

F 3039

Wolfram Jäger, Eyas Alkhateeb Hassan Youssef, Robert Masou

0-EneMau – Innovative Dämmtechnik zur Reduzierung der Transmissionswärmeverluste im Mauerwerksbau mit dem Ziel der Gewährleistung des 0-Energie-Standards

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

Fraunhofer IRB Verlag

F 3039

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) 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

2020

ISBN 978-3-7388-0213-9

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





Fakultät Architektur Lehrstuhl Tragwerksplanung

F:\2-T-TU-Arbeitsordner\Forsch\b-Proj\12\61203-0ENEMAU\06-Bericht\End\03-Lieferung\Abschlussbericht\17-05-15-Endbericht- 0EneMau-ee.docx

Abschlussbericht "0-EneMau"

"Innovative Dämmtechnik zur Reduzierung der Transmissionswärmeverluste im Mauerwerksbau mit dem Ziel der Gewährleistung des 0-Energie-Standards"

Az.: II 3-F20-10-1-169/SWD-10.08.18.7-12.33

Auftraggeber:	Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) Deichmanns Aue 31-37 53179 Bonn
Mitfinanziert durch	:Fachverband Ziegelindustrie Nord e.V. Bahnhofsplatz 2a, 26122 Oldenburg
	Klinkerwerk Hagemeister GmbH & Co. KG Buxtrup 3, 48301 Nottuln
	Wilhelm Modersohn GmbH & Co Postfach 1255, 32133 Spenge
	HALFEN GmbH Otto-Brenner-Straße 3, 06556 Artern
	VARIOTEC GmbH & Co. KG Weißmarterstraße 3-5, 92318 Neumarkt
	Evonik Industries Rodenbacher Chaussee 4, 63457 Hanau-Wolfgang
Auftragnehmer:	Technische Universität Dresden Fakultät Architektur Lehrstuhl Tragwerksplanung
Projektleiter:	o. Prof. DrIng. Wolfram Jäger, TU Dresden
Bearbeiter:	DrIng. Eyas Alkhateeb, TU Dresden DiplIng. Hassan Youssef, TU Dresden DiplIng. Architekt Robert Masou, TU Dresden
Datum:	Stand 15. Mai 2017



Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung sowie aus der Industrie (s.o.) gefördert. (Aktenzeichen: II 3-F20-10-1-169/SWD-10.08.18.7-12.33)

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

Inhaltsverzeichnis

1.	Einle	itung	. 7
	1.1.	Zum Projekt	. 7
	1.2.	Problemstellung	. 7
	1.3.	Projektziele	. 8
	1.4.	Lösungsansatz, Methode	. 9
2.	Zwei	schaliges Mauerwerk	11
	2.1.	Konstruktion	11
	2.1.1	. Bauweise	11
	2.1.2	. Begriffe	11
	2.1.3	. Merkmale	11
	2.1.4	. Konstruktive Grundsätze	12
	2.1.5	. Stand der Technik	13
	2.1.6	. Normative Anforderungen	13
	2.2.	Konstruktive Elemente	14
	2.2.1	. Wandaufbau: Vorwand – Schalenzwischenraum – Hintermauer	14
	2.2.2	. Dehnfugen	16
	2.2.3	. Luftschichtanker	17
	2.2.4	. Sichtung geeigneter Ankersysteme	18
	2.2.5	. Konsolen	26
	2.3.	Bauteilanschlüsse	27
	2.3.1	. Sockel	27
	2.3.2	. Öffnungen - Fensteranschlüsse	28
	2.4.	Ausgewählte Aspekte	29
	2.4.1	. Toleranzausgleich	29
	2.4.2	. Tendenzen beim Schalenabstand	30
	2.5.	Zeilenförmige bzw. geschosshohe Befestigung	30
	2.5.1	. Gegenüberstellung der Verankerungsformen	31
	2.5.2	. Stand der Technik in der Schweiz	31
	2.5.3	. Stand der Forschung in Deutschland	33
3.	Bear	spruchungen	37
	3.1.	Windlasten	37
	3.1.1	. Allgemeines	37
	3.1.2	. Windlasten bei hinterlüfteten Wandflächen	38
	3.1.3	. Winddruck	39
	3.1.4	. Vereinfachter Böengeschwindigkeitsdruck	39
	3.1.5	. Aerodynamische Beiwerte	40
	3.2.	Temperatur	41
	3.2.1	. Allgemeines	41
	3.2.2	. Untersuchungen von Zumbroich und Schellbach	41
4.	Betra	achtungsrahmen	43
	4.1.	Festlegung der Geometrie und der Nutzung	43
	4.1.1	. Gebäudegeometrie und Nutzung	43
	4.1.2	. Leitdetails	44
	4.2.	Bauphysikalische Festlegungen	45
	4.2.1	. Nullenergiegebäude	45
	4.2.2	. 0-Energie-Standard	45
	4.3.	Okobilanz	46
	4.3.1	. Zieldefinition	47
	4.3.2	. Untersuchungsmethoden	48



5. Wärmebrücken bei Luftschichtankern	
5.1. Wärmebrücken	49
5.2. Punktförmige Wärmebrücken	50
5.2.1. Näherungsweise Ermittlung nach DIN EN ISO 6946	50
5.2.2. Genaue Ermittlung nach DIN EN ISO 10211	52
5.3. Einflussgrößen	52
5.3.1. Schalenabstand und Wärmeleitfähigkeit	52
5.3.2. Wärmekoeffizient und Wärmeleitfähigkeit	53
5.3.3. Gesamtwärmedurchgangskoeffizient und Wärmeleitfähigkeit	53
6. Analyse spezifischer Wärmebrücken im numerischen Modell	
6.1. Einfluss der Ankeranordnung	
6.1.1. Festlegungen	
6.1.2. Varianten	59
6.1.3. Validierung der Rahmenbedingen	61
6.1.4. Ergebnisse der Variantenuntersuchung	62
7. Innovative Dämmtechnik zur Reduzierung der Transmissionswärmeverluste	e 69
7.1. Probleme in den herkömmlichen Dämmsystemen	
7.1.1. Geometrie in Bezug auf die thermische Effizienz	70
7.1.2. Bildung von Wärmebrücken	71
7.1.3. Montierbarkeit und Demontierbarkeit	71
7.1.4. Durchführbarkeit auf der Baustelle	72
7.2. Isolationsdämmpaneele zur Verbesserung der Dämmeffizienz	72
7.2.1. Vakuumisolationspaneele (VIP)	72
7.2.2. VIS - Vacuum Insulating Sandwiches [28], [23]	
7.2.3. CALOSTAT als Hochleistungswärmedämmplatte	
7.2.4. Anwendunasschwieriakeiten	94
7.3. Lösungskonzept	
7.4. Befestigung des Dämmsystems	
7.4.1. Anker	
7.4.2. Konsole	
7.4.3. Paneele Bemaßung und Modul-System	
7.4.4. Struktur der VIP Paneele	102
7.5. Verankerungssystem - Konzept 1	103
7.6. Verankerungssystem - Konzept 2	106
7.7. Finbau	
7.8. Besondere Details des Vakuum-Systems	110
7.8.1. Eckenaufbau	
7.8.2. Brandriegel	112
7.8.3 Dachanschluss, Eußboden und Terrassen	114
7.8.4. Sockel	115
7 8 5 Balkonanschluss	115
7.8.6. Fenster	122
7.9. Systemanwendung in zweischaligem Mauerwerk	123
7 10 Systemanwendung für andere Fassadenlösungen	123
7.10.1. Demontierbares Trockenbau-Ziegel-System	124
7.10.2. Fassadenverkleidungsplatten	
8. Brandverhalten und Feuerwiderstand	125
8.1. Allgemeines	125
8.2. Numerische Analysen	126
8.2.1. Randbedingungen und Modellbeschreibung	126
8.3 Fraebnisse	127



8.3.1.	Brandbeanspruchung der Wand von innen	. 127
8.3.2.	Brandbeanspruchung der Wand von außen	. 127
8.3.3.	Fazit	. 127
9. Bewertu	ng des Systems	. 127
9.1. Verg	gleich zu anderen Dämmungssystemen	131
9.1.1.	Thermischer Vergleich mit einem Stahlanker-System	131
9.1.2.	Thermischer Vergleich mit anderen Dämmsystemen	. 133
9.1.3.	Vergleich der Wandstärken	134
9.1.4.	Vergleich in Bezug auf die Tageslichtausbeute und Fenstergröße	136
9.1.5.	Kosten	138
9.2. Zus	ammenfassung in Hinsicht auf Entwurf und Bauphysik	143
10. Numeris	che Untersuchungen	144
10.1. Allg	emeines	144
10.2. Ank	er-Modell	144
10.3. Erge	ebnisse aus der FEM-Berechnung des Ankers	145
10.3.1.	Verformung	145
10.3.2.	Spannungen	146
10.4. Kon	solen-Modell	146
10.5. Kon	solen-Ergebnisse	.147
10.5.1.	Verformungen	147
10.5.2.	Spannung	148
11. Experime	entelle Untersuchung	150
11.1. Allg	emeines	150
11.2. Zup	orufende Verankerungssystemteile	150
11.3. Ran	dbedingungen	151
11.4. Ank	er- und Konsolenanordnung	151
11.5. Vers	suchsbegleitende Materialprutungen (Serien MB, MD, MSD)	152
11.5.1.		152
11.5.2.	Mauerwerk (Serien MWH , MWV)	154
11.5.3.	Hartscherrestigkeitsversuch (Serien HH , HV)	158
11.6. ANK	erversuche	102
.0. . 11 ()	Tragranigkeit des Ankers	102
11.0.Z. 11.4.2	Aulpau	162
11.0.3.		103
11.0.4. 114 E	Lagerungsbeuingung	100
11.0.3. 11.4.4	Plurungebung	100
11.0.0.	Ergobnisso dar Ankorvarsucha	160
11.0.7.	Zusammonfassung der experimentellen Ankernashweise	100
11.0.0.	Zusahimemassung der experimentenen Ankemachweise	175
11.0.7. 11.7 Brai	Norisole (Serie K)	10
11.7. Diai 11.7.1	Allaemeines und Anforderungen	102
11.7.1.	Versuchsgegenstand	182
11.7.2.	Prüfmethode	187
11.7.3. 11 7 <i>4</i>	Prüfstand / Prüfaufbau/ Brandmodell	187
11 7 5	Versuchsbedingungen	189
1176	Mess- und Registrierdaten	190
11 7 7	Versuchsdurchführung	190
11 7 8	Frgebnisse	192
11 7 9	Zusammenfassung der Ergebnisse des Brandversuches	196
11.8. Trac	Ifähigkeit des Verankerungssystems, Luftkissenversuch	198
		-



11 8 1	Allaemeines	108
11.0.1.	Versuchsaufhau	100
11.0.2.	7u nrüfendes Mauerwerk (Prüfkörner)	202
11.8.4	Messtechnik	205
11.8.5	Schritte des Versuchsaufhaues	206
11.0.5.	Versuchsdurchführung	206
11.0.0. 11.0 Vore	suchshaaleitende Materialnrüfungen	200
11 0 1	Allaemeines	207
11.9.1.	Mauermörtel	207
11.9.2.	Mauerwerk (Serien MW/H MW/V)	209
11.7.3.	Versuchsergehnisse	207 21/
11.0.5	7usammenfassung der Versuchsergehnisse	214
12 7usamm	enfassung	221
12. Zusanini 13. Anhang	1. Normative und Rechnerische Nachweise	222
13. Annang 13.1 Frm	ittlung der Ankerkräfte aus Windlasten nach DIN FN 1991-1-4/NA	224
13.1. Lini 13.2 Δhn	nessungen der Teile des Verankerungssystems	224
13.2. Abi	Nondoto Materialion	224
13.4 Nac	hweis des Ankers	225
	Nachweis des Verhundelements (Luftschichtanker):	225
13.4.1.	Nachweis des Polyamid Profils	225
13.4.2.	Nachweis des Foryannus roms	ZZU
12.5 Nac	hwois der Kensele	ZZO
12 5 1	Lastabtragung in der Konsolo	ZZO
13.5.1.	Nachwoiso im Dolyamidtoil	220
13.5.2.	Nachweise im Folgamuten	230
13.3.3. 12 5 <i>1</i>	Darstellung der Nachweise	ZJT
13.3.4. 14 Appapa	2 Eatadokumantation und Masswarta dar Varsucha	ZJZ
1/1 Annany	arvorsucho	230
14.1. AIIN 1/11	Mörtelprüfungen	230
14.1.1.	Mauerworksprüfungen	240
14.1.2. 1/1 1 2	Haftschorfostigkoitsvorsucho	240 242
14.1.3. 1/ 1 /	Ankorvorsucho an sich	242 245
14.1.4. 14.1.5	Ankeiversuche an Sich	240 245
14.1.3. 14.1.6		240 245
14.1.0. 14.2 Kon	solonbolastungsvorsucho (Sorio K)	240
14.2. NUI 14.2 Luft	kissopyorsucho	200
14.3. LUII	Materialprüfung Märtelprüfungen	200 255
14.3.1.	Mauersteinnrüfungen	200 250
14.3.2.	Mauerworkenrüfungen	200
14.3.3.	Dissbildupa	200
14.3.4. 1/ 2 E	Nissulluliy	203 747
14.3.3. 11 2 4	Sicharbaitsbaiwart dar Linianvarankarung	/ 20
14.3.0. 1/1 Dray	advorsuch [154]	∠/U 271
	เนงธิเวนนา [134]	וז∠ רדכ
		ZII



1. Einleitung

1.1. Zum Projekt

Entwicklung und Tendenzen im Mauerwerksbau stehen, wie im gesamten Bauwesen, im Zusammenhang mit Forderungen an die Reduktion von Transmissionswärmeverlusten. Vor diesem Hintergrund sollte in dem Forschungsprojekt "0-EneMau" eine Innovative Dämmund Verbindungstechnik, für den Einsatz bei zweischaligem Verblendwerk, entwickelt werden.

Anlass war die inzwischen vor dem Hintergrund der geforderten Wärmedurchgangswerte erreichte Grenze, die sich sinnvoll noch mit konventioneller Dämmung erreichen lässt. Der Nachteil der konventionellen Dämmung ist außerdem, dass über die Wanddicke eine erhebliche Flächeninanspruchnahme erfolgt und es Probleme mit der Belichtung und der Sicht durch bzw. aus den Fenstern gibt.

Der Projektname "0-EneMau" transportiert verkürzt den Projekttitel "Innovative Dämmtechnik zur Reduzierung der Transmissionswärmeverluste im Mauerwerksbau, mit dem Ziel der Gewährleistung des 0-Energie-Standards". Das Projekt wird durch das Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung im Rahmen der Forschungsinitiative "Zukunft Bau" gefördert. Mitfinanziert und fachlich unterstützt wird das Projekt durch den Fachverband Ziegelindustrie Nord e.V., dem Klinkerwerk Hagemeister GmbH & Co KG, Wilhelm Modersohn GmbH & Co, der Firma HALFEN GmbH, VARIOTEC GmbH & Co KG, sowie Evonik Industries.

Mit dem Projekt sollen Lösungen erarbeitet werden, wie mit hocheffektiver Dämmtechnik der Wandquerschnitt wieder reduziert und im Mauerwerksbau die gestiegenen Anforderungen an die Verringerung der Energieverluste durch die Außenwände erfüllt werden können. Es soll auch zukünftig mit der tradierten und bewährten Bauweise weiter gearbeitet werden können, da sie eine Vielzahl von Vorteilen aufweist, die es fortzuschreiben gilt.

1.2. Problemstellung

Zweischaliges Mauerwerk hat, insbesondere in Gegenden mit entsprechender Schlagregenbeanspruchung, eine weite Verbreitung. Gestiegene Anforderungen an die Reduzierung der Transmissionswärmeverluste konnten bisher durch Vergrößerung der Dämmschichtdicken und der Schalenabstände erreicht werden. Diesen Tendenzen sind jedoch hinsichtlich der Effizienz der Gesamtkonstruktion sowie der Gebäudenutzung Grenzen gesetzt. Die Zunahme der Dämmschichtdicke und die damit erreichbare Verringerung der Transmissionswärmeverluste verhalten sich nicht linear. Außerdem vergrößert sich mit zunehmenden Schalenabständen der Konstruktionsanteil am Gebäude.

Die Vakuumdämmtechnik hat in den letzten 15 Jahren eine rasante Entwicklung im Hochbau vollzogen. Bemühungen diese hocheffiziente Dämmtechnik in der Breite im Bauwesen einzusetzen, haben schon früher stattgefunden. Eine systemische Einführung der Vakuumdämmtechnik (VIP-Dämmung) im Mauerwerksbau, wie beispielsweise bei zweischaligem Mauerwerk, würde neben der Effizienzsteigerung bei den Hochbauten, einen Innovationsschub für den Mauerwerksbau auslösen.



Den Verfassern ist der bestehende Gegensatz zwischen der Dauerhaftigkeit zweischaliger Mauerwerkswände und der momentan vorhandenen Dauerhaftigkeit bei VIP-Dämmungen bewusst. Dieser stellt jedoch nur einen Aspekt unter vielen dar, den es ggf. künftig noch zu bearbeiten und in Ansätzen zu lösen gilt. Vielmehr wird hier die Auffassung vertreten, diejenigen Probleme zu lösen, die sich gegenwärtig lösen lassen, um so einen Betrag zum Erhalt eines zukunftsfähigen Mauerwerksbaus in Deutschland zu leisten.



Bild 1 Vergleich der Wärmeleitzahlen von konventionellen Dämmstoffen und Vakuumisolationsdämmstoffen unter Berücksichtigung der Streubereiche aus [35]

Gegenwärtig werden VIPs bei Neubauten vorrangig zur Lösung besonderer Details oder in der Sanierung, meist als Innendämmung, eingesetzt. Versuche, die Vakuumdämmtechnik im Mauerwerksbau einzuführen, sind bisher nicht über das Stadium von Piloteinsätzen hinweggekommen. Dies begründet sich zum einen dadurch, dass die Verbindungs- und Durchstoßproblematik nur unzureichend oder gar nicht gelöst wurde, weil man dabei auf die Techniken, wie sie beim Einsatz von Mineralwoll- bzw. Schaumplatten bei zweischaligem Mauerwerk üblich sind, abgehoben hat. Zum anderen laufen Bemühungen, die Vakuum-Dämmtechnik einzusetzen, isoliert ab, sodass keine Synergien zustande kommen. Ein auf die konstruktiven Besonderheiten des Mauerwerksbaus abgestimmtes VIP-Dämmsystem, das auch den rauen Anforderungen einer gleichzeitigen Verarbeitung im Zuge der Errichtung der Vorsatzschale gerecht wird, existiert gegenwärtig nicht.

1.3. Projektziele

Ziel des Forschungsvorhabens ist es, die Vakuum-Dämmtechnik mit den Vorteilen des Zweischaligen Mauerwerksbaus zu verbinden und so einer Breitenanwendung zuzuführen. Darüber hinaus sollen gegenwärtige Tendenzen bei der Gebäudedämmung mit neuen Fügetechniken (Linienhafte bzw. zeilen- oder spaltenhafte Verankerungen) auf den Mauerwerksbau übertragen werden. Folgende Teilziele sind definiert

 Entwicklung und Optimierung eines geeigneten Ankersystems für zweischaliges Mauerwerk mit dem Schwerpunkt





- Linienhafte bzw. zeilen- oder spaltenhafte Verankerungen unter Berücksichtigung
- o Horizontaler Lasten infolge Wind und der
- o Dehnungen infolge thermischer Längenänderung
- Entwicklung und Optimierung von speziell auf die Belange des zweischaligen Mauerwerksbaus abgestimmten Vakuum-Dämmelementen unter Berücksichtigung
 - o sämtlicher Bauteil- und Gebäudetoleranzen sowie aller aufnehmbarer Bauteilbewegungen
 - o Wärmebrückenreduzierung und Dampfdichtheit
 - o Demontabilität und Rückführbarkeit der Gesamtkonstruktion

1.4. Lösungsansatz, Methode



a) Fassadenschnitt aus [37]

- b) Eingangsbereich mit Vorsatzschale in Sichtmauerwerk aus [78]
- Bild 2 Beispiel einer geschosshohen Verankerung von zweischaligen Mauerwerkswänden: Dienstleistungs- und Verwaltungszentrum Theaterstraße in Winterthur

Durch zeilenförmige Verankerung in gewissen Abständen oder linienförmige Verankerung in Höhe der Geschoßdecken oder spaltenförmige Verankerung in größeren Abständen sollen die Durchstoßpunkte verringert und einer wärmetechnisch verbesserten Lösung zugeführt werden. Diese linienhaften Verankerungen der Vormauerschale führen nicht nur zu einer Verringerung der Ankeranzahl, sondern tragen zu einer effizienten Bauwerkserrichtung bei. Im Zusammenhang mit der Befestigung der Wärmedämmung kann der sonst störende Einfluss flächenhaft angeordneter Drahtanker minimiert werden. Entsprechende Anker sind zu orten und für den speziellen Einsatz mit VIP-Dämmung aufzuarbeiten. Durch Entwicklung einer geeigneten Fugenverbindung, die ein Minimum an Wärmeverlusten aufweist, soll darüber hinaus die Effizienz der Vakuumpaneele verbessert und der pauschale Abschlag (Wärmebrückeneffekt im Randverbund) im Bemessungswert der Wand reduziert werden. Das für die linienhafte Verankerung mit VIP-Dämmung angepasste Ankersystem ist im Bauteiltest zu überprüfen.



Bei den Vakuumpaneelen selbst müssen derzeit Abschläge aufgrund des Wärmebrückeneffektes gemacht werden. Hinzu kommen die zuvor beschrieben U-Wert-Abminderungen aufgrund der Bauteile Anker und Konsole. Diesen leistungsmindernden Faktoren gilt es ganzheitlich zu untersuchen und Vorschläge zu erarbeiten, wie Wärmebrückeneffekte vermindert bzw. vermieden werden können.

Die zwangsläufig notwendigen Fugen in den Plattenstößen und Anschlussbauteilen sind dabei mit besonderer Sorgfalt zu beplanen. Hier gewinnt die Abstimmung der vorzugsweise modular auszubildenden Elementdimensionen, neben der Berücksichtigung der statischbauphysikalischen Zwänge, wie die Aufnahme von Formänderungen, Schall, Wärme-, Feuchte- und Brandschutz, ebenfalls an Bedeutung. Eine Lebenszyklusbewertung der Konstruktion unter Berücksichtigung des kumulierten Energieaufwands soll Aufschluss über mögliche Umweltwirkungen geben.



Bild 3 Blockschema Lösungsmethode

Im Vorgehen wird sich an den weiterzuentwickelnden Elementen orientiert. Bild 3 fasst die gewählte Methode zusammen. Dabei bildet der Anker auch im methodischen Vorgehen das Bindeglied zwischen den bauphysikalischen und den tragwerksplanerischen Lösungsschwerpunkten. Es ergibt sich folgender Ablauf:

- Stand der Technik bzw. des Wissens (Zweischaliges Mauerwerk und VIP), mit Sichtung geeigneter Ankersysteme
- Analyse der zu lösenden Probleme und Festlegung des Betrachtungsrahmens
- Entwicklung eines konstruktiven Ansatzes
- Entwicklung eines Bemessungsansatzes für einen Anker
- Numerische und Experimentelle Erprobung
- Entwicklung der Konstruktion
- Bewertung

2. Zweischaliges Mauerwerk

2.1. Konstruktion

2.1.1. Bauweise

Fassaden in Sichtmauerwerk sind vielerorts stadtbildprägend. Sichtmauerwerkfassaden lassen sich vor dem Hintergrund der geltenden Anforderungen [56] nur als gedämmte und folglich als zweischalige Konstruktionen realisieren. Deswegen sind Überlegungen zur Optimierung von zweischaligem Mauerwerk mit VIP-Dämmung, insbesondere bei Neubauvorhaben im urbanen Kontext, von Bedeutung.

Der ursprüngliche Zweck dieser handwerklich geprägten Bauweise war der Außenwandkonstruktionen bzw. Schlagregenschutz [105]. Zweischalige Verblendmauerwerke gelten im Allgemeinen als an das regionale Klima besonders gut angepasst und stellen eine ortstypische Bauweise dar. Die Konstruktion kann meist mit örtlich verfügbaren Ressourcen realisiert werden. Sie besitzt aufgrund Ihrer massiven Bauweise und der Verwendung mineralischer Baustoffe eine hohe Lebensdauer und wird, neben der gestalterisch kulturellen Dimension und dem guten Schall- und Wärmeschutz, aufgrund der geringen Wartung in der Nutzungsphase als nachhaltig eingestuft. Im Gegensatz zum Verblendmauerwerk sind sie bei ordnungsgemäßer Ausführung schlagregensicher.

2.1.2. Begriffe

Der Begriff "zweischaliges Mauerwerk" wurde gemäß DIN 1053 [39] und wird aktuell gemäß DIN EN 1996 [63] definiert. Zur Abgrenzung wird unter Verblendmauerwerk eine einschalige Wandkonstruktion bestehend aus zwei Schichten verstanden. Diese sind innig miteinander verbunden und verzahnt. Zweischaliges Mauerwerke werden oftmals auch als zweischaliges Verblendmauerwerk oder kurz Verblendmauerwerk bezeichnet [81], was auf Kosten der Begriffsklarheit geht.



Bild 4 Begriffsdefinitionen a) einschaliges Verblendmauerwerk b) zweischaliges Mauerwerk nach [39]

2.1.3. Merkmale

Zweischaliges Mauerwerk unterscheidet sich von anderen Mauerwerkskonstruktionen durch die beiden parallel verlaufenden gemauerten Wandschalen und deren definierter konstruktiver Verbindung mittels bauaufsichtlich zugelassener Anker, die gegenwärtig ausschließlich aus nichtrostendem Stahl hergestellt sind. Kennzeichen dieser Bauweise ist die sogenannte konstruktive und bauphysikalische Funktionstrennung in Lastabtrag und Bekleidung, dem Schlagregen- und Feuchteschutz sowie dem Wärmeschutz, in der Regel



durch Dämmung im Schalenzwischenraum. Da hier nur vollständig aus Mauersteinen errichtete zweischalige Außenwandkonstruktionen betrachtet werden – zweischalige Außenwände mit Vormauerschale sind durchaus auf einer Tragschale aus Stahlbeton üblich, sie werden auch vor Skelettkonstruktionen in Stahl, Stahlbeton oder auch Holz ausgeführt – werden die im Mauerwerksbau üblichen Bezeichnungen verwendet: Die Innenschale wird als Hintermauer oder Tragschale, die Außenschale als Vormauer, Verblend- oder Wetterschale bezeichnet. Der Schalenzwischenraum wird nach Art der Füllung und bauphysikalischer Wirkung weiter unterschieden.

Nachteile ergeben sich bei diesen sehr hochwertigen Konstruktionen aufgrund der Zweischaligkeit: Zwei Wandscheiben bedeuten immer auch einen nahezu doppelten Aufwand; mit Folgen für Wandstärke, Ressource und Kosten. Deshalb sind zweischalige Außenwandkonstruktionen immer dann sinnvoll, wenn einschalige Wände die Anforderungen nicht mehr mit einem vertretbaren Aufwand erfüllen [86], so z.B. bei entsprechender Schlagregenanforderung.

2.1.4. Konstruktive Grundsätze

Im Zusammenhang mit der Entwicklung zweischaliger Außenwandwandkonstruktionen mit VIP-Dämmung bedarf es einer Festlegung der konstruktiven Grundsätze. Da sowohl statischkonstruktive als auch bauphysikalische Lösungen zu erarbeiten sind, liegt der Schluss nahe, Festlegungen nach den allgemeinen Gesetzmäßigkeiten der Bauweise zu treffen:

- Bei Mauerwerksbauten ist der Mauerstein das maßgebende Element, welcher über Steinformat und Verband ein definiertes geometrisches Ordnungsprinzip für Tragsystem, Gebäudehülle und mithin modulare Grundlage für die Ausformung der VIP Elemente bildet. Im Projekt gilt der im Mauerwerksbau übliche Oktameter (1/8 m = 125 mm) als Modul.
- Ferner bestimmt das für den Mauerwerksbau grundlegende Prinzip der Lastabtragung die Wahl über Anordnung der Verbindungsmittel und Fugen.
- Aus dem im Mauerwerksbau typischen Primat der Wand vor der Öffnung ergibt sich eine zwingende Folge bei den durchzuarbeitenden konstruktiven Details.

Für die zu entwickelnde Konstruktion lässt sich damit folgender Lösungsweg zu nachfolgenden Themenschwerpunkten aufzeigen:

Stabilität - Zweischaligkeit

- Stabilität der Vormauer
- Modularität und Toleranzraum
 Luftschichtanker als Folge von Verankerungs- und



Bauphysik - VIP Dämmung

- Wärmebrücke, Feuchteschutz, Dampfdichtigkeit
- Toleranzausgleich und Art der Unterkonstruktion
- Fuge und Verbindung der VIP-Elemente
- Brandschutz

Bild 5 Anforderungen

Lagerungsart



2.1.5. Stand der Technik

In den letzten Jahren wurde detailliert über den Stand der Technik bei zweischaligem Mauerwerk berichtet. Deshalb soll an dieser Stelle auf eine ausführliche Beschreibung zum Stand der Technik verzichtet werden. Vielmehr wird auf folgende Quellen und Veröffentlichungen hingewiesen, die hier zusammenfassend dargestellt sind. Schwerpunkt in diesem Abschnitt ist die Herleitung des Forschungsschwerpunktes mit der Fragestellung nach der Verankerungs- und Lagerungsart der Vorwand. Auf diese wird im Abschnitt 2.5 und 2.5.3 gesondert eingegangen. Ebenso gesondert betrachtet werden Beanspruchungen die auf die Vormauer einwirken. Sie werden in Abschnitt 3 behandelt.

Angaben und Hinweise zur Planung und Konstruktion von zweischaligem Mauerwerk im Allgemeinen wurden von Jäger [99] sowie Jäger und Pfeifer in [102] zusammengestellt. Zum aktuellen Stand der Technik und der Ausführung von zweischaligen Mauerwerk wird hier auf die Darstellungen von Altaha [6] [7], Figge [79] [80] und Gigla [81] hingewiesen. Zur Abdichtung von zweischaligem Mauerwerk gegen Feuchte wird auf die Ausführungen von Altaha in [1] sowie die besonderen Hinweise von Oswald zur Sturzabdichtung in [109] hingewiesen. Zur aktuellen normativen Einbindung von zweischaligem Mauerwerk im Eurocode 6 sind die Kommentare und Hinweise von Altaha und Seim in [8] zu finden. Der aktuelle Stand der bei der Verbindung der beiden Mauerschalen verwendeten sogenannten Luftschichtanker ist in den Dokumentationen von Jäger und Hirsch in [100], insbesondere Abschnitt 9.2 ab Seite 180 und in [101] insbesondere dort, Abschnitt 10 ab Seite 58 zu finden. Zum Einsatz von neuen Legierungen bei Vormauerankern und Verblenderkonsolen sind die Ausführungen von Hübers und Modersohn in [107] wichtig.

2.1.6. Normative Anforderungen

Die normativen Anforderungen an die zweischaligen Außenwandkonstruktionen sind in Tabelle 1 und Tabelle 2 stichpunktartig zusammengefasst.

Tabelle 1	Normative Anforderungen
-----------	-------------------------

Anforde- rung	Norm	Beschreibung
Wärme- schutz	DIN 4108-2 [56]/- 10 [55]	Mindestanforderungen gesunder Wohn- und Arbeitsverhältnisse bei Reduktion des Energiebedarfs
Feuchte- schutz	DIN 4108-3 [57] DIN 18195 [42]	Verhinderung der Durchfeuchtung infolge Tauwasserbildung und Ausschluss von Schimmelbildung, Schlagregenschutz sowie Schutz gegen aufsteigende bzw. seitlich eindringende Feuchte.
Schallschutz Brandschutz	DIN 4109 [59] LBO / MBO DIN 4102-4 [54] DIN 4102-22 [53]	Schutz gegen Außenlärm Verhinderung der Brandausbreitung über Brandabschnitte hinaus, Sicherung der Trag- und Schutzfunktion im Brandfalle zur Gewährung von Flucht, Evakuierung und Brandbekämpfung sowie dem Schutz von Sachwerten.



Tabelle 2	Bautelibezogene	Normen
Element	Bauteil	Normen
Allgemein		DIN 1053-1 [39] bzw. DIN EN 1996-1-1 [63]
Verblend-	Ziegel	DIN 105-100 [38], DIN EN 771-1 [66], DIN 106 [41], DIN
schale		V 20000-401 [76]
	Mörtel	DIN EN 998-2 [70], DIN V 20000-412 [77]
	Fugendichtung	DIN 18542 [45]
Tragschale		Gemäß allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassungen
Schalen-	Drahtanker,	DIN EN 845-1 [67] sowie
zwischen-	Konsolen	gemäß allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassungen
raum		

2.2. Konstruktive Elemente

2.2.1. Wandaufbau: Vorwand - Schalenzwischenraum - Hintermauer

Nach den in Deutschland gültigen Normen ist die Vormauer bei zweischaligem Verblendmauerwerk in Dicken von 90 mm bis 115 mm realisierbar. Die Vormauer kann, je nach Steindicke, ihre Eigenlasten über Geschoßhöhen von 6 m bis 12 m auf Konsolen bzw. Fundamentverbreiterungen selbst abtragen. Aufgrund fehlender Auflasten, insbesondere am oberen Wandende, wird die Vormauer jedoch als zur selbstständigen Übertragung von Windsog und Druck nicht geeignet eingestuft. Zur Übertragung dieser Horizontallasten wird die Vormauer deshalb nach den in Deutschland gültigen Normen mit flächig verteilten, bauaufsichtlich zugelassenen Drahtankern aus nichtrostendem Stahl an der tragenden Hintermauer befestigt. Es ist eine Eigenheit von zweischaligen Verblendmauerwerken, dass die Vorwand über mehrere Geschosse Vertikallasten abträgt, aber horizontal gehalten werden muss.



a) Iso-Clip-Maxi Multi-Plus [118]





b) Iso-Clip [116]

c) Fixierung Iso-Clip [116] auf Drahtanker für [119]

Bild 6 Abtropfscheiben unterschiedlicher Größe: zum Fixieren der Dämmplatten sowie um zu verhindern, dass eventuell anfallendes Regenwasser über die Anker an die Innenschale gelangt.

Von den vier möglichen Aufbauten die normativ bei zweischaligem Mauerwerk gefasst sind, stellen die im Schalenzwischenraum gedämmten Konstruktionen den weitaus größten Teil der bei Neubauten realisierten Wandaufbauten dar. Unter Berücksichtigung feuchtetechnischer zweischaligem Vorkehrungen können Kerndämmungen bei Verblendmauerwerk als Stand der Technik bezeichnet werden. Soll der



Schalenzwischenraum ungedämmt bleiben, muss die Tragschale, wie bei einer monolithischen Wand, thermisch wirksam sein. Dies führt zu einer Aufhebung der klaren Funktionstrennung der Schichtung. Der Aufbau dieser drei Varianten lässt sich nach [7] [8] wie folgt beschreiben:

Ohne Dämmung

Bei der Ausführung ohne Wärmedämmung in der Hohlschicht muss der Schalenabstand mindestens 4 cm betragen. Zudem müssen die Anker mit Tropfscheiben (siehe Bild 6) ausgestattet werden, um zu verhindern, dass eventuell anfallendes Regenwasser über die Anker an die Innenschale gelangen kann.

Teildämmung – Mit Hinterlüftung

Bei der Ausführung mit Teildämmung im Schalenzwischenraum sind nur dauerhaft wasserabweisende Dämmstoffe mit der Bezeichnung WZ nach DIN 4108-10 [55] zulässig. Die Dämmplatten im Schalenzwischenraum müssen durch Klemmscheiben (siehe Bild 6) im Bereich der Drahtanker so fixiert werden, dass die Dämmplatten in dem Zwischenraum nicht kippen können. Ein Verkleben der Dämmplatten wie beispielsweise beim WDV-System ist nicht notwendig.

Volldämmung (Kerndämmung) - Fingerspalt

Wird der Dämmstoff beispielsweise nach Errichtung der Vormauer durch Einblasen von Granulat oder Flocken eingebracht ist von einem tatsächlich vollständig gefüllten Schalenzwischenraum auszugehen.

Üblich jedoch ist, den Dämmstoff in einem kontinuierlichen Prozess, beim Aufmauern der Vormauer, einzubringen. Dazu werden stumpfgestoßene oder mit Stufenfalz versehene plattenförmige oder mattenförmige Dämmstoffen vom Gerüst aus verbaut. Bei dieser Art der Ausführung ist darauf zu achten, dass ein sogenannter Fingerspalt von 1 bis 2 cm zwischen Dämmung und Außenschale eingehalten wird. Der Fingerspalt ist baupraktisch notwendig, damit die Finger des von der Hand gegriffen Vormauersteins beim Auflegen des Steines auf die Vormauer zwischen Vorsatzschale und Dämmung passen. Darüber hinaus empfiehlt sich die Berücksichtigung des Fingerspaltes bei mehrgeschossigen Gebäuden, da mit Bautoleranzen der tragenden Innenschale gegenüber der Vormauer gerechnet werden muss.

Das Vorgehen birgt, neben dem Vorteil der schnellen und der kontinuierlichen Fertigung, Nachteile:

- Die Dämmschicht ist im Gegensatz zu eingeblasener Dämmung nicht Fugenlos und kann bei unachtsamer oder gar unsachgemäßer Ausführung einen Feuchtedurchgang nach innen ermöglichen.
- Um die platten- oder mattenförmigen Dämmstoffe einbauen zu können müssen diese über den Luftschichtanker gegen die Tragschale aufgeschoben werden. Dazu werden die Platten oder Matten mit dem Messer eingeschnitten und dann von oben direkt auf den sie durchstoßenden Anker geschoben. Dies kann bei unachtsamer Handhabung zu klaffenden Fugen, Fehlstellen und Minderstärken im Dämmstoff führen.

Dies lässt folgende Rückschlüsse zum Einsatz von VIP- Dämmung im Schalenzwischenraum zu:



- Aufgrund der plattenförmigen Ausbildung ist mit einem Fingerspalt von 2 cm bei den weitern Überlegen auszugehen.
- Am kontinuierlichen Verbau von Dämmplatte und Vormauer sollte festgehalten werden. Es müssen jedoch alternative Fügetechniken entwickelt werden, die eine dem Baustellengeschehen angemessene Handhabung der VIP Elemente ermöglicht und zum anderen eine schnelle und fachgerechte Verlegung in einem kontinuierlichen Prozess vom Gerüst aus zulässt.

Neben Vormauer- und Tragschale bilden Dehnfugen, Luftschichtanker und Konsolen die wesentlichen konstruktiven Elemente beim zweischaligem Mauerwerk.

2.2.2. Dehnfugen

Durch die direkte Einwirkung von Temperaturwechseln und Feuchtigkeit unterliegt die Außenschale größeren Verformungsschwankungen als die abgeschirmte Innenschale. Dementsprechend ist sicherzustellen, dass Verformungen parallel zur Wandebene spannungsfrei aufgenommen werden können. Um Schäden durch Risse und Zwängungen zu vermeiden wird die Außenschale durch Dehnfugen unterteilt. Maßgebende Einflussfaktoren für die Anzahl und Abstände der Dehnfugen sind Länge und Höhe der Wandscheibe, Lage und Größe eventuell vorhandener Öffnungen, Vorsatzschalendicke, die geographische Orientierung des Gebäudes, der Farbton der Fassadenfläche und die Sonneneinstrahlung.



a) Gebäudeorientierung

b) Anordnung horizontaler und vertikaler Dehnfugen

Bild 7 Beispielhafte Anordnung von Dehnfugen aus [84]

Generell gilt, dass die Fugenbreite in Abhängigkeit der Längenänderungen der Vorsatzschale infolge von Temperaturausdehnung gewählt wird. Bewährt haben sich Maße von 10 bis 30 mm. Dehnfugen sind mit geeignetem Füllmaterial dauerhaft und dicht zu versiegeln. Es wird in senkrechte und waagrechte Dehnfugen unterschieden.

Senkrechte Dehnfugen sind in Eckbereichen oder, falls gestalterische Gründe dies erfordern, maximal in 2 m Entfernung zur anschließenden Wand anzuordnen. Des Weiteren müssen sehr lange Wandscheiben durch senkrechte Dehnfugen unterteilt werden. Besonders die Wetterseite muss frei beweglich bleiben, da sie den größten Temperaturverformungen unterliegt.



Alternativ zur Trennung mittels senkrechter Dehnungsfuge im Eckbereich, sind Gebäudeecken im Verband möglich. Dabei müssen Eckbügel zur Verstärkung des Mauerwerks benutzt werden. Je Stockwerk werden mindestens drei Bügel mit einem maximalen Abstand von 60 cm in die Fugen eingelegt. Anker dürfen erst in einer Entfernung von 100 cm zur Ecke gesetzt werden. Bei der Ausbildung von Dehnungsfugen im Eckbereich wird keine zusätzliche Bewehrung benötigt. Für die Stabilität sorgen möglichst nahe an der Ecke angebrachte Anker.

Um die Auswirkungen aus den unterschiedlichen Verformungen der beiden Schalen abzumindern, sind Dehnfugen in waagerechter Richtung anzuordnen. Unterhalb von Abfangungen und auskragenden Bauteilen, wie zum Beispiel bei Balkonen, sind waagerechte Dehnfugen unerlässlich. Im Bereich von Fensteröffnungen kann Lagerfugenbewehrung angeordnet werden, um die Rissbildung zu vermeiden und Dehnfugen in diesen Bereichen einzusparen.

2.2.3. Luftschichtanker

In Deutschland ist nach wie vor eine flächige Verankerung der Vorsatzschale die Regel. Je nach Anforderung und geometrischen Bedingungen sind dafür 5 bis 9 Anker je m² Wandfläche nötig (s. Tabelle 3 mit der erforderlichen Ankeranzahl). In Randbereichen, an Öffnungen, bei Dehnfugen, müssen zusätzliche Anker (3 je pro laufenden Meter) angeordnet werden.



Bild 8 Anordnung der Anker nach Norm [39] [63]

Der EC 6 sieht vor, dass man die Anker bemessen kann, wozu die Ankertragfähigkeit bekannt sein muss. In Deutschland hat man sich im Zuge des Nationalen Anhangs auf die in der Vergangenheit übliche konstruktive Festlegung nach Tabelle geeinigt, die für die praktische Anwendung sehr praktikabel ist. Auf Grund der veränderten Windlasten ist jetzt die Anzahl der Anker gegenüber DIN 1053-1:1996-11 abhängig von der jeweiligen Windlastzone im Nationalen Anhang zu DIN EN 1996-1-1 gestaffelt angegeben, s. nachfolgende Tabelle 3.

Tabelle 3 Durchmesser und Ankeranzahl je m² nach [64]

Tabelle NA.18 — Mindestanzahl <i>n</i> _{tmin} von Drahtankern je m ² Wandf	läche (Windzonen nach
DIN EN 1991-1-4/NA)	

	Gebäudehöhe	Windzonen 1 bis 3 Windzone 4 Binnenland	Windzone 4 Küste der Nord- und Ostsee und Inseln der Ostsee	Windzone 4 Inseln der Nordsee	
	<i>h</i> ≤ 10 m	7 ^a	7	8	
	10 m < <i>h</i> ≤ 18 m	7 ^b	8	9	
	18 m < <i>h</i> ≤ 25 m	7	8 ^c		
а	a in Windzone 1 und Windzone 2 Binnenland: 5 Anker/m²				
ь	in Windzone 1: 5 Anker/m ²				
c	Ist eine Gebäudegrundrisslänge kleiner als k/4: 9 Anker/m²				

Die Anker werden in Ankertypen nach Art der Befestigung und Verankerung in der Hintermauer in normierte Anker und davon abweichende, in bauaufsichtlich zugelassene Anker unterschieden.

Üblicherweise wird die Tragschale aus im Dünnbett (Dicke von 1 bis 3 mm) verlegten Plansteinen errichtet. Dadurch ergibt sich aber, dass normierte Anker (Durchmesser von 3 bis 5 mm) keinen Platz mehr in der Lagerfuge finden. In Folge wurde eine Reihe von Verankerungen entwickelt, die sich aufgrund Ihrer Geometrie als Flachankersystem (Dicken von 0,7 bis 1,2 mm) zum Einlegen im Dünnbett eignen oder die aufgrund deren vorgesehener Anwendung (Verdübeln) gar nicht mehr in die Lagerfuge eingelegt zu werden brauchen. Mit den derzeit existierenden, zugelassenen Ankersorten sind Schalenabstände von bis zu 200 mm realisierbar. Größere Schalenabstände sind möglich, führen aber zu einer Erhöhung der Ankeranzahl von bis zu 11 Ankern pro m².

2.2.4. Sichtung geeigneter Ankersysteme

Da die Verankerung schwerpunktmäßig betrachtet wird, soll in diesem Abschnitt auf einige besondere Ankersysteme hingewiesen werden. In Tabelle 4 wird eine Übersicht aus [100] bzw. [101] über in Deutschland 2013 zugelassene Maueranker gegeben.

Nr.	Gegenstand	Abstar	nd	Hersteller
		von	bis	
		[mm]	[mm]	Deutschland
Z-17.1-633	"Multi-Luftschichtanker" für zweischaliges Mauerwerk	60	170	Bever GmbH
Z-17.1-710	EURO- Flachstahlanker für zweischaliges Mauerwerk	175	-	H & R GmbH
Z-17.1-822	Drahtanker mit Durchmesser 4 mm für zweischaliges Mauerwerk	150	200	H & R GmbH
Z-17.1-825	Drahtanker mit Durchmesser 4 mm für zweischaliges Mauerwerk	150	200	Bever GmbH
Z-17.1-888	Multi-Luftschichtanker Plus für zweischaliges	120	200	Bever GmbH

Tabelle 4	Übersicht über	die bauaufsichtlichen	Zulassungen von	Mauerankern

	Mauerwerk Vormauer- bzw. Verblendschalen auch im Dünnbettverfahren			
Z-17.1-923	Drahtanker 3 mm und 4 mm zur Verbindung von Vormauer- bzw. Verblendschalen mit Wänden von Holzhäusern in Holzrahmenbauweise	-	-	H & R GmbH
Z-17.1-924	Drahtanker 4 mm zur Verbindung von Vormauer- bzw. Verblendschalen mit Wänden von Holzhäusern in Holzrahmenbauweise	-	-	Bever GmbH
Z-17.1-1062	Luftschichtanker DUO für zweischaliges Mauerwerk	40	150	Bever GmbH
				Holland
Z-17.1-463	Flachstahlanker zur Verbindung der Mauerwerksschalen von zweischaligen Außenwänden	175	-	Gebr. Bodegraven
Z-17.1-933	Zweischalige Außenwände mit Verblendschalen aus trocken gestapelten Ziegeln mit besonderem Befestigungssystem mit Dübelankern	-	-	daas ClickBrick
				Schweiz
Z-17.1-466	KE-Gelenkanker zur Verbindung von zweischaligem Mauerwerk	40	210	MURINOX AG

Nachfolgend beschriebene Ankersysteme wurden hinsichtlich Ihrer Eignung zur Weiterentwicklung detailliert untersucht:

2.2.4.1. Luftschichtanker DUO [116]



Bild 9 Komponente zur Verankerung in der Mörtelfuge der Außenschale: Drahtteil mit 4 mm Durchmesser, aus [116]

Der Luftschichtanker DUO [116] besteht aus zwei Komponenten - einem 0,7 mm dicken Blechteil, zur Verankerung in der Mörtelfuge in der Innenschale und einem Drahtteil mit 4 mm Durchmesser zur Verankerung in der Mörtelfuge der Außenschale - die auf der Baustelle als Anker zur Verbindung der zwei Mauerwerksschalen zusammengebaut werden.

Das Blechteil ist im Bereich der Einbindung in die Mörtelfuge mit gestanzten Öffnungen versehen und verfügt über eine "Nase", die als Anschlag für den Einbau in die Innenschale dient. Im nicht eingemörtelten Bereich ist eine Öse angeordnet, in die nach dem Einbau des Blechteiles das Drahtteil eingehängt wird. Am Ende des Blechteils befindet sich eine nach oben abgebogene Führungsöffnung zur Aufnahme des Drahtteils. Der maximale Abstand von Innen- und Außenschale darf bis zu 150 mm betragen.





b) Längsschnitt A-A

Querschnitt B-B

Bild 10 Komponente zur Verankerung in der Mörtelfuge der Innenschale: 0,7 mm dicken Blechteil mit Aufkantung, aus [116]

Die Luftschichtanker DUO [116] dürfen nur für Wandbereiche bis zu einer Höhe von 20 m über Gelände verwendet werden.



a) Komponenten Unterseite



c) Komponenten Oberseite



b) Detail zu a)



d) Detail zu c)

Bild 11 Bauteilkomponenten des Luftschichtankers "DUO" [116]

Zunächst ist das Blechteil beim Errichten des Mauerwerks der Innenschale in das Mörtelbett einzulegen, wobei nach dem Einlegen auch die Oberseite des Blechteils mit dem Mörtel abzudecken ist. Bei Mauerwerk im Dünnbettverfahren soll die Fugendicke mindestens 2 mm betragen, so dass die Blechteile vollständig in Mörtel eingebettet werden. Das Blechteil ist so anzuordnen, dass die aus dem Blechteil ausgestanzte "Nase" nach unten zeigt und knirsch an der Außenseite des Mauerwerks ansitzt. Es ist darauf zu achten, dass die im nicht eingemörtelten Bereich angeordnete Öse nicht verschmutzt (z. B. durch Mörtelreste). Beim Errichten der Außenschale werden sukzessive die Drahtteile in die Ösen der Blechteile eingehängt, bis diese hörbar in der nach oben abgebogenen Führungsöffnung der Blechteile einrasten. Das Wellende der Drahtteile ist in der Mörtelfuge der Außenschale mindestens 50 mm tief einzulegen. Zur Wasserabführung und Fixierung der Dämmung an der Innenschale ist eine Kunststoffscheibe (bezeichnet als Iso-Clip – vergleiche Bild 6) vorgesehen. Die Klemmscheibe wird direkt vor der Dämmung von oben auf den Anker geschoben. Die Anker sind so einzubauen, dass sie sich im rechten Winkel befinden.

Dieses Anker-System ist insofern für das Projekt 0-EneMau interessant, da es, insbesondere vor dem Hintergrund einer eventuell notwendigen Gelenkausbildung, eine sehr einfache Handhabung auf der Baustelle verspricht. Der Gelenkpunkt sollte, in Fortführung der Überlegungen der Bauteilbewegung in jedweder Art von der Dämmebenen fernzuhalten (siehe Abschnitt 2.2.4.3), dahingehend weiterentwickelt werden. Das zur Verankerung in der Mörtelfuge der Innenschale verwendete Flachstahlblech verspricht mit seiner Gesamtbauteilstärke von 0,7 mm eine gute thermische Trennung. Deswegen dient die Ankergeometrie als Vorlage für das numerische Modell zur Untersuchung der Ankeranordnung (siehe Abschnitt 6.1.1).

2.2.4.2. System Multi-Luftschichtanker Plus [118]

Mit dem "Multi-Luftschichtanker Plus" [118] hat Bever eine interessante Innovation vorgelegt. Der Anker wird aus 0,5 mm dickem Blech hergestellt. Er hat einen profilierten, mit ausgestanzten Löchern versehenen 17,5 mm breiten Flachstahlbereich, der in der Innenschale angeordnet wird und 90 mm in die Lagerfuge einbindet.



a) Gesamtansicht: Hohlquerschnitt des Ankers mit Durchmesser 6 mm





b) Detail: Ankerspitze

c) Detail: Ankerschaft

Bild 12 Luftschichtanker "Multi-Luftschichtanker Plus" [118]

Das andere Ende des Ankers ist aus dem Hohlquerschnitt des Ankerschaftes mit Durchmesser 6 mm gepresst und mit seitlichen, halbkreisförmigen Ausstanzungen versehen (siehe Bild 12). Der gepresste und seitliche mit halbkreisförmigen Ausstanzungen versehene Teil wird in der Mörtelfuge der Außenschale mindestens 50 mm tief verankert. Der größte planmäßige Abstand von Innen- und Außenschale beträgt, bei einer Gesamtankerlänge von



360 mm ca. 200 mm. Abweichend von der Norm dürfen Vormauerschalen auch aus Kalksand-Plansteinen, unter Berücksichtigung der Bestimmungen, im Dünnbettverfahren eingesetzt werden.

Bei Entwurf und Ausführung solchen zweischaligen Mauerwerks ist zu beachten, dass ein planmäßig waagerechter Einbau der Anker möglich ist und die für die jeweilige Ankerlänge zulässigen kleinsten und größten Schalenabstände unter Berücksichtigung der Stein- und Ausführungstoleranzen eingehalten werden, da ein Ausgleich von Minustoleranzen des Schalenabstandes durch Einführen des Ankerschaftes in die Dünnbett-Mörtelfuge der Vormauer- bzw. Verblendschale nicht möglich ist (Länge des Ankerschaftes = Mindestschalenabstand).

Interessant bei diesem Anker ist, dass gezeigt werden kann, wie Formoptimierung zu einer Optimierung der Materialnutzung und zu einer Reduktion des Wärmestroms beim Luftschichtanker führt. In Abhängigkeit vom U-Wert der Wand (respektive Lambda und Dicke der verwendeten Dämmung), ergeben sich bei Luftschichtankern typische c-Werte von 0,00075 bis 0,001 W/K je Anker (siehe Abschnitt 5.1). Spitzenwerte von c = 0,0005 W/K wie sie beim Multi-Luftschichtanker Plus nach gewiesen werden können [31], sind nur aufgrund der Verwendung von Hohlrohrstäben mit Manteldicken von 0,5 mm üblichen Vollrohrquerschnitte möglich.

2.2.4.3. MURINOX [117] Gelenkanker

Die Anker sind durch ein im Mittelteil angeordnetes Doppel-Kugelgelenk in der Lage, unterschiedliche Bewegungen der Innen- und Außenschale bis zu einer bestimmten Größenordnung in einer Parallelverschiebung zwängungsfrei aufzunehmen. Die diese sogenannten KE-Gelenkanker [117] bestehen aus zwei Ankerstangen Durchmesser 5,25 mm, die in dem mittig angeordneten Doppel-Kugelgelenk befestigt sind.

Es werden drei Ankertypen unterschieden (siehe Bild 13). Bei Ankern des Typs 30 sind zwei Gelenke in einer Hülse angeordnet, bei den übrigen Typen sind die zwei Gelenke jeweils in einer eigenen Hülse, die über ein Distanzrohr miteinander verbunden sind, angeordnet. Die Länge des mittigen Gelenkteils ist variabel und beträgt zwischen 30 mm bis 180 mm.

Während der Verankerungsteil und die Verankerung der KE-Gelenkanker [117] in der Außenschale immer gleich ist (Verankerung mittels gewellter Ankerstange in der Mörtelfuge), können bei entsprechender einseitiger Ausbildung der Anker für die Innenschale auch andere Befestigungselemente und andere Materialien für die Ausführung der Innenschale verwendet werden.

Zweischalige Außenwände mit Schalenabständen > 150 mm dürfen abweichend von DIN EN 1996-1-1:2013-02/NA [64] nur mit Kerndämmung mit nichtbrennbaren oder schwer entflammbaren Dämmstoffen ausgeführt werden. Für eine flächenförmige Verankerung der Vormauerschale gelten die Bestimmungen der Norm für Drahtanker mit einem Durchmesser 5 mm.

Je nach Art der Verankerungsanordnung wird unterschieden:

 Bei nicht flächenförmiger Verankerung der Vormauerschale, z.B. linienförmig oder nur in Höhe der Decken, ist die Standsicherheit der Vormauerschale nachzuweisen. Sie dürfen auch bei größeren Höhenabständen der Schalenabfangungen (d.h. > 12 m siehe Abschnitt 2.2.5) eingesetzt werden, wenn nachgewiesen ist, dass die



zulässigen zwängungsfrei aufnehmbaren Verformungsdifferenzen zwischen Innenund Außenschale nicht überschritten werden.

 Bei linienförmiger Verankerung soll der horizontale Abstand der Anker 500 mm nicht überschreiten.



Ankertyp	Gelenklänge ¹ Zulässige Verformungs		Zutässiger Schalenabstand	Einbindetiefe ² in Trag- und Außenschale ³ bei		
	mm	differenz v mm	mm	min a mm	max a mm	
KEG 11	30	±5	40 bis 80	100	80	
KEG 12	60	a 10	70 bis 110	100	80	
KEG 13	90	= 10	100 bis 140	100	80	
KEG 14	120	± 10	130 bis 170	100	80	
KEG 15	150	± 10	160 bis 200	100	80	
KEG 16	180	a 10	190 bis 210	100	90	
1 Syna 2 Für 2 3 Dicke	retrische Anordnung d wischerwerte der Sch mindestans 115 mm.	les Gelenkas zwischen alenabsitände a sind de Ausführung in Fugengi	Trag- und Außenschale Werte geradinig zu inter attatich	polioren		

a) Typ 10: zum Einlegen in die Lagerfuge beider Schalen



Ankertyp	Gelenklänge	Zulässige Verformungs-	Zulässiger Schalenabstand ¹	Einbindetiefe ² in der Außenschale ² bei		
	mm	differenz v	amm	min a	max a mm	
KEG 21	30	± 5	50 bis 85	100	65	
KEG 22	60	± 10	80 bis 115	100	65	
KEG 23	90	a 10	110 bis 145	100	65	
KEG 24	120	± 10	140 bis 175	100	65	
KEG 25	150	± 10	170 bis 205	100	65	

b) Typ 20: mit einseitigem Gewinde M6 für die Deckenstirn oder die Wand



Ankertyp	Gelenklänge ¹	Zulässige Zulässiger Verformungs- Schalenabstand		Einbindetiefe ^{2,3} in Trag und Außenschale ⁴ bei		
	mm	differenz v mm	mm	min a mm	max a	
KEG 131	30	*5	40 bis 80	95 (100)	75 (80)	
KEG 132	60	± 10	70 bis 110	95 (100)	75 (80)	
KEG 133	90	± 10	100 bis 140	95 (100)	75 (80)	
KEG 134	120	± 10	130 bis 170	95 (100)	75 (80)	
KEG 135	150	a 10	160 bis 200	95 (100)	75 (80)	
KEG 136	190	* 10	190 bis 210	95 (100)	85 (90)	



Bild 13 Geometrie, zulässige Verformungen und Schalenabstände beim KE Gelenkanker [117] im Vergleich

Die sich in Abhängigkeit vom Ankertyp ergebenden zulässigen Schalenabstände und die maximal zulässigen Verformungsdifferenzen zwischen Außen- und Innenschale sind in Bild 13, neben der Geometrie des jeweiligen Dübels, dargestellt.

