale Ankerkraft wird über eine Stahllasche bei Windsog direkt in die innere Betonplatte als Randlast eingetragen.

In Anlehnung an DIN 1045-1 wird über den Durchstanznachweis die Tragfähigkeit der Betonplatte nachgewiesen.

Geometrie $b := 2 \cdot 50mm = 100 \cdot mm$ $d := 30mm$

$V_{Ed} := H_{d.u} = 2.933 \cdot kN$

$\kappa := \min\left(2, 1 + \sqrt{\frac{200}{\frac{d}{mm}}}\right) = 2$ $\eta_1 := 1.0$ $\rho_l := \min\left(0.02, \frac{erf_A_t}{b \cdot d}\right) = 0.020$

BTU Cottbus
Fakultät 2
LS Massivbau

Seite: 27
Datum: 17.08.2012
Aufsteller: Frank Jesse

$$V_{Rd.ct} := \left[\frac{0.15}{\gamma_C} \cdot \kappa \cdot \eta_1 \cdot \left(100 \cdot \rho_l \cdot \frac{f_{ck}}{\frac{N}{mm^2}} \right)^{\frac{1}{3}} \right] b \cdot d \cdot \frac{N}{mm^2} = 2.96 \cdot kN$$

$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd.ct}} = 0.991$ Nachweis erfüllt.

Anmerkung: Der Nachweis zeigt, dass die Ankerpunkte jeweils etwa 100 mm eines kritischen Rundschnittes aktivieren müssten, um die notwendige Tragfähigkeit zu erreichen. Zur Wahl des Dübelbildes siehe separater Prüfbericht.

Die horizontale Ankerkraft wird über eine Klebeverbindung in den Flansch des GFK-Rahmenprofils eingeleitet. Der Nachweis ausreichender Tragfähigkeit wird als Normalspannungsnachweis im Steg des Profils geführt.

Geometrie $b := 120mm$ Lastenbreite gewählt

$b_2 = 4.5 \cdot mm$ Stegdicke

Nachweis

$\sigma_d := \frac{H_{Rk.u}}{b \cdot b_2} = 16.3 \cdot \frac{N}{mm^2}$ $\frac{\sigma_d}{f_{GFK.ck}} = 0.109$ Nachweis erfüllt.

Anmerkung: Der Normalspannungsnachweis wird problemlos erbracht. Stegbeulen kann mangels Bemessungsgrundlagen nicht nachgewiesen werden.

4 Quellen

[Brendler:2007] Brendler, S. A.: Rechnerisches Bemessungskonzept für absturzsichere Verglasungen. Dissertation, TU Braunschweig, Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften, 2007, 255 S.

[BUEV-KS:2010] BÜV-Empfehlung: Tragende Kunststoffe im Bauwesen [TKB]. Entwurf, Bemessung und Konstruktion. Berlin : Bau-Überwachungsverein e.V., Entwurf Stand 08/2010, 89 S. -- http://www.buev-ev.de/shared/doc-pdf/BUEV_Kunststoff_Empf.pdf

[EligehausenEtAl:1997] Eligehausen, R.; Mallée, R.; Rhem, G.: Befestigungstechnik. Eibl, J. (Hrsg.): Betonkalender 86 (1997) Teil II, S.609-753

[Schneider18] Goris, A. (Hrsg.): Schneider Bautabellen für Ingenieure. 18. Aufl., Köln : Werner Verlag, 2008

[SitglatWippel:1983] Stiglat, K.; Wippel, H.: Platten. Berlin : Ernst & Sohn, 3. überarb., erg. u. erw. Aufl., 1983

[Quast:2002] Quast, U.: Neue Bemessungskonzepte mit alten Verfahren? Beton- und Stahlbetonbau 97 (2002) Nr. 11, S. 576-583

[CTS748230877/1] Material Cerfiticate No. 748230877/1, CTS Composite Technologie Systeme, Mercatorstraße 43, 21502 Gestacht, 8 S.

[Trumpf:2006] Trumpf, H.: Stabilitätsverhalten ebener Tragwerke aus pultrudierten faserverstärkten Polymerprofilen. Dissertation, Lehrstuhl für Stahlbau und Leichtmetallbau, Heft 59, Aachen : Shaker-Verlag, 2006

Normen:

[DIN 1045-1] DIN 1045-1:2008-08: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 1: Bemessung und Konstruktion

[DIN 1055-4] DIN 1055-4:2005-03: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 4: Windlasten

[DIN 1055-7] DIN 1055-7:2002-11: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 7: Temperatureinwirkungen

[DIN EN 1991-1-1] DIN EN 1991-1-1:2010-12: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen auf Tragwerke – Wichten, Eigengewicht und Nutzlasten im Hochbau; Deutsche Fassung EN 1991-1-1:2002 + AC:2009.

[DIN EN 1991-1-1/NA] DIN EN 1991-1-1/NA:2010-12: Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen auf Tragwerke – Wichten, Eigengewicht und Nutzlasten im Hochbau.

[DIN EN 1991-1-7] DIN EN 1991-1-7:2010-12: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-7: Allgemeine Einwirkungen – Außergewöhnliche Einwirkungen; Deutsche Fassung EN 1991-1-7:2006 + AC:2010.

[DIN EN 1991-1-7/NA] DIN EN 1991-1-7/NA:2012-12: Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-7: Allgemeine Einwirkungen – Außergewöhnliche Einwirkungen.

[DIN EN 1999-1-1] DIN EN 1999-1-1:2010-05: Eurocode 9: Bemessung und Konstruktion von Aluminiumtragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln; Deutsche Fassung EN 1999-1-1:2007 + A1:2009

[DIN EN 1999-1-1/NA] DIN EN 1999-1-1/NA: 2010-12: Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter -

BTU Cottbus
Fakultät 2
LS Massivbau

Seite: 29
Datum: 17.08.2012
Aufsteller: Frank Jesse

Eurocode 9: Bemessung und Konstruktion von Aluminiumtragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln

[DIN EN 12600] DIN EN 12600:2003-04: Glas im Bauwesen – Pendelschlagversuch – Verfahren für die Glasprüfung und Klassifizierung von Flachglas; Deutsche Fassung DIN EN 12600:2002

8.2 Prüfbericht zu den Verbindungsmitteln

Brandenburgische
Technische Universität
Cottbus

BTU Cottbus · Postfach 10 13 44 · 03013 Cottbus

**Fakultät Architektur,
Bauingenieurwesen und Stadtplanung**
Lehrstuhl Massivbau
Gastprof. Dr.-Ing. Frank Jesse

Sekretariat
T +49 (0)355 69 24 71
F +49 (0)355 69 24 78
E massivbau@tu-cottbus.de

Prüfbericht Nr.: 2701000/001

Bemessung und Prüfung von Vakutex-Elementen – Prüfung von Verbindungsmitteln

Cottbus, 20. August 2012

Auftraggeber:
Architekturinstitut Leipzig
HTWK Leipzig
Karl-Liebknecht-Straße 132
04277 Leipzig

Ansprechpartner:
Dipl.-Ing. [FH] Susanne Kirmse
Dipl.-Ing. [FH] Alexander Kahnt

Prüfstelle:
Lehrstuhl Massivbau
Technische Universität Cottbus
03046 Cottbus

Ansprechpartner:
Dr.-Ing. Frank Jesse
Gastprofessor an der BTU Cottbus

Datum:
Cottbus, den 27.07.2012

Der Abschlussbericht besteht aus 27 Seiten inkl. Anlagen.

Gastprof. Dr.-Ing. Frank Jesse
Lehrstuhl Massivbau

1 Aufgabenstellung

Durch den Auftraggeber (AG) wurden insgesamt 12 Prüfkörper geliefert, an denen der Auszugwiderstand rückseitig einbetonierter Einbauteile zu bestimmen war. Die Prüfkörper mit Abmessungen von 30 cm Breite, 30 cm Höhe und 3 cm Dicke repräsentieren einen Ausschnitt aus dem neu entwickelten Fassadenelement „Vakutex“. Rückseitig waren mittig oberflächenbündig Einbauteile aus Gewindehülsen mit Innengewinde M10 einbetoniert. Die Einbauteile dienen der Befestigung der Vakutex-Fassadenelemente an der tragenden Unterkonstruktion. Die Fassadenplatten besitzen rückseitig mehrere Ankerpunkte. Diese müssen in der planmäßigen Einbaulage an den oberen Ankerpunkten Eigen- und Windlasten aufnehmen, an den unteren Ankerpunkten nur Windlasten. Die Herstellung der Platten erfolgte nach Angaben des AG liegend mit fließfähigem Beton und Verdichtung durch leichtes Rütteln. Das Einbauteil wurde in der geplanten Einbaulage vor dem Betonieren positioniert und bis zur ausreichenden Erhärtung fixiert.

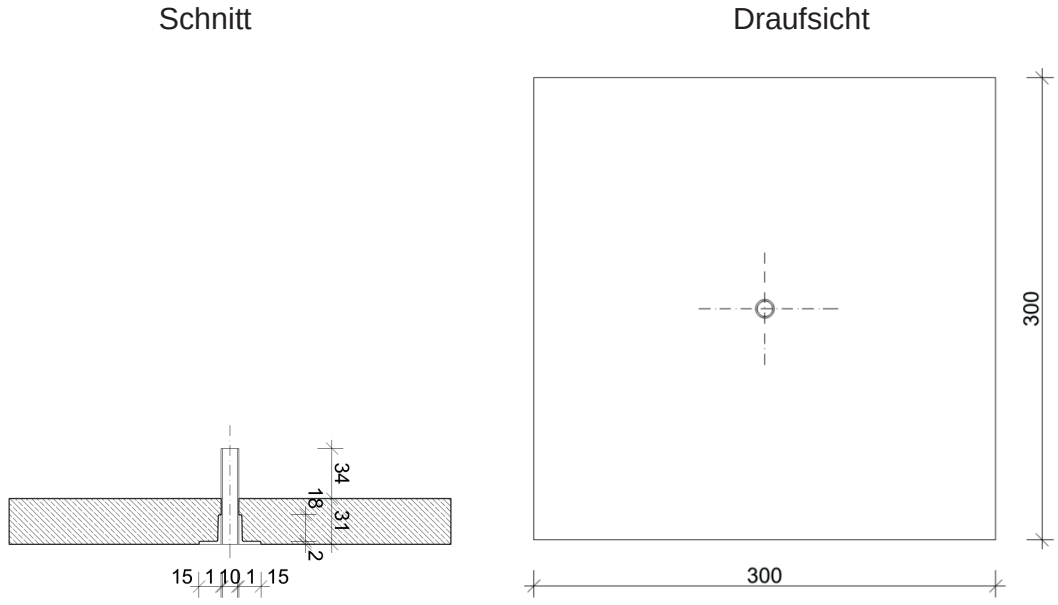


Bild 1: Zeichnung der Probekörper mit Einbauteilen

Für die Beurteilung der Eignung der Einbauteile war deren Tragfähigkeit entsprechend der relevanten, vorgegebenen Einwirkungen aus [2] zu prüfen:

- LF1: Eigengewicht (Zug parallel zur Plattenebene)
  V_{Ed} = 3,85 kN; α = 0° (je oberer Befestigungspunkt)
- LF2: Windsog (Zug senkrecht zur Plattenebene)
  H_{Ed} =$H_{o,Ed}$ = 2,93 kN; α = 90° (auf der sicheren Seite je Befestigungspunkt)
- LF1+LF2: Eigengewicht + Windsog (Zug schräg zur Plattenebene)
  S_{Ed} = 4,84 kN; α = 37,4° (je oberer Befestigungspunkt)

Winddruck ist keine maßgebende Bemessungssituation. Bei Verbindungsmitteln ist die Interaktion der Belastungsrichtungen von großem Interesse, da die Reaktion sehr unterschiedlich ausfällt. Die Tragfähigkeit eines Verbindungsmittels kann bei gleichzeitigem Auftreten von Beanspruchung (hier senkrecht und parallel zur Bauteiloberfläche) signifikant kleiner sein, als wenn die Beanspruchungen separat wirken. Aus diesem Grund werden auch Schrägzugversuche durchgeführt, um den Effekt aus Interaktion zu erfassen. Der Angriffspunkt und die Richtung der Schrägzugbelastung ergeben sich aus der geplanten Einbausituation und den vom AG beauftragten und vom AN erstellten statischen Unterlagen [2].

2 Versuchsbeschreibung

2.1 Allgemein

Der Angriffspunkt der Prüflast ergibt sich für alle Fälle aus der vom AG vorgegebenen Einbausituation. Entsprechend wurde für Längs-, Quer- und Schrägzug eine hochfeste Schraube M10 in die Gewindehülse eingedreht, die anschließend punktuell mit dem Verbindungsmittel verschweißt wurde. Die Prüflast wurde jeweils über geeignet geformte Lasteinleitungsmittel auf die eingesetzte Schraube übertragen. Für Längszug wurde ein Gewindestab als Lasteinleitungsmittel verwendet. Somit stimmt der im Versuch aktivierte Lastangriffspunkt in allen Versuchen mit der Einbausituation am Bauwerk überein. Der Punkt der Lasteinleitung ist vor allem relevant für die aus der Exzentrizität bezüglich Querzug und Schrägzug im Verbindungsmittel eingetragene Momentenbeanspruchung.

2.2 Zug senkrecht zur Plattenebene (Längszug)

Für die Zugbelastung mit einer Kraft senkrecht zur Plattenebene (Längszug) wurden die Proben auf eine feste horizontale Oberfläche gelegt. Auf der Betonierseite wurde die Pressenkraft über einen Gewindestab direkt in die Gewindehülse eingeleitet und über einen Stahlrahmen, einen Aussteifungsring und einen Lastverteilungsring aus Gummi in die Platte so eingetragen, dass sich der Ausbruchkegel ungehindert ausbilden kann. Der Lastverteilungsring dient der Vermeidung lokaler Spannungsspitzen zwischen dem Aussteifungsring und der rauen Betonoberfläche.

Als Messgrößen wurden erfasst (Bild 2):

1. Die Kraft durch eine Kraftmessdose der Kapazität 100 kN,
2. Die Verschiebungen eines am Gewindestab angebrachten Querbalkens an zwei Punkten symmetrisch zur Lastachse gegenüber der Probenoberfläche mit zwei induktiven Wegaufnehmern 300 mm.

Bild 2 zeigt in Foto des Versuchsaufbaus.

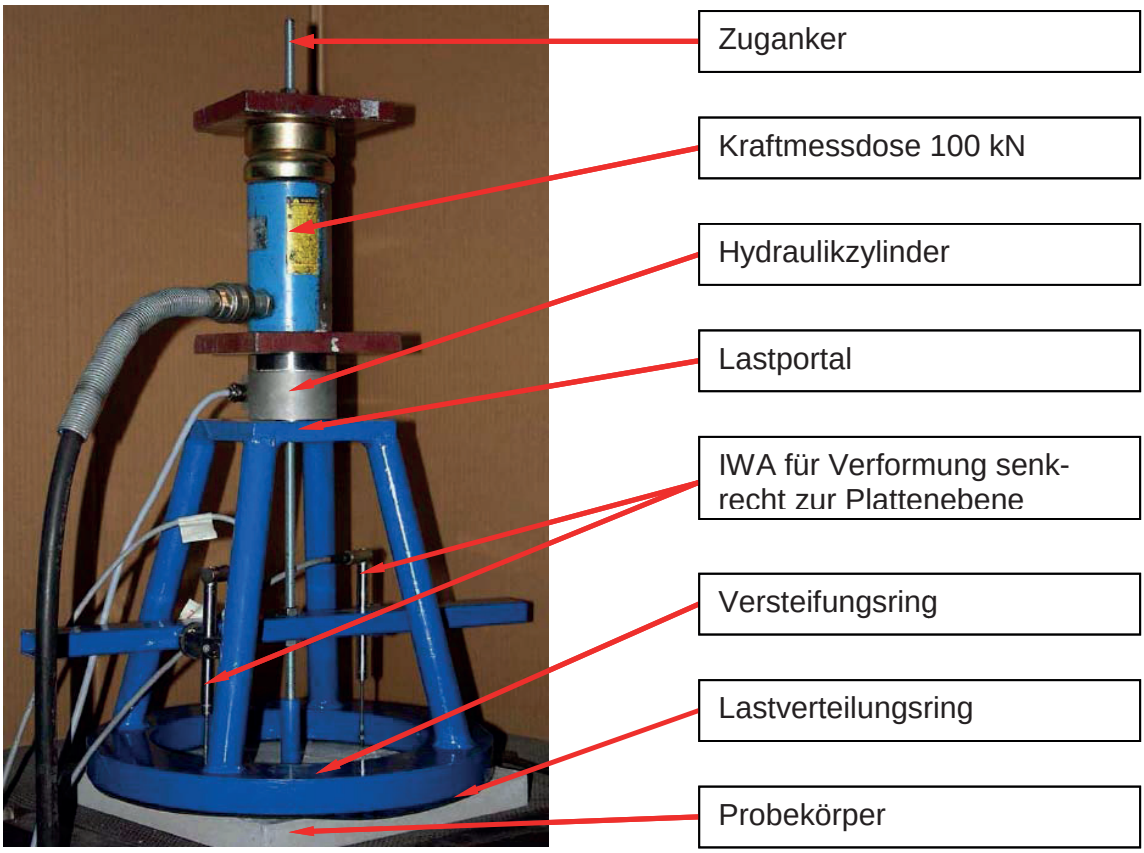


Bild 2: Foto des Versuchsaufbaus für Längszug mit Messpunkten

2.3 Zug parallel zur Plattenebene (Querzug)

Für die Zugbeanspruchung parallel zur Plattenebene bzw. quer zur Gewindehülse (Querzug) wurden die Proben vertikal auf einem stählernen Widerlager platziert und zur Aufnahme des Momentes aus der exzentrischen Lasteinleitung gegen das rückwärtige Widerlager verankert. Die Lasteinleitung erfolgte über eine hochfeste Schraube und eine gelenkig angeschlossene stählerne Zuglasche. Der Lastangriffspunkt liegt ca. 5 mm oberhalb der Plattenoberfläche.

Als Messgrößen wurden erfasst (Bild 3):

1. Die Kraft durch eine Kraftmessdose 100 kN der hydraulischen Zugpresse,
2. Die Verschiebungen des Schraubenkopfes senkrecht zur Plattenebene durch einen induktiven Wegaufnehmer 300 mm und
3. Die Verschiebung des unbelasteten Endes der stählernen Zuglasche parallel zur Plattenebene durch die Differenz zweier induktiver Wegaufnehmer 300 mm.

Bild 3 und 4 zeigen Fotos des Versuchsaufbaus.

Gastprof. Dr.-Ing. Frank Jesse
Lehrstuhl Massivbau

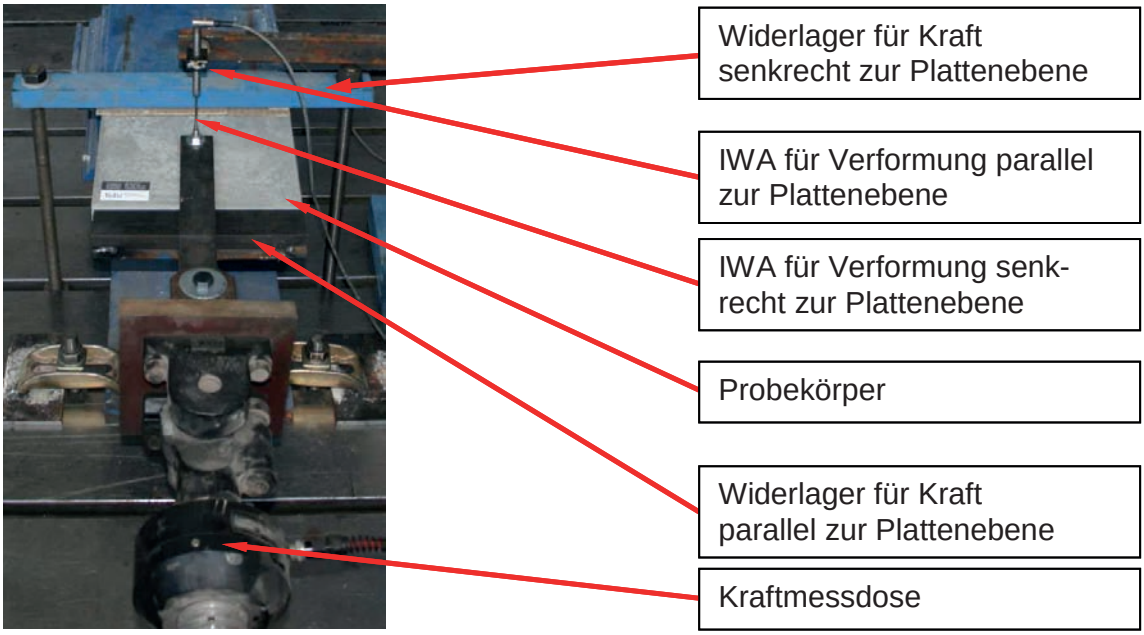


Bild 3: 1. Foto des Versuchsaufbaus für Querzug mit Messpunkten

Bild 4: 2. Foto des Versuchsaufbaus für Querzug mit Messpunkten

2.4 Zug im Winkel zur Plattenebene (Schrägzug)

Die plattenförmigen Probekörper wurden an zwei Rändern auf 30 mm breite Auflagerflächen zur Aufnahme der Kraftkomponente senkrecht zur Plattenebene gelagert. Am belasteten Rand der Probekörper diente ein vollflächiger Anschlag zur Aufnahme der Kraftkomponente in Plattenebene. Die Prüflast wurde über ein spezielles stählernes Formteil in den Schraubenkopf eingeleitet. Das Formteil war gelenkig mit dem Zugstab (Flachstahl) verbunden, der die Last aus dem Hyd-

raulikzylinder übertrug (Bild 6).

Die Richtung der Prüflast war durch Angaben in den statischen Berechnungen festgelegt. Als Bemessungslasten muss an den Verankerungspunkten die Aufnahme folgender Kräfte versuchstechnisch nachgewiesen werden:

4. LF1: Windsog senkrecht zur Plattenebene: H_{Ed} = 2,93 kN
5. LF2: Eigengewicht parallel zur Plattenebene: V_{Ed} = 3,85 kN

Die Resultierende aus LF1+LF2 in Höhe von S_{Ed} = 4,84 kN greift im Winkel von = 37,4° zur Plattenebene an. Der Lastangriffspunkt liegt 5 mm über der Betonoberfläche. Der Versuchsaufbau wurde so gestaltet, dass die Richtung der Prüflast einstellbar, jedoch während des Versuches konstant ist (Bild 5). Als Messgrößen wurden erfasst

6. Die Kraft durch eine Kraftmessdose der hydraulischen Zugpresse (Siehe 2.3),
7. Die Verschiebung des Schraubenkopfes senkrecht zu Plattenebene und
8. die Verschiebung des Schraubenkopfes parallel zur Plattenebene.

Bild 5 zeigt ein Foto des Versuchsaufbaus, Bild 6 das Detail der Lasteinleitung.