Die Verankerungen sind ingenieurmäßig zu planen und zu bemessen. Dabei sind die entsprechenden Ankerlasten zu berücksichtigen (siehe Tabelle 5). Die Anker sind planmäßig ohne Auslenkung im Gelenkteil zu planen und einzubauen, dass sie sich im Rechtenwinkel, d.h. ohne Versatz der Ankerteile, zur Innen- und Außenschale befinden. Die zulässigen Verformungsdifferenzen dürfen infolge Einbautoleranzen und Verschiebungen der Außenschale gegenüber der Innenschale (z.B. infolge Temperatur, Quellen, Schwinden, Kriechen) nicht überschritten werden.



a) Typ 10				b) Typ 20) und 30			
Anker nach Ankertyp	Länge des Gelenkteils mm	zulässige Zugkraft kN	zulässige Druckkraft kN	Anker nach Ankertyp	Anker nach Bild 110 Ankertyp	Länge des Gelenkteils mm	zulässige Zugkraft kN	zulässige Druckkraft kN
KEG 11	30	1,5	1,8	KEG 21	KEG 131	30	1,5	1,8
KEG 12	60	1,5	1,2	KEG 22	KEG 132	60	1,5	1,2
KEG 13	90	1,5	0,8	KEG 23	KEG 133	90	1,5	0,8
KEG 14	120	1,5	0,8	KEG 24	KEG 134	120	1,5	0,8
KEG 15	150	1,5	0,8	KEG 25	KEG 135	150	1,5	0,8
KEG 16	180	1,5	0,8	_	KEG 136	180	1,5	0,8

Tabelle 5Zulässige Ankerlasten gemäß [117], aus [100]

Bei Gebäuden, bei denen Außenwandbekleidungen schwerentflammbar sein müssen und die unter Verwendung von schwerentflammbaren Dämmstoffen aus Polystyrol-Hartschaum mit Dicken > 100mm ausgeführt werden, müssen konstruktive Bedingungen zum Brandschutz eingehalten werden.

Durch die konstruktive Ausbildung der Anker kann keine nennenswerte Feuchtigkeit von der Außenschale zur Innenschale gelangen. Deshalb wird auf die zusätzliche Anordnung von Abtropfscheiben verzichtet.

Die KE Gelenkanker [117] sind im Zusammenhang mit der im Projekt 0-EneMau definierten Zielstellung in vielerlei Hinsicht interessant:

Die Angaben zu Ankerlasten und zulässige Verformung geben Aufschluss über Größenordnungen und bieten so Anlass zu Optimierung. Neben dem vorhanden seine eines effizienten Gelenks zum Toleranzausgleich etc. und der Möglichkeit sowohl flächig als auch Linienförmig zu verankern, bietet das Gelenk die Möglichkeit zur Anordnung einer thermischen Trennung. An der Schnittstelle "Gelenk" ist, ähnlich wie dies mit den unterschiedlichen Anschlussvarianten auf der Schalen Innenseiten der Fall ist, die Entwicklung einer Verbindung für den luftdichten Abschluss der VIP-Dämmelenente möglich.

Gelenkanker haben sich, ähnlich wie die linienhafte Ankeranordnung, in Deutschland bisher nicht durchgesetzt. Bei der linienhaften Ankeranordnung mag sich dies mit zusätzlichem Planungsaufwand begründen lassen. Bei den Gelenkankern ist dies aber nicht der Fall; es liegen entsprechende bauaufsichtliche Zulassungen vor. Daher sollte im Vorfeld, oder zumindest parallel, zu einer technischen Weiterentwicklung, eine Untersuchung erfolgen, die klärt, warum die Akzeptanz und die Marktdurchdringung von, beispielsweise Gelenkanker, in Deutschland so gering ist und nur in besonderen Einzelfällen [120] Anwendung findet [36].

2.2.4.4. System ClickBrick[119]

Mit dem System ClickBrick kann ein System gezeigt werden, dass durch die trockene Fügung und die Verwendung eines besonderen Befestigungssystems die Möglichkeit zur Errichtung einer demontablen und somit sortenrein trennbaren Vormauerschale bietet. Die Verblendschale wird aus speziell geformten Verblendern im Halbsteinverband als Trockenmauerwerk ausgeführt. Form und Lochanordnung sind in Bild 14 dargestellt.







a) Formangaben gemäß Zulassung aus [119] b) Ansicht

Bild 14 Form und Lochanordnung des Vormauersteines

Die Verblender sind mit einer einseitig angeordneten Nut mit einer Breite von 2,7 mm und einer Tiefe von 9,5 mm versehen. Die Stirnseiten der Verblender sind planparallel geschliffen. Die Verblender werden untereinander in jeder Stoßfuge mit Clips in den Nuten der Steine verbunden (siehe Bild 15). Die Clips bestehen aus 0,65 mm dickem, kaltgewalztem Blech aus nichtrostendem Stahl.

Bezeichnung der Verankerung	ezeichnung der Zulassungs- erankerung nummer		gsart	Verankerungsgrund ¹⁾
Reuß-Luftschicht- anker	Z-21.2-941	Dübelhülse aus Polyamid	Drahtanker 4 mm mit Einschlag- gewinde	Normalbeton Festigkeitsklasse ≥ C12/15 bzw. ≥ B 15, Mauerwerk aus ungelochten Vollziegeln oder ungelochten Kalksandsteinen Steinfestig- keitsklasse ≥ 12
BEVER-Dübelanker Typ ZV	Z-21.2-1009	Dübelhülse aus Polyamid	Drahtanker 4 mm mit Einschlag- gewinde	Normalbeton Festigkeitsklasse ≥ C12/15 bzw. ≥ B 15, Mauerwerk aus ungelochten Vollziegeln oder ungelochten Kalksandsteinen Steinfestig- keitsklasse ≥ 12
BEVER-Porenbeton- Luftschichtanker PB 10	Z-21.2-1546	Dübelhülse aus Polyamid mit Außengewinde	Drahtanker 4 mm mit aufgerolltem Gewinde ²⁾	Porenbetonmauerwerk Steinfestigkeitsklasse ≥ 4 oder Porenbetonbauteile Festigkeitsklasse ≥ 3,3
H&R Luftschicht- dübelanker FD LDZ	Z-21.2-1732	Dübelhülse aus Polyamid	Drahtanker 4 mm mit Einschlag- gewinde	Normalbeton Festigkeitsklasse ≥ C12/15 bzw. ≥ B 15, Mauerwerk aus ungelochten Vollziegeln oder ungelochten Kalksandsteinen Steinfestig- keitsklasse > 12

Tabelle 6Für das System ClickBrick [119] zugelassene 4 mm Drahtanker mit den
dazugehörenden Dübelhülsen aus [100]

1) Nähere Angaben sind der betreffenden allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung zu entnehmen.

 Abweichend von der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung ist statt der Welle zur Verankerung in der Vormauerschale der Anker gerade auszuführen.

Die Mauerwerksschalen werden mit speziell bearbeiteten Drahtankern (Nenndurchmesser 4 mm) aus nichtrostendem Stahl und dazu gehörenden Dübelhülsen miteinander verbunden. Für das System dürfen nur bestimmte allgemein bauaufsichtlich zugelassene Drahtanker verwendet werden (siehe Tabelle 6).







a) Formangaben gemäß Zulassung [119] b) Aufsicht Bild 15 Form und Anwendung des Clipelementes







b) Konsole WK-D-290-7,0 aus Lean Duplex Rostfrei D4 [107] der Firma Modersohn

Bild 16 Sockelabschluss oberhalb Geländeoberfläche mit Vorwand auf Konsole

Mauerwerkskonsolen (s. Bild 16), kurz Konsolen, leiten die Gewichtskräfte aus der Vorsatzschale über Zug und Anpressdruck von der Außen- in die Innenschale. Befestigt werden die Konsolen entweder an einbetonierten Ankerschienen, über Mörteltaschen im Mauerwerk oder auch mittels Dübeln. Durch Anordnung von Langlochanschlüssen können sie horizontal und vertikal justiert werden. Notwendig werden Konsolen bei Vorwandhöhen größer 6 m bzw. 12 m und da, wo im Sockel eine Fundamentverbreitung für die Vormauer nicht infrage kommt.

Grundsätzlich werden Konsolen anhand der Art der Auflagerung der untersten Steinreihe unterschieden. Es gibt solche die eine durchgängige Auflagerung der Verblendschale ermöglichen und Einzelkonsolen, die auf beiden Seiten jedes Steins angeordnet werden. Die Bemessung der Konsolen richtet sich nach dem Eigengewicht der auf die Konsolen entfallenden Wandflächen. Die Berechnung selbst erfolgt dann anhand der jeweiligen Typenprüfung. Bei den Einzelkonsolen, die in der Regel linienförmig am Wandfuß angeordnet sind, ergeben sich, in Abhängigkeit vom U-Wert der Wand, c-Werte von 0,020 bis 0,100 W/K. Hierbei kann gezeigt werden, dass Materialoptimierungen durch stoffliche Veränderungen zur Verbesserung der Materialnutzung und Reduktion des Wärmestroms führen. Aufgrund der Einführung sogenannter Lean Duplex Stähle ergeben sich bei den Abfangkonstruktionen wesentliche höhere Festigkeiten. Mit diesen können nicht nur Materialquerschnitte deutlich reduziert und folglich Gewicht, Material und Kosten eingespart, sondern auch Wärmebrückenverluste merklich vermindert werden [107] [106] [121].

2.3. Bauteilanschlüsse

Alle Bauteilanschlüsse müssen konstruktiv dahin gehend ausgebildet sein, dass eine Durchfeuchtung der Innenschale verhindert wird. Naturgemäß ist die Abdichtung der Anschlüsse aufgrund der Zweischaligkeit aufwendig. Überhöhte Anforderungen an die Beanspruchung führen zu unwirtschaftlichen oder realitätsfernen Lösungen. In diesem Zusammenhang sei auf den aktuellen Stand des Wissens zur Feuchtebeanspruchung infolge Schlagregen hingewiesen: Aufgrund des zweistufigen Dichtungsprinzips und der Wasserspeicherfähigkeit der Verblendschale kann die durch die Vorwand schlagende Wassermenge als sehr gering eingeschätzt werden.

Wesentliche Bauteilanschlüsse sind:

- im Bereich der Gründung: der Wandsockel.
- bei den Öffnungen: Fenster und Türen.
- bei den Dringungen: Bauteile wie Balkonplatten oder statische beanspruchte Konsolen.

Neben der Reduktion der gesamten Wandstärke werden insbesondere bei den Bauteilanschlüssen Vorteile und Vereinfachungen durch reduzierte Dämmstärke beim Einsatz von VIP- Elementen erwartet.

2.3.1. Sockel

Beim Gebäudesockel dürfen Vormauer und Schalenzwischenraum oberhalb wie unterhalb der Geländeoberfläche ausgeführt werden. Bei einer Entwässerung unterhalb der Geländeoberfläche ist gemäß DIN 18195-4 [44] eine Sickerschicht oder Dränage vorzusehen. Die Wandabdichtung ist mit gemäß DIN 18195-2 [43] geregelten Bitumen- oder Kunststoffbahnen auszuführen, bis zur Vorderkante der Außenschale zu verlegen und mindestens 150 mm an der Innenschale hoch zu führen. Ein künstliches Gefälle hin zur Außenseite der Wand ist durch Unterlegung der wasserführenden Schicht zu gewährleisten. Zum Schutz vor aufsteigender Feuchte müssen je nach Lage des Sockels mindestens eine oder zwei waagerechte Abdichtungen im Wandquerschnitt der Innenschale vorgesehen werden.





a) Sockelabschluss oberhalb Geländeoberfläche mit Vorwand auf Konsole



b) Sockelabschluss unterhalb Geländeoberfläche im Bereich der Außentür mit Vorwand auf Fundamentverbreiterung

Bild 17 Abdichtung im Bereich des Sockelanschlusses aus [114]

2.3.2. Öffnungen - Fensteranschlüsse



Bild 18 Seitlicher Rohbauanschluss Fenster, in Dämmebene, aus [114]

Bei den Öffnungen, insbesondere beim Anschluss der Fenster an den Rohbau, ergeben sich planmäßig folgende Anschlüsse: seitliche Fensteranschlüsse im Bereich der Fensterleibung, untere im Bereich der Fensterbrüstung und der obere Fensteranschluss im Bereich des Sturzes. Die Fensteranschlüsse sind je nach Lage des Fensters zu den beiden Rohbauöffnung auf unterschiedliche Weisen in das zweischalige Dichtprinzip eingebunden.

- Der Fensteranschluss kann an Hintermauer befestigt sein. Die Verblendschale wird dann nach innen geführt.
- Der Fensteranschluss kann an der nach außen geführter Hintermauer befestigt werden.
- Der Fensteranschluss kann in Dämmebene durch ein umlaufendes Fensterprofil mit Dichtanschluss vorgesehen werden (siehe Bild 18).



Beim Stoß der Außen- an die Innenschale ergeben sich im Bereich des Übergangs zwischen Fenster und Rohöffnung potentiell Wärmebrücken, die es zu berücksichtigen gilt.



Bild 19 Oberer und unterer Rohbauanschluss Fenster, in Dämmebene, aus [114]

Der Brüstungsanschluss wird folgerichtig entsprechend dem seitlichen Rohbauanschluss des Fensters ausgebildet. Dabei sollte die Außenfensterbank, sofern sie nicht selbst aus Mauerwerk errichtet ist, aus wasserdichtem Material bestehen und eine seitliche Aufkantungen aufweisen. Ein Überstand als Abtropfkante ist in jedem Fall sinnvoll.

Der ursprünglich mittels scheitrechtem Bogen überspannte Fenstersturz wird heute meist mit einem Flachsturz, einer örtlich bewehrten und ausbetonierten U-Schale, einem verblendeten Betonfertigteil oder mittels einer Stahlkonsole überdeckt. Die Abdichtung des Fensters erfolgt heute meist durch komplettes abkleben der dreiseitig umlaufende Dämmung und Anordnung einer zusätzlichen Dichtungsbahn oberhalb der Rohbauöffnung [1]. Idealerweise erfolgt die Ansteuerung und Versorgung mit Strom von außen liegendem Sonnenschutz durch das Fensterelement und nicht durch das Mauerwerk und dessen Abdichtungen.

2.4. Ausgewählte Aspekte

2.4.1. Toleranzausgleich

Beim zweischaligen Verblendmauerwerk werden Höhentoleranzen der Tragschale, wie bei allen Mauerwerksbauen auch, am Wandfuß des jeweiligen Geschosses, in der sogenannten Kimmschicht ausgeglichen. Forderung nach flucht- und höhengleich verlegtem Sichtmauerwerk und die Notwendigkeit zu einer, für den Ausbau ausreichend ebenen Innenwand, führen zu einem Ausgleich der anfallenden Ebenheitstoleranzen im Schalenzwischenraum.

Der 4 cm starke Luftspalt der hinterlüfteten oder der 2 cm starke Fingerspalt beim kerngedämmten Verblendmauerwerk ist erfahrungsgemäß ausreichend um sämtliche Toleranzanforderungen beim zweischaligen Verblendmauerwerk angemessen zu erfüllen.



Werden plattenförmige Dämmstoffe verwendet, so ergebt sich, insbesondere bei einer Hintermauerschale in Ziegelmauerwerk, die Notwendigkeit Unebenheiten, welche aus Versatzungenauigkeiten zwischen den einzelnen Steinlagen oder der Decken entstehen, auszugleichen. Gegenwärtig werden diese Toleranzen zum Beispiel bei aluminiumkaschierten Polyurethan Hartschaumdämmplatten (PU-Platten) [90] durch eine zusätzlich aufgebrachte Schicht Mineralwolle an der Rückseite der Platten ausgeglichen. Die Dicke der Ausgleichsschicht beträgt in der Regel 20 mm, im uneingebauten Zustand. Beim Verbau wird die Schicht gegen die unebene Außenseite der Hintermauer gepresst und bis auf eine Dicke von 10 mm verdichtet [90].

2.4.2. Tendenzen beim Schalenabstand

Die Norm legt bei der Ausführung von zweischaligem Verblendmauerwerk einen Schalenabstand von mindestens 40 mm bis maximal 150 mm fest. Größere Schalenabstände sind nur bei Verwendung gesondert zugelassener Verankerungen möglich. Steigende Anforderungen an den thermischen Wärmeschutz führten zunächst zu größeren Dämmstoffdicken auch bei der zweischaligen Wand und somit zu einer Tendenz hin zu größeren Schalenabständen. Der Markt hat auf die erhöhten Anforderungen reagiert und es stehen zugelassene Produkte für größere Schalenabstände zur Verfügung.

Der Tendenz zu noch größeren Dämmungen und Schalenabständen sind jedoch hinsichtlich der Effizienz gesetzt. Es ergeben sich konstruktive Erschwernisse bei der Abfangung der Vorwand und der Fensterstürze. Zudem ergeben sich unnatürlich tiefe Fensterlaibungen und ungünstige Gebäudekennwerte. Somit ergeben sich folgende Optionen:

- Der Einsatz effizienter, sogenannter Hochleistungsdämmstoffe im Schalenzwischenraum [91].
- Verbesserung der thermischen Leistung der Gesamtkonstruktion, durch (zusätzliche) Verwendung von thermisch wirksamen Steinen in der Hintermauer. Dies kann mit Hochlochziegeln, Porenbetonsteinen oder mit Dämmung gefüllte Steine aus Beton erreicht werden.



2.5. Zeilenförmige bzw. geschosshohe Befestigung

Bild 20 Mögliche Verankerung der Vorsatzschale von zweischaligen Wänden nach [2]

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

2.5.1. Gegenüberstellung der Verankerungsformen

Bei einer geschosshohen Befestigung der Vorsatzschale wird die Vormauer nur durch linienförmig, an Wandfuß und Kopf angeordnete Anker horizontal gehalten. Das Verhalten der Vormauer unter Windlast (Horizontallast) ist, ähnlich der bei einer zweiseitig gefassten Ausfachung: Sie verformt sich unter der Horizontallast und verkeilt sich unter Verdrehung im Auflager in der oberen, unteren und eventuell seitlichen Wandhalterung. Dies trifft auch auf die zeilenhafte Befestigung der Vorsatzschale zu, bei der durch eine zusätzliche, meist mittig angeordnete Ankerzeile die Durchbiegung begrenzt wird. Bei beiden, der zeilenförmigen wie der geschosshohen Befestigung, wird die Vorsatzschale unter horizontaler Last auf Biegung beansprucht. Aus der Reduktion der Ankerreihen auf zwei bzw. drei Reihen pro Geschoss resultieren technische und wirtschaftliche Vorteile. Diese sind:

- Rationalisierung der Ankeranzahl und damit Effizienzsteigerung bei der Bauwerkserrichtung durch Material Einsparung und Minimierung der Arbeitsgänge pro Geschoss.
- Verringerung der Durchstoßpunkte und damit einhergehende Verbesserung der wärmetechnischen Lösung.

Diesen Vorteilen stehen allgemeine Bedenken gegenüber:

Anders als bei der schubfesten, flächigen Verteilung der Anker, besteht bei der geschosshohen, wie bei der linienförmigen Verankerung der Vorwand die Gefahr, das unter Horizontallast die geschosshohe Wand aufgrund zu geringer Auflast unter Biegezug versagt und als ganze geschosshohe Wand herausfällt.

Diese Bedenken gilt es, zu entkräften. Dem Risiko ist, ohne wirtschaftlich Abstriche hinnehmen zu müssen, in einem angemessenen Bemessungskonzept zu begegnen. Dies mag ein Grund dafür sein, warum, in Deutschland linienförmige Verankerungen seit Langem bekannt sind, aber bis heute keinen Eingang in die Normung gefunden haben.

2.5.2. Stand der Technik in der Schweiz

In der Schweiz sind zeilenförmig bzw. geschosshoch verankerte Vorwandkonstruktionen seit Jahrzehnten in der Baupraxis eingeführt. Sie können dort zu Recht als Stand der Technik bezeichnet werden. Sie werden dort auch bei Gebäuden mit hohen Windbelastungen, wie beispielsweise bei Hochhäusern eingesetzt (siehe Bild 21).

Im Gegensatz zur flächig- schubfesten Verankerung in Deutschland wird in der Schweiz die Anordnung von Ankern und Lagerfugenbewehrung zur Aufnahme von Spannungsspitzen miteinander kombiniert. Bei linienhafter Verankerung sind pro Geschoss zwei Ankerreihen vorgesehen: Die Erste befindet sich in Sturz-, die Zweite in Brüstungshöhe. Die genaue Anzahl und Lage der Anker ist durch den Ingenieur zu bemessen. Im Folgenden werden die Planungshinweise der Firma Swissbrick zur Ankeranordnung zitiert [87]:

- Der vertikale Abstand der Ankerreihen sollte 1,70 m nicht überschreiten.
- Im Deckenbereich sind die Anker in der ersten oder zweiten Lagerfuge unterhalb der Decke anzuordnen.
- Bei Gleitlagerung der Decke des obersten Stockwerks sollte auf Verankerung in der Deckenstirn verzichtet werden.



• Zur Verteilung der eingeleiteten Kräfte ist unter- oder oberhalb der Ankerlage eine Lagerfugenbewehrung mit \emptyset = 5 mm, oder eine Bewehrung mit \emptyset = 4 mm oberund unterhalb der Ankerreihe anzuordnen.



Bild 21 Hochhaus mit geschosshoch verankertem Verblendmauerwerk Dienstleistungsund Verwaltungszentrum Theaterstraße in Winterthur, aus [78]

Die zum Einsatz kommenden Spiral- und KE- Gelenkanker müssen sowohl Auflagerkräfte der Wand übertragen, als auch die Verformungen zwischen Verblendschale und Tragschale zwängungsfrei ermöglichen. Beide Ankertypen werden nach Art der Befestigung und Verankerung in der Hintermauer unterschieden (siehe Tabelle 7).

Der Einsatz von Spiralankern ermöglicht Schalenabstände von 5 bis 23 cm bei einer maximal aufnehmbaren Zug- oder Druckkraft von 0,8 kN bei einem Schalenabstand von 23 cm. Durch die spiralförmigen Windungen werden unterschiedliche Deformationen der Außen- und Innenschale aufgenommen. Dabei ist eine Schalenverschiebung von \pm 5 mm bei in alle Richtungen gleich bleibender Knickstabilität möglich. Die Verspreizung sorgt für einen festen Sitz in der Mörtelfuge.

Die Gelenkanker verfügen über Doppelgelenke in Ankermitte, welche je nach Ankerlänge eine Beweglichkeit zwischen 15 und 93 mm ermöglichen. So können die Verformungsunterschiede der beiden Wandschalen bei anhaltender Knickstabilität problemlos abgefangen werden. Bei zulässigen Schalenabständen von 4 bis 32 cm liegen die aufnehmbaren Kräfte bei ± 1,7 kN für den Maximalabstand.



Tabelle 7In der Schweiz zum Einsatz kommende Spiral- und KE-Gelenkanker für
zeilenförmige Verankerungen der Vormauer [87]

Art der Befestigung	ZZ- Spiralanker	KE-Gelenkanker
a) In der Lagerfuge der Hintermauer		
b) Mit Siebhülse im Mauerstein		
c) Als Einschlag – Metalldübel in Stahlbeton		+ ²⁵ + ¹⁸ +

2.5.3. Stand der Forschung in Deutschland

Auch in Deutschland ist diese Art der Verankerung seit Langem bekannt und Gegenstand von Forschungen. Im Folgenden werden die in Tabelle 8 zusammengefassten Forschungsberichte und Gutachten bezüglich der Anordnung von Mauerankern und Nachweiskonzepte für Verblendschalen mit linienförmiger Verankerung vorgestellt und ausgewertet.

Tabelle 8Untersuchungen zu linienförmigen Verankerungen

Jahr	Autor	Gegenstand / Inhalt
1984	Schellbach, Zumbroich [111]	Standsicherheit, thermische Differenzen,
		Großversuche
1986	Glitza [83]	Umordnung von flächenhafter
		zu linienhafter Verankerung
1992	Jedamzik, Junge [103]	Versagensformen
2004	Brameshuber et al. [31]	Analogie zu Ausfachungswände
2007	Graubner [85]	Bemessungskonzept

- Zur Untersuchung von Schellbach und Zumbroich [111]

Schellbach und Zumbroich vergleichen in [111] Vorsatzschalen mit einer geschossweisen Verankerung bzw. flächigen Verankerung unter Wind- und Temperaturlasten. Es wurden Versuche zur Tragfähigkeit und zum Riss- und Verformungsverhalten durchgeführt.

Die Versuche ergaben, dass der Lastfall "ungleichmäßige Temperatur" gegenüber der Windlast maßgebend wird. Für die Berechnung der Vorsatzschale wurde ein real vorkommender Temperaturgradient von ±10-15 Kelvin angegeben. Bei linienförmiger Verankerung der Vorsatzschale im Abstand von 2 m entstehen aufgrund der freien Verformung der Schale keine Zwangsbeanspruchungen. Bei enger liegenden Ankerreihen (½



Geschoss z.B.) kommt es infolge der steigenden Unbestimmtheit zu einer zunehmenden Zwangsbeanspruchung und dadurch zu Rissen im Mauerwerk.

Zur Untersuchung von Glitza [83]

Glitza betrachtet in [83], wie eine linienförmige Verankerung ausgebildet werden kann, um nicht die allgemeine Forderung nach 5 bzw. 7 Ankern / m² zu verletzen. Nach Gl. (1) errechnen sich die entsprechenden benötigten Ankerabstände. Tabelle 9 zeigt für ausgewählte vertikale Distanzen der linienförmigen Verankerung den erforderlichen Mindestanstand der Anker horizontal.

$$1/(a x) =$$
 Ankeranzahl / m²

(1)

mit

a = Abstand der Ankerlinien senkrecht x = Ankeranzahl / m²

Tabelle 9Abstand der Anker [m] bei linienhafter Verankerung mit 5 bzw. 7 Ankernpro m²

a	a [m]	0,50	0,60	0,75	0,80	0,90	1,00	1,10	1,25	1,30	1,40	1,50	1,60
Anzah	l –												
5		0,400	0,333	0,267	0,250	0,222	0,200	0,182	0,160	0,154	0,143	0,133	0,125
7		0 204	0 220	0 101	0 1 7 0	0 150	0 1 1 2	0 1 2 0	0 1 1 1	0 1 1 0	0 102		0 080

Die Drahtanker bilden die horizontalen Auflager der Vorsatzschale, welche daher als punktgestützte Platte angesehen werden dürfte. Glitza [83] gibt dafür für den ungünstigsten Fall ein maximales Biegemoment im Feld von ql²/8 an und bezieht sich damit auf einen Einfeldträger.

Um die statisch auftretenden Biegezugspannungen senkrecht zur Lagerfuge ohne Rissbildung der Vorsatzschale übertragen zu können, ist eine vertikale Auflast im Querschnitt notwendig, welche diesen überdrückt. Ist die nicht der Fall, wird die Lagerfuge an der Stützstelle aufklaffen, wodurch sich die Verankerungstiefe der Anker in der Vorsatzschale abgemindert und somit ein Sicherheitsrisiko darstellt (siehe Bild 22).



Bild 22 Verankerung bei aufklaffender Lagerfuge, aus Glitza [83]


(2)

Im Falle einer vertikalen Auflast, welche ausschließlich aus dem Eigengewicht der Vorsatzschale herrührt, gibt Glitza [83] die Formel (2) an, um die notwendige Wandhöhe h zu berechnen. Innerhalb dieses Bereiches werden geringere Ankerabstände notwendig. Grundlage dabei ist eine einachsige Tragwirkung der Vorsatzschale.

$$h = \frac{w \times c_p \times a^2 \times 6}{8 \times q \times d^2}$$

mit

h = Wandhöhe

w = Windlast

c_p = aerodynamischer Kraftbeiwert

a = Ankerabstand senkrecht

d = Dicke der Vorsatzschale

g = Wichte der Vorsatzschale

- Zur Untersuchung von Jedamzik und Junge [103]

Jedamzik und Junge untersuchten in [103] Vorsatzschalen mit Zeilen- und Flächenverankerung unter Wind- und Temperaturbeanspruchung.

Im Ergebnis dieser Untersuchungen wurde festgestellt, dass die Verformungen der Vormauerschale infolge der angesetzten Temperaturerhöhungen von bis zu 80 Kelvin auf der Oberfläche bei flächenhafter Verankerung geringer sind als bei linienförmiger Verankerung. Jedoch führten die Verformungen infolge Temperaturerhöhung in keinem der beiden Fälle zu einer Schädigung der Vorsatzschale.

Nach [103] sind folgende Aspekte maßgebend für die Beanspruchbarkeit und das Versagen der Gesamtkonstruktion:

- Bei linienförmiger Verankerung die aufnehmbaren Biegezugspannungen infolge Horizontalbelastung der Vorsatzschale. Demnach war die Rissbildung in der Lagerfuge, in der Grenzschicht von Mörtel und Stein, die vorherrschende Versagensform.
- Die vorherrschende Versagensform bei der flächenförmigen Verankerung war das Ankerversagen.

Für den statischen Nachweis der Ankerschale wurde bei linienförmiger Verankerung mit horizontal oder vertikal angeordneten Ankern vereinfachend von einem Durchlaufträger ausgegangen. Damit wäre eine Maßnahme zur Verringerung der Biegezugspannungen z.B. die Verkürzung der Ankerreihenabstände oder die Vergrößerung der Vorsatzschalendicke.

Um die Biegebeanspruchung zu reduzieren, wird bei Jedamzik und Junge [103] eine kreuzweise Anordnung von Ankerreihen vorgeschlagen. Das daraus abgeleitete Tragverhalten der Vorsatzschale "in Analogie an eine Ausfachungswand" wurde experimentell bestätigt, wobei festzustellen ist, dass hierbei die Randeinspannung der Vorsatzschale von der einer Ausfachungsfläche abweicht.



- Zur Untersuchung von Brameshuber und Graubner et al. [31]

Der an der RWTH Aachen erstellte Forschungsbericht von Brameshuber und Graubner et al. [31] hat sich mit der Analyse der bestehenden Größen der Ausfachungsflächen beschäftigt. Das Ziel des Forschungsvorhabens war es, die Ausgangsparameter zu identifizieren, auf denen die Werte der Verankerungsformen basieren. Anschließend sollten, aufbauend auf diesen Annahmen die Auswirkungen der Windlasten, nach der damals neu eingeführten DIN 1055-4:2005 [40] auf die Ausfachungsflächen, untersucht werden.

Unter der Annahme, dass sich das statische System von Vorsatzschalen jenem von Ausfachungswänden in Fachwerk-, Skelett- und Schottensystemen ähnelt, liegt die Idee nahe, diese Analogie zu nutzen.

Ausfachungswände dürfen ohne statischen Nachweis ausgeführt werden, wenn die Wände vierseitig gehalten, die Ausfachungsflächen gemäß nachfolgender Tabelle nicht überschritten und Dünnbettmörtel, Normalmörtel, mindestens der Mörtelgruppe IIa oder Leichtmörtel LM 36 verwendet werden.

Tabelle 10	Größte	zulässige	Werte	nicht	tragender	Ausfachungswände,	die	gemäß
DIN 1053-1.	1996-11	, Tabelle 9	[39], ke	einen r	echnerisch	en Nachweises bedür	fen.	

Wanddicke	Größte zu	llässige Werte	') der Ausfachungsflächen in m² bei einer Höhe über Gelände von			
d	0 bis	s 8 m	8 bis	20 m	20 bis	100 m
mm	ε = 1,0	ε ≥ 2,0	ε = 1,0	ε ≥ 2,0	ε = 1,0	ε≥2,0
115 ²)	12	8	8	5	6	4
175	20	14	13	9	9	6
240	36	25	23	16	16	12
≥ 300	50	33	35	23	25	17
1) Dei Ceite	mu orbältnige of	10	< 20 dite	n die mräßt		Marta dar

 Bei Seitenverhältnissen 1,0 < ε < 2,0 dürfen die größten zulässigen Werte der Ausfachungsflächen geradlinig interpoliert werden.

²) Bei Verwendung von Steinen der Festigkeitsklasse ≥ 12 dürfen die Werte dieser Zeile um ¹/₃ vergrößert werden.

Die von der damals gültigen DIN 1053-1 [39] beschriebenen Verankerungsformen abweichenden Verankerungen und größeren Schalenabstände sind, genauso wie heute, in Deutschland ohne Standsicherheitsnachweis der Vorsatzschale nicht zulässig. Neben der Möglichkeit der genauen Berechnung oder der Simulation mit Finiten Elemente (FE-Methode) bietet der Nachweis über die Einhaltung der zulässigen Ausfachungsflächen nach Tabelle 10 bzw. Tabelle in DIN EN 1996-3/NA [65] (NCI Anhang NA.C) eine einfache Alternative.

Im Ergebnis der Untersuchungen von Brameshuber und Graubner et al. [31] werden erste Werte als Näherung für den Nachweis von zweischaligem Mauerwerk auf Basis der Analogie zu Ausfachungsflächen gegeben. Die im Verlauf des Projektes angewendete Bruchlinientheorie wird im Forschungsbericht selbst als kritisch bewertet. Unklarheit besteht in der Frage, ob ein plastisches Tragverhalten in den Bruchlinien unterstellt werden darf. Nicht berücksichtigt wird der Einfluss durch Krümmungen und Dehnungen infolge von Erwärmung (siehe Abschnitt 3.2). Für die Berechnung der Ausfachungsflächen von Stahlbeton-Skelettbauwerken mag dies vertretbar sein, denn die Verformungen von Tragkonstruktion und Ausfachung sind aufgrund der ähnlichen a_{T} – Werte aller Materialien einheitlich. Bei zweischaligem Mauerwerk entstehen allerdings Zwängungen durch



Temperaturschwankungen und unterschiedlichen Verformungen der beiden Wandschalen (siehe Abschnitt 3.2).

- Zur Untersuchung von Graubner [85]

Graubner [85] untersucht die vertikale Anordnung der Ankerreihen und entwickelte ein Bemessungsmodell, dessen Ergebnis in Form von Bemessungsdiagrammen für die Vorsatzschale vorliegt. Dabei werden nichtlineare Einflüsse aus dem gerissenen Zustand unter Ausnutzung der plastischen Rotationsfähigkeit der Lagerfuge berücksichtigt.

- Rückschlüsse für die eigenen Untersuchungen

Ausgehend von den oben angegebenen Punkten zu linienförmigen Verankerungen ist es zielführend, den festen Wert von fünf Ankern pro m² und mehr, im Sinne der Wirtschaftlichkeit zu reduzieren. Daher sind Untersuchungen zu größeren Ankerkräften und - verformungen zwingend notwendig. Das postulierte Ergebnis wäre die Verwendung von weniger, vom Querschnitt her dickeren Ankern für eine linienförmige, zeilenförmige oder spaltenförmige geeignete Verankerung.

3. Beanspruchungen

Die Vorsatzschale der zweischaligen Außenwand dient in erster Linie dem Witterungsschutz. Dementsprechend muss die Wand keine Nutzlasten abtragen, sondern neben dem Eigengewicht hauptsächlich Wind- und Temperaturlasten aufnehmen. Zusätzliche Beanspruchungen aus Kriechen und Schwinden können aufgrund der geringen Lasten bzw. dem geringen Schwindmaß bei Ziegelmauerwerk vernachlässigt werden. Bei der Ausführung werden die Vorsatzschale und die Tragschale überwiegend auf einem gemeinsamen Sockel, z. B. eine Wand oder ein Fundament, gegründet (siehe Abschnitt 2.3.1), sodass Beanspruchungen aus Setzungsunterschieden zwischen den beiden Wandteilen ebenfalls nicht zu erwarten sind.

3.1. Windlasten

3.1.1. Allgemeines

Auf dem Teilsicherheitskonzept der DIN EN 1990 [60] basierend, erschien im Dezember 2010 die neue Windlastnorm DIN EN 1991-1-4:2010-12 [62]. Bei der Ermittlung der auf Bauwerke einwirkenden Windlast sind zukünftig die geografische Lage und die Bodenrauigkeit zu berücksichtigen. Zur Erfassung der geografischen Lage ist die Bundesrepublik Deutschland in vier Windzonen mit unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten unterteilt. Die Bodenrauigkeit wird durch vier Geländekategorien sowie zwei Mischprofile erfasst. Die Geländekategorien differenzieren z. B. nach Stadtgebiet, Industriegebiet, Lage am See bzw. auf dem flachen Land und deren Übergangsbereichen (Mischprofile).

Nach DIN EN 1990 [60] müssen die Windlasten als veränderliche, freie und unabhängige Einwirkungen betrachtet werden und entsprechend mit anderen Einwirkungen (z. B. Eigengewicht, Schnee) kombiniert werden. Die DIN EN 1991-1-4 [62] gibt die Windlast als charakteristischen Böengeschwindigkeitsdruck q_p an, der im Mittel nur einmal in 50 Jahren überschritten werden darf. Die Böengeschwindigkeitsdrücke können nach zwei Verfahren ermittelt werden:



- vereinfachte Ermittlung eines über die Höhe konstanten Geschwindigkeitsdrucks für Gebäude bis zu einer Höhe von 25 m,
- höhenabhängiger Böengeschwindigkeitsdruck in Abhängigkeit der Bodenrauigkeit



Bild 23 Windzonenkarte gemäß Bild NA.A.1 - Windzonenkarte für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland aus DIN EN 1991-1-4_NA_2010-12 [62]

Eine vereinfachte Vorgehensweise für nicht schwingungsanfällige Gebäude bis zu einer Höhe von 25 m ist im Abschnitt 3.1.2 dargestellt.

3.1.2. Windlasten bei hinterlüfteten Wandflächen

Nach DIN EN 1991-1-4 / NA [62] kann unter Einhaltung gewisser Anwendungsgrenzen ein konstanter Winddruckbeiwert von $c_{p,net} = \pm 0,5$ für Außenwandbekleidungen angesetzt werden. Folgende Anwendungsgrenzen sind einzuhalten:

- An den Gebäudekanten ist kein Luftspalt (Dehnungsfuge) angeordnet.
- Die Winddurchlässigkeit der Verblendschale muss gewährleistet sein und gilt als erfüllt, wenn mindestens der Anteil der Öffnungen 0,75 % der Gesamtfläche beträgt. Die Öffnungen müssen über die Wandfläche gleichmäßig verteilt sein.
- Der Luftspalt zwischen der Vorsatzschale und der Innenwand bzw. der angeordneten Wärmedämmung beträgt maximal 100 mm.

Während die Kriterien für die Gebäudekanten und den Luftspalt zwischen der Vorsatzschale konstruktiv eingehalten werden können, gestaltet sich die Einhaltung der Bedingung für die Winddurchlässigkeit der Verblendschale mit vermörtelten Stoßfugen als schwierig. Aus diesem Grund werden die Windlasten für die Vorsatzschale wie bei einer einschaligen Wand



(4)

angesetzt. Die Ermittlung des Winddruckes und der benötigten aerodynamischen Beiwerte erfolgt in den nachfolgenden Abschnitten 3.1.3 bis 3.1.5.

3.1.3. Winddruck

Der Winddruck auf Außenflächen eines Tragwerkes errechnet sich allgemein zu:

$$w_e = c_{pe} \times q_p(z_e) \tag{3}$$

mit

 $w_e = AuBendruck in kN/m^2 \\ c_{pe} = Aerodynamischer Beiwert \\ z_e = Gebäudehöhe beim Vereinfachten Verfahre \\ q_p(z_e) = Geschwindigkeitsdruck für die Bezugshöhe z_e$

Die Ermittlung der Werte c_{pe} und q_k erfolgt in den Abschnitten 3.1.4 und 3.1.5.

3.1.4. Vereinfachter Böengeschwindigkeitsdruck

Die Einwirkungen aus Wind werden bei nichtschwingungsanfälligen Tragwerken durch eine statische Ersatzlast, dem Böengeschwindigkeitsdruck q_p , erfasst. Bei Bauwerken bis 25 m Höhe darf vereinfachend der Böengeschwindigkeitsdruck q_p nach Tabelle 11 in Abhängigkeit der Windzonen nach angesetzt werden. Für vorübergehende Zustände, z. B. im Bauzustand, kann der Geschwindigkeitsdruck nach DIN EN 1991-1-4 [62] zusätzlich abgemindert werden.

Tabelle 11 Tabelle NA.B.3 — Vereinfachte Geschwindigkeitsdrücke für Bauwerke bis 25 m Höhe aus DIN EN 1991-1-4_NA_2010-12 [62]

Windzone		Geschwindigkeitsdruck q_p in kN/m ² bei einer Gebäudehöhe <i>h</i> in den Grenzen von			
		<i>h</i> ≤ 10m	10 m < <i>h</i> ≤ 18 m	18 m < <i>h</i> ≤ 25 m	
1	Binnenland	0,50	0,65	0,75	
2	Binnenland	0,65	0,80	0,90	
 ²	Küste und Inseln der Ostsee	0,85	1,00	1,10	
2	Binnenland	0,80	0,95	1,10	
ľ	Küste und Inseln der Ostsee	1,05	1,20	1,30	
	Binnenland	0,95	1,15	1,30	
4	Küste der Nord- und Ostsee und Inseln der Ostsee	1,25	1,40	1,55	
	Inseln der Nordsee	1,40	—	—	

Nachfolgende Hinweise bzw. Anwendungsgrenzen sind bei Verwendung des vereinfachten Böengeschwindigkeitsdrucks zu beachten:

- Der Geschwindigkeitsdruck ist über die gesamte Gebäudehöhe als konstant wirkend anzusetzen.
- · Zur Küste zählt ein 5 km breiter Streifen.
- · Gilt auf den Inseln der Nordsee nur bis einer Gebäudehöhe von 10 m



3.1.5. Aerodynamische Beiwerte

Der aerodynamische Beiwert c_{pe} für nicht hinterlüftete Wandflächen hängt von der Größe der Lasteinzugsfläche A des Bauteils ab. Die Tabellen in den nachfolgenden Abschnitten geben den Außendruckbeiwert für A = 1 m² ($c_{pe,1}$) und für A = 10 m² ($c_{pe,10}$) wieder. Zwischenwerte können entsprechend Bild 24 bzw. Gleichung (logarithmisch) interpoliert werden.



Bild 24 Außendruckbeiwert in Abhängigkeit der Lasteinzugsfläche A aus [113]

Die Werte für A < 10 m² dienen z. B. der Berechnung von Ankerkräften von unmittelbar durch Windeinwirkung beanspruchten Bauteilen bzw. von Bauteilen mit keiner Möglichkeit zur Lastumlagerung.

Aus Bild 25 und Tabelle 12 können für Wände die Druckbeiwerte c_{pe} und deren Wirkungsflächen entnommen werden. Die Ermittlung der Windlast auf die Vorsatzschale erfolgt mit dem Druckbeiwert $c_{pe,10}$ für den Bereich A und B bzw. D. Für Einzelbauteile bzw. Einzelverankerungen sind die Windlasten mit dem Druckbeiwert $c_{pe,1}$ zu bestimmen. Die Ankerreihen stellen keine Einzelverankerung dar, da eine Lastumlagerung innerhalb der Reihe vorausgesetzt wird.



Bild 25 Einteilung der Wandflächen aus [113]



Bereich	/	۱	I	3	(I)	I	3
h/d	Cpc.10	C pe.t	C pc.10	C pc.1	C pc.10	C pc.1	C pc.10	C pe.t	C pc.10	C pe.1
≥ 5	-1,4	-1,7	-0,8	-1,1	-0,5	-0,7	+0,8	+1,0	-0,5	-0,7
1	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0	,5	+0,8	+1,0	-0	,5
≤ 0.25	-1.2	-1.4	-0,8	-1,1	-0	.5	+0,7	+1,0	-0.3	-0,5

Tabelle 12Aerodynamische Beiwerte für rechteckige Gebäude aus [113]

3.2. Temperatur

3.2.1. Allgemeines

Während sich das Eigengewicht der Wand und die Belastung aus Wind in Abhängigkeit der Lage und Geometrie der Wand bzw. des Gebäudes relativ einfach bestimmen lassen, stellt sich die Ermittlung der Temperaturlast etwas schwieriger dar. Die Beanspruchungen durch die Einwirkung der Temperatur auf ein Bauteil lassen sich in folgende Anteile gliedern:

- · Bauteildehnung (siehe Bild 26 a),
- Bauteilkrümmung (siehe Bild 26b, c)
- Eigenspannungen (siehe Bild 26d).

Für die Betrachtung der Mauerwerksvorsatzschale sind die Bauteildehnung infolge gleichmäßiger Temperaturverteilung und die Bauteilkrümmung (Schüsseln) infolge Temperaturdifferenz zwischen den Oberflächen von Bedeutung.

3.2.2. Untersuchungen von Zumbroich und Schellbach

Zumbroich [125] untersuchte verschiedene Konstruktionsarten der zweischaligen Wand auf ihr Verhalten bei Temperaturbeanspruchung. Die Ergebnisse zeigen, dass eine erhöhte Temperaturbeanspruchung bei Wänden mit Kerndämmung durch Wärmestau zwischen der Rückseite der Vormauerschale und der Außenseite der Dämmschicht nicht einstellt. Selbst intensive Sonneneinstrahlung führte nicht zu einer stark erhöhten Temperatur in der Vorsatzschale. Der Einfluss der Kerndämmung war messbar, aber unbedeutend. Bei extremen Temperaturerhöhungen von bis zu 80 Kelvin an der Außenseite der Vorsatzschale unterscheiden sich die Temperaturen an ihrer Innenseite lediglich um 3 bis 5 Kelvin und haben somit geringeren Einfluss als die Temperaturdifferenzen aus unterschiedlichen Oberflächenfärbungen.



Bild 26 Unterschiedliche Temperaturanteile nach [125]



Für Mitteleuropa ist ein Wert von 60 Kelvin für die jahreszeitlichen Temperaturschwankungen realistisch, für Deutschland ist von 50 Kelvin auszugehen. Dies entspricht Temperaturen von +35° C im Sommer und -15°C im Winter. Die täglichen Schwankungen liegen etwa bei ±20 Kelvin. Je nach Oberflächenbeschaffenheit können durch Sonnenstrahlung, gerade bei den dunklen Ziegeloberflächen, weitaus höhere Werte für die tägliche Aufheizung gemessen werden. Für dunkle Wände ist davon auszugehen, dass sich die Oberfläche um bis zu 25 Kelvin im Vergleich zur Lufttemperatur erwärmen kann. Zumbroich [125] empfehlt, für die Temperaturbeanspruchung der Vormauerschale einen Temperaturunterschied zwischen Vor- und Hintermauerschale von maximal ±35 Kelvin anzusetzen. Den linearen Temperaturunterschied in der Vorsatzschale zur Abschätzung der Bauteilkrümmungen nimmt er mit ±15 Kelvin an. Schellbach und Zumbroich [111] untersuchten zweischalige Wände mit geschossweiser Verankerung unter Wind- und Temperaturbeanspruchung. Die aus den Versuchen ermittelten Verformungen wurden in Vergleichsrechnungen mit einem Temperaturgradienten von ±10 Kelvin ermittelt. Für allgemeine Berechnungen geben Schellbach und Zumbroich [111] einen Temperaturgradienten von ±10-15 Kelvin in der Vorsatzschale je nach Lage und Farbe an.

Aufgrund des nichtlinearen Temperaturgradienten innerhalb der Vorsatzschale bei instationärer Wärmeströmung sind durch Zumbroich [111] die Auswirkungen auf die Schnittgrößenermittlung untersucht worden. Für eine einfache analytische Untersuchung werden entsprechend Bild 26 für die Temperaturanteile a), c) und d) Ansatzfunktionen gewählt. In den Untersuchungen von Zumbroich [125] sowie Schellbach und Zumbroich [111] sind Verformungen in Abhängigkeit des Temperaturgradienten und die Temperatur-verläufe für eine Vorsatzschale angegeben (siehe Bild 27). In Bild 27a) ist deutlich zu erkennen, dass kein proportionaler Zusammenhang zwischen dem Temperaturgradienten und der Verformung besteht.



a) Temperaturdifferenz der Oberflächentemperaturen und Durchbiegung f einer einseitig erwärmten Wand (1,5 x 1,5 m) aus Vollziegeln in Abhängigkeit der Zeit

b) Temperaturverlauf in der Vorsatzschale bei plötzlicher Besonnung für
(-) mit Kerndämmung
(++) mit Luftschicht

Bild 27 Einfluss des Temperaturverlaufs auf die Durchbiegung, nach Zumbroich [125]



Aufbauend auf den Untersuchungen von Zumbroich [125] und den analytischen und den Analysen in [85]. lässt sich feststellen, dass die Annahme von $T_L = 15$ Kelvin zu einer sehr geringen Überschätzung durch den nichtlinearen Temperaturverlauf führt. Im Ergebnis auf die in diesem Abschnitt durchgeführte Literaturrecherche wird in diesem Projekt auf die festgestellte Temperaturdifferenz von 15 Kelvin aufbauend Bezug genommen.

- 4. Betrachtungsrahmen
- 4.1. Festlegung der Geometrie und der Nutzung
- 4.1.1. Gebäudegeometrie und Nutzung



a) Gesamtgebäude

b) Raumgeometrie - Geschosshöhe

Bild 28 Festgelegte Gebäude- und Raumgeometrie

Um realitätsnahe Aussagen für die zu untersuchenden Bauteile (Anker und Vorwand) geben zu können, werden, ausgehend von einem nicht unterkellerten viergeschossigen Wohngebäude mit einer maximalen Gebäudehöhe von 12 Metern, folgende geometrische Festlegungen getroffen:

• Geschosshöhe: von max. 3000	nm
-------------------------------	----

Lichte Raumhöhen: von 2625 bis 2750 mm

Es wird dabei von einem Vormauerstein von Länge / Breite / Höhe, L/B/H = 240/115/113 mm (DF2) versetzt in Normalmörtel und einer in Dünnbett verlegten Hintermauer aus Plansteinen (DF12) mit L/B/H = 498/175/238 mm für die weiteren Betrachtungen ausgegangen.

Für die Fassade ergibt sich nach Gleichung (3), bei einer gewählten Windzone 2 im Binnenland und einem aerodynamischen Beiwert von $c_{pe,10} = 0,8$ ein Außendruck von $w_e = 0,64 \text{ kN/m}^2$. Es wird $c_{pe,10}$ maßgebend. Im Weiteren wird der Gebäudebereich D (Druck) bzw. B (Sog) betrachtet.



4.1.2. Leitdetails



Bild 29 Details

Bei der Abarbeitung der konstruktiven Details ergibt sich damit folgende Reihenfolge:

- Für den Wandaufbau
 - o die geschosshohe, geschlossene Wand
 - o der Wand Decken-Konten
 - o die Gebäudeaußenecke
 - o Der Gebäudesockel
- Für Öffnungen
 - o Fenster und Türsturz gleichermaßen
 - o Fenster und Türlaibung gleichermaßen
 - o die Fensterbrüstung
 - o Sockelanschluss der Tür im Erdgeschoss und auf Balkon
- Für Durchdringungen: Balkon
- Gebäudefugen: Doppelhaustrennwand



4.2. Bauphysikalische Festlegungen



Bild 30 Gesamtkonzeption bei Nullenergiegebäude aus [112]

Für die konstruktive Durchbildung und Entwicklung der Verankerungen von Vormauerwänden mit VIP-Dämmung wurde gemäß Antrag [126] "0-Energie-Standard" definiert. Diese Festlegung bedarf einer näheren Erläuterung:

4.2.1. Nullenergiegebäude

Nach Definition des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) [94] jetzt BMUB) sind "Nullenergiegebäude", Gebäude, bei denen im Jahresverlauf sowohl der Primärenergiebedarf (Q_p) als auch der Endenergiebedarf (Q_e) vollständig durch die im Gebäude bzw. unmittelbar auf dem Grundstück erzeugte Energie ausgeglichen werden müssen. Dabei sind die End- und Primärenergiebedarfswerte für Wohnungsbeleuchtung, Haushaltsgeräte und -prozesse mit einzubeziehen. Die Primärenergiefaktoren werden gemäß DIN V 18599 [75] angesetzt. Das Nullenergieniveau ist erreicht, wenn gilt:

- Primärenergiebedarf $\sum Q_p = 0 \text{ kWh/(m^2a)}$
- Endenergiebedarf $\Sigma Q_e = 0 \text{ kWh/(m^2a)}$

4.2.2. 0-Energie-Standard



Bild 31 Konzept zum Erreichen des 0 - Energie-Standards im Projekt 0-EneMau

Aus dem Gebäudestandard "Nullenergiegebäude" resultieren Forderungen, die sich mit der Konstruktion allein nicht realisieren lassen. Üblich ist eine schrittweise Annäherung in einem mehrstufigen Verfahren für das ganze Gebäude (siehe Bild 30). Demnach lässt sich die Optimierung der Gebäudehülle, mit Reduktion der Transmissionswärmeverluste, dem



zweiten Schritt zuordnen. Für die Konstruktion ergeben sich Parameter nach Passivhaus Standard (siehe Tabelle 13.)

Tabelle 13Technische Parameter f
ür die Konstruktion nach Passivhaus Standard [29]

Parameter	Bauteil	Wert
Wärmedurchgangskoeffizient	opake Bauteile (Wand, Dach): transparente Bauteile	0,10 bis 0,15 W/m²K 0,80 W/m²K
Luftdichtheit (n50): Jahresheizwärmebedarf: Maximale Heizlast:		≤ 0,6 h-1 15 kWh/(m²a) 10 W/m²

In diesem Projekt wird für das zu untersuchende Bauteil Wand, im Zusammenhang mit dem in der Aufgabenstellung festgelegen Gebäudestandard "Nullenergiegebäude", ein Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) von 0,12 W/m²K zur Reduktion von Transmissionswärmeverlusten festgelegt.

Zum Erreichen dieses Gebäudestandards sind Baukonstruktionen mit modernen Baustoffen notwendig, mit denen ein solch geringer Wärmedurchgangskoeffizient erreicht werden kann. Diese Baustoffe werden oft mit einem hohen Energieaufwand, unter Nutzung und Bindung natürlicher Ressourcen hergestellt. Die Auswirkungen auf unsere Umwelt und die zur Herstellung der Konstruktion kumulierte Energie wird aber bei dem Gebäudestandard "Nullenergiegebäude" nicht berücksichtigt. Um die Konstruktion ganzheitlich bewerten zu können, ist der sogenannte ökologische Rucksack (Ressourceninanspruchnahme Umweltwirkung), der zum Erreichen des Gebäudestandard "Nullenergiegebäude" entsteht, dem infolge der konstruktiven Maßnahme vermiedenen Ressourcenverbrauch in einer Ökobilanz gegenüberzustellen. Bezogen auf die in diesem Projekt zu entwickelnde Konstruktion, wird der Begriff "0-Energie-Standard" eingeführt. Gegenüber den Festlegungen des zu erfüllenden Standards "Nullenergiegebäude" erfährt der Begriff "O-Energie-Standard" eine Erweiterung, in dem die Konstruktion, zusätzlich ökobilanziell bewertet wird (siehe Bild 31).

4.3. Ökobilanz

Die Ökobilanz ist eine anerkannte Methode zur Beurteilung von Produkten in ökologischer Hinsicht, da alle maßgeblichen an der Belastung der Umwelt beteiligten Lebensphasen eines Produkts berücksichtigt werden. Sie dient als Grundlage bei der Lebenszyklusanalyse. Ziel der Ökobilanz ist es, die Umweltwirkungen der noch zu entwickelnden Konstruktion in Varianten anhand unterschiedlicher Szenarien zu ermitteln, zu bewerten und so deren Vorund Nachteile aufzuzeigen.

Die Bilanzierung erfolgt nach den Grundsätzen der DIN EN ISO 14040 [72] schrittweise gemäß DIN EN ISO 14044 [73]. Diese sind:

Schritt 1: Zieldefinition Schritt 2: Erstellung der Sachbilanz Schritt 3: Wirkabschätzung Schritt 4: Auswertung und Interpretation Im Rahmen des hier vorgelegten Abschlussberichtes wird ein erster Ansatz einer noch zu erstellenden Ökobilanz gegeben. Tiefe und breite der Ökobilanz können, je nach Zielsetzung sehr schwanken. Insbesondere der Umstand, das Material mit einer sehr viel geringen Lebensdauer als die zweischaliger Mauerwerke, wie bei VIP - Dämmungen der Fall, im Schalenzwischenraum verbaut und nicht zum erforderlichen Zeitpunkt ausgetauscht werden können, stellt zum gegenwärtigen Stand eine Herausforderung bei der Zielsetzung und der Szenarienbildung dar, für die im Rahmen des Projekts noch eine geeignete Lösung gesucht wird.

Eine Verbesserung des Zeitstandsverhaltens der VIP-Dämmelemente selbst ist nicht Gegenstand des Forschungsprojekts. In den folgenden Abschnitten 4.3.1 und 4.3.2 die zum gegenwärtigen Stand des Projektes die möglichen Festlegungen dokumentiert.