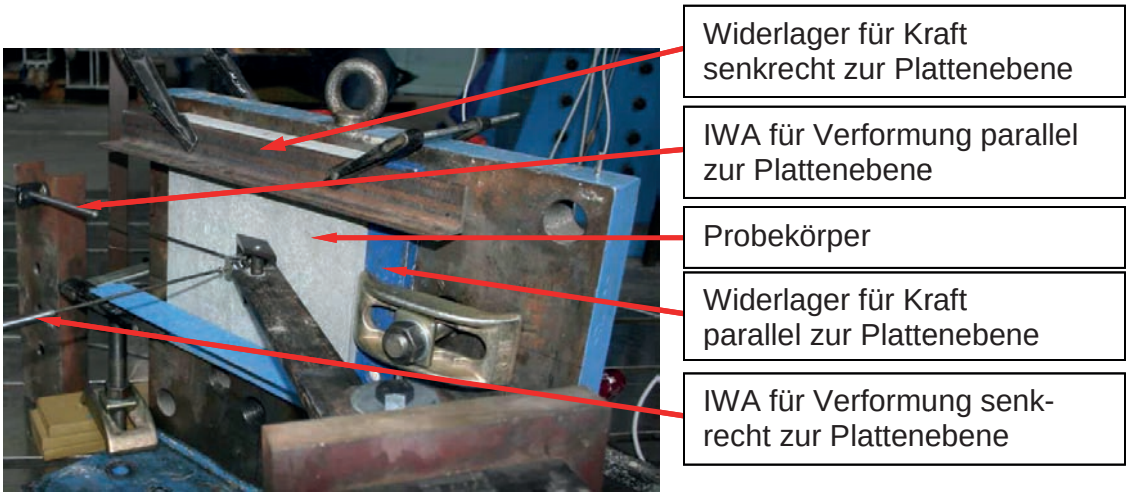


Bild 5: Foto des Versuchsaufbaus für Schrägzug mit Messpunkten

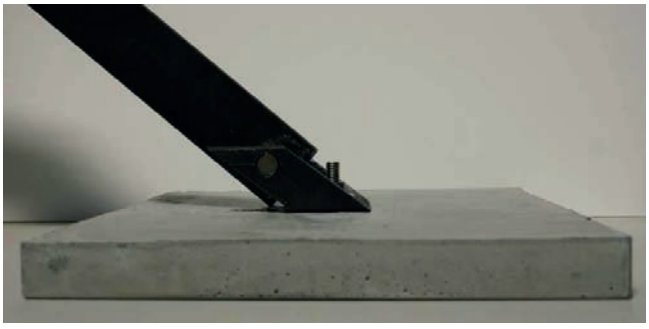


Bild 6: Foto des Lasteinleitungsdetails, Achse der Prüfkraft im Winkel von 37,4° zur Plattenebene

Gastprof. Dr.-Ing. Frank Jesse
Lehrstuhl Massivbau

2.5 Versuchsdurchführung

Die Belastung wurde kontinuierlich mit etwa 0,01mm/s gesteigert, bis nach dem Erreichen der Maximalkraft das Lastniveau deutlich abfiel bzw. der Ausbruchkegel voll ausgeprägt war. Der Hydraulikdruck wurde mittels Handpumpe erzeugt. Nach dem Versagen wurde das Bruchbild fotografisch dokumentiert, siehe Anlagen A1 bis A3.

3 Versuchsergebnisse und Diskussion

In Anlage A1 bis A3 sind die Kraft-Verformungs-Diagramme aus den während den Versuchen gemessenen Werten dargestellt. Die Proben zeigten bei Belastung zunächst eine hohe Steifigkeit, bis es zu einem Versagen kommt, dass sich nicht durch plastische Verformungen ankündigt. Bis zum Erreichen der Bruchlast unterliegen die Proben einer Biegebeanspruchung, die zu sichtbaren Rissen radial zur Presshülse führt. Ca. 0,5-1 kN vor Erreichen der Maximallast kündigt sich der Ausbruch der Einbauteile durch Knacken und deutlich sichtbare konzentrische Risse an. Das Versagen trat in fast allen Fällen durch einen Ausbruch des Betons um das Einbauteil ein. Lediglich bei einer Probe kam es zum Biegeversagen des Versuchskörpers.

Die gemessenen Prüflasten sind in den Tabellen 1 bis 3 zusammengestellt. Angegeben sind zusammenfassend Mittelwert (jeweils Zeile 4), Standardabweichung (jeweils Zeile 6) und als charakteristischer Wert für die Tragfähigkeit des Einbauteils das empirische 5 %-Quantil der Versagenslast (Zeile 5). Für einen globalen Sicherheitsbeiwert ist bei Dübeln ein Wertebereich von γ = 3 … 5 üblich [1]. Als Konservative Annahme und unter Berücksichtigung eines mittleren Teilsicherheitsbeiwertes auf der Einwirkungsseite von γ_E = 1,4 wird der Bemessungswert mit γ_R = 5 / 1,4 = 3,6 ermittelt.

Auf die sonst übliche Ermittlung des Konfidenzintervalls wurde aufgrund des prototypischen Charakters der Versuche verzichtet. Statt der daraus folgenden Reduzierung der Quantilwerte würde eine angemessene Erhöhung der Anzahl der Versuchskörper empfohlen werden.

Aus der Darstellung im Bild 4 wird deutlich, dass bei Schrägzug eine durchschnittliche Tragfähigkeit erreicht wird.

Gastprof. Dr.-Ing. Frank Jesse
Lehrstuhl Massivbau

Seite 8/27 vom 20.08.2012

Tabelle 1: Messwerte und statistische Auswertung der Versuche für Längszug

Messergebnisse						
	1	2	3	4	5	6
Zeile	Prüfkörper	Betonierdatum	Prüfdatum	Alter	max. Kraft	Anmerkung
	[-]	[dd.mm.yyyy]	[dd.mm.yyyy]	[d]	[kN]	[-]
1	VK_LZ_90_01	17.03.2012	19.06.2012	94	5,41	Ausbruchkegel
2	VK_LZ_90_02	17.03.2012	19.06.2012	94	4,9	Ausbruchkegel
3	VK_LZ_90_03	17.03.2012	19.06.2012	94	4,42	Biegebruch
Statistik						
4	Mittelwert		σ		4,91 kN	
5	5 %-Quantil		$F_{0,05}$		4,09 kN	
6	Standardabweichung		STABW		0,49 kN	
7	Anzahl der Proben		n		3	
8	Teilsicherheitsbeiwert		γ_R		3,6	
9	**Bemessungswert**				**1,13 kN**	

Tabelle 2: Messwerte und statistische Auswertung der Versuche für Querzug

Messergebnisse						
	1	2	3	4	5	6
Zeile	Prüfkörper	Betonierdatum	Prüfdatum	Alter	max.Kraft	Anmerkung
	[-]	[dd.mm.yyyy]	[dd.mm.yyyy]	[d]	[kN]	[-]
1	VK_QZ_00_01	17.03.2012	29.06.2012	104	18,67	Ausbruchkegel
2	VK_QZ_00_02	17.03.2012	29.06.2012	104	17,63	Ausbruchkegel
3	VK_QZ_00_03	17.03.2012	29.06.2012	104	15,93	Ausbruchkegel
Statistik						
4	Mittelwert		σ		17,41 kN	
5	5 %-Quantil		$F_{0,05}$		15,13 kN	
6	Standardabweichung		STABW		1,38 kN	
7	Anzahl der Proben		n		3	
8	Teilsicherheitsbeiwert		γ_R		3,6	
9	**Bemessungswert**				**4,20 kN**	

Gastprof. Dr.-Ing. Frank Jesse
Lehrstuhl Massivbau

Tabelle 3: Messwerte und statistische Auswertung der Versuche für Schrägzug

Messergebnisse						
	1	2	3	4	5	6
Zeile	Prüfkörper	Betonierdatum	Prüfdatum	Alter	max.Kraft	Anmerkung
	[-]	[dd.mm.yyyy]	[dd.mm.yyyy]	[d]	[kN]	[-]
1	VK_SZ_37_01	17.03.2012	17.07.2012	122	6,6	Ausbruchkegel
2	VK_SZ_37_02	17.03.2012	18.07.2012	123	8,85	Ausbruchkegel
3	VK_SZ_37_03	17.03.2012	18.07.2012	123	6,59	Ausbruchkegel
Statistik						
4	Mittelwert		σ		7,34 kN	
5	5 %-Quantil		$F_{0,05}$		5,20 kN	
6	Standardabweichung		STABW		1,30 kN	
7	Anzahl der Proben		n		3	
8	Teilsicherheitsbeiwert		γ_R		3,6	
9	**Bemessungswert**				**1,44 kN**	

4 Anwendungsempfehlung

4.1 Bemessungswiderstand eines Dübels

Bei ausreichendem Achs- und Randabstand wird empfohlen, bei den geprüften Gewindehülsen die in Bild 4 ablesbaren Bemessungswerte nicht zu überschreiten. Als ausreichend kann der Achs- und Randabstand angesehen werden, wenn die Ausprägung des Ausbruchkegels nicht behindert wird. Allgemein wird angenommen, dass dazu ca. 2/3 des sichtbaren Ausbruchkegels im ungestörten Experiment erforderlich sind, ohne dass es zu signifikanten Reduzierungen der Tragfähigkeit kommt. Aus den Bruchbildern lassen sich die Achs- und Randabstände in Lastrichtung s_1 bzw. quer zur Lastrichtung s_2 demnach wie in Tabelle 4 abschätzen.

- Oberseite der Elemente (Eigengewicht & Wind): s_1 = 105 mm; s_2 = 80 mm
- Unterseite der Elemente (nur Wind): $s_1 = s_2$ = 80 mm

Für die Randabstände wird angenommen, dass sie jeweils dem halben Achsabstand entsprechen. Entsprechende Prüfungen liegen nicht vor.

Gastprof. Dr.-Ing. Frank Jesse
Lehrstuhl Massivbau

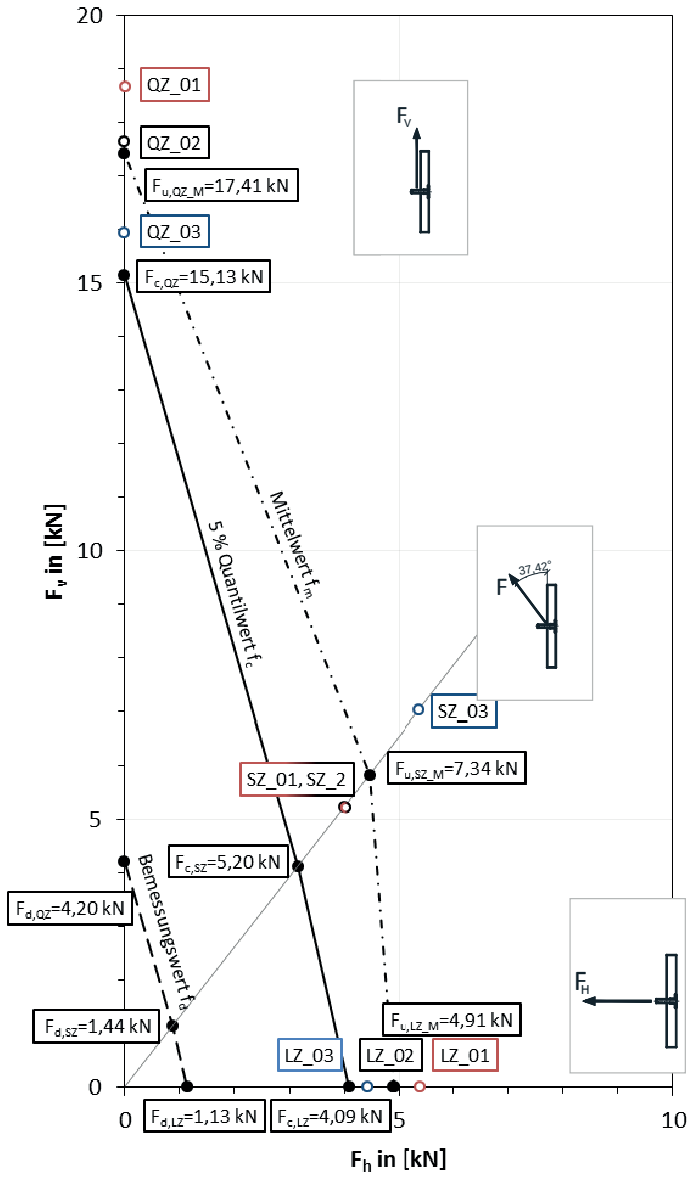


Bild 4: Interaktionsdiagramm mit Prüflasten, Mittelwertkurven, charakteristische Werte und daraus ermittelte Bemessungswerte

Gastprof. Dr.-Ing. Frank Jesse
Lehrstuhl Massivbau

Tabelle 4: Abschätzung der Achse- und Randabstände

Zeile		Ausbruchkegel in Richtung	
	Längszug	**horizontal**	**Vertikal**
1	VK_LZ_90_01	120 mm	110 mm
2	VK_LZ_90_02	110 mm	100 mm
3	VK_LZ_90_03	130 mm	140 mm
4	2/3 * Mittelwert	78,9 mm	
5	gewählt	$s_1 = s_2 = 80$ mm	
	Querzug	**Quer zur Lastrichtung**	**In Lastrichtung**
6	VK_QZ_00_01	110 mm	130 mm
7	VK_QZ_00_02	120 mm	140 mm
8	VK_QZ_00_03	120 mm	110 mm
9	2/3 * Mittelwert	77,8 mm	84,4 mm
10	gewählt	$s_2 = 80$ mm	$s_1 = 85$ mm
	Schrägzug	**Quer zur Lastrichtung**	**In Lastrichtung**
11	VK_SZ_37_01	90 mm	150 mm
12	VK_SZ_37_02	90 mm	150 mm
13	VK_SZ_37_03	110 mm	160 mm
14	2/3 * Mittelwert	62,2 mm	102,2 mm
15	gewählt	$s_2 = 65$ mm	$s_1 = 105$ mm

4.2 Konstruktionsvorschlag für Ankerschuh

Den vorgelegten Entwurfszeichnungen des AG wurde entnommen, dass der Ankerschuh die Vertikallasten über ein stählerne Nase mit einer Exzentrizität von 36 mm bezogen auf die Oberfläche der inneren Betonplatte auf der tragenden Konstruktion absetzt. Damit ergibt sich für ein mehrreihiges Dübelbild prinzipiell die Situation, dass für vertikal angreifende Lasten (Eigengewicht) das entstehende Versatzmoment an der oberen Reihe die Einwirkung aus Windsog abmindert, an der unteren Reihe jedoch zusätzlich zur Einwirkung aus Windsog wirkt.

Bemessung siehe Anhang B.

Für den oberen Elementrand ist eine Dübelgruppe mit 6 Stück in 2 Reihen mit horizontalen Achsabständen von 80 mm und vertikalen Achsabständen von 105 mm erforderlich. Für den unteren Elementrand sind 3 Dübel mit gleichen Achsabständen erforderlich. Der Abstand zum Betonrand darf 40 mm nicht unterschreiten. Die Bemessung der Stahlplatte ist nicht maßgebend. Die Lagerung der stählernen Grundplatte sollte in der Achse des Schwerpunktes des Dübelbildes erfolgen.

Bei der konstruktiven Durchbildung ist darauf zu achten, dass keine zusätzlichen Kräfte aus Zwang eingetragen werden.

Gastprof. Dr.-Ing. Frank Jesse
Lehrstuhl Massivbau

5 Literatur

[1] Eligehausen, R.; Mallée, R.; Rhem, G.: Befestigungstechnik. Eibl, J. (Hrsg.): *Beton-kalender 1997*. Berlin : Ernst & Sohn, 1997, Band 86, Teil II, S. 609-753

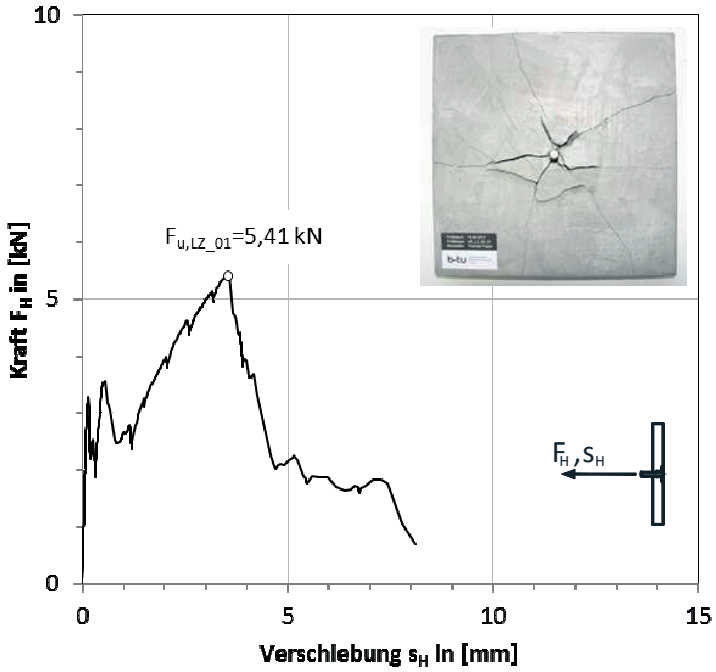
[2] Jesse, F.: *Statische Nachweise und Auslegung für Vakutex-Elemente*. Cottbus : LS Massivbau der BTU Cottbus, 2012, 29 S.

Gastprof. Dr.-Ing. Frank Jesse
Lehrstuhl Massivbau

Anlage A1: Versuchsdokumentation Längszug

Datum der Prüfung: 19.06.2012

Probe VK_LZ_90_01



(a) Kraft-Verformungs-Diagramm

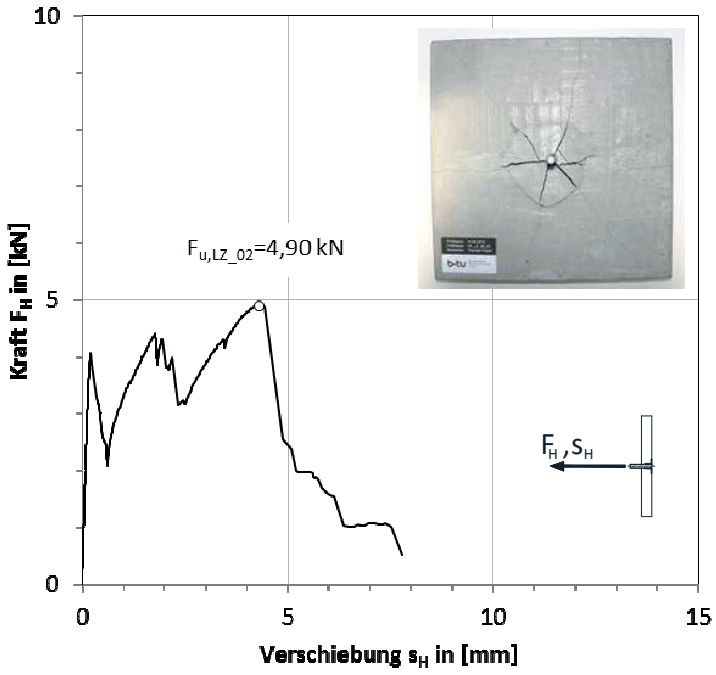
(b) Aufnahme von oben

Bild 5: Probekörper VK_LZ_90_01

Gastprof. Dr.-Ing. Frank Jesse
Lehrstuhl Massivbau

Datum der Prüfung: 19.06.2012

Probe VK_LZ_90_02



(a) Kraft-Verformungs-Diagramm

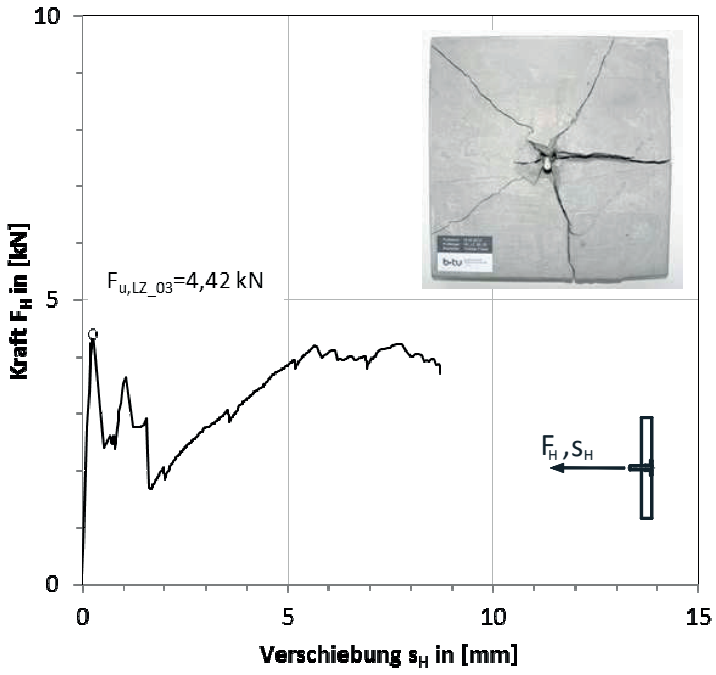
(b) Aufnahme von oben

Bild 9: Probekörper VK_LZ_90_02

Gastprof. Dr.-Ing. Frank Jesse
Lehrstuhl Massivbau

Datum der Prüfung: 19.06.2012

Probe VK_LZ_90_03



(a) Kraft-Verformungs-Diagramm

(b) Aufnahme von oben

Bild 10: Probekörper VK_LZ_90_03

Gastprof. Dr.-Ing. Frank Jesse
Lehrstuhl Massivbau

Proben VK_LZ_90_01 – VK_LZ_90_03

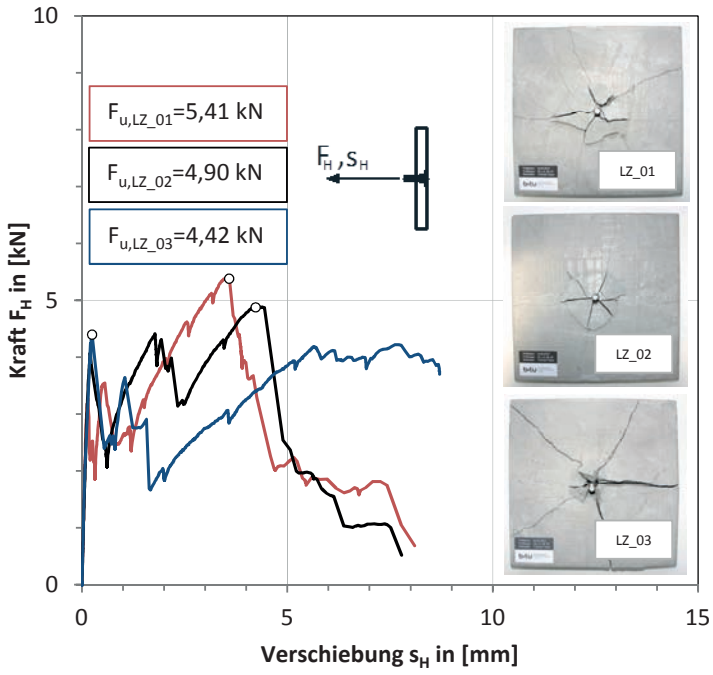


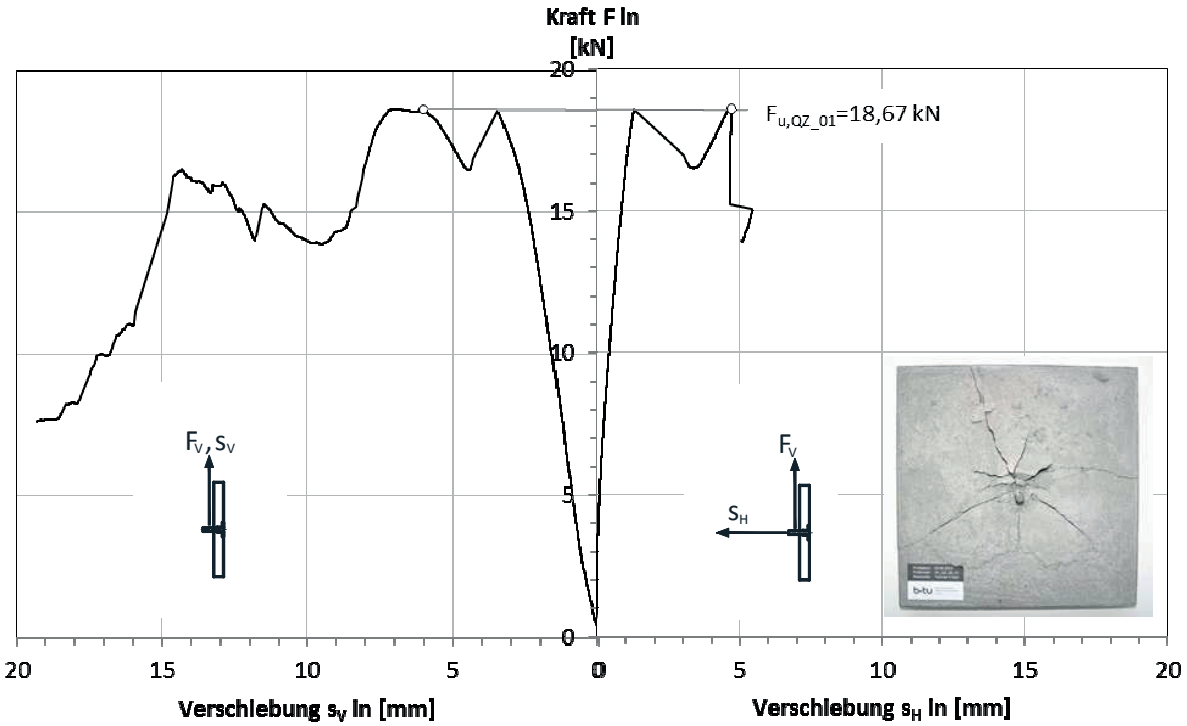
Bild 11: Last-Verformungs-Diagramm der Versuchskörper unter Längszug