4.3.1. Zieldefinition

Der Vergleich beschränkt sich auf die Untersuchung konstruktiver Varianten zur Befestigung von VIP Dämmungen bei zweischaligem Mauerwerk. Gemäß DIN EN ISO 14040 [72] wird ein Betrachtungsrahmen vom Werktor bis zur Entsorgung bzw. Recycling für die Konstruktion festgelegt. Von Interesse dabei ist:

- Auswirkungen des verwendeten Materials der entwickelten Unterkonstruktion für die VIP Dämmung.
 - o Der Vergleich mit im Mörtelbett verklebt befestigten VIP-Elementen
 - Der Vergleich mit einer konventionellen Kerndämmung in PU [90]
- Den Auswirkung der Lebensdauer der VIP-Elemente auf die Gesamtkonstruktion

Um die unterschiedlichen Konstruktionen miteinander vergleichen zu können, sind die bauphysikalischen und statischen Kenngrößen aufeinander abgestimmt. Mit allen Aufbauten soll das gleiche Anforderungsniveau erreicht werden (siehe Abschnitt 4.1 und 4.2). Als Bezugseinheit für den Vergleich wird ein Teilabschnitt von 1 m² Außenwand festgelegt. Darin werden die Umweltwirkungen sämtlicher Bauteilschichten bilanziert. Bei der Bilanzierung wird auf die Datensätze der Ökobau.dat 2011 [92] zurückgegriffen. Diese Datensätze beziehen sich in der Regel auf Querschnittswerte der jeweiligen Baustoffkategorie. Die Datensätze umfassen folgende Lebenswegabschnitte

- Herstellung
- Nutzung und Instandhaltung
- Rückbau, Recycling und Verwertung (End-of-Life)

Dabei werden folgende in Tabelle 14 zusammengefasste Wirkkategorien [104] betrachtet und in Materialgruppen nach dem Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen für Bundesgebäude (BNB) [93] gegenübergestellt – Dominanzanalyse.

Nicht berücksichtigt werden Transporte vom Werk zur Baustelle, die für die Errichtung und den Rückbau benötigte Energie und Ressourcen, sowie der für den Transport von der Baustelle zur Recyclinganlage bzw. der Deponie entstehenden Aufwand.



Tab	elle 14	Betrachtete Wirkkategorien [95]	
	Kürzel	Bezeichnung	Einheit /m² Außenwand
1. 2.	PEI _{ne} : PEI _e :	Primärenergie nicht erneuerbar Primärenergie erneuerbar	[kWh /m²] [kWh /m²]
3.	GWP:	Treibhauspotenzial	[kg CO ₂ -Äqu /m²]
4.	AP:	Versauerungspotenzial	[kg SO ₂ -Äqu / m²]
5.	POCP:	Photochemisches Oxidantienbildungspotenzial	[kg Ethen-Äqv / m²]
6.	EP:	Eutrophierungspotenzial	[kg PhospÄqu / m ²]
7.	ODP:	Ozonschichtabbaupotenzial	[kg R11-Äqu / m²]

Zur Vereinfachung darf die Berechnung in Gruppen von Materialien durchgeführt werden. Folgende Materialgruppen können nach BNB in den Berechnungen zu unterscheiden werden:

Tabelle 15Materialgruppen nach BNB [95]

- Nr. Materialgruppe
- 1. Metalle
- 2. Mineralische Baustoffe
- 3. Materialien mit einem Heizwert (Holz, Kunststoffe, etc.)
- 4. Wärmeerzeuger
- 5. Alle sonstigen Materialien, die auf Bauschutt- oder Hausmülldeponien abgelagert werden dürfen

4.3.2. Untersuchungsmethoden

Folgende vergleichende Untersuchungen über die Umweltwirkungen sollen durchgeführt werden:

- Erstherstellung mit Dominanzanalyse beim Material Dieser Vergleich stellt die Umweltwirkungen für das einmalige Erstellen der gesamten Konstruktion, zusammen. Mittels einer Dominanzanalyse der einzelnen Materialgruppen innerhalb der sieben untersuchten Wirkkategorien wird der Einfluss einzelner Baustoffe auf die Ökobilanz dargestellt und die Basis für spätere Optimierungsstrategien geschaffen.
- Die Nutzung soll über einen von Zeitraum 50 Jahre, inklusive Instandhaltung nach BNB [95] bilanziert werden. Die angesetzte Nutzungsdauer für einzelne Baustoffe orientiert sich an den Vorgaben des Leitfadens "Nachhaltiges Bauen" des BMVBS[94].
- End-of-Life nach BNB [95]
 Für die Phase End-of-Life finden die von der BNB entwickelten Szenarien Anwendung. Dabei werden Annahmen für folgende in Tabelle 16 aufgeführten Materialgruppen und deren Verwertungswege getroffen:



Tabelle 16Festlegungen des Verwertungsweges für die Materialgruppen

- Nr. Materialgruppe
- 1. Metalle
- 2. Mineralische Baustoffe
- 3. Materialien mit einem Heizwert
- 4. Wärmeerzeuger
- 5. Alle sonstigen Materialien

Verwertungsweg Recycling inklusive des jeweiligen Recyclingpotenzials (Gutschrift) Vereinfacht für alle mineralischen Baustoffe -Verwertungsweg "Bauschuttaufbereitung" Verwertungsweg "thermische Verwertung" Für diese Bilanz unrelevant. Für alle anderen Materialien wird eine Deponierung angesetzt.

5. Wärmebrücken bei Luftschichtankern

5.1. Wärmebrücken

Wärme nimmt den Weg des geringsten Widerstands. Bei thermischen Gebäudehüllen erfolgt der Abfluss der Wärmeenergie bevorzugt über sogenannte Wärmebrücken und Undichtigkeiten in der Gebäudehülle. Dieser Weg wird über die physikalisch gleichzeitig stattfindende Wärmeübertragung durch Konvektion und Wärmestrahlung beschrieben. Definitionsgemäß bezeichnet man Wärmebrücken als Bereiche in der thermischen Gebäudehülle, bei denen aufgrund von Materialwechsel in der Bauteilebene, der Bauteilgeometrie, konstruktiven Zwängen, Fugen und Undichtigkeiten (während der Heizperiode) gegenüber dem ungestörten Bauteil erhöhten bzw. zusätzliche Wärmeabflüsse auftreten, sodass auf der inneren Seite von Außenbauteilen die Oberflächentemperatur örtlich begrenzt stark absinkt. Aufgrund dieser Zweifachwirkung von Wärmebrücken (erhöhter Wärmeabfluss und Temperaturabsenkung) sind zur Kennzeichnung in der Regel auch zwei unterschiedliche, voneinander unabhängige Kenngrößen erforderlich. Bezüglich der Temperaturabsenkung an der Bauteiloberfläche erfolgt aus [56] nach [74] eine temperaturbezogene Betrachtung gemäß Gleichung (5):

$$f_{Rsi} = \frac{Q_{si} - Q_e}{Q_i - Q_e}$$
(5)

Mit

- f_{Rsi} Temperaturfaktor (Temperaturdifferenzquotient) []
- Q_{si} Temperatur an der Innenoberfläche [°C]
- Q_i Innenlufttemperatur [°C]
- Q_e Außenlufttemperatur [°C]
 - Mindestanforderung f_{Rsi} ³ 0,70

Der Wärmeabfluss wird nach Gleichung (6) bezogen auf den Leitwert, die Geometrie und die Temperaturdifferenz beschrieben.



$$q = \mathbf{Q}_i - \mathbf{Q}_e \, \, U = \frac{Q}{A}$$

(6)

- A Bezugsfläche [m²]
- *q* Wärmestromdichte [W/m³]
- *U* Wärmedurchgangskoeffizient [W/m²K]
- Q_i Innenlufttemperatur [°C]
- Qe Außenlufttemperatur [°C]

Die Ursachen für den Wärmeabfluss und die Temperaturabsenkung können unterschiedlich sein und sich überlagern. Zudem können die Bereiche mit Temperaturabsenkung nicht isoliert betrachtet untersucht werden, da bei diesen Bereichen das sie umgebende Bauteil in der Betrachtung einzubeziehen ist. Entsprechend dem jeweiligen räumlich – konstruktiven Zusammenhang, in dem die Wärmebrücke steht, wird die Wärmebrücke in flächige, linienförmige, und punktuelle Wärmebrücken unterschieden. Gleichung (7) aus [71] stellt den notwendigen Zusammengang zwischen flächiger, linienförmiger und punktueller Wärmebrücken unterschieden.

$$L_{3D,i,j} = \bigotimes_{k=1}^{N_k} U_{k(i,j)} \times A_k + \bigotimes_{m=1}^{N_m} L_{2D,m(i,j)} \times A_k + \bigotimes_{n=1}^{N_n} L_{3D,n(i,j)}$$
(7)

Mit

$L_{3D,n(i,j)}$	thermischer Leitwert aus der d	Ireidimensionalen	Wärmebrücke
	[W/K]		
$L_{2D,m(i,j)}$	thermischer Leitwert der zwo	eidimensionalen	Wärmebrücke
	[W/mK]		
l_m	Länge, über die $L_{2D,m(i,j)}$ gilt [m]		
$U_{k(i,i)}$	Wärmedurchgangskoeffizient (1D	– Betrachtung) de	er für Raum k
()))	gilt		
A_k	Fläche, für die U_k gilt [m²]		
N_n	Gesamtzahl der 3D – Teile [-]		
N_m	Gesamtzahl der 2D – Teile [-]		
N_k	Gesamtzahl der 1D – Teile [-]		

5.2. Punktförmige Wärmebrücken

5.2.1. Näherungsweise Ermittlung nach DIN EN ISO 6946

Nach DIN EN ISO 6946 [74] sind punktförmige Wärmebrücke dann zu berücksichtigen, wenn der U-Wert der ungestörten homogenen Wand (U_T - Wert) durch den Anker um mehr als 3% erhöht wird.

$$U_T = \frac{1}{\mathbf{R}_T} = \frac{1}{\mathbf{R}_{si} + \overset{\circ}{\mathbf{a}}_i \frac{d_i}{I_i} + \mathbf{R}_{se}}$$

(8)



Mit

- *U_T* Wärmedurchgangskoeffizient des ungestörten Bauteils [W/m²K]
- *R_T* Gesamtwärmeübergangswiderstand aller Bauteilschichten [(m²K)/W]
- *R_{si}* Normierter Wärmeübergangswiderstand der Bauteilinnenseite [(m²K)/W]
- *R_{se}* Normierter Wärmeübergangswiderstand der Bauteilaußenseite [(m²K)/W]
- *d_i* Schichtdicke i [m]
- *I*_i Wärmeleitfähigkeit der Schicht i [W/(mK)]

Dabei wird der Wärmedurchgangskoeffizient U_T der ungestörten Wand (siehe Gleichung) um den gemäß DIN EN ISO 6946 Anhang D3 [74] ermittelten Korrekturwert DU_f (siehe Gleichung (9)) erhöht.

$$U_{Ges.} = U_T + \mathsf{D}U_f = U_T + (\mathsf{n}_f \,\mathcal{C}) \tag{9}$$

Mit

- $U_{Ges.}$ Wärmedurchgangskoeffizient des Gesamtbauteils incl. Anker [W/m²K]
- U_f Korrekturwert [W/m²K]
- *U_T* Wärmedurchgangskoeffizient des ungestörten Bauteils [W/m²K]
- n_f Anzahl der Anker pro m² [-]
- *c* Punktbezogener Wärmekoeffizient [W/K]

Der punktbezogene Wärmekoeffizient ckann näherungsweise nach Gleichung (10) für Befestigungselemente die nicht an beiden Enden an metallischen Teilen enden, ermittelt werden.

$$\boldsymbol{c} = \boldsymbol{a} \frac{\boldsymbol{I}_f \ \boldsymbol{A}_f}{\boldsymbol{d}_0} \boldsymbol{\mathcal{E}}_{\boldsymbol{R}_T}^{\boldsymbol{R}_1} \boldsymbol{\dot{\mathcal{E}}}_{\boldsymbol{\phi}}^{\boldsymbol{2}}$$
(10)

Mit

- *c* Punktbezogener Wärmekoeffizient [W/K]
- *a* Durchdringungskoeffizient; bei vollständiger Durchdringung a = 0,8 [-]
- *I*_f Wärmeleitfähigkeit des Ankers [W/m²K]
- *A_f* Querschnittsfläche des Ankers [m²]
- *d*₀ Schichtdicke i [m]
- R₁ Wärmedurchlasswiderstand der vom Anker durchdrungen Schicht [m²K/W]
- *R_T* Gesamtwärmeübergangswiderstand aller Bauteilschichten des ungestörten Bauteils [m²K/W]



5.2.2. Genaue Ermittlung nach DIN EN ISO 10211

Die genaue Ermittlung des Einflusses punktförmiger, dreidimensionaler Wärmebrücken erfolgt mittels Finite-Elemente-Methoden (FEM) nach DIN EN ISO 10211 [71]. Demnach wird der sich infolge der Temperaturdifferenz von Innen- und Außentemperatur ergebende Wärmestrom F im numerischen Modell als thermischer Leitwert L_{3D} anhand Gleichung (11) ermittelt.

$$L_{3D} = \frac{F}{Q_{si} - Q_{se}}$$
(11)

Mit

- L_{3D} thermischer Leitwert der dreidimensionalen Wärmebrücke [W/K]
- F Wärmestrom [W]
- Q_{si} Innenlufttemperatur [°C]
- Q_{se} Außenlufttemperatur [°C]

Der punktbezogene Wärmedurchgangskoeffizient c wird hierbei aus der Differenz des thermischer Leitwertes L_{3D} (Gesamtwärmestrom im dreidimensionalen numerischen Modell) und dem ungestörten Wärmestrom (Produkt aus U-Wert und Fläche) gebildet (siehe Gleichung (12).

$$\boldsymbol{c} = \mathbf{L}_{3\mathrm{D}} - \overset{n}{\overset{n}{\mathbf{a}}} \boldsymbol{U}_i \cdot \boldsymbol{A}_i \tag{12}$$

Mit

- *c* Punktbezogener Wärmedurchgangskoeffizient [W/K]
- L_{3D} thermischer Leitwert der dreidimensionalen Wärmebrücke [W/K]
- *U_i* Wärmedurchgangskoeffizient ungestörten Bauteils [W/(m2K)]
- A_i Fläche innerhalb des 3-dimensionalen geometrischen Modells, für die U_i gilt [m]
- ⁿ Anzahl der Bauteile [-]

5.3. Einflussgrößen

5.3.1. Schalenabstand und Wärmeleitfähigkeit

Im Zusammenhang mit dem gesteigerten Wärmedämmwiderstand bei VIP-Dämmungen lassen sich nach Gleichung (8) folgende, in Bild 32 dargestellte Zusammenhänge zwischen Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) und Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung (I _{Dämmung}) für die Bauteilgeometrie ableiten:

Bei gleichem Wärmedurchgangskoeffizienten des ungestörten Bauteils (U_T –Wert) nimmt, mit kleiner werdender Wärmeleitfähigkeit der Dämmung, die Schichtdicke der Dämmung d₀ ab. Der Schalenabstand kann reduziert werden. Die Zusammenhänge sind in Bild 32 dargestellt.





a) bezogen auf die Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung (I _{Dämmung})



Bild 32 Zusammenhang zwischen Dämmschichtdicke und Wärmeleitfähigkeit der Dämmung, bei unterschiedlichen U_{T} - Werten der ungestörten Wand

5.3.2. Wärmekoeffizient und Wärmeleitfähigkeit



a) bezogen auf die Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung (I _{Dämmung})



Bild 33 Zusammenhange zwischen *c*-Wert und Wärmeleitfähigkeit der Dämmung, bei unterschiedlichen U_{T} - Werten der ungestörten Wand

Bei gleichem U_T -Wert und gleichem Luftschichtanker (gleich bleibendem Querschnitt A_f und Wärmeleitfähigkeit I_f) nimmt, mit abnehmender Wärmeleitfähigkeit der Dämmung (abnehmendes I_{Dämmung} und abnehmende Schichtdicke), der punktbezogene Wärmekoeffizient c zu.

c ist umso höher, je höher der U_T -Wert der ungestörten Wand ist (siehe Bild 33).

5.3.3. Gesamtwärmedurchgangskoeffizient und Wärmeleitfähigkeit

Dies gilt naturgemäß auch für den Gesamtwärmedurchgangskoeffizient U_{Ges} des betrachten Bauteils. Der Absolutwert des Gesamtwärmedurchgangskoeffizienten ist demnach ebenso höher, je höher der Wärmedurchgangskoeffizient des ungestörten Bauteils ist (siehe Bild 34).





a) bezogen auf die Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung (I _{Dämmung})

b) bezogen auf die Schichtdicke d₀ der Dämmung

Bild 34 Zusammenhang zwischen Gesamtwärmedurchgangskoeffizient U_{Ges} und Wärmeleitfähigkeit der Dämmung, bei unterschiedlichen U_T- Werten der ungestörten Wand

Da punktförmige Wärmebrücken normativ dann zu berücksichtigen sind, wenn der Wert der ungestörten homogenen Wand durch den Anker um mehr als 3% erhöht wird, ist es notwendig, den sich aus der Anzahl der verwendeten Anker ergebenden Korrekturwert U_f auf den Gesamtwärmedurchgangskoeffizient U_{Ges} zu beziehen (siehe Bild 35).







Bild 35 Prozentualer Zuwachs des Gesamtwärmedurchgangskoeffizient U_{Ges} , bei unterschiedlichen U_{T} - Werten der ungestörten Wand

Mit steigenden Wärmewiderstand der Dämmung (kleiner werdendes I) lässt sich beim Gesamtwärmedurchgangskoeffizient ein prozentualer Zuwachs gegenüber dem U-Wert des ungestörten Bauteils zeigen (siehe Bild 35). Ab einer Wärmeleitfähigkeit der Dämmung von. I _{Dammung} = 0,01 W/m²K beeinflussen die aus den Ankern resultierenden punktförmigen Wärmebrücken die Gesamtleistung des Bauteils deutlich.





Bild 36 Übersicht zum prozentualen Zuwachs des Gesamtwärmedurchgangskoeffizienten U_{Ges.}



a) bezogen auf den U_T - Wert der b) bezogen auf die Schichtdicke d₀ der ungestörten Wand Dämmung

Bild 37 Prozentualer Zuwachs des Gesamtwärmedurchgangskoeffizient U_{Ges}, bei einer definierten Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung (I_{Dämmung})

Der prozentuale Zuwachs des Gesamtwärmedurchgangskoeffizienten infolge des steigenden Wärmewiderstandes liegt dabei im Promillebereich (siehe Bild 37).

Untersucht man den Einfluss von Ankeranzahl und Ankerquerschnittsfläche auf den prozentualen Zuwachs des Gesamtwärmedurchgangskoeffizienten, so ist der Einfluss der Querschnittsfläche wesentlich höher. Der prozentuale Zuwachs ist hier eine Zehnerpotenz höher als jener des steigenden Wärmewiderstandes und der verkürzten Dämmstoffdicke (siehe Bild 38).





a) bezogen auf den U_T - Wert der b) bezogen auf die Schichtdicke d₀ der ungestörten Wand Dämmung

Bild 38 Prozentualer Zuwachs des Gesamtwärmedurchgangskoeffizient $U_{Ges.}$ bei zunehmenden Ankerquerschnitt, mit unterschiedlichen U_{T} - Werten der ungestörten Wand

6. Analyse spezifischer Wärmebrücken im numerischen Modell

Sämtliche Nachweise nach DIN EN ISO 10211 [71] erfolgen anhand numerischer Modelle nach Finiter Element Methoden (FEM). Zum Nachweis der Wärmebrücken wird die Software HEAD verwendet. Der Nachweis erfolgt in Abhängigkeit von der Fragestellung und Art der nachzuweisenden Wärmebrücke anhand geometrisch vereinfachter Modelle. Für linienförmige Wärmebrücken zweidimensionale Modelle wird die Software HEAD2 verwendet. Für punktförmige Wärmedurchgänge und dreidimensionale Modelle kommt die Software HEAT3 zur Anwendung.

6.1. Einfluss der Ankeranordnung

Der Nachweis zum Einfluss der Ankeranordnung auf den Gesamtwärmedurchgangskoeffizient U_{Ges} wird an einem sogenannten 3-Stein-Modell erbracht.

6.1.1. Festlegungen

Bei dem vereinfachten Modell einer zweischaligen Verblendmauer mit Kerndämmung werden nur die Lagefugen modelliert. Es ergeben sich bei der gewählten und in Bild 39 dargestellten Ausrichtung des Modells, folgende Gesamtbauteilmaße:

- X-Richtung, die Breite B = 450 mm
- Y-Richtung, die Länge L = 1000 mm
- Z-Richtung, die Höhe H = 750 mm

Der Modellnullpunkt ist an der unteren Modellaußenkante am Vorwandfuß festgelegt (siehe Bild 39).



Bild 39 Modellgeometrie mit festgelegtem Modellnullpunkt (Kreis)

Für das Normalbett der Vorwand wurden 10 mm, für das Dünnbett der Tragschale 2 mm festgelegt. Auf eine Modellierung der Stoßfuge, der Innenwandbekleidung und des Fingerspalts wurde verzichtet. Die Zuordnung der gewählten Materialien zur jeweiligen Schicht ist in Bild 40 dargestellt. Die gewählten Materialparameter sind Tabelle 17 zu entnehmen.



Bild 40 X-Z- Ansicht, Schnitt bei Y = 0,375 m: Materialzuordnung



Tabelle 17	Materialparameter

Pos.	Bezeichnung	С	r	
	-	MJ/m ³ K]	[kg/m³]	[W/mK]
1.	Mauerwerk aus Mauerziegel nach DIN 105-1			
	bis E DIN 105-6 [38]: Voll-, Hochloch-,	2,2	2200	1,2
	Keramikklinker NM/DM			
2.	Normalmörtel NM	1,8	1800	1,2
3.	Polyurethan Hartschaum 021 Kat.I	0,0672	48	0,021
4.	Kalksandstein DIN 106 [41] NM/DM	1,8	1800	0,99
5.	Dünnbettmauermörtel	1,6	1600	1,0
6.	Nichtrostender Stahl	3,634	7900	17,0

C = Wärmekapazität

r = Rohdichte

I = Wärmeleitfähigkeit

In Tabelle 18 wird der U_T –Wert gemäß [74] (Glaserverfahren) für den ungestörten Aufbau nachgewiesen. Die Temperaturdifferenz wurde, ausgehend von einer Innenraulufttemperatur von 20°C, auf 35 Kelvin festgelegt. Es ergibt sich ein Temperaturverlauf, der ebenso in Tabelle 18 dargestellt ist.

Tabelle 18Ungestörter U-Wert

Pos.	Bezeichnung	S [m]	l [W/mK]	R [m²K/W]	Q [°C]
					20,000
S1	Innen (R _{si})			0,130	19,436
S2	KS-Wand	0,175	0,990	0,177	18,667
S3	Dämmung PU	0,160	0,021	7,619	-14,410
S4	Klinker	0,115	1,200	0,096	-14,826
S5	Außen (R _{se})			0,040	-15,000
			R Ges.	8,0620	[m²K/W]
			U	0,1240	[W/m²K]

S = Schicht

I = Wärmeleitfähigkeit

R = Wärmeleitwiderstand

Q = Temperatur an der Schicht S

Weiterhin können nach Gleichung (6) die sich einstellende Wärmestromdichte q und der sich ergebende Wärmestrom Q über die im Modell angesetzte Außenwandfläche ermittelt werden.

 $q = (20-(-15)) \times 0,1240387 = 4,3413545 [W/m²]$

Q = 4,3413545 x 0,75 = 3,2560158 [W]



Beide, Wärmestromdichte q und Wärmestrom Q, sollten ohne wesentliche Abweichungen gegenüber dem berechneten, im ungestörten numerischen Modell zu finden sein.

6.1.2. Varianten

Ausgehend von einer Mindestdicke der Dünnbettschicht von 2 mm werden im numerischen Modell zwei idealisierte Ankerquerschnitte (Ankertypen) verwendet:

- Ankertyp 1: Querschnittsgeometrie B/H = 20/1 mm, Ankerfläche A_{F1} = 20 mm²
- Ankertyp 2: Querschnittsgeometrie B/H = 20/2 mm, Ankerfläche A_{F2} = 40 mm²

Die Festlegungen zur Anordnung der Anker orientiert sich zum einen an den normativen Vorgaben ([56] bzw. [63] – siehe Abschnitt 2.2.3).

Zum anderen richten sich die Überlegungen darauf, die Anker in die Lagerfugen der Hintermauer einlegen zu können und auf ein Bohren und Dübeln der Anker zunächst zu verzichten.

Für die gewählte Modellgeometrie ergibt sich in der Modellebene ZY ein flächiges Raster von 250 mm / 250 mm, in dem die Anker frei verteilt werden können. Hinsichtlich der Randabstände, der Abschneidekriterien im numerischen Modell, wird eine Abweichung zwischen oberem und seitlichem Rand in Kauf genommen, um Steinschnitte zu vermeiden.



Bild 41 Festgelegtes Raster für die Ankerverteilung in Eben ZY

Ausgehend von der ungestörten Schichtfolge, werden beide Ankertypen mit zunehmender Anzahl flächig verteilt.



Um Überlagerungen gesondert betrachten zu können, wird in einem ersten Schritt eine möglichst gleichmäßige Verteilung der Anker angestrebt. Sind bei gleicher Ankerzahl mehrere Anordnungen möglich, wird zunächst jene Ankeranordnung modelliert, bei der die Abstände zwischen den Anker gegenüber den anderen, weitestgehend gleichmäßig verteilt sind. Um die Variantenbildung nicht zu überfrachten, werden Anordnungen mit einem Anker, zwei oder vier Ankern nicht variiert.

Tabelle 19 fasst die Überlegung und die sich daraus ergebende Varianz zur Anordnung der Anker zusammen.

Tabelle 19	Variation der Ankeranordnung
------------	------------------------------

	Ankerquerschnitt B/H = 20/1 mm				Ankerquerschnitt B/H = 20/2 mm			
Anker Anzahl	Anker- Fläche	Anker- Variation der Anordnung			Anker- Fläche	Variation der Anordnung		
[n]	[mm²]	I	Z	3	[mm²]	I	Z	3
0	-	-	-	-	0	-	-	-
1	20		-	-	40		-	-
2	40		-	-	80		-	-
4	80		-	-	160		-	-
5	100			-	200			-
6	120				240			
7	140			-	280			-
8	160			-	320			-
9	180		-	-	360		-	-



6.1.3. Validierung der Rahmenbedingen

Zur Validierung der für das numerische Modell der Variantenuntersuchung getroffenen Festlegungen und Rahmenbedingungen wurden im Vorfeld folgende Untersuchungen durchgeführt:

Einfluss der Mörtelfugen

Um einen möglichen Einfluss der beiden im Modell vorgesehen Mörtelfugen (Dünnbett in der Tragschale, Normalbett in der Vorwand) auf das Gesamtsystem ausschließen zu können, wurden die Mörtelfugen schrittweise aufgebaut. Jeder Schritt wurde in einem zweidimensionalen Modell geprüft. Es wurde der längenbezogene thermischer Leitwert L_{2D} und der lineare Wärmedurchgangskoeffizient Y ermittelt. Tabelle 20 fasst die Ergebnisse dieser Überprüfung zusammen.

		. ,	C	0	
		Ohne	Eine	Zwei	Drei
		Fugen	Fuge	Fugen	Fugen
q	[W/m²]	4,3416	4,3413	4,3414	4,3416
Q	[W]	3,2562	3,2560	3,2561	3,2562
L_{2D}	[W/mK]	0,093	0,093	0,093	0,093
Υ	[W/mK]	0,000	-0,000036	0,000	0,000
Q _{Si - Max}	[°C]	19,432	19,435	19,435	19,435
Q _{Si – Min}	[°C]	19,432	19,432	19,432	19,432
Q _{Se - Max}	[°C]	-14,824	-14,824	-14,824	-14,824
Q _{Se – Min}	[°C]	-14,824	-14,826	-14,826	-14,826

 Tabelle 20
 Einfluss der (beiden) im Modell vorgesehenen Mörtelfugen

In Wertung der Ergebnisse kann ein Einfluss der in dem Modell vorgesehenen Mörtelfugen auf das Gesamtverhalten ausgeschlossen werden.

Abgleich der numerischen Modelle

Zudem erfolgte ein Abgleich der Ergebnisse nach den mit Glaser ermittelten Werten (siehe Tabelle 21)

		nach Glaser	2D-Modell Drei Fugen	3D-Modell Drei Fugen
q	[W/m²]	4,341	4,342	4,342
Q	[W]	3,256	3,256	3,256
Q _{Si – Max}	[°C]	19,436	19,435	19,436
Q _{Si – Min}	[°C]		19,432	19,436
Q _{Se - Max}	[°C]	-14,826	-14,824	-14,826
Q _{Se – Min}	[°C]		-14,826	-14,826

Tabelle 21Abgleich der Ergebnisse des ungestörten Bauteils



6.1.4. Ergebnisse der Variantenuntersuchung

Tabelle 22Übersicht der sich aus den variierten Ankeranordnung ergebendenInnenoberflächentemperaturen, am Beispiel des Ankerquerschnittes B/H = 20/2 mm



In Tabelle 22 wird eine Übersicht der durchgeführten Variantenuntersuchung gegeben. Die Darstellung erfolgt exemplarisch an den sich bei unterschiedlicher Anordnung der Anker



ergebenden Oberflächentemperatur der Außenwandinnenseite. Im vorliegenden Beispiel werden Temperaturen bei einem Ankerguerschnitt von B/H = 20/2 mm gezeigt.

Tabelle 23 und Tabelle 24 fassen die Ergebnisse sämtlicher, an beiden Ankerquerschnitten durchgeführter Simulationen zusammen. Auf sie wird im Folgenden detaillierter eingegangen.

Pos.	n	A _F	Q	q	Q Si – Min	Q Si - Max	Q Se – Min	Q _{Se - Max}	U _{Ges}
	[-]	[mm²]	[W]	[W/m²]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[W/m²K]
0.0	0	0	3,2562	4,3416	19,435	19,436	-14,826	-14,826	0,1240
1.0	1	20	3,3058	4,4078	19,402	19,433	-14,826	-14,790	0,1259
2.0	2	40	3,3555	4,4740	19,398	19,426	-14,825	-14,790	0,1278
4.0	4	80	3,4546	4,6061	19,384	19,412	-14,823	-14,787	0,1316
5.1	5	100	3,5040	4,6720	19,378	19,408	-14,823	-14,786	0,1335
5.2	5	100	3,5040	4,6720	19,372	19,411	-14,823	-14,784	0,1335
6.1	6	120	3,5535	4,7380	19,370	19,393	-14,819	-14,784	0,1354
6.2	6	120	3,5534	4,7378	19,362	19,407	-14,823	-14,782	0,1354
6.3	6	120	3,5533	4,7377	19,356	19,408	-14,823	-14,780	0,1354
7.0	7	140	3,6028	4,8037	19,359	19,390	-14,818	-14,781	0,1372
8.0	8	160	3,6520	4,8694	19,348	19,386	-14,818	-14,779	0,1391
9.0	9	180	3,7013	4,9350	19,337	19,382	-14,818	-14,776	0,1410

Taballa 22	Frachnicco hai Ankarguarcahnitt h/h 20/1 mm
Tapelle 23	EI U = D I = Z U I I = Z U I I I I = Z U I I I I I I I I I

Ergebnisse bei Ankerguerschnitt b/h = 20/2 mm

Pos.	n	A _F	Q	q	Q Si – Min	Q Si – Max	Q Se – Min	Q Se - Max	U _{Ges}
	[-]	[mm²]	[W]	[W/m²]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[W/m²K]
0.0	0	0	3,2562	4,3416	19,435	19,436	-14,826	-14,826	0,1240
1.0	1	40	3,3512	4,4682	19,372	19,430	-14,826	-14,775	0,1277
2.0	2	80	3,4460	4,5947	19,365	19,416	-14,824	-14,754	0,1313
4.0	4	160	3,6351	4,8469	19,337	19,390	-14,820	-14,749	0,1385
5.1	5	200	3,7293	4,9724	19,327	19,383	-14,820	-14,747	0,1421
5.2	5	200	3,7249	4,9725	19,315	19,388	-14,820	-14,744	0,1419
6.1	6	240	3,8236	5,0981	19,311	19,354	-14,812	-14,744	0,1457
6.2	6	240	3,8233	5,0977	19,299	19,380	-14,819	-14,740	0,1456
6.3	6	240	3,8230	5,0974	19,284	19,382	-14,820	-14,736	0,1456
7.0	7	280	3,9172	5,2229	19,290	19,348	-14,811	-14,739	0,1492
8.0	8	320	4,0108	5,3477	19,269	19,341	-14,810	-14,735	0,1528
9.0	9	360	4,1061	5,4748	19,251	19,334	-14,810	-14,730	0,1564

Gesamtverhalten

In Wertung der Ergebnisse des numerischen Modells werden die mit dem vereinfachten Verfahren ermittelten Ergebnisse von jenen der Simulation bestätigt und qualitativ präzisiert. Mit Bezug auf das Gesamtverhalten kann Folgendes festgehalten werden:



- Das mit dem vereinfachten Verfahren ermittelte lineare Verhalten von . Gesamtwärmedurchgangskoeffizient U_{Ges} und Gesamtwärmestrom bei Ankerguerschnitt und Anzahl lässt sich auch mit dem numerischen Modell zeigen (siehe Bild 42).
- Die Zu- bzw. Abnahme der Oberflächentemperaturen, die sich aufgrund zunehmender Verdichtung der punktförmigen Wärmebrücken (siehe Bild 44) bestätigen das vereinfachte Modell.



a)

Gesamtwärmedurchgangsko effizient UGes

Bild 42 Lineares Verhalten von Gesamtwärmedurchgangskoeffizient U_{Ges} und Gesamtwärmestrom aufgrund Ankerquerschnitt und -anzahl

Je nach Anzahl und Ankerquerschnitt ergibt sich ein Anstieg des Gesamtwärmedurchgangskoeffizienten U_{Ges} von 1,5 % bis 21 %. Daraus folgen entsprechende Mehrstärken bei der verwendeten Dämmung (siehe Bild 43).



a) Prozentuale Zunahme U_{Ges}



b) Resultierende Dämmungsmehrstärken Kompensation



Bild 43 Darstellung der Auswirkung







Aufgrund der zunehmenden räumlichen Verdichtung der Ankerfläche ergibt sich eine Zubzw. Abnahme der Oberflächentemperaturen (siehe Bild 44). Diese liegen, je nach Anzahl und Querschnittsfläche der Anker, zwischen 0,03 Kelvin und 0,1 Kelvin. Bezogen auf den ungestörten Aufbau ergeben diese, bei "idealer" (symmetrischer und gleichmäßiger) Verteilung der Anker, Veränderungen der Oberflächentemperaturen, die zwischen 0,25% und 0,65 % liegen (siehe Bild 45).



a) Temperaturdifferenz



Bild 45 Veränderung der maximal Oberflächentemperaturen Außen

Berücksichtigt man, bei gleicher Ankeranzahl und Querschnitt, ungünstigere Ankeranordnungen, so führen sogenannte Überlagerungseffekte, beispielsweise an der Außenwand-Innenoberfläche zu weiteren, lokal begrenzten Temperaturabsenkungen (siehe Bild 46).





a) Symmetrische Anordnung b) Asymmetrische Anordnung

Bild 46 Unterschiedliche Oberflächentemperaturen an der Außenwandinnenseite bei unterschiedlicher Anordnung von sechs Ankern mit Querschnitte b/h = 20/2 mm

Im vorliegenden Fall ergeben diese Absenkungen, je nach Anordnung, zwischen 0,008 und 0,014 Kelvin. Gegenüber der symmetrischen Ankeranordnung sind dies Abweichungen der Oberflächentemperatur von 12% bis 22%. In Bild 47 und Bild 48 sind die Abweichungen aller untersuchten Anordnungsvarianten zusammengefasst dargestellt.







a) Ankerquerschnitt 20/1

b) Ankerguerschnitt 20/2

Bild 47 Absenkung der minimalen Oberflächentemperaturen Innen



Bild 48 Zunahme der Maximalen Oberflächentemperaturen Außen



Lokale Veränderung der Oberflächentemperatur



a) Horizontalschnitt bei Z = 375 mm b) Detailausschnitt

Bild 49 Isothermen – Temperaturverlauf mit zwei Edelstahlankern B/H = 20/1 mm.

Auswirkungen punktförmiger Wärmebrücken auf die Oberflächentemperatur sind lokal begrenzt. Bild 49 zeigt ein solches lokales Verhalten: Mit zunehmendem Wärmedurchlasswiderstand der Dämmung wird der Wärmstrom in Ebene der Dämmung auf den sehr viel besser leitenden Anker zurückgedrängt. Der Wärmeabfluss im Anker beeinflusst nur in dessen nahem Umfeld die Veränderungen der Oberflächentemperaturen.

Bild 49 zeigt den sich im numerischen Modell, mit zwei Edelstahlankern einer Ankerquerschnittsfläche von = 20/1 mm einstellenden Isothermenverlauf. Beim Schnitt in Anker- bzw. Modellmitte lässt sich zeigen, dass ca. 60 mm neben der Ankermitte sich ein ungestörter Isobarenverlauf (wieder) einstellt. Mit zunehmendem Ankerquerschnitt steigt der Wärmestrom und die Temperaturdifferenzen nehmen zu; diese bleiben jedoch lokal (siehe Bild 50).



Bild 50 Vergleich der Außenwand- Innenoberflächentemperaturen bei der Verwendung von einem bzw. zwei Edelstahlankern unterschiedlicher Dicke



Weitere symmetrische Verdichtungen, durch Steigerung von Ankeranzahl und / oder Ankerquerschnitt, wie beispielsweise in Bild 51 dargestellt, führen dann, unter Beibehaltung der hohen lokalen Temperaturdifferenzen, zu einer Veränderung der gesamten Bauteiloberfläche entlang dieser Linie.



Bild 51 Außenwand- Innenoberflächentemperaturen bei der Verwendung von einem bzw. zwei Edelstahlankern unterschiedlicher Dicke

Ungleichmäßige Verteilungen, wie sie beispielsweise durch asymmetrische Anordnung der Anker an Gebäudekanten auftreten, führen zu Überlagerungen der Temperaturdifferenzen, bei denen die lokale Begrenzung aufgehoben wird. Bild 52 zeigt diese Veränderungen der Oberflächentemperaturen im Vergleich.



Bild 52 Vergleich der Außenwand- Innenoberflächentemperaturen bei symmetrischer und asymmetrischer Anordnung der Edelstahlanker unterschiedlicher Dicke



Temperaturverlauf im einzelnen Anker



Bild 53 Ankerkerntemperatur im Ankerlängsschnitt, eines Ankers, bei dichter Ankeranordnung (Bei Orientierung Innen x = 0,45 m nach außen X = 0 m)

Vergleicht man den Temperaturabfall im Längsschnitt eines Ankers entlang seines Verlaufs von innen nach außen, mit dem Temperaturabfall in einem ungestörten Bauteil (vergleichbarer Schichtung), zeigen sich an den sogenannten Durchstoßpunkten des Ankers Temperaturdifferenzen. Bild 53 zeigt, dass sich an beiden Durchstoßpunkten Temperaturdifferenzen zwischen der Kerntemperatur im Anker und der errechneten Oberflächentemperatur der ungestörten Dämmung von 5 bis 6 Kelvin ergeben. Die Steigung des Temperaturgradienten ist gegenüber jenen des ungestörten Bauteils flacher. Sie ist, wie auch im Isothermenverlauf in Bild 49 gezeigt, erkennbar höher am äußeren und niedriger am inneren Durchstoßpunkt der errechneten Oberflächentemperatur der ungestörten Dämmung. Naturgemäß bleibt diese Differenz von Ankerkerntemperatur zu der ihn umgebenden Dämmung lokal begrenzt und flacht, wie in Bild 49 und in Bild 50 gezeigt, relativ schnell ab.

Sie hat weder einen direkten negativen Einfluss auf den Anker noch auf die Vakuumdämmung. Jedoch steht, insbesondere der Fugenspalt zwischen Ankerflanke und Dämmung am Durchstoßpunkt auf der Dämmungsinnenseite im Verdacht der Anreicherung von Feuchte infolge Kondensation.

7. Innovative Dämmtechnik zur Reduzierung der Transmissionswärmeverluste

Das in diesem Bericht vorgestellte Dämmsystem wurde entwickelt, um die Lücken, die in den bisherigen Dämmsystemen bestehen, hauptsächlich im Hinblick auf die Verringerung der Transmissionswärmeverluste in Verbindung mit einer vernünftigen Wandgeometrie zu überbrücken.

7.1. Probleme in den herkömmlichen Dämmsystemen

Viele der bisher benutzen Dämmsysteme weisen die im Folgenden beschriebenen Nachteile Ein weiteres Problem ist die Diffusion und die Kondensation von Wasser zwischen den 2



Mauerschalen auf die Wärmedämmpaneele oder auf die Innenseite des Fassadenmaterials. Daher berücksichtigen die meisten der Dämmsysteme für zweischaliges Mauerwerk, die die bisher entwickelte Dämmpaneelen benutzen, eine Hinterlüftung zwischen dem Dämmpaneel und der Außenmauerschale auf.

7.1.1. Geometrie in Bezug auf die thermische Effizienz

Die thermische Leitfähigkeit (Lambda I) der meisten bisher verwendeten Dämmpaneelen beträgt zwischen 0,045 und 0,21 (Tabelle 25). Um einen Höchstwert von U<0,24 W/m²K mit diesem Material nach der Maßgabe von EnEV2014 für Erstinstallationen, Ersatz oder Erneuerung von Außenmauern (Anhang 3, Tabelle 1, Zeile 1) zu gewährleisten, ist es notwendig, Paneele mit einer Stärke zwischen 18 und 22 cm (Tabelle 25) zu benutzen.

Tabelle 25 Tabelle der Materialeigenschaften für herkömmliche Dämmpaneele

Material	Wärmeleitfähig	Wärmekapazität c	Diffusions-	Rohdichte
	keit I W/mK	J/kg/K	widerstand	kg/m³
Hartschaum,	0.04	1450	80-200	35
XPS	0.005	1.10.1	010.050	
Swisspor XPS 300 GE	0.035	1404	210-250	30
Jackodur Plus 300 Standard	0.028	1400	80/250	30
swisspor Lambda W-25 (at)	0.031	1400	35-80	23
Hartschaum, EPS 035	0.035	1500	20-100	30
Neopor WLG032	0.032	1500	20-50	15
PU Hohlwand- schaum PURWAplus	0.027	1450	100-150	55
Swisspor PUR Premium	0.021	1400	12086	30
Klöber Permo therm solar	0.021	1400	35	40
Braas Clima Comfort	0.021	1470	35	40
Mineraldämm- platte	0.045	1300	3	115
Mineralwoll- dämmplatte- weber.therm MW 035 Fassade	0.035	1000	1	130
Steinwolle	0.04	830	1.4	60
Glaswolle	0.04	830	1-2	20
Schaumglas	0.04	850	1e6	100
Glaswolle Isover 035	0.035	830	1-2	20
Styropor	0.04	1500	20/100	20


Dies erhöht die Stärke der Wand vor allem bei zweischaligem Mauerwerk, aber nicht in dem Maße wie bei konventioneller Dämmung.

Ein weiteres Problem ist die Diffusion und die Kondensation von Wasser zwischen den 2 Mauerschalen auf die Wärmedämmpaneele oder auf die Innenseite des Fassadenmaterials. Daher berücksichtigen die meisten der Dämmsysteme für zweischaliges Mauerwerk, die die bisher entwickelte Dämmpaneelen benutzen, eine Hinterlüftung zwischen dem Dämmpaneel und der Außenmauerschale.

Unter Berücksichtigung dieses Aspekts beträgt die Stärke des Dämmkerns bei dem so gedämmten Mauerwerk zwischen 15 und 20 cm. Wenn diese Paneele an den Wänden angebracht werden, weist die Wand bei einer Zusammensetzung von 240 mm der inneren KS-Tragschale und von 115 mm der äußeren Klinkervorsatzschale eine Gesamtstärke von 55 bis 65 cm auf. Dies bedeutet einen enormen Verlust der Raumgröße (Tabelle 25) und eine Verringerung des durch die Fenster einfallenden Tageslichtes.

7.1.2. Bildung von Wärmebrücken

Die herkömmlichen Verankerungssysteme sind überwiegend aus Stahl, insbesondere aus Edelstahl hergestellt. Diese verfügen über eine sehr hohe Dauerhaftigkeit und Tragfähigkeit sowie eine sehr gute Brandschutzklasse.

Die Wärmeleitfähigkeit von Metallen ist im Allgemeinen sehr hoch. Die Befestigung der äußeren, kalten Wandschalen an der inneren warmen mit Stahlankersystemen durch die Dämmplatten hindurch bildet eine Wärmebrücke, durch die hohe Transmissionswärmeverluste im Mauerwerksbau entstehen (Abschnitt 5). Dies wirkt sich auf die Effizienz der Dämmplatten insbesondere bei Anstieg Ankeranzahl sowie der Vergrößerung der der Querschnitte der Befestigungsteile (Anker und Konsole) sehr negativ aus (Bild 54). Ausgehend davon streben Hersteller danach, die Querschnitte und die Anzahl der Verankerungsteile pro Quadratmeter möglichst zu reduzieren, um eine effektivere Energieeinsparung zu erzielen.



7.1.3. Montierbarkeit und Demontierbarkeit

Für eine Erhöhung der Effizienz der Dämmung ist es notwendig, sicherzustellen, dass keine kalte Außenluft zwischen den Dämmpaneels und der Innenwand einströmt, besonders in den Fällen in denen harte Dämmpaneelen aus ESP, XPS oder PU benutzt werden. Die Paneele sollten dicht an der Wand fixiert werden. Dies wird i.d.R. durch das Ankleben der Paneele an die Innenwand mithilfe eines speziellen Klebers gewährleistet.

Das Ankersystem, das benutzt wird, um die Dämmpaneelen zwischen zwei Mauerwerksschalen zu befestigen, ist in den Fugen der Innenwand eingebunden. Nach der Fixierung der Dämmpaneele wird es in dem Mörtel der Fassadenfugen verankert. Beide Anwendungen – Kleben der Dämmpaneelen und Verankerung im Mörtel sind demontierbar.



7.1.4. Durchführbarkeit auf der Baustelle

Das Verankerungskonzept bei zweischaligem Mauerwerk basiert auf dem Einsetzen des Ankers zuerst an der Mörtelfuge bei der Mauerung der inneren Mauerschale bzw. durch das Bohren nach der Aufmauerung. Zuerst wird die innere Schale der Wand gemauert und dabei die Anker eingesetzt. Danach erfolgt das Aufmauern der Vormauerschale und deren Verbindung mit dem (den) Anker(n). Der Anker muss durch die Dämmschicht hindurchgeführt werden.

Der Verankerungsprozess setzt eine exakte Positionierung der freien Ankerseite an den Mörtelfugen zwischen den Vormauersteinen voraus. Dies ist aber aufgrund unterschiedlicher Aspekte, Β. ungenaue Ziegelhöhe, Ζ. unregelmäßige Dicke des Mörtelbetts und die menschlich verursachten Abweichungen beim Bohren bzw. Mauern nicht immer erfüllbar (Bild 55).



Bild 55 Vorbefestigte Anker liegen nicht unbedingt in den Mauerfugen

7.2. Isolationsdämmpaneele zur Verbesserung der Dämmeffizienz

Die Isolationsdämmpaneele, die eine Lösung für die vorher genannten Probleme bieten sollen, sollten folgende Anforderungen berücksichtigen:

- Geringe Wärmeleitfähigkeit, dadurch wird die Anwendung von starken Paneelen reduziert, um eine bessere Dämmeffizienz zu erreichen und im Gegenzug Material und Platz einzusparen
- Die Möglichkeit, die Paneele in einer modularen und demontierbaren Form herzustellen, um die Montage- und Installationszeit vor Ort zu verringern und die Wiederverwendbarkeit bei einer Renovierung oder Änderung der Gebäudefunktion zu garantieren
- Austauschbarkeit bei demontierbarer Vormauerschale
- · Ausschluss von Kondenswasserbildung zwischen den beiden Mauerwerksschalen

In Bezug auf die geringe Wärmeleitfähigkeit sind heutzutage in erster Linie Vakuum-Paneele geeignet, die von verschiedenen Unternehmen in verschiedenen Formen hergestellt werden. Ein weiteres geeignetes Dämmmaterial ist CALOSTAT, das von Evonic produziert und angeboten wird.

7.2.1. Vakuumisolationspaneele (VIP)

7.2.1.1. Prinzipielle Funktionsweise einer Vakuumdämmung

Die Vakuumdämmelemente bestehen aus einem Kern, der mit einer Hochbarrierefolie luftdicht umhüllt und vakuumiert wird. Durch die Struktur des Stützmaterials reduziert sich die Wärmeübertragung über Festkörperleitung, da zwischen den einzelnen Teilchen nur ein punktförmiger Kontakt besteht. Ein Zuschlagstoff verringert die Infrarot-Durchlässigkeit und minimiert somit den Wärmeübergang durch Strahlung.



Beim Herausziehen der Luft sinkt die Anzahl der Luftmoleküle im Dämmelement. Bei jedem Zusammenstoß wird Bewegungsenergie übertragen und Wärme transportiert. Die noch verbliebenen Luftmoleküle kontaktieren sich seltener.

Bild 56 zeigt einen Vergleich der heute üblichen Dämmstoffe mit dem QASA-Element von VARIOTEC und stellt die Wärmeleitfähigkeit der verschiedenen Dämmstoffe gegenüber.



a) VIP QASA-Element von VARIOTEC
b) Märmeleitzahlen verschiedener Dämmstoffe [13]
b) Mineralwolledämmung im
Vergleich dazu [13]

Bild 56 Vergleich der Vakuumdämmung mit herkömmlichen Dämmmaterialien

Dem Vorteil der hohen Dämmeigenschaften steht der Nachteil des Verlustes des Vakuums gegenüber. Aber auch dann noch hat das Stützmaterial eine hervorragende Dämmwirkung. Ziel dieses Forschungsvorhabens ist es, dem Nachteil entgegen zu wirken und durch eine abgestimmte Systemlösung die Verletzungsgefahr für das Vakuum zu bannen. Die ggf. geringere Lebensdauer (des Vakuums) könnte durch eine entsprechende Ausbildung einer Hülle mit Sicherheit auf das erforderliche Maß angehoben werden. Ist die Wetterschutzschicht oder –schale demontierbar, kann zu gegebener Zeit ein Austausch vorgenommen werden.

7.2.1.2. Funktionsweise der Vakuumisolationspaneele (VIP)

Für die Wärmedämmung von Gebäuden sind Vakuum-Isolationspaneele (VIP) aus wärmetechnischer Sicht ideal. Erste Lösungen sind dazu auf dem Markt und werden bereits angewendet, wenn auch nicht im Mauerwerksbau. Das von VARIOTEC entwickelte QASA-Bauteil macht die VIP-Technik universell und problemlos, sowohl bei der Sanierung von Altbauten als auch beim Neubau einsetzbar. Deckschichten und Kantenschutz beugen Beschädigungen bei Transport und Einbau vor und übernehmen zusätzliche technische und gestalterische Funktionen.

QASA-Elemente weisen hervorragende Dämmeigenschaften bei geringer Dicke auf. Hohe Effizienz und geringer Raumbedarf ermöglichen kostengünstige Sanierungen gemäß den Vorgaben der Energieeinsparverordnung EnEV. Zusätzlich dient die schlanke Konstruktion ohne Stufen und Vorsprünge dem barrierefreien Bauen. Das VIP/QASA-Wärmedämmsystem



bietet sich somit für Neubau und Sanierung in hocheffizienter Dämmklasse sowie für den gesamten Passivhausbereich an.

7.2.1.3. Wirkprinzip und Leistungsrahmen

Der prinzipielle Aufbau eines Vakuum-Isolations-Paneels (VIP) ist in Bild 57) dargestellt. Das Vakuum-Isolations-Paneel bzw. Vakuum-Isolations-Element besteht aus dem hochporösen Kernmaterial (pyrogene Kieselsäure), ggf. umhüllt durch ein Staubschutzvlies und einem gasdichten Hüllmaterial, einer sogenannten Hochbarrierefolie (Bild 57 b). Das in die Hochbarrierefolie eingeschweißte und unter Vakuum gesetzte Kernmaterial aus einem porenreichen Feststoffgerüst, bildet eine dem äußeren Luftdruck widerstehende "Vakuumkammer".



a) Prinzipskizze eines VIP aus [35] b) Folienschichtung [35] bzw. [13] bzw. [13]

Bild 57 Aufbau eines Vakuum-Isolations-Paneels

Für das besonders hohe Wärmedämmvermögen der VIP spielen zum einen das Kernmaterial und zum anderen auch das Vakuum eine bedeutende Rolle. Dies lässt sich wie folgt erläutern:

Allgemein findet der Wärmetransport eines porösen Dämmstoffes durch Wärmeleitung über das Festkörpergerüst, Wärmestrahlungs- und Wärmetransport in der Gasphase statt. Im Vakuum wird die Energieübertragung durch die technischen Brownsche Molekularbewegung und die Stoßenergie durch die Gaspartikel untereinander infolge der verminderten Anzahl an Gasmolekülen auf ein Minimum reduziert. Durch die Verwendung spezieller hochporöser Kernmaterialien wie pyrogene amorphe Kieselsäure mit einem Porenraum von > 90 Volumen-%, wird auch die Wärmeleitung über das Festkörpergerüst I s (Festkörperleitung) infolge des niedrigen Feststoffgehaltes sehr klein. Pyrogene Kieselsäure besitzt die herausragende Eigenschaft, dieses hohe Porenvolumen und die geringe Festkörperleitung auch bei einem atmosphärischen Druck von 1 bar aufrecht zu erhalten. Das Kernmaterial dient als Stützkörper für die vakuumdichte Hülle. Erst dadurch ist es möglich, flache evakuierte Körper mit einer dünnen Folie als Gasbarriere herzustellen.

Im Vakuum erfolgt der Wärmetransport somit im Wesentlichen über Wärmestrahlung (Ausbreitung von elektromagnetischen Wellen). Im Vakuum-Isolations-Paneel kommt hier noch die Festkörperleitung des Stützkernmaterials hinzu. Die Wärmestrahlung I_R in porösen Dämmstoffen wie den VIP-Elementen, kann durch das Hinzufügen von sogenannten Infrarot-reflektierenden/absorbierenden Stoffen (IR-Trübungsmittel) zur hochporösen Materialmischung wirksam reduziert und technisch kontrolliert werden. IR-Trübungsmittel absorbieren und/oder streuen die elektromagnetische Strahlung aufgrund ihrer chemischen Zusammensetzung und Struktur. Der durch das Vakuum erzeugte Innendruck in einem neuen funktionstüchtigen VIP-Bauelement liegt in einem Bereich von 0,1 bis 5 mbar [35].



Das Festkörpergerüst im VIP bildet den sogenannten Stützkern der Bauteilelemente. Generell werden als Stützkernmaterial hochporöse und mesoporöse Grundstoffe verwendet, an die folgende technische Grundanforderungen gestellt werden:

- Niedrige Wärmeleitung I Ist eine raumnetzförmige Struktur der Stützkernmaterialien vorhanden und liegt ein hoher Gesamtporenraum von > 90 Vol.-% vor, handelt es sich um ein geeignetes Material. Durch diese Festkörpereigenschaft, die Evakuierung und die Verwendung von Trübungsmitteln (IR-Reflektoren) wird die Gesamtwärmeleitfähigkeit I minimiert [35].
- Feine Porenstruktur Weist der Stützkern eine sehr feinporige -Porengrößenverteilung mit Poren auf, die vor allem im Mesoporenbereich (2 nm - 50 nm) liegen, wie das bei Einsatz der pyrogenen Kieselsäure der Fall ist, wird die Beweglichkeit von Gasmolekülen innerhalb dieser Porenstruktur sehr stark eingeschränkt, da die mittlere freie Weglänge der Sauerstoff- und Stickstoffmoleküle bei Raumtemperatur im Bereich von 70 nm liegt. Setzt man Stützkernmaterialien mit gleichem Porenraum, aber gröberer Porengrößenverteilung ein, ist die freie Weglänge der Gasmoleküle höher und die Gas-Wärmeleitung I_G steigt an. Das erklärt die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit vom Gasdruck und vom Stützkernmaterial in einem VIP. Die Tabelle zeigt die Verhältnisse der Einflussgrößen I_G: I_R: I_S des Wärmetransports bei konventioneller Mineralfaserdämmung und bei Vakuumdämmung

Tabelle 26VerhältniszahlenderWärmeleitungsanteileinkonventionellenDämmstoffen auf Mineralfaserbasis im Vergleich mit Vakuumdämmstoffen aus [23]

Dämmsystem	Gasleitung I _G	Strahlung I _R	Festkörperleitung I _s
Mineralfaser	25	13	2
VIP	0	1	3

Festigkeit

Bei der oben genannten hohen Porosität, muss ein auf 0,1 mbar evakuiertes VIP-Stützkernmaterial eine ausreichend hohe strukturelle Festigkeit besitzen, um dem atmosphärischen Luftdruck von rd. 1000 mbar dauerhaft Widerstand leisten zu können - ohne flach zusammengedrückt zu werden [35].

· Dauerhaftigkeit

Die geforderte Lebensdauer von VIP beträgt leistungsbezogen 30 bis 50 Jahre. Dieser Lebenszeitraum entspricht etwa den Vorgaben der europäischen Normen für Wärmedämmstoffe in Bezug auf eine mittlere Lebensdauer von 25 Jahren unter Einbeziehung der Alterungseffekte in die deklarierte Wärmeleitzahl. Daher müssen sowohl die Einzelkomponenten als auch das gesamte Bauteil eine hohe Alterungsbeständigkeit, z. B. Widerstand gegen Durchfeuchtung und strukturellen Abbau (chemische Degradation), aufweisen [35].

Toxikologische Bewertung - Pyrogene Kieselsäure

In VIP-Paneelen liegt das Stützkernmaterial pyrogene amorphe Kieselsäure gebunden vor, sodass eine Exposition gegenüber diesem Stoff nicht gegeben ist. Eine Exposition ist aber bei Beschädigung der Paneele oder bei der Entsorgung möglich. Zu pyrogener amorpher Kieselsäure liegen umfassende Daten zur Toxikologie,



Ökotoxikologie und Epidemiologie vor (s. [15] - [20]). Danach bestehen keine gesundheitlichen Risiken beim sachgerechten Umgang mit pyrogener amorpher Kieselsäure, wobei der offizielle Arbeitsplatzgrenzwert (in Deutschland 4 mg/m³ einatembarer Staub) eingehalten werden muss. Darüber hinaus sind die Vorgaben im Sicherheitsdatenblatt des Herstellers zu beachten. Pyrogene amorphe Kieselsäure ist kein gefährlicher Stoff im Sinne des Chemikaliengesetzes. Pyrogene amorphe Kieselsäure ist nach ISO technical committee ISO/TC 229, WD Technical Specification ISO/TS 80004-4 ein nanostrukturiertes Material [18]. Isolierte Nanopartikel liegen im Produkt nicht vor (s.[14], [15], [18]). Somit ist bei bestimmungsgemäßen Umgang eine relevante Exposition gegenüber Nanopartikeln nicht gegeben. Synthetische amorphe Kieselsäure, dies schließt pyrogene amorphe Kieselsäure ein, wurde bereits unter REACH (Registration by European Chemicals Agency) erfolgreich registriert [20].

Synthetische amorphe Kieselsäure ist kein gefährlicher Abfall, kann entweder durch geeignete Aufbereitungsverfahren rezykliert oder unter Berücksichtigung länderspezifischer Regelungen durch Deponierung entsorgt werden.

Für VIP-Stützkerne für Anwendungen im Baubereich kann gegenwärtig nur pyrogene Kieselsäure als Grundmaterial eingesetzt werden. Als so genannte Hilfsstoffe werden folgende Materialien eingesetzt:

- IR-Trübungsmittel Wie bereits unter "Funktionsweise" erläutert, werden zur Reduktion und Steuerung der Wärmestrahlung eingesetzt. Es wird z. B. Siliziumkarbid, Graphit oder Aluminiumflitter verwendet [21].
- Bewehrungsfasern Zur mechanischen Stabilisierung des gepressten VIP-Rohkerns werden Glas-, Mikroglas-, Zellulose- und Polymerfasern einzeln oder auch in Kombination miteinander eingesetzt. Die Einzelkomponenten werden gemischt, anschließend zu Platten gepresst und ggf. einem Trocknungsprozess unterzogen. Das Stützkernmaterial wurde und wird im Laufe der Entwicklung von VIP u. a. mit dem Ziel, eine möglichst niedrige Wärmeleitfähigkeit zu erreichen, weiterentwickelt und erforscht. Das nachfolgende Bild zeigt für verschiedene Stützkernmaterialien den Anstieg der Wärmeleitfähigkeit λ bei Zunahme des inneren Gasdrucks von 0,001 mbar bis 1000 mbar. Die dargestellten Versuche wurden an VIP-Paneelen unter Verwendung von trockenem Stickstoff (N2) als lufttypisches Füllgas bei einem äußeren Luftdruck von 1 bar und einer Temperatur von T = 20 °C durchgeführt [22]. Das untere Diagramm in Bild 58 zeigt, dass bei der Verwendung von pyrogener Kieselsäure oberhalb eines Innendrucks von rd. 10 mbar ein moderates Ansteigen der Wärmeleitfähigkeit erfolgt. Im Vergleich mit den anderen dargestellten Stützkernmaterialien, weist die pyrogene Kieselsäure bis zu diesem Innendruck eine konstante Wärmeleitfähigkeit auf. Um auf der wärmetechnisch sicheren Seite zu bleiben, wurde für die VIP-Herstellung die Einhaltung eines Innendrucks herstellerspezifisch unterschiedlich von kleiner als 3 mbar bzw. kleiner als 5 mbar festgeschrieben. Steigt der Gasdruck im VIP über 10 mbar an, bleibt die Wärmeleitzahl der Vakuumisolationspaneele mit Kieselsäurefüllung weiter auf einem niedrigen Niveau vergleichsweise zu VIP mit anderen Stützkernmaterialien. Aus diesem Grunde wird bei der VIP-Herstellung überwiegend pyrogene Kieselsäure als robustes Stützkernmaterial eingesetzt. Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit λ eines VIP-Elementes vom Innendruck der Gasatmosphäre aus trockenem Stickstoff bei Verwendung unterschiedlicher Stützkernmaterialien.





Bild 58 Ansteigen der Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit des Innendrucks im Vergleich mit anderen Stützkernmaterialien aus [22]

Die pyrogene Kieselsäure ist ein Hightech-Nebenprodukt der Silizium-(Photovoltaik-Wafer-) und Silikonchemie. Die pyrogene Kieselsäure entsteht bei der Pyrolyse und Oxidation von Siliciumtetrachlorid SiCl₄, Trichlorsilan SiHCl₃ oder Methyltrichlorsilan CH₃SiCl₃ in einer Wasserstoff- und Sauerstoff-Knallgasflamme bei Temperaturen zwischen 1200 bis 1600 °C. Im Hydrolyse- und Oxidationsprozess entstehen zunächst Kieselsäure-Primärpartikel, die über Kollisionen und Sinterprozesse in der Flamme stabile Aggregate von ca. 100 bis 500 Nanometer bilden, die sich im Weiteren nach der Flamme zu größeren Agglomeraten von größer als 1 Mikrometer zusammenlagern. Infolge ihrer fraktalen Feinstruktur schließen die Partikel ein großes Volumen an Mesoporen ein, das bei der VIP-Herstellung für die Evakuierung zur Verfügung steht. Isolierte Primärpartikel treten bei kommerziellen pyrogenen Kieselsäuren nicht auf. Die pyrogene Kieselsäure besteht aus einem amorphen SiO₂-Gerüst, das ein großes Porenvolumen einschließt. Die hohe Porosität erklärt die geringen Schüttgewichte.

Tabelle 27 Typische Kennwerte pyrogener Kieselsäure ([24], [25], [26])

Kennwert	Einheit	Typische Größenordnung
Schüttdichte	g/l	Ca. 30 bis 60
Porosität	Vol%	91 bis 97
Spezifische Oberfläche	m²/g	50 bis 400; typisch 200
Silanolgruppen-Dichte SiOH von hydrophiler	-	2 SiOH-(Silanol)-Gruppen
Kieselsäure bei 75 % relativer Feuchte	-	pro nm ²
Reversible Wasserbindung (Physisorption) bei 75 % relativer Feuchte	kg/kg	0,050
Reversible Wasserbindung (Physisorption) bei 95 % relativer Feuchte	kg/kg	0,172 bis 0,198

Charakteristische Eigenschaften der pyrogenen Kieselsäure sind die große spezifische Oberfläche (pyrogene Kieselsäuren werden mit unterschiedlichen spezifischen Oberflächen angeboten), der hydrophile Charakter (Oberflächenenergie > 72 mJ/m²) und eine Wasserdampfabsorptionsisotherme mit hoher Wasserbindungskapazität bei hoher relativer



Luftfeuchtigkeit > 80 %. Einige für die VIP-Herstellung wichtige Kennwerte von pyrogener Kieselsäure sind in Tabelle 27 aufgeführt.

Ein besonderer Vorteil pyrogener Kieselsäure ist ihre nach dem heutigen Erkenntnisstand uneingeschränkte Recyclingfähigkeit. Bei VIP-Fehlproduktionen (z. B. Mängelexemplare) kann das Stützkernmaterial Kieselsäure wieder vollständig dem Rohstoffkreislauf bzw. Produktionskreislauf zugeführt werden [25].

Eine hydrophile Kieselsäure hat die Fähigkeit, Wasserdampf zu absorbieren, wodurch ein möglicher Druckanstieg im VIP durch eindringenden Wasserdampf unterdrückt werden kann. Mit zunehmendem Feuchtigkeitsgehalt oberhalb einem Relativdampfdruck p/p0 = 0,5 steigt die Festkörper-Wärmeleitfähigkeit I der Kieselsäure an ([24], [26]).

Die Wasserdampf-Permeation durch Barrierefolien lässt sich nicht ausschließen, gehört zum natürlichen Alterungsprozess und ist eine Teilursache für den Anstieg der Wärmeleitfähigkeit. Hier muss auf weitere Entwicklungen vom Materialsektor her gesetzt werden.

Die Feuchtigkeitsaufnahme der Kieselsäure und ihre Auswirkung auf die Erhöhung der Wärmeleitzahl I wurden in Grundlagenuntersuchungen ermittelt [26]. Danach kann die Masse der Kieselsäure durch Feuchtigkeitsaufnahme bis zum Erreichen eines Gleichgewichtszustands um bis zu 10 Masse-% ansteigen. Gleichzeitig erhöht sich die Wärmeleitfähigkeit I eines fabrikneuen VIP von I = 0,004 bis 0,005 W/mK auf I = 0,007 W/mK beim feuchtebeladenen VIP. Dieser Anstieg der Wärmeleitzahl wurde bei der Festlegung der Bemessungswerte in den allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen des Deutschen Instituts für Bautechnik Berlin pauschal berücksichtigt.

Nach dem gegenwärtigen Erkenntnisstand der Wacker-Forschung hat die Feuchtigkeitsaufnahme keine Auswirkungen auf die Struktur und die Strukturstabilität der Kieselsäure über den langen Zeitraum der Alterung ([25], [27]).

7.2.1.4. Aufbau und Arten

Typenbezeichnung:	Aufbau:	Einsatzbereich:	
VT-A-DA-2 R-GGR	3 mm R-Gummi	Wintergartenboden, Bodendämmung	
SAFE & SPEED R-Gummi *	(Gummigranulat)	außen	
	VIP 20/30 mm	Lagerelemente	
	3 mm R-Gummi	Vorgegebene Formate It. Datenblatt	
	(Gummigranulat)	Lieferzeit: ca. 10 Arbeitstage	
VT-A-DA-2 GFK	1,5 mm GFK weiß	Bodeninnendämmung,	
SAFE & SPEED R-Gummi *	VIP-Kerndicke 20-50 mm	Kellerdeckendämmung, Stabile,	
	1,5 mmGFK wiß	trittfeste Oberfläche	
	(Glasfaserverstärkte	Flächendämmung innen und außen	
	Kuntststoffplatte)		
SAFE & SPEED PP-Vlies [*]	1 mm PP-Vlies	Bodeninnendämmung,	
	VIP 20/30 mm	Bodendämmung außen	
	1 mm PP-Vlies	Sehr geringer Aufbau durch NUR 1	
		mm Schutzschicht, Schutz vor	
		Feuchtigkeit (hydrophob) und	
		Schmutz	
		Lagerelemente	
		Vorgegebene Formate It. Datenblatt	
		Lieferzeit ca. 10 Arbeitstage	

Tabelle 28Aufbau und Arten



*		
BAUDER VIP-TE *	15 mm PIR-Schaum	Flachdach-, Balkon-, Terrassen-
	VIP 20/30/40 mm	dämmung
	3 mm Gummigranulat	Aniragen direkt an Fa. Paul BAUDER
	2 mm DVC K	Dockschichton DVC K Cumminlatto
VI-A-DA-PVC-K-GGR	Z IIIII PVC-K VID	für geringe Aufbauten
	3 mm Gummigranulat	Wintergartenboden
	5 mm Gummigrandiat	Maximales Elementformat: 1000 x
		1000 mm
		Mindestberechnungsfläche: 0.5 m ²
		Lieferzeit: 15 – 20 Arbeitstage nach
		Auftragsfreigabe
		Aufgrund des asymmetrischen
		Aufbaus können Verzugsprobleme
		entstehen
VI-A-DA-2 PVC-K	2 mm PVC-K	Deckschichten beidseitig PVC-K für
		geringe Aufbauten Sablagfasta
	2 mm PVC-K	Bodopdämmung Einsatzboroicho
		obne Sichtanforderung
		Mindestberechnungsfläche: 0.5 m ²
		Lieferzeit: 15 – 20 Arbeitstage nach
		Auftragsfreigabe
VT-A-DA-2 R-GGR [*]	3 mm R-Gummi	Deckschichten beidseitig
	VIP	Gummiplatte für geringe Aufbauten
	3 mm R-Gummi	Wintergartenboden
		Maximales Elementformat: 1000 x
		1000 mm
		Mindestberechnungsfläche: 0,5 m ²
		Lieferzeit: 15 – 20 Arbeitstage nach
	2 mm Aluminium	Auftragstreigabe
VI-A-2 AIU/IVIAX	2 mm Auminium 25 mm Stabilisierungsschicht	Piegelkonstruktion
	VIP	Pfosten/Riegel Fassadenaufbauten
	2,5 mm Stabilisierungsschicht	1-seitig Aluminium; 1-seitig mit
	2 mm Aluminium/Max Exterior	Fundermax (HPL) (Schichtstoff)
		Preis auf Anfrage
	ALTERNATIV	gewünschten Aluminium/-
	3 mm Aluminium	Fundermax-Farbton grundsätzlich
		angeben!
	3 mm Aluminium / Max Exterior	Lieferzeit: abhängig vom
	2 mm Sporrholz Workswehl	
vi-A-Gaub		ohne Sichtanforderung
	3 mm Sperrholz Werkswahl	zur bauseitigen Befestigung der
		Paneele können auf Wunsch PUR
		oder XPS-Schaumeinlagen integriert
		werden
		Preis auf Anfrage
		Lieferzeit: 15 – 20 Arbeitstage nach
		Auftragsfreigabe
VT-A-Hydro	15 mm Hydropaneel HD	Fassadendämmung mit Hydropaneel
	5 mm XPS	Fassaden-, Holzriegel-, Ziegel-,
		IVIASSIV- oder Betonbau
		Sanierungsbereich Z. B. bei Nachbarschaftsangronzungen
		Mindestherechnungsflächer 0.5 m ²
		Lieferzeit: 20 Arbeitstage nach
		Auftragsfreigabe



VT-A-PP-Vlies [*]	1 mm PP-Vlies	Bodeninnendämmung,
	VIP	Bodendämmung außen
	1 mm PP-Vlies	Sehr geringer Aufbau durch NUR 1
		mm Schutzschicht, Schutz vor
		Feuchtiakeit (hydrophob) und
		Schmutz
		Mindestberechnungsfläche: 0,5 m ²
		Lieferzeit: 15 – 20 Arbeitstage nach
		Auftragsfreigabe
VT-A-Laib*	10 mm EPS	Fensterlaibung- Tür- oder
	VIP	Sturzverkleidung
	10 mm FPS	Stückpreise (besonders bei
		schmalen Elementen geeignet.
		OHNE Mindestberechnungsfläche)
		Lieferzeit: 15 – 20 Arbeitstage nach
		Auftragsfreigabe
VT-A-Roll*	3 mm Sperrholz Werkswahl	Rollladen- oder Raffstorekasten
VI / Ron	VIP	Heizkörnernischen
	3 mm Sperrholz Werkswahl	Mindestherechnungsfläche [,] 0.5 m ²
		Stückpreise (besonders bei
	Alternativdeckschichten	schmalen Elementen geeignet.
	5 mm XPS	OHNE Mindestberechnungsfläche)
	2 mm geschäumtes PVC	Lieferzeit: 15 – 20 Arbeitstage nach
	1 mm PP-Vlies	Auftragsfreigabe
VT-I-B-GE [*]	10 mm Ginsfasernlatte	Deckschichten Ginsfasernlatten für
	10 mm Gipsfaserplatte versetzt	geringe Innenbodenaufbauten
	VIP	Mindestherechnungsfläche [.] 0.5 m ²
	10 mm XPS	Lieferzeit: 15 – 20 Arbeitstage nach
		Auftransfreigabe
VT-I-B-OSB *	18 mm MEP/OSB (MEP)	Deckschichten OSB (MEP) für
	VIP	deringe Innenbodenaufbauten
	10 mm XPS	(Stufenfalzsystem)
		Fußboden über unbeheizten Kellern
		ungedämmten Fundamentplatten
		Mindestherechnungsfläche [,] 0.5 m ²
		Lieferzeit: 15 – 20 Arbeitstage nach
		Auftragsfreigabe
VT-I-B-HWF [*]	19 mm Holzweichfaserplatte	unbeheizte Keller ungedämmten
	VIP	Fundamentplatten
	10 mm Holzweichfaserplatte	Bodenkonstruktionen im Holzbau
		Mindestberechnungsfläche: 0.5 m ²
VT-I-SPI-GK *	12.5 mm Gipskarton	Innendämmung mit
	VIP	wärmebrückenarmen SPS-Kanteln
	5 mm XPS	Innendecken- Innenwanddämmung
	mit Lattung (SPS)	Mindestberechnungsfläche: 0.5 m ²
VT-I-W-GK *	12.5 mm Gipskarton	Innenwanddämmung
	1.5 mm GFK	Mindestberechnungsfläche: 0.5 m ²
	VIP	
	10 mm EPS	
NORIT-Fußbodenheizung	30 mm Norit-TE Therm U	Innendämmung mit
VIP	Flement	Fußbodenheizsystem
	2.5 mm Stabilisierungsschicht	Fußboden über unbeheiztem Keller
	20 mm VIP	oder über Fundamentplatte geeignet
	10 mm XPS	Durch die Kombination der schlanken
		VIP-Dämmung mit den für die
		Heizschlangen oder
		Fußbodenheizung vorgefrästen
		Trägerplatten, die nur mehr
		ausgegossen werden, ergibt sich ein



		sehr schlankes Gesamtsystem mit einer Aufbauhöhe von ca. 5,5 cm. Klicksystem Mindestberechnungsfläche: 0,5 m ² Anfragen direkt bei Fa. Lindner GFT GmbH
NORIT-Trockenestrich VIP	20 mm Trockenestrich NORIT 2,5 mm Stabilisierungsschicht 20 mm VIP-Element 10 mm XPS	Innendämmung mit integriertem Trockenestrichsystem Fußboden über unbeheiztem Keller oder über Fundamentplatte geeignet Klicksystem Mindestberechnungsfläche: 0,5 m ² Anfragen direkt bei Fa. Lindner GFT GmbH

*) Variotec – Produkt- und Systemübersicht VIP/QASA http://variotec.de/hp2527/Vakuumdaemmung-VIP-QASA.htm

7.2.1.5. Anwendung

Neubau / Sanierung

Der Einsatz von Vakuum-Isolations-Paneelen (VIP) sind vor allem in der Sanierung von hohem Wert. Bausichere VIP-Systeme sind nicht nur vollwertiger Ersatz für konventionelle Dämmungen, sondern bieten bedingt durch die um den Faktor 5 (bemessen am Bemessungswert I = 0,007 W(mK), im belüfteten Zustand 0,020 W/(mK)) schlankeren Dämmstärken viele Anwendungsmöglichkeiten mit wirtschaftlichem Mehrwert.

Voraussetzung hierfür sind bauerfahrene und bausichere Herstellersysteme, welche grundlegende Detaillösungen und Projektbegleitungen für alle Sanierungsgewerke anbieten und hohe Qualitätsstandards schon in der Herstellung der VIP-Elemente pflegen. Grundlage für die Integration von VIP-Elementen auf dem Bausektor ist die ausschließliche Verwendung von gewerkbezogenen, definierten Deckschichten, wodurch VIP-Sandwichoder Mehrschalenelemente entstehen.

Es gilt der Leitsatz: VIP-Produktqualität = Herstellerqualität + Anwendungsqualifikation (Planung + Ausführung)

Erfahrungen mit diesem Dämmstoff bestehen seit Jahren. Eine unkomplizierte und sichere Anwendung in Projekten aller Größenordnungen ist möglich. Seitens des Herstellers müssen neben der hohen Fertigungsqualität systembezogene Detail- und Montagelösungen zur Verfügung gestellt werden. Eine Beschädigung ist außer bei Mutwilligkeit nur noch in sehr geringem Maße möglich. Zudem der Lambda- Wert selbst im belüfteten Zustand immer noch mit 0,020 W/(mK) hervorragende Dämmleistungen bringt, so dass auch bei richtiger Planung und Berechnung Bauschäden selbst bei Havarie ausgeschlossen werden können. Bzgl. der Qualitätssicherung ist der Nachweis des Herstellers über die mehrstufige Prüfung jedes einzelnen Vakuum-Elementes bei der Fertigung wichtig. Für die Anwendung in den nach DIN 4108-10 ausgewiesenen Bereichen, sind entsprechend auf die Anwendung angepasste Schutzdeckschichten und mechanisch belastbare und durchdringbare Randausbildungen möglich und erforderlich.

Hierzu muss der VIP-Hersteller belastbare Praxislösungen anbieten können. Die Lebensdauer der VIP-Elemente betragen z. B. bei dem Produkt QASA der VARIOTEC GmbH & Co. KG nach einer Testphase von 180 Tagen, gemessen vom FIW München, ca. 30-35 Jahre bei einem Testwert dreier Vergleichselemente mit einem Lambda- Anstieg von Ausgangswert I = 0,0038 W/(mK) auf nur 0,0057 W/(mK).





Bild 59 Lebensdauer der VIP (Quelle: Messergebnisse QASA- Vakuumdämmpaneele der Fa. VARIOTEC GmbH & Co. KG)

Der den Berechnungen zugrunde zu legende Bemessungswert It. DIBt mit 0,007 W/(mK) schließt hier zudem weitreichende Sicherheitszuschläge mit ein. Somit ist auch das Thema der Haltbarkeit und Bausicherheit durch die vorgenannten Ausführungen obsolet. Das FIW (Forschungsinstitut für Wärmeschutz) München als akkreditiertes Prüfinstitut hat als Ergebnis der Messungen aufgezeigt, dass bei keinem der drei Testpaneele über den Zeitraum Anzeichen von Versagen oder Belüften vorliegen.

Innendämmung – Außendämmung

Einsatzbereiche von VIP-Dämmsystemen in der Sanierung nach DIN 4108-10 sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengestellt.

Tabelle 29	Einsatzbereiche von VIP-Dämmsystemen in der Sanierung (Quelle: Systeme
QASA VARI	OTEC GmbH & Co. KG)

	Kürze I	Einsatzbereich e	Lösung	Vermeidung
A	DAD	Dachaußen- dämmung (Steildach- dämmung)	Abstandsflächen	Brüstungsergänzung Dachaufbauten
			Architekturproportionen	Aufwendige Ortgang-, Trauf- und Firstarbeiten
		Gauben- dämmung	Abstandsfläche	Reduktion Ortgang-, Trauf- und Firstarbeiten
			Brandschutzabstände Denkmalschutzvorgaben Architekturproportionen Vorfertigung Fertiggauben	



	DAA	Flachdach- dämmung	Abstandsflächen	Aufwendige kosten- intensive Begleit- gewerke z. B. zur Schwellenerhöhung Terrassentüren
			Barrierefreies Bauen	Nicht normgerechte Abdichtungslösungen
/	/		Attikareduktionen	Wechsel der Terrassentüre bzw. Sturzerhöhungen Geländer- und Attikaumbauten
	DAA	Balkone, Terrassen	Erhalten von Balkonen durch Möglichkeit der Wärmebrückenreduktion	
			Große Dämmstärken sind oftmals nicht einsetzbar wegen begrenzenden Öffnungen, Bauteilen etc.	
	DZ	Sparren- zwischen- dämmung	Nutzbare Höhe kann beibehalten werden	Keine raumgreifende Sparrenaufdopplung außer statisch erforderlich
			Nutzen des bestehenden Sparrenquerschnittes	Dachabbruch von außen und wetterabhängige Baumaßnahmen
			Möglichkeit der Sichtbalkenaus-führung trotz geringem Sparrenquerschnitt bestehender, älterer Gebäude	
	Di	Deckeninnen- dämmung	Wärmebrücken zu nicht beheizten Geschossen	Deckendämmungen im Wohnraum
			Unabhängige Lösung z. B. in Etagenwohnungen mit untersch. Geschossweisen Nutzern Nutzerschonende Lösung Ausreichende Nutzhöhe trotz Deckeninnendämmung	Keine unnötigen, aufwendigen und störenden Zusatzarbeiten wie Bodenabbruch etc.



B	DEO	Innendämmung Decke o. Boden	Dämmsysteme als Vollelemente mit und ohne Fußbodenheizung	
	1	4	Einsatz bei nicht möglicher Deckeninnendämmung oder Komplettsanierung mit neuen Bodenaufbauten	
			Möglichkeit der FBH VIP- Element-fertigung, (z. B. QASA NORIT), ein Element für mehrere Funktionen mit einem Arbeitsgang	Handbarder Handba
× ×	WI	Wandinnen- dämmung	Dämmsysteme mit und ohne Installationsebene	Verlust von Wohn-/ Nutzfläche
	(4)	5	Heizkörpernischen und Gesamtflächen	Kombination mit Boden- und Deckeninnendämmsyst emen
			Schlanke Innenwanddämmung mit Vorsatzschale für Installationen mit ca. 10 cm im Passivhaus-Standard	Verwendung bestehender Fenster- und Türrahmen bei ausreichender Rahmengüte
	12	Barran Sanan Banar Maran La Managaran Sana Mana La Managaran Sana Sana	Laibungs-, Sturz und Brüstungsdämmung von Türen, Fenster	
NH NH	WAB	Außen- dämmung Wand hinter Bekleidung	Vorgehängte, hinterlüftete Fassaden VHV für alle Bekleidungsvarianten, Laibungsdämmungen, Verschattungsanlagen	Vermeidung von Verbreiterungen der Trauf- und Ortgangsüberstände
	N		Geringer Fassadenaufbau vor bestehenden Fassadenflächen, trotz höchstem Dämmwert	Es werden tiefe Laibungseinstände ver- mieden, der Lichteinfall wird erhöht, die Fensterfläche kann reduziert werden
1			Systemlösung für alle Fassadenuntergründe	Wärmebrückenreduzier- te Ankersysteme u. ge- ringe Ankerlängen ver- meiden statische Nach- teile u. lassen die Be- festigung aller Fassa- denbekleidungen zu



			Hoher Dämmwert trotz geringem Platzangebot z. B. Innenstadt, Straßenorientierung, Gehweganbindung	VIP-Systeme lassen hohe Dämmleistungen trotz Abstandsflächenvorgab en zu
			Sonderfall: Das B1 QASA- Dämmsystem der Fa. VARIOTEC bietet die Möglichkeit selbst in vielen Brandschutzbereichen mit mind. B1 Anforderungen Vakuumdämmung einzusetzen	Vermeidung unwirtschaftlicher Vorbereitungen des Fassadengrundes. Die Hinterlüftungs- ebene lässt den Ausgleich unebener Flächen zu
- P			Mit dem VIP-System VHV sind nahezu fassadenbündige Fenstereinbauten nicht nur optisch ansprechend, sondern tatsächlich mit hoher Dämmgüte der Fassade möglich	
		Verschattungs- anlagen	Dämmung von Raffstore- und Außenrollladenanlagen mit Integration in Dämmaufbau der Hauptfassade ohne Überstände	Vorgesetzte Verschattungs-anlagen dem Witterungsangriff ausgesetzt
			Gleicher Dämmwert im Kastenhintergrund wie in der konventionellen Dämmung	Zu geringe Dämmung im Bereich der Verschattungskästen aus architektonischen Gründen
			Kombination VIP-Dämmung, Verschattung und konventionelle Dämmfassade	
WZ	WZ	Zweischalige Wände, Kerndämmung	Vorgehängte, vorgefertigte schlanke Systemlösungen als Installations- und Funktionswände mit hohem Dämmwerk	Vorbereiten der bestehenden Fassadenuntergründe
	WH	Dämmung Holztafel- rahmen- bauweise	Außenseitige Montage der VIP-Systeme für VHV-Systeme	Rückbau der Basis- konstruktion und Erhöhung der Dämm- wirkung mit schlankem Aufbau



7.2.1.6. Verarbeitung

Die Anwendungen unterscheiden sich hauptsächlich durch die Wahl der systembezogenen Deckschichten, der Montagelösungen, nicht jedoch durch die Elementfertigung an sich. Die Elementgrößen beziehen sich auf möglichst große Einzel-Kern-VIPs mit etwa 1000 x 1000 mm. Die Größen unterliegen natürlich projektbezogenen Maßlichkeiten. Die üblichen Elementgrößen für die Anwendungen Innen und Außen betragen von ca. 500 x 1000 bis ca. 1000 x 1000 mm in Abstufungen. Schrägzuschnitte sind möglich. Jedes Element wird mit maschineller Unterstützung handgefertigt und anhand eines Verlegeplanes, seitens des Herstellers, in Abstimmung definiert.



Bild 60 Verlegeplan für VIP-Elemente

7.2.2. VIS - Vacuum Insulating Sandwiches [28], [23]

Das Wirkprinzip bei dem Vakuum-Dämm-Sandwichelement beruht ebenfalls auf dem oben beschriebenen Prinzip. Ein Kern stabilisiert das Vakuum und als äußere Hülle dienen hier stabile Platten, die auch in der Lage sind lokale Druckspannungen aufzunehmen und zu verteilen. Die schmale Seite wird von einer Membran gefasst, die sich nach der Evakuierung an das Stützmaterial anlehnt (vgl. Bild 61 und Bild 62).

Die Evakuierung erfolgt über einen Flansch, der auch im Falle einer Leckage nach deren Reparatur genutzt werden kann, um das Vakuum erneut wieder herzustellen.

Vakuum-Dämm-Sandwichelemente sind aufgrund ihrer hohen Belastbarkeit unter anderem sehr gut als Bodendämmung für Lager- und Industriehallen sowie Kühlhäuser geeignet, deren Böden hochgedämmt sein müssen und zugleich große Lasten übertragen müssen.





Bild 61 VIS Element mit Aluminiumdeckblechen [28]





Die Hüllen sind in der Regel aus Edelstahl oder Aluminium und daher ökologisch gesehen sehr aufwendig.

Anders als bei einem VIP Element lässt sich bei einem VIS Element nahezu jede Geometrie realisieren. Zudem können relativ einfach andere Deckmaterialien aufgebracht und Verbindungsmittel aufgeschweißt werden, um spätere Anschlusskonstruktionen befestigen zu können.

Die Dimensionen in der Ebene sind abhängig von den Transportmöglichkeiten. Daraus resultieren Elementabmessungen von 3.0 x 8.0 m². Ihre zugehörigen Stärken liegen zwischen 10 und 40 mm.





Bild 63 Mögliche Geometrien, Aussparungen und Befestigungen bei einem VIS [28]

Ein wesentlicher Vorteil gegenüber dem VIP ist die Robustheit der Metallhülle, die vor mechanischer Beanspruchung schützt. Außerdem kann das Element jederzeit neu evakuiert werden. Der Systemdruck wird wieder angepasst und die Funktionalität bleibt erhalten. Das ist insbesondere vor dem Hintergrund der Langlebigkeit der Vormauerung ein wichtiger Vorteil.

7.2.2.1. VIS - Stützkern

Gemäß den Anforderungen werden als Material für den Stützkern beispielsweise Glasfasern, offenzellige Polystyrol- und Polyurethanschäume sowie gefällte und pyrogene Kieselsäure verwendet.

Unter Einsatz von Kieselsäure als Stützkernmaterial in der Kombination mit einer nur gering permeablen Hüllfolie sind keinerlei Zusatzmaßnahmen erforderlich. Die Säure fungiert hier als Trocknungsmittel und die Folien halten die Gasmoleküle zurück.

7.2.2.2. VIS - Hüllmaterial

Die Hülle eines VIS-Elementes besteht aus zwei Edelstahldeckblechen und einer umlaufenden Membran, die gasdicht miteinander verschweißt werden. Die einzelnen Edelstahldeckschichten sind 0,60 bis 4,00 mm stark.

Als Edelstahl wird in der Regel 1.4301 eingesetzt, der aufgrund seines gleichmäßig dichten Aufbaus einen hervorragenden Permeationswiderstand bietet. Bild 64 verdeutlicht den vorteilhaften Permeationswiderstand des Edelstahls hinsichtlich Sauerstoff- und Wasserdampfpermeation:





Bild 64 Permeationsraten diverser Hüllmaterialien [28]

Ein weiterer Vorteil des Edelstahls stellt die hohe Belastbarkeit und seine Unempfindlichkeit gegenüber mechanischen Beanspruchungen dar.

Ein nicht zu unterschätzende Nachteil des Materials ist jedoch seine hohe Wärmeleitfähigkeit von ca. 15 W/(mK), welche sich natürlich in erhöhten Wärmebrückeneffekten bzw. sogar in Transmissionswärmeverlusten widerspiegelt.

7.2.2.3. VIS - Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeit eines VIS-Elementes beträgt im ungestörten Bereich ohne Berücksichtigung von Alterungs- und Wärmebrückeneffekten:

I = 0,005 W/(mK)

Die Dämmleistung dieser auf Edelstahl basierenden Vakuumelemente ist somit um das fünfbis achtfache höher als die konventioneller Dämmmaterialien.

Um die Auswirkungen von Alterungseinflüssen auf die geringe Wärmeleitfähigkeit zu ermitteln wurden entsprechende Klimaprüfungen am Forschungsinstitut für Wärmeschutz in München (FIW) durchgeführt. Diese konnten mit einer maximalen Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit um

DI = 0,0013 mW/(mK)

belegen, dass die Alterung hier keinen bedeutenden Einfluss auf die hochdämmende Eigenschaft des VIS-Elementes hat. Diese Tatsache ist auf den hohen Permeationswiderstand der Edelstahlhülle zurückzuführen, der das Eindringen von Gasmolekülen und Feuchte bestmöglich verhindert.

Damit ergibt sich der Rechenwert der Wärmeleitfähigkeit zu

I = 0,0063 W/(mK).



Zusätzlich müssen bei der Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von VIS-Elementen die auftretenden Wärmebrückeneffekte an den Elementstößen berücksichtigt werden.

7.2.2.4. VIS - Diffusionsverhalten

Grundlegendes

Die hoch dampf- bzw. gasdichten Vakuumelemente lassen im intakten Zustand keine Diffusion von Wasserdampf- und Gasmolekülen zu. Folglich kann es innerhalb dieses Vakuumelementes zu keinerlei Tauwasserausfall kommen, auch wenn ein entsprechender Tauwassernachweis nach Glaser hier einen theoretischen Tauwasserausfall anzeigt.

Dennoch herrscht bei Wasserdampf- und Sauerstoffmolekülen unter atmosphärischem Druck ein Bestreben, entsprechende Konzentrationen auf das Vakuum zu übertragen. Dieser Vorgang sowie der damit verbundene Tauwasserausfall kann nur durch einen hohen Permeationswiderstand des Hüllmaterials unterbunden werden.

Infolge von Alterungseffekten kann sich dieser Widerstand jedoch, insbesondere bei den Hüllfolien der VIP deutlich verschlechtern.

Grundsätzlich gilt das VIP-Element dennoch als diffusionsdichtes, das VIS-Element sogar als schlagregen- und diffusionsdichtes Bauelement.

• Einsatz in der Außenwand

Im eingebauten Zustand kommt es jedoch in den Stoßbereichen zweier oder mehrerer Elemente aufgrund der verstärkt zu Wärmebrücken neigenden Rändern und Kanten der Vakuumdämmelemente zu einer erhöhten Gefahr der Tauwasserbildung.

Demzufolge ist an diesen Stellen für jede individuelle Konstruktion ein schadenfreies Diffusionsverhalten sorgfältig nachzuweisen.

Dabei gilt das Vakuumdämmelement aus bauphysikalischer Sicht selber als Dampfsperre.

7.2.2.5. VIS – Brandverhalten

• Grundlegendes

Das Brandverhalten der Vakuumelemente ist grundsätzlich abhängig von der Kombination des Hüll- und Stützkernmaterials, wobei den Feuerwiderstandseigenschaften der Hülle mehr Bedeutung zukommt, da diese im Brandfall direkt dem Feuer ausgesetzt ist. Eine allgemeine bauaufsichtlich geregelte Einstufung in Brandschutzklassen gibt es für VIS-Elemente bislang nicht.

VIS-Elemente basieren auf den Komponenten Edelstahl als Hüllmaterial und nicht brennbare Kieselsäure als Stützkern, diese könnten theoretisch betrachtet jedoch als ein A1-Produkt (entsprechend Klassifizierung noch nach DIN 4102-2 [51], [52]) eingestuft werden. Eine Klassifizierung als B1-Material ist mit einem Stützkern aus schwer entflammbarem XPS theoretisch möglich. Mit Glasfasern ist eine A2-Klassifizierung denkbar.

Derartige Klassifizierungen erfordern jedoch für jede individuelle Anwendung eine bauaufsichtliche Zustimmung im Einzelfall bzw. im Rahmen einer Systemlösung eine abZ.



• Einsatz in der Gebäudehülle

Der Einsatz von VIS-Elementen in die Gebäudehülle ist aus brandschutztechnischer Sicht unbedenklich.

7.2.2.6. VIS - Tragfähigkeit

Während die VIP-Elemente lediglich dem Wärmeschutz dienen, können VIS-Elemente auch für statische Zwecke genutzt werden. Der Grundaufbau eines VIS-Elementes entspricht einem System aus zwei Zuggliedern ohne Eigensteifigkeit (den Deckschalen) kombiniert mit einem schubweichen Kern, die unter atmosphärischem Druck schubfest miteinander verbunden sind. Es bildet sich ein Sandwich- oder auch Verbundtragverhalten aus.

Die folgende Prinzipskizze zeigt den physikalischen Verbund der Einzelglieder des Elementes bei äußerer Belastung im evakuierten Zustand:



Bild 65 Prinzipskizze zum physikalischen Verbund durch äußere Belastungen im evakuierten Zustand [28]

Die Evakuierung des Elementes führt zu einer beachtlichen Eigensteifigkeit des gesamten Systems und unterstützt somit den Lastabtrag. Von besonderer Bedeutung für den Lastabtrag ist auch die Verschweißung mit der Randmembran, insbesondere wenn es zu einer Belüftung kommen sollte.

In der folgenden Abbildung wird das entsprechende Tragverhalten für den belüfteten und evakuierten Zustand veranschaulicht.



Bild 66 Tragverhalten der VIS - Elemente bei Biegebeanspruchungen im belüfteten [oben] und evakuierten [unten] Zustand [28]



Das belüftete VIS-Element neigt bereits unter seinem Eigengewicht zu erheblichen Verformungen, während eine Verformung bei einem evakuierten Element unter gemeinsamer Belastung durch Eigengewicht und Verkehrslast deutlich geringer ausfällt. Zusammenfassend bedeutet dies, dass die durch die Evakuierung erzeugte Eigensteifigkeit das Tragverhalten der Elemente deutlich verbessert.

7.2.2.7. VIS - Dauerhaftigkeit

Die Dauerhaftigkeit gehört neben den physikalischen Eigenschaften zu einem entscheidenden Einsatzkriterium für ein Dämmmaterial.

Sie ist abhängig von der Permeationseigenschaft des Hüllmaterials. Dieser ist wiederum abhängig von Alterungseffekten und der Resistenz der Vakuumelemente gegenüber mechanischer Belastung.

Während VIP-Elemente sehr anfällig für derartige Effekte sind, besitzt die Edelstahlhülle der VIS-Elemente einen sehr hohen Permeationswiderstand, resultierend aus dem gleichmäßig dichten Aufbau des Hüllmaterials.

Infolgedessen haben die Edelstahlelemente recht hohe Lebenserwartungen. Diese lassen sich rechnerisch experimentell ermitteln. Dafür muss zunächst ein zulässiger Grenzwert für die Wärmeleitfähigkeit I grenz festgelegt werden, über den aus der folgenden Grafik ein zulässiger Druckanstieg abhängig von dem Stützkernmaterial ermittelt werden kann. Über diesen Wert lässt sich dann die Lebensdauer t_{grenz} des VIS-Elementes ermitteln.

Die Lebenserwartung eines Vakuumelementes variiert in Abhängigkeit von Stützkernmaterial, Abmessung, Leckagegrad und zulässigem Druckanstieg. Die Haltbarkeit von VIS-Elementen kann mehr als hundert Jahre erreichen.

Die Dichtigkeit der Edelstahl-Elemente wird bei Qualitätskontrollen im Werk bestimmt. Trotzdem sollte bei Konstruktionsentwürfen immer auf die Möglichkeit eines Austausches beschädigter bzw. belüfteter Elemente Wert gelegt werden.



Bild 67 Prinzipskizze des Versuchsaufbaus zur quantitativen Bestimmung der Dichtheit eines VIS – Elements [28] ("Integrales Vakuumverfahren" mit Helium als Prüfgas nach DIN EN 1779)

Evakuierungsflansch und zugehörige Verschlussplatte werden vor dem Einbau in die Elementhülle in einer separaten Heliumlecktesteinrichtung geprüft, weil sie bei dem integralen Vakuumverfahren versuchsbedingt nicht berücksichtigt werden können. Die Dichtheit der Verschlussplatte im Evakuierungsflansch wird durch einen vakuumtauglichen Viton-Dichtring erreicht.

7.2.3. CALOSTAT als Hochleistungswärmedämmplatte

CALOSTAT [97] ist eine speziell für den Bausektor entwickelte diffusionsoffene, nichtbrennbare und selbsttragende Wärmedämmplatte.

Das rein mineralische Rohmaterial Siliciumdioxid ist ein idealer Indikator für hervorragende Produkteigenschaften, dem auch bauphysikalisch gute Noten verliehen werden: CALOSTAT® ist der Baustoffklasse A (nicht brennbar) zuzuordnen. Bemerkenswert sind die Rohdichte (165 kg/m³) und die sehr niedrige Wärmeleitfähigkeit I = 0,019 W/(m K). Die Wärmeleitstufe (WLS) wird mit 021 angegeben. Der hydrophobe Dämmstoff zeichnet sich darüber hinaus durch folgende Druckfestigkeit von > 90 kPa aus (Tabelle 30). Das Leichtbauelement beinhaltet weder Fungizide, Algizide oder Pestizide. Es verhält sich reaktionsneutral zu anderen Verbundwerkstoffen, ist resistent gegen Umwelteinflüsse wie Schimmelbildung sowie fogging-frei und im Unterschied zu den meisten marktgängigen fossilen Dämmmaterialien recyclingfähig. [89]

Einneit	Richtwerte
	grau
kg/m³	165
W/(m K)	0,019
	021
	6
kg/m²	≤0,1
Masse %	≤ 1,0
%	≤ 1/1/2
kPa	> 90
%	≤ 10
	kg/m ³ W/(m K) kg/m ² Masse % % kPa %

Tabelle 30	Physikalisch-chemisc	he Daten [89]
	าารุรเห็นแรงกะงางการงา	

CALOSTAT ermöglicht eine besonders schlanke Fassadenbauweise. So können also Fassaden problemlos unter Einhaltung der Grundstücksbegrenzung saniert werden. Relevante Fassadentypen sind hier z.B. Elementfassaden, vorgehängte (hinterlüftete) Fassaden oder Betonsandwichelemente. Im Falle eines Neubaus bewähren sich die effektive Dämmung mit CALOSTAT und der daraus folgende schlanke Fassadenquerschnitt ebenso. [97]

Bei überwiegend reinen Glasfassaden bietet sich die Dämmung mit CALOSTAT besonders im Bereich der Geschossdecken und Technikräume an, also überall dort, wo im Verhältnis zu Glasfassade ein gleichermaßen schlanker Aufbau, dieser allerdings als Sichtschutz erwünscht ist. [97]

Mit der Wärmeleitfähigkeit von nur I = 0,019 W/(m K) – gem. abZ WLS 021 – kann im Vergleich zu konventionellen mineralischen Dämmstoffen bis zu 50 % an Dämmstärke eingespart werden. Das wiederum erhöht die Gestaltungsmöglichkeiten der Planer und Architekten. [97]



Weitere Vorteile sind, dass im Fassadenbau geringere Wandaufbauten geringere statische Lasten und geringeren Konstruktionsaufbau bedeuten und sich im Fertigteilbau die Transportkapazitäten durch die dünneren Wandaufbauten erhöhen. [97]

7.2.4. Anwendungsschwierigkeiten

Da als neues Produkt und neue Wärmedämmmethode die Benutzung der Vakuum- und CALOSTAT-Paneelen noch nicht weit verbreitet ist, ist die Anwendung ein Diskussionspunkt in dieser Forschungsarbeit mit dem Ziel, eine bessere Nutzung und Anwendung für ein innovatives Dämmsystem zu erarbeiten.

7.2.4.1. Anwendungsschwierigkeiten bei der Nutzung von Vakuum-Paneelen

Vakuum-Paneele können weder auf der Baustelle geschnitten werden, noch gebohrt werden, um ein Ankersystem zu fixieren. Die Platten werden in der Regel nach bestimmten Maßen vorbereitet, die vom Architekten vorgegeben und auf Anfrage auf die Baustelle geliefert werden. Der VIP-Paneelenkern kann leicht beschädigt werden, daher sollte der Paneelenkern extra geschützt werden an den Seiten durch einen PU-Rahmen und auf der Vorder- und Rückseite mit verschieden harten unzerbrechlichen Platten aus PVC, Holz, Plastik, Schaum oder glasfaserverstärkten Polymeren. Die Anwendung reduziert einerseits die Dämmeffizienz, garantiert aber andererseits eine verbesserte Handhabung durch sichere Penetrationszonen am Paneelenseitenfalz des Seitenschutzes. Diese Dämmpaneelen werden von verschiedenen Firmen produziert, z. B. VARIOTEC, Porextherm ... etc.

Um eine Luftdichtheit zwischen den Dämmpaneelen und der Innenwandschale zu erreichen, werden die Paneele derzeit mit speziellem Mörtel auf die zu dämmende Wand geklebt. Die Anwendung ist sehr kompliziert, wenn Paneele mit bestimmten Maßen zwischen dem vorinstallierten Anker und der Konsole befestigt werden müssen. Durch diese Nutzung wird eine Lufttrennung zwischen den Paneelen erzeugt. Dies wiederum führt zu einer Reduzierung des Wärmeverlustes.

Die vorher beschriebenen Probleme bei der Anwendung lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- 1- VIP-Paneele können nicht auf der Baustelle nach Maß geschnitten werden.
- 2- VIP-Paneele können nicht gebohrt werden, um einen Anker daran zu befestigen, um dem Außenmauerwerk Halt zu geben.
- 3- Befestigte VIP-Paneele sind durch die Fixierungstechnik mit Kleber nicht wiederverwendbar und schwer trennbar.
- 4- Wärmeverlust zwischen den Paneel-Fugen unter Berücksichtigung von vorinstallierten Ankern und Konsolen

7.2.4.2. Anwendungsschwierigkeiten bei der Anwendung von CALOSTAT

CALOSTAT besteht hauptsächlich aus Siliciumdioxid-Pulver [89], daher ist es sehr weich, wenn es in flacher Paneelenform für die Wärmedämmung an Fassaden eingesetzt wird. Diese Eigenschaft ist für eine Anwendung auf der Baustelle schwierig, wenn ein Schneiden oder Bohren erforderlich ist oder ein unbeabsichtigter Schlag während der Installation auf die Paneele erfolgt.

Aufgrund der chemischen Eigenschaften besitzt CALOSTAT als Rohmaterial einen sehr niedrigen Wasseraufnahme-Koeffizient (Wasseraufnahme) _ 0,1 kg/m² (Tabelle 30) [89]. Dadurch ist das Befestigen durch Kleben unmöglich, wenn nichtbrennbarer wasserbasierter Kleber ohne spezielle Behandlung benutzt wird.

CALOSTAT-Paneele haben einen niedrigen Diffusionswiderstand (μ = 6), der erlaubt der Baukonstruktion zu atmen. Dafür ist es notwendig, eine mögliche Wasserkondensation an kalten Gegenständen in der gemauerten Wand an bestimmten Stellen zu berücksichtigen, wenn eine hinreichende Belüftung nicht gegeben ist - vor allem auf die Innenseite der Außenmauerwerksschale bei der Anwendung von Baustoffen mit hohem Diffusionswiderstand wie z. B. Ziegelsteine. Außerdem hat CALOSTAT sehr gute Eigenschaften, um Brandschutzklasse A1 zu leisten und es kann für den Brandschutz eingesetzt werden.

Die vorher beschriebenen Probleme bei der Anwendung lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- 1- CALOSTAT-Paneele sind leicht zerbrechlich an den Seiten und sie können nicht ohne einen speziellen Schutz verarbeitet werden.
- 2- Eine Fixierung durch Kleben an der Fassade ist mit der Verwendung von wasserbasiertem Mörtel ist nicht möglich.
- 3- Spezielle Planungen bei möglicher Wasserkondensation zwischen den Mauerwerksschalen, Belüftung bei der Anwendung von CALOSTAT-Paneelen bei mehrschaligem Mauerwerk, um die Bildung von Kondenswasser zu vermeiden

7.3. Lösungskonzept

Die Forschung belegt, dass das innovative Wärmedämmsystem, das aus Dämmpaneelen mit geringerer Wärmeleitfähigkeit besteht, durch Anwendung der Vakuumtechnik die Stärke der Dämmung in der Wand um das 5-fache verringert werden kann. Um die Flexibilität zu gewährleisten und Schwierigkeiten, die bei der Anwendung entstehen, zu lösen, sollte ein modulares System mit einer bestimmten Modulgröße benutzt werden. Dadurch sollte auch das Problem des nicht möglichen Zuschnittes und des Handlings auf der Baustelle gelöst werden. Die Dämmplatten müssen als modulares System unter Berücksichtigung der besonderen Details in der PU-Rahmen-Zone der einzelnen Paneele für das Verankerungssystem produziert werden.

Zum besseren Schutz werden die Dämmpaneele in zweischaligem Mauerwerk als mittlere Dämmschicht fixiert. Dies bietet zusätzlichen Schutz für die Paneele durch die KS-Schale und die innere Ziegelsteinschale.

Das benutzte Ankersystem bietet eine thermische Trennung durch die Verwendung der eingearbeiteten mittleren Teile aus Polyamiden mit geringer Wärmeleitfähigkeit.

Die Lösung für den speziellen Einsatz bieten brandsichere Dämmpaneele aus CALOSTAT, die als Brandriegel an den notwendigen Stellen im Bauwerk eingesetzt werden.

Die wichtigsten Aspekte bei der Forschung zu diesem Wärmedämmsystem lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Gewinnen von Gebäudefläche durch den Einsatz von VIP-Paneelen mit sehr geringer Wärmeleitfähigkeit
- Bessere Tageslichtausbeute in dem Gebäude durch dünnere Wände



- Bereitstellung eines speziellen Schutzes für die Paneele durch die Befestigung der Dämmung zwischen 2 Mauerwerksschalen
- Lösungsmöglichkeit für eine flexible Installation, wenn die VIP-Paneele in einem modularen System eingebettet sind, welches im Entwurfsprozess für das gesamte Gebäude leicht verfolgt werden kann
- Reduzierung aller möglichen Wärmebrücken zwischen den 2 Dämmseiten durch die Verwendung eines speziellen Ankersystems, das eine thermische Trennung ermöglicht
- Erreichen der gestellten Brandschutzanforderungen und der thermischen Trennung durch spezielle Dämmpaneele aus CALOSTAT(Brandriegel)
- Erreichen einer höheren Effizienz und besserer Luftdichtigkeit um mögliches Kondenswasser an einigen Teilen des Systems zu vermeiden
- Gewährleistung einer sicheren Lastenverteilung in der Tragkonstruktion
- Das gesamte System ist demontierbar und kann im Falle eines Defekts deinstalliert werden, um wiederverwendet oder recycelt zu werden, wenn sich die Nutzung oder die Funktion des Gebäudes ändert
- Erreichen eines 6,5 cm starken Dämmkerns inklusive des Dämmsystems, des Installationsbereiches f
 ür die Anker und Konsolen und den Feuerschutzrahmen (Brandriegel)
- Der gesamte U-Wert für die Wand sollte nicht mehr als 0,2 W/m² betragen
- Die Ankeranzahl wird sich im Bereich von 4 -5 [Anker/m²] bewegen, unabhängig davon, wie kompliziert die Wandform ist.

7.4. Befestigung des Dämmsystems

Das Verankerungssystem besteht aus einem speziellen Anker, einer Konsole, VI-Paneelen und den zur Installation benötigten Teilen. Das neue System basiert auf drei konzeptionellen Punkten.

Die erste Idee ist die Verhinderung des aus der Verwendung eines herkömmlichen Ankers entstehenden Wärmedurchgangs beim Einsatz des mittleren Materials im Bereich der Dämmung. Das zweite Konzept ist die Einführung von Gummiabdichtungsschnüren, die durch ihre Ausdehnung infolge des mechanischen Einschraubendrucks in bestimmter Richtung zur Luftdichtigkeit des Systems führen. Eine flexible Installation in vertikaler Richtung bildet das dritte Konzept. Zu diesem Zweck werden bewegliche verschiebbare Profile verwendet.

7.4.1. Anker

Der Anker besteht aus drei Teilen. Der erste Teil ist eine doppelseitige Duplexstahlschraube mit einem dazu geeigneten Dübel Diese sind an der Innenwandschale einzubringen Der zweite Bestandteil ist eine an die Schraube angepasste Kunststoffmutter aus glasfaserverstärktem Polyamid (PA6.6 GF 30), mit zwei Gummiringen an beiden Innen-und Außenseiten versehen, wie im Bild 68 gezeigt wird.





Bild 68 Ankerkonstruktion, Schnitt und 3D Ansicht

Die Polymermutter hat eine zur VIP-Dicke passenden Länge sowie ein diagonales Loch an der Außenseite. Dieses Loch dient zur Fixierung des dritten Ankerteiles, der aus zwei verschiebbaren Stahlflügeln besteht. Die getrennten Stahlflügel ermöglichen die notwendige Flexibilität zur Modifizierung der Befestigungsposition an der Vormauerschale nach oben und unten.

Im Detail betragen die Abmessungen der Doppelschraube (10 x 800, Æ 5 mm) (Bild 69-1). Die mittlere Mutter hat einen Durchmesser von 12 mm und einer Länge von 40 mm. Es wurden dafür zwei Materialien vorgeschlagen, Polyamid (PA6.6 GF30) oder Polyetheretherketon (PEEK GF30) zwecks der Verbesserung des Brandschutzverhaltens. Der Durchmesser der Außenmutterseite beträgt 16 mm und hat eine Länge von 16 mm. Das vorhandene Loch hat einen Durchmesser von 6 mm und ist bei der Installation immer diagonal vorzuhalten (Bild 69, 4,-5,-6).

Der unten angehängte L-förmige Stahlflügel besteht aus einem durchgebohrten Blech mit den Abmessungen 15 x 80 x 2 mm (Löcher Æ 8 mm) und einem Stahldraht Æ 6 mm in Längsrichtung (Bild 69-10).

Der obere U-förmige Flügel wird aus zwei Stahlblechen mit den Maßangaben 90x15x2 mm (Löcher Æ8 mm) geformt. Er enthält ein Loch Æ 6 mm zur Verbindung mit dem unteren Flügel (Bild 69-7).

Der Anker unterbindet den Wärmedurchgang durch die Einführung des mittleren Polyamid-Teiles (Bild 69) und verändert den Wärmeverlauf innerhalb der Stoßstelle an den VI-Paneelen so, dass eine Kondensation von Wasser auf dem Anker selbst ausgeschlossen ist (Bild 68). Die Luftdichtheit ist im inneren VIP-Level durch den Innengummiring, der sich infolge des mechanischen Schraubprozesses ausdehnt, gewährleistet. Der Außengummiring ist zwischen dem Polyamidteil und der Außenseite der VI-Paneele zusammengedrückt und sorgt deshalb für die Abdichtung am Außenlevel der Paneele



Bild 69 Detailliertes Modell für die Bestandteile des Ankers

7.4.2. Konsole

TECHNISCHE UNIVERSITÄT

DRESDEN

Die Konsole wird aus drei Bestandteilen gebildet. Das Innenteil ist ein aus Duplexstahl hergestellter Bolzenanker des Typs Fischer FAZ II M12 / 30 DIN A4 mit einer dazu geeigneten Mutterschraube. Das Außenteil besteht aus einem L-Profil aus Duplexstahl mit den Maßen 100 x 60 x 4 mm und ist mit Längslöchern an der kurzen Seite ausgestattet (Loch: 20 x 30 mm aller 500 mm). Dieses L-Profil ist mit dem mittleren Teil der Konsole anhand von Stahlschrauben und Muttern an den Längslöchern zu befestigen sowie mithilfe von Justierplatten auf die geeignete Position zu justieren. Die Justierplatten verfügen über diagonale Längslöcher (12 x 60 mm) mit einem Winkel von 20° (Bild 70).

Der mittlere Teil ist wie beim Anker aus glasfaserverstärktem Polyamid (PA6.6 GF30) oder Polyetheretherketon (PEEK GF30) für besseren Brandschutz und mit der Gesamtabmessungen 170 x 40 x 40 mm hergestellt. Das spezielle Design des mittleren Teils ermöglicht eine einfache Installation der zugehörigen Befestigungsteile. Die vertikale Standhaltung der Konsole wird durch eine Justierschraube gewährleistet.

Für eine einfachere Installation und wenn die Konsolen entlang der Stahlbetonplatten benötigt werden, könnten die Konsolen auf Metallbahnen oder auf Profilen mit speziellen Verbindungsteilen befestigt werden, wie im (Bild 71) ersichtlich.





Bild 70 Detailliertes Modell für die Bestandteile der Konsole (links), für eine Konsole mit Fixierung durch Bolzenanker (rechts)



Bild 71 Details einer Konsole mit während des Betonierens an der Seite der Betonplatten vorfixierter horizontaler Metallschiene

7.4.3. Paneele Bemaßung und Modul-System

Durch eine Modulbauweise werden die Baukosten im Konstruktionsprozess eines Gebäudes reduziert. Diese modulare Bauweise kann vor allem bei der Gestaltung von sich wiederholenden Elementen angewendet werden, wie z. B. bei Blöcken, Türstürzen, Fenstern, Türen, Fassadenelementen usw.

Dem gleichen Konzept folgend, kann ein modulares System für die sich wiederholende Installation von VI-Paneelen entwickelt werden, dass bei modern gestalteten Gebäuden eingesetzt werden kann. Außerdem wird es den Paneelen-Herstellern ermöglichen, den



Produktionsprozess zu automatisieren und bestimmte Paneelenformen wiederholt zu produzieren. Dadurch reduzieren sich die Herstellungskosten.

Das vorgeschlagene Modul hat die Abmessungen eines Vielfachen von 500 mm und es folgt dem Design und der Produktion der verwendeten Steine (KS) in der Ziegelindustrie (Bild 72 und Bild 73).

Als Basisgröße für VI-Paneele wurden eine Höhe von 500 mm und eine Breite von 500 mm mit einer Stärke von 43 bis 45 mm vorgeschlagen, je nach Schutzgrad der Schale.