Gastprof. Dr.-Ing. Frank Jesse
Lehrstuhl Massivbau

Anlage A2: Versuchsdokumentation Querzug

Datum der Prüfung: 29.06.2012

Probe VK_QZ_00_01



(a) Kraft-Verformungs-Diagramm

(b) Aufnahme von oben

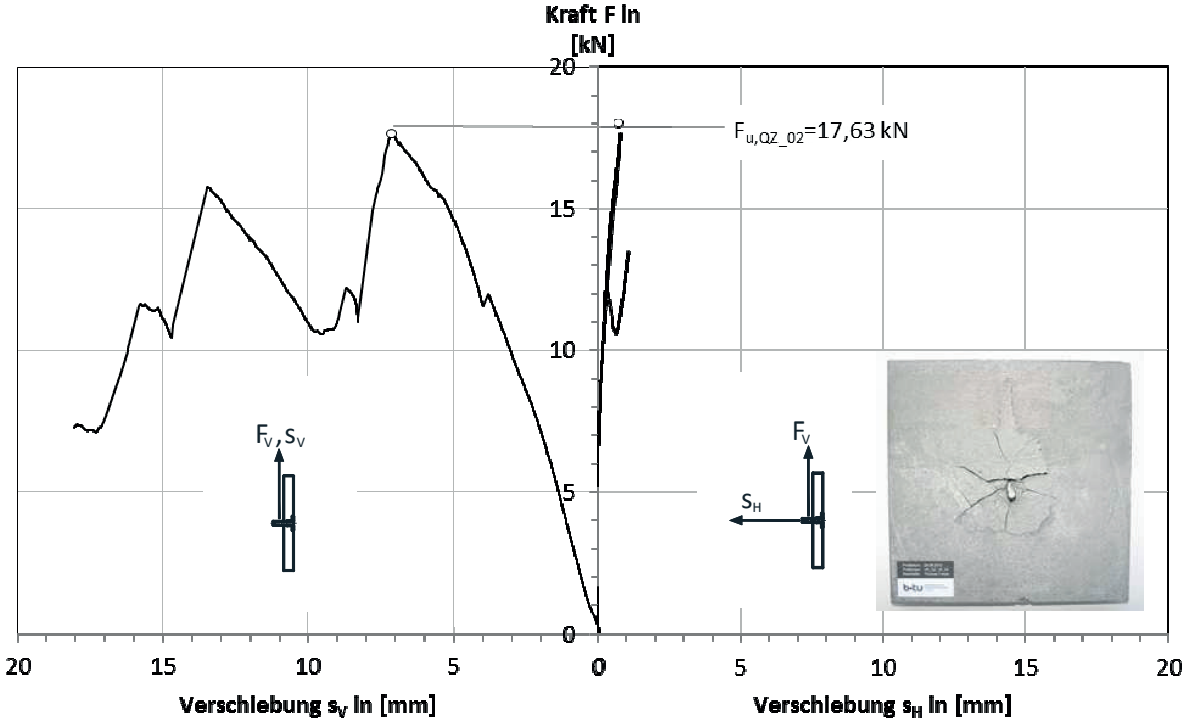
Bild 12: Probekörper VK_QZ_00_01

Gastprof. Dr.-Ing. Frank Jesse
Lehrstuhl Massivbau

Seite 18/27 vom 20.08.2012

Datum der Prüfung: 29.06.2012

Probe VK_QZ_00_02



(a) Kraft-Verformungs-Diagramm

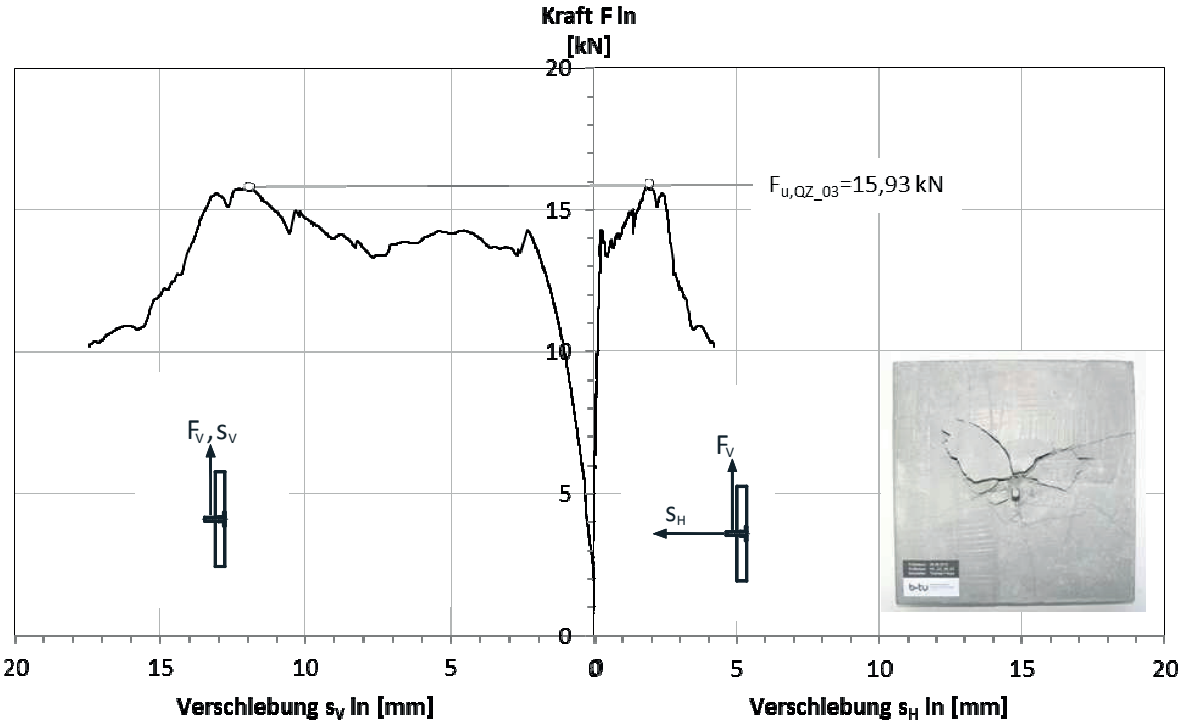
(b) Aufnahme von oben

Bild 13: Probekörper VK_QZ_00_02

Gastprof. Dr.-Ing. Frank Jesse
Lehrstuhl Massivbau

Datum der Prüfung: 29.06.2012

Probe VK_QZ_00_03



(a) Kraft-Verformungs-Diagramm

(b) Aufnahme von oben

Bild 14: Probekörper VK_QZ_00_03

Gastprof. Dr.-Ing. Frank Jesse
Lehrstuhl Massivbau

Proben VK_QZ_00_01 – VK_QZ_00_03

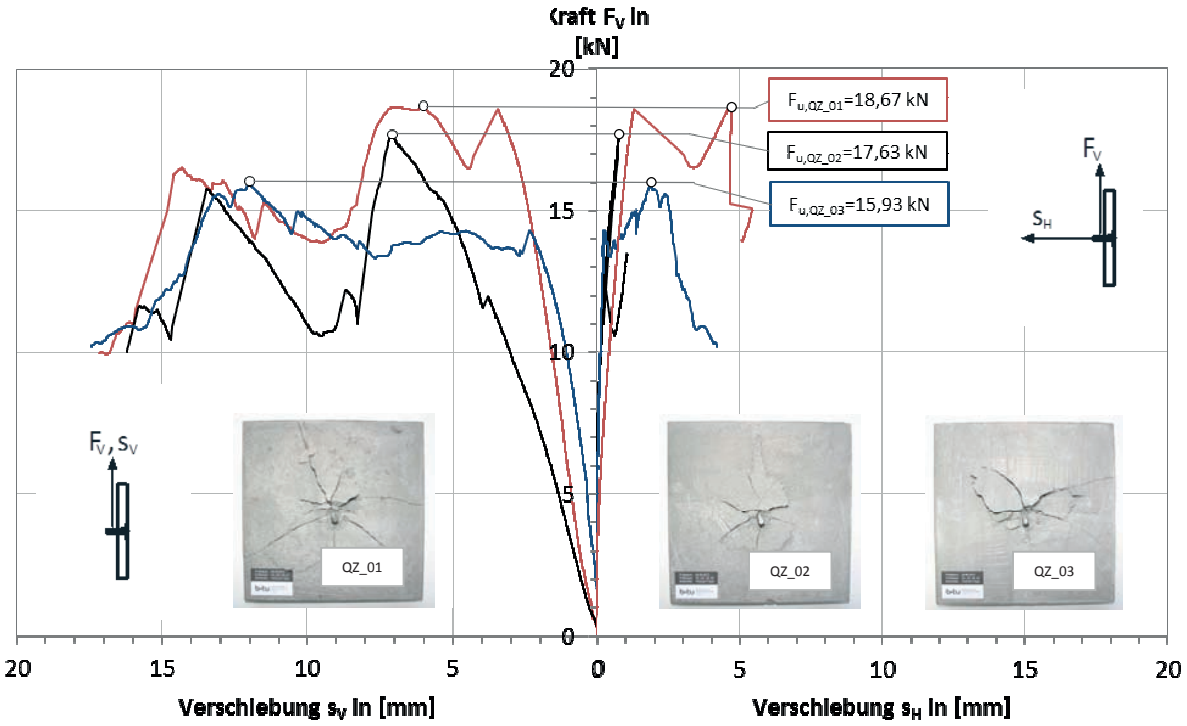


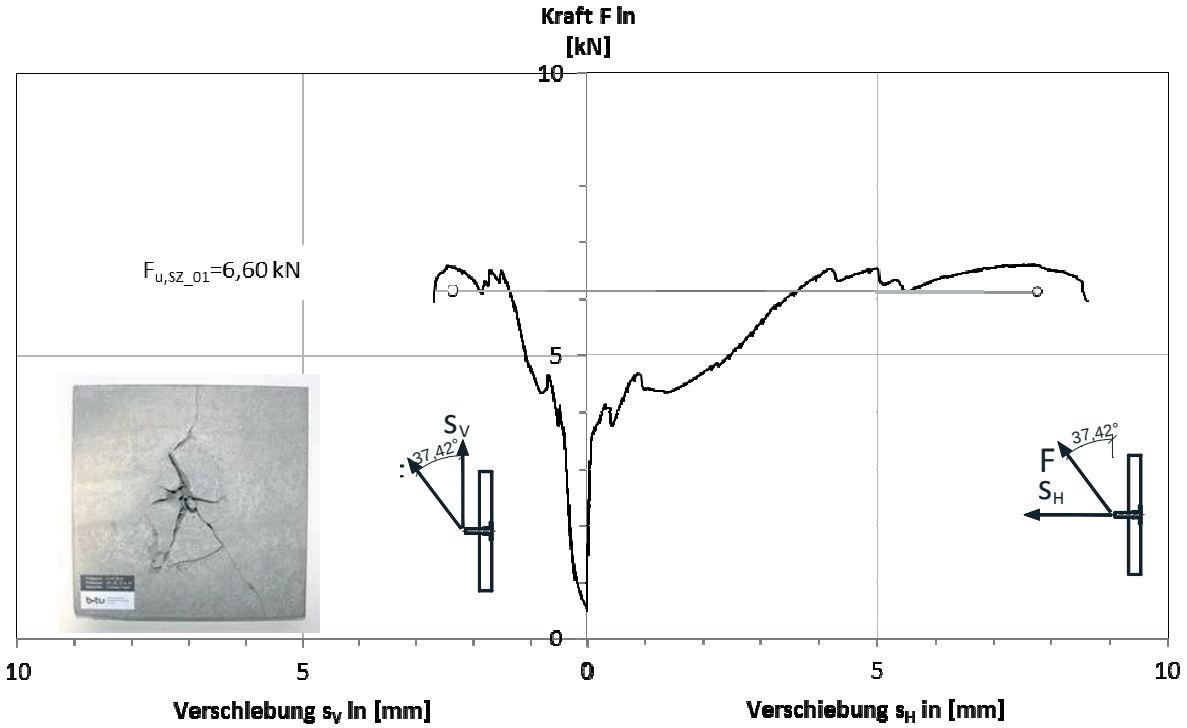
Bild 15: Last-Verformungs-Diagramm der Versuchskörper unter Querzug

Gastprof. Dr.-Ing. Frank Jesse
Lehrstuhl Massivbau

Anlage A3: Versuchsdokumentation Schrägzug

Datum der Prüfungen: 17.07.2012

Probe VK_SZ_37_01



(a) Kraft-Verformungs-Diagramm

(b) Aufnahme von oben

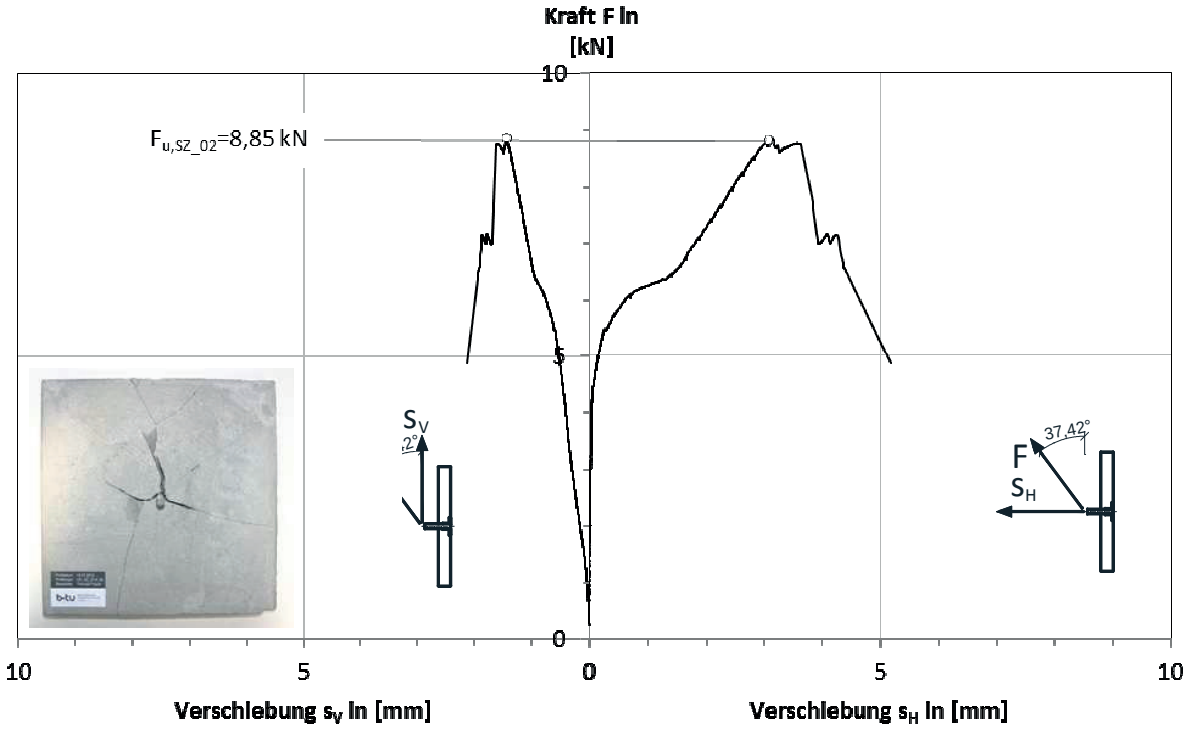
Bild 16: Probekörper VK_SZ_37_01

Gastprof. Dr.-Ing. Frank Jesse
Lehrstuhl Massivbau

Seite 22/27 vom 20.08.2012

Datum der Prüfung: 18.07.2012

Probe VK_SZ_37_02



(a) Kraft-Verformungs-Diagramm

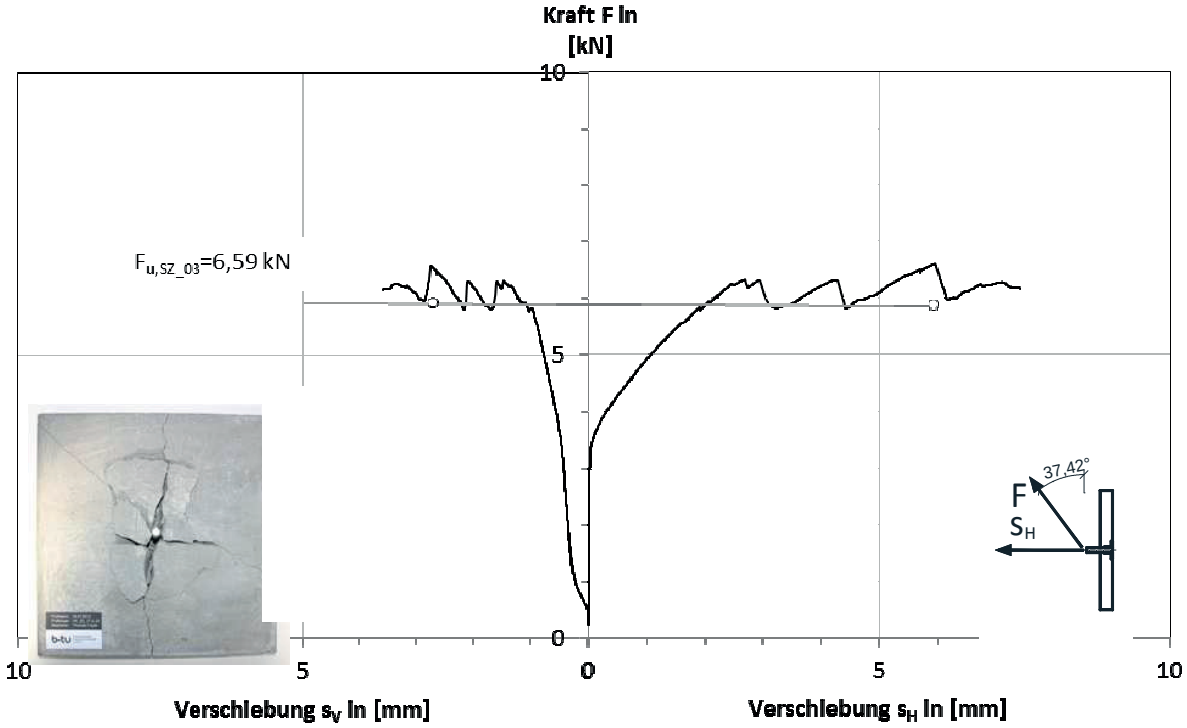
(b) Aufnahme von oben

Bild 17: Probekörper VK_SZ_37_02

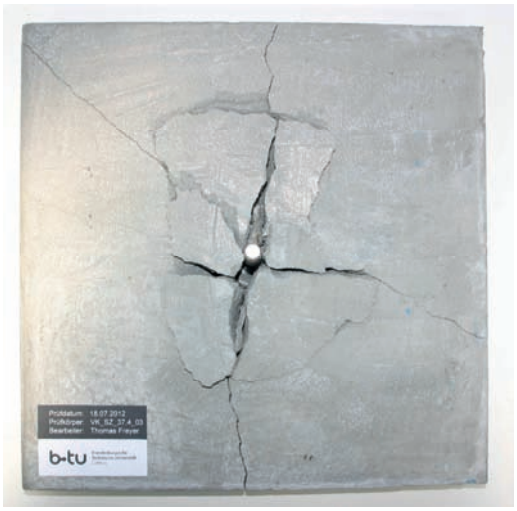
Gastprof. Dr.-Ing. Frank Jesse
Lehrstuhl Massivbau

Datum der Prüfung: 18.07.2012

Probe VK_SZ_37_03



(a) Kraft-Verformungs-Diagramm



(b) Aufnahme von oben

Bild 18: Probekörper VK_SZ_37_03

Gastprof. Dr.-Ing. Frank Jesse
Lehrstuhl Massivbau

Proben VK_SZ_37_01 – VK_SZ_37_03

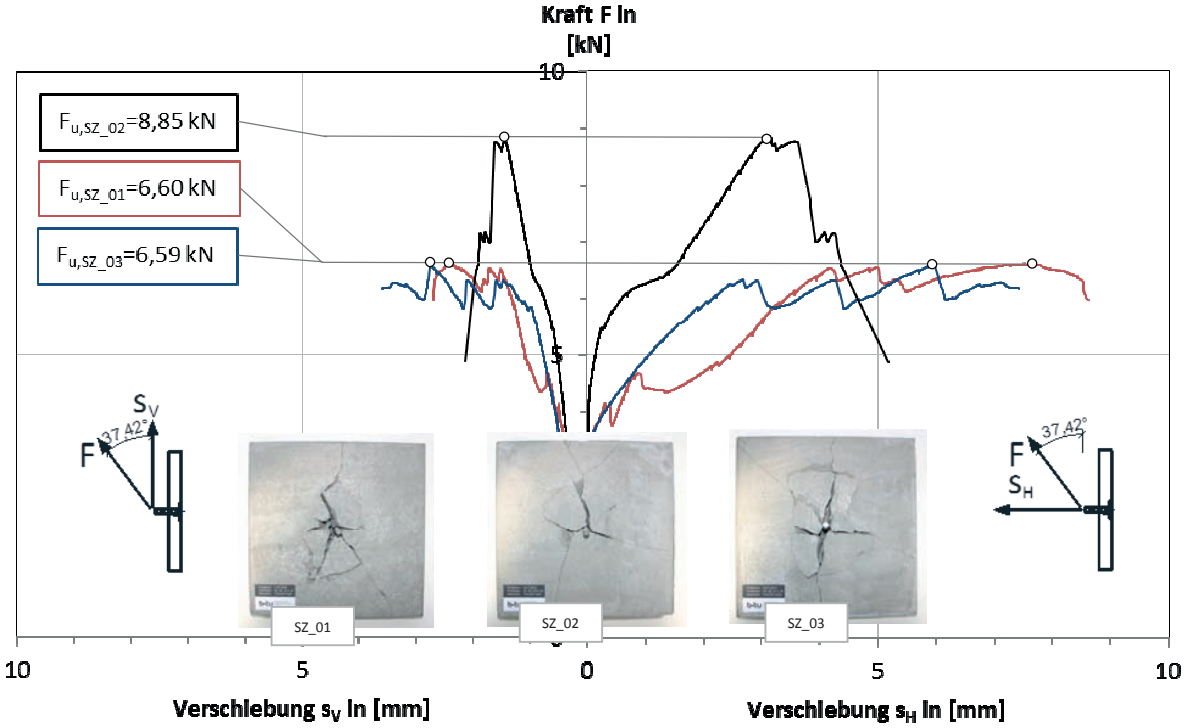


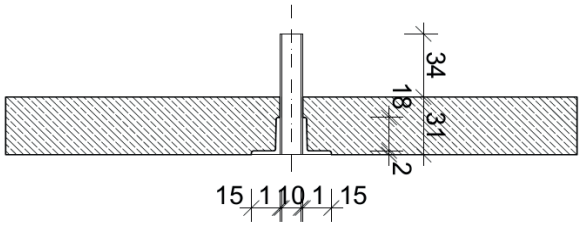
Bild 19: Last-Verformungs-Diagramm der Versuchskörper unter Schrägzug

BTU Cottbus
Fakultät 2
LS Massivbau

Anhang B: Bemessung der Dübel für Ankerschuhe

Aus den experimentell ermittelten Tragfähigkeiten wird nachfolgend eine mögliche Lösung auf der Basis eines stählernen Fassadenschuhs vorgeschlagen. Am oberen Elementrand trägt das Element Vertikallasten (aus Eigengewicht) und Horizontallasten (aus Wind) ab, am unteren Elementrand planmäßig nur Horizontallasten (aus Wind). Der Lastangriffspunkt liegt nicht einige Millimeter oberhalb der Plattenebene, so dass für die Vertikallasten zusätzlich ein Versatzmoment berücksichtigt werden muss. Für die Horizontallasten wird davon ausgegangen, dass die Ankerplatte als steif angenommen werden kann und die Kräfte in der Symmetrieebene in die Unterkonstruktion weitergegeben werden, so dass hier kein Versatzmoment berücksichtigt werden muss.