Es sollten Paneele benutzt werden, die an den Ecken schmaler sind um eine ideale Verteilung der Konsolen und damit eine gute Tragfähigkeit zu erzielen. Daher sollten Paneele mit einer Breite von 250 mm an den Ecken angebracht werden. Zusätzlich zu diesen Paneelen sollte eine andere Breite bezogen auf die Stärke des ausgewählten KS benutzt werden, je nach Form des Gebäudes (Bild 72 und Bild 73).

Die Paneelen-Reihe, die über den Konsolen installiert wird, sollte ein bestimmtes Unterteil für eine leichtere Installation verwendet werden (Bild 77, Bild 78, Bild 82 und Bild 83. Unter Anwendung des beschriebenen Moduls wird das Dämmsystem aus 10 Hauptformen mit unterschiedlichen Dimensionen der Paneele und 6 optionalen dem Design folgenden Formen bestehen (Tabelle 31). Bei einer Stärke der Bauteile KS angegeben als (TKS) ergeben sich folgende Abmessungen für die Paneele (L_{VIP}, B_{VIP}, T_{VIP}) in mm:

Тур	L _{VIP} /mm	B _{VIP} /mm	T _{VIP} /mm	Notiz
Generell- Konsole	500	500	43	Konsoldetail
Hälfte- Konsole	500	250	43	Konsoldetail
Ecke- Konsole (F1)	500	T_{KS} + T_{VIP}	43	Konsoldetail
Ecke- Konsole (F2)	500	500-T _{KS} -T _{VIP}	43	Konsoldetail
Generell- Wand	500	500	45	
Hälfte-Wand	500	250	45	
Ecke- Wand (F1)	500	T _{KS} +T _{VIP}	45	
Ecke- Wand (F2)	500	500-T _{KS} -T _{VIP}	45	
Ende- Wand*	475	500	45	
Ende-Hälfte*	475	250	45	
Ende-Ecke (F1)*	475	$T_{KS} + T_{VIP}$	45	
Ende- Ecke (F2)*	475	500-T _{KS} -T _{VIP}	45	
Unter Fenster **	250	500	45	
Längswandpanelle***	1000	500		

Tabelle 31EmpfohleneFormenvonVI-Paneelen,dieverschiedeneDesign-Anforderungen bei der Verwendung von KS erfüllen.

* Im Falle der Installation einer Brandriegel-Paneele mit 125 mm Breite unterhalb der Konsole

** Fenster auf der Fensterebene, wenn die Fenster in die Fassade einbezogen werden *** optional zur Reduzierung der Anzahl der Paneele im Falle der Anwendung von Option 2

Um das System anwenden zu können, muss die Gebäudeplanung der Dimension der Wandbreite folgen, um sicherzustellen, dass eine ordnungsgemäße Installation der VIP-Paneele erfolgen kann.



- Mehrfaches von 500
- Mehrfaches von 500+ 250+T_{KS}
- + Mehrfaches von 500+ $2T_{KS}$
- Mehrfaches von 500-2T_{KS}
- Mehrfaches von 500+250-T_{KS}



Bild 72 Abbildung des Moduls im Falle der Ecken auf der Außenseite



Bild 73 Abbildung des Moduls im Falle der Ecken auf der Innenseite



7.4.4. Struktur der VIP Paneele

Die VIP Paneele der Firma VARIOTEC bestehen aus einem VIP Kern, der zwischen zwei Hart-PVC-Platten liegt und von einem PU-Streifen umrahmt und nach außen hin abgeschlossen wird. Die so entstehenden Platten mit einer Dicke von 4 cm können im Bereich des PU-Streifens an der Hintermauerung befestigt werden. Die VIP über der Konsole sind an den unteren, seitlichen Rändern ausgeklinkt, sodass dort der Anker für die Konsole Platz findet.



Bild 74 VIP-Paneel über der Konsole Bild 75 beim Einbau



PU-Streifen und Hart-PVC-Platte als Schutz für den Vakuum-Kern, Abkantung für den Ankerdurchstoßpunkt im Bereich des PU-Streifens



Bild 76 Montage der VIP-Elemente an einer trocken versetzten KS-Mauer



7.5. Verankerungssystem - Konzept 1



Bild 77 Detaillierte Abbildung einer VI-Paneele – Konzept 1



Bild 78 Installationsplan – Konzept 1



Das erste Konzept beruht auf einer Fixierung der Vakuum-Paneele an der inneren Mauerwerksschale mit einem Verbindungselement an den Ecken. Jede Paneele hat eine abgeschrägte Ecke im 45°-Winkel (Bild 77, Bild 78). Wenn die Paneele aneinandergefügt werden, bilden die abgeschrägten Ecken eine rechteckige Lücke, in die ein Verbindungselement passt. Dieses Verbindungselement hat ein Loch, in das der Anker genau passt. Die Paneele, die oberhalb der Konsolenreihe befestigt werden, erhalten ein besonderes Detail, das zu der Konsolenform passt (Bild 77, Bild 78, Bild 79 und Bild 80).







Bild 80 Konzept 1 – Detaillierte Abbildung des Verbindungselementes



Bild 81 1:1 Reales Modell zeigt die Details des Ankersystems



7.6. Verankerungssystem - Konzept 2



Bild 82 Detail VIP Option 2 Detaillierte Darstellung einer VIP – Konzept 2

Dieses Konzept sieht vor, die Paneele an einer Ecke mit einem vorgefertigten Loch herzustellen, in das der Anker passt, um ein Verbindungselement zu setzen. Wie beim Konzept 1, ergibt sich auch beim Konzept 2 eine spezielle Lücke in der VIP-Reihe für die Konsolen (Bild 82, Bild 83, während alle anderen verwendeten Paneele einem anderen Entwurfsprinzip folgen. Nach dem Konzept 2 sollte die äußere Schicht der VIP-Paneele einen Vorsprung von 1 cm auf der linken unteren Seite und eine Regression von 1 cm auf der oberen rechten Seite vorweisen. Der PU-Schutzrahmen sollte genügend Platz für das Durchdringen des Ankers am linken unteren Rand bieten. Daher sollte der PU-Rahmen, der den Vakuumkern ummantelt eine Breite von 2,5 cm an der linken unteren Seite besitzen. Im Gegensatz dazu sollte die rechte obere Rahmenbreite 5 mm betragen (Bild 82-Schnitt cc).

Die Stelle, an der der Anker in der Paneele befestigt ist, unterscheidet sich in Abhängigkeit von der Stelle, wo die Paneele angebracht sind (Bild 83). Daher sollte jedes VIP-Paneel verschiedene Löcher mit einem Durchmesser von 12 mm in der Höhe der Schutzschale besitzen. Dies bedeutet, dass die Löcher mit dem PU-Rahmen geschlossen werden, wenn die Paneele vom Anbieter geliefert werden. Die Installateure können leicht in das PU ein Loch bohren, abhängig vom Befestigungsort der Paneele (Bild 83).




Bild 83 Installationsplan – Konzept 2







7.7. Einbau

Dem Verlegeplan folgend, sollten die Konsolen als erstes in den Platten befestigt werden, wenn die Konsolen mit Bolzenankerbefestigung verwendet werden. Außerdem sollte die Stahlbetonplatte mit dem geeigneten Bohrer gebohrt werden (Bild 84-2). Nach dem Bohren und Säubern des Loches, sollte der Bolzenanker durch Einschlagen in dem Loch fixiert werden (Bild 84-1). Besondere Sorgfalt ist bei der vorgegebenen Länge des aus der Betonplatte ragenden Bolzens geboten. Im dargestellten Fall sollte der herausragende Bolzen eine Länge von 3 bis 3,5 cm für die optimale Konsoleninstallation aufweisen. Wenn der Bolzenanker fixiert wurde, kann das Polyamid-Teil der Konsole im rechten Winkel angebracht werden (Bild 84-3, 4).



1 - Bohren der Betonplatte



3 - Fixierung d. Polyamid-Teils der Konsole



5 - Befestigen der Eck-VIP-Paneele



2 - Fixierung des Bolzenankers in der Platte



4 - vertikale Ausrichtung



6 - Befestigen der VIP mit Standardmaß





7 - Blick auf die Konsolen über dem Sturz

Bild 85 Montageschritte der Konsole



8 - Fixierung der Stahlprofile



Bild 86 Fixierung der VI-Paneele mit Verbindungselementen – Konzept 1





1 - Bohren nach der Markierung des Bohrlochs



2 - Fixierung des 3 - B Metallteils des Ankers Verbin mit dem Akkuschrauber

3 - Befestigung der VIP ohne Verbindungselement

Bild 87 Fixierung der VI-Paneele - Konzept 2

7.8. Besondere Details des Vakuum-Systems

Die Forschung zu einem vollständigen Dämmsystem beinhaltet auch die Installation für Gebäude mit herkömmlichem zweischaligem Mauerwerk. Daher werden Lösungen für Gebäudeecken, Öffnungen, Decken, Fundament und Balkone in diesem Kapitel vorgestellt.

7.8.1. Eckenaufbau

Die Positionen und die Paneelenformen an den Ecken sind verbunden mit der Eckenausrichtung. Die beiden Hauptfälle 90- und 270-Grad-Ecken werden wie im Bild 88 ersichtlich gelöst.

Im Falle einer 90-Grad-Ecke sollte das erste Paneel eine Form der Breite $T_{KS} + T_{VIP}$ und auf der anderen Seite eine Breite von 250 mm (Bild 89, Bild 90) besitzen. Dabei sollte der kürzere Anker mit einer Länge von 5 cm an der Ecke angebracht werden, um sicherzustellen, dass keine Unterbrechung bei der Installation des Eckankers an der anderen Ecke erfolgt. Im Fall einer 270-Grad-Ecke sollte die Paneele eine Breite von 500-T_{KS}-T_{VIP} aufweisen (Bild 89-1-2, Bild 90).





Bild 88 Paneelenausrichtung an der inneren und äußeren Ecke





Bild 89 Äußere Ecke – kurzer Anker Bild 90 5 cm in der Wand befestigt

Nicht wie bei 90-Grad-Ecken, bei denen die Form und Position der Paneele eine größere Montageflexibilität von bis zu 4 cm erlauben, ist 270-Grad-Ecken der Einbau von weniger flexibel vor allem dann, wenn die Wand einige Millimeter oder Zentimeter kürzer oder länger ist. Um dieses Problem zu lösen, sollten die Eckpaneele mit einer Breite von 500-T_{KS}-T_{VIP}, ein Profil mit einem auswechselbaren PU-Seitenrand in verschiedenen Seiten besitzen. welcher außerdem an den Seiten geschnitten werden kann unter Berücksichtigung des benötigten Platzes (Bild 91).



Innere Ecke – normaler Anker 8 cm in der Wand befestigt



Eckpaneele auf einem demontierbaren PU-Seitenrand

7.8.2. Brandriegel

Das vorgeschlagene Dämmsystem ist ein geschlossenes System. Dies bedeutet, dass keine Hinterlüftung notwendig ist, wenn VIP-Dämmpaneele benutzt werden. Außerdem wird die Gefahr der Kaminwirkung im Brandfall reduziert, vor allem wenn der Raum zwischen den beiden Mauerschalen an den Öffnungen, wo das Feuer eindringen kann, mit nicht brennbarem Material ausgefüllt wird.

Wird ein Brandriegel im Dämmsystem installiert, erhöht dies den Brandwiderstand des gesamten Systems. Brandriegel sollen vor allem das Durchbrennen im Zwischenraum



zwischen Tragschale und Vormauerschale verhindern. Der Brandriegel sollte aus nichtbrennbarem Material sein und schottet im Brandfalle die einzelnen Brandbereiche ab.



Bild 92Position des Brandriegels in einer Bild 93Brandriegel: DämmpaneeleStandardwand und über der Öffnungmit höherem Brandschutz

Der vorgeschlagene Brandriegel besteht hauptsächlich aus einer CALOSTAT-Dämmplatte mit einer Höhe von 125 mm, einer Breite von 500 mm und einer Stärke von 50 mm. Der CALOSTAT-Brandriegel wird von einer glasfaserverstärkten, zementgebundenen Platte mit den gleichen Abmessungen und einer Stärke von 15 mm (Bild 93) ummantelt.



Bild 94 Die Installation eines Brandschutzriegels unter Konsolen

Die Brandschutz-Riegel können durch Schrauben am Sturz unter den Konsolen befestigt werden, um die Lücke zwischen der äußeren und unteren Mauerwerksschale komplett zu schließen (Bild 92, Bild 94). Für eine bessere Stabilität des CALOSTAT zu sorgen, ist es ebenfalls möglich, eine dünne Schicht Steinwolle auf die Platte zu kleben (Typ: Isover Akustic EP 3-Steinwolle-Dämmplatte). Die Materialien, die in der Brandschutzpaneele verwendet werden, besitzen alle die Zertifizierung der Brandklasse A1. Die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl (μ) für das CALOSTAT-Dämmmaterial beträgt μ =6 (Tabelle 30), was zu einer Wasserkondensation bei der Anwendung von CALOSTAT führt. In dem beschriebenen Fall und aufgrund der Struktur der Brandschutz-Dämmplatte wird die Kondensation des Wassers auf der Innenseite der Klinkerfassade stattfinden (Bild 95).







Geplante Wasserauslässe oberhalb und unterhalb des Brandriegels

Daher ist es notwendig, eine Öffnung für die Verdunstung des Wassers durch die Klinkerfassade oberhalb und unterhalb der Zone, wo der Brandriegel befestigt wurde, vorzusehen (Bild 96).

7.8.3. Dachanschluss, Fußboden und Terrassen

Dächer weisen unterschiedliche architektonische Formen auf. Wie die Wände sollten auch die Dächer gedämmt werden, um Energie zu sparen. Das dafür angewandte Dämmsystem wird in der Regel in Abhängigkeit von der Dachform und der Konstruktionsmethode ausgewählt.

• Geneigte Holzdächer

Wenn Gebäude geneigte Holzdächer aufweisen, bieten die Holzbalken-Struktur und deren Stärke den geeigneten Raum, um kostengünstig starke Platten wie Rockwool, XPS oder ESP zu installieren. In diesem Fall kann das herkömmliche Dämmsystem in das Vakuum-Dämmsystem integriert werden wie im Bild 97 dargestellt.



Bild 97 Detaillierte Darstellung der Bild 98 Seitenwand mit schrägem





Holzdach

Betondach

· Flachdächer

Bei Flachdächern spielt die Stärke der Dämmung eine entscheidende Rolle in Relation zur Effizienz. In diesem Fall ist die Nutzung von Sandwich- Vakuum Paneelen (VIS), die direkt auf den Betonboden unter die Abdeckung und die Estrichschicht gelegt werden können, zu empfehlen. Zur Reduzierung der Wärmebrücken an den Seitenwänden, sollten die VIS-Paneele unter den seitlichen KS-Steinen installiert werden um eine undurchlässige Verbindung mit den vertikal angebrachten Dämmpaneelen herzustellen (siehe Bild 98. Um die Last, die durch die KS-Attika an den Seitenwänden entsteht, zu reduzieren, besteht die Möglichkeit, lastabtragende Teile aus Material mit geringer Wärmeleitfähigkeit (40 x 40 x 170 mm Polyamid oder Kimmsteine) in Konsolenform in die Vakuumpaneele einzubauen (Bild 82 – Schnitt BB). Eine andere Lösungsmöglichkeit bietet die Verwendung von Kimmsteinen für die Seitenwände oder einiger Stücke der Kimmsteine, die in die Konsolenform der VIP-Paneele passen.

Wenn VIS-Paneele für flache Böden benutzt werden, müssen spezielle Details der Abflüsse beachtet werden (Bild 99, Bild 100).



7.8.4. Sockel

Das Fundament der Außenfassade wird im Normalfall zusammen mit dem Fundament des Gebäudes, durch welches die Last der tragenden Wände verteilt wird, hergestellt (vgl. Bild 4, b). Die Art der thermischen Trennung ist in der Regel an der Verbindungsfläche zwischen der Tragwand und der Betondecke oder dem Fundament durch die Verwendung von thermischen Kimmsteinen denkbar.

7.8.5. Balkonanschluss

Der effektivste Weg zur Reduzierung der Wärmedurchlässigkeit von bautechnischen Komponenten (Balkone, Brüstungen, Vordächer), die die Dämmschicht durchdringen, ist die äußere Struktur von der inneren Struktur thermisch zu trennen. Mit dem Ziel der Senkung des Wärmeverlustes an den Verbindungsstellen optimieren "Schöck Isokorb® Tragende Wärmedämmelemente" die Funktion und die Leistung eines jeden integralen Bestandteils an der Verbindungsstelle. Die vorrangige Zielsetzung für die Konstruktion und die Wahl der bei der thermischen Trennung richtigen Strategie ist die Einhaltung der Wärmeschutzanforderungen und die Gewährleistung der Kraftübertragung.



Das allgemeine Konzept ist, dass mehrere leitende Materialien wie Stahlbeton ($\lambda = 2.2$ W/(mK)) oder Baustahl ($\lambda = 50$ W/(mK)) an der Verbindung durch expandiertes Polystyrol (EPS, $\lambda = 0.031$ W/(mK)) ersetzt werden mit einer Mindestdicke von 80 mm, um eine effektive thermische Trennung zu erreichen. Das Dämmmaterial bildet den Hauptkörper und die Oberfläche der thermischen Trennung. Um die Kraftübertragung zwischen der äußeren (z. B. Balkone, Vordächer) und der inneren (z. B. Bodenplatte) Struktur herzustellen, werden Bewehrungsstäbe verwendet, um beide Seiten zu verbinden und die Kräfte sicher durch die Dämmschicht zu leiten. Diese durchqueren den Isolationskörper der thermischen Trennung und bestehen aus hochfestem Edelstahl ($\lambda = 15$ W/(mK)) anstatt aus üblichem Karbonstahl ($\lambda = 50$ W/(mK)). Dies reduziert nicht nur die Wärmeleitfähigkeit, sondern garantiert eine hohe Langlebigkeit durch seine inhärente Korrosionsbeständigkeit. Um die Lasten zu verteilen, können für die thermische Trennung auch spezielle Komprimierungsmodule aus hochfestem Beton ($\lambda = 0.8$ W/(mK)) verwendet werden, da diese eine bessere thermische Performance bieten im Vergleich zu Kompressionsstäben aus Karbonstahl oder auch Edelstahl.

Eine Studie zur thermischen Modellierung wurde von der Oxford Brookes University durchgeführt, um die Wirksamkeit von Schöck Isokorb ® zu erforschen. Die folgenden Abschnitte zeigen die Ergebnisse für unterschiedliche Anwendungen mit verschiedenen Lösungsmöglichkeiten.

7.8.5.1. Betonbalkone

Im Wohnungsbau sind freitragende Balkone aus Beton üblich. Schöck Isokorb ® Typ K bietet die Lösung um den äußeren Balkon von der inneren Platte thermisch zu separieren. Schöck Isokorb ® Typ K (Bild 101, Bild 106) bietet einen hohen Wärmedurchgangswiderstand durch die Verwendung von korrosionsfesten Stäben, die als Zug- und Schubbewehrung und durch hochfeste Betonhalterungen (HTE, hohe thermische Performance) als Komprimierungsmodule fungieren [123].



Bild 101 Schöck Isokorb ® Typ K für die Verbindung von Betonbalkonen mit der inneren Platte[123]



Die erwähnte Studie der Oxford Brookes University zur Erforschung der Effektivität des Schöck Isokorb [®] hatte zum Ziel, den Wärmeverlust, die minimale Oberflächentemperatur und den daraus resultierenden Temperaturfaktor (f_{Rsi}) beim Einsatz von Typ K-Einheiten zu bestimmen. Dabei sollte ein Betonbalkon mit der Bodenplatte verbunden werden (Bild 103) und die Messwerte mit denen ohne den Einsatz von Steckverbindern (durch die Wand hervorstehende Bodenplatte, Bild 102) verglichen werden. Die Berechnung der Werte erfolgte mittels der Finite-Differenzen-Analyse mit BISCO und TRISCO Software von Physibel (Bild 104,Bild 105) [123].





ne Bild 103 Schöck Isokorb®Typ K50 Verbindung [123]



Tabelle 32Ergebnisse der thermischen Modellierung [123]



	Temperature factor (based on wall surface)	Linear thermal transmission Ψ (W/mK)
Without Isokorb	0.72	0.94
With Isokorb Type K50	0.91	0.42

Die Tabelle 32 zeigt den Temperaturfaktor und die lineare Wärmetransmission für den Einbau eines Isokorbs Typ K50 Einheiten im Vergleich zu der äquivalenten Wärmetransmission für den Fall, dass kein Isokorb-Typ verwendet wurde. Die Ergebnisse zeigen, dass der Schöck Isokorb® Typ K50, mit $f_{Rsi} = 0,91$ (zweite Spalte in Tabelle 32) diese Werte übersteigt und die gestellten Anforderungen erfüllt. Ohne Verwendung der Schöck Isokorb® Typ K50-Einheiten wäre die Konstruktion für Wohnungen nicht geeignet. Bei der Verwendung von Isokorb-Materialien kann der Wärmeverlust um mehr als 40% gesenkt werden [123].



Bild 106 Eingebautes Schöck Isokorb®Type K zwischen dem Außenbalkon und der inneren Betondecke [123]

7.8.5.2. Schöck-Teile für Stahlbalkone

Ein häufiges Architekturdetail ist, einen Stahlbalkon mit der inneren Stahlbetondecke zu verbinden. Schöck Isokorb® Typ KS bietet eine Lösung, um den Außenbalkon thermisch von der inneren Decke zu trennen. Der Hauptteil der Schöck Isokorb® Typ KS besteht aus einer 80 mm starken EPS-Dämmung. Dies bietet eine hohe thermische Leistungsfähigkeit. Die statische Wirksamkeit wird durch nichtrostende Zug-, Scher- und Druckbewehrung erreicht [123].







Bild 107 Schöck Isokorb® Typ KS für Bild 108 Stahlbalkone.[123]

108 Anwendung von Schöck Isokorb® Typ KS bei Wohngebäuden [123]

Die Oxford Brookes University-Studie zur Beurteilung der Effektivität der Schöck Isokorb®-Lösung hatte zum Ziel, den Wärmeverlust, die minimale Oberflächentemperatur und damit den Temperaturfaktor (f_{Rsi}), der aus der Verwendung von Schöck Isokorb® Typ KS14-Einheiten zur Verbindung von Stützen eines Stahlbalkons mit der Betondeckenplatte resultiert, zu bestimmen [123].





Bild 109 Wandkonstruktion mit einer Bild 110 direkten Stahlbalkonverbindung [123]

Verwendung von Isokorb® Typ KS14 in der Konstruktion [123]





Tabelle 33Ergebnisse der thermischen Modellierung [123]

	Linear thermal transmission Ψ (W/mK)	Minimum Temperature factor f _{au}
Constuction without thermal break	0.98	0.68
With Isokorb® type KS14 H200	0.287	0.90

In der Tabelle 33 ist ersichtlich, dass KS14-Einheiten, mit fRsi = 0,90, den Wert des geforderten minimalen Temperaturfaktors von f_{Rsi} = 0,75. Die Konstruktion ohne thermische Trennung erfüllt nicht den Wert des Temperaturfaktors, der für Wohnungen erforderlich ist. Der Wärmeverlust wird durch den Einbau von Schöck Isokorb® Typ KS um fast 70% reduziert [123].



Bild 113 Schöck Isokorb[®] Typ KS integriert in die innere Platte mit nachträglicher Installation des Stahlbalkons [123]



7.8.5.3. Verwendung von Schöck - Teilen im Vakuum -Dämmsystem

Die Benutzung von Schöck-Materialien reduziert den Wärmeverlust zwischen 40 % im Betonteilen und 70 % in Stahlteilen. Der Verlust in Betonteilen ist viel größer, da die Dämmteile kontinuierlich an der Verbindungsebene zwischen dem Balkon und der Betonplatte befestigt sind. Während bei der Verwendung von Stahl nur einige Teile an bestimmten Stellen im Verbindungsbereich zwischen dem Balkon und der Platte fixiert werden. Dies bedeutet, dass die Wärmeübertragungsfläche bei einem Stahlbalkon viel kleiner ist als bei der Verwendung von Betonplatten.

Der größte Teil der Wärme geht verloren bei der Verwendung von Schöck-Teilen wie Zugund Scherstangen, da die anderen Teile aus Materialien mit geringer Wärmeleitfähigkeit hergestellt werden.

Schöck-Teile, die für die Verwendung bei Stahlbalkonen konstruiert wurden, sind besser geeignet, wenn das VIP-Dämmsystem zum Einsatz kommt. Aufgrund der punktförmigen, gleichmäßigen Verteilung entlang der Verbindungslinie zwischen der Platte und dem Balkon ist es möglich, ein modulares Bauteil des VIP-Systems zu integrieren, welches die gleiche Stärke aufweist. Dies kann zwischen den Schöck-Teilen befestigt werden, wenn ein Balkon gebaut wird (Bild 114 - Fassade). Schöck-Teile, die für den Bau von Metallbalkonen konstruiert wurden, besitzen den Vorteil, dass sie für das VIP-Dämmsystem gut geeignet sind.

Um die Wärmekapazität von Schöck-Teilen zu verbessern, ist es möglich, die Zug- und Schubstäbe durch glasfaserverstärkte Teile zu ersetzen (Bild 114). Diese Teile können nach dem Einbau der Schöck-Teile auf der einen Seite mit Epoxid-Mörtel und auf der anderen Seite mit Muttern fixiert werden (Bild 114, Schnitt aa, Schnitt bb).





Bild 114 Modifizierte Dämmelemente aus Glasfaser, anstelle von Metall



Bild 115 Glasfaserverstärkte Anker und Riegel mit Muttern und Bohrköpfen von verschiedenen Herstellern (links: Anker von Schöck, mitte: Anker mit Mutter von Lee Composites, rechts: Glasfaseranker mit Bohrköpfen von Sinorock

Glasfaserverstärkte Bewehrungsstäbe haben eine sehr geringe Wärmeleitfähigkeit im Vergleich zu Stahlstäben. Dies reduziert den Wärmeverlust durch die Schöck-Teile auf der einen Seite und bietet auf der anderen Seite die Möglichkeit einer Demontage im Falle einer Änderung der Gebäudefunktion.

7.8.6. Fenster

Heutzutage gibt es verschiedene Fenster-Systeme, die für die Erreichung einer höheren Energieeinsparung eine thermische Trennung in ihren Profilen zwischen der Innen- und Außenseite berücksichtigen. In diesen Systemen wird in das Fensterprofil ein Verbindungsteil aus einem Material mit geringer Wärmeleitfähigkeit integriert, welches die Wärmebrücke unterbindet, die im Normalfall durch das komplette Metallprofil gebildet wird. Einige andere Fensterprofile werden komplett aus Materialien mit einer sehr geringen Wärmeleitfähigkeit, wie Polymere oder Glasfaser, hergestellt. Die Schutzanforderungen sind jedoch mit solchen Profilen noch schwerer zu erreichen.









Bild 116 Schüco Fenster System AWS 112 IC, mit einer Thermotrennung im Fensterprofil und den notwendigen Brandschutzeigenschaften. [124]. Unten: Detail mit Verwendung eines Fenstersystems, das eine thermische Trennung wie beim Schüco Fenster System AWS 112 IC umsetzt

Die neuen Fensterprofile der Firma Schüco berücksichtigen eine thermische Trennung im Fensterprofil und die geforderten Brandschutzeigenschaften. Die äußeren Teile des Profils sind mit den Innenraumteilen mit Polymerteilen verbunden (Bild 116).

Dieses System hat eine ausgezeichnete Energiesparfunktionen, Uf-Wert = $0.8 \text{ W/m}^2\text{K}$ bei 120 mm, Uw-Wert = $0.75 \text{ W/m}^2\text{K}$ für das gesamte Aluminium-Fenster, erreichbar mit 3-Fach-Verglasung Ug-Wert = $0.6 \text{ W/m}^2\text{K}$ und Kunststoff-Abstandshaltern [124].

Dieses System verfügt über eine isolierte Vorsatzschale mit einer wärmebrückenfreien Befestigung für eine optimierte Wärmedämmung und es ist für Aluminium-Fenster gemäß Passivhaus-Zertifizierungsstandards anwendbar [124].

Solche oder ähnliche Systeme können in das vorgestellte Vakuum-Dämmsystem integriert werden. In diesem Fall wird das Fenster auf der Ebene der Vakuum-Dämmschale befestigt und gleichzeitig die Lücken mit nicht brennbarem Material geschlossen. Über dem Fenster wird der Brandriegel befestigt, welcher das Auftreten des Kamineffekts verhindert. Bild 116 zeigt die Details des Fensters nach dem zuvor erwähnten System.

7.9. Systemanwendung in zweischaligem Mauerwerk

Mit den zuvor beschriebenen Details lassen sich sowohl VIP-Elemente als auch VIS-Elemente als Kerndämmung im zweischaligen Mauerwerk einsetzen. Beide Grundprinzipien haben ihre Eigenheiten, die es zu berücksichtigen gilt.

Hervorzuheben ist dabei der Fall der festen Vermörtelung der Vormauerschale, die eine Auswechselung im Falle einer ggf. notwendigen Erneuerung im Laufe der Lebensdauer der Rohkonstruktion ausschließt. Dgl. trifft für die VIS-Lösung im Hinblick auf die Erneuerung des Vakuums zu, wenn dies nicht von vornherein vorgesehen wird.

7.10. Systemanwendung für andere Fassadenlösungen

Moderne Gebäude können verschiedene architektonische Formen von Fassaden- und Putz-Systemen aufweisen. Das Dämmsystem sollte für differenzierte Fassaden und Putzsysteme eine Anwendungsmöglichkeit bieten.



7.10.1. Demontierbares Trockenbau-Ziegel-System



Bild 117 3D-Detaildarstellung eines Ankersystems für Vakuum-Paneele bei Verwendung des ClickBrick-Systems

Trockenmauerwerk bietet die Möglichkeit, die Wand oder die Vormauerschale komplett zurückzubauen. Das hat den Vorteil, dass man die Nachteile aus den unterschiedlichen Lebensdauern kompensieren kann. Das Verankerungssystem für die Vormauerschale, das in dieser Forschungsarbeit vorgeschlagen wird, kann auch mit Trockenbau-Ziegeln, wie z. B. mit dem ClickBrick-System von Daas verwendet werden (Abschnitt 2.2.4.4) [119]. Es sind lediglich geringfügige Änderungen an den Ankerköpfen und an den Metallprofilen der Konsolen notwendig, um beide Systeme passfähig zu machen. Die notwendigen Anpassungen sind in Bild 117 dargestellt.

7.10.2. Fassadenverkleidungsplatten

Leichte demontierbare Fassaden-Paneele werden heute in der modernen Architektur eingesetzt. Diese Fassadenplatten werden aus unterschiedlichen Materialien hergestellt, wie Glas, Metall, Polymeren und Keramik. Das vorgeschlagene Dämmsystem kann ebenfalls mit einem leichten flachen Fassadensystem angewendet werden. Dies bietet die Möglichkeit, Platz zu sparen im Zusammenhang mit der Reduzierung der Wandstärke.

Das System kann mit Keramikplatten installiert werden, wie z. B. mit dem Argeton-System, das von der Firma Wienerberger angeboten wird [98].

Um solche Systeme anzuwenden, müssen die vertikalen Metall-T-Profile an der Konsole und aller 500 mm an den Ankern befestigt werden. Dann kann das horizontale untere Metallprofil an dem vertikalen tragenden T-Profil im Abstand von 25 cm den Abmessungen und den Details der Keramikplatten entsprechend angebracht werden.



Bild 118 3D-Detaildarstellung eines Ankersystems für Vakuum-Paneele bei Verwendung des Fassadenplattensystems Wienerberger

8. Brandverhalten und Feuerwiderstand

8.1. Allgemeines

Die meisten der auf dem Markt existierenden Dämmsysteme sind brennbar. Daher ist es notwendig zu verhindern, dass die Materialien bei einem Brandfall dem direkten Feuer ausgesetzt werden.

Bei zweischaligem Mauerwerk mit Dämmschicht als mittlerem Kern zwischen den beiden nicht brennbaren Mauerwerksschalen ist ein Schutz vor direktem Feuer im Brandfall notwendig. Falls die Flammen z. B. durch eine Wandöffnung zwischen die beiden Mauerwerksschalen gelangen, ist es erforderlich, durch eine Trennung zwischen den Dämmpaneelen mit nicht brennbarem Material die Ausbreitung des Feuers im Dämmbereich zu verhindern. Dieses nicht brennbare Material stoppt den Kamineffekt beim Brand und verhindert so eine Brandausbreitung.

Ein anderes Problem ist die Temperaturerhöhung in der Wand im Falle, dass diese lange Zeit von einer oder von zwei Seiten dem Feuer ausgesetzt ist. In dieser Situation können sich die Eigenschaften des mittleren Dämmkerns ändern und die strukturelle und thermische Effizienz des Systems beeinflussen.

Das vorgestellte Dämmsystem besteht aus Vakuum-Paneelen der Brandklasse B1, einem Ankersystem aus nicht brennbarem Metall und aus einem Polymerteil, das ebenfalls der Brandklasse B1 zuzuordnen ist. Es besteht damit das Problem der Brandausbreitung in der Dämmebene. Die Brandschutzklasse B1 bezeichnet "schwer entflammbare" Baustoffe und Bauprodukte nach der in Deutschland geltenden Brandschutznorm DIN 4102-1 [46]. Die DIN 4102-1 definiert, dass der Brand nach dem Entfernen der Brandquelle bei Stoffen nach der Brandschutzklasse B1 von selbst erlischt. Europaweit gilt seit 2002 auch die EN 13501-1 [48], ein Klassifizierungssystem für die Beurteilung der Brennbarkeit von Baustoffen und Bauprodukten¹. Diese beiden Normen lassen sich nicht 1:1 miteinander vergleichen, da das europäische System erstmals auch Brandnebenerscheinungen, wie Rauchentwicklung und brennendes Tropfen, oder Abfallen definiert.

Das System darf eine Brandausbreitung, wenn es den direkten Flammen ausgesetzt wird, nicht zulassen. Um das Problem der möglichen Ausbreitung des Feuers durch den Kamineffekt zu lösen, werden Brandriegel aus nicht brennbarem Material in einer bestimmten Höhe vorgesehen. Dies wird realisiert durch die Verwendung nicht brennbarer stärkerer Dämmpaneele unter der Ebene der Konsolen aus CALOSTAT der Fa. EVONIK [50] mit einer Brandklasse A1.

Einige der tragenden Teile des Ankersystems werden aus PA6.6 GF30 hergestellt, so dass der mittlere Teil der Konsolen und der Anker die Eigenschaften ihres Materials ändern wenn eine Temperatur von 80°C erreicht wird. Daher ist es notwendig, sicherzustellen, dass die Temperatur im Brandfall nicht diesen Wert erreicht. Um eine bauaufsichtliche Zulassung bei einem möglichen Temperaturanstieg im Wandkern zu ermöglichen, sind numerisch verschiedene thermische und physikalische Analysen durchzuführen.

8.2. Numerische Analysen

Das Ziel dieser Analysen ist es, numerisch zu belegen, dass die Temperatur der Wand, die den Flammen direkt ausgesetzt wird, die Temperatur des Dämmkerns nicht auf einen Wert ansteigen lässt, bei dem sich die Eigenschaften der tragenden Teile des Systems ändern können.

8.2.1. Randbedingungen und Modellbeschreibung:

Für die Simulation des Modells wurde die Software HEAT2D angewendet. Das Modell beschreibt die äußere 115 mm Fassadenklinkerschale (Vollklinker NM/DM r = 2200 kg/m³, $\lambda = 1,2$ W/mK), die innere 175 mm KS-Schale DIN 106 NM/DM r = 1800 kg/m³, $\lambda = 0,99$ W/mK und den Kern aus 45 mm Vakuum-Isolationspaneelen (r = 205 kg/m³, $\lambda = 0,007$ W/mK) mit 20 mm konstantem Luftraum zwischen der äußeren Klinkerschale und dem Vakuumisolationskern. In diesem Modell folgt der Anker des mittleren Teils aus Polyamid den Abmessungen im Abschnitt 7.4.1. Die Simulation wurde für eine direkte Beflammung der Wand bei 1950°C für 90 Minuten von innen, von außen und von beiden Seiten durchgeführt.

¹ Zuordnung der bauaufsichtlichen Begriffe s. [47] und [49].



8.3. Ergebnisse

8.3.1. Brandbeanspruchung der Wand von innen

Das Bild 119 zeigt die Temperaturausbreitung bei einer Brandbeanspruchung der Wand mit einer Flamme (1950°C) von innen kontinuierlich über einen Zeitraum von 90 Minuten. Der Dübel wirkt als Dämmung für den Stahlanker von 90 bis 54°C. Die Temperatur der Polyamid-Mutter an der Verbindung mit dem Stahlanker beträgt am äußersten Rand 19°C und am inneren Rand 22°C.



8.3.2. Brandbeanspruchung der Wand von außen

Das Bild 120 zeigt die Temperaturausbreitung bei Brandbeanspruchung der Wand mit einer Flamme (1950°C) von außen kontinuierlich über einen Zeitraum von 90 Minuten

8.3.3. Fazit

Die Temperatur erreicht keinen kritischen Wert, bei dem sich die Eigenschaften der Polyamidteile ändern könnten.

9. Bewertung des Systems

Das dargestellte System wurde entwickelt, um einerseits eine optimale Nutzung der Eigenschaften der Vakuumdämmpaneele zu gewährleisten und andererseits Wärmebrücken zu reduzieren. Das System erreicht einen U-Wert für die Wand mit Vakuumpaneelen von 4 cm Stärke von 0,157 W/m²K (Bild 121).

Durch die thermische Trennung, die über das vorgeschlagene Verankerungssystem realisiert wird, werden die Wärmebrücken reduziert. Durch die numerische Modellierung der Wärmebrücken mit der 3D-HEAT-Software und die folgende Veränderung der Konstruktionsgeometrie war es möglich, den Wärmefluss durch den Anker und die Konsole zu optimieren. Der Wärmestrom durch die vorgeschlagenen Anker beträgt 0,37 W und durch die Konsole 0,84 W (Bild 122, Bild 123).



Zusammenhang Im mit der Wärmebrückenreduzierung, die durch die Polyamidabtrennung erreicht wird, erreicht man mit dem System eine Verringerung des Wärmeverlustes Wand. in der Die durchschnittliche Anzahl der Anker beträgt 4 pro m² in einer einfachen Fassade und kann sich bis zu 5 Ankern pro m² in einem komplizierten Fall einer Fassade erhöhen (Berechnung für ein Musterhaus). Die durchschnittliche Anzahl der Konsolen pro m² beträgt 0,1 (Berechnungen für ein Musterhaus) und kann 1,5 Konsolen pro m² erreichen, wenn die Konsolenreihe aller 3 m installiert wird.









Bild 122 *3D-Modell der Wärmeverteilung* Bild 123 bei Verwendung eines Ankers mit Trennteilen aus Polyamid

3D-Modell der Wärmeverteilung bei Verwendung eines klassischen Stahlankers

Unter Berücksichtigung einer maximalen Ankeranzahl von 5 Stück pro m² und der maximalen Anzahl der Verwendung der Konsolen alle 3 m wird der gesamte U-Wert der vakuumgedämmten Wand um 0,03 W/m²K steigen und einen Maximalwert von 0,20 W/m²K an der Außenwand erreichen. Dieser Wert ist viel geringer als der festgelegte Wert, der durch die Energieeinsparverordnung EnEV definiert wurde (0,28 W/m²K nach Tabelle 1, Zeile 1.1 nach Anlage 1 zur EnEV [58]).

Durch das gewählte System wird der Schalenabstand auf 60 bis 65 mm reduziert, wenn es notwendig ist, einen minimalen Wärmefluss von 0,2 W/m²K zu erreichen. Wenn ein höherer Wärmefluss von 0,24 W/m²K nach den Anforderungen der EnEV 2014/2016 zugelassen werden kann, ist es möglich, den Schalenabstand auf nur 45 mm zu verringern, indem dünnere Vakuumpaneele mit einer Stärke von 30 mm eingesetzt und das Verankerungssystem optimiert wird.

Aufgrund der minimalen Stärke des Dämmkerns erlaubt das System dünnere Wände bei zweischaligem Mauerwerk als nach der konventionellen Ausführung.



Wenn das System für zweischaliges Mauerwerk angewendet wird, bei dem die innere Mauerschale aus 175 mm KS-Stein und die äußere aus 115 mm Klinker besteht, wird die gesamte Stärke der Wand nur 350 mm erreichen. Dies bedeutet wiederum eine größere Nutzfläche auf der einen Seite und auf der anderen Seite ein Gewinn von Tageslicht bei kleineren Fenstern (Bild 124). Daraus resultiert dann eine Kostenersparnis aufgrund der eingesparten Bau- und Fensterfläche. Mit dem System ist es möglich, die erforderliche Tageslichtmenge und Belüftung mit kleineren Fenstern zu erreichen (siehe Kostenvergleich des Musterhauses).



Bild 124 Gewinn an Tageslicht durch die schmale Vakuumdämmung im Vergleich zu den dicker gedämmten Wänden

Die Kosten des Systems wurden mit Unternehmen, die Stahl-, Baustoff- und Vakuumdämmstoffe herstellen, kalkuliert. Alle ausgewiesenen Werte beziehen sich auf eine Serienproduktion mit einem gewissen Jahresdurchschnitt der Produktionsmenge. Die Kosten der Stahlteile des Ankers und der Konsolen wurden durch die Fa. Modersohn , die Kosten der glasfaserverstärkte Konsolen- und Ankerteile wurden durch die Fa. Fischer, die Kosten der Vakuumpaneele wurden durch die Fa. Variotec und die Kosten der Brandriegel durch die Fa. Evonik kalkuliert. Der errechnete Preis der verschiedenen Teile des Systems ist summiert in der folgenden Tabelle ersichtlich:

Tabelle 34	Kosten	der	Stahl-Windverankerung,	angenommene	Stückzahl	200.000
Stück/Jahr (ínach Mo	dersc	ohn)	-		

	Fertigunsart	Anzahl	EP	Gesamt
Edelstahlflügel B	Stanzautomat	1	1,70 €	1,70 €
Edelstahlflügel B	Stanzautomat	1	2,00 €	2,00 €
Stockschraube mit Dübel	Automatenfertigung	1	1,00 €	1,00 €
Summe				4,70€

Tabelle 35 Kosten der Konsole, angenommene Stückzahl 10.000 Stück/Jahr (nach Modersohn)



	Fertigunsart	Anzahl	EP	Gesamt
Grundkörber L 100x60x41000	Laser, Kanten, Schweißen	1	59,00€	59,00€
Einstellplatte	Laserzuschnitt	2	1,60 €	3,20 €
U-Scheibe 45x35x6, Rdl 13	Laserzuschnitt	2	0,90€	1,80 €
Sk-Schraube DIM 933 M10x40	Zukauf	2	0,20 €	0,40 €
Mu M10 DIN 934	Zukauf	2	0,10€	0,20 €
Dübel FAZ II M12x30	Zukauf	2	2,80 €	5,60€
Summe				70,20 €

Tabelle 36Kosten des Verankerungssystems

Teil		Stahl*	Polyamid**	Gesamt
Anker		4,70 €Stück	0,32	5,02 €Stück
Konsole		3,10 €Stück	2,70	5,80 €Stück
Konsole	mit	70,20 € m	5,40 € m ***	75,60 € m
Stahlschiene				

* Nach Modersohn, ** Nach Fischer, *** zwei Stück pro Meter.

Tabelle 37Kosten des Brandriegels (nach Evonic)

Anfrage 5.001-20.000 Stück Brandriegel		CALOSTAT	Preisindex	Preisindex
	Abmasse	DICKE	(netto) ab werk	(netto) per itm
Variante 1:	mm	mm	€ per Stück	€ per Ifm
Calostat zweilagig 30 mm, in ein mineralisches Vlies eingeklebt und auf				
Zementfaserplatte aufgeklebt	500 x 125	60	30,00	60,00
Variante: 2:				
Calostat einlagig 50 mm, in ein mineralisches Vlies eingeklebt und auf				
Faserzementplatte 15 mm aufgeklebt	500 x 125	50	28,00	56,00
Variante 3:				
Calostat einlagig 50 mm und auf einer Faserzementplatte 15mm				
aufgeklebt	500 x 125	50	24,00	48,00

 Tabelle 38
 Kosten der Vakuumpaneele nach dem vorgestellten System (nach Variotec)

VIP Format:	Preis Standardanker*	Preis Standardkonsole**
500*1000	68,00 €Stück	65,00 € Stück
500*500	46,10 €Stück	42,10 €Stück
500*250	34,50 € Stück	30,60 ∉ Stück
500*150-249	21,00 € Stück	18,70 ∉ Stück

* Aufbau der Elemente: 2 mm PVC Kömaprint - 1,5 mm GFK - 40 mm VIP-Kern - 1,5 mm GFK

** Aufbau der Elemente: 1,5 mm GFK - 40 mm VIP-Kern - 1,5 mm GFK

Folgendes Resümee kann daraus gezogen werden:

- Einsparung von Baufläche durch die Benutzung von Vakuumpaneelen, die eine Wärmeleitfähigkeit von 0,007 W/m²K besitzen
- Größere Tageslichtausbeute durch die Fenster aufgrund dünnerer Wände



- Das Vakuum benötigt einen besonderen Schutz, der dann die Dauerhaftigkeit gewährleistet.
- Lösung des Flexibilitätsproblems durch Einsatz von VIP in einem modularen, wiederholbaren System
- Reduzierung aller möglichen Wärmebrücken zwischen den beiden Oberflächen durch die Verwendung eines speziellen Ankersystems, das eine Wärmetrennung ermöglicht
- Gewährleistung der Brandschutzanforderungen durch die Einführung von Brandriegeln in das Dämmsystem, die auf der Basis von nichtbrennbaren Siliciumdioxid-Dämmstreifen hergestellt wurden
- Erreichen einer höheren Effizienz und Gewährleistung der Luftdichtheit ohne Kleben, nur über eine Dichtungsschnur auf den Paneelen.
- Gewährleistung einer sicheren Lastverteilung von der Fassade zu den tragenden Gebäudeteilen mit einer minimalen Anzahl der Anker
- Die Ankeranzahl übersteigt nicht die Vorgabe von 4 pro m², unabhängig davon, wie kompliziert die Wandform gestaltet ist
- Das Dämmsystem ist demontierbar und kann bei defekten Paneelen deinstalliert bzw. wiederverwendet oder recycelt werden, wenn sich die Nutzung oder die Funktion des Gebäudes ändert
- Reduzierung des Schalenabstandes inklusive der Dämmplatten, Anker, Konsolen und dem Brandriegel von 6,5 cm im Vergleich zu heute üblichen 15 bis 20 cm
- Gesamter U-Wert der Wände überschreitet nicht 0,2 W/m²K

9.1. Vergleich zu anderen Dämmungssystemen

Im Vergleich mit anderen Dämmsystemen erreicht das vorgeschlagene Dämmsystem sehr gute Eigenschaften in verschiedenen Bereichen.

9.1.1. Thermischer Vergleich mit einem Stahlanker-System

Vergleich der Verankerung des vorgeschlagenen Systems mit einem herkömmlichen Stahlanker-System.



Vergleich 2D:



Bild 125 Vergleich der thermischen Verteilung bei Verwendung eines Verankerungssystems mit Polyamidteilen für die Trennung und einem klassischen Verankerungssystem aus Stahl

Vergleich 3D:

Anker: Der Wärmefluss durch den vorgeschlagenen Anker beträgt 0,37 W im Vergleich mit einem Stahlanker, der 0,53 W aufweist.

Konsole: Der Wärmefluss durch die vorgeschlagene Konsole ergibt 0,84 W im Vergleich zu einer Stahlkonsole 1,24 W





3D Konsole:



Bild 128 3D-Modell der Wärmeverteilung Bild 129 bei Verwendung einer Konsole mit Trennteilen aus Polyamid



9.1.2. Thermischer Vergleich mit anderen Dämmsystemen

Dieser Vergleich basiert auf Abschnitt (7.1.1) mit dem Ziel für den U-Wert =0,24 W/m²K. Das Modell beschreibt die äußere 115 mm Klinkerschale (Vollklinker NM/DM r = 2200 kg/m³, λ =1,2 W/mK), die innere 175 mm Kalksandsteinschale DIN 106 NM/DM r = 1800 kg/m³, λ =0,99 W/mK. Der Dämmkern ist unterschiedlich je nach der Art der installierten Dämmplatten. Außerdem differiert der Luftzwischenraum je nach der Anforderung der verwendeten Dämmplatten (Bild 131, Bild 130)

Tabelle 39	Vergleich	zwischen	dem	vorgeschlagenen	System	und	den	weiteren
Dämmsyste	emen							

Material	WD mm	WSch W/m²K	Feuchteschutz		Hitzeschutz			
			Tauwass	HL.	Luft.	TAD	Ph.Versch.	WK- innen
			er		mm		h	kJ/m²K
Steinwolle	470	0,241	Ja	Ja	50	99	10,3	295
XPS	475	0,239	Ja	Ja	50	96	9,3	293
EPS	460	0,239	Ja	Ja	50	94	8,7	291
PU	410	0,230	Ja	Ja	50	99	9,0	293
CALOSTAT	390	0,243	Ja	Ja	50	93	8,2	290
Vacuum	320	0,211	Nein	Nein	0	>100	nicht relevant	302
System	350	0,157	Nein	Nein	20	>100	nicht relevant	307
System	335	0,204	Nein	Nein	15	>100	nicht relevant	302
improved								

WD. Wanddicke, WSch. Wärmeschutz, HL. Hinterlüftung, TAD.: Temperaturamplitudendämpfung, Ph.Versch. Phasenverschiebung, WK. Wärmekapazität





Bild 130 Thermischer und geometrischer Vergleich des vorgeschlagenen Systems mit anderen Dämmsystemen zur Erreichung des gleichen U-Wertes 0,24 W/m²K



Vorgeschlagenes System erreicht einen U- Verbessertes Wert = $0,157 \text{ W/m}^2\text{K}$, Wandstärke=350 mm = $0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$

Verbessertes System, erreicht U-Wert = 0,24 W/m²K, Wandstärke = 335 mm

Bild 131 Thermische Analyse bei Verwendung des Systems auf der linken und des verbesserten Systems auf der rechten Seite zur Erreichung des U-Wertes 0,24 W/m²K

9.1.3. Vergleich der Wandstärken

Das System erreicht einen U-Wert von 0,157 W/m²K mit einem 65 mm starken Dämmkern unter Berücksichtigung des Zwischenraums für die Verankerung und die Brandriegel-Paneele. Zum Erreichen des gleichen U-Wertes mit anderen Dämmmaterialien ist es notwendig, stärkere Dämmplatten zu benutzen (Tabelle 39, Tabelle 40)

Tabelle 40	Die benötigte Stärke der verschiedenen Dämmsysteme zum Erreichen von
0,158 W/(m	K) im Vergleich mit der Stärke des Vakuum Systems.

Material	Wärme- leitfähig-	Verwendete Dämmstärke	Benötigte Hinter-	Gesamt stärke	Vergleich der Wandstärke
	keit	zum Erreichen	lüftuna	Dämm-	zu 65 mm
	λ (W/mK)	0.158 W/(m^2K)	lantang	system	System
Hartschaum, XPS	0.04	230 mm	30 mm	260 mm	4
Swisspor XPS 300 GE	0.035	200 mm	30 mm	230 mm	3,5
Jackodur Plus 300 Standard	0.028	160 mm	30 mm	190 mm	2,9
swisspor Lambda W-25 (at)	0.031	180 mm	30 mm	210 mm	3,2
Hartschaum, EPS 035	0.035	200 mm	30 mm	230 mm	3,5
Neopor WLG032	0.032	180 mm	30 mm	210 mm	3,2
PU Hohlwand-	0.027	160 mm	30 mm	190 mm	2,9
schaum PURWAplus					
Swisspor PUR Premium	0.021	120 mm	30 mm	150 mm	2,3
Braas Clima Comfort	0.021	120 mm	30 mm	150 mm	2,3
Mineraldämm- platte	0.045	260 mm	30 mm	290 mm	4,5
Mineralwoll- dämmplatte- weber.therm MW 035 Fassade	0.035	200 mm	30 mm	230 mm	3,5
Steinwolle	0.04	230 mm	40 mm	270 mm	4.2
Glaswolle	0.04	230 mm	30 mm	260 mm	4
Schaumglas	0.04	230 mm	30 mm	260 mm	4
Glaswolle Isover 035	0.035	200 mm	30 mm	230 mm	3,5
Styropor	0.04	230 mm	30 mm	260 mm	4
Vakuumpaneele	0.007	45 mm	20 mm	60 mm	1



9.1.3.1. Vergleich in Bezug auf den Verlust der Nutzfläche des Gebäudes

Die höheren Stärken der Dämmplatten sind notwendig, um den festgelegten U-Wert zu erreichen, verursachen jedoch einen Verlust der Nutzfläche des Gebäudes. Der Verlust der Nutzfläche in einem Musterhaus mit den Abmessungen L = 590 cm, B = 890 cm wurde kalkuliert durch die Aufstellung eines realistischen Vergleichs, der den Verlust der Nutzfläche zeigt, bei der Verwendung der verschiedenen Dämmsysteme. Die Ergebnisse des Vergleichs sind in der folgenden Tabelle ersichtlich. Basierend auf diesem Vergleich ist es möglich, die Erhöhung der Nutzfläche des Musterhauses je nach verwendetem System zu summieren: 9,9 % im Vergleich zu XPS und Steinwolle, 8,46 % im Vergleich zu ESP und 4,53 % im Vergleich zum PU-System.



Bild 132 Verlust der Nutzfläche eines Hauses aufgrund der Wandstärke

Tabelle 41	Vergleich	des	Verlustes	der	Nutzfläche	bei	einem	Musterhaus	mit	einer
Länge von 5	,90 m und	einei	r Breite vo	n 8,9	10 m					

Land Meter Price	242,11 €	Building-L	Building-B	Area	Cost of Use	Gesamt Kost		Building
		L/m	8/m	A/m2	Meter	Baufleche		Factor 0,3
System Wall Thikness	0,35	5,90	8,90	52,51	807,03 €	42.377,32 €		u-wert 0,157
Material	Needed Wall Thickness/ mm for u= 0,157 Wim2K	Ln/m	Bn/m	A/m2	Lost Area m2	∆A to System	Gain A% if system aplication	Spar
Vacuum Panelle	350	5,20	8,20	42,64	9,87			
Hartschaum, XPS	550	4,80	7,80	37,44	15,07	5,20	9,90	4.196,57 €
Swisspor XPS 300 GE	520	4,86	7,86	38,20	14,31	4,44	8,46	3.583,55 €
Jackodur Plus 300 Standard	480	4,94	7,94	39,22	13,29	3,42	6,51	2.757,15 €
swisspor Lambda W-25 (at)	500	4,90	7,90	38,71	13,80	3,93	7,48	3.171,64 €
Hartschaum, EPS 035	520	4,85	7,85	38,20	14,31	4,44	8,45	3.583,55 €
Neopor WLG032	500	4,90	7,90	38,71	13,80	3,93	7,48	3.171,64 €
PUR Dämmplatten beids. Alu kaschier	440	5,02	8,02	40,26	12,25	2,38	4,53	1.920,42 €
Swisspor PUR Premium	440	5,02	8,02	40,25	12,25	2,38	4,53	1.920,42 €
Braas Clima Comfort	440	5,02	8,02	40,26	12,25	2,38	4,53	1.920,42 €
Mineraldämmplatte	580	4,74	7,74	36,69	15,82	5,95	11,34	4.803,79 €
Miniralwolldämmplatte- weber.t 035 Fassade	520	4,86	7,85	38,20	14,31	4,44	8,45	3.583,55 €
Steinwolle	550	4,80	7,80	37,44	15,07	5,20	9,90	4.195,57 €
Glasswolle	550	4,80	7,80	37,44	15,07	5,20	9,90	4.196,57 €
Schaumglas	550	4,80	7,80	37,44	15,07	5,20	9,90	4.196,57 €
Glaswolle Isover 035	520	4,86	7,85	38,20	14,31	4,44	8,46	3.583,55 €
Styropor	550	4,80	7,80	37,44	15,07	5,20	9,90	4.196,57 €

9.1.4. Vergleich in Bezug auf die Tageslichtausbeute und Fenstergröße

Die benötigte Größe für ein Fenster in einem Raum wird in der Regel basierend auf der Formel Fenstergröße = Zimmergröße/20 unter Berücksichtigung einer festen Wandstärke



berechnet. Wenn die Wände eine größere Stärke aufweisen, sollte die Fensterfläche vergrößert werden, um die gleiche Tageslichtausbeute und Belüftung zu erreichen. Zur Erstellung eines Vergleichs zwischen dem vorgeschlagenen System und anderen Dämmsystemen in Bezug auf die Tageslichtmenge und die Fenstergröße wurde die Änderung der Fenstergröße an verschiedenen Wänden mit dem Ziel gemessen, die gleiche Tageslichtmenge zu erreichen. Der Vergleich wurde mit einem Raum von 12 m² und mit einer Fenstergröße von 1 m² (1 x 1 m) mit den Dämmsystemen Steinwolle, XPS und PU gegenüber VIP durchgeführt.



Bild 133 Änderung der Fensterhöhe zur Erreichung der gleichen Tageslichtmenge bei einer Fenstergröße von 1 x 1 m



Bild 134 Änderung der Fensterbreite zur Erreichung der gleichen Tageslichtmenge bei einer Fenstergröße von 1 x 1 m



Basierend auf diesem Ergebnis ist es möglich, folgendes Resümee zu ziehen: Die Fensterfläche müsste bei einer Dämmung mit Steinwolle auf 178 %, bei einer Dämmung mit XPS auf 150 % und auf 165 % bei einer Dämmung mit PU vergrößert werden, um die gleiche Tageslichtmenge wie bei Verwendung der VIP-Dämmung zu erreichen.