Eigenschaften Verbindungsmittel



Bemessungswert des Verbindungsmittels bei Querzug: $V_{Rd} := 15.1kN$

Bemessungswert des Verbindungsmittels bei Längszug: $H_{Rd} := 1.13kN$

Bemessungswert des Verbindungsmittels bei Schrägzug: $S_{Rd.37°} := 1.44kN$

Geometrie der Verbindungsmittel als Dübelgruppe

Anzahl Dübel: 3 oben; 3 unten $n_o := 3$ $n_u := 3$

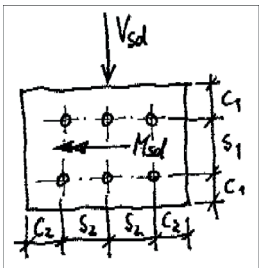
Randabstand:

vertikal: $c_{1.1} := 75mm$ (entspricht Mindestmaß 75 mm)

$c_{1.2} := 75mm$ (entspricht Mindestmaß 75 mm)

seitlich: $c_{2.1} := 40mm$ (entspricht Mindestmaß 40 mm)

$c_{2.2} := 40mm$ (entspricht Mindestmaß 40 mm)



Bauteildicke: $hr := 31mm$

Achsabstand:

vertikal: $s_1 := 105mm$ (gewählt, Mindestmaß 105 mm)

seitlich: $s_2 := 80mm$ (entspricht Mindestmaß 80 mm)

Dübeltyp: Presshülse M10 (ähnlich Hinterschnittdübel)

Verankerungstiefe: $h_{ef} := 31mm$

Lastangriffspunkt: $h_{LAP} := 5mm$

BTU Cottbus Fakultät 2 LS Massivbau	Seite: 26/27 Datum: 20.08.2012 Aufsteller: Frank Jesse

Beanspruchung

Bemessungswerte am oberen Elementrand je Ankerpunkt:

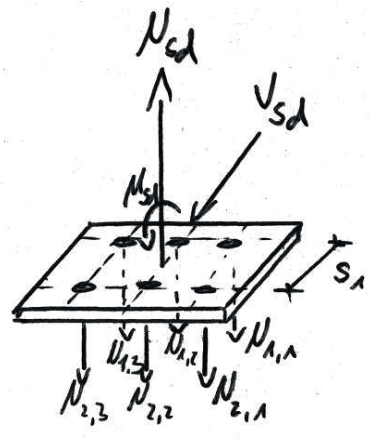
aus Eigengewicht $V_{Ed} := 3.85kN$ $V_{Sd} := V_{Ed} = 3.85 \cdot kN$

aus Wind $H_{Ed} := 2.64kN$ $N_{Sd} := H_{Ed} = 2.64 \cdot kN$

Versatzmoment $M_{Ed} := (h_{ef} + h_{LAP}) \cdot V_{Ed}$ $M_{Sd} := M_{Ed} = 0.139 \cdot kN \cdot m$

Dübelgruppe am oberen Elementrand

Zugbeanspruchung eines Dübels:
Ankerplatte wird als unendlich steif angenommen.
Berechnung der Belastung des höchstbelasteten Dübels:



aus ΣM = 0:

$$N_{Sd.1} := 0.5 \cdot N_{Sd} + \frac{M_{Sd}}{s_1} = 2.64 \cdot kN$$

aus ΣN = 0:

$$N_{Sd.2} := N_{Sd} - N_{Sd.1} = 0 \cdot kN$$

$N_{1.1} := \frac{1}{n_u} \cdot N_{Sd.1} = 0.88 \cdot kN$ $N_{1.2} := N_{1.1}$ $N_{1.3} := N_{1.1}$ untere Dübelreihe

$N_{2.1} := \frac{1}{n_o} \cdot N_{Sd.2} = 0.00 \cdot kN$ $N_{2.2} := N_{2.1}$ $N_{2.3} := N_{2.1}$ obere Dübelreihe

Höchstbelasteter Dübel:

$$N_{Sd.max} := \max(N_{1.1}, N_{1.2}, N_{1.3}, N_{2.1}, N_{2.2}, N_{2.3}) = 0.88 \cdot kN$$

Querbeanspruchung eines Dübels:

$$V_{Sd.max} := \frac{1}{n_o + n_u} \cdot V_{Sd} = 0.642 \cdot kN \qquad \alpha := \operatorname{atan}\left(\frac{V_{Sd.max}}{N_{Sd.max}}\right) = 36.1 \cdot °$$

Winkel α entspricht annähernd experimentell geprüfter Variante und kann daher direkt mit den experimentell ermittelten Tragfähigkeiten verglichen werden.

Schrägzugbeanspruchung:

$$S_{Ed.max} := \sqrt{N_{Sd.max}^2 + V_{Sd.max}^2} = 1.09 \cdot kN \qquad S_{Rd.max} := 1.44kN$$ Nachweis erfüllt

BTU Cottbus
Fakultät 2
LS Massivbau

Dübelgruppe am unteren Elementrand

Bei Winddruck erfolgt Kraftübertragung durch Flächenpressung zwischen Ankerplatte und Betonschale, hier offensichtlich nicht maßgebend und daher ohne Nachweis.

Bei Windsog erfolgt Lastabtrag durch reinen Längszug am Dübel (Annahme).

Beanspruchung:

$H_{Ed} := 2.93kN$ (entnommen aus Statik)

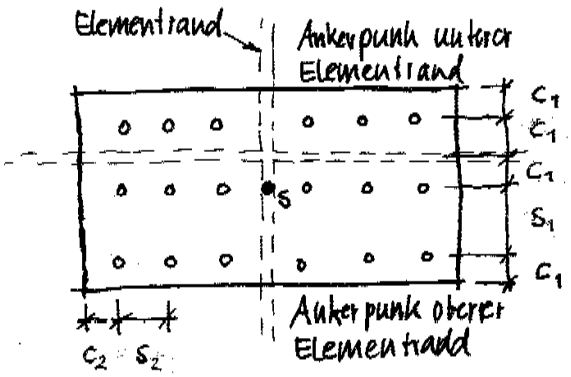
Geometrie

$n := 3$

Beanspruchung eines Dübels

$N_{Sd.1} := \frac{H_{Ed}}{n} = 0.98 \cdot kN$ $H_{Rd} = 1.13 \cdot kN$ Nachweis erfüllt

Anmerkung: Die vom Auftraggeber übermittelte Vorzugsvariante ist muss hinsichtlich Randabstände, Dübelbild und Dübelanzahl an das vorliegende Bemessungsergebnis angepasst werden. Die Grundplatte muss ausreichend ausgesteift sein (nicht Bestandteil dieser Bemessung). Für den oberen Elementrand sind je Ankerpunkt mindestens 6 Dübel mit den angenommenen Rand- und Achsabständen erforderlich, für den unteren Elemenrand mindestens 3 Dübel je Ankerpunkt.



8.3 Prüfbericht zur Bestimmung der Verbrennungswärme

MFPA Leipzig GmbH
Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle für Baustoffe, Bauprodukte und Bausysteme
Geschäftsbereich III - Baulicher Brandschutz
Dr.-Ing. Peter Nause
Arbeitsgruppe 3.1 - Brandverhalten von Bauprodukten
Dipl.-Phys. G. Brinkmann
Telefon +49 (0) 341 - 6582-175
brinkmann@mfpa-leipzig.de

Prüfbericht Nr. PB 3.1/12-009-1
als Grundlage für einen Klassifizierungsbericht

vom 22. Mai 2012
1. Ausfertigung

Auftraggeber:	Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Architektur-Institut Leipzig Karl-Liebknecht-Straße 132 04277 Leipzig
Auftragssache:	Bestimmung der Verbrennungswärme nach DIN EN ISO 1716*, Ausgabe November 2010
Gegenstand:	Fassadenelemente „vakutex“
Auftragsdatum:	20.02.2012
Probeneingang:	27.02.2012 (Eingangsnummer DZ 3.1/12-054)
Probenahme:	durch Auftraggeber
Kennzeichnung:	ohne
Prüfdatum:	10./21.05.2012
Bearbeiter:	Dipl.-Phys. Günter Brinkmann

Dieser Prüfbericht umfaßt 5 Textseiten.

Dieser Bericht darf nur ungekürzt vervielfältigt werden. Eine Veröffentlichung – auch auszugsweise – bedarf der vorherigen schriftlichen Zustimmung der MFPA Leipzig GmbH. Als rechtsverbindliche Form gilt die deutsche Schriftform mit Originalunterschriften und Originalstempel des/der Zeichnungsberechtigten.

Es gelten die Allgemeinen Geschäftsbedingungen (AGB) der MFPA Leipzig GmbH.

DAkkS Deutsche Akkreditierungsstelle D-PL-11021-01-00

Durch die DAkkS GmbH nach DIN EN ISO/IEC 17025 akkreditiertes Prüflaboratorium. Die Akkreditierung gilt für die in der Urkunde aufgeführten Prüfverfahren (in diesem Dokument mit * gekennzeichnet). Die Urkunde kann unter www.mfpa-leipzig.de eingesehen werden.
Nach Landesbauordnung (SAC 02) anerkannte und nach Bauproduktengesetz (NB 0800) notifizierte PÜZ-Stelle

Gesellschaft für Materialforschung und Prüfungsanstalt für das Bauwesen Leipzig mbH (MFPA Leipzig GmbH)

Sitz	Hans-Weigel-Str. 2b – 04319 Leipzig/Germany
Geschäftsführer	Prof. Dr.-Ing. Frank Dehn
Handelsregister	Amtsgericht Leipzig HRB 17719
USt-Id Nr.	DE 813200649
Tel.	+49 (0) 341 - 6582-0
Fax	+49 (0) 341 - 6582-135

1 Beschreibung des Materials

Bei dem zu prüfenden Bauprodukt handelte es sich nach Angaben des Auftraggebers um ein Fassadenelement mit der Bezeichnung „vakutex", welches aus Vakuum-Wärmedämmplatten aus Kieselsäure besteht, die beidseitig mit Betonplatten abgedeckt sind.

Nach Angaben des Auftraggebers weisen die Fassadenelemente „vakutex" folgenden Aufbau auf:

- Textilbeton (Feinbeton, Dichte 2166 kg/m³, mit eingelegtem textilen Gelege, Maschenweite 15 mm x 15 mm, Flächenmasse 0,2 kg/m²), Dicke 15 mm,
- Vakuum-Wärmedämmplatte, Dicke 30 mm, bestehend aus Stützkern aus pyrogener Kieselsäure (Dichte 190 kg/m³), Vliesumhüllung und Ummantelung aus mehrlagiger metallisierter Hochbarrierfolie,
- Aluminiumblech, Dicke 1,0 mm, Flächenmasse 2,7 kg/m²,
- Vakuum-Wärmedämmplatte, Dicke 30 mm, bestehend aus Stützkern aus pyrogener Kieselsäure (Dichte 190 kg/m³), Vliesumhüllung und Ummantelung aus mehrlagiger metallisierter Hochbarrierfolie,
- Textilbeton (Feinbeton, Dichte 2166 kg/m³, mit eingelegtem textilen Gelege, Maschenweite 15 mm x 15 mm, Flächenmasse 0,2 kg/m²), Dicke 30 mm.

Die Vliesumhüllung des Stützkerns der Vakuum-Wärmedämmplatten und die die Paneele randumlaufend verschließenden GFK-Rahmenprofile waren nicht Gegenstand der Prüfung.

Weitere Angaben zu den verwendeten Materialien und zur Anwendung lagen der Prüfstelle nicht vor.

2 Herstellung der Proben

Die Proben für die Brandprüfungen wurden in der Brandprüfstelle der MFPA Leipzig aus dem vom Auftraggeber bereitgestellten Material entnommen und gemäß DIN EN ISO 1716 Abschnitt 7 für die Prüfung vorbereitet.

3 Materialkennwerte

Kennwerte nach Angaben des Auftraggebers: siehe oben im Abschnitt 1

Von der MFPA Leipzig wurden folgende Kennwerte ermittelt:

Rohdichte Feinbeton:	etwa 1917 kg/m³
Flächenmasse Feinbeton für eine Dicke von 15 mm:	etwa 28,760 kg/m²
Flächenmasse Feinbeton für eine Dicke von 30 mm:	etwa 57,519 kg/m²
Flächenmasse des textilen Geleges:	etwa 0,350 kg/m²
Dicke des textilen Geleges:	etwa 0,82 mm (an Kreuzungspunkten etwa 1,60 mm)
Dicke der Vakuum-Wärmedämmplatte:	etwa 30 mm
Rohdichte des Stützkerns der Vakuum-Wärmedämmplatte:	etwa 191 kg/m³

Flächenmasse des Stützkerns:	etwa 5,737 kg/m²
Flächenmasse Hochbarrierfolie:	etwa 0,109 kg/m²
Dicke der Hochbarrierfolie:	etwa 0,10 mm

4 Versuchsdurchführung

Die Durchführung der Versuche erfolgte nach DIN EN ISO 1716 (Ausgabe November 2010).

An den obengenannten Bauprodukten Feinbeton, textiles Gelege, Stützkern und Hochbarrierfolie wurde die Bestimmung der PCS-Werte durchgeführt.
Die Proben sind vor der Prüfung nach DIN EN 13238 konditioniert worden.
Das Wasseräquivalent des verwendeten Kalorimeters betrug 9,226 kJ/K.

5 Prüfergebnisse

Die Prüfergebnisse sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengefaßt.

Tabelle: Bestimmung des PCS-Wertes in MJ/kg und in MJ/m²

- Feinbeton als wesentlicher Bestandteil,
- textiles Gelege als innerer unwesentlicher Bestandteil,
- Stützkern als wesentlicher Bestandteil,
- Hochbarrierfolie als innerer unwesentlicher Bestandteil,
- Aluminiumblech 1,0 mm als wesentlicher Bestandteil;

	Feinbeton Dicke 15 mm	textiles Gelege	Stützkern Dicke 30 mm	Hochbarrier-folie	-
Flächenmasse [kg/m²]	28,760	0,350	5,737	0,109	-
Einzelwerte der Verbrennungs-wärme Q_{PCS} [MJ/kg]	0,105 0,090 0,231	6,793 6,739 6,884	1,325 1,335 1,521	32,598 32,586 32,809	-
Mittelwert des Q_{PCS}-Wertes [MJ/kg]	0,142	6,805	1,394	32,664	-
Q_{PCSS}-Wert [MJ/m²]	4,084	2,382	7,997	3,560	-

MFPA Leipzig GmbH
SAC 02
NB 0800

	Feinbeton Dicke 30 mm	Aluminium-blech, Dicke 1,0 mm	-	-	-
Flächenmasse [kg/m²]	57,519	2,700	-	-	-
Einzelwerte der Verbrennungs-wärme Q_{PCS} [MJ/kg]	0,105 0,090 0,231	0,000 0,000 0,000	-	-	-
Mittelwert des Q_{PCS}-Wertes [MJ/kg]	0,142	0,000	-	-	-
Q_{PCSS}-Wert [MJ/m²]	8,168	0,000	-	-	-

Damit ergibt sich für das im Abschnitt 1 beschriebene Produkt als Ganzes ohne Berücksichtigung des Vlieses:

	Flächenmasse M_i [kg/m²]	Q_{PCSi} [MJ/m²]
Feinbeton Dicke 15 mm	28,760	4,084
textiles Gelege	0,350	2,382
Hochbarrierfolie	0,109	3,560
Stützkern Dicke 30 mm	5,737	7,997
Hochbarrierfolie	0,109	3,560
Aluminiumblech Dicke 1,0 mm	2,700	0,000
Hochbarrierfolie	0,109	3,560
Stützkern Dicke 30 mm	5,737	7,997
Hochbarrierfolie	0,109	3,560
textiles Gelege	0,350	2,382
Feinbeton Dicke 30 mm	57,519	8,168
gesamt:	101,589	47,250

$M = \Sigma M_i$ $Q_{PCSS} = \Sigma Q_{PCSi}$ $Q_{PCS} = Q_{PCSS}/M = 0,47$ MJ/kg

6 Besondere Hinweise

Dieser Prüfbericht enthält keine Einstufung in eine Baustoffklasse und ersetzt nicht den gegebenenfalls bauordnungsrechtlich erforderlichen Verwendbarkeitsnachweis nach Landesbauordnung.

Dieser Prüfbericht ersetzt nicht einen Klassifizierungsbericht nach DIN EN 13501-1.
Dieser Prüfbericht kann als Grundlage für einen Klassifizierungsbericht nach DIN EN 13501-1 verwendet werden.

Die Prüfergebnisse beziehen sich nur auf das Verhalten der Proben von einem Bauprodukt unter den speziellen Prüfbedingungen bei der Prüfung; sie sind nicht als einziges Kriterium zur Bewertung der potentiellen Brandgefahr des Bauprodukts im Anwendungsfall zu verstehen. Die Ergebnisse der Prüfungen beziehen sich ausschließlich auf die beschriebenen Prüfgegenstände und nicht auf die Grundgesamtheit.

Leipzig, den 22. Mai 2012

MFPA Leipzig GmbH

Dr.-Ing. P. Nause
Geschäftsbereichsleiter

Dipl.-Phys. G. Brinkmann
Prüfstellenleiter

8.4 Prüfbericht zur orientierenden Brandverhaltensprüfung nach dem SBI-Verfahren

MFPA Leipzig GmbH
Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle für Baustoffe, Bauprodukte und Bausysteme
Geschäftsbereich III - Baulicher Brandschutz
Dr.-Ing. Peter Nause
Arbeitsgruppe 3.1 - Brandverhalten von Bauprodukten
Dr.-Ing. W. Jank
Telefon +49 (0) 341 - 6582-120
jank@mfpa-leipzig.de

Prüfbericht Nr. PB 3.1/12-030-1

vom 04. Juni 2012
1. Ausfertigung

Auftraggeber:	Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig Karl-Liebknecht-Straße 132 04277 Leipzig
Antragssache:	Orientierende Prüfung nach dem SBI-Verfahren (Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten – Thermische Beanspruchung durch einen einzelnen brennenden Gegenstand für Bauprodukte mit Ausnahme von Bodenbelägen) nach DIN EN 13823, Ausgabe Dezember 2010
Gegenstand:	Fassadenelement aus Textilbeton und Vakuumdämmung
Auftragsdatum:	29.02.2012
Probeneingang:	08.05.2012, Proben-Nr. DZ 3.1/12-150
Probennahme:	Auftraggeber
Kennzeichnung:	keine
Prüfdatum:	23.05.2012
Bearbeiter:	Dr. W. Jank

Dieses Dokument besteht aus 4 Seiten, 3 Anlagen mit 12 Seiten.

Dieser Bericht darf nur ungekürzt vervielfältigt werden. Eine Veröffentlichung – auch auszugsweise – bedarf der vorherigen schriftlichen Zustimmung der MFPA Leipzig GmbH. Als rechtsverbindliche Form gilt die deutsche Schriftform mit Originalunterschriften und Originalstempel des/der Zeichnungsberechtigten.

Es gelten die Allgemeinen Geschäftsbedingungen (AGB) der MFPA Leipzig GmbH.

ilac-MRA DAkkS Deutsche Akkreditierungsstelle D-PL-11021-01-00

Durch die DAkkS GmbH nach DIN EN ISO/IEC 17025 akkreditiertes Prüflaboratorium. Die Akkreditierung gilt für die in der Urkunde aufgeführten Prüfverfahren (in diesem Dokument mit * gekennzeichnet). Die Urkunde kann unter www.mfpa-leipzig.de eingesehen werden.
Nach Landesbauordnung (SAC 02) anerkannte und nach Bauproduktengesetz (NB 0800) notifizierte PÜZ-Stelle.

Gesellschaft für Materialforschung und Prüfungsanstalt für das Bauwesen Leipzig mbH (MFPA Leipzig GmbH)

Sitz: Hans-Weigel-Str. 2b – 04319 Leipzig/Germany
Geschäftsführer: Prof. Dr.-Ing. Frank Dehn
Handelsregister: Amtsgericht Leipzig HRB 17719
USt-Id Nr.: DE 813200649
Tel.: +49 (0) 341 - 6582-0
Fax: +49 (0) 341 - 6582-135

1 Beschreibung der Produkte und Verwendung

Bei dem zu prüfenden Bauprodukt handelte es sich nach Angaben des Auftraggebers um ein Fassadenelement aus Textilbeton und Vakuumdämmung. Der genaue Aufbau und die verwendeten Materialien sind Anlage 1 zu entnehmen.

Die Farbe des Oberfläche war grau.

2 Herstellung der Proben

Das vorbezeichnete Produkt, wurde durch Mitarbeiter des Auftraggebers für die Prüfung aufgebaut.

- schmaler Probenflügel 495 mm x 1500 mm x Dicke mm
- breiter Probenflügel 1000 mm x 1500 mm x Dicke mm

Der große Flügel hatte 200 mm aus der Ecke und 500 mm von unten eine Stoßfuge, die mit Steinwolle und einer Brandschutzschnur ausgefüllt waren.

Die Probe wurde ohne Abstand mit einer CaSi-Platten hinterlegt.

3 Materialkennwerte

Von der MFPA Leipzig wurden folgende Kennwerte ermittelt:

Dicke gesamt:	ca. 110 mm
Dicke Textilbeton, Vorderseite:	ca. 30 mm
Rückseite:	ca. 15 mm
Dämmung:	30 mm Vakuum-Isolations-Paneel
	25 mm Vakuum-Isolations-Paneel

4 Versuchsdurchführung

Vor der Prüfung wurden die Proben nach EN 13238 konditioniert.

Die Durchführung der Versuche erfolgte nach DIN EN 13823, Ausgabe Dezember 2010.

MFPA Leipzig GmbH III
SAC 02
NB 0800

5 Prüfergebnisse

Die Prüfergebnisse sind in den nachfolgenden Tabellen und Anlage 2 zusammengefasst.