 Tabelle 42
 Veränderung der Fenstergröße zur Erreichung der gleichen Tageslichtmenge

		Änderung				
	Änderung der	der				
	Fensterbreite	Fensterhöhe	Fenster-	Fenster-		
Dämm-stoff	[m]	[m]	höhe [m]	breite [m]	Fläche [m ²]	ΔA[%]
VIP	-	-	1	1	1	-
Steinwolle	0,65	0,2	1,2	2,32	2,784	178 %
XPS	0,57	0,17	1,17	2,14	2,5038	150 %
PU	0,26	0,09	1,09	1,52	1,6568	165 %

9.1.5. Kosten

Für die Erstellung eines realistischen Vergleichs des Systems mit anderen Dämmsystemen wurde das Musterhaus mit den folgenden Systemanforderungen entworfen (Bild 135). Die Kosten für die Dämmung dieses Hauses wurden kalkuliert unter Berücksichtigung der Nutzfläche und der Tageslichtmenge. Die Kosten der Dämmung wurden verglichen mit der Anwendung der verschiedenen Alternativen Steinwolle, XPS Swisspore and Swisspor PUR, um den gleichen U-Wert (0,157 W/m²K) wie bei dem Vakuumdämmsystem zu erreichen.



Bild 135 Entwurf des Musterhauses, 2 Etagen, bestehend aus: Eingang, Wohnzimmer, Küche, WC, Treppe, Schlafzimmer, Bad, Ankleidezimmer, Balkon und Terrasse, Bebaute Fläche = 52,51 m² = 8,9 m x 5,9 m, Höhe = 6,8 m

Um den Preis für die detaillierten Pläne mit den vier Fassadenseiten kalkulieren zu können, müssen die folgenden Systemanforderungen (Bild 136) berücksichtigt werden. Basierend auf den Plänen war es möglich, den Bereich mit Vakuumpaneelen zu kalkulieren sowie deren Größe und Menge. Auch die Ankeranzahl, die Konsolenlage und –anzahl und die Position der möglichen Brandriegel sowie der Standort und die Anzahl der Balkon-Dämmteile von Schöck konnten festgelegt werden.





Bild 136 Verlegepläne der VIP für die 4 Musterhausfassaden

Der Preis wurde von interessierten Herstellerfirmen kalkuliert und in der folgenden Tabelle 43 aufgelistet.

Tabelle 43Kosten der Teile der verschiedenen Dämmsysteme für die Kalkulation beim
Musterhaus wie vom Hersteller angegeben

Bauteil	Ahmessung	Preis	Firma	Notiz
	ADITICSSURY			
Vakuum Paneel-K^	500X500	37,7	Variotec	Halbautomatisierte
Vakuum Paneel-K	250X500	27,5	Variotec	Produktion
Vakuum Paneel-Pos. W	500X500	41,5	Variotec	
Vakuum Paneel-Pos. W	250X500	31,00	Variotec	
Vakuum Paneel-Pos. W	500X250	31,00	Variotec	
Vakuum Paneel-Pos. W	750X250	40,00	Variotec	
Anker		5,02	Modersohn-	Linienproduktion
			Fischer	
Konsole	gem.	72,9	Modersohn-	Linienproduktion
	Zeichnung		Fischer	-
Calostat-Brandriegel	gem.	24,00	Evonik	-
	Zeichnung			
Schöck-Balkonteil	Isokorb RKS	212,8	Schöck	Glasfaser
	14			unberücksichtigt

Vergleichswerte für andere Dämmsysteme vom Grundmaterial her zeigt Tabelle 44.



Tabelle 44	Kosten	der	verschiedenen	Dämmpaneele	in	m²	zu	Marktpreisen	vom
10.08.2015									

Material	Stärke/mm	Preis €/m ²	Quelle
Hartschaum, XPS	100	17,58 €	hornbach
Swisspor XPS 300 GE	100	21.25 €	hornbach
Jackodur Plus 300 Standard	100	15,68 €	bausep
swisspor Lambda W-25 (at)	180	41,83 €	bausep
Hartschaum, EPS 035	180	18,70 €	bausep
Neopor WLG032	180	15,80 €	bausep
PUR Dämmplatten beids. Alu kaschiert	120	22,50 €	hornbach
120 mm			
Braas Clima Comfort	100	35,35 €	Braas
Mineraldämmplatte	100	35,46 €	Bauesep
Mineralwolldämmplatte-weber.therm	180	33,81 €	Bauesep
MW 035 Fassade			
Steinwolle	120	5,95 €	Bauhaus
Glaswolle	180	10,40 €	Bauhaus
Glaswolle Isover 035	180	6,84 €	Bauhaus
Styropor	80	5,16 €	Obi

In der nachfolgenden Tabelle sind die Kosten für das VIP-Dämmsystem mit ihren Einzelanteilen dargestellt.

Tabelle 45 Kosten des vorgeschlagenen Dämmsystems bei Anwendung am Musterhaus

Position	Anker	VIP	Brandriegel	Schöck	Gesamt
Kosten/Haus	4.668,17€	27.256,80	408,00€	638,40€	32.971,37
		€			€
Kosten/m ² Fassadenfläche (162 m ²)	28,82€	168,25€	2,52 €	3,94 €	203,53€
Kosten/m ² ohne Balkonteile					199,59€
Kosten/m ² ohne Balkonteile und					197,07€
ohne Brandriegel					

Anschließend erfolgt die Aufstellung für die herangezogenen Vergleichssysteme.

Tabelle 46Kosten bei der Anwendung von Steinwolle als Dämmsystem amMusterhaus

Position	Brandriegel	Schöckteile	Anker	Konsole	Steinwolle	Gesamt
Gesamt	0,00 €	638,40€	396,90€	542,25€	963,90€	
Gesamt Haus						2.541,45€
Kosten/m ²						15,69€



Tahelle 47	Kosten hei der A	nwenduna von	XPS am	Musterhaus
	KUSIEN DEI UEI P	anvenuung von	лг эаш	IVIUSIEITIAUS

Position	Brandriegel	Schöckteile	Anker	Konsole	Steinwolle	Gesamt
Gesamt	59,92€	638,40€	396,90€	542,25€	3.442,50€	
						5.079,97
Gesamt Haus						€
Kosten/m ²						31,36€

Tabelle 48Kosten bei der Anwendung von PUR am Musterhaus

Position	Brandriegel	Schöckteile	Anker	Konsole	Steinwolle	Gesamt
Gesamt	59,92 €	638,40€	396,90€	542,25€	4.941,00€	
Gesamt Haus						6.578,47 €
Kosten/m ²						40,61€

Zusammenfassung unter Berücksichtigung dieser Berechnungen für das Dämmsystem:

- Gesamtkosten bei Verwendung des Vakuum-Dämmsystems 32.971,37 € Kosten pro m² 203,53 €(dieser Betrag beinhaltet den CALOSTAT Brandriegel und die Schöck-Balkon-Teile), ohne Brandriegel betragen die Kosten pro m² 199,59 €
- Gesamtkosten bei Verwendung des XPS Swisspore-Dämmsystems 5.080,00 €
 Kosten pro m² 31,36 €
- Gesamtkosten bei Verwendung von Steinwolle 2.541,50 € Kosten pro m² 15,69 €

Betrachtet man die Werte der Änderung der Nutzfläche und die Kosten des Landes pro m² in Städten wie Berlin (545 Euro/ m²) und einer Grundflächenzahl (GRZ, [153]) von 0,3² in diesem Bereich, so beträgt der Anteil des Baulandes am m²-Preis der Bruttogrundfläche 1.816,67 Euro.

Musterhaus Fläche [m ²]	52,51 m2
Grundstück Fläche [m ²]	175,03 m2
Grundstück Preis [€/m ²]	545,00€
Grundflächenzahl GFZ (Ausnutzungsfaktor des Baulandes)	0,30
Grundstück Preis [€]	95.393,17 €
Preis des ausgenutzten Meter ² [€/m ²] (Grundstückspreis umgelegt auf	
Nettogrundfläche Haus von 42,64 m²)	2237,18€

² Fiktiv angenommener Wert, um die Systematik zu demonstrieren.



Preis des ausgenutzten Meter ² [€/m ²] (Grundstückspreis umgelegt auf	
Nettonutzfläche (»BGF-KF ^{Aussenwand}) Haus 2 x 42,64 m ²)	1.118,59€
Fensterkosten [€/m ²]	295,00€

Auf eine weitere Detaillierung in Bezug auf Bruttofläche, Nutzfläche und Bruttogeschossfläche wird verzichtet.

Nachfolgend werden die Zusatzkosten ermittelt, die für die Vergrößerung der Fenster entstehen, um den gleichen Tageslichteinfall wie beim vorgeschlagenen System mit VIP zu erreichen.

Taballa EO	Errochnoto Zucatzkocton für die Verarößerung der E	onctor
	Enechnete zusätzkusten nur die vergruberung der ro	SUSIEI

Material	Brei- ten- ände- rung	Höhen ände- rung	Höhe	Breite	Fläche	ΔΑ%	Kosten	Gesamt- fläche	Fenster- kosten	Preis- änderung
VIP			1	1	1		295	12,62	3.724,38€	
SW	0.66	0,2	1,2	2,32	2,78	178%	821,28	35,15	28.866,35€	25.141,97€
XPS	0.57	0,17	1,17	2,14	2,50	150%	738,62	31,61	23.348,16€	19.623,79€
PUR	0.26	0,09	1,09	1,52	1,66	29%	488,76	20,92	10.223,36€	6.498,98€

Unter Einbeziehung dieser Größen verändert sich das Bild im Kostenvergleich entscheidend.

Tabelle 51Vergleich der Kosten des vorgeschlagenen Systems mit anderen Systemen

	Preis der Dämmung		Verlust				Musterhaus	
			an	Gew			tatsächliche	
	2		Nutz-	inn	Verlust	Extra	Kosten des	Ver-
	m²	Haus	fläche	VIP	Grund-stück	Kosten für	Dämm-	gleichs-
Material			m²	m ²	Preis/m ²	Fenster	systems	faktor
VIP	199,59€	32.971,37€	9,87				32.971,37€	
PUR	40,61€	6.578,47 €	12,25	2,38	5324,48€	6.498,98€	18.401,93€	0,56
XPS	31,36€	5.079,97 €	14,31	4,44	9933,06€	19.623,79€	34,636,82€	1,05
SW	15,69€	2.541,45€	15,07	5,20	11633,31 €	25.141,97€	39,316,73€	1,19

Um den U-Wert (0,157 W/m²K) mit dem Vakuum-Dämmsystem zu erreichen, ist ein Schalenabstand von 6,5 cm zwischen der inneren und der äußeren Mauerschale notwendig. Diese Stärke gilt als sehr gering im Vergleich mit anderen Dämmsystemen (Tabelle 40). Die Verwendung des Vakuum-Dämmsystems erhöht die nutzbare Fläche des Musterhauses um 13,9 % im Vergleich zur Verwendung von Steinwolle, um 11,6 % im Vergleich zur Verwendung von Steinwolle, zur UPR-Dämmplatten.


Unter Anrechnung aller Vorteile bleibt dennoch die Variante PUR wettbewerbsfähig, während die anderen beiden Dämmsystem SW und XPS etwa gleichauf liegen bzw. teurer sind. Die Differenz zwischen VIP und PUR beträgt 14.569,44 € Umgelegt auf die 162 m² Außenwandfläche muss die Herstellung der VIP um 89,93 €m² gesenkt werden auf 168,25 € minus 89,93 € gleich 78,32 € In Anbetracht der bisher durchgeführten Handfertigung erscheint die Zahl realistisch.

Betrachtung der Vorteile des Vakuum-Dämmsystems:

- Demontierbar, sortenreine Zerlegung möglich, recycelbare Teile
- Die Gebäude, die mit einem Vakuum-Dämmsystem gebaut werden, besitzen eine größere Tageslichtausbeute durch die geringere Wandstärke
- Bessere Ausnutzung der nach Baunutzungsverordnung [153] für das Baugebiet zulässigen Baufläche infolge geringerer Wandstärke

Schlussfolgerung

- Die PUR-Dämmung ist im Vergleich der exemplarisch betrachteten Dämmvarianten zweifelsohne die wettbewerbsfähigste und noch im Vorteil gegenüber der vorgeschlagenen VIP-Lösung.
- Die VIP- Dämmung ist im Hinblick auf die Ausnutzung des Baulandes und des Tageslichteinfalls die effektivste Variante.
- Um eine Breiteneinführung der VIP-Elemente zu erreichen, muß eine weitere Optimierung sowohl von der Materialseite als auch der Herstellung erfolgen. Eine Serienfertigung bietet dazu fertigungstechnisch ein entsprechendes Potential, das im Rahmen des Forschungsvorhabens noch nicht gefasst werden konnte.

9.2. Zusammenfassung in Hinsicht auf Entwurf und Bauphysik

Die Verwendung des vorgeschlagenen Systems reduziert den benötigten Schalenabstand, um die Dämmung zu installieren, erheblich. Es werden 65 mm einschließlich eines Luftzwischenraums von 25 mm (vgl. Bild 68) für einen einfachen Einbau der Dämmschicht zwischen Hintermauerung und Vorsatzschale des zweischaliges Mauerwerks benötigt. Im Vergleich zu anderen gegenwärtig angewandten Dämmsystemen reduziert das Vakuum-Dämmsystem den benötigten Schalenabstand etwa um 3 das Dreifache (Tabelle 4) auf 65 mm. Neben den dünneren Wänden hat das Gebäude, das mit den vorgeschlagenen Vakuum-Paneelen gebaut wird, eine größere Tageslichtausbeute auf der einen Seite und die eingesparte Wandstärke erhöht auf der anderen Seite die nutzbare Fläche des Gebäudes und die Ausnutzung der Grundstücksfläche.

Um einen realistischen Vergleich zwischen den Dämmsystemen ziehen zu können, wurde ein Musterhaus konstruiert (Bild 135). Die Nutzfläche des Musterhauses wurde unter Berücksichtigung der Verwendung der verschiedenen Dämmsysteme wie Steinwolle, XPS-, ESP- und PUR-Paneelen kalkuliert, unter der Voraussetzung, dass alle Varianten den gleichen U-Wert (0,157 W/m²K) erreichen. Dieser Wert wird durch das entwickelte VIP-System mit nur 65 mm Dämmstärke inklusive dem Luftzwischenraum von 25 mm realisiert.

Die Verwendung des vorgeschlagenen Vakuum-Dämmsystems erhöht den nutzbaren Raum des Musterhauses um 13,9 % im Vergleich zur Benutzung von Steinwolle, um 11,6 % im Vergleich zu Swisspor XPS 300 GE und um 5,9 % im Vergleich zu den PUR/PIR-Dämmplatten welche mit Aluminiumschutz an beiden Seiten angeboten werden.



Zusätzlich zu den bisher aufgezeigten Vorteilen ist das System demontierbar und beschädigte Teile können leicht ausgetauscht werden. Das setzt jedoch voraus, dass die Vormauerschale ebenfalls demontierbar ist, was beispielsweise die Cklick-Brick-Vormauerung gewährleistet. Ferner kann das vorgeschlagene System nach geringfügigen Änderungen an den Metallankerköpfen auf andere Fassadensysteme angewendet werden. Zum Beispiel kann es mit Keramikfassadenplatten (wie Wienerberger), Betonfassadenplatten oder mit Trockenbau-Ziegel-Systemen (wie das ClickBrick System) angewendet werden. In allen vorher genannten Systemen kann das entwickelte System komplett demontiert und wiederverwendet werden wenn sich die Funktion des Gebäudes oder die Gebäudehülle verändert.

Aufgrund der derzeitigen Herstellungsschwierigkeiten der nicht gleichmäßigen VIP-Paneelen-Formen und des manuellen Herstellungsverfahrens sind die VIP-Paneele immer noch teurer im Vergleich zu anderen Dämmpaneelen. Die Anwendung der modularen Formen, die in dieser Forschungsarbeit vorgeschlagen wurden, werden die Herstellungsformen reduzieren, ermöglichen den Herstellern einen voll automatischen Produktionsprozess und bieten als Massenproduktion nur bestimme Formen in einem modularen System, die bei allen Gebäuden installiert werden können, an. Dazu ist entwurfsund ausführungsseitig eine gewisse Planungsdisziplin erforderlich.

Eine Maßnahme, die zur weiteren Senkung der Kosten dienen kann, ist die spaltenhafte Verankerung der Vorsatzschale unter Ausnutzung der Biegetragfähigkeit der Vormauerschale. Dabei geht aber die Demontierbarkeit und Auswechselbarkeit verloren. Ein weiterer Ansatzpunkt zur Optimierung der VIP-Dämmung ist der Einsatz eines anderen, preisgünstigeren Stützmaterials anstelle des Kieselgur-Kerns.

10. Numerische Untersuchungen

10.1. Allgemeines

Die numerische Berechnung des Verankerungssystems dient dazu, die aus den Einwirkungen zu erwarteten Verformungen bzw. entstehenden Lokalspannungen an den Anschlussstellen am Anker sowie an der Konsole genauer zu betrachten und damit an den kritischen Stellen die Querschnitte nachzuweisen.

Die Berechnungen wurden Bemessungslasten durchgeführt.

10.2. Anker-Modell





Bild 137 Ankermodell



Auf den Anker wirken, wie zuvor im Abschnitt 3.1 erläutert, die Windlasten. Der Winddruck/Sog ist nach DIN EN 1991-1-4/ NA [62] zu berechnen. Daraus ergibt sich eine maximale charakteristische Windlast in Höhe von $W_{Ek} = 0,54$ [KN] in der Windzone 4 (bei 4 Ankern/m²). Zur Gewinnung exakter Spannungs- und Verformungswerte am Polyamid-Profil wurde der Anker als Volumen modelliert (Bild 137) und im Gebrauchszustand der Tragfähigkeit berechnet (charakteristische Lastfallkombination).

Beim Generieren des FE-Netzes werden im Anker 3D-Finite Elemente erzeugt. Diese sind im Bild 138 zu sehen.



Bild 138 FE-Netz aus 3D Elementen, Lagerung

Die Gewindestange ist an der Hintermauerung zu befestigen. Die Randbedingungen der Lagerung sind dementsprechend einzuhalten.

10.3. Ergebnisse aus der FEM-Berechnung des Ankers

10.3.1. Verformung



Bild 139 Anker-Verformungen [mm]



Die zu erwartenden Verformungen am Anker infolge horizontaler Belastung (Windsog) sind im Bild 139 dargestellt.

Dabei ist es zu erkennen, das die maximalen horizontalen Verformungen am Duplexstahl-Teil infolge der Biegespannungen auftreten. Das Polyamidteil weist sehr geringe Verformungen auf.

10.3.2.Spannungen

Die kritischen Spannungsstellen befinden sich am Polyamid GF30/PEEK-Profil wegen der erforderlichen Durchdringungen besonders am Ankerkopf, die zu erheblichen Tragfähigkeitsverminderungen der betroffenen Querschnitte führen. Die Spannungen am Volumenkörper sind im Bild 140 grafisch dargestellt. Die zu erwartenden Spannungen im Polyamid-Profil betragen etwa 31,7 MPa (charakteristische Lastkombination, GZN [60], [61]). Dieser Wert entspricht etwa 20-37% der Tragfähigkeit des glasfaserverstärkten Polyamids (f_{yk} =100-150 MPa). Dementsprechend bewegt sich der globale Sicherheitsfaktor γ im Bereich zwischen 3 - 4,7. Eine nichtlineare Berechnung erübrigt sich damit.



Bild 140 Anker-Spannungen

10.4. Konsolen-Modell

Das Konsolenmodell soll für eine kontinuierliche Auflagerung des Systems entlang der Fassade sorgen. Die Konsole ist je 50 cm an der Betonplatte zu verankern und mit einem Eckprofil aus Duplexstahl zu verbinden. Das entsprechende Modell ist im Bild 141 gezeigt.





Bild 141 Konsolenmodell

Als Belastung ist hier das Gewicht der Vormauerschale als ständige Last geschoßweise anzusetzen. Daraus ergibt sich eine vertikale Last in Höhe von 6 [KN] je laufendem Meter. Das entspricht etwa einer Abfangung aller ca. 6 m (G_{vk} = 6ž0,5ž0,115ž18 kN = 6,21 kN). Die Vernetzung des Modells ist im Bild 142 gezeigt. Die Berechnung wird wieder für die charakteristische Lastkombination ([60], [61]) durchgeführt.



Bild 142 FE-Netz im Konsolenmodell

10.5. Konsolen-Ergebnisse

10.5.1. Verformungen

Im Bild 143 sind die aus der Belastung der Vorsatzschale im Konsolensystem entstehenden Verfomungen dargestellt. Die maximalen Verformungen treten in der Mitte des durchlaufenden Trägers auf. Dieser Wert beträgt 2,4 [mm] \approx L/210 \leq 1/200. Damit ist der Nachweis der Gebrauchstauglichkeit nach DIN EN 1993 ([128], [129]) erbracht.





Bild 143 Aufgetretene Verformungen im Konsolenmodell

10.5.2.Spannung

Die Spannungen in den Polyamid/PEEK-Teilen sind in diesem Fall insbesondere von großer Bedeutung. Diese Spannung sollen die Werte von 100 MPa für Polyamid/PEEK sowie 560 MPa für Duplexstahl auf keinen Fall überschreiten. Die maximalen Spannungen in den Teilen aus Duplexstahl sind im Bild 144 gezeigt. Sie sind für die Polyamid-Teile im Bild 144 dargestellt.



Bild 144 Entstehende Spannungen in Duplexstahlteilen des Konsolensystems





Bild 145 Entstehende Spannungen in Polyamidteilen des Konsolensystems

Die Lokalspannungen an der Kontaktfläche zwischen Polyamid-Teil und Gewinde sind im Bild 146, Bild 147 und Bild 148 gezeigt.



- Bild 146 Lokalspannung1 in Kontaktfläche Bild 147 zwischen Gewinde und Polyamidteil
- Lokalspannung2 in Kontaktfläche zwischen Gewinde und Polyamidteil



Bild 148 Spannung im gesamten Polyamid-Profil mit Berücksichtigung aller Durchdringungen

Die Berechnungen haben resultierende Spannungen im Polyamid/PEEK in Höhe von 42 MPa und bei Duplexstahl in Höhe von 209 MPa ergeben. Dies hat zur Folge, dass der globale Sicherheitsfaktor bei einem Wert in Höhe von 3 liegt. Die erforderlichen Teilsicherheiten sind damit abgedeckt.



11. Experimentelle Untersuchung

11.1. Allgemeines

Im Rahmen des Forschungsvorhabens sollte der Einfluss der Einwirkungen auf die Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit des Verankerungssystems sowie das Versagen der Systemteile im Grenzzustand der Tragfähigkeit an geeigneten Probekörpern untersucht werden.

Das Ziel dieser Versuche ist die Feststellung der Tragfähigkeit der Einzelteile "Anker+ Konsole" der entwickelten Verbundtechnik, die bei zweischaligen Mauerwerkswänden zur Befestigung hocheffektiver Dämmtechnik zum Einsatz kommen sollen.

Bei der Vorbereitung und Durchführung dieser Versuche sind die zutreffenden Randbedingungen einzuhalten bzw. zu realisieren.

11.2. Zu prüfende Verankerungssystemteile

Die vorbereiteten Versuche wurden an einem Anker (Bild 149) und einer Konsole (Bild 150) durchgeführt werden. Der Anker und die Konsole bilden die Bestandteile des neu entwickelten Verankerungssystems und sind Verbundteile, die aus 2 verbundenen Werkstoffen bestehen, glasfaserverstärktes Polyamid PA6.6 GF 30 und Duplexstahl.





Bild 149 Zu prüfender Luftschichtanker Bild 15

Bild 150 Zu prüfendes Konsolensystem

Taballa ED	Machaniacha	Flagmachaftan	dar Matarialian	daal	larankarungaanatanga
	Mechanische	FIGENSCHAHEN	oer warenalien	aes v	erankerunossvsiems
	111001101100110	Ligeneenarten	aor matorianori	400	or ar mor an igoo jo corrio

	Mech	anische Eigenschaften	
Material	Biegefestigkeit	Zugfestigkeit	E-Modul
Polyamid PA6.6 GF30 (glasfaserverstärktes Polyamid)	200	175	9000
Edelstahl	460	540	21000

Der Anker und die Konsole sind noch keine zugelassenen Bauteile um sie im Zusammenhang mit den VIP-Dämmelementen einzusetzen. Da die VIP-Elemente nur ganz

beschränkte Verbundmöglichkeiten zulassen, ergeben sich für die Verbundteile geometrische und belastungstechnische Nutzungsbesonderheiten.

Die mechanischen Eigenschaften der angewendeten Materialien sind in der Tabelle 52 dargestellt.

11.3. Randbedingungen

Die Systemverbundteile sind tragende Elemente. Der Anker soll die resultierenden Horizontalkräfte infolge der Windlast aufnehmen. Da die Windlast als Sog oder Druck auftritt, soll der Anker auf Zug- sowie Druckbelastung geprüft werden. Zur Prüfung der Stabilität des Ankers soll auch die horizontale bzw. vertikale Schubfestigkeit geprüft werden.

Die Konsole ist für die Abtragung der Vormauer bei zweischaligem Mauerwerk anzusetzen und um die entstehenden Belastungen an die Betonplattendecke überzuleiten. Deshalb soll für die Konsole ein Belastungsversuch in vertikaler Richtung durchgeführt werden. Das entwickelte Verbundsystem soll planmäßig bei allen Auswirkungen stabil bleiben. Das führt dazu, dass die Konsole zusätzlich zur vertikalen Belastung auch unter Schwingbelastung geprüft werden muss.

Für die Untersuchungen wird von einem Gebäude mit 12 m Höhe und einer Windlastzone im Binnenland ausgegangen. Daraus ergibt sich ein Geschwindigkeitsdruck von 0,8 kN/m². Für den aerodynamischen Beiwert gilt für rechteckige Gebäude bis 12 m Höhe ein Wert 0,8 für Winddruck und -0,5 für Windsog. Die ansetzbare Windlast, inklusive Sicherheitsbeiwert von 1,5 beträgt demnach 0,96 kN/m² für Winddruck und -0,6 kN/m² für Windsog.

11.4. Anker- und Konsolenanordnung

Die Anordnung der Dämmtechnik ist in 2 Varianten dargestellt (Bild 151). Die Ankerverteilung ist durch die Paneelen-Abmessungen nur an den Paneelen-Seiten möglich ist. Der Ankerabstand beträgt bei beiden Varianten 50 cm in beiden Richtungen. Dies ergibt eine Ankeranzahl von 4-5 Ankern/m2. Es soll ebenfalls gewährleistet sein, dass die Ankerkräfte nicht die üblichen zugelassenen Werte überschreiten.



a)

Bild 151 Anordnung der Anker/Konsole bei a) Variante 1, b) Variante 2



11.5. Versuchsbegleitende Materialprüfungen (Serien MB, MD, MSD)

11.5.1.Mauermörtel

11.5.1.1. Ziel

Der Anker und die Konsole sind für eine Vormauerschale sowohl mit Normal- als auch Dünnbettmörtel einzusetzen. Für die Tragschale sind beide Mörtelarten für die Verwendung der Anker zugelassen. Die Untersuchungen wurden deshalb an Mauerwerk mit Normalmörtel für die Vormauer und Dünnbettmörtel für die Hintermauer durchgeführt.

11.5.1.2. Mauermörtelversuche

Zur eindeutigen Festlegung der Mörteleigenschaften wurden Versuche an Mörtelprismen der MGIIa und MG III vorgenommen [136]. Bei der Herstellung der Versuchskörper wurden von dem verwendeten Mauermörtel Prismen zur Bestimmung der Mörteleigenschaften angefertigt (40 x 40 x 160 mm). Bei jeder Mörtelmischung sind Prüfkörper in ausreichender Menge herzustellen. Tabelle 53 enthält die zu bestimmenden Parameter.

Tabelle 53	Parameter	zur	Bestimmung	der	Mörteleigenschaften

Parameter	Versuch	Prismen (min)	
$\sigma - \varepsilon - Linie$	in Anlahnung an DIN 19555 4	2	
E-Modul Em	In Anienhung an Dirit 18555-4	3	
Mörteldruckfestigkeit fm			
Spaltzugfestigkeit fsz.M	in Anlehnung an DIN EN 1015-11	3	
Biegezugfestigkeit f _{BZ.M}			

Es wird die folgende Anzahl an Probekörpern ausgewählt:

- 6 x Biegezugfestigkeit $f_{BZ,m_{i}}$ (Serie MB) nach [138]
- 6 x Mörteldruckfestigkeit fm, (Serie MD)
 nach [136]
- 6 x Spannungs-Dehnungs-Beziehung, (Serie MSD) nach [139]



Bild 152 a) Spannungs-Dehnungs-Beziehungen an Mörtelprismen (DIN 18555-4); b) Bestimmung der Biegezugfestigkeit (DIN EN 1015-11); c) Prismendruckfestigkeit und Spaltzugfestigkeit an halbierten Mörtelprismen Neben der Spannungs-Dehnungs-Beziehung des Materials (Prüfung in Anlehnung an DIN 18555-4 [138], siehe Bild 152 a) ist auch die Zugfestigkeit der Mauersteinprismen zu bestimmen.

Dafür sind Biegezugversuche und Spaltzugversuche (in Anlehnung an die Versuche an Mörtelprismen nach DIN EN 1015-11 [136] durchzuführen.

Bemerkung: Die Mörteldruckfestigkeit und die Spaltzugfestigkeit werden dann an den halbierten Prismen aus den Biegezugversuchen bestimmt. Beim Spaltzugversuch werden an der Ober- und Unterseite jeweils schmale Lastverteilungsstreifen aus Filz oder Sperrholzstreifen angeordnet.

11.5.1.3. Lastregime und Messstellen

• Für Biegezugversuche und Druckversuche:

Die Last ist stoßfrei mit einer gleichmäßigen Geschwindigkeit im Bereich von 10 N/s bis 50 N/s aufzubringen, sodass der Bruch innerhalb von 30 s bis 90 s eintritt.

• Für Spannungs-Dehnungs-Beziehungen:

Die Last kann stufenlos oder in Stufen aufgebracht werden. Die Dauer der gesamten Lasteinwirkung bis zum Bruch soll etwa 15 bis 20 Minuten betragen. Der Höchstwert der Last ist aufzuzeichnen

11.5.1.4. Versuchsergebnisse der Mörtelprüfungen

Bei der Herstellung der kleinen Mauerwerksprüfkörper wurden vom verwendeten Dünnbettmörtel sowie vom normalen Mörtel Prismen (40/40/160 mm) zur Bestimmung der Mörteleigenschaften angefertigt. Neben der Mörteldruckfestigkeit f_m wurden auch die Biegezugfestigkeit $f_{BZ,m}$ sowie die Spannungs-Dehnungs-Beziehung ermittelt (Bild 153). Die Biegezugfestigkeit und die Druckfestigkeit wurden dabei nach DIN EN 1015-11[143] und die *s*-*e*Beziehung nach DIN 18555-4 [144] bestimmt und sind in der Tabelle 54 dargestellt. Die Ergebnisse werden im Einzelnen im Anhang wieder gegeben.



Bild 153 a) Bestimmung der Biegezugfestigkeit (DIN EN 1015-11); b) Prismendruckfestigkeit an halbierten Mörtelprismen; c) Spannungs-Dehnungs-Beziehungen an Mörtelprismen (DIN 18555-4)



Tabelle 54 Materialeigenschaften Dünnbettmörtel (Silka)

Bezeichnung	Silka Dünnbettmörtel	Normalmörtel Baumit
Rohdichte r _m	1,797 kg/dm³	1,455 kg/dm³
Biegezugfestigkeit f _{BZ,m}	4,43 N/mm ²	2,21 N/mm²
Druckfestigkeit aus Biegezugprismen f _m	16,45 N/mm²	9,53 N/mm²
E-Modul (Prisma hochkant) E_m	6613 N/mm²	7487 N/mm²
Druckfestigkeit (Prisma hochkant) <i>f_{m,E}</i>	13,50N/mm ²	6,77 N/mm²

11.5.2. Mauerwerk (Serien MWH, MWV)

11.5.2.1. Ziel

Zur Bestimmung der Mauerwerkseigenschaften der Vor- und Hintermauer (Druck und E-Modul) wurden je 3 RILEM Probekörper (nach DIN EN 1052-1 [131]) mit Klinkern in NF und KS-Steine in 6 DF unter Verwendung von Mörtel MG IIa (M10) für Klinker und Dünnbettmörtel für KS-Steine geprüft. Es wurden auch Haftscherfestigkeitsversuche jeweils für die Vormauer und die Hintermauer durchgeführt. Somit stehen für die eigentlichen Ankerversuche eindeutige Kennwerte für das Mauerwerk zur Verfügung.

11.5.2.2. Druckfestigkeitsversuche

Versuchsgegenstand

Für die Versuche sollten Mauerwerkprobekörper aus Steinen wie im Bild 154 dargestellt, geprüft werden.



Bild 154 Verwendete Mauerwerkssteine, Vormauerschale Klinker NF

Für die Hintermauerung kamen Kalksandsteine in dem Format 6DF und der Druckfestigkeitsklasse 12 in Verbindung mit Dünnbettmörtel zum Einsatz (Bild 155). Es handelt sich dabei um einen Lochstein. Die Vormauerschale wird aus Klinkern NF in Verbindung mit Normalmörtel MGIIa hergestellt (Bild 154).







Probekörperabmessungen

Es wurden die Druckfestigkeit f_k , die Spannungs-Dehnungs-Beziehung und der E-Modul an kleinen Mauerwerks-Prüfkörpern (PK) in Anlehnung an DIN EN 1052-1 [131] ermittelt. Es sind insgesamt je 3 Versuche durchgeführt worden (Bild 156).



Bild 156 Mauerwerksprüfkörper aus [131]

Die Prüfkörper sind mit den in Tabelle 55 und Tabelle 56 angegebenen Maßen anzuwenden. Die Druckfestigkeit einer Probe von Mauersteinen ist nach dem in der EN 772-1 [135] angegebenen Verfahren zu bestimmen.



Tabelle 55 Maße für Prüfkörper zur Prüfung der Druckfestigkeit nach EN 772-1 [135]

Maße der Sichtfläch	e des Mauersteines	Maße des Mauerwerksprüfkörper			
l _u mm	h _u mm	Lānge l _s	Lānge Höhe l _s h _s		Breite ts
< 300	≤ 150	>(0 × 1)	$\geq 5 h_{\rm u}$		
≤ 300	> 150	$\geq (2 \wedge l_u)$	\ge 3 h_u	\geq 3 t_s und \leq 15 t und	> f
> 300	≤ 150	\geq (1,5 \times $l_{\rm u}$)	\geq 5 $h_{\rm u}$	$\geq l_s$ and $\geq l_s$	<i>≥ t</i> u
> 300	> 150		\geq 3 $h_{\rm u}$		

Tabelle 56ausgewählte Maße für Prüfkörper zur Prüfung der Druckfestigkeit nach EN 772-1[135]

Stein	lu	hu	ts	Länge Ls	ls	ls,gew.	Höhe	hs	hgew.	Abmessung										
							≥3.hu	≥213												
Vormauar NE	240	71	115	5 0 0 kg	≥ 480	× 400 400	≥ 3.ts	≥ 345	200	402*200										
VOITIduel INF	Vormauer NF 240 /1 115	115	22,01u	≥ 480		≥ 400	492	≥ls	≥240	390	492 390									
							≤ 15 .ts	≤1725												
							≥3.hu	≥ 750												
Hintermauer 6DF	250	250	175	≥2,0 lu	≥2,01u ≥500	> 2 0 Ju > 500	>20Ju	> 2 0 Iu	> 2 0 101 >	≥ 2,0 lu ≥ 500 750 ≥ 3.ts ≥ ls	0 Iu ≥ 500	≥2,01u ≥500	≥2,0lu ≥500		> 2 0 lu > 500	> 500 750	≥ 3.ts	≥ 345	750	500*750
	200	230	175			≥ 500 /50 ≥	22,010 2000	≥ 500	2,010 2,000					≥ls	≥ 500	750				
							≤ 15 .ts	≤ 2625												

Die Abmessungen der verwendeten Probekörper sind im Bild 157 und Bild 158 angegeben.





b)

Bild 157 a) Mauerwerksprüfkörper, Serie MWH , Hintermauer, b) Prüfkörperherstellung





Bild 158 Serie MWV (Vormauer): a) Mauerwerksprüfkörper, b) Prüfkörperherstellung

Lastregime und Messstellen

 Die Längs- und Querverformungen sind f
ür jeden PK zu messen. Dazu wurden induktive Wegaufnehmer an jeden PK nach Bild 160 f
ür die Hintermauer und Bild 159 f
ür die Vormauer an den angegebenen Messstellen angebracht

Lastregime:

- § Die Last wurde gleichmäßig auf die obere und untere Fläche des Prüfkörpers aufgebracht. Die Last war stetig so zu steigern, dass der Bruch 15 min bis 30 min nach Belastungsbeginn stattfindet.
- § Die Lastgeschwindigkeit liegt zwischen rund 0,15 N/(mm² / min) und bei Mauersteinen niedriger Festigkeit bei 1,25 N/(mm² / min) bei Mauersteinen hoher Festigkeit.





Bild 159 a) Messstellen für Mauerwerksprüfkörper , Vormauer b) Prüfkörper in der Prüfmaschine





Bild 160 a) Messstellen für Mauerwerksprüfkörper, Hintermauer; b) Prüfkörper in der Prüfmaschine

11.5.2.3. Versuchsergebnisse der Mauerwerksprüfungen

Die Ergebnisse der Einzelprüfungen zur Ermittlung der Druckfestigkeit f_k , die Spannungs-Dehnungs-Beziehung und des E-Moduls an den Mauerwerksprüfkörpern (PK) in Anlehnung an die DIN EN 1052-1 [131] sind im Anhang zusammengestellt.

Tabelle 57 enthält die Mittelwerte der Versuchsreihen MWN und MWH.

Tabelle 57	Materialeigenschaften M	lauerwerk aus der	Druckfestigkeits	orüfung

Serienbezeichnung	Serie MWV (Vormauer)	Serie MWH (Hintermauer)
Mittlere	18,28 N/mm ²	6,03 N/mm ²
Mauerwerksdruckfestigkeit f		
E-Modul Emw	13248 N/mm ²	4679 N/mm ²
Querdehnzahl	0,20	0,12

11.5.3. Haftscherfestigkeitsversuch (Serien HH, HV)

Da das Verankerungssystem über einen in der Mörtelfuge eingebetteten Luftschichtanker verfügt, sind diese Versuche zur Bestimmung der in der Tragwerksebene wirkenden Anfangsscherfestigkeit (Haftscherfestigkeit) von horizontalen Lagerfugen in Mauerwerk besonders wichtig.

11.5.3.1. Probekörper

Dabei wurden Prüfkörper auf Abscheren geprüft. Diese wurden aus den Mauersteinen der Vor- und Hintermauer in Verbindung mit dem ausgewählte Mauermörtel in Anlehnung an DIN EN 1052-3 [140] hergestellt. Die Probekörper können auf zwei Arten hergestellt werden

(Bild 161). Die Versuche wurden mit den nach Typ I hergestellten Probekörpern durchgeführt. Die Maße sind aus der Tabelle 58 zu entnehmen.



Bild 161 Probekörpertypen für Haftscherfestigkeitsversuch

Tabelle 58Ausgewählte Maße für Prüfkörper zur Prüfung der Haftscherfestigkeit nach
[140]

Länge des Mauersteins	Typ und Maße der Prüfkörper		
l _u	Two pach Bild 1	Maße	
mm	Typ hach blid T	mm	
≤ 300	I	$l_{s} = l_{u}$	
> 300	I	300 < l _s < 350	
< 200	щ	h ₁ = 200	
≤ 300	ш	$l_{s} = l_{u}$	
- 200		h ₁ = 200	
> 300	ш	300 < l _s < 350	

Für die zu prüfenden Mauersteine ergeben sich somit die in Bild 162 dargestellten Abmessungen.



a) Probekörper Vormauer, Serie HV, Typ I



b) Probekörper Hintermauer, Serie HH, Typ I



Bild 162 Probekörper für Haftscherfestigkeitsversuch, a) Vorschale, b) Hintermauerschale

Es ist nach [140] zwischen zwei Prüfverfahren zu unterscheiden. Versuchsdurchführung an vorbelasteten Probekörpern (Verfahren A) oder nicht belasteten (Verfahren B). Bei den vorliegenden Versuchen wurden beide Verfahren angewendet. Es ist zu bemerken, dass mindestens sechs Prüfkörper bei einer Vorlast von Null zu prüfen sind (Bild 162).



Bild 163 Haftscherfestigkeitsversuch- Vorbelastung

11.5.3.2. Versuchseinrichtung nach DIN EN 1052-3

Die äußeren Steine jedes Prüfkörpers sind wie in Bild 164 dargestellt in der Prüfeinrichtung aufzulagern. Hierfür sind mindestens 12 mm dicke Stahlplatten zu verwenden, wobei erforderlichenfalls eine geeignete Ausgleichsschicht aufzutragen ist, um einen vollflächigen Kontakt zu sichern. Der Durchmesser der Rollenauflager muss 12 mm betragen und ihre Mindestlänge der Steinbreite entsprechen. Die Last ist über eine Kugelkalotte einzuleiten, die im Mittelpunkt der oberen mittigen Stahlplatte angeordnet ist.



Bild 164 Haftscherfestigkeitsversuch - Einrichtung – DIN EN 1052-3



11.5.3.3. Lastregime und Messstellen

Die relativen Längsverformungen zwischen dem Außen- und Mittelstein sind durch die vertikal angeordneten IWA,s zu messen. Die Rissöffnung an den Mörtelfugen ist durch die horizontalen IWA,s aufzunehmen (Bild 165).



Bild 165 Messstellen, Prüfkörper in der Prüfmaschine

Folgende Punkte bei der Versuchsdurführung sind zu beobachten:

- 1- Die Kraft-Verformungs Werte sind aus den Versuchsdaten zu entnehmen (Kraft-Weg aus der Prüfmaschine)
- 2- Die Querschnittsfläche der Prüfkörper liegt parallel zur Scherkraft
- 3- Der Höchstwert der Scherkraft F_{i,max} ist aufzuzeichnen

Die Scherspannung ist mit einer Geschwindigkeit zwischen 0,1 N/(mm²/min) und 0,4 N/(mm²/min) zu steigern.

11.5.3.4. Ergebnisse der Haftscherfestigkeitsversuche

Die nach DIN EN 1052-3 [140] geprüften Prüfkörper liefern für Vor- und Hintermauerschale folgende zusammengefassten Ergebnisse bezüglich der Anfangsscherfestigkeit.

Im Anhang sind die Ergebnisse der Einzelversuche dargestellt.

Tabelle 59Ergebnisse der Haftscherfestigkeitsprüfung für die Vormauerschale
(MG II a) und die Hintermauerschale (DBM – MG III)

Bzeichnung	Vormauerschale (Serie HV)	Hintermauerschale (HH)
Mörtel	MG IIa	MG III
Anfangsscherfestigkeit	0,46 [N/mm2]	0,33 [N/mm2]



11.6. Ankerversuche

11.6.1.Tragfähigkeit des Ankers

Um die Tragfähigkeit des Ankers sowie der Konsole gewährleisten zu können, sind entsprechende Prüfungen durchzuführen. Dazu zählen für den Anker der Druckversuch, der Zugversuch und der Schubversuch. Im Folgenden sind die Versuche mit dazugehörigem Versuchsaufbau, -durchführung und Belastungstechnik detailliert beschrieben.

11.6.2. Aufbau

Legende

3

Der prinzipielle Aufbau der Zug-/Druckversuche ist im Bild 166 dargestellt.



Bild 166 Aufbau Steinpaar-Probekörper nach DIN EN 846-5 [130]

Die Anker sind so konstruiert, dass sie in vertikaler Richtung verschieblich sind. Es kann nur in horizontaler Richtung eine Kraft auftreten, die nachzuweisen ist.

Bemerkung 1: Die Prüfkraft ist mit dem Ausziehgerät stetig so zu steigern, dass die Höchstlast frühestens nach etwa 1 min erreicht wird. Dabei sind möglichst die Verschiebungen während des Versuchs zu messen. Eine Rissbildung kündigt sich durch das Abflachen der Last-Verschiebungskurve an (DIN EN 846-5 [130]). Bemerkung 2: Zur Ermittlung des Einflusses der Temperaturverformungen von Vormauerschale und Hintermauerwerk auf der Zugkraft-Schlupf-Kennlinie der Prüfkörper, wurden auf den Ankern zyklische Verformungen aufgebracht. Es sind 18000 Zyklen mit einer horizontalen Verformung ±2 mm vorzusehen.





(X) Seitenansicht des in die Prüfmaschine eingebauten Steinpaares

(Z) Ansicht der Klemmvorrichtung

Legende

- 1 obere Platte der Prüfmaschine
- 2 untere Platte der Prüfmaschine
- 3 oberer Mauerstein
- 4 unterer Mauserstein
- 5 Mörtelfuge

6 obere Klemmvorrichtung für das Steinpaar 7 untere Klemmvorrichtung für das Steinpaar 8 Futter (Y) Ansicht des in die Prüfmaschine eingebauten Steinpaares

- 9 Lastfeder
- 10 Messdose
- 11 Maueranker
- 12 Klemmvorrichtung für den Anker
- 13 Messvorrichtung für die Durchbiegung Futter um den in der Klemmvorrichtung
- 14 eingespannten Maueranker
- 15 Laststempel



11.6.3. Probekörper

Die Herstellung der Probekörper für Ankerversuche unterscheidet sich nach Typ und definiertem Ziel des Versuches. Bei den Ankerversuchen wurden Probekörper für folgende Ziele hergestellt (siehe Tabelle 60):

- a) Auszugversuch (Serie AV): Prüfen der Verbindung zwischen Ankerteilen sowie Feststellung der Ausziehlast von der Vormauerschale
- b) Auszugversuch (Serie AHF): Feststellung der Ausziehlast aus der Fuge der Hintermauerschale (Bestimmung der Traglast des entwickelten Dübels).
- c) Auszugversuch (Serie AHS): Feststellung der Ausziehlast aus dem Kalksandstein der Hintermauerschale (Vergleich mit Ausziehlast aus der Mörtelfuge.
- d) Schubversuch (Serie AScH): Feststellung der vertikalen Schubtragfähigkeit des Ankers infolge möglicher vertikaler Belastung.
- e) Druckversuch (Serie ADH): Prüfen der Stabilität und Tragfähigkeit des Ankers an der Hintermauerschale bei Druckbelastung







11.6.4. Lagerungsbedingung

Die Probekörper sind nach deren Herstellung in den ersten 3 Tagen abzudecken, um das Austrocknen zu verhindern. Anschließend sollen die Probekörper unbedeckt in einer Laborumgebung bis zur Prüfung gelagert werden. Die Probekörper sind 7 Tage beim Verwenden von Dünnbettmörtel und 28 beim Verwenden von Normalmauermörtel aushärten zu lassen. Da die Probekörper Befestigungsteile aus Kunststoff haben, sollen diese unmittelbar vor dem Prüfen bei 30 °C gelagert werden DIN EN 846-5 [130].

11.6.5. Prüfumgebung

Nach DIN EN 846-5 [130] sind die Prüfungen an den Ankern bei einer Umgebungstemperatur von 32,5 °C $\pm 2,5$ °C zu prüfen. Dies gilt für Kunststoffanker oder Anker mit Kunststoffbauteilen, die die gesamte Last oder einen Teil der Last übertragen.

11.6.6.Belastung

1-Auflast

Die Auflast ist für jeden Versuchstyp gemäß DIN EN 846-5 [130] Abschnitt 5.2 durch ein Hilfsmittel zur Aufbringung und Aufrechterhaltung einer konstanten Druckspannung von $0,1 \text{ N/mm}^2 \pm 0,01 \text{ N/mm}^2$ auf das Steinpaar zu erbringen (siehe Bild 168). Diese Auflast ist mittels geschliffener Stahlplatten, U-Profilen und Gewindestangen aufzubringen und mit Hilfe einer zwischengeschalteten Kraftmessdose zu überprüfen.



a) Probekörper der Vormauer





2-Zyklische Vorbelastung

Zur Ermittlung des Einflusses der unterschiedlichen Temperaturverformungen von Vormauerschale und Hintermauerwerk auf die Zugkraft-Schlupf-Kennlinie der Prüfkörper, wurden an den Ankern zyklische Verformungen aufgebracht. Dies betrifft nur die Ankerversuche für die Hintermauerschale (Serien: AHF, AHS, AScH und ADH).

Für diese Vorbelastung wurden jeweils 18.000 Zyklen als Erfahrungswert mit einer Verformung des Ankerkopfes (des Polyamidteiles) von ± 1 mm bezogen auf die Nulllage des Ankers festgelegt (Siehe Bild 169). Die Verformung sollte parallel zur Lagerfuge der Steine erfolgen. Die vertikale Auflast betrug analog bei diesen Versuchen 0,1 N/mm². Diese wurde mittels Stahlplatten, U-Profilen und Gewindestangen aufgebracht und mit Hilfe einer Kraftmessdose während des Versuches überprüft.





Bild 169 Temperaturverformungen am Ankerkopf

Für alle Versuche mit zyklischen Vorbelastungen gilt das angegebene Diagramm der Schwingungen (Bild 170). Das Diagramm verdeutlicht die aufgebrachten Schwingungen am Ankerkopf. Die Schwingungsamplitude beträgt wie erwähnt 2 mm.



Bild 170 Schwingungsdiagramm der Ankerversuche



3-Lastregime für Schub-, Zug- und Druckversuche

a) Für Druck- und Zugversuche

Die Last ist nach DIN EN 846-5 [130] gleichmäßig in 2 angegebenen Geschwindigkeiten bis höchstens 200 N aufzubringen, wobei der Schlupf höchstens 1 mm betragen darf. Nach dem Festspannen der Probe ist die Last auf einen nominellen positiven Wert, z.B. 10 N, zu verringern und die Durchbiegung auf Null einzustellen, bevor mit der Durchführung der Prüfung fortgefahren wird. Die Last ist erneut gleichmäßig nach den in Tabelle 61 angegebenen Geschwindigkeiten mit Hilfe des Lastverteilungsbalkens der Maschine oder des hydraulischen Antriebs aufzubringen.

Dies muss bei fortlaufender Aufzeichnung sowohl der Last als auch der Verschiebung kontinuierlich erfolgen. Die gesamte Lastverschiebungskurve ist kontinuierlich bis zu einer Verschiebung von höchstens 5 mm aufzuzeichnen. Als maßgebender Wert für das Versagen ist entweder die aufgezeichnete Höchstlast oder die Last bei einer Verschiebung um 5 mm zu betrachten, wobei der jeweils kleinere Wert maßgebend ist und als Tragfähigkeit gilt. Die Art des Versagens ist aufzuzeichnen. Die zu erwartende Bruchlast der Anker wird auf 1,5 kN geschätzt, wonach die Laststeigerung mit 200 N/min festgelegt ist (Tabelle 61).

Voraussichtliche Mindestbruchlast	Höchstgeschwindigkeit der Laststeigerung
N	N/min
500	200
2 000	800
5 000	2 000

Tabelle 61Höchstgeschwindigkeit für die Belastung und Laststufen nach [130]

b) Für Schubversuch

Nach[132] sind die Schubkräfte gleichmäßig nach den in Tabelle 61 angegebenen Geschwindigkeiten mithilfe des Lastverteilungsbalkens der Maschine oder des hydraulischen Antriebs aufzubringen. Das muss entweder bei fortlaufender Aufzeichnung sowohl der Last als auch der Verschiebung kontinuierlich oder bei manueller Aufzeichnung der Last und/oder der Verschiebung in Laststufen erfolgen. Die gesamte Last-Verschiebungs-Kurve ist entweder kontinuierlich oder in mindestens 10 Laststufen bis zu einer Verschiebung von höchstens 10 mm aufzuzeichnen. Erfolgt die Aufzeichnung durch eine Maximal-Ablesevorrichtung, sind alle spezifischen Höchstwerte aufzuzeichnen. Als maßgebender Wert für das Versagen ist entweder die aufgezeichnete Höchstlast oder die Last bei einer Verschiebung um 10 mm zu betrachten, wobei der jeweils kleinere Wert maßgebend ist. Die Last und die Art des Versagens sind aufzuzeichnen.

Messstellen

Es sind zwei induktive Wegaufnehmer zur Messung des Schlupfes am Anker beim Auszug und nach zyklischer Vorbelastung am Ankerkopf zu befestigen (Bild 171 und Bild 172).





Bild 171 Messstellen-Probekörper - Vormauerschale



Bild 172 Messstellen-Probekörper - Hintermauer

11.6.7. Ergebnisse der Ankerversuche

11.6.7.1. Serie AV (Ankerauszugversuch aus Vormauerschale)

Ziel dieser Versuche ist das Prüfen der Verbindung zwischen Ankerteilen sowie die Feststellung der Ausziehlast aus der Fuge der Vormauerschale. Die Ergebnisse der Ankerauszugversuche aus der Vormauerschale sind in der Bild 173 zusammengestellt. Für den Materialwiderstand wurde einer Materialsicherheitsbeiwert von $y_{m} = 1,5$ an der Verbindung zwischen Edelstahlflügel und Polyamidkopf nach DIN 1053-100:2007-09 [147] benutzt. Bei der Berechnung wird für die Einwirkungen (Windlasten) gemäß DIN EN 1990 [60] sowie dem zugehörigen NA [61] ein Teilsicherheitsbeiwert γ_{\circ} von 1,5 verwendet. Die Auswertung der Ergebnisse der erhaltenen Auszugskräfte bei 1 mm Verformung (siehe Bild 174) liefern einen mittleren Tragsicherheitsfaktor auf der Materialseite von 1,11, der nicht ausreichend ist. Die Verformungen sind - wie aus den Bildern im Anhang zu erkennen ist - nicht durch den Auszug des Ankers entstanden, sondern durch Verformung des Ankers an sich. Es sind im weiteren Verlauf des Forschungsvorhabens dann Modifikationen an dem Anker selbst hinsichtlich der Verformung vorgenommen worden. Da beim Bruch noch kein Auszug festzustellen war, ist davon ausgegangen worden, dass die Verankerung im Mörtel ausreichend sicher war (s. Anhang).



Bild 173	Auswertung der Ankerauszugversuche- Serie AV (Vormauerschale Ansatz	des
	"Schlupfes" (der Verformung) als Tragfähigkeitskriterium	

Stein- Mörtel-	Bruchkraft	[KN]	Teilsicher-					
in Kombinati on mit MG IIa	Bei 1 mm Verformun g	max. P	heits- beiwert (g M)	Schlupf bei max. P	F _{R,d} [KN]	Maximale Einwirkung WES,d [KN] (Windzone 4)	Auslastung [%]	
PK 1	1,12	2,82	2,5	0	1,13	0,81	72	
PK 2	0,78	2,53	2,5	0	1,01	0,81	80	
PK 3	0,95	3,37	2,5	0	1,35	0,81	60	
PK 4	0,87	2,72	2,5	0	1,09	0,81	74	
PK 5	0,76	2,80	2,5	0	1,12	0,81	72	
Mittelwert	0,90	2,85	2,50	0	1,14	0,81	72	

Der Teilsicherheitsbeiwert von $g_{Mm} = 2,5$ wird i. A. auf Verankerungen im Mauerwerk angewendet (vgl. [146], S. 9 und s. auch [55]). Der Teilsicherheitsfaktor wird hier auf den Mittelwert bezogen.

In Deutschland hat man bisher die Kraft, bei der der Anker sich um 1 mm aus dem Mauerwerk herausziehen lässt, als Bruchkraft angesetzt. Bei der festgestellten Bruchkraft des Rundstabes war kein Schlupf der Ankerteile, die sich im Mörtel befunden haben, festzustellen.



Bild 174 Serie AV - Auszug-Schlupf-Linien

Die Verankerungselemente im Mörtel zeigten keinerlei Schlupf. Die Ankerkräfte führten jedoch zu starken Verformungen des Rundstabes, die dann schnell die 1-mm-Verformungsgrenze erreichen ließen (vgl. Anhang). Am Prüfkörper AV-PK3 wurde zuerst ein Schlupf von ca. 2 mm gemessen, der den Verbindungsstellen zuzuordnen ist.



11.6.7.2. Serie AHF (Ankerauszugversuch aus Hintermauerschale- Fuge)

Zur Feststellung der Ausziehlast des Ankerdübels aus der Fuge der Hintermauerschale (Bestimmung der Traglast des entwickelten Dübels) wurden die nachfolgend beschriebenen Versuche durchgeführt. Bei der Ankerschraube in Verbindung mit dem Langschaftdübel FUR SS von Fischer wird einer Materialsicherheitsbeiwert von γ_{M} = 2,5³ nach der entsprechenden Zulassung in Übereinstimmung mit ETAG 020 ([151], Teil 3) angesetzt [146]. Nach den allgemein anerkannten Regeln (vgl. auch Abschnitt 11.6.7.1) hinsichtlich der Bestimmung der Tragfähigkeit erfolgt die Auswertung der Auszugsversuche bei 1 mm Schlupf. Nach der Tabelle 62. EN 1996-1-1 bezieht den Sicherheitsbeiwert von γ_{M} = 2,5 auf den Mittelwert. Die nachfolgenden Betrachtungen gehen vom EC 6 aus.

Mit den Ergebnissen der Tabelle 62 ist der Nachweis nicht erbracht. Die Dübeltragfähigkeit hängt wesentlich von der Steinfestigkeitsklasse ab. Aus der Erfahrung heraus wird postuliert, dass bei Einsatz einer Stfkl. 20 das Problem sich lösen lässt. Ggf. ist einem Dübelhersteller eine Modifikation für das System möglich.