Tabelle: 1 Prüfung im SBI-Gerät gemäß DIN EN 13823

Probekörper: Fassadenelement aus Textilbeton und Vakuumdämmung
hinterlegt ohne Abstand mit Platten aus Calciumsilikat

Proben-bezeichnung	FIGRA $_{0,2/0,4}$ [W/s]	THR_{600} [MJ]	LFS	SMOGRA [m²/s²]	TSP_{600} [m²]	brennend abfallende Teile	brennend abfallende Teile > 10 s
DZ12150A	3,0/0,0	0,03	nein	0,0	10,9	nein	nein
DZ12150B	0,0/0,0	0,18	nein	0,0	11,2	nein	nein

Probe A: dicke Textilbetonplatte auf der Brennerseite
Probe B: dünne Textilbetonplatte auf der Brennerseite

Beobachtungen:

Probekörper: A	Beobachtungen
ca. 6:30	Schwarzfärbung der Oberfläche im Bereich der Brennerflamme
ca. 24:50	starke Abplatzung der unteren kleinen Platte des großen Flügels

Probekörper: B	Beobachtungen
ca. 6:30	Schwarzfärbung der Oberfläche im Bereich der Brennerflamme

MFPA Leipzig GmbH III
SAC 02
NB 0800

6 Besondere Hinweise

Die orientierenden Prüfergebnisse sind kein Nachweis für die Einstufung der Bauprodukte in eine Klasse nach DIN EN 13501-1.

Diese Prüfergebnisse können ***nicht*** als Grundlage für die Erstellung eines Klassifizierungsberichtes verwendet werden.

Die Prüfergebnisse beziehen sich auf das Verhalten der Proben unter den speziellen Testbedingungen; sie stellen nicht das alleinige Kriterium zur Beurteilung des Brandgefährdungspotentials der Materialien im Gebrauch dar.

In Verbindung mit anderen Stoffen kann sich das Brandverhalten ändern.

Dieser Prüfbericht ist kein bauordnungsrechtlicher Verwendbarkeitsnachweis.

Die Ergebnisse der orientierenden Prüfungen erfüllen die Werte für die Klass A2-s1, d0.

Die Ergebnisse der Prüfungen beziehen sich ausschließlich auf die beschriebenen Prüfgegenstände und nicht auf die Grundgesamtheit.

Dieses Dokument ersetzt keinen Konformitäts- oder Verwendbarkeitsnachweis im Sinne der Bauordnungen (national/ europäisch).

Leipzig, den 04. Juni 2012

MFPA Leipzig GmbH III

i.V.

Dr.-Ing. Peter Nause
Geschäftsbereichsleiter

Dipl.-Phys. G. Brinkmann
Prüfstellenleiter

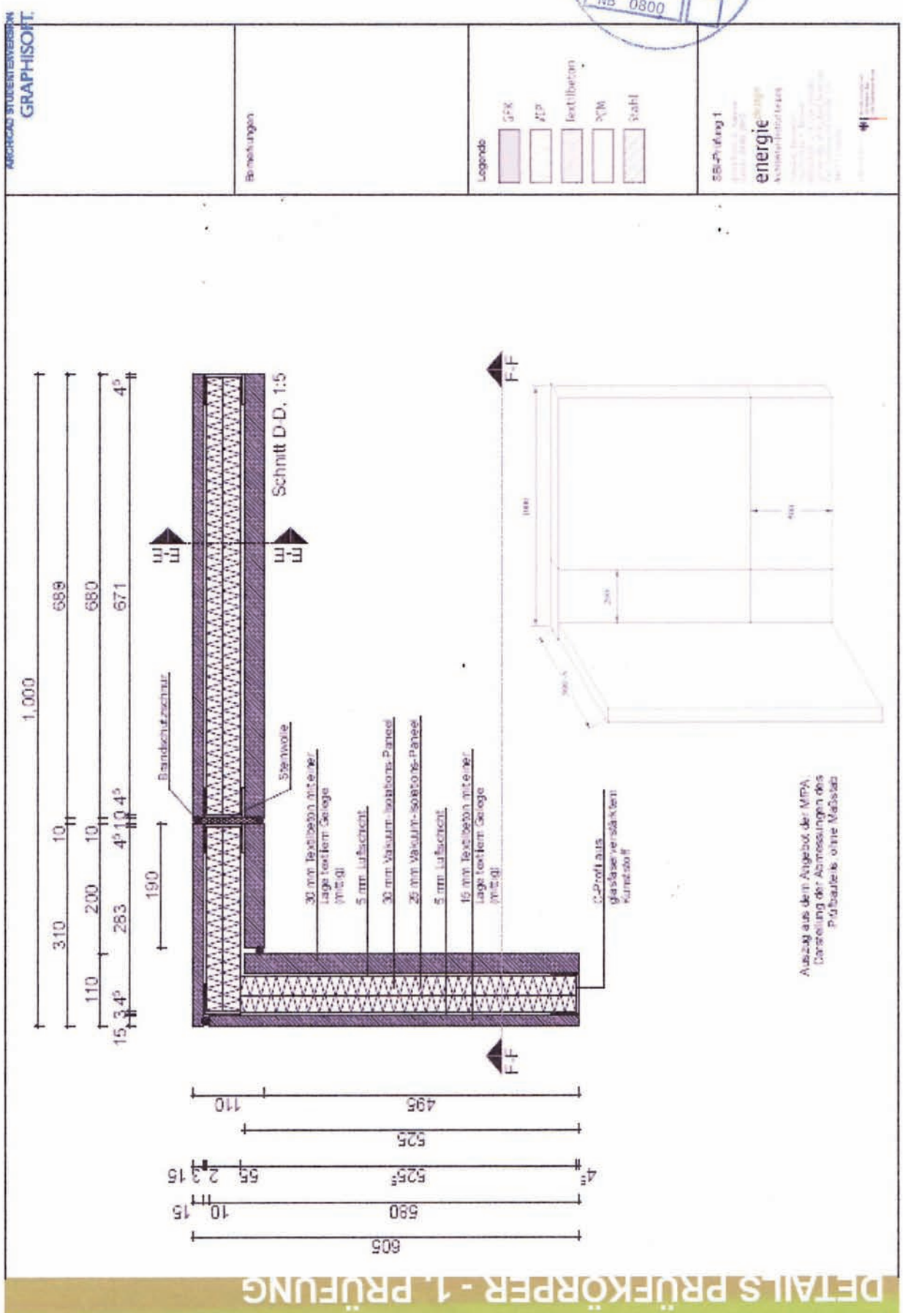
Dr.-Ing. W. Jank
Bearbeiter

MFPA Leipzig GmbH
Baulicher Brandschutz

Nr. PB 3.1/12-030-1
vom 04. Juni 2012

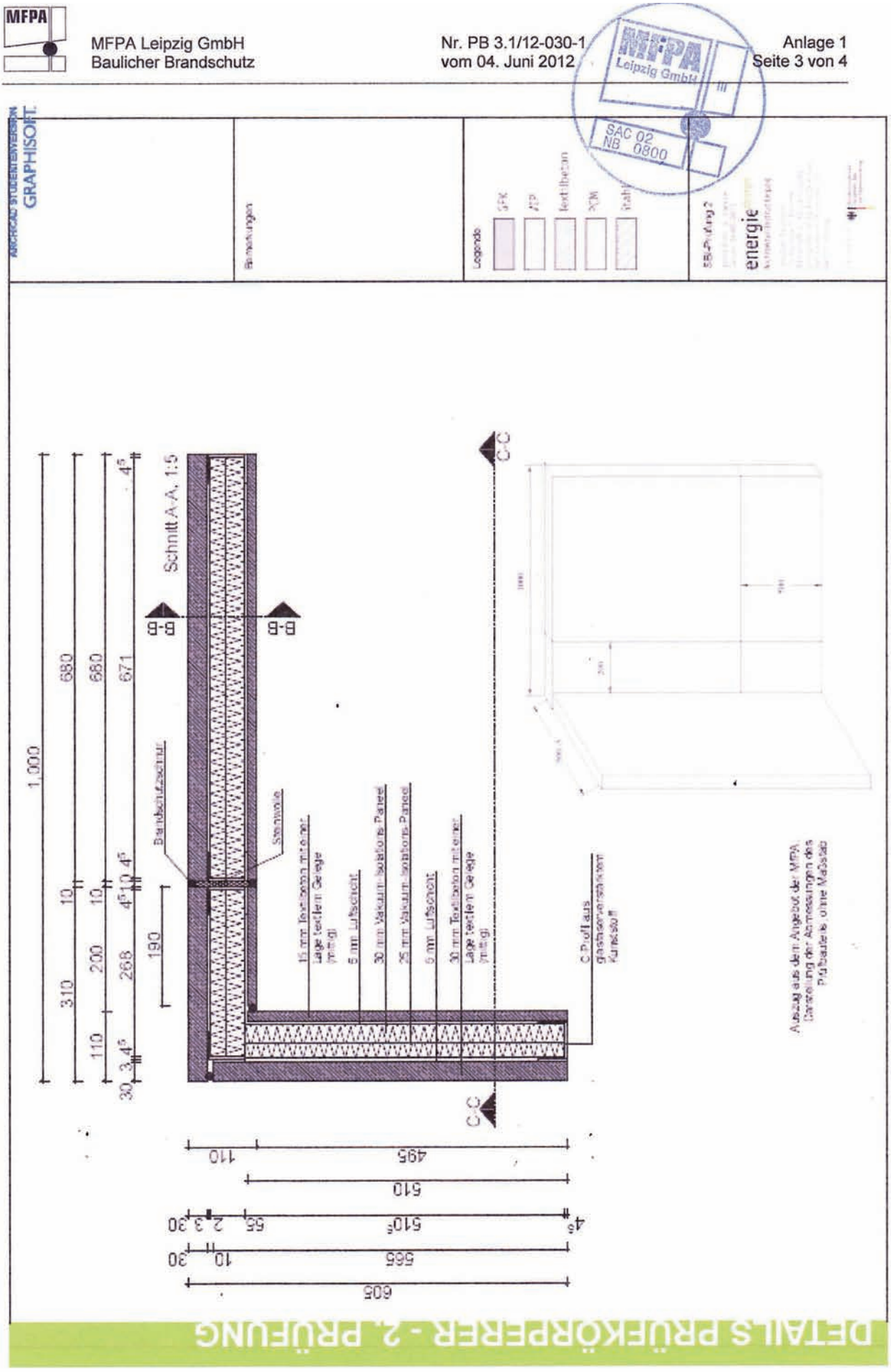
Anlage 1
Seite 1 von 4

MFPA Leipzig GmbH III
SAC 02
NB 0800



DETAILS PRÜFKÖRPER - 1. PRÜFUNG

MFPA
MFPA Leipzig GmbH
Baulicher Brandschutz
Nr. PB 3.1/12-030-1
vom 04. Juni 2012
Anlage 1
Seite 2 von 4
Leipzig GmbH
SAC 02
Bemerkungen
Legende
energie
Schnitt E-E, 1:5
Schnitt F-F, 1:5
E-E
D-D
491
500
10
981
990
1.491
1.500
Fugen
Brandschutzschnur
und nichtbrennbare
Mineralwolle
DETAIL 5 PRÜFKÖRPER - 1. PRÜFUNG


ARCHICAD STUDENTENVERSION
GRAPHISOFT
Bemaßungen
Legende
energie
Schnitt A-A, 1:5
B-B
C-C
1.000
680
671
310
200
110
190
Brandschutzsteine
Stahlwinkel
15 mm Textilbeton mit einer Lage textilen Gelege (mittig)
5 mm Luftschicht
30 mm Vakuum-Isolations-Paneel
25 mm Vakuum-Isolations-Paneel
5 mm Luftschicht
30 mm Textilbeton mit einer Lage textilen Gelege (mittig)
C-Profilaus glasfaserverstärktem Kunststoff
Auszug aus dem Angebot der MFPA
Darstellung der Abmessungen des Prüfkörpers ohne Maßstab
110
495
610
565
605
DETAIL S PRÜFKÖRPERER - 2. PRÜFUNG

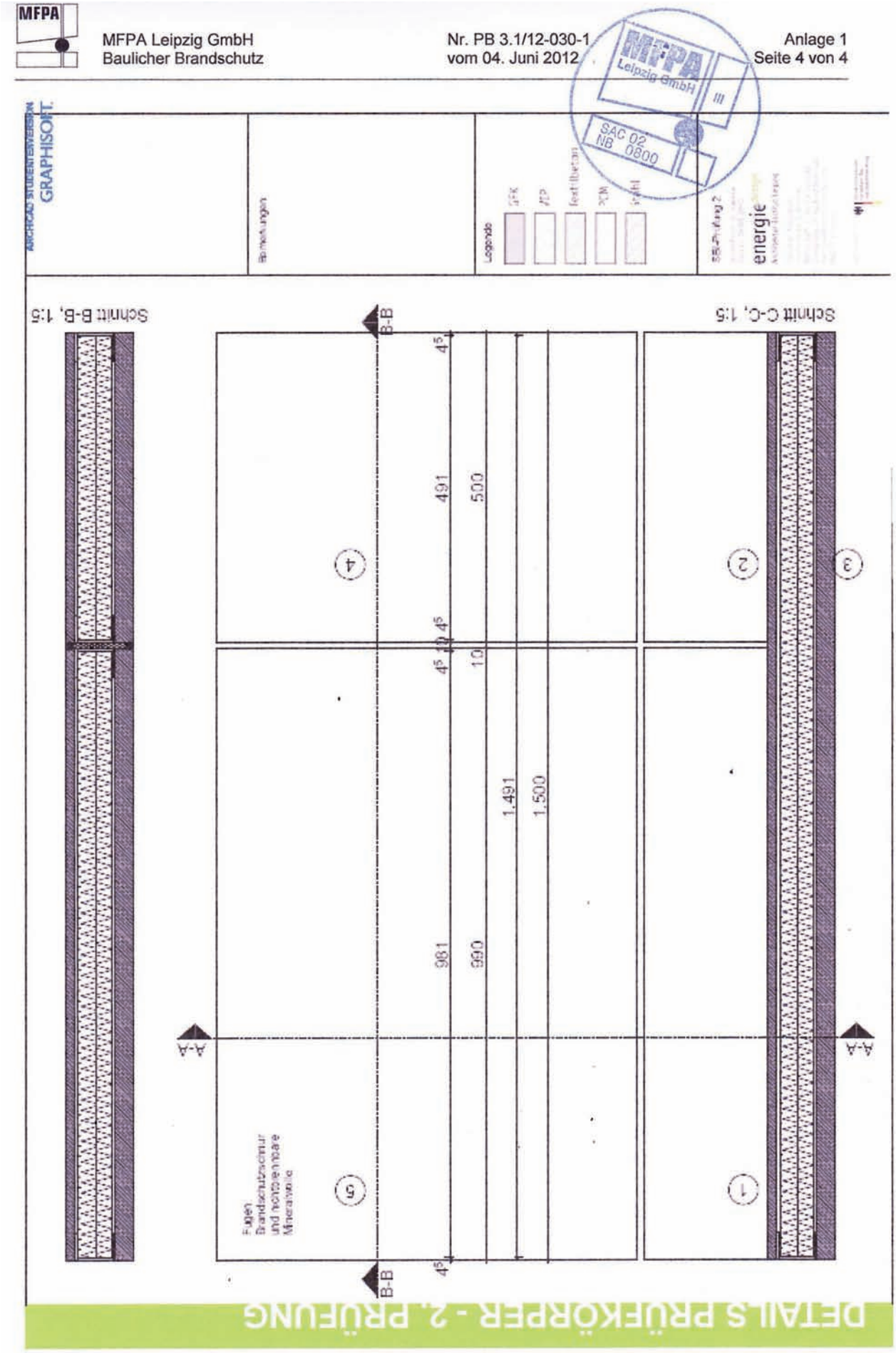

MFPA
MFPA Leipzig GmbH
Baulicher Brandschutz
Nr. PB 3.1/12-030-1
vom 04. Juni 2012
Anlage 1
Seite 4 von 4
MFPA Leipzig GmbH
SAC 02
NB 0800
ARCHICAD STUDENTENVERSION
GRAPHISOFT.
Bemerkungen
Legende
energie
Schnitt B-B, 1:5
Schnitt C-C, 1:5
B-B
A-A
45
491
500
10
1.491
1.500
981
990
Fugen
Brandschutzschnur
und nichtbrennbare
Mineralwolle
DETAIL 5 PRUEFKOERPER - 2. PRUEFUNG

Diagramme und Kennwerte des SBI-Versuches

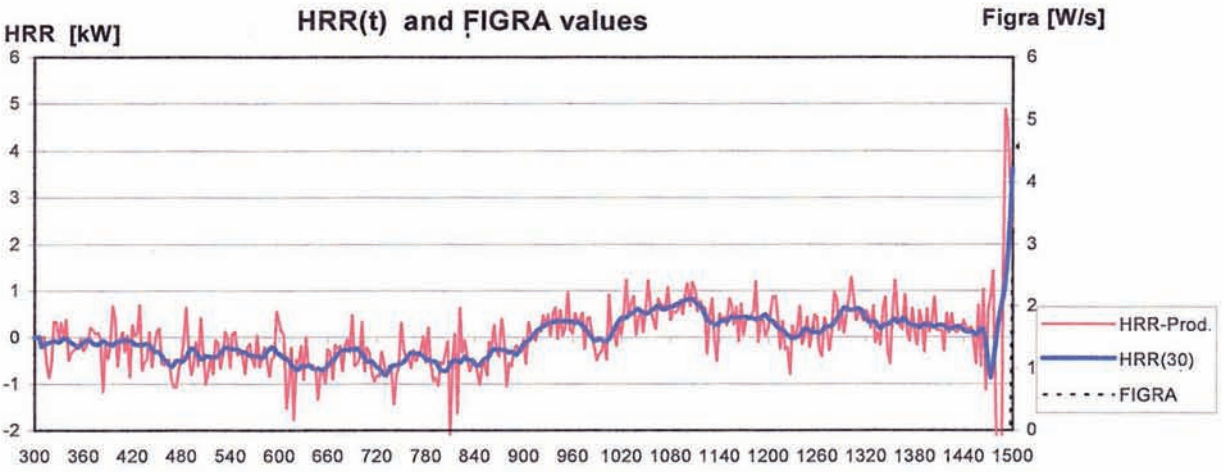
SBI-Versuch am: 23.05.2010

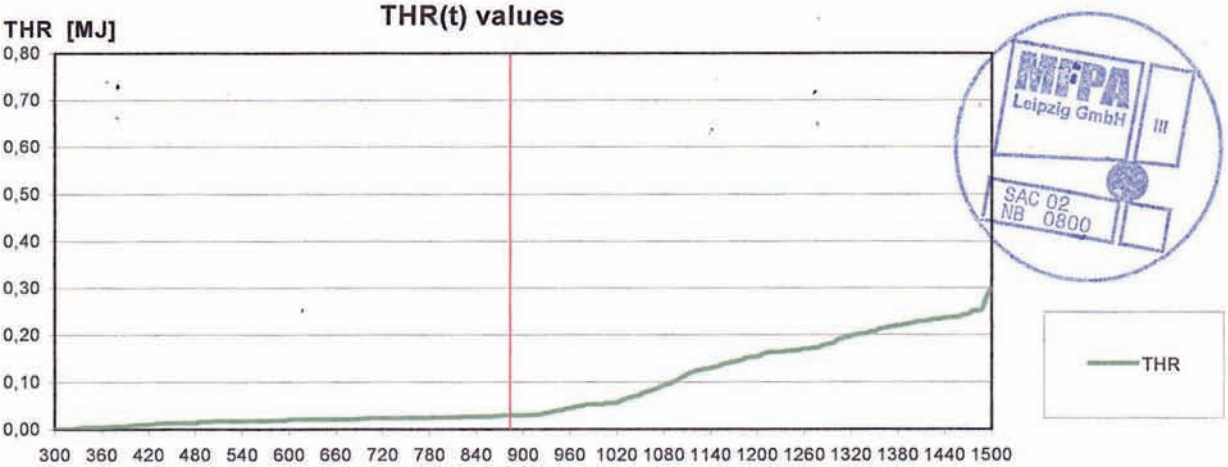
Probekörper: DZ12150A

Bezeichnung: Fassadenelement aus Textilbeton und Vakuumdämmung
Textilbeton, Vorderseite: Dicke 30 mm zum Brenner
Dämmung: Vakuum-Isolations-Paneel, Dicke 30 mm und 25 mm
Probenanordnung: ohne Abstand mit Calziumsilikatplatten hinterlegt

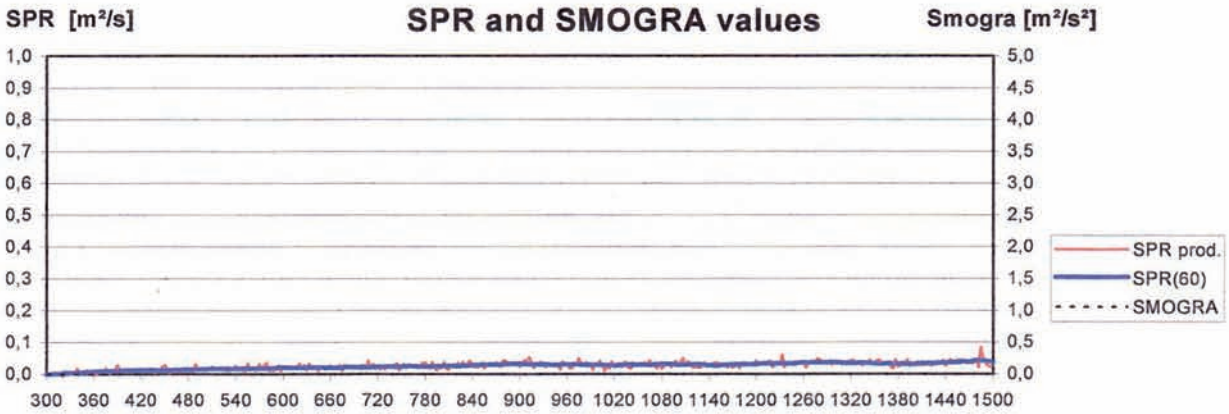
Versuch abgebrochen nach: nein

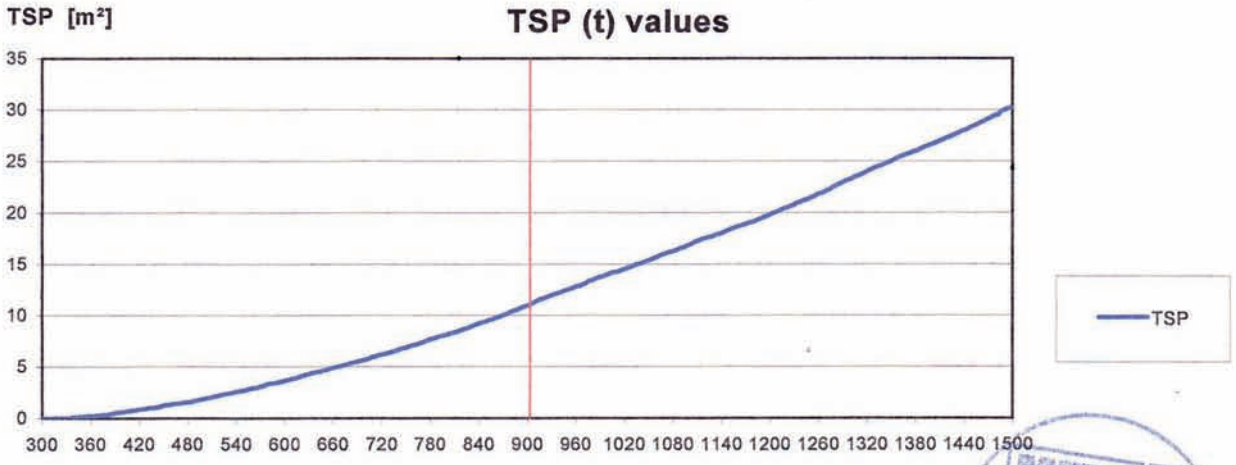
$FIGRA_{0,2\ MJ}$ [W/s]:	3,0
$FIGRA_{0,4\ MJ}$ [W/s]:	0,0
THR_{600} [MJ] [W/s]:	0,03
LFS:	0
SMOGRA [m²/s²]:	0,0
TSP_{600} [m²]:	10,9
brennend abfallende Teile:	N
brennend abfallende Teile > 10 s:	N





MFPA Leipzig GmbH
SAC 02
NB 0800





MFPA Leipzig GmbH
SAC 02
NB 0800

Diagramme und Kennwerte des SBI-Versuches

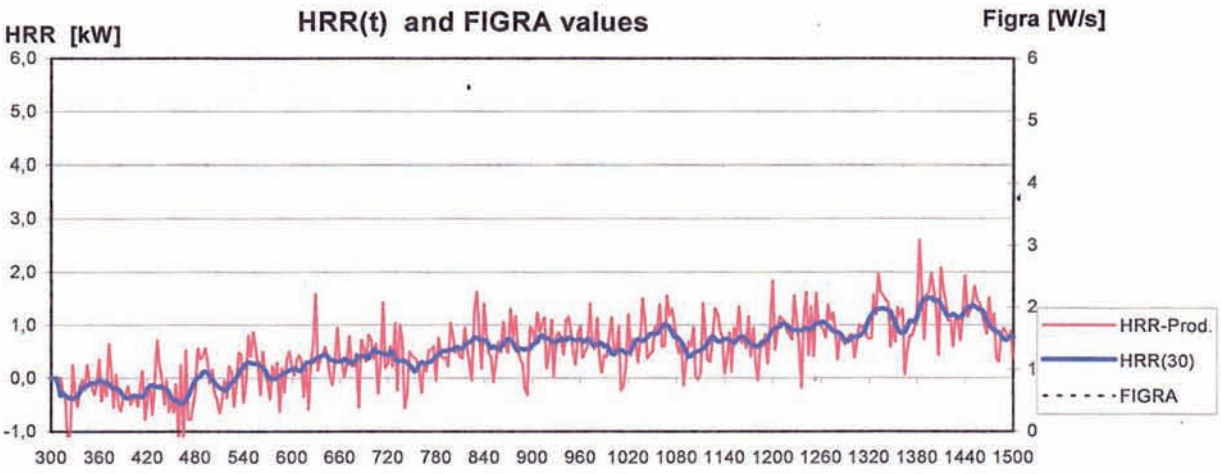
SBI-Versuch am: 23.05.2010

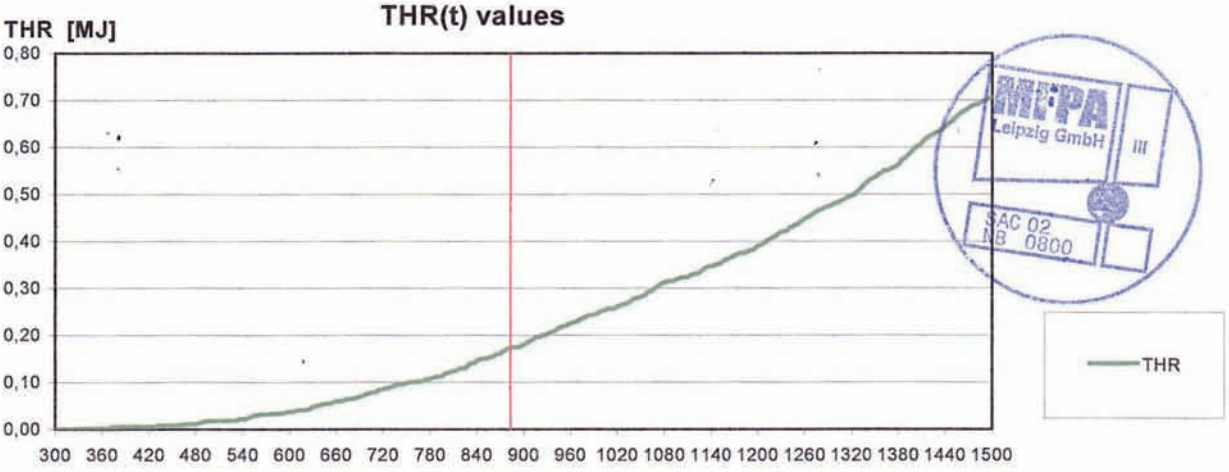
Probekörper: DZ12150B

Bezeichnung: Fassadenelement aus Textilbeton und Vakuumdämmung
Textilbeton, Vorderseite: Dicke 15 mm zum Brenner
Dämmung: Vakuum-Isolations-Paneel, Dicke 30 mm und 25 mm
Probenanordnung: ohne Abstand mit Calziumsilikatplatten hinterlegt

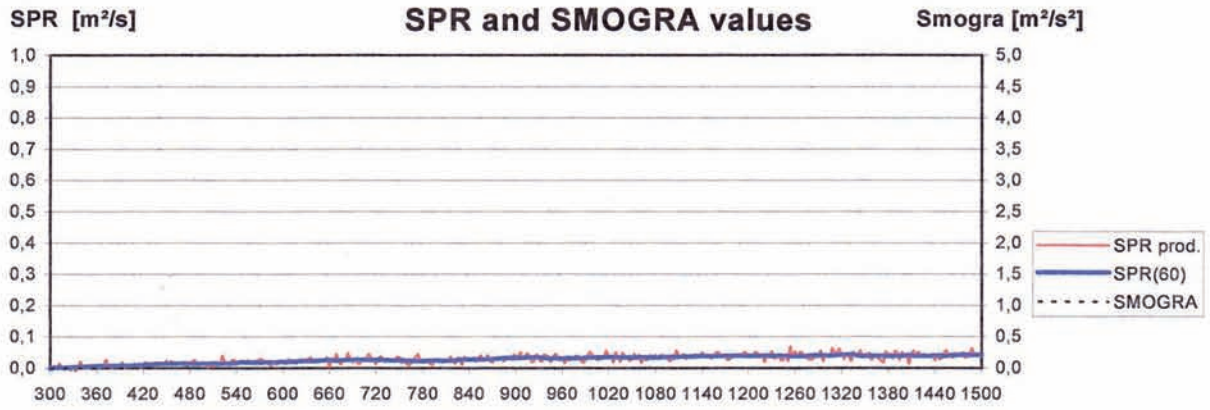
Versuch abgebrochen nach: nein

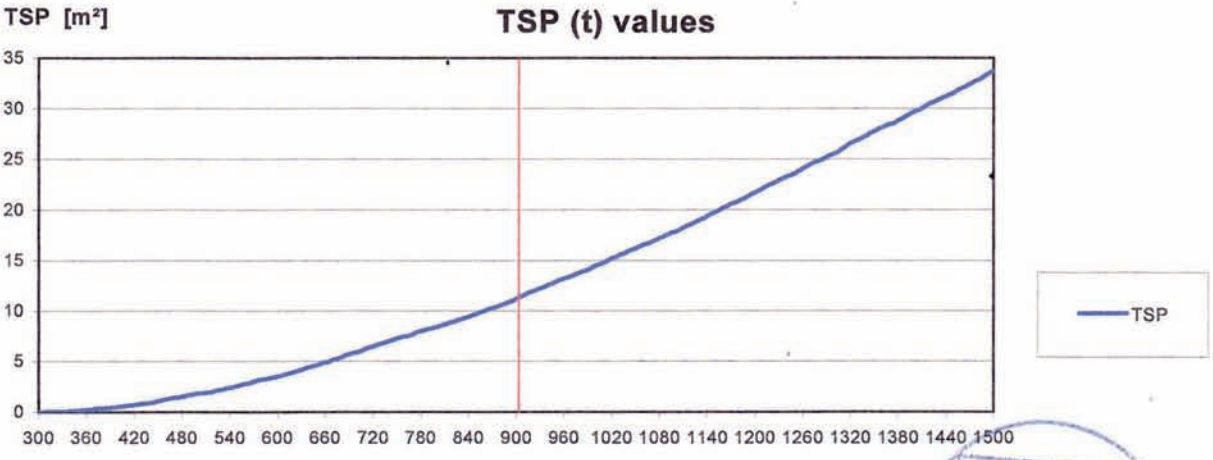
FIGRA$_{0,2\ MJ}$ [W/s]:	0,0
FIGRA$_{0,4\ MJ}$ [W/s]:	0,0
THR$_{600}$ [MJ] [W/s]:	0,18
LFS:	0
SMOGRA [m²/s²]:	0,0
TSP$_{600}$ [m²]:	11,2
brennend abfallende Teile:	N
brennend abfallende Teile > 10 s:	N





MFPA Leipzig GmbH
SAC 02
NB 0800





MFPA Leipzig GmbH
SAC 02
NB 0800

Foto 2: Hinterlegung mit CaSi-Platten ohne Abstand

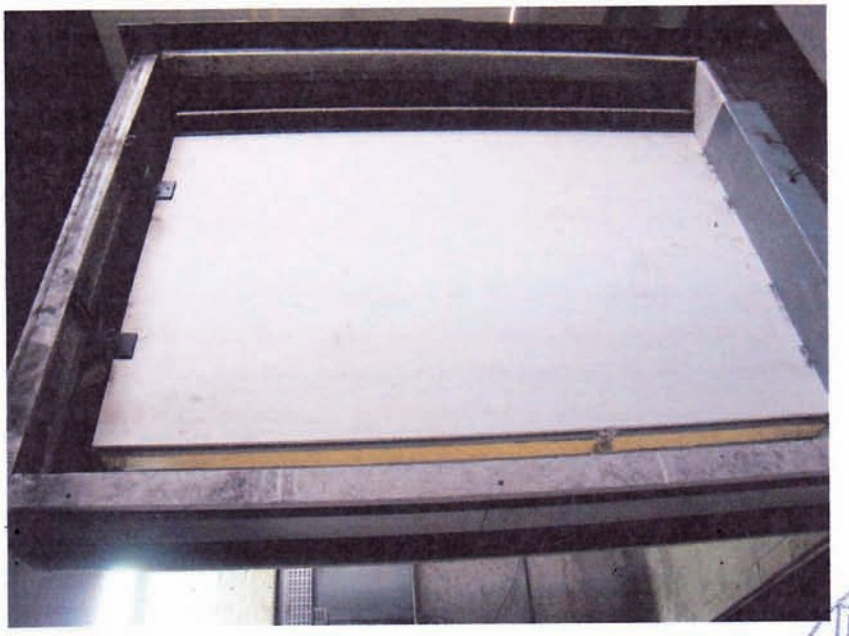


Foto 1: Ansicht der Hinterlegungsplatten Eckansicht

MFPA Leipzig GmbH III
SAC 02
NB 0800

Foto 5: Prüfkörper A,
Ansicht der Brennerecke nach der Brandprüfung

Foto 4: Prüfkörper A,
Ansicht der Probe nach der Brandprüfung

Foto 3: Prüfkörper A,
Ansicht des großen Flügels vor der Brandprüfung

MFPA Leipzig GmbH

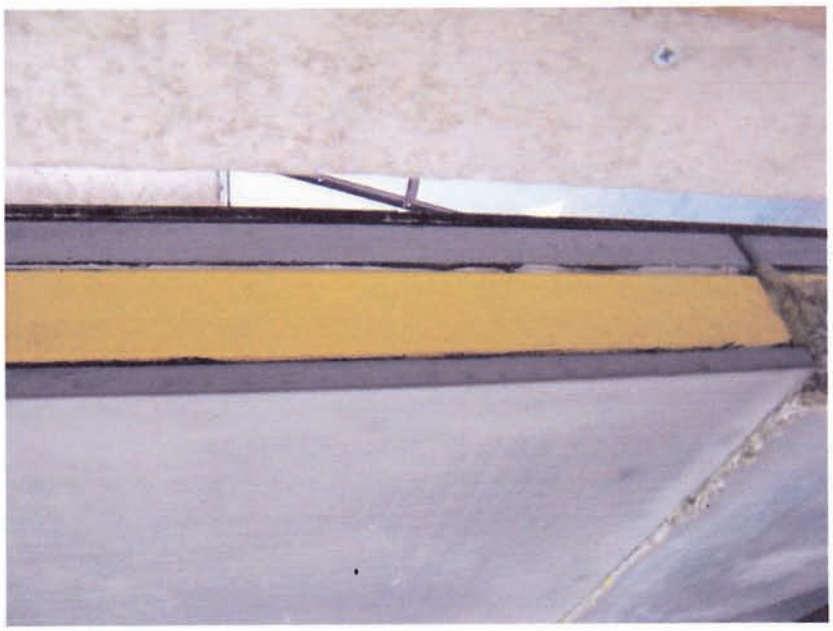


Foto 7: Hinterlegung mit CaSi-Platten ohne Abstand

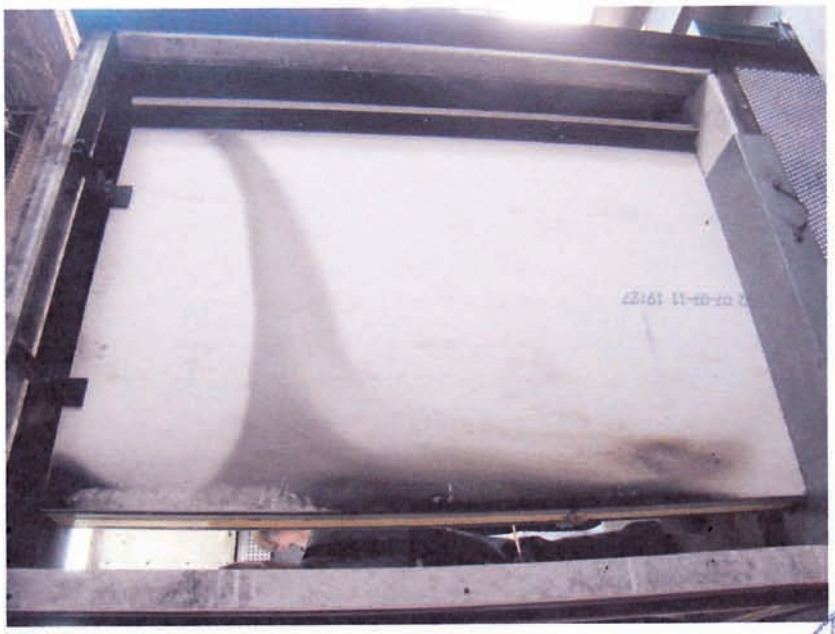


Foto 6: Probe B, Ansicht der Hinterlegungsplatten Eckansicht

MFPA Leipzig GmbH
SAC 02
NB 0800

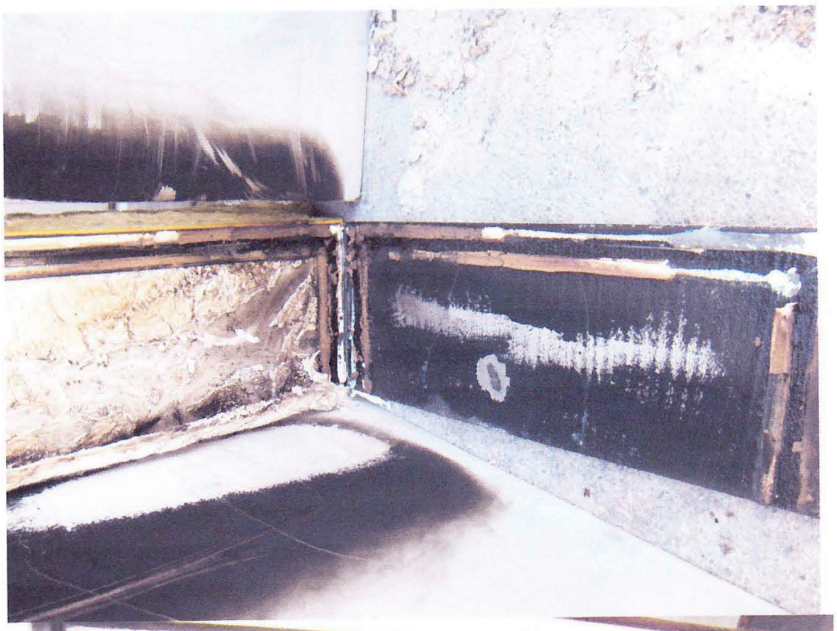


Foto 10: Prüfkörper B,
Ansicht der Brennerecke nach der Brandprüfung, untere Platte abgeklappt

Foto 9: Prüfkörper B,
Ansicht der Probe nach der Brandprüfung

Foto 8: Prüfkörper B,
Ansicht des großen Flügels vor der Brandprüfung

MFPA Leipzig GmbH
SAC 02
NB 0800

8.5 Prüfbericht Schallmessung - Konstruktion mit Agraffe

MFPA Leipzig GmbH
Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle für Baustoffe, Bauprodukte und Bausysteme

Geschäftsbereich IV - Bauphysik
Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Bauer

Arbeitsgruppe 4.2 - Schallschutz
Dipl.-Phys. D. Sprinz
Telefon +49 (0) 341 - 6582-115
sprinz@mfpa-leipzig.de
Dipl.-Ing. M. Busch
Telefon +49 (0) 341 - 6582-163
busch.m@mfpa-leipzig.de

VMPA-anerkannte Prüfstelle nach DIN 4109
VMPA-SPG-129-97-SN
Messstelle nach § 26 BImSchG

Prüfbericht Nr. PB 4.2/11-398-1

vom 23. Mai 2012
. Ausfertigung

Gegenstand:	Messung der Luftschalldämmung in Anlehnung an DIN EN ISO 10140-2 von einem mehrschaligen Textilbeton-Wandprüfkörper mit der Bezeichnung Schallbauteil 12 (auftragsinterne Bezeichnung: Versuch 1)
Auftraggeber:	Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig Fakultät Bauwesen Prof. Hülsmeier Karl-Liebknecht-Straße 132 04277 Leipzig
Auftragsdatum:	29.02.2012
Probeneingang:	14.05.2012
Prüfdatum:	14.05.2012
Bearbeiter:	Dipl.-Ing. M. Busch Dipl.-Phys. D. Sprinz

Dieser Prüfbericht besteht aus 7 Seiten und 3 Anlagen.

Dieser Bericht darf nur ungekürzt vervielfältigt werden. Eine Veröffentlichung – auch auszugsweise – bedarf der vorherigen schriftlichen Zustimmung der MFPA Leipzig GmbH. Als rechtsverbindliche Form gilt die deutsche Schriftform mit Originalunterschriften und Originalstempel des/der Zeichnungsberechtigten.

Es gelten die Allgemeinen Geschäftsbedingungen (AGB) der MFPA Leipzig GmbH.

Durch die DAkkS GmbH nach DIN EN ISO/IEC 17025 akkreditiertes Prüflaboratorium. Die Akkreditierung gilt für die in der Urkunde aufgeführten Prüfverfahren (in diesem Dokument mit * gekennzeichnet). Die Urkunde kann unter www.mfpa-leipzig.de eingesehen werden.

Gesellschaft für Materialforschung und Prüfungsanstalt für das Bauwesen Leipzig mbH (MFPA Leipzig GmbH)

Sitz: Hans-Weigel-Str. 2b – 04319 Leipzig/Germany
Geschäftsführer: Prof. Dr.-Ing. Frank Dehn
Handelsregister: Amtsgericht Leipzig HRB 17719
USt-Id Nr.: DE 813200649
Tel.: +49 (0) 341 - 6582-0
Fax: +49 (0) 341 - 6582-135

1. Aufgabenstellung

Für einen mehrschaligen Textilbeton-Außenwand-Prüfkörper des Auftraggebers

Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig
Fakultät Bauwesen
Prof. Hülsmeier
Karl-Liebknecht-Straße 132
04277 Leipzig

mit der Bezeichnung Schallbauteil 12 ist die Luftschalldämmung* in Anlehnung an DIN EN ISO 10140-2 im Türenprüfstand der MFPA Leipzig zu messen.

2. Prüfgegenstände und Prüfaufbauten

Der zu untersuchende Außenwand-Prüfkörper wurde am 14.05.2012 vom Auftraggeber in zwei baugleichen Teil-Elementen zusammen mit dem Material für die Fuge zwischen den Elementen angeliefert und in die Prüföffnung im Türenprüfstand der MFPA Leipzig eingebaut. Die Prüfung des Prüfkörpers erfolgte am 14.05.2012.

Einbau in den Prüfstand:

Der Prüfkörper wurde so in die Prüföffnung des Türenprüfstandes (B x H = 1000 mm x 2000 mm) eingebaut, dass zu beiden Seiten des Prüfbauteils unterschiedliche Nischentiefen des Prüfstandsrahmens vorlagen. Die Textilbetonschale für die Außenwand-Außenseite des Wandprüfkörpers zeigte zum Senderaum. Die senkrechte Fuge zwischen den beiden Prüfkörperwandelementen wurde mit dem vom Auftraggeber vorgesehenen Fugenmaterial verschlossen. Die Fuge zwischen Wandprüfkörper und Prüföffnungsleibung wurde mit Mineralwolle verstopft und sende- und empfangsseitig umlaufend mittels dauerplastischer Fugendichtmasse (Terostat IX) gedichtet.

Aufbau des Prüfkörpers:

Der Prüfaufbau erhält auftragsintern die Bezeichnung Versuch 1.
Zeichnungen des Auftraggebers zum Prüfkörper finden sich in Anlage 2.
Ansichten des Prüfkörpers im Prüfstand sind in Anlage 3 dargestellt.

*) nach DAkkS akkreditiertes Prüfverfahren

Aufbau der beiden baugleichen Prüfkörperelemente von Schallbauteil 12:

(von der Sende- zur Empfangsraumseite)

- 15 mm Textilbeton-Wandaußenschale **
- ca. 3 mm Luftspalt
- 60 mm Rahmen aus vierseitig umlaufendem GFK-Profil, mit Rahmenfüllung aus 55 mm Dämmung: Vakuum-Isolations-Paneele
- ca. 3 mm vierseitig umlaufende Kleber-Fuge zwischen Textilbetonschale und GFK-Rahmen: nebeneinander Epoxidharz-Kleber / Kompriband / Epoxidharz-Kleber
- 30 mm Textilbeton-Wandinnenschale

**) Die Textilbeton-Wandaußenschale wurde über Agraffen am GFK-Rahmen des Elementes befestigt, wie in der Zeichnung des Auftraggebers in Anlage 2 dargestellt.

Aufbau der senkrechten Fuge zwischen den beiden Prüfkörperelementen

Das Verfüllen der Fuge erfolgte durch Verstopfen mit dem in Tabelle 1 aufgeführten Glaswolle-Streifen. Im Bereich der Wandoberflächen wurde die Fuge jeweils sende- und empfangsraumseitig durch das Einstopfen einer Brandschutz-Schnur, wie in Tabelle 1 aufgeführt, verschlossen.

Folgende in Tabelle 1 aufgeführte Abmessungen und flächen- bzw. längenbezogene Massen der Prüfkörperkomponenten wurden ermittelt:

Tabelle 1: Ermittelte Abmessungen und flächenbezogene Massen

Bezeichnung	Länge mm	Breite mm	Dicke mm	flächen- bzw. längenbezogene Masse
Prüfkörper Schallbauteil 12, Teil-Element 1	1965	485	110	118 kg/m²
Prüfkörper Schallbauteil 12, Teil-Element 2	1965	485	110	122 kg/m²
Brandschutz-Schnur: flexible Steinwolle in weitmaschiger textiler Hülle***	2000	Durchmesser ca. 25 mm		0,03 kg/m
Glaswolle-Streifen zur Fugenverfüllung***	2000	60	30	0,07 kg/m

***) Abmessungen im unkomprimierten Zustand vor dem Einbau

Gesamtmasse des Prüfkörpers:

Gesamtmasse: 230 kg
Flächenbezogene Masse: 115 kg/m²

3. Prüfstand, Prüfverfahren

Der Türenprüfstand entspricht den Anforderungen der DIN EN ISO 10140-5.