Stein- Mörtel-	Bruchkraft [KN]		Tailaiaharhaita	F	Max. Einwirkung	Auclastung	
in Kombi- nation mit MG III	Bei 1 mm Schlupf	max. P	beiwert (g _M)	FR,d [KN]	W _{ES,d} [KN] (Windzone 4)	[%]	
PK 1	1,90	2,62	2,5	0,76	0,81	1,07	
PK 2	2,24	2,33	2,5	0,90	0,81	0,90	
PK 3	0,98	1,73	2,5	0,39	0,81	2,06	
PK 4	2,35	2,44	2,5	0,94	0,81	0,86	
PK 5	1,26	2,33	2,5	0,50	0,81	1,62	
Mittelwert	1,75	2,29	2,50	0,70	0,81	1,16	

Tabelle 62	Auswertung der Ar	kerauszugversuche-	Serie AHF	(Hintermauerschale)	
	. /	. /		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	



Bild 175 Serie AHF - Auszug-Schlupf-Linien (rote Linie – Mittelwert bei 1 mm Schlupf $P_s=1,75 \text{ kN}$, rote Strichlinie bei $0,4*P_h=0,75 \text{ kN}$; P_h ...horizontale Asymptote)

Gemäß ETAG 020 wird für den Mittelwert die Forderung nach linearem Anstieg im Gebrauchszustand erfüllt (ETAG 020 [151], Teil 1, 6.4.1.3).

³ Zwischen ETAG 020 und dem Eurocode EN 1996-1-1 besteht eine Diskrepanz hinsichtlich des empfohlenen Sicherheitsbeiwertes. EN 1996-1-1 empfiehlt, bezogen auf den Mittelwert 2,5 zu verwenden, die ETAG 020 geht von 2,5 bei Bezug auf den charakteristischen Wert aus.

Die Verankerung in der Dünnbettfuge erfüllt jedoch nicht die Tragfähigkeitsanforderungen für alle Windlastzonen einschließlich WLZ 4 ($W_{ES,d} > P_{R,d}$).

Wird sichergestellt, dass keine Verankerung in der Fuge erfolgt, kann bei Verwendung entsprechender Vollsteine aus KS It. Zulassung die erforderliche Tragfähigkeit gewährleistet werden:

 $P_{R,k}^{nach ETA-13/0235} = 3,5 \text{ kN gem.}$ Anhang 6, Tab. 9 Zeile 4 der ETA-13/0235

W $_{ES,d}$ = 0,81 kN < P $_{R,d}$ = P $_{R,k}$ ^{nach ETA-13/0235}/ g_{Mm} = 3,5 kN/ 2,5 = 1,4 kN

Unter Beachtung der Fugenteilung und bei Verwendung eines entsprechend ausgewählten Hintermauerungswerkes lässt sich die Einwirkung aus Wind für WLZ 4 nachweisen.

11.6.7.3. Serie AHS (Ankerauszugversuch aus Hintermauerschale-Stein)

Zur Feststellung der Ausziehlast des Ankerdübels aus dem Kalksandstein der Hintermauerschale und zwecks des Vergleichs der Ergebnisse mit der Ausziehlast der Anker aus der Mörtelfuge wurden diese Ankerauszugsversuche durchgeführt. Unter den gleichen Bedingungen im Abschnitt 11.6.7.2 hinsichtlich des Materialsicherheitsbeiwertes und der Berechnung der Einwirkung sind die Ergebnisse in der Tabelle 63 bzw. im Bild 176 zusammengefasst.

Daraus ergibt sich ein mittlerer Wert des Teilsicherheitsbeiwert für die Einwirkung von 1,01 < 1,5. Damit ist der Nachweis nicht erbracht. Die Dübeltragfähigkeit hängt wesentlich von der Steinfestigkeitsklasse ab. Aus der Erfahrung heraus wird postuliert, dass bei Einsatz einer Stfkl. 20 das Problem sich lösen lässt. Ggf. ist mit einem Dübelhersteller eine Modifikation für das System möglich.

K Stain	Kra	Kraft [KN]		Bemessungs-	Maximala	
Klasse 12	Bei 1 mm Schlupf	max. P _B	Teilsicherheits- beiwert (YM)	wert Tragwider- stand P _{R,d} [KN]	Einwirkung W _{ES,d} [kN] (Windzone 4)	Auslastung %
PK 1	1,32	1,97	2,5	0,53	0,81	153%
PK 2	1,14	1,88	2,5	0,46	0,81	176%
PK 3	1,10	1,52	2,5	0,44	0,81	184%
PK 4	0,88	1,64	2,5	0,35	0,81	231%
PK 5	2,37	2,40	2,5	0,95	0,81	85%
Mittel- wert	1,36	1,88	2,50	0,54	0,81	150%

 Tabelle 63
 Auswertung der Ankerauszugversuche- Serie AHS (Hintermauerschale)

Mit dem hier ausgewählten Stein lassen sich die Anforderungen aus der Windlastzone 4 nicht erfüllen. Die Ursache dafür wird in der Tatsache gesehen, dass es sich um einen Lochstein handelt. Es gilt der gleiche Schluss wie im vorhergehenden Abschnitt.





Bild 176 Serie AHS - Auszug-Schlupf-Linien (rote Linie – Mittelwert bei 1 mm Schlupf $P_s=1,36$ kN, rote Strichlinie bei $0,4*P_h=0,54$ kN; P_h ...horizontale Asymptote)

11.6.7.4. Serie AScH (Ankerschubversuch)

Ziel dieser Versuche ist die Feststellung der vertikalen Schubtragfähigkeit des Ankers infolge möglicher vertikaler Belastung bzw. Konsolenschienenabsetzungen. Der Materialsicherheitsbeiwert der Ankerschraube und des Polyamidkopfes wird in diesem Fall mit γ_M = 1,5 angenommen. Aus der Tabelle 64 lässt sich eine zulässige Schublast bei einer maximalen Konsolenabsetzung von 10 [mm] nach [134] (s. Anhang) in Höhe von 0,15 KN bestimmen.

Tabelle 64Auswertung der Ankerschubversuche- Serie AScH (Hintermauerschale))

K-Stein Klasse 12	Bei 1 mm Schub	Bruchkraft [KN] bei 10 mm Schub	max. Q	Teilsicher- heitsbeiwert (g _M)	Zulässige Last [KN]
PK 1	0,05	0,22	0,24	1,09	
PK 2	0,07	0,23	0,33	1,43	
PK 3	0,08	0,21	0,30	1,43	
Mittelwert	0,07	0,22	0,29	1,32	0,15

Der Versuch ist standardmäßig so vorgesehen. Das vorgeschlagene Verankerungssystem hat aber den Vorteil, dass es vertikal verschieblich ist und somit keine Zwängungen vertikal auftreten können. Es können lediglich horizontal Zwängungen entstehen, die in der Größenordnung von 10 mm Verformung mit dem Teilsicherheitsbeiwert von 1,32 aufgenommen werden können. Im Zuge einer konkreten Umsetzung wäre dieses Problem nochmals zu eruieren.



11.6.7.5. Serie ADH (Ankerdruckversuch)

Mit diesen Versuchen wurde für die Stabilität und Tragfähigkeit des Ankers an der Hintermauerschale bei Druckbelastung aus dem Winddruck geprüft. Für den Materialsicherheitsbeiwert sowie die Berechnung der Einwirkungen gelten die gleichen Annahmen wie im Abschnitt 11.6.7.2. Die Auswertung der Ergebnisse der Ankerdruckversuche sind in der Tabelle 65 dargestellt. Der Anker hat bei 1 mm Schlupf (siehe Bild 177) eine ausreichende Tragfähigkeit, womit mit den Zahlen in Tabelle 65 dieser Nachweis erbracht ist.

Tabelle 65	Auswertung der Anken	druckversuche - Serie	ADH ((Hintermauerschale)
	rusvertung der rinker		,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,	i mitteri nau ei senaiej

KS- Kraft [k		kN]		Irag-		
Steinf Klasse 12	Bei 1 mm Schlupf P (YM) leilsicher- heitsbeiwert P _{R,d} [kN]		widerstand P _{R,d} [kN]	Einwirkung WED,d [kN] (Windzone 4)	Auslastung [%]	
PK 1	1,41	4,10	2,5	0,56	0,47	84%
PK 2	1,63	5,26	2,5	0,65	0,47	72%
PK 3	2,29	3,33	2,5	0,92	0,47	51%
PK 4	2,18	3,33	2,5	0,87	0,47	54%
Mittel- wert	1,88	4,01	2,50	0,75	0,47	63%



Bild 177 Serie ADH - Druck-Schlupf-Linien

11.6.7.6. Zugprüfung der Ankerschraube

Die Ankerschraube besteht aus zwei zugelassen Bestandteilen, aus einem Gewindestift mit Innensechskant (DIN 914[145]) und einer Spezialschraube des Langschaftdübels FUR vom Fischer (Zulassung: ETA-13/0235 [146]), die zusammen geschweißt werden. Dieser Versuch ist dafür wichtig, um die maximale Zuglast der gesamten Schraube zu bestimmen (Bild 178).





a) Ankerschraube in der Prüfmaschine



b) Ankerschraube am Versuchsende

Bild 178 Zugprüfung der Ankerschraube

Die Prüfparameter sind in der Tabelle 66 dargestellt. Die erhaltenen Ergebnisse dieses Versuchs zeigen in der Tabelle 67 eine Bruchlast in Höhe von 10,89 [kN] bei einer 2% Bruchdehnung (siehe Bild 179).

 Tabelle 66
 Auswertung der Ankerdruckversuche - Serie ADH (Hintermauerschale)

Material	-	Duplexstahl
Charge	-	Zug Anker- Dübel
Einspannlänge	50	mm
Prüfgeschwindigkeit	0,01	mm/s

 Tabelle 67
 Auswertung der Ankerdruckversuche - Serie ADH (Hintermauerschale)

	Probe	Fm	F max 2	Bruch	F(s= 1	zul. Fd
					mm)	
Legende		kN	mm	%		
"	Zug	10,893	1,82	-	10 kN	6,67 kN

Als Materialbeiwert wird in diesem Fall für Edelstahl 1,5 benutzt. Der Tragsicherheitsfaktor der Ankerschraube beträgt $(10/(1,5*0,58)=11,5)\geq 1$ und somit ist der Nachweis erbracht.



Bild 179 Spannungs-Dehnungs-Linie, Ankerschraubenversuch

11.6.8. Zusammenfassung der experimentellen Ankernachweise

Mindestanzahl der Maueranker

Die Mindestanzahl der Maueranker je Flächeneinheit n_t sollte nach [149] nach der folgenden Gleichung bestimmt werden:

$$n_t = W_{Ed}/F_d$$

 W_{Ed} : der Bemessungswert der horizontalen Last je Flächeneinheit, die zu übertragen ist;

 F_d : der Bemessungswert der Druck- oder Zugtragfähigkeit eines Mauerankers unter dem maßgebenden Bemessungsfall.

Aus der Gesamtauswertung der Ankerversuche ist der Ankerauszug aus dem Mauerstein mit niedriger Festigkeitsklasse (bei FK12) der maßgebende Fall der Ankertragfähigkeit. Dementsprechend ergibt sich eine mittlere zulässige Last in Wert von 0,54 [kN] (siehe Tabelle 63 und Bild 180). Daraus resultierend ergibt sich eine erforderliche Ankerzahl /m²:





Bild 180 Bestimmung der Ankertragfähigkeit

Die Mindestzahl an Anker pro Quadratmeter beträgt 7 nach [62]. Durch den entwickelten Anker wird diese Zahl aufgrund der höheren Ankertragfähigkeit und gegebenenfalls der Ankeranordnung auf 6 Anker/m² verringert. Wirtschaftlich vertretbar erscheint eine Ankerzahl von n_t = 4. Der müsste dann eine Tragfähigkeit von 0,81 kN haben. Somit müsste eine Optimierung bei dem Auszugsverhalten aus der Hintermauerschale erfolgen. Hinsichtlich des Druckverhaltens wäre der derzeitig konzipierte Anker ausreichend tragfähig.

11.6.9.Konsole (Serie K)

11.6.9.1. Tragfähigkeit der Konsole

Da die Konsole aus zusammengebundenen Teilen besteht, ist ihre deklarierte Tragfähigkeit als die niedrigste ermittelte Tragfähigkeit der Teile des Konsolensystems anzunehmen, z. B. die Tragfähigkeit der Verankerung, die Tragfähigkeit des Auflagerteils oder von Teilen des Auflagerteils.

Zur thermischen Trennung wurde das Polyamidteil der Konsole als mittlerer Teil verwendet und durch einen Bolzenanker des Types FAZ II [150] an der Betonplatte verankert. Anschließend wird die Stahlschiene, die für die Abtragung der Vormauerschale zuständig ist, an den Polyamidteil mittels Schrauben befestigt.

11.6.9.2. Aufbau und Versuchssystem

Das Bild 181 stellt die Prüfkörperformen bzw. Belastungsanordnungen für die Konsole bei üblichem vertikalem Belastungsversuch dar. Bei Probenahme nach Abschnitt 8 und Prüfung entsprechend dem Verfahren nach DIN EN 846-10 [134] muss die Tragfähigkeit bei üblicher vertikaler Belastung mindestens dem deklarierten Wert entsprechen. Außerdem darf die Tragfähigkeit jedes einzelnen Probekörpers 90 % des deklarierten Wertes nicht unterschreiten.

Für den Versuch in der Prüfhalle wurde eine besondere Probekörpergeometrie angeordnet. Das Konsolensystem wurde an einem Stahlbetonbalken des Typs C20/25 zum Realisieren der Randbedingungen verankert (Bild 182).

Genauere Abmessungen des Versuchssystems sind im Bild 183 verdeutlicht.





- X Vorderansicht einer einfachen Konsole;
- Y Vorderansicht einer Konsole mit Verstärkungsrippe;
- Z Aufriß mit Belastungsanordnung;
- a Konsole;
- b Grundmaterial, z. B. Beton, Mauerwerk usw.;
 - undmaterial, z. B. Beton, Mauerwerk usw.;
- c Vorgesehene Breite des Zwischenraumes;
- e Meßuhr oder Wegaufnehmer;
- T Dicke des Mauerwerks;
- L Länge der Konsole;
- W Aufgebrachte Last





Bild 182 Geprüftes Konsolensystem



Bild 183 Abmessungen des Konsolensystems



11.6.9.3. Prüfumgebung

Nach DIN EN 846-5 [130] sind die Prüfungen an den Konsolen bei einer Umgebungstemperatur von 32,5 °C \pm 2,5 °C zu prüfen. Dies gilt für die Kunststoffkonsole oder die Konsole mit Kunststoffbauteilen, die die gesamte Last oder einen Teil der Last übertragen.

11.6.9.4. Belastung und Lastregime

Es ist nach [130] eine Vorlast von 1 kN auf den Prüfkörper aufzubringen und für die Dauer von 1 min aufrechtzuerhalten. Die Last ist zu entfernen und wie folgt weiter zu verfahren:

- Die Last ist kontinuierlich oder in mindestens sechs Stufen bis zur maximal erwarteten Prüflast aufzubringen. Die Belastungsgeschwindigkeit ist so zu wählen, dass der Bruch zwischen 15 min und 30 min nach Beginn der Prüfung auftritt.
- Die Last ist zu steigern:
 - bis zur Bruchlast, bei der die Durchbiegungen ohne Steigerung der Prüflast anwachsen; oder
 - bis zu einer maximalen Durchbiegung von 10mm, die als Grenzwert festgelegt ist.
- Die Last-Verformungs-Werte, die Bruchlast und die Art des Bruches sind zu registrieren.

Bemerkung: Während des Versuches ist eine Vorbelastung in Höhe von 0,1 N/mm2 aufzubringen. Dies ergibt eine Gesamtlast in Höhe von 45 KN auf dem Betonbalken (Siehe Bild 184).



Bild 184 Vorbelastung auf Konsolensystem

11.6.9.5. Messstellen und Versuchsdurchführung

Die Durchbiegung bzw. vertikale Verformungen sind während der Versuchsdurchführung zu messen. Deshalb sind zwei induktive Wegaufnehmer zur Bemessung der Durchbiegung der Konsolenschiene im Mittelbereich anzubringen. Zur Bemessung der vertikalen Verformung der Konsolenschiene im Konsolenbereich wird unter jeder Konsole einen IWA angebracht (siehe Bild 185 und Bild 186).




a) Anordnung der IWA



b) Anordnung der IWA

Bild 185 Messstellen im Konsolensystem



a) Belastung der Konsole in der Prüfmaschine



 b) Versagen des Konsolensystems (Versagen des schwächsten Querschnitt es des Polyamidteiles auf Zugbeanspruchung)



c) Bemessung der Schienenverdrehung

Bild 186 Versuchsdurchführung- Serie K



11.6.9.6. Ergebnisse der Konsolenversuche

Die durchgeführten Konsolenbelastungsversuche haben ein gleichmäßiges Tragverhalten des Konsolensystems gezeigt. Das Versagen ist bei allen Versuchen an den schwächsten Querschnitt des Polyamidteiles nach dem Erreichen der Zugspannungen im alasfaserverstärkten Polyamid (PA6.6 GF30) aufgetreten. Die aufgenommenen Vertikalverformungen sind an Schienenmitte deutlich größer als im Konsolenbereich (siehe Bild 187). Das Versagen ist mit zunehmender Verdrehung (siehe Bild 188 und Bild 187) der Stahlschiene ab dem Konsolenbereich bis zur Schienenmitte begleitet.



Bild 187 Belastungsversuch - Serie K - Prüfkörper 1

Die Ergebnisse der Konsolenbelastungsversuche sind in der Tabelle 68 zusammengestellt. Für den Materialwiderstand wurde ein Materialsicherheitsbeiwert von γ_{M} = 1,5 an den Verbindungen zwischen Schiene, Bolzenanker und Polyamidteil nach [61]. Der Ansatz auf den Mittelwert der Testergebnisse ist damit gerechtfertigt, dass es sich um Polyamid oder Stahl handelt, was versagt. Bei der Berechnung wird für die Einwirkungen dazu gemäß DIN EN 1990/NA ([60], [61]) ein Teilsicherheitsbeiwert γ_{G} von 1,35 angesetzt. Die Auswertung der Ergebnisse der erhaltenen Bruchlasten bei 10 mm (nach DIN EN 846-10 [134]) Vertikalverformung der Konsole (siehe Bild 189) erlauben eine Anwendung der getesteten Konstruktion bis zu einer Höhe von 8 m.

Konsole-	Belastu	ng [KN]			Bem wert	
Stahlbeton - platte C25/30	Bei 10 mm Durch- bieg.	max. P	Teilsicher- heits- beiwert (g _M)	Tragwiderstand P _{R,d} [KN]	Ein- wirkung G _{v,d} [kN] H=8 m	Auslastung in [%]
PK 1	17,42	26,95	1,5	11,61	11,18	96
PK 2	16,73	26,95	1,5	11,15	11,18	100
PK 3	16,52	26,19	1,5	11,01	11,18	101
Mittwert	16,89	26,70	1,50	11,26	11,18	99

Tabelle 68Auswertung der Konsolenbelastungsversuche - Serie K





ild 188 Belastungsversuch - Serie K - Bild Prüfkörper 1-Schienenverdrehung

Ergebnisse der Serie K Konsolenbelastungsversuche



Zur Verhinderung nicht zugelassener Schienenverdrehung (siehe Bild 190) und damit die Behebung der Probleme der Gebrauchstauglichkeit wurde ein neuer Entwurf der Schiene unter Anwendung der verdoppelten Anzahl der Aussteifungsscheiben vorgeschlagen, in dem der Abstand zwischen den aufeinanderfolgenden Aussteifungsscheiben 250 mm statt 500 mm beträgt.

Bild 190 Versuchsdurchführung - Serie K -Schienenverdrehung

Die DIN EN 846-10 [134] gibt als "Bruchkriterium" an:

- das Erreichen des Bruches
- · das Erreichen der 10 mm Verformung als Grenzwert.



Die Ankerschiene lässt sich im Hinblick auf die eingetretenen Verformungen modifizieren, sodass dann als Kriterium der Bruch der oder eines Ankerteiles maßgebend wird. Die nachfolgende Tabelle 69 setzt voraus, dass durch konstruktive Optimierung das Verformungskriterium ausgeschaltet werde konnte (vgl. auch [152]. In diesem Falle lassen sich dann Abfanghöhen von bis zu 12 m ohne weiteres realisieren.

Tabelle 69 Auswertung der Konsolenbelastungsversuche - Serie K nach der Bruchlast des Polyamidteils

Konsole-	Belastur	ng [KN]	Telleleken	Trag-	Democrating	
Stahl- beton- platte C25/30	Bei 10 mm Durch- biegung	max. P	heits- beiwert (y M)	wider- stand P _{Rd} [kN]	Bemessungs- wert Einwirkung G _{v,d} [kN] H=12 m	Auslastung [%]
PK 1	17,42	26,95	1,5	17,97	16,767	93%
PK 2	16,73	26,95	1,5	17,97	16,767	93%
PK 3	16,52	26,19	1,5	17,46	16,767	96%
Mittelwert	16,89	26,70	1,50	17,80	16,767	94%

11.7. Brandversuch

11.7.1. Allgemeines und Anforderungen

Bei diesem Versuch wurde die Durchführung eines original maßstabgerechten Brandversuches nach DIN E 4102-20 an einem Fassadesystem (zweischaliges Mauerwerk) unter Verwendung von Vakuum-Isolations-Paneelen, einem speziell entwickelten Verankerungssystem - Verankerung in "Betondecken" - zum Lastabtrag der Vorsatzmauerschale an der Brandprüfstelle MFPA-Leipzig beauftragt. [154]

Ziel der Untersuchungen war der Nachweis der brandschutztechnischen Eignung des Dämmsystems.

11.7.2. Versuchsgegenstand

Gegenstand dieses Versuches ist das im Lehrstuhl für Tragwerksplanung entwickelte Dämmsystem.

Das Dämmsystem kann bei zweischaligem Mauerwerk, das über eine mittlere Dämmschicht aus Vakuum-Isolations-Paneelen verfügt, eingesetzt werden. Die tragende Wand besteht aus Kalksandstein, wobei für die Außenwandschale Fassadenklinker verwendet wurden.

Das Dämmsystem besteht aus Hochleistungsdämmplatten (VIP), die mittels eines dazu an der TU Dresden, im Lehrstuhl für Tragwerksplanung entwickelten Verankerungssystems an der tragenden Wand befestigt wird.

Das Verankerungssystem verfügt über einen speziellen Anker, eine Konsole und die zur Installation benötigten Metallteile. Die Anker und die Konsolen sind mehrteilig. Der Anker besteht aus drei Teilen. Der erste Teil ist eine doppelseitige Duplexstahlschraube mit einem dafür geeigneten Dübel und wird an der Innenwandschale eingebracht. Das zweite Bestandteil ist eine an die Schraube angepasste Kunststoffmutter aus glasfaserverstärktem Polyamid (PA6.6 GF 30). Das dritte Ankerteil bilden zwei Duplexstahlflügel (Bild 191). Diese dienen zur Haltung der Vormauerschale und zur Aufnahme entstehender horizontaler Auswirkungen.



Bild 191 Anker im Detail, Schnitt und 3D

Der Hauptteil der Konsole besteht wie beim Anker aus glasfaserverstärktem Polyamid (PA6.6 GF30). Dieser Teil wird mittels eines Bolzenankers des Typs Fischer (FAZ II M12 / 30, DIN A4) mit einer dazu geeigneten Mutterschraube an der Betonplatte angebracht. Zur Abtragung des Vormauergewichtes wird eine Stahlschiene an der Konsole befestigt (Bild 192).





Konsol im Detail: Schnitt und 3D Modell

Die Vakuum-Isolations-Paneele (VIP) bilden den Kern des Dämmsystems. Diese bestehen aus einem evakuierten Kern, der mit Randstreifen aus Hartschaum (25 mm) und zwei dünnwandigen Schutzschichten (2 mm) aus hartem PVC geschützt wird (Bild 193).

Um das Brandverhalten des entwickelten Dämmsystems zu verbessern sowie dessen thermische Dämmeigenschaften beim Brandfall unbeeinträchtigt einzuhalten, wurde ein Brandriegel in dem System unter den Konsolen unmittelbar von der Ebene der Betonplatte eingeführt. Der Brandriegel wird hauptsächlich aus einem Hochleistungsdämmstoff (CALOSTAT von EVONIK) hergestellt. Dieser Dämmstoff ist nicht brennbar (Baustoffklassifizierung A) und verfügt über eine sehr niedrige Wärmeleitfähigkeit. Der CALOSTAT-Kern wird anhand von zwei dünnen Schichten geschützt. Die Außenschicht bildet eine



zementgebundene Platte (Fermacell Powerpanel, Brandschutzklasse A1) und die innere besteht aus Steinwolle (Brandschutzklasse A1). Die Herstellung des Brandriegels erfolgt daher plattenweise und wurde im eigenen Labor des Lehrstuhls für Tragwerksplanung an der TU-Dresden in Zusammenarbeit mit EVONIK angefertigt (Bild 194).



Bild 193 Aufbau der VIP-Paneele



Bild 194 Brandriegelposition im Dämmsystem- Detail des Brandriegels (CALOSTAT-Kern + 2 Schutzschichten aus Materialien der Brandklasse A1)



Wärmedämmung

Die verwendeten Vakuum-Isolations-Paneele Typ "QASA" (bauaufsichtliche Zulassung Nr. Z-23.11-1779) bestehen aus einem Stützkern aus Kieselsäure, der unter Vakuum umhüllt und in eine mehrlagige Hochbarrierefolie eingeschweißt wird. Dieser Kern wird vierseitig mit einer 25 mm dicken PUR-Hartschaumschicht geschützt. Ober- und Unterseite sind vollflächig mit Deckschichten aus hartem PVC kaschiert, zusätzlich wird auf der Oberseite eine zweite Deckschicht versetzt aufgeklebt und dient der Verankerung der Paneele.

- Baustoffklasse: B2, normalentflammbar nach DIN 4102-1 bzw.
 - DIN EN13501-1
 - Plattendicke: ca. 43 44,5 mm
- Format: 505 x 505 mm
- auf massivem mineralischen Untergrund verschraubt (Parallel-Spreizdübel Bizeps mit Edelstahlschraube)
- Verankerungssystem

Das Verankerungssystem besteht aus speziellen mehrteileigen Ankern, Konsolen und diversen, für die Installation notwendigen Metallteilen, Bild 195).

Der Anker selbst besteht aus drei Teilen:

- Doppelseitige Duplexstahlschraube (zusammengeschweißter Gewindestift) und Dübel (Fischer Rahmendübel FUR) für die Verankerung im massiven Mauerwerk (Innenwandschale)
- Kunststoffmutter (an die Schraube angepasst) aus glasfaserverstärktem Polyamid (PA6.6 GF 30)
- zwei Duplex-Stahlflügel (Ober- und Unterflügel) zur Arretierung der Vorsatzmauerschale und zur Aufnahme entstehender Horizontalkräfte





Bild 195 Anker : Links im Eingebauten Zustand, Rechts – 3D Darstellung

Die Konsole, bestehend aus glasfaserverstärktem Polyamid (PA6.6 GF 30) wird mit einem Bolzenanker (Fischer FAZ II M12) und geeigneten Schrauben (M12) in den "Betondecken" oberhalb der Brandriegel verankert.

An der Konsole wird dann eine Stahlschiene (L-Profil aus Edelstahl) befestigt, um den Lastabtrag aus dem Vormauerwerk zu gewährleisten (Bild 196).





Bild 196 Konsole und Stahlschiene im Beton verankert

- <u>Hinterlüftung</u>
 - Abstand zwischen Dämmung und Verkleidung: ca. 25 mm
 - am Sturz wurde die freie Öffnung des Luftspaltes bis auf den Eckbereich durch ein Stahlblech (MOSO Winkelauflager WA-Ü aus Edelstahl) abgedeckt; zur Vermeidung von Kondenswasserbildung an den Brandriegeln wurden Vertikalfugen in der Klinkerfassade in jeweils einer Reihe unter und über den Brandriegel <u>nicht</u> mit Mörtel verschlossen (Zuund Abluft von ca. 34 cm²/lfm).
- Vorsatzschale
 - Klinker NF 71x240x115
 - Konsolen mit Stahlschienen dienen dem Lastabtrag des Klinkermauerwerks
 - oberhalb des Sturzes wurde die vertikale Klinkerreihe auf einem Winkelprofil aus Stahlblech abgesetzt, so dass eine direkte Beflammung des Brandriegels nur an dessen Unterseite erfolgen konnte (s. Bild 12 der Anlage 4)
 - Prüfaufbau seitlich geschlossen, an der Oberseite offen
- Brandschutzmaßnahmen

Um das Brandverhalten des entwickelten Dämmsystems zu verbessern sowie dessen thermische Dämmeigenschaften beim Brandfall unbeeinträchtigt einzuhalten, wurde ein Brandriegel in dem System unter den Konsolen unmittelbar von der Ebene der Betonplatte eingeführt(Bild 197, Bild 198 und Bild 199). Der Brandriegel besteht aus:

- zwei umlaufende Brandriegel ca. 0,1 m und ca. 3,0 m über Sturz
- bestehend aus:
 - ~ einem Hochleistungsdämmstoff (CALOSTAT-Kern)
 - ~ einseitig auf einer Fermacellplatte (Fermacell Powerpanel) appliziert
- ~ Vorderseite mit 10 mm Steinwolle kaschiert
- Querschnitt der Brandriegel: 120 x 70 mm
- Baustoffklasse (alle Bestandteile des Brandriegels): A1, nichtbrennbar nach DIN EN13501-1 bzw. 4102-1
- im massiven Untergrund verschraubt (Parallel Spreizdübel PSD Bizeps mit Edelstahlschraube)









mit Bild 199

der

Bild 197 Brandriegel

Bild 198

Konsole Stahlschiene, darunter Brandriegel Winkelprofil am Sturz zur Aufnahme der vertikalen Klinker

11.7.3.Prüfmethode

Der Prüfansatz entsprach dem DIN-Entwurf 4102-20 "Besonderer Nachweis für das Brandverhalten von Außenwandbekleidungen" als Bestandteil der Zulassungsgrundsätze des Deutschen Instituts für Bautechnik. Auf einem Versuchsstand (Außenwand im natürlichen Maßstab mit einspringender Gebäudeecke), wurde das zu untersuchende Fassadensystem (zweischaliges Mauerwerk) unter Verwendung horizontal umlaufender Brandsperren 0,1 m und 3,0 m oberhalb des Sturzes (unterhalb der "Betondecken") im originalen Einbauzustand befestigt und mittels eines Gasbrenners bei natürlichen Lüftungsbedingungen über einen Zeitraum von 30 Minuten (Prüfzeit für nichtbrennbare Außenwandbekleidungen) thermisch beansprucht.

11.7.4. Prüfstand / Prüfaufbau/ Brandmodell

Die Brandprüfung wurde witterungsunabhängig unter natürlichen Lüftungsbedingungen in einem hinreichend großen Brandraum (Länge 7,7 m, Breite 3,5 m, Höhe 7,0 m) durchgeführt (Bild 200 und Bild 201).

Die Belüftung des Raumes erfolgte durch eine Zuluftöffnung (Tor: 3,0 m breit und 3,0 m hoch; tlw. geöffnet) auf Bodenniveau in der Vorderwand des Prüfraumes und die Rauchgasabführung durch eine Abgasöffnung (Abgasschlot 3,0 m breit, 1,0 m tief und 2,0 m hoch) in der Brandraumdecke oberhalb der Versuchswand (Prüfstand Anlage 2, Abb. 1).

Der Prüfkörper hatte eine Breite von 3,5 m (Rückwand ca. 2,2 m, Eckwand 1,3 m) bei einer Höhe von 6,2 m. In der Rückwand des Versuchsstandes befand sich in der rechten unteren Ecke eine Brandkammer, Breite 1 m, Höhe 1 m und Tiefe 0,8 m, in der der Gasbrenner positioniert wurde (Bild 201).

Die Wände der Brandkammer bestanden aus Materialien der Baustoffklasse A. Das Fassadensystem wurde direkt auf den Wänden des Versuchsstandes appliziert.





Bild 200 Detail des Brandversuchsmodell-Sicht zur Brandöffnung





Details des Brandversuchsmodell-Schnittes durch die Brandöffnung









a) Sturzbereich

b) offene Vertikalfugen ober- und unterhalb des Brandriegels

c) Sturzunterseite

Länge 800 mm x Breite 312 mm x Höhe 200 mm

Bild 201 Detail der Öffnung im Brandmodell

11.7.5. Versuchsbedingungen

Die Anordnung des Gasbrenners in der Brandkammer simuliert ein Szenario, wie es für den Feueraustritt aus einem offenen Fenster eines sich im Vollbrand befindlichen Wohnraumes auf eine Fassade typisch ist.

- Gasbrenner:
- diffuser Gasbrenner mit zusätzlicher Frischluftbeimischung
- Propangas strömt von unten in eine rechteckige, mit Kies gefüllte Wanne und wird durch ein Prallblech und die Kiesschüttung gleichmäßig verteilt
- Wannengröße:
 - freie Brennerfläche: 2496 cm²
 - Gasdurchsatz: 7,4 g/s
- Luftzufuhr: 36.000 l/h bei 4 bar
- Brennerposition in der Brandkammer:
 - Abstand Brenneraußenkante zur Brandkammerwand 3 cm, das heißt unmittelbar an der Eckwand
 - ~ Brennervorderkante 10 cm hinter der Rohbauwand
 - ~ Abstand Brenneroberkante zur Sturzunterkante 35 cm
- Zündung:
 - Zündmittel: offene Flamme (Zündlicht)
- Lüftungsbedingungen:
 - natürliche Lüftung
 - Zuluftöffnungsfläche \leq 9 m² (Tor 3 m hoch und 3 m breit) nur teilweise geöffnet
 - Abgasöffnungsfläche 3,0 m² (3,0 m x 1,0 m), Höhe des Abgasschlotes 2,0 m
 - Verhältnis der Zuluftfläche zur Abgasfläche etwa 2:1



11.7.6. Mess- und Registrierdaten

Während des Versuches wurden folgende Messgrößen erfasst:

Temperaturen

- Brandkammer:
 - ~ an drei Messstellen mittig unterhalb des Brandkammersturzes 40 mm, 80 mm und
 - 120 mm in die Brandkammer hineinragend (S1 bis S3)

- Abschlussbeschichtung (Wandbekleidungsplatten)

- ~ 5 mm vor der Oberfläche, an 33 Messstellen (O0 O28)
- ~ 100 mm vor der Oberfläche, an 9 Messstellen (X0 X7)
- ~ in der Mitte des Dämmstoffes an 8 Messstellen (T1 T7)
- ~ in der Mitte des Luftspaltes an 24 Messstellen (D1 D21)
- ~ im Abgasstrom (in halber Höhe des Abluftschlotes), an 6 Messstellen (R2/1 -R2/6)
- Gaskonzentration O₂ und CO₂
 - im Abgasstrom in halber Höhe des Abluftschlotes kontinuierliche Entnahme mit einer Vierfachsonde an den Punkten A D; Messung mit einer Sidor-Gasanalyseanlage
- · Flammenhöhen:
 - visuell durch Vergleich mit Messmarken

Alle Temperaturen wurden mit NiCr-Ni-Mantelthermoelementen Typ K nach JEC 584, Teil 1, mit einem Thermodrahtdurchmesser von 0,37 mm und einem Manteldurchmesser von 3 mm gemessen und online mit einem Messsystem TUM 99-2 registriert (Zykluszeit 10 Sekunden).

Die Anordnung der Temperaturmessstellen am Prüfkörper ist in der Abbildung 3 der Anlage 1.2 dargestellt. In der Abbildung 3 findet sich die Messstellenverteilung im Abgasschlot (Temperaturen und Gasanalyse).

Unmittelbar vor dem Versuch wurden Lufttemperatur, Windrichtung, Luftdruck und die relative Luftfeuchte erfasst.

11.7.7. Versuchsdurchführung

11.7.7.1. Versuchsbeobachtungen

Versuchstermin Äußere Bedingunger	n (Tabelle 70)	20.10.2015
*	Temperatur:	8 °C
*	Windrichtung:	N/W
*	Luftdruck:	1018 hPa
*	relative Luftfeuchte:	88 %
Prüfungsdauer:	30 Minuten bei einer Brennerle mind. 60 Minuten Beobachtung	istung von ca. 350 kW gszeit



Tabelle 70	Versuchsbeobachtungen
------------	-----------------------

Prüfminute	Versuchsbeobachtungen
1.	Versuchsbeginn - der Gasbrenner wird gezündet; unmittelbar Entflammung und eigenständig fortschreitendes Brennen des in den Leibungen freiliegenden PUR- Schaumes der Vakuum-Isolations-Paneele beginnend Rauchaustritt aus offenen Vertikalfugen ober- und unterhalb der Brandriegel; max. Flammenlänge ca. 2,1 m*
2 5.	weiterhin Rauchaustritt aus den offenen Vertikalfugen und am Fassadenfuß max. Flammenlänge ca. 2,5 m*
6.	zunehmende Rußablagerungen im Einflussbereich der Prüfflamme an der Klinkerfassade; nachlassendes Brennen in den Leibungen, PUR-Schaum ist teilweise verkrackt / verkohlt max. Flammenlänge ca. 2,3 m*
7 15.	weiterhin Rauchaustritt aus den offenen Vertikalfugen, an den seitlichen Prüfkörperrändern tritt jetzt ebenfalls Rauch aus; in den Leibungen sind kaum noch Flammen erkennbar; an der Fassadenoberfläche sind <u>keine</u> Verformungen, Abplatzungen oder Absprengungen erkennbar max. Flammenlänge ca. 2,0 m*
16 25.	an der Fassadenoberfläche sind Rußablagerungen bis zur Prüfkörperoberkante erkennbar; unvermindert tritt Rauch aus den offenen Vertikalfugen aus max. Flammenlänge ca. 2,1 m*
26. – 30.	im direkten Flammeneinflussbereich oberhalb des Sturzes verbrennt der Ruß max. Flammenlänge 2,1 m*
31.	Versuchsende nach Ablauf von 30 Prüfminuten, der Gasbrenner wird abgeschaltet; lokal begrenztes Brennen in den Leibungen ist zu beobachten, ebenso Glimmen/Glühen an der Sturzunterseite; im Verlauf der Beobachtungszeit verlöschen alle Flammen, jedoch ist weiterhin Rauchaustritt aus den offenen Vertikalfugen ober- und unterhalb beider Brandriegel zu beobachten

*Bezugsebene für die angegebenen Höhen ist der Brandkammersturz

Dias nachfolgende Bild 202 vermittelt einen Eindruck vom Brandgeschehen während der Prüfung.



a) 2. Prüfminute

b) 13. Prüfminute

c) 25. Prüfminute

d) nach Ablauf von 30 Prüfminuten

Bild 202 Brandgeschehen während der Prüfung



11.7.7.2. Flammenhöhen

Die Flammenhöhen erreichten von der 2. bis zur 5. Prüfminute vor der Fassadenoberfläche eine maximale Höhe von ca. 2,5 m.

Ein Flammeneintritt in den Luftspalt war durch die Anordnung des Sturzbleches und des Brandriegels oberhalb des Brandkammersturzes unwahrscheinlich. Direkte Beobachtungen während des Versuches waren jedoch nicht möglich.

11.7.7.3. Zusammenfassung der Versuchsbeobachtungen

Die Versuchsbeobachtungen sind in der Tabelle 71 erfasst.

Tabelle 71	Versuchsbeobachtungen	(20	Minuten	Prüfzeit;	mind.	60	Minuten
Beobachtur	ngszeit)						

Branderscheinung	Zeitpunkt des Auftretens Dauer		Maximale Ausdehnung*		
	(Prüfminute) (Minuten)				
Brennen an der Oberfläche der		kein			
Klinkerfassade					
Brennen im Luftspalt	nicht beobachtbar				
maximale Flammenlänge vor der	2.	4	2,5 m*		
Fassade					
Abfallen brennender oder	kein				
nichtbrennender Teile					
Brennendes oder	r kein				
nichtbrennendes Abtropfen					

Branderscheinung	Zeitpunkt des Auftretens	Dauer	Maximale Ausdehnung*		
	(Prüfminute)	(Minuten)			
Rauchentwicklung	im gesamten Versuchsverlauf deutlicher Rauchaustritt aus offenen				
	Vertikalfugen im Klinkermauerwerk ober- und unterhalb der Brandri				
	geringfügig auch am Fassadenfuß und den seitlichen Prüfkörperra				
Besonderheiten	Entflammung und geringfügig eigenständiges Brennen in den Leibungen				
(außenliegender PUR-Schaum der VIP)					

*Bezugsebene für die angegebenen Höhen ist der Brandkammersturz

11.7.8.Ergebnisse

11.7.8.1. Temperaturmessung

Maximaltemperaturen

Die an ausgewählten Prüfbereichen registrierten zeitunabhängigen Maximaltemperaturen sind in der nachfolgenden Tabelle 72 zusammengefasst.

Bei Brandversuchen nach DIN E 4102-20 ist die Bemessungsgrenze für die vertikale, geschoss-übergreifende Brandausbreitung in einer Höhe von 3,5 m über dem Sturzbereich definiert. Systembedingt befindet sich die entsprechende Messachse im Luftspalt und in der Dämmung im konkreten Fall 3,7 m oberhalb des Sturzes.

U.a. sind die Temperaturen vor der Putzoberfläche (3,5 m ü. Sturz) und dahinter (3,7 m ü. Sturz) relevant und dürfen weder an der Oberfläche noch im Inneren des Prüfkörpers (hier Luftspalt und Dämmung) über eine Dauer von mehr als 30 Sekunden (kontinuierlich) Werte



von 500 °C überschreiten. Die während des Versuches in einer Höhe von 3,7 m ermittelten Temperaturen überschritten <u>mittig</u> oberhalb der Brandkammer die zulässigen Grenzwerte zu keinem Zeitpunkt. Sowohl Dämmung als auch Unterkonstruktion wiesen, abgesehen von Rußablagerungen keine Brandschäden auf.

Tabelle 72	Zeitunabhängige Ma	iximaltemperaturen	mittig oberhalb	der Brandkammei
------------	--------------------	--------------------	-----------------	-----------------

Messort		Temperaturen [°C] in verschiedenen Höhen*							
	Sturz*	0,25 m*	0,5 m*	1 m*	2 m*	3 m*	3,5 m*	4 m*	5 m*
5 mm von der Oberfläche entfernt (O0-O32)	816	876	835	697	329	190	153	135	101
100 mm von Oberfläche entfernt	930	855	689	554	311	186	146	127	101
	Sturz*	0,45 m*	0,7 m*	1,2 m*	2,2 m*	3,2 m*	3,7 m*	4,2 m*	5 m*
in der Mitte des Dämmstoffes (T1 bis 7)	-	58	54	43	32	21	14	15	15
im Luftspalt (D1bis D21)	-	63	55	47	31	22	14	17	15

*bezogen auf den Brandkammersturz

zeitunabhängige Maximaltemperaturen in Isothermendarstellung Die zeitunabhängige maximale thermische Beanspruchung in Isothermendarstellung vermittelt einen Eindruck über die maximal auftretende Brandausbreitung in vertikaler und horizontaler Richtung sowohl vor der Fassadenoberfläche (5 mm Abstand) als auch im





Bild 203 zeitunabhängige Maximaltemperaturen in Isothermendarstellung vor der Fassadenoberfläche und im Luftspalt



 thermische Beanspruchung im Sturzbereich und im Luftspalt
 Die hohe Intensität der thermischen Beaufschlagung insbesondere des Sturzbereiches während der 30 Minuten andauernden Prüfzeit verdeutlicht das nachfolgende Diagramm.
 Unterhalb des Brandkammersturzes lagen die Temperaturen von der 2. bis zur 30.
 Prüfminute oberhalb von 800 °C (Bild 204).



Bild 204 Temperaturen an der Unterseite des Brandkammersturzes (Flammenaustrittstemperatur)

Die im Luftspalt registrierten Temperaturen hingegen zeigten keine nenneswerten Veränderungen und liefern somit den Nachweis, dass ein Flammeneintritt in den Luftspalt durch den Brandriegel oberhalb des Sturzes sicher verhindert wurde (Bild 205).



Bild 205 Temperaturen im Luftspalt mittig oberhalb der Brandkammer über die Höhe verteilt

11.7.8.2. Konzentration der Gase O₂ und CO₂ im Abgasschlot

Die im Abgasstrom ermittelten Konzentrationen der Gase O₂, CO₂ und CO veränderten sich gegenüber ihren Ausgangswerten nur unwesentlich (Anhang).

11.7.8.3. Zustand des Prüfkörpers nach dem Versuchsende

· Vorsatzmauerwerk (Klinker)

Das Vorsatzmauerwerk an Rück- und Eckwand wies, abgesehen von Rußablagerungen, keine Schäden auf (Tabelle 73). Siehe auch Anhang.

Tabelle 73Zustand des Vorsatzmauerwerks

Vorsatzmauerwerk (Klinker)	
verfärbt / verrußt	vertikal 5,0 m*
	horizontal ca. 1,2 m
Risse / Abplatzungen / abgefallene Plattenteile	keine
Brandschädigung nach DIN 4102-1	keine

*Die angegebenen Höhen beziehen sich auf den Brandkammersturz

Unterkonstruktion, Dämmung und Brandriegel

Nach einer ausreichenden Abkühlphase wurde das Vorsatzmauerwerk entfernt.

Der Zustand der Unterkonstruktion, der Dämmung und der Brandriegel nach dem Versuch sind in der Anlage (Kapitel 14.3.) dokumentiert.

Dämmung und Unterkonstruktion (Anker und Konsolen) wurden oberhalb des Brandriegels ausschließlich durch Heißgase thermisch beansprucht und wiesen geringe Verfärbungen und Verformungen auf. Brandschäden entstanden an der Dämmung nur unterhalb des ersten Brandriegels, dort kam es zu einer begrenzten horizontalen Brandausbreitung. Der in den Leibungen freiliegende PUR-Schaum der Paneele war teilweise verbrannt / verkohlt.

Der Brandriegel oberhalb des Sturzes wies Verfärbungen auf und war im direkten Flammeneinflussbereich geringfügig thermisch verändert, haftete jedoch fest am Untergrund und war formstabil. Ein Flammenüberschlag über diesen Brandriegel hinaus kann ausgeschlossen werden.

Der zweite Brandriegel 3,0 m oberhalb des Sturzes war keiner Brandbeanspruchung ausgesetzt, wies demzufolge auch keinerlei Veränderungen auf (Tabelle 74).

Tabelle 74 Brandschäden an Dämmung / an Brandriegeln / an Ankern und Konsolen

Dämmung / Verankerung / Brandriegel	
Brandschädigung der Dämmung nach DIN	horizontal: ca. 0,7 m links und rechts der
4102-1 unterhalb des ersten Brandriegels	Brandkammer
Brandschädigung der Dämmung nach DIN	keine
4102-1 oberhalb des ersten Brandriegels	
Brandschädigung des Brandriegels 0,1 m ü.	horizontal: ca. 1,0 m - thermisch verändert
Sturz	/ verfärbt
Brandschädigung des Brandriegels 3,0 m ü.	keine Schädigung
Sturz	
Brandschädigung an Ankern und Konsolen	Keine die Funktionalität beeinträchtigende
	Schäden

*Die angegebenen Höhen beziehen sich auf den Brandkammersturz



Das nachfolgende Bild 206 vermittelt einen Eindruck vom Zustand des Prüfkörpers nach dem Versuch.



Bild 206 Zustand des Prüfkörpers nach dem Versuch

11.7.9. Zusammenfassung der Ergebnisse des Brandversuches

Ein Fassadensystem (zweischaliges Mauerwerk) unter Verwendung von Vakuum-Isolations-Paneelen, einem speziell entwickelten Verankerungssystem im Bereich von "Betondecken" und darunter angeordneten Brandriegeln der TU Dresden, Lehrstuhl für Tragwerksplanung wurde in einem originalmaßstäblichen Brandversuch nach den Zulassungsgrundsätzen des DIBt (DIN E 4102-20) geprüft.

Das System wurde mit zwei speziellen umlaufenden Brandriegeln 0,1 m und 3,0 m über Sturz ausgeführt. Der Luftein- und -auslass war auf offene Vertikalfugen in der Klinkerfassade in jeweils einer Reihe unter und über den Brandriegel beschränkt (Zu- und Abluft von ca. 34 cm²/lfm).

Der Abstand zwischen Dämmung und Vorsatzmauerwerk oberhalb des ersten Brandriegels betrug ca. 25 mm.

Die hohe Flammenaustrittstemperatur führte im direkten Flammeneinflussbereich frühzeitig zu Rußablagerungen und Rauchaustritt aus den offenen Vertikalfugen ober- und unterhalb der Brandriegel.

Branderscheinungen am Prüfaufbau wurden während der 30 Minuten andauernden Prüfzeit nicht beobachtet. Lediglich in den Brandkammerleibungen kam es zur Entflammung des freiliegenden PUR-Schaumes (Randstreifen 25 mm) der Paneele (VIP) und einer sich anschließenden lokal begrenzten horizontalen Brandausbreitung hinter der Klinkerfassade – beschränkt auf den Bereich unterhalb des ersten Brandriegels.



Das Vorsatzmauerwerk hielt der Brandbeanspruchung ohne Einschränkungen stand, Verformungen oder Abplatzungen wurden nicht beobachtet.

Nach Ablauf einer Prüfzeit von 30 Minuten wurde der Versuch beendet. Es schloss sich eine mind. 60 Minuten andauernde Beobachtungszeit an, in deren Verlauf die vereinzelt noch sichtbaren Flammen in den Leibungen eigenständig erloschen. Rauchaustritt aus den offenen Vertikalfugen konnte noch über einen Zeitraum von etwa 25 Minuten beobachtet werden. Nach Entfernung des Vorsatzmauerwerks wurden keine nennenswerten Brandschäden an der Dämmung und der Verankerung festgestellt.

Bewertungskriterien nach DIN E 4102-20 für die Brandausbreitung

Die Bewertung der Ergebnisse des Brandversuches ist in der Tabelle 75 dargestellt.

Bewertungskriterium	Bemessungskriterium	Versuchsergebnis		
Schädigung	Die Brandschädigung des Prüfkörpers nach	maximale Höhe der		
	DIN 4102-1 darf weder an seiner Oberfläche	Brandschädigung über dem		
	noch im Inneren eine Höhe von 3,5 m oberhalb	Brandkammersturz		
	der Unterkante des Brandkammersturzes	Klinker: ca. 0,7 m		
	(Rohbausturz des Versuchsstandes)	Dämmung: keine		
	überschreiten.			
Temperaturen	Die Temperaturen dürfen weder an der	Oberfläche: 153 °C		
(Messstrecke in 3,5 m	Oberfläche, noch hinter der Oberfläche	Luftspalt: 14 °C		
Höhe oberhalb des	(Luftspalt bzw. Dämmebene) über eine Dauer	(3,7 m ü. Sturz)		
Brandkammersturzes)	von mehr als 30 s (kontinuierlich) Werte von			
	500 °C überschreiten			
Flammenhöhen	Oberhalb einer Höhe von 3,5 m über der			
	Unterkante des Brandkammersturzes dürfen	vor der Oberfläche: 2,5 m		
	keine permanenten, kontinuierlichen Flammen			
	Luftenalt, kein erkennharen			
	wahrnehmbar sein. Zu keinem Zeitpunkt sind	Luftspalt: Kein erkennbares		
	biennen			
	tolerabel			

Tabelle 75 Bewertungskriterien f ür die Brandausbreitung

*Die angegebenen Höhen beziehen sich auf den Brandkammersturz

• Brandnebenerscheinungen

In der Tabelle 76 wurden die Brandnebenerscheinungen erfasst.

Tabelle 76Brandnebenerscheinungen

Branderscheinungen	Bemessungskriterium	Versuchsergebnis
Abfallen und Abtropfen von brennenden und nichtbrennenden Teilen	Die Dauer des Vorgangs darf die Be- flammungsdauer (20 Minuten) nicht überschreiten und ein möglicherweise am Brandraumboden entstehender Sekundärbrand darf in seiner seitlichen Ausdehnung die Breite der Flamme des "Primärbrandes" (Prüffeuer) nicht	kein Abfallen oder Abtropfen von brennenden oder nichtbrennenden Teilen



Branderscheinungen	Bemessungskriterium	Versuchsergebnis
Brennen / Glimmen	nach einer maximalen Prüf- und Beobachtungszeit von 90 Minuten darf an keiner Stelle des Prüfkörpers ein Brennen oder Glimmen (keine Temperaturen von mehr als 50 °C) feststellbar sein. <u>Anmerkung</u> Brandprozesse, auch Glimmen, bis zu diesem Zeitpunkt sind sowohl fortschreitend, als auch lokal begrenzt tolerabel, wenn die oben genannten Schädigungsgrenzen nicht überschritten werden.	Temperaturen an allen Messpunkten vor der Oberfläche < 50°C im Dämmstoff < 60 °C (weiter fallend)

11.8. Tragfähigkeit des Verankerungssystems, Luftkissenversuch

11.8.1.Allgemeines

Zur Begrenzung der Durchbiegung der Vormauerschale wird bei zeilenhafter bzw. spaltenhafter Befestigung der Vorsatzschale eine zusätzliche, meist mittig angeordnete Ankerzeile oder – spalte eingefügt.

Bei diesem Versuch wird die obengenannte, linienförmige Verankerungsweise, welche bei zweischaligen Mauerwerkswänden zur Befestigung hocheffektiver Dämmtechnik zum Einsatz kommen soll, geprüft (Bild 207).

Hauptziele dieses Versuches sind:

- Festlegung der Stabilität der Vorsatzschale, die mittels eines entwickelten Verankerungssystems in linienförmiger Verankerungsweise vorgehängt wird.
- Rationalisierung der Ankeranzahl und damit Effizienzsteigerung bei der Bauwerkserrichtung durch Materialeinsparung und Minimierung der Arbeitsgänge der Vakuumdämmung pro Geschoss durch Vergrößerung der Dämmplattenabmessungen.
- Verringerung der Durchstoßpunkte und damit einhergehende Verbesserung der wärmetechnischen Lösung.
- Ausschließen von der Versagens- sowie Herausfallengefahr der durch linienförmigen Verankerung befestigten, geschosshohen Vormauerschale unter Horizontallast und aufgrund zu geringer Auflast unter Biegezug.
- Ausnutzung der maximalen Biegetragfähigkeit der Vormauerschale durch die vertikal angeordnete, linienförmige Verankerung (Bruchlinie senkrecht zu Lagerfuge)

Bei diesem Versuch ist die Tragfähigkeit und die Verformung der Einzelteile des Verankerungssystems zu erforschen sowie die Verformungen der Vorsatzschale und tragenden Mauerschale bei horizontalen Auswirkungen (Windbelastung) zu betrachten. Bei der Vorbereitung und Durchführung dieser Versuche sind die zutreffenden Randbedingungen einzuhalten bzw. zu realisieren.





Bild 207 Angewendete Verankerung der Vorsatzschale beim Luftkissenversuch [2]

11.8.2. Versuchsaufbau

11.8.2.1. Prüfrahmen

Für die Versuchsdurchführung wurde mittels eines speziell angefertigten Belastungsrahmens aus S235 realisiert. Der Prüfrahmen wird aus zusammengeschweißten Metallteilen Profilstahl Prüfhallenkranes aus der Sorte S235 mittels des zusammengeschraubt. Der Rahmen könnte in unterschiedlichen Abmessungen, je nach verfügt Prüfkörperlänge, zusammengebaut werden und über maximale Außenseitenabmessungen von (L x H x B: 6,44 x 3,44 x 0,8 m). Unter Berücksichtigung der Maße der Profilquerschnitte können mit diesem Prüfrahmen Wände bis zu einer maximalen Abmessung von (L x H: 6 x 3 m) geprüft werden (Bild 208).







Bild 208 Prüfrahmen

11.8.2.2. Airbags

Das Aufbringen der Windbelastung wird durch Airbags realisiert. Die Airbags werden zwischen dem zu prüfenden Mauerwerk (vor der Vorsatzschale) und einer Stützwand (hier die Hintermauerschale) positioniert. Die Airbags haben Abmessungen von (L x H x B: 1,5 x 3 x 0,2 m) (Bild 210). Jeder Airbag verfügt über 4 Öffnungen mit einem Durchmesser von 16 mm. Das maximal aufnehmbare Luftvolumen beträgt etwa 0,9 m3 pro Airbag. Der Raum zwischen der Vorsatzschale und der Stützwand beträgt max. 7 cm damit das Aufblasen der Airbags die gewünschten Drucklasten an der Vorsatzschale aufbringen kann. Hier wird mit einem maximalen Luftdruck von 0,5 Bar gerechnet, welcher für die maximal erwarteten Bruchverformungen ausreichend ist.





Bild 209 Rückseite des Versuchsrahmens mit Hintermauerung und zusätzlicher Aussteifung







Bild 210 Eingehangene Airbags

11.8.3.Zu prüfendes Mauerwerk (Prüfkörper)

Der Versuch soll an 2 Prüfkörper mit den Abmessungen ca. 3 x 3 m durchgeführt werden. Jeder Prüfkörper ist eine zweischalige Mauerwerkswand. Der Aufbau dieser Wand besteht aus einer Hintermauerung aus Kalksandsteinen (175 mm), einer Vorsatzschale (115 mm), die mittels einer Verankerungstechnik (Bild 211) vorgehängt wird, sowie einer dazwischenliegenden Hinterlüftung (65 -70 mm). Das Wandsystem verfügt über eine Gesamtdecke von (35,5 cm) und wird im bereit stehenden Prüfrahmen (Gesamtbreite 40 cm) aufgemauert (Bild 212).





a) entwickelter Anker





b) Befestigung der Anker an der Hintermauerschale

c) Aufmauern des Fassadenklinkers-Endzustand

Bild 211 Zu prüfende Verankerung





Bild 212 Prüfkörper - Zweischaliges Mauerwerk mit linienförmiger Verankerung



11.8.4. Messtechnik

Bei diesem Versuch sind die Verformungen der Vorsatzschale sowie die Längsverformungen des Ankers zu betrachten.

Bei der Vorsatzschale werden IWA,s auf der Außenseite nach dem dargestellten Raster im Bild 213 durch passende Halterungen aufgebracht. Damit werden die entstehenden Verformungen erfasst.

Die Längsverformungen und der Schlupf der Anker bei jeder Ankerreihe werden dementsprechend aus den darauf aufgebrachten IWA,s entnommen (Bild 213).



Bild 213 Prüfkörper - Zweischaliges Mauerwerk mit linienförmiger Verankerung (vertikal) mit Messstellen



11.8.5. Schritte des Versuchsaufbaues

Der Versuch wird in dieser Reihenfolge aufgebaut (Bild 214):

- 1. Zusammenbau des Prüfrahmens mittels Hallenkran und seitliche Stützung des Rahmens
- 2. Aufmauern der tragenden Mauerschale aus Kalksandstein (17,5 oder 24 cm)
- 3. Installation des Verankerungssystems, 3 Ankerreihen
- 4. Verlegen der Airbags und Anschließen der Leitung der Luftpumpe
- 5. Aufmauern der Vorsatzschale aus Fassadenklinker (11,5 cm)
- 6. Installation der Messtechnik und anschließend Versuchsdurchführung



Bild 214 Luftkissenversuch: Versuchsaufbau

11.8.6. Versuchsdurchführung

Der Versuch beginnt beim Aufblasen der Airbags. Das maximal aufnehmbare Luftvolumen beträgt etwa 1,8 m3 für beide Airbags. Da der Abstand zwischen Prüf- und Hintermauer/Stützwand nur [6,5 cm] ist, beginnt der Luftdruck im Manometer ab dem aufgeblasenen Volumen von 0,6 m3 zu steigen.

Unter Berücksichtigung der Höchsttragfähigkeit [EC6] aller planmäßig zu prüfenden Wände liegt der Bruchluftdruck bei etwa 0.15 Bar= 15 kN/m².

Der Luftdruck in den Airbags (Luftdruckmessdosen) sowie die Änderung der horizontalen Prüfwandverformung (IWA, s) sind im Laufe des Versuches ständig zu kontrollieren.

Der Versuch endet bei einem dieser folgenden Fälle:

- 1- Versagen der Vorsatzschale
- 2- Versagen der tragenden Mauerschale
- 3- Versagen des Ankersystems (Gesamt- oder Einzelteile)

11.9. Versuchsbegleitende Materialprüfungen

11.9.1.Allgemeines

Das Ziel dieser Versuche ist die Bestimmung der Mörtel- und Mauerwerkseigenschaften für das zweischalige Mauerwerk, welches bei der Feststellung der Tragfähigkeit einer linienförmigen Verbundtechnik, die bei zweischaligen Mauerwerkswänden zur Befestigung hocheffektiver Dämmtechnik zum Einsatz kommen soll, aufgebaut wird.

Bei der Vorbereitung und Durchführung dieser Versuche sind die zutreffenden Randbedingungen einzuhalten bzw. zu realisieren.

11.9.2. Mauermörtel

11.9.2.1. Ziel

Der Anker und die Konsole sind für eine Vormauerschale sowohl mit Normal als auch Dünnbettmörtel einzusetzen. Für die Tragschale sind beide Mörtelarten für die Verwendung der Anker zugelassen. Die Untersuchungen wurden daher und aus dem Grunde der Vergleichbarkeit an Mauerwerk mit Normalmörtel für die Vormauer und Dünnbettmörtel für die Hintermauer durchgeführt.

11.9.2.2. Mauermörtelversuche

Zur eindeutigen Festlegung der Mörteleigenschaften wurden Versuche an Mörtelprismen der MGIIa und MG III vorgenommen[136]. Bei der Herstellung der Versuchskörper wurden von dem verwendeten Mauermörtel Prismen zur Bestimmung der Mörteleigenschaften angefertigt (40 x 40 x 160 mm). Bei jeder Mörtelmischung sind Prüfkörper in ausreichender Menge herzustellen. Tabelle 53 enthält die zu bestimmenden Parameter.

Tabelle 77Parameter zur Bestimmung der Mörteleigenschaften

Parameter	Versuch	Prismen (min)	
$\sigma - \varepsilon - Linie$	in Anlahnung an DIN 19555 4	2	
E-Modul Em	In Aniennung an Din 18555-4	3	
Mörteldruckfestigkeit fm			
Spaltzugfestigkeit fsz,M	in Anlehnung an DIN EN 1015-11	3	
Biegezugfestigkeit fBZM			

Es werden die folgenden Anzahlen an Probekörpern ausgewählt:

- 3x Biegezugfestigkeit $f_{BZ,m}$ (Serie MB)
- 3x Mörteldruckfestigkeit fm, (Serie MD)
- 3x E-Modul Em (Serie MSD)

- nach [138] nach [136] nach DIN 18555-4 nach [136]
- 3x Spaltzugfestigkeit fsz,м (Serie MSp)







Neben der Spannungs-Dehnungs-Beziehung des Materials (Prüfung in Anlehnung an DIN 18555-4 [138], siehe Bild 152 a) ist auch die Zugfestigkeit der Mauersteinprismen zu bestimmen.

Dafür sind Biegezugversuche und Spaltzugversuche (in Anlehnung an die Versuche an Mörtelprismen nach DIN EN 1015-11 [136] durchzuführen.

Bemerkung: Die Mörteldruckfestigkeit wird an den halbierten Prismen aus den Biegezugversuchen be-stimmt.

11.9.2.3. Lastregime und Messstellen

• Für Biegezugversuche und Druckversuche:

Die Last ist stoßfrei mit einer gleichmäßigen Geschwindigkeit im Bereich von 10 N/s bis 50 N/s aufzubringen, sodass der Bruch innerhalb von 30 s bis 90 s eintritt.

11.9.2.4. Versuchsergebnisse der Mörtelprüfungen

Bei der Herstellung der kleinen Mauerwerksprüfkörper wurden vom verwendeten Dünnbettmörtel sowie vom normalen Mörtel Prismen (40/40/160 mm) zur Bestimmung der Mörteleigenschaften angefertigt. Neben der Mörteldruckfestigkeit f_m wurden auch die Biegezugfestigkeit $f_{BZ,m}$ sowie die Spannungs-Dehnungs-Beziehung ermittelt (Bild 153). Die Biegezugfestigkeit und die Druckfestigkeit wurden dabei nach DIN EN 1015-11[143] und die *s*-*e*Beziehung nach DIN 18555-4 [144] bestimmt bzw. in der Tabelle 54 dargestellt. Die Ergebnisse sind im Einzelnen im Anhang enthalten.





Bild 216 a) Bestimmung der Biegezugfestigkeit (DIN EN 1015-11); b) Prismendruckfestigkeit an halbierten Mörtelprismen; c) Spannungs-Dehnungs-Beziehungen an Mörtelprismen (DIN 18555-4)

Taballa 70	Matarialaigancehaftan	Düpphottmörtol	(Cilka)
	<i>Ivialenaleigenscharlen</i>	Dunnbellinoilei	(Зіїка)

Bezeichnung	Fels Dünnbettmörtel	Normalmörtel Baumit
Rohdichte r _m	1,6 kg/dm³	1,455 kg/dm³
Biegezugfestigkeit f _{BZ,m}	3,7 N/mm²	2,79 N/mm²
Druckfestigkeit aus Biegezugprismen f _m	13,7 N/mm²	10,71 N/mm²
E-Modul (Prisma hochkant) E_m	3396 N/mm²	3202 N/mm²
Druckfestigkeit (Prisma hochkant) <i>f_{m,E}</i>	12,8 N/mm²	8,2 N/mm²

11.9.3. Mauerwerk (Serien MWH, MWV)

11.9.3.1. Ziel

Zur Bestimmung der Mauerwerkseigenschaften der Vor- und Hintermauer (Druck und E-Modul) wurden je 3 Rilem Probekörper mit Klinkern in NF und KS-Steine in (6 DF) unter Verwendung von Mörtel in MG IIa (M10) für Klinker und Dünnbettmörtel MGIII für KS-Steine geprüft. Es wurden auch Haftscherfestigkeitsversuche jeweils für die Vormauer und die Hintermauer durchgeführt. Somit stehen für die eigentlichen Ankerversuche eindeutige Kennwerte für das Mauerwerk zur Verfügung.

11.9.3.2. Druckfestigkeitsversuche

Versuchsgegenstand

Für die Versuche sollen Mauerwerkprobekörper aus Steinen wie im Bild 154 geprüft werden.



a) Klinker NF

b) Klinkerabmessungen

Bild 217 Verwendete Mauersteine, Vormauerschale Klinker NF

Für die Hintermauer sind Kalksandsteine in dem Format 6DF und der Druckfestigkeitsklasse 12 in Verbindung mit Dünnbettmörtel (MGIII) zu verwenden (Bild 155). Die Vormauerschale ist mit Klinker NF in Verbindung mit Normalmörtel MGIIa vorzusehen (Bild 154).



Bild 218 Verwendete Mauersteine, Hintermauerschale KS, 6DF

Probekörperabmessungen

Es wurden die Druckfestigkeit f_k , die Spannungs-Dehnungs-Beziehung und das E-Modul an kleinen Mauerwerks-Prüfkörpern (PK) in Anlehnung an DIN EN 1052-1 [131] ermittelt. Es sind insgesamt 6 bis 12 Versuche durchzuführen (Bild 156).





Bild 219 *Mauerwerksprüfkörper aus* [131]

Die Prüfkörper sind mit den in Tabelle 55 und Tabelle 56 angegebenen Maßen anzuwenden. Die Druckfestigkeit einer Probe von Mauersteinen ist nach dem in der EN 772-1 [135] angegebenen Verfahren zu bestimmen.

Maße der Sichtfläche des Mauersteines		Maße des Mauerwerksprüfkörpers			
l _u mm	h _u mm	Länge I _s	Hõhe h _s		Breite ts
< 300	≤ 150	>(2×1)	$\geq 5 h_u$		>t.
3 300	> 150	$\geq (\geq \wedge t_{\rm u})$	\ge 3 $h_{\rm u}$	$\geq 3 t_s$ und $\leq 15 t_s$ und	
> 300	≤ 150	>(15 × 1)	\geq 5 $h_{\rm u}$	$\geq l_s$	~ +u
- 300	> 150		\ge 3 $h_{\rm u}$		

Tabelle 80ausgewählte Maße für Prüfkörper zur Prüfung der Druckfestigkeit nach EN772-1 [135]

Stein	lu	hu	ts	Länge Ls	ls	ls,gew.	Höhe	hs	hgew.	Abmessung																
		040 71	71 115		> 400	> 400 402	≥ 3.hu	≥213		402*200																
Vormauar NE	240			> 2 0 I.I.			≥ 3.ts	≥ 345	200																	
Vormauer INF	240	/1		115	115	115	CII	110 2	≥2,01u	22,01u	22,01u	≥ 480	≥ 400	≥ 400	2,010 2400	≥ 400	2 400	2 400	≥ 400	u ≥480	≥ 400	≥ 400	492	≥ls	≥240	390
							≤ 15 .ts	≤1725																		
							≥ 3.hu	≥750																		
Lliptormouor (DE	250	250	175	>20III	> E00	750	≥ 3.ts	≥ 345	75.0	500*750																
ninternauer obr	250	200 1	175	≥2,01u	22,01u	22,01u	22,01u	≥2,01u	22,010 2	/iu ≥ 500	2 500	≥ 500	lu ≥ 500	22,010 2500	≥ 500	≥ 500	22,010 2500	≥ 500 / 50	≥ls	≥500	750	300 730				
							≤ 15 .ts	≤ 2625																		

Die Abmessungen der verwendeten Probekörper sind im Bild 157 und Bild 158 verdeutlicht.





a)

Bild 220 a) Mauerwerksprüfkörper, Serie MWH, Hintermauer, b) Prüfkörperherstellung





Lastregime und Messstellen

 Die Längs- und Querverformungen sind f
ür jeden PK zu messen. Dazu werden induktive Wegaufnehmer an jeden PK nach Bild 160 f
ür die Hintermauer und Bild 159 f
ür die Vormauer an den vorbemerkten Messstellen angebracht

Lastregime:

- § Die Last ist gleichmäßig auf die obere und untere Fläche des Prüfkörpers aufzubringen. Die Last ist stetig so zu steigern, dass der Bruch 15 min bis 30 min nach Belastungsbeginn stattfindet.
- § Die Lastgeschwindigkeit liegt zwischen rund 0,15 N/(mm2 ´ min) bei Mauersteinen niedriger Festigkeit und 1,25 N/(mm2 ´ min) bei Mauersteinen hoher Festigkeit.









a)

Bild 223 a) Messstellen für Mauerwerksprüfkörper, Hintermauer, b) Prüfkörper in der Prüfmaschine

11.9.3.3. Versuchsergebnisse der Mauerwerksprüfungen

Die Ergebnisse der Einzelprüfungen zur Ermittlung der Druckfestigkeit fk, die Spannungs-Dehnungs-Beziehung und des E-Moduls an den Mauerwerksprüfkörpern (PK) in Anlehnung an die DIN EN 1052-1 [131] sind im Anhang zusammengestellt.

Tabelle 57 enthält die Mittelwerte der Versuchsreihen MWV und MWH.



Materialeigenschaften Mauerwerk aus der Druckfestigkeitsprüfung

Serienbezeichnung	Serie MWV (Vormauer)	Serie MWH (Hintermauer)
Mittlere Mauerwerksdruckfestigkeit f	20,6 N/mm2	19,7 N/mm2
E-Modul Emw	11640 N/mm2	9481 N/mm2
Querdehnzahl	0,20	0,39

11.9.3.4. Versuchsergebnisse aus der Prüfung der Mauersteine

Die Ergebnisse aus den zur Ermittlung der Druckfestigkeit fk, die Spannungs-Dehnungs-Beziehung und des E-Moduls an den Mauerwerksprüfkörpern (PK) in Anlehnung an die DIN EN 1052-1 [131] sind im Anhang zusammengestellt.

Tabelle 57 enthält die Mittelwerte der Versuchsreihen MWV und MWH.

Materialeigenschaften Mauerwerk aus der Druckfestigkeitsprüfung

Serienbezeichnung	Druckfestigkeit	Biegezugfestigkeit
KS-Stein 6DF, Hintermauer	26 N/mm2	-
Fassadenklinker NF, Vormauer	124,5 N/mm2	9,1 N/mm2

11.9.4. Versuchsergebnisse

11.9.4.1. Allgemeines

Die Linienverankerung bildet eine gelenkförmige Lagerung der Vormauer- zur Hintermauerschale. Beim Aufbau dieser Versuche wurde es sorgfältig berücksichtiget, die Vormauerschale nur mit den Ankern an die die Hintermauerschale zu verankern. Zu diesem Zweck wurden die Ränder der Vormauermauer am Belastungsrahmen nicht vermörtelt. Damit wurden alle möglichen Kraftübertragungen außerhalb der Linienverankerung vermieden.

11.9.4.2. Verformung und Tragfähigkeit der Linienverankerung

Die während des Versuches aufgenommenen, maximalen Verformungen sind im Bild 224 und Bild 225 dargestellt. Es war zu erwarten, dass die mittleren Anker, die größten Ausziehkräfte bekommen bzw. Verformungen aufweisen. Um die sichere Lastabtragung und Gebrauchstauglichkeit der Linienverankerung zu gewährleisten, dürfen die Verformungen der Einzelteile der Linienverankerung bei maximalen Auswirkungen (Horizontale Einwirkungen aus Windlast, in der Windzone 4) einen Wert von <u>1 mm</u> nicht überschreiten [130].




Bild 224 Maximale Verformung bis zum Bruch- Mitte- Luftkissenversuch-Versuch 1 (horizontale Belastung in kN/m²)



Bild 225 Maximale Verformung bis zum Bruch- Mitte- Luftkissenversuch-Versuch 2 (horizontale Belastung in kN/m²)

Demzufolge ist der aufgezeichnete Wert der horizontal aufgebrachten Belastung bei 1 mm Schlupf entscheidend und als Grenztragfähigkeit des Verankerungssystems maßgebend. Als Bruchlastsind die gemessene Höchstbelastung sowie die zugehörige Verformung bis zum

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

Versagen zu entnehmen. Die Ergebnisse aus beiden durchgeführten Versuchen sind in der Tabelle 81 zusammengefasst.

uch	Windows	Einwirkung (Bemessungswert) _{WEd}	Teilsicherheits- beiwert der	Tragfähigkeit bei 1 mm Verformung	Tragfähigkeit bei 5 mm Verformung	Tragfähigkeit im Bruchzustand	,	Auslastung E _d / R _d =R _m *0,8/g	/R _d M
Vers	winazone	[kN/m2]	Linienverankeru ng ⊻M*)	[kN/m2]	[kN/m2]	[kN/m2]	Verformg. 1 mm	Verformg. 5 mm	Bruch- zustand (Bruch aus Versuch)
	Windzone 1, Binnenland	1,58	1,5	5,8	7,8	8,9	0,51	0,38	0,3
	Windzone 2, Binnenland	1,89	1,5	5,8	7,8	8,9	0,61	0,45	0,4
us d 2	Windzone 2, Küste und Inseln der Ostsee	2,31	1,5	5,8	7,8	8,9	0,75	0,56	0,5
un	Windzone 3, Binnenland	2,31	1,5	5,8	7,8	8,9	0,75	0,56	0,5
elwer such1	Windzone 3, Küste und Inseln der Ostsee	2,73	1,5	5,8	7,8	8,9	0,88	0,66	0,6
Ver:	Windzone 4, Binnenland	2,73	1,5	5,8	7,8	8,9	0,88	0,66	0,6
	Windzone 4, Küste der Nord- und Ostsee und Inseln der Ostsee	3,26	1,5	5,8	7,8	8,9	1,05	0,78	0,7
	Windzone 4, Inseln der Nordsee	2,94	1,5	5,8	7,8	8,9	0,95	0,71	0,6
Da Bruc	h durch Erreichen der Grenzverfor	mung bzw. durch Materi	alversagen der An	kerteile eintrat, ist	der Ansatz von Y _M	=1,5 gerechtferti	gt.		
Beim A	bbau der Versuchswand konnte fes	staestellt werden, dass o	jie Verankerung in	n Mörtel keine Ver	formuna (Schlupf)	aezeiat hat.			

Tabelle 81 Linienverankerung- Tragfähigkeit- Übersicht

In Tabelle 81 sind die maximalen Werte der Tabelle NA.B.3 des NA zu DIN EN 1991-1 [62] mit den vereinfachten Geschwindigkeitsdrücken für Bauwerke bis 25 m Höhe. eingesetzt worden. Der maximale cpe,10-Wert für den Außendruckbeiwert mit 1,4 für den Bereich A angesetzt worden (Tabelle NA.1 der DIN EN 1991-1-4/NA [62]). Da aus den zwei Versuchen sich kein verlässlicher charakteristischer Wert ermitteln lässt, wurde dieser mit 80 % des Mittelwertes angesetzt.

Bis auf Windzone 4, Küste der Nord- und Ostsee und Inseln der Ostsee liegt dann die Auslastung unterhalb von 1,0, sodass die praktische Anwendbarkeit bestätigt worden ist. Die 5% Überschreitung lassen sich durch Optimierung der Ankerteile beseitigen.

11.9.4.3. Rissbildung

Die Rissverläufe bei beiden Versuchen im Bruchzustand sind in den Bildern (Bild 226 bis Bild 229) deutlich zu erkennen. Allerdings ist zwischen Rissen im Mörtel sowie durchgehenden Rissen in den Steinen zu unterscheiden. Die Entwicklung der Haarrisse zu größeren Rissen wird unter zunehmender Horizontalbelastung beschleunigt. Nach Ausfall der Lastabtragung der mittleren Ankerreihe aufgrund des Versagens der Anker wird die gesamte Prüfwand nur mit Randlagerung unter Horizontallast beansprucht. Die zunehmenden Horizontalverformungen und Rissöffnungen führen zur Beeinträchtigung der Tragfähigkeit der Prüfwand und somit zum Versagen der Vorsatzschale.





Bild 226 Rissbildung beim Bruch-Luftkissenversuch- Versuch 1





Bild 227 Rissbreite bis zum Bruch-Luftkissenversuch- Versuch 1





Bild 228 Rissbildung beim Bruch-Luftkissenversuch- Versuch 2







11.9.4.4. Bruchmerkmale

Folgende Merkmale haben sich beim Bruch und nach dem Versuchsabbau gezeigt:

- Elastizitätsphase (Lastabtrag durch Linienverankerung):

Bei den ersten Laststufen (bis 6,6 kN/m² im ersten Versuch und 5 kN/m² im zweiten) und vor der Rissentstehung erfolgt der Lastabtrag der horizontalen Auswirkung über das gesamte Verankerungssystem. Die Ankerkräfte unterscheiden sich je nach Ankerposition, in dem die mittlere, vertikale Ankerreihe deutlich größere Ankerkräfte als an den Randreihen aufnimmt. Die Vormauer funktioniert in dieser Phase als zwei nebeneinanderliegende und zusammenwirkende Mauerschalen von jeweils (LXH:1,5 x 3 m). Das Tragverhalten des zweischaligen Mauerwerks ist in dieser Phase linear-elastisch und die Steigung der Belastungs-Verformungs-Linie wird durch die Zusammenwirkung der Komponente des Mauerwerks, zum einen durch die Tragfähigkeit der Ankerteile (bis zum Erreichen maximaler Zugspannung des glasfaserverstärkten Polyamids und maximaler Auszuglast der Ankerdübel) und zum anderen durch die Biegetragfähigkeit des Vormauerschale (Biegezugfestigkeit der Vormauerschale) bestimmt. Diese Phase endet beim Versagen der mittleren Ankerreihe durch Erreichen entweder der maximalen Zugspannung des glasfaserverstärkten Polyamids oder maximalen Zuglast des Ankerdübels. Zum Abschluss und aufgrund der Lastabtragrichtung der Vormauer bilden sich Risse in der Vormauerschale vertikal zur Lagerfuge.

- Plastizitätsphase (Versagen der Vormauerschale):

Diese Phase beginnt nach Versagen der mittleren Ankerreihe. Die Lastabtragung erfolgt durch die Zusammenwirkung der Biegetragfähigkeit der gesamten Vormauerschale (L x H: 3 x 3 m) und der Tragreserve der Anker in den Randankerreihen (2 horizontale und 2 vertikale Ankerreihen). Die horizontale Verformung der Vormauerschale steigt im Vergleich zu der ersten Phase bei geringerer horizontaler Belastung deutlich zu. Diese Phase endet mit Erreichen der Biegetragfähigkeit der Vormauerschale. Die diagonal entstehenden Risse breiten sich bis zum Versagen aus (s. Bild 226) .Im Versuch 2 (s. Bild 229) zeigt sich, dass mit dem vertikalen Riss auf der rechten Seite der Vormauerschale die Biegetragfähigkeit zwischen den vertikalen Ankerreihen erreicht wird.

11.9.5. Zusammenfassung der Versuchsergebnisse

In den Versuchen wurde die Tragfähigkeit der Vorsatzschale, die mittels eines entwickelten Verankerungssystems in linienförmiger Weise verankert wird, geprüft und ausgewertet. Das geschah im Zusammenwirken von Ankern und Vorsatzschale.

Die Ergebnisse haben deutliche Aussagen über die Tragfähigkeit des Systems Vorsatzschale und Anker bei der Lastabtragung der horizontalen Auswirkung (Windbelastung) geliefert.

Es hat sich gezeigt, dass die Verformung der Anker in sich der kritische Punkt ist. Mit den hier zugrunde gelegten Abmessungen konnte die Tragfähigkeit bis Windlastzone 4 Binnenland problemlos für einen Außendruckbeiwert von c $_{pe,10} = 1,4$ im Bereich A nachgewiesen werden. Mit geringfügiger Änderung der Ankerkonstruktion ließe sich auch die WLZ 4, Küste der Nord- und Ostsee und Inseln der Ostsee schaffen.

Das Ergebnis der Untersuchungen zur linienhaften Verankerung (hier vertikal) ermöglicht eine Rationalisierung der Ankeranzahl je nach Windzone. Dabei wird die Verwendung von größeren, modularen VI-Paneelen sowie die Verringerung der Durchstoßpunkten möglich, welches zur Verbesserung der wärmetechnischen Lösung führt.



12. Zusammenfassung

Die Verwendung des vorgeschlagenen Systems reduziert den benötigten Abstand zwischen den Mauerschalen, um die Dämmung zu unter zu bringen, drastisch. Es werden 65 mm einschließlich eines Luftzwischenraums von 25 mm benötigt, um die energetisch erforderliche Anbringung der Dämmschicht zwischen Hintermauerung und Vorsatzschale des zweischaliges Mauerwerks zu erlauben. Im Vergleich zu anderen gegenwärtig angewendeten Dämmsystemen reduziert das Vakuum-Dämmsystem die benötigte Stärke um den Faktor 3 bis 4,5 (Tabelle 3). Neben den dünneren Wänden hat das Gebäude, das mit den vorgeschlagenen Vakuum-Paneelen gebaut wird, eine größere Tageslichtausbeute auf der einen Seite und die eingesparte Wandstärke erhöht auf der anderen Seite die nutzbare Fläche des Gebäudes.

Um einen realistischen Vergleich zwischen den Dämmsystemen ziehen zu können, wurde ein Musterhaus mit den folgenden Anforderungen konstruiert (Fig. 10). Die Nutzfläche des Musterhauses wurde unter Berücksichtigung der Verwendung der verschiedenen Dämmsysteme wie Rockwool, XPS-, ESP- und PUR-Paneelen kalkuliert, um den gleichen U-Wert (0,157 W/m²K) zu erreichen. Dieser Wert wird durch das entwickelte VIP-System mit nur 65 mm Dämmstärke inklusive dem Luftzwischenraum von 25 mm realisiert.

Die Verwendung des vorgeschlagenen Vakuum-Dämmsystems erhöht den nutzbaren Raum des Musterhauses um 13,9 % im Vergleich zur Benutzung von Rockwool, um 11,6 % im Vergleich zu Swisspor XPS 300 GE und um 5,9 % im Vergleich zu den PUR/PIR-Dämmplatten welche mit Aluminiumschutz an beiden Seiten angeboten werden.

Zusätzlich zu den bisher aufgezeigten Vorteilen ist das System demontierbar, sofern die Vorsatzschale es ist, und beschädigte Teile können dann leicht ausgetauscht werden. Ferner kann das vorgeschlagene System nach geringfügigen Änderungen an den Metallankerköpfen auf andere Fassadensysteme angewendet werden. Zum Beispiel kann es mit Keramikfassadenplatten (wie Wienerberger), Betonfassadenplatten oder mit Trockenbau-Ziegel-Systemen (wie das Click Brick System) benutzt werden. In allen vorher genannten Systemen kann das entwickelte System komplett demontiert und wiederverwendet werden wenn sich die Funktion des Gebäudes oder die Gebäudehülle verändert.

Aufgrund der derzeitigen Herstellungsschwierigkeiten der nicht gleichmäßigen VIP-Paneelen-Formen und der erst halbautomatisierten Herstellungsverfahren sind die VIP-Paneelen immer noch teurer im Vergleich zu anderen Dämmpaneelen. Die Anwendung der modularen Formen, die in dieser Forschungsarbeit vorgeschlagen wurden, werden die Herstellungsformen reduzieren, ermöglichen den Herstellern einen voll automatischen Produktionsprozess und bieten als Massenproduktion die notwendigen Formen, die bei allen Gebäuden installiert werden können. Dadurch werden sich die Herstellungskosten reduzieren.

Die Auswertung der Ergebnisse der experimentellen Untersuchung an allen Teilen des Dämmsystems hat nachgewiesen, dass das entwickelte Verankerungssystem (Anker+ Konsole) alle bauaufsichtlichen Anforderungen bauphysikalisch, tragwerksplanerisch und statisch erfüllt.

Beim Brandversuch in MFPA Leipzig wurde festgestellt, dass das Dämmsystem nach DIN EN 4104-20 brandbeständig ist. Es wurden keine Branderscheinungen am Prüfaufbau während der 30 Minuten andauernden Prüfzeit beobachtet. Lediglich in den Brandkammerleibungen kam es zur Entflammung des freiliegenden PUR-Schaumes



(Randstreifen 25 mm) der Paneele (VIP) und einer sich anschließenden lokal begrenzten horizontalen Brandausbreitung hinter der Klinkerfassade – beschränkt auf den Bereich unterhalb des ersten Brandriegels. Das Vorsatzmauerwerk hielt der Brandbeanspruchung ohne Einschränkungen stand, Verformungen oder Abplatzungen wurden nicht beobachtet. Nach Ablauf einer Prüfzeit von 30 Minuten wurde der Versuch beendet. Es schloss sich eine mind. 60 Minuten andauernde Beobachtungszeit an, in deren Verlauf die vereinzelt noch sichtbaren Flammen in den Leibungen eigenständig erloschen. Rauchaustritt aus den offenen Vertikalfugen konnte noch über einen Zeitraum von etwa 25 Minuten beobachtet werden. Nach Entfernung des Vorsatzmauerwerks wurden keine nennenswerten Brandschäden an der Dämmung und der Verankerung festgestellt.

Die Versuche zur Feststellung der Tragfähigkeit des Systems, die mittels des entwickelten Verankerungssystems in linienförmiger Verankerungsweise vorgehängt wird, zeigten ausreichende Tragfähigkeit des Verankerungssystems in allen Windzonen. Mit der Ausnahme der Windlastzone 4 – Küste der Nord- und Ostsee und Ostseeinseln. Hier wäre eine geringfügige Verstärkung der Anker nötig.

Die Auswertung dieser Versuche hat positive Aussagen über die Tragfähigkeit der Vorsatzschale bei der Lastabtragung der horizontalen Auswirkung (Windbelastung) geliefert. In den Windzonen 1-3 lässt sich eine Rationalisierung der Ankeranzahl je nach Windzone ermöglichen. Dabei ist die Verwendung von größeren, modularen VI-Paneelen sowie die Verringerung der Durchstoßpunkten möglich, welches zur Verbesserung der wärmetechnischen Lösung führt.

Das entwickelte und bereits im Rahmen dieses Forschungsvorhabens bauphysikalisch und tragwerksplanerisch geprüfte VIP-Dämmsystem lässt sich laut Projektpartner aus der Industrie einfach herstellen. Dies hat sich auch bei der Durchführung des Brandversuches an einem großen Versuchskörper aus zweischaligem Mauerwerk gezeigt. Damit ist ein sicherer Einsatz des VIP-Dämmsystems in der Praxis gewährleistet.

Seitens der Produzenten der VIP-Elemente sollte die Herstellung weiter rationalisiert werden, um einen günstigeren Preis ansetzen zu können. An der Frage der Langlebigkeit sollte ebenfalls gearbeitet werden. Die sich daraus ergebenden Nachteile können durch eine demontierbare Vorsatzschale oder Verkleidung kompensiert werden, wenn zu einem gegebenen Zeitpunkt der Austausch der Paneele notwendig würde.



13. Anhang 1- Normative und Rechnerische Nachweise

13.1. Ermittlung der Ankerkräfte aus Windlasten nach DIN EN 1991-1-4/NA

Das entwickelte Verankerungssystem ist für die Vakuumdämmung vorgesehen. Aufgrund der Minimierung der Arbeitsgänge ist es notwendig, ein Vakuumpaneelen-Muster festzulegen. Daher ergibt sich eine bestimmte Ankeranordnung an der Vorsatzschale. Aus der Ankerverteilung sollen die Ankerkräfte nach DIN EN 1991-1-4/NA ermittelt werden. In der Tabelle 82 sind die ermittelten Ankerkräfte bei allen Windzonen dargestellt.

Charakteristische A	nkerkräfte aus o	der Windlast bei Ge	ebäuden mit Höhe bis 2	25 m
	nach DIN	EN 1991-1-4/ NA		
	Nach	1 Tab. 3.13		
		Panelabmessungen	h = [cm]	50
		(Ankerabstände)	l = [cm]	50
Windzone 🗾	Vinddruck [KN/I	Windsog [KN/m2]	Ankerkraft Druck [KN]	Ankerkraft Sog [KN]
Windzone 1, Binnenland	0,6	-1,05	0,15	-0,26
Windzone 2, Binnenland	0,72	-1,26	0,18	-0,32
Windzone 2, Küste und Inseln der Ostsee	0,88	-1,54	0,22	-0,39
Windzone 3, Binnenland	0,88	-1,54	0,22	-0,39
Windzone 3, Küste und Inseln der Ostsee	1,04	-1,82	0,26	-0,46
Windzone 4, Binnenland	1,04	-1,82	0,26	-0,46
Windzone 4, Küste der Nord- und Ostsee und Inseln der Ostsee	1,24	-2,17	0,31	-0,54
Windzone 4, Küste und Inseln der Ostsee	1,12	-1,96	0,28	-0,49
		Maximale Werte	0.31	0.54

Tabelle 82 Ankerkräfte aus Windlast bei einem modularen Ankerabstand von 0,5 m

13.2. Abmessungen der Teile des Verankerungssystems

Die unten dargestellte Abbildung (Bild 230) erläutert die der Abmessungen der ausgewählten Einzelteile des Verankerungssystems sowie die schematische Aufteilung der Horizontallast. Die Ankereinzelteile sind hauptsächlich auf die Windlast beansprucht. Im nächsten Schnitt werden die Nachweise jedes Teils nach EC3 [128] und die geeigneten Zulassungen erbracht.



Bild 230 Aufteilung der Windlast

13.3. Verwendete Materialien

Die ausgewählten Materialien der tragenden Ankersystemteile sind in der Tabelle 83 mit den Kennwerten ihrer mechanischen Eigenschaften aufgeführt.

Tabelle 83 Mechanische Eigenschaften ausgewählter Materialien des Ankersystems

Element	Ausgewähltes Material	Festigkeit
Luftschichtanker, Schrauben	Duplexstahl	f _y = 560 MPa
Polyamid-Profil, Konsole	PA6.6 GF30	f _y = 100 – 150 MPa
Konsolenecke	Baustahl S355/ Edelstahl	$f_y = 355/560 MPa$

13.4. Nachweis des Ankers

13.4.1. Nachweis des Verbundelements (Luftschichtanker):

Der Luftschichtanker besteht aus zwei Teilen (Bild 231), Teil 1 ist ein Verbundblechteil und Teil 2 besteht aus Blech und Draht, die miteinander geschweißt sind. Beide Teile sind separat zu verarbeiten und aus Edelstahl ($f_v = 560 MPa$) herzustellen:



Teil 1 ist in der Fuge eingebettet. Die aus der Windlast resultierende horizontale Kraft ist auf das Drahtteil anzubringen (Bild 232). Damit ist das Drahtteil auf Biegung beansprucht.

13.4.1.1. Nachweis der Biegebeanspruchung

Der Nachweis ist durch die Gleichung durchzuführen:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1,0$$
$$M_{Ed} = \frac{W_{E,d}}{2} \cdot h/2$$



- *h*: Länge des Drahtteils (~8, 3 cm)
- P: Ankerkraft aus der Windlast (je nach Windzone)

$$W_{E,d} = \gamma_Q \cdot W_{E,k}$$

$$M_{cpl,Rd} = W_{pl} \cdot f_{y} \kappa_{M0}$$

$$M_{cpl,Rd} = 0,053 \cdot \pi (d = mm)^3 \cdot \frac{\left(560 \frac{N}{mm^2}\right)}{1,0} \cdot 10^{-6} KN \cdot m$$

$$M_{Ed} = 1,5 * \frac{W_{Ed}}{2} * 0,083/2 m = 3,1 \cdot 10^{-2} * W_{Ed} KN \cdot m$$

13.4.1.2. Nachweis der Querkraftbeanspruchung

$$\frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} \le \mathbf{1,0}$$
$$V_{c,Rd} = V_{pl,Rd} = A_v \frac{f_v}{\sqrt{\mathbf{3}}} \frac{\mathbf{1}}{\mathfrak{r}_{M0}}$$

Für einen Querschnitt mit einem Mindestdurchmesser in Höhe von 4 mm ergibt sich:

$$V_{c,Rd} = V_{pl,Rd} = \frac{\pi 4^2}{4} * \frac{560}{\sqrt{3}} \frac{1}{1,0} = 4KN$$

Nachweis ist für alle Windzonen erfüllt.

13.4.2. Nachweis des Polyamid-Profils

13.4.2.1. Nachweis der Zug-/Druckbeanspruchung

Der Kopf des Polyamidprofils ($f_y \approx 150 MPa$) nimmt die resultierenden Schnittgrößen des Drahtteils auf. In diesem Fall ist der Querschnitt an den Schnitten 1 und 2 auf Druck- bzw. Zugkraft zentrisch beansprucht. Dabei ist der Querschnitt am Schnitt 3 biegebeansprucht (Bild 233).



Bild 233Nachzuweisende Querschnitte am Polyamid-Bild 234Gewindestangen-
querschnittProfilquerschnitt

$$W_{E,d} = N_{E,d} = 1,5 * W_{E,k}$$

Der Nachweis an den Schnitten 1 und 2 ist durch die folgende Gleichung durchzuführen:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} \leq \mathbf{1,0}$$

$$N_{c,Rd} \equiv A_{ef} * f_{y} / \mathfrak{F}_{M0}$$

A_{ef}: Die effektive Querschnittsfläche des Polymidprofils je nach Schnitt.

Der Nachwies am Schnitt 3 ist in der Gleichung $\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1,0$ gegeben.

13.4.2.2. Nachweis der Querkraftbeanspruchung

$$\frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} \le \mathbf{1,0}$$
$$V_{c,Rd} = V_{pl,Rd} = A_v \frac{f_y}{\sqrt{\mathbf{3}}} \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{v}_{M0}}$$

Der kritische Schnitt für eine Querkraftbeanspruchung ist der Schnitt 3. Unter der Annahme der gegebenen Abmessungen in der Abbildung und mit dem Einsatz eines Drahtdurchmessers mit einem Wert von 4 mm ergibt sich aus der Gleichung:



$$V_{c,Rd} = V_{pl,Rd} = \left(16 * 12 - \frac{\pi 4^2}{4}\right) * \frac{150}{\sqrt{3}} \frac{1}{1,0} = 18,6KN$$

Damit ist der Nachweis für alle Windzonen erfüllt.

13.4.3. Nachweis der Gewindestange

Die gesamte Windlast ist ggf. in den Schraubenquerschnitt einzuleiten. Damit ist der Querschnitt der Schraube (Bild 234) auch auf Druck- bzw. Zugkraft zentrisch beansprucht.

$$W_{E,d} = N_{E,d} = 1,5 * W_{E,k}$$

Der Nachweis ist durch die Gleichung durchzuführen:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} \leq \mathbf{1,0}$$

$$N_{c,Rd} = A_{ef} * f_y / \gamma_o$$

A_{ef}: Die effektive Querschnittsfläche der Gewindestange

13.5. Nachweis der Konsole

13.5.1.Lastabtragung in der Konsole

Das Konsolensystem und die zugehörigen Geometrien sind im Bild 235 gezeigt.



Bild 235 Konsolensystem, Konsole aus Polyamid+ L-Profil aus Duplexstahl, Geometrie

13.5.1.1. Nachweis der Biegebeanspruchung:

Die aus dem Vormauergewicht abzutragende Last lässt sich wie im (Bild 236) verteilen. Daraus ergibt sich ein Zugkraft A im Anker und D an der Verbindung zwischen PEEK-Profil und Stahlecke sowie eine Pressung B auf den Beton. Die Werte dieser Kräfte sind wie folgend zu berechnen:

Eigengewicht der Vormauerschale



Wichte des Mauerwerkes $g_{\ell} = 18 \text{ kN/m}^3$

Dicke der Vormauerschale $t_V = 0,115$ m

Höhe der Vormauerschale H = n ž 3 m; n \pounds 4

Gewicht der Vormauerschale in einem Geschoss $G_{V1} = g_V \check{z} t_V \check{z} 3 = 6,21 \text{ kN}$ (pro m Wandlänge und Geschoss)

Das Eigengewicht aus der Vormauer ergibt sich dann bei einer Einflussbreite von e = 0.5/2 + 0.25/2 = 0.375 m zu

 $Cd = 1,35 \text{ ž n } \text{Z}G_{V1} \text{Z}e$

ergibt bei zwei Geschossen:

Cd= 1,35 ž 2ž 6,21 ž 0,5 = 8,38 kN





Zugkraft am Konsolenanker:

$$A = \frac{c \cdot b}{z_{min}} \text{ mit } b = 0,115/3 + 0,075 = 0,1133 \text{ m und } z_{min} = 0,1 \text{ m}$$
$$A_{Ed} = \frac{8,38 \cdot 0,11}{0,1} = 9,22 \text{ [KN]}$$

für zwei Geschosse und ohne Wind.

Druckkraft:

$$B = (0,5 + 0,25) \cdot W_{DE.d} + \frac{9,22 \cdot 0,11}{0,1} = 0,75 \cdot W_{DE.d} + 10.14 [KN]$$

 $W_{ED,k}$: Charakteristischer Winddruck je nach Windzone [kN/m^2]. Für Windlastzone



Der Nachweis der Zugschraube ist durch die Gleichung durchzuführen:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} \le \mathbf{1,0}$$
$$N_{c,Rd} = A_{ef} * f_y \gamma \mathcal{T}_{M0}$$

 A_{ef} : Die effektive Querschnittsfläche der Schraube. Bei einer Schraube M10 ist der Kernquerschnitt A_{eff} = 52,3 mm²

$$N_{c,Rd} = 52,3 \ mm^2 * \frac{560 \ \frac{N}{mm^2}}{1,25} = 29,29 \ KN \gg 9,22 \ kN = A_{Ed}$$

- 13.5.2. Nachweise im Polyamidteil
- 13.5.2.1. Nachweis der Querkraft:
 - 1) Am Konsolenanker:

$$\frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} \le \mathbf{1,0}$$
$$V_{c,Rd} = V_{pl,Rd} = A_v \frac{f_y}{\sqrt{3}} \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{r}_{M0}}$$

$$V_{c,Rd} = V_{pl,Rd} = \left(\frac{\pi 18^2}{4}\right) * \frac{150}{\sqrt{3}} \frac{1}{1,0} = 22 KN > 8,38 KN \rightarrow Nachweis erfüllt$$

2) Am Schnitt 1-1 (Bild 237):



Bild 237 Schnitt am Polyamid-Profil



13.5.2.2. Nachweis der Betonpressung unter der Konsole: Die Pressungsfläche ist im Bild 238 dargestellt.

$$\sigma_{Ed} = \frac{\max B}{\mathbf{A}} = \frac{(0,75 \cdot 0,81 + 10,14) * 1000}{\frac{\pi 40^2}{4}} = 8,55 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{Rd} = 25 \frac{N}{mm2} * \frac{0,85}{1,5} = 14,8 \frac{N}{mm2} > 8,55 \frac{N}{mm2} \rightarrow Nachweis \, erf \ddot{u}llt$$

13.5.3. Nachweis der Konsolenecke

13.5.3.1. Nachweis der Biegebeanspruchung:

Die Stahlecke ist auf Biegung beansprucht (Bild 239).



$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \le 1,0$$

$$M_{c,Rd} = W_P * f_y r_{M0}$$

$$M_{c,Rd} = 1,7 \cdot 500 \frac{4^2}{6} * \frac{355}{\frac{N}{mm2}} \frac{N}{1,25}$$

$$= 0,64 \text{ KN. m}$$

$$M_{Ed} = 8,38 * \frac{0,115}{2} = 0,48 \text{ KN. } m$$

$$\frac{0,48}{0,64} = 0,75 \le 1,0 \rightarrow \text{Nachweis erbracht}$$

Bild 239 Stahlecke im Konsolensystem

13.5.3.2. Nachweis der Querkraft an der Konsolenecke

$$\frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} \le \mathbf{0.5}$$

$$V_{c,Rd} = V_{pl,Rd} = A_v \frac{f_v}{\sqrt{\mathbf{3}}} \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{v}_{M0}}$$

$$V_{c,Rd} = V_{pl,Rd} = (500 * 4) * \frac{355}{\sqrt{3}} \frac{1}{1,0} = 409,93 \ kN \gg 8,38 \ KN \rightarrow Nachweis \ erf \ ullt$$

13.5.3.3.

Nachweis der Schraube

$$\mathbf{R} = \frac{1,55 * 11,5/2}{5} = 1,78 \ KN$$
$$N_{c,Rd} = A_{ef} * f_y / \tau_o = \frac{\pi 4^2}{4} * \frac{560}{1,25} = 56,3 \gg 1,78 \ KN \rightarrow Nachweiss \ erf \ \"ullt$$

Bemerkung: Aufgrund der Komplexität in Konsolen- und Ankerteilverbindungen insbesondere Duplexstahl-Polyamid ist ein Nachweis auf der Basis von 3D-Finite-Elemente-Rechnung notwendig (sehe Kapital 10)



13.5.4. Darstellung der Nachweise

Charakteristische/Bemessungswe	erte der Ankerk	kräfte aus der W	indlast bei Gebäuden	mit Höhe bis 25 m
	nach DIN EN 199	1-1-4/ NA, Tab.3.13		
				1.5
		Development	g _=	1,5
		(Ankerabstände)	n = [cm] I = [cm]	50
	Winddruck w _{ED,k}	Windsog w _{ES,k}	Ankerkraft Druck W _{ED.d}	Ankerkraft Sog W _{ES.d}
vv indzone	[kN/m²] 🗾	[kN/m ²]	[kN]	[kN] 🔽
Windzone 1, Binnenland	0,6	-1,05	0,23	-0,39
Windzone 2, Binnenland	0,72	-1,26	0,27	-0,47
Windzone 2, Küste und Inseln der Ostsee	0,88	-1,54	0,33	-0,58
Windzone 3, Binnenland	0,88	-1,54	0,33	-0,58
Windzone 3, Küste und Inseln der Ostsee	1,04	-1,82	0,39	-0,68
Windzone 4, Binnenland	1,04	-1,82	0,39	-0,68
Windzone 4, Küste der Nord- und Ostsee und Inseln der Ostsee	1,24	-2,17	0,47	-0,81
Windzone 4, Küste und Inseln der Ostsee	1,12	-1,96	0,42	-0,74
		Maximale Werte	0,47	0,81

Tabelle 84 Ankerkräfte aus Windlast bei einen modularen Ankerabstand von 0,5 m

	Nachweis d	es Ersten Ankersyst	ems	
	Nachw	eis des Drahtteils		
			17,5 cm6 cm	11,5 cm
Banalahmassungan	h = [cm]	50		
Failelabiliessuligen	I = [cm]	50		
			P aus Windlast	P/2 →
Dratteildurchmesser d [mm]	8			PEEK-Profil 7,1 cm
fy [N/mm2]	560		Gewindestange Duplexstahl	© 20 mm
			∂ 5 mm ↓ Drahttei	1
			0 5an	
Windzone	Mc,Rd [KN.m]	M _{Ed} [KN.m]	Nachweis: M _{Ed} /M _{c,Rd}	Nachweis erfüllt !!
Windzone 1, Binnenland	0,0477	0,0122	0,26	Ja
Windzone 2, Binnenland	0,0477	0,0146	0,31	Ja
Windzone 2, Küste und Inseln der Ostsee	0,0477	0,0179	0,37	Ja
Windzone 3, Binnenland	0,0477	0,0179	0,37	Ja
Windzone 3, Küste und Inseln der Ostsee	0,0477	0,0212	0,44	Ja
Windzone 4, Binnenland	0,0477	0,0212	0,44	Ja
Windzone 4, Küste der Nord- und	0.0477	0.0050	0.52	141
Ostsee und Inseln der Ostsee	0,0477	0,0252	0,53	Ja
Windzone 4, Küste und Inseln der Ostsee	0,0477	0,0228	0,48	Ja

Tabelle 85 Nachweis des Drahtankers



	Nachweis des Polyamidprofils- Schnitt 1-1							
Panelahmessungen	h = [cm]	50	2					
r unerus messungen	= [cm]	50						
			⁴ 1 4 2					
PEEK, d Schnitt 1-1[mm]	12							
fy [N/mm2]	100		z z	z 4				
			12 mm 20 mm					
				12 m P				
			Schnitt 1 Schnitt 2	Schnitt 3				
Windzone	Nc,Rd [KN]	N _{Ed} [KN]	Ned/Nc,rd	Nachweis erfüllt !!				
Windzone Windzone 1, Binnenland	Nc,Rd [KN] 9,05	N _{Ed} [KN]	Nachweis: Ned/Nc,rd 0,04	Nachweis erfüllt !! Ja				
Windzone Windzone 1, Binnenland Windzone 2, Binnenland	Nc,Rd [KN] 9,05 9,05	N _{Ed} [KN] 0,39 0,47	Nachweis: Ned/Nc,rd 0,04 0,05	Nachweis erfüllt !! Ja Ja				
Windzone Windzone 1, Binnenland Windzone 2, Binnenland Windzone 2, Küste und Inseln der Ostsee	Nc,Rd [KN] 9,05 9,05 9,05	N _{Ed} [KN] 0,39 0,47 0,58	Nachweis: Ned/Nc,rd 0,04 0,05 0,06	Nachweis erfüllt !! Ja Ja Ja				
Windzone 1, Binnenland Windzone 2, Binnenland Windzone 2, Küste und Inseln der Ostsee Windzone 3, Binnenland	Nc,Rd [KN] 9,05 9,05 9,05 9,05 9,05	N _E , [KN] 0,39 0,47 0,58 0,58	Nachweis: Ned/Nc,rd 0,04 0,05 0,06 0,06	Nachweis erfüllt !! Ja Ja Ja Ja Ja				
Windzone 1, Binnenland Windzone 2, Binnenland Windzone 2, Küste und Inseln der Ostsee Windzone 3, Binnenland Windzone 3, Küste und Inseln der Ostsee	Nc,Rd [KN] 9,05 9,05 9,05 9,05 9,05	N _E , [KN] 0,39 0,47 0,58 0,58 0,58	Nachweis: Ned/Nc,rd 0,04 0,05 0,06 0,06 0,08	Nachweis erfüllt !! Ja Ja Ja Ja Ja Ja				
Windzone 1, Binnenland Windzone 2, Binnenland Windzone 2, Küste und Inseln der Ostsee Windzone 3, Binnenland Windzone 3, Küste und Inseln der Ostsee Windzone 4, Binnenland	Nc,Rd [KN] 9,05 9,05 9,05 9,05 9,05 9,05	N _{Ed} [KN] 0,39 0,47 0,58 0,58 0,58 0,68	Nachweis: Ned/Nc,rd 0,04 0,05 0,06 0,06 0,08	Nachweis erfüllt !! Ja Ja Ja Ja Ja Ja Ja				
Windzone 1, Binnenland Windzone 2, Binnenland Windzone 2, Küste und Inseln der Ostsee Windzone 3, Binnenland Windzone 3, Küste und Inseln der Ostsee Windzone 4, Binnenland Windzone 4, Küste der Nord- und	Nc,Rd [KN] 9,05 9,05 9,05 9,05 9,05 9,05	N _{Ed} [KN] 0,39 0,47 0,58 0,58 0,58 0,68 0,68	Nachweis: Ned/Nc,rd 0,04 0,05 0,06 0,06 0,08 0,08	Nachweis erfüllt !! Ja Ja Ja Ja Ja Ja Ja				
Windzone Windzone 1, Binnenland Windzone 2, Binnenland Windzone 2, Küste und Inseln der Ostsee Windzone 3, Binnenland Windzone 3, Küste und Inseln der Ostsee Windzone 4, Binnenland Windzone 4, Küste der Nord- und Ostsee und Inseln der Ostsee	Nc,Rd [KN] 9,05 9,05 9,05 9,05 9,05 9,05 9,05	N _{E₀} [KN] 0,39 0,47 0,58 0,58 0,68 0,68 0,68 0,81	Nackweis: Ned/Nc,rd 0,04 0,05 0,06 0,06 0,08 0,08 0,09	Nachweis erfüllt !! Ja Ja Ja Ja Ja Ja Ja Ja				

Tabelle 86 Nachweis des Polyamidprofils Schnitt 1-1

Nachweis de	Nachweis des Polyamidrofils am Anschluss mit dem Drahtteil- Schnitt 2-2							
Panalahmossungon	h = [cm]	50						
raneiabinessungen	l = [cm]	50						
Dratteildurchmesser d [mm]	8							
fy [N/mm2]	100							
PEEK-Pofildurchmesser d Schnitt2-2 [mm]	20							
Windzone	Nc,Rd [KN]	N _{Ed} [KN]	Nachweis: NEd/Nc,Rd	Nachweis erfüllt !!				
Windzone 1, Binnenland	12,33	0,39	0,03	Ja				
Windzone 2, Binnenland	12,33	0,47	0,04	Ja				
Windzone 2, Küste und Inseln der Ostsee	12,33	0,58	0,05	Ja				
Windzone 3, Binnenland	12,33	0,58	0,05	Ja				
Windzone 3, Küste und Inseln der Ostsee	12,33	0,68	0,06	Ja				
Windzone 4, Binnenland	12,33	0,68	0,06	Ja				
Windzone 4, Küste der Nord- und	10.00	0.01	0.07	lo				
Ostsee und Inseln der Ostsee	12,33	0,81	0,07	BL				
Windzone 4, Küste und Inseln der Ostsee	12,33	0,74	0,06	Ja				

Tabelle 87 Nachweis des Polyamidprofils Schnitt 2-2



Nachweis des	Nachweis des Polyamidsprofils am Anschluss mit dem Drahtteil- Schnitt 3-3						
Danalahmassungan	h = [cm]	50					
T allerabiliessungen	l = [cm]	50					
Dratteildurchmesser D [mm]	8						
fy [N/mm2]	100						
PEEK-Pofildurchmesser D [mm]	20						
Windzone	Mc,rd [KN.m]	M _{Ed} [KN.m]	Nachweis: M _{Ed} /M _{c,Rd}	Nachweis erfüllt !!			
Windzone 1, Binnenland	0,033	0,007	0,21	Ja			
Windzone 2, Binnenland	0,033	0,012	0,37	Ja	ł		
Windzone 2, Küste und Inseln der Ostsee	0,033	0,015	0,45	Ja			
Windzone 3, Binnenland	0,033	0,015	0,45	Ja			
Windzone 3, Küste und Inseln der Ostsee	0,033	0,018	0,54	Ja			
Windzone 4, Binnenland	0,033	0,018	0,54	Ja			
Windzone 4, Küste der Nord- und Ostsee und Inseln der Ostsee	0,033	0,021	0,64	Ja			
Windzone 4, Küste und Inseln der Ostsee	0,033	0,019	0,58	Ja			

Tabelle 88 Nachweis des Polyamidprofils Schnitt 3-3

	Nachweis des Po	olyamidprofils- Schi	nitt 4-4		
Panelabmessungen	h = [cm]	50			
, anotazini ocoaligoni	l = [cm]	50			
DEEK Drofildurchmasser D. Cohnitt 1 1 Januar	10				
PEEK-Promourichmesser D Schnitt 1-1[mm]	12				
Ty [N/mm2]	100				
Gewindestangedurchmesser D(eff) [mm]	8				
Windzone	Nc,rd [KN]	Ned [KN]	Nachweis: Ned/Nc,rd	Nachweis erfüllt !!	
Windzone 1, Binnenland	5,03	0,39	0,08	Ja	
Windzone 2, Binnenland	5,03	0,47	0,09	Ja	
Windzone 2, Küste und Inseln der Ostsee	5,03	0,58	0,11	Ja	
Windzone 3, Binnenland	5,03	0,58	0,11	Ja	
Windzone 3, Küste und Inseln der Ostsee	5,03	0,68	0,14	Ja	l
Windzone 4, Binnenland	5,03	0,68	0,14	Ja	
Windzone 4, Küste der Nord- und	E 02	0.01	0.1/	le.	
Ostsee und Inseln der Ostsee	5,03	0,81	0,16	BL	1
Windzone 4, Küste und Inseln der Ostsee	5,03	0,74	0,15	Ja	1

Tabelle 89 Nachweis des Polyamidprofils Schnitt 4-4



	Nachweis	der Gewindestange)		
Danalahmassungan	h = [cm]	50			
Fallelabillessuligen	l = [cm]	50			
Gewindestangedurchmesser d [mm]	8				
fy [N/mm2]	560				
Kernquerschnitt [mm ²]	32,8				
Windzone	Nc,Rd [KN]	N _{Ed} [KN]	Nachweis: N _{Ed} /N _{c,Rd}	Nachweis erfüllt !!	
Windzone 1, Binnenland	14,69	0,39	0,03	Ja	
Windzone 2, Binnenland	14,69	0,47	0,03	Ja	
Windzone 2, Küste und Inseln der Ostsee	14,69	0,58	0,04	Ja	
Windzone 3, Binnenland	14,69	0,58	0,04	Ja	
Windzone 3, Küste und Inseln der Ostsee	14,69	0,68	0,05	Ja	
Windzone 4, Binnenland	14,69	0,68	0,05	Ja	
Windzone 4, Küste der Nord- und	14.40	0.01	0.0/	la.	
Ostsee und Inseln der Ostsee	14,69	0,81	0,06	BL	
Windzone 4, Küste und Inseln der Ostsee	14,69	0,74	0,05	Ja	

Tabelle 90 Nachweis der Gewindestange



- 14. Anhang 2 Fotodokumentation und Messwerte der Versuche
- 14.1. Ankerversuche

14.1.1.Mörtelprüfungen



a) Silka Dünnbettmörtel DM (MG III) Bild 240 Geprüfte Mörtelsorten



b) Baumit MG IIa



a) Prüfkörper Serien MD und MB (Prismen 160x40x40 mm)

Bild 241 Herstellung der Prüfkörper (MG IIa)



b) Prüfkörper für Serie MSD (Prismen 200x100x100 mm)



a) Prüfkörper Serien MD und MB (Prismen 160x40x40 mm)



b) Prüfkörper für Serie MSD (Prismen 200x100x100 mm)

Bild 242 Herstellung der Prüfkörper vom Dünnbettmörtel (MG III)





Bild 243 a) Bestimmung der Biegezugfestigkeit (DIN EN 1015-11); b) Prismendruckfestigkeit und Spaltzugfestigkeit an halbierten Mörtelprismen; c) Spannungs-Dehnungs-Beziehungen an Mörtelprismen (DIN 18555-4)



Bild 244

a) Bestimmung der Biegezugfestigkeit (DIN EN 1015-11); b) Prismendruckfestigkeit an halbierten Mörtelprismen; c) Spannungs-Dehnungs-Beziehungen an Mörtelprismen (DIN 18555-4)



											Biegezugfe	stigke it	Druckfest	tigkeit	E-Mo	dul
Ifd.	Name	Material	erstellt	geprüft	Alter	Breite	Höhe	Länge