Zwischen den beiden aus Kalksandsteinmauerwerk und Beton bestehenden Nachhallräumen (Sende- und Empfangsraum) des Türenprüfstandes besteht eine durchgehende Trennfuge zur Unterdrückung der Flankenübertragung. Die gemeinsame Trennwand mit der Prüföffnung für das Prüfbauteil ist als zweischaliges Kalksandsteinmauerwerk 2 x 175 mm, Rohdichteklasse 2.0 ausgeführt und verputzt. Die Trennwand besitzt auf beiden Seiten Vorsatzschalen aus Gipsfaserplatten und Mineralwollefüllung. In der 50 mm breiten durchgehenden Trennfuge zwischen den Mauerwerksschalen befinden sich dicht gestoßene Mineralwolleplatten. Die Fugen sind in der Prüföffnung mit elastischem Material verschlossen.

Die weiteren Wände des Sende- und des Empfangsraumes sind als 240 mm Kalksandsteinmauerwerk, Rohdichteklasse 2.0 ausgeführt und beidseitig verputzt und besitzen innenseitig jeweils Vorsatzschalen aus Gipsfaserplatten und Mineralwollefüllung. Die Wände von Sende- und Empfangsraum sind jeweils schiefwinklig. Die obere Decke ist in 140 mm Stahlbeton ausgeführt. Sende- und Empfangsraum besitzen jeweils einen schwimmenden Zementestrich auf der 200 mm dicken Stahlbetonbodenplatte.

Die Prüffläche S beträgt 2,0 m².

Das Senderaumvolumen betrug 70,7 m³, das Empfangsraumvolumen 58,9 m³.

Die Durchführung der Messungen der Luftschalldämmung* erfolgte in Anlehnung an [1]:
- DIN EN ISO 10140-2, Ausgabe Dezember 2010

Die Berechnung der Luftschalldämmung erfolgte nach:
- DIN EN ISO 717-1, Ausgabe November 2006

Die Ermittlung des Schalldämm-Maßes R wurde mit Breitbandrauschen im Terzfrequenzbereich 50 – 5000 Hz über die zur Verfügung stehende Prüffläche vorgenommen.

*) nach DAkkS akkreditiertes Prüfverfahren

[1]) In Anlehnung an DIN EN ISO 10140: Das Messverfahren entspricht DIN EN ISO 10140-2, jedoch wurde mit verminderter Fläche des Prüfkörpers (2 m² statt 10 m²) gemessen.

Das Schalldämm-Maß R ergibt sich aus folgender Gleichung:

$$R = L_1 - L_2 + 10 \lg S/A \text{ in dB}$$

Hierin bedeuten:

- L_1 mittlerer Schalldruckpegel im Senderaum in dB
- L_2 mittlerer Schalldruckpegel im Empfangsraum in dB
- S Fläche Prüfkörper in m²
- A äquivalente Absorptionsfläche im Empfangsraum in m²

Die äquivalente Absorptionsfläche im Empfangsraum wurde anhand von 12 Nachhallzeitmessungen terzweise nach folgender Gleichung bestimmt:

$$A = 0{,}16 \times V/T$$

Hierin bedeuten:

- V Volumen des Empfangsraumes in m³
- T Nachhallzeit im Empfangsraum in s

Aufgrund der Maximaldämmung des Prüfstandes von 61 dB wurden die Messergebnisse nicht durch Flankenübertragungen beeinflusst.

Während der Prüfungen am 14.05.2012 wurden in den Prüfräumen folgende Werte für die Lufttemperatur, die relative Luftfeuchte und den statischen Druck gemessen:

Tabelle 2: Lufttemperatur, relative Luftfeuchte, statischer Druck während der Prüfungen

Messgröße	Messwert	Messunsicherheit
Lufttemperatur	21 °C	± 1 °C
Relative Luftfeuchte	40 %	± 3 %
Statischer Druck	100 kPa	± 3 kPa

Die Durchführung und der Umfang der Messungen entsprechen den Grundsätzen des Arbeitskreises der bauaufsichtlich anerkannten Schallprüfstellen in Abstimmung mit dem NABau- Unterausschuss 00.71.02.

4. Messgeräte

Folgende in Tabelle 3 aufgeführte Messgeräte wurden verwendet:

Tabelle 3: Verwendete Messgeräte

Gerät	Typ	Hersteller
Echtzeitanalysator mit Rauschgenerator	840	Norsonic
Freifeldmikrofon	1220	Norsonic
Vorverstärker	1201	Norsonic
Kalibrator	4231	B & K
Leistungsverstärker	260	Norsonic
Lautsprecherkombination (Dodekaeder)	229	Norsonic
Mikrofon-Schwenkanlage	231, 252	Norsonic

Die Messgeräte werden regelmäßig geeicht, vor und nach jeder Messung wird die Messkette kalibriert. Die MFPA Leipzig nimmt regelmäßig an den Vergleichsmessungen für Prüfstellen der Gruppe I (Eignungsprüfstellen) der Physikalisch Technischen Bundesanstalt (PTB) Braunschweig teil (zuletzt im Jahr 2010) und ist als Prüfstelle in dem „Verzeichnis der Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstellen nach den Landesbauordnungen“ des Deutschen Institutes für Bautechnik DIBt unter der Kennziffer „SAC 02“ eingetragen.

5. Messergebnisse

In nachfolgender Tabelle 4 wird als Ergebnis der Messung das bewertete Schalldämm-Maß R_w nach DIN EN ISO 717-1 für den Frequenzbereich 100 bis 3150 Hz jeweils mit den Spektrum-Anpassungswerten angegeben.

Tabelle 4: Prüfergebnisse

Prüfaufbau	bewertetes Schalldämm-Maß	Spektrum-Anpassungswerte						siehe Anlage
	Prüfwert $R_{w,P}$ (C; C_{tr}) [dB]	$C_{50-3150}$	$C_{50-5000}$	$C_{100-5000}$	$C_{tr,50-3150}$	$C_{tr,50-5000}$	$C_{tr,100-5000}$	
Textilbeton-Außenwand-Prüfkörper mit der Bezeichnung Schallbauteil 12; auftragsinterne Bezeichnung: Versuch 1	56 (-2;-7)	-3	-2	-1	-11	-11	-7	1

Die grafische Darstellung der R-Werte in Abhängigkeit von der Frequenz ist aus der Anlage 1 ersichtlich.

6. Hinweise zu den Prüfergebnissen

Die ermittelten Werte sind Prüfwerte, die unter Laborbedingungen gemessen wurden.

Die Ergebnisse der Prüfungen beziehen sich ausschließlich auf die beschriebenen Prüfgegenstände und nicht auf die Grundgesamtheit. Dieses Dokument ersetzt keinen Konformitäts- oder Verwendbarkeitsnachweis im Sinne der Bauordnungen (national/ europäisch).

Leipzig, den 23. Mai 2012

Prof. Dr.-Ing. P. Bauer	Dipl.-Phys. D. Sprinz	Dipl.-Ing. M. Busch
Geschäftsbereichsleiter	*Arbeitsgruppenleiter*	*Bearbeiter*

MFPA Leipzig GmbH | Nr. PB 4.2/11-398-1 | Anlage 1
Bauphysik | vom 23. Mai 2012 | Seite 1 von 1

Schalldämm-Maß, *R*, in Anlehnung an ISO 10140-2

Messung der Luftschalldämmung von Bauteilen im Prüfstand

Auftraggeber:	HTWK Leipzig, Fakultät Bauwesen, Prof. Hülsmeier, 04277 Leipzig	Prüfdatum:	14.05.2012
Hersteller:	Auftraggeber	Kennzeichnung der Prüfräume:	BT.02 / BT.01
Prüfgegenstand eingebaut von:	Auftraggeber		

Produktbezeichnung: Mehrschaliger Textilbeton-Außenwand-Prüfkörper mit der Bezeichnung Schallbauteil 12 (auftragsinterne Bezeichnung: Versuch 1)

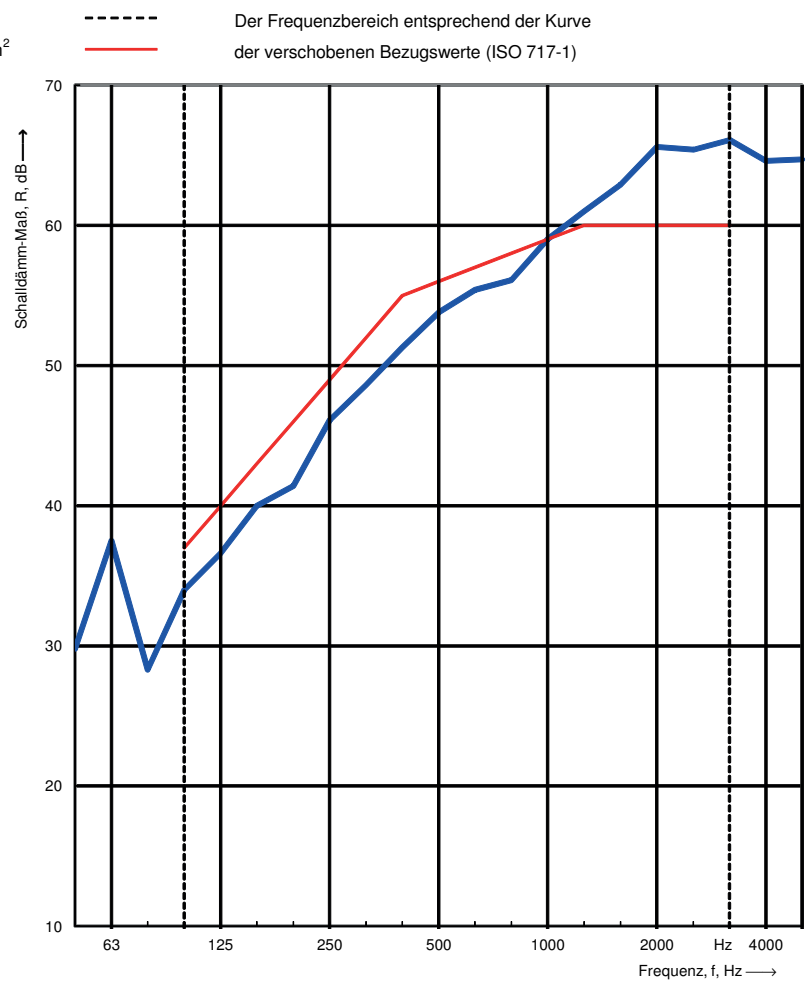
Aufbau Prüfgegenstand: Zwei baugleiche Elemente, Aufbau von der Sende- zur Empfangsraumseite:

- 15 mm Textilbeton-Wandaußenschale; über Agraffen am GFK-Rahmen des Elementes befestigt
- ca. 3 mm Luftspalt
- 60 mm Rahmen aus vierseitig umlaufendem GFK-Profil, mit Rahmenfüllung aus 55 mm Dämmung: Vakuum-Isolations-Paneele
- ca. 3 mm vierseitig umlaufende Kleber-Fuge zwischen Textilbetonschale und GFK-Rahmen: nebeneinander Epoxidharz-Kleber / Kompriband / Epoxidharz-Kleber
- 30 mm Textilbeton-Wandinnenschale

Senkrechte Fuge zwischen beiden Elementen verstopft mit Brandschutz-Schnur / Glaswolle / Brandschutz-Schnur

Fläche S des Prüfgegenstandes:	2,0	m^2
Flächenbezogene Masse:	115	kg/m^2
Lufttemperatur:	21	°C
Luftfeuchte:	40	%
Statischer Druck:	100	kPa
Volumen des Empfangsraumes:	58,9	m^3

Frequenz f [Hz]	R Terz [dB]
50	29,8
63	37,5
80	28,3
100	34,0
125	36,6
160	40,0
200	41,4
250	46,1
315	48,6
400	51,3
500	53,8
630	55,4
800	56,1
1000	59,0
1250	61,0
1600	62,9
2000	65,6
2500	65,4
3150	66,1
4000	64,6
5000	64,7



Bewertung nach ISO 717-1

$R_w(C;C_{tr})$ = 56 (-2 ; -7) dB

$C_{50\text{-}3150}$ = -3 dB $C_{50\text{-}5000}$ = -2 dB $C_{100\text{-}5000}$ = -1 dB

$C_{tr,50\text{-}3150}$ = -11 dB $C_{tr,50\text{-}5000}$ = -11 dB $C_{tr,100\text{-}5000}$ = -7 dB

Die Ermittlung beruht auf Prüfstandsmessergebnissen, die nach einem Standardverfahren erhalten wurden:

MFPA Leipzig GmbH

Datum: 23.05.2012 Unterschrift:

MFPA
Bereich Schallschutz
Hans-Weigel-Str. 2b
04319 Leipzig
Tel. 0341- 6582115

Zeichnungen des Auftraggebers

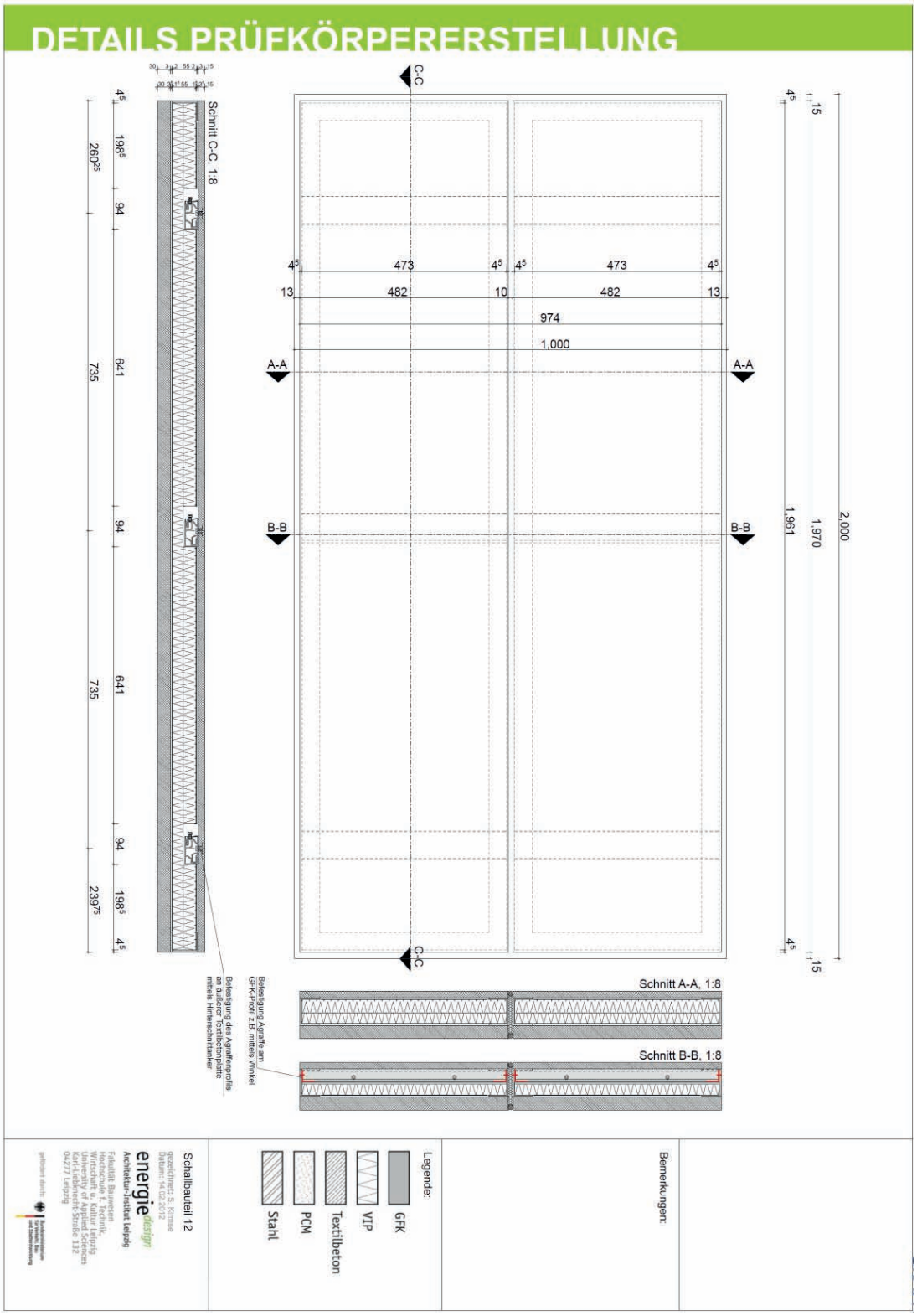


Bild A.1: Prüfkörper von der Senderaumseite

Bild A.2: Prüfkörper von der Empfangsraumseite

8.6 Prüfbericht Schallmessung - Konstruktion mit Klebeverbindung

MFPA Leipzig GmbH
Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle für Baustoffe, Bauprodukte und Bausysteme

Geschäftsbereich IV - Bauphysik
Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Bauer

Arbeitsgruppe 4.2 - Schallschutz
Dipl.-Phys. D. Sprinz
Telefon +49 (0) 341 - 6582-115
sprinz@mfpa-leipzig.de
Dipl.-Ing. M. Busch
Telefon +49 (0) 341 - 6582-163
busch.m@mfpa-leipzig.de

VMPA-anerkannte Prüfstelle nach DIN 4109
VMPA-SPG-129-97-SN
Messstelle nach § 26 BImSchG

Prüfbericht Nr. PB 4.2/11-398-2

vom 23. Mai 2012
. Ausfertigung

Gegenstand:	Messung der Luftschalldämmung in Anlehnung an DIN EN ISO 10140-2 von einem mehrschaligen Textilbeton-Wandprüfkörper mit der Bezeichnung Schallbauteil 11 (auftragsinterne Bezeichnung: Versuch 2)
Auftraggeber:	Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig Fakultät Bauwesen Prof. Hülsmeier Karl-Liebknecht-Straße 132 04277 Leipzig
Auftragsdatum:	29.02.2012
Probeneingang:	14.05.2012
Prüfdatum:	14.05.2012
Bearbeiter:	Dipl.-Ing. M. Busch Dipl.-Phys. D. Sprinz

Dieser Prüfbericht besteht aus 7 Seiten und 3 Anlagen.

Dieser Bericht darf nur ungekürzt vervielfältigt werden. Eine Veröffentlichung – auch auszugsweise – bedarf der vorherigen schriftlichen Zustimmung der MFPA Leipzig GmbH. Als rechtsverbindliche Form gilt die deutsche Schriftform mit Originalunterschriften und Originalstempel des/der Zeichnungsberechtigten.

Es gelten die Allgemeinen Geschäftsbedingungen (AGB) der MFPA Leipzig GmbH.

ilac-MRA DAkkS Deutsche Akkreditierungsstelle D-PL-11021-01-00

Durch die DAkkS GmbH nach DIN EN ISO/IEC 17025 akkreditiertes Prüflaboratorium. Die Akkreditierung gilt für die in der Urkunde aufgeführten Prüfverfahren (in diesem Dokument mit * gekennzeichnet). Die Urkunde kann unter www.mfpa-leipzig.de eingesehen werden.

Gesellschaft für Materialforschung und Prüfungsanstalt für das Bauwesen Leipzig mbH (MFPA Leipzig GmbH)

Sitz: Hans-Weigel-Str. 2b – 04319 Leipzig/Germany
Geschäftsführer: Prof. Dr.-Ing. Frank Dehn
Handelsregister: Amtsgericht Leipzig HRB 17719
USt-Id Nr.: DE 813200649
Tel.: +49 (0) 341 - 6582-0
Fax: +49 (0) 341 - 6582-135

1. Aufgabenstellung

Für einen mehrschaligen Textilbeton-Außenwand-Prüfkörper des Auftraggebers

Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig
Fakultät Bauwesen
Prof. Hülsmeier
Karl-Liebknecht-Straße 132
04277 Leipzig

mit der Bezeichnung Schallbauteil 11 ist die Luftschalldämmung* in Anlehnung an DIN EN ISO 10140-2 im Türenprüfstand der MFPA Leipzig zu messen.

2. Prüfgegenstände und Prüfaufbauten

Der zu untersuchende Außenwand-Prüfkörper wurde am 14.05.2012 vom Auftraggeber in zwei baugleichen Teil-Elementen zusammen mit dem Material für die Fuge zwischen den Elementen angeliefert und in die Prüföffnung im Türenprüfstand der MFPA Leipzig eingebaut. Die Prüfung des Prüfkörpers erfolgte am 14.05.2012.

Einbau in den Prüfstand:

Der Prüfkörper wurde so in die Prüföffnung des Türenprüfstandes (B x H = 1000 mm x 2000 mm) eingebaut, dass zu beiden Seiten des Prüfbauteils unterschiedliche Nischentiefen des Prüfstandsrahmens vorlagen. Die Textilbetonschale für die Außenwand-Außenseite des Wandprüfkörpers zeigte zum Senderaum. Die senkrechte Fuge zwischen den beiden Prüfkörperwandelementen wurde mit dem vom Auftraggeber vorgesehenen Fugenmaterial verschlossen. Die Fuge zwischen Wandprüfkörper und Prüföffnungsleibung wurde mit Mineralwolle verstopft und sende- und empfangsseitig umlaufend mittels dauerplastischer Fugendichtmasse (Terostat IX) gedichtet.

Aufbau des Prüfkörpers:

Der Prüfaufbau erhält auftragsintern die Bezeichnung Versuch 2.
Zeichnungen des Auftraggebers zum Prüfkörper finden sich in Anlage 2.
Ansichten des Prüfkörpers im Prüfstand sind in Anlage 3 dargestellt.

*) nach DAkkS akkreditiertes Prüfverfahren

Aufbau der beiden baugleichen Prüfkörperelemente von Schallbauteil 11:

(von der Sende- zur Empfangsraumseite)

- 15 mm Textilbeton-Wandaußenschale
- ca. 3 mm vierseitig umlaufende Kleber-Fuge zwischen Textilbetonschale und GFK-Rahmen: nebeneinander Epoxidharz-Kleber / Kompriband / Epoxidharz-Kleber
- 60 mm Rahmen aus vierseitig umlaufendem GFK-Profil, mit Rahmenfüllung aus 55 mm Dämmung: Vakuum-Isolations-Paneele
- ca. 3 mm vierseitig umlaufende Kleber-Fuge zwischen Textilbetonschale und GFK-Rahmen: nebeneinander Epoxidharz-Kleber / Kompriband / Epoxidharz-Kleber
- 30 mm Textilbeton-Wandinnenschale

Aufbau der senkrechten Fuge zwischen den beiden Prüfkörperelementen

Das Verfüllen der Fuge erfolgte durch Verstopfen mit dem in Tabelle 1 aufgeführten Glaswolle-Streifen. Im Bereich der Wandoberflächen wurde die Fuge jeweils sende- und empfangsraumseitig durch das Einstopfen einer Brandschutz-Schnur, wie in Tabelle 1 aufgeführt, verschlossen.

Folgende in Tabelle 1 aufgeführte Abmessungen und flächen- bzw. längenbezogene Massen der Prüfkörperkomponenten wurden ermittelt:

Tabelle 1: Ermittelte Abmessungen und flächenbezogene Massen

Bezeichnung	Länge mm	Breite mm	Dicke mm	flächen- bzw. längenbezogene Masse
Prüfkörper Schallbauteil 11, Teil-Element 1	1965	485	110	107 kg/m²
Prüfkörper Schallbauteil 11, Teil-Element 2	1965	485	110	108 kg/m²
Brandschutz-Schnur: flexible Steinwolle in weitmaschiger textiler Hülle**	2000	Durchmesser ca. 25 mm		0,03 kg/m
Glaswolle-Streifen zur Fugenverfüllung**	2000	60	30	0,07 kg/m

**) Abmessungen im unkomprimierten Zustand vor dem Einbau

Gesamtmasse des Prüfkörpers:

Gesamtmasse: 205 kg
Flächenbezogene Masse: 103 kg/m²

3. Prüfstand, Prüfverfahren

Der Türenprüfstand entspricht den Anforderungen der DIN EN ISO 10140-5.

Zwischen den beiden aus Kalksandsteinmauerwerk und Beton bestehenden Nachhallräumen (Sende- und Empfangsraum) des Türenprüfstandes besteht eine durchgehende Trennfuge zur Unterdrückung der Flankenübertragung. Die gemeinsame Trennwand mit der Prüföffnung für das Prüfbauteil ist als zweischaliges Kalksandsteinmauerwerk 2 x 175 mm, Rohdichteklasse 2.0 ausgeführt und verputzt. Die Trennwand besitzt auf beiden Seiten Vorsatzschalen aus Gipsfaserplatten und Mineralwollefüllung. In der 50 mm breiten durchgehenden Trennfuge zwischen den Mauerwerksschalen befinden sich dicht gestoßene Mineralwolleplatten. Die Fugen sind in der Prüföffnung mit elastischem Material verschlossen.

Die weiteren Wände des Sende- und des Empfangsraumes sind als 240 mm Kalksandsteinmauerwerk, Rohdichteklasse 2.0 ausgeführt und beidseitig verputzt und besitzen innenseitig jeweils Vorsatzschalen aus Gipsfaserplatten und Mineralwollefüllung. Die Wände von Sende- und Empfangsraum sind jeweils schiefwinklig. Die obere Decke ist in 140 mm Stahlbeton ausgeführt. Sende- und Empfangsraum besitzen jeweils einen schwimmenden Zementestrich auf der 200 mm dicken Stahlbetonbodenplatte.

Die Prüffläche S beträgt 2,0 m².

Das Senderaumvolumen betrug 70,7 m³, das Empfangsraumvolumen 58,9 m³.

Die Durchführung der Messungen der Luftschalldämmung* erfolgte in Anlehnung an [1]:
- DIN EN ISO 10140-2, Ausgabe Dezember 2010

Die Berechnung der Luftschalldämmung erfolgte nach:
- DIN EN ISO 717-1, Ausgabe November 2006

Die Ermittlung des Schalldämm-Maßes R wurde mit Breitbandrauschen im Terzfrequenzbereich 50 – 5000 Hz über die zur Verfügung stehende Prüffläche vorgenommen.

*) nach DAkkS akkreditiertes Prüfverfahren

[1]) In Anlehnung an DIN EN ISO 10140: Das Messverfahren entspricht DIN EN ISO 10140-2, jedoch wurde mit verminderter Fläche des Prüfkörpers (2 m² statt 10 m²) gemessen.

Das Schalldämm-Maß R ergibt sich aus folgender Gleichung:

$$R = L_1 - L_2 + 10 \lg S/A \text{ in dB}$$

Hierin bedeuten:

- L_1 mittlerer Schalldruckpegel im Senderaum in dB
- L_2 mittlerer Schalldruckpegel im Empfangsraum in dB
- S Fläche Prüfkörper in m²
- A äquivalente Absorptionsfläche im Empfangsraum in m²

Die äquivalente Absorptionsfläche im Empfangsraum wurde anhand von 12 Nachhallzeitmessungen terzweise nach folgender Gleichung bestimmt:

$$A = 0{,}16 \times V/T$$

Hierin bedeuten:

- V Volumen des Empfangsraumes in m³
- T Nachhallzeit im Empfangsraum in s

Aufgrund der Maximaldämmung des Prüfstandes von 61 dB wurden die Messergebnisse nicht durch Flankenübertragungen beeinflusst.

Während der Prüfungen am 14.05.2012 wurden in den Prüfräumen folgende Werte für die Lufttemperatur, die relative Luftfeuchte und den statischen Druck gemessen:

Tabelle 2: Lufttemperatur, relative Luftfeuchte, statischer Druck während der Prüfungen

Messgröße	Messwert	Messunsicherheit
Lufttemperatur	21 °C	± 1 °C
Relative Luftfeuchte	42 %	± 3 %
Statischer Druck	100 kPa	± 3 kPa

Die Durchführung und der Umfang der Messungen entsprechen den Grundsätzen des Arbeitskreises der bauaufsichtlich anerkannten Schallprüfstellen in Abstimmung mit dem NABau- Unterausschuss 00.71.02.

4. Messgeräte

Folgende in Tabelle 3 aufgeführte Messgeräte wurden verwendet:

Tabelle 3: Verwendete Messgeräte

Gerät	Typ	Hersteller
Echtzeitanalysator mit Rauschgenerator	840	Norsonic
Freifeldmikrofon	1220	Norsonic
Vorverstärker	1201	Norsonic
Kalibrator	4231	B & K
Leistungsverstärker	260	Norsonic
Lautsprecherkombination (Dodekaeder)	229	Norsonic
Mikrofon-Schwenkanlage	231, 252	Norsonic

Die Messgeräte werden regelmäßig geeicht, vor und nach jeder Messung wird die Messkette kalibriert. Die MFPA Leipzig nimmt regelmäßig an den Vergleichsmessungen für Prüfstellen der Gruppe I (Eignungsprüfstellen) der Physikalisch Technischen Bundesanstalt (PTB) Braunschweig teil (zuletzt im Jahr 2010) und ist als Prüfstelle in dem „Verzeichnis der Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstellen nach den Landesbauordnungen“ des Deutschen Institutes für Bautechnik DIBt unter der Kennziffer „SAC 02“ eingetragen.

5. Messergebnisse

In nachfolgender Tabelle 4 wird als Ergebnis der Messung das bewertete Schalldämm-Maß R_w nach DIN EN ISO 717-1 für den Frequenzbereich 100 bis 3150 Hz jeweils mit den Spektrum-Anpassungswerten angegeben.

Tabelle 4: Prüfergebnisse

Prüfaufbau	bewertetes Schalldämm-Maß	Spektrum-Anpassungswerte						siehe Anlage
	Prüfwert $R_{w,P}$ (C; C_{tr}) [dB]	$C_{50-3150}$	$C_{50-5000}$	$C_{100-5000}$	$C_{tr,50-3150}$	$C_{tr,50-5000}$	$C_{tr,100-5000}$	
Textilbeton-Außenwand-Prüfkörper mit der Bezeichnung Schallbauteil 11; auftragsinterne Bezeichnung: Versuch 2	47 (-1;-4)	-1	0	0	-5	-5	-4	1

Die grafische Darstellung der R-Werte in Abhängigkeit von der Frequenz ist aus der Anlage 1 ersichtlich.

6. Hinweise zu den Prüfergebnissen

Die ermittelten Werte sind Prüfwerte, die unter Laborbedingungen gemessen wurden.

Die Ergebnisse der Prüfungen beziehen sich ausschließlich auf die beschriebenen Prüfgegenstände und nicht auf die Grundgesamtheit. Dieses Dokument ersetzt keinen Konformitäts- oder Verwendbarkeitsnachweis im Sinne der Bauordnungen (national/ europäisch).

Leipzig, den 23. Mai 2012

Prof. Dr.-Ing. P. Bauer	Dipl.-Phys. D. Sprinz	Dipl.-Ing. M. Busch
Geschäftsbereichsleiter	*Arbeitsgruppenleiter*	*Bearbeiter*

MFPA Leipzig GmbH
Bauphysik

Nr. PB 4.2/11-398-2
vom 23. Mai 2012

Anlage 1
Seite 1 von 1

Schalldämm-Maß, *R*, in Anlehnung an ISO 10140-2

Messung der Luftschalldämmung von Bauteilen im Prüfstand

Auftraggeber:	HTWK Leipzig, Fakultät Bauwesen, Prof. Hülsmeier, 04277 Leipzig	Prüfdatum:	14.05.2012
Hersteller:	Auftraggeber	Kennzeichnung der Prüfräume:	BT.02 / BT.01
Prüfgegenstand eingebaut von:	Auftraggeber		
Produktbezeichnung:	Mehrschaliger Textilbeton-Außenwand-Prüfkörper mit der Bezeichnung Schallbauteil 11 (auftragsinterne Bezeichnung: Versuch 2)		

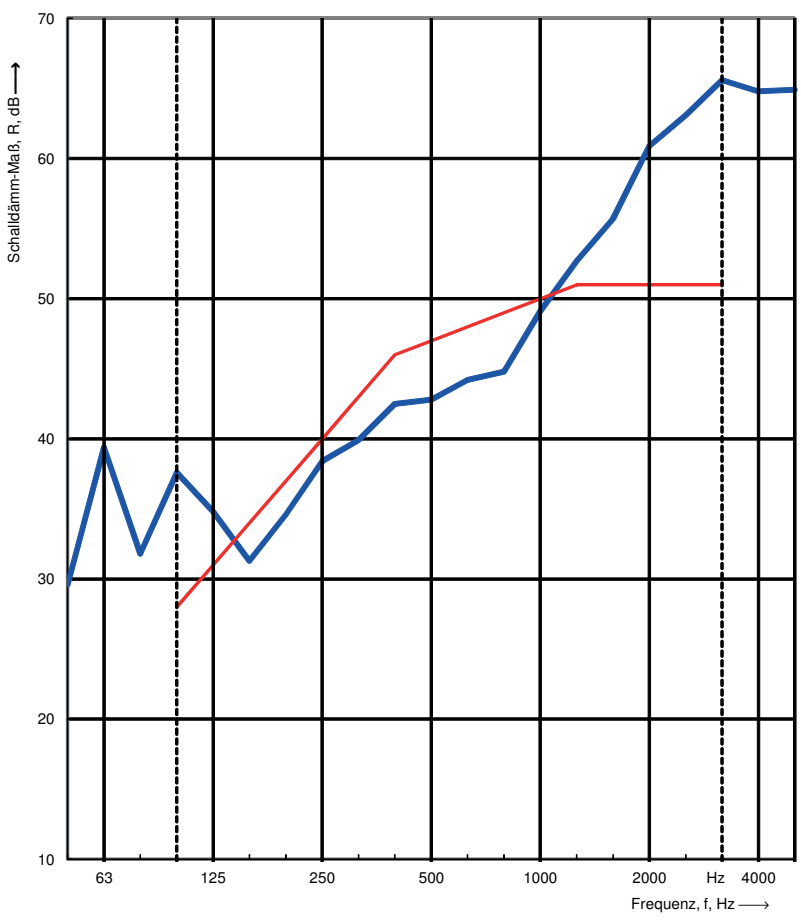
Aufbau Prüfgegenstand: Zwei baugleiche Elemente, Aufbau von der Sende- zur Empfangsraumseite:

- 15 mm Textilbeton-Wandaußenschale
- ca. 3 mm vierseitig umlaufende Kleber-Fuge zwischen Textilbetonschale und GFK-Rahmen: nebeneinander Epoxidharz-Kleber / Kompriband / Epoxidharz-Kleber
- 60 mm Rahmen aus vierseitig umlaufendem GFK-Profil, mit Rahmenfüllung aus 55 mm Dämmung: Vakuum-Isolations-Paneele
- ca. 3 mm vierseitig umlaufende Kleber-Fuge zwischen Textilbetonschale und GFK-Rahmen: nebeneinander Epoxidharz-Kleber / Kompriband / Epoxidharz-Kleber
- 30 mm Textilbeton-Wandinnenschale

Senkrechte Fuge zwischen beiden Elementen verstopft mit Brandschutz-Schnur / Glaswolle / Brandschutz-Schnur

Fläche S des Prüfgegenstandes:	2,0 m^2
Flächenbezogene Masse:	103 kg/m^2
Lufttemperatur:	21 °C
Luftfeuchte:	42 %
Statischer Druck:	100 kPa
Volumen des Empfangsraumes:	58,9 m^3

Frequenz f [Hz]	R Terz [dB]
50	29,6
63	39,4
80	31,8
100	37,6
125	34,8
160	31,3
200	34,6
250	38,4
315	39,9
400	42,5
500	42,8
630	44,2
800	44,8
1000	49,1
1250	52,7
1600	55,7
2000	60,9
2500	63,1
3150	65,6
4000	64,8
5000	64,9



Bewertung nach ISO 717-1

$R_w(C;C_{tr})$ = 47 (-1 ; -4) dB

$C_{50\text{-}3150}$ = -1 dB $C_{50\text{-}5000}$ = 0 dB $C_{100\text{-}5000}$ = 0 dB

$C_{tr,50\text{-}3150}$ = -5 dB $C_{tr,50\text{-}5000}$ = -5 dB $C_{tr,100\text{-}5000}$ = -4 dB

Die Ermittlung beruht auf Prüfstandsmessergebnissen, die nach einem Standardverfahren erhalten wurden:

MFPA Leipzig GmbH

Datum: 23.05.2012 Unterschrift:

Bereich Schallschutz
Hans-Weigel-Str. 2b
04319 Leipzig
Tel. 0341- 6582115

Zeichnungen des Auftraggebers

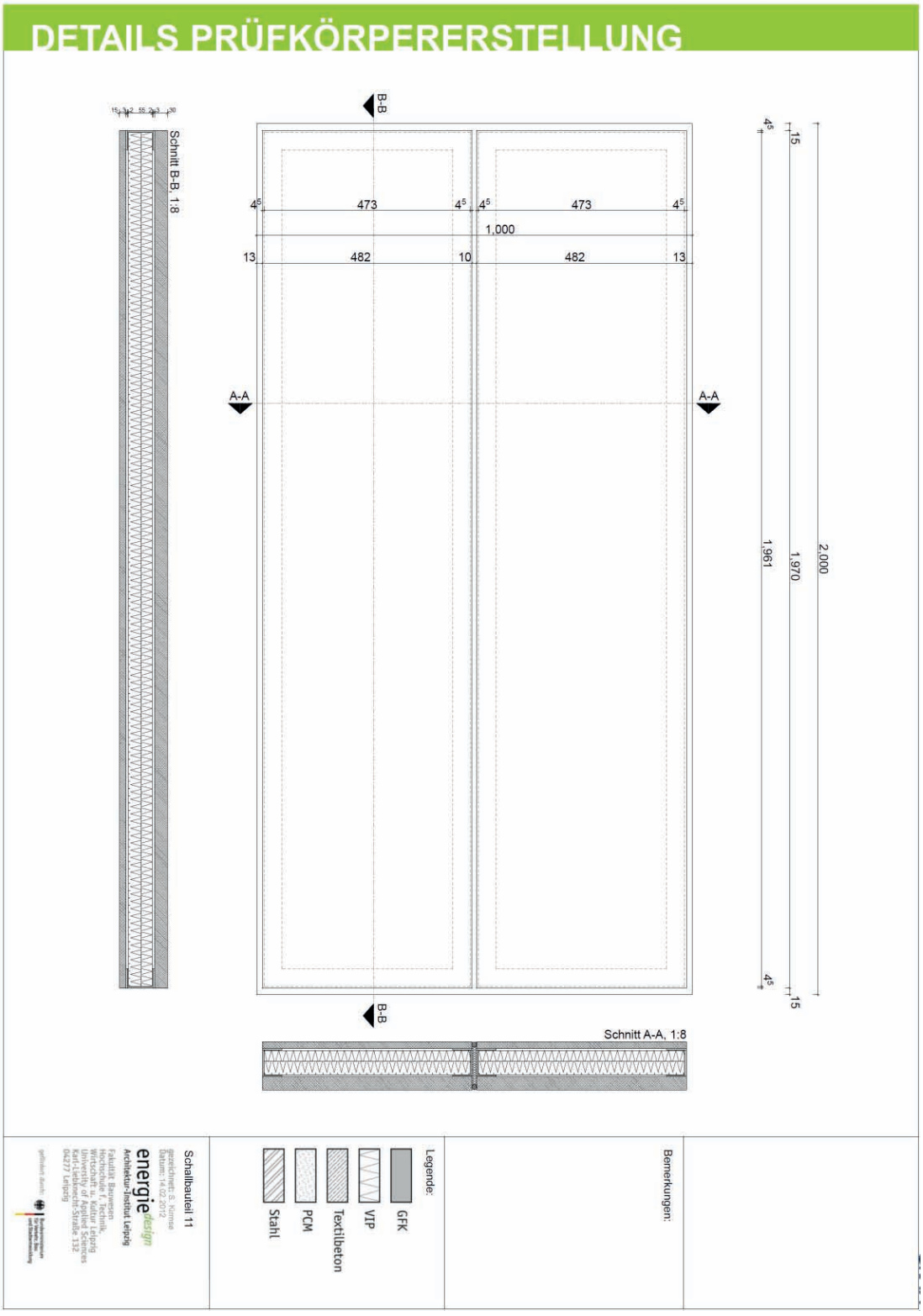


Bild A.1: Prüfkörper von der Senderaumseite

Bild A.2: Prüfkörper von der Empfangsraumseite

Construction

Prüfbericht 2012026

Weitergabe und Vervielfältigung nur in ungekürzter Form gestattet!

Haftungsprüfung mit dem SikaTack Panel System
Auf Fassadenelementen aus Textilbeton und GFK - Rahmen

Datum:	03.04.2012	**Prüfer:**	**Auftraggeber:**
Prüf.–Nr.:	2012026	Karthäuser	H. Kriegelstein
Dateiname:	2011026.docx		
Seiten:	4	**Verfasser:**	**Kunde:**
Prüfkosten:	€ 1000,-	Boldt	Hochschule für Technik Leipzig, Frau Kirmse

Verteiler:

Sika Deutschland GmbH:		**Kunde:**
Fr. Friedrich	H. Nimmerjahn	Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig, Frau Kirmse
H. Timmerhaus	H. Kathrein	
H. Kriegelstein	H. Zanotti	

TA Kleben und Dichten - ITB

i. V.
Frank Boldt

i. A.
Martin Krauß

Unsere anwendungstechnischen Empfehlungen in Wort und Schrift, die wir zur Unterstützung des Käufers bzw. Verarbeiters aufgrund unserer Erfahrung nach bestem Wissen entsprechend dem derzeitigen Erkenntnisstand in Wissenschaft und Praxis geben, sind unverbindlich und begründen kein vertragliches Rechtsverhältnis und keine Nebenverpflichtung aus dem Kaufvertrag.
Sie entbinden den Käufer bzw. Verarbeiter nicht von der Prüfung unserer Produkte auf ihre Eignung für den vorgesehenen Verwendungszweck in eigener Verantwortung und von der Beachtung Schutzrechte Dritter. Es ist stets die neuste Fassung unserer "technischen Merkblätter" zu verwenden; diese sind erforderlichenfalls bei uns anzufordern. Im Übrigen gelten ausschließlich unsere allgemeinen Geschäftsbedingungen.

Sika Deutschland GmbH / Stuttgarter Strasse 117 / 72574 Bad Urach
Tel: +49 7125 940-0 / Fax: +49 7125 940-228; www.sika.de

1. Aufgabenstellung

An der Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur in Leipzig wird Im Rahmen des Forschungsprojektes Vakutex ein neues Fassadenelement entwickelt, hierbei sollen auf einen GFK – Rahmen beidseitig Textilbetonplatten geklebt werden.
Im Rahmen der Prüfung wird die Haftung des SikaTack Panel Systems auf dem Textilbeton und GFK – Rahmen überprüft.

2. Ergebnis

Auf der geprüften strukturierten Rückseite der geprüften Textilbetonplatte wurde nach Anschleifen mit einer Drahtbürste, Reinigen mit (ölfreier) Druckluft und Primern mit SikaTack Panel Primer (einmaliger und zweimaliger Auftrag) mit dem SikaTack Panel Klebstoff eine sehr gute Haftung nach allen durchgeführten Lagerungen erzielt.

Auf dem GFK – Profil wird nach Anschleifen mit Schleifvlies, Reinigen mit Sika Aktivator-205 und Primern mit SikaTack Panel Primer als auch nach Anschleifen mit Schleifvlies, Reinigen mit Sika Aktivator und Primern mit Sika Primer 206 G+P mit dem SikaTack Panel Klebstoff ebenfalls sehr gute Haftung erreicht.

3. Empfehlung

Textilbeton: Anschleifen der Haftfläche (z.B. mit Drahtbürste), Reinigen mit ölfreier Druckluft und Primern mit SikaTack Panel Primer.

GFK – Profil: Anschleifen des GFK –Profils mit Schliefvlies, Reinigen mit Sika Aktivator-205 und Primern mit SikaTack Panel Primer.

Die Verklebung der vorbehandelten Bauteile erfolgt mit dem SikaTack Panel Klebstoff.

Hinweis: Für eine Verklebung von Fassadenplatten in Deutschland ist eine entsprechende bauaufsichtliche Zulassung von Klebstoff und Platte im System erforderlich. Ob eine Verklebung auch ohne die entsprechende bauaufsichtliche Zulassung möglich ist, muss gegebenenfalls durch die zuständige örtliche Baubehörde entschieden werden.

4. Prüfmaterial

4.1. Untergründe

- Textilbetonplatte, Dicke 1,5 cm
- GFK – Profil, keine weiteren Angaben

4.2. Klebstoff

● SikaTack Panel	# 0013023566	elfenbein

4.3. Vorbehandlungen / Primer

● Sika Aktivator-205	# 0012771232
● Sika Aktivator	# 0013043310
● SikaTack Panel Primer	# 0012873723
● Sika Primer 206 G+P	# 0012985486

4.5. Untergrundvorbehandlung

- Anschleifen mit Drahtbürste
- Anschleifen mit Schleifvlies, Körnung 360

5. Durchführung

Haftungsprüfung durch Raupenabschältest nach Sika-Prüfvorschrift CQP033-1 und CQP034-1 (Prüfung in Anlehnung an DVS Merkblatt 1618 und DIN 54457). Panel bonding.
Es wurde die Haftung jeweils nach folgenden Lagerungen untersucht:
1.) 7 d Normklima, **2.)** 7 d Wasser bei 21°C (+ 2 h NK), **3.)** 3 d -20°C (+ 2 h NK),
4.) 3 d 80°C Umluftofen (+ 2 h NK) und
5.) 7 d Kataplasma-Lagerung (70°C/100% r.F.) + 2 h NK.

6. Meßergebnisse

Tabelle 1: Haftungsergebnisse aus dem Raupenabschältest

Untergrund: Textilbeton

Untergrundvorbehandlung	Primer	Haftungsergebnisse				
		NK	H_2O	-20°C	80°C	Kata.
Anschleifen mit Drahtbürste, Reinigen mit ölfreier Druckluft	1 x STP Primer	1	1	1	1	1
	2 x STP Primer	1	1	1	1	1

Tabelle 2: Haftungsergebnisse aus dem Raupenabschältest

Untergrund: GFK-Profil

Untergrundvorbehandlung	Primer	Haftungsergebnisse				
		NK	H_2O	-20°C	80°C	Kata.
Anschleifen + Sika Aktivator-205	STPP	1	1	1	1	1

Anschleifen + Sika Aktivator	Primer 206 G+P	1	1	1	1	1

Legende:

STP Primer: SikaTack Panel Primer
Primer 206 G+P Sika Primer 206 G+P

Note	**Bewertung der Haftung**	**Haftbild**
1	Sehr gut	100 % Kohäsionsbruch
2	Gut	≥ 90 % Kohäsionsbruch
3	Ausreichend	> 50% Kohäsionsbruch
4	Unzureichend	≤ 50% Kohäsionsbruch
5	**Glattes Ablösen, leicht**	**≤ 25% Kohäsionsbruch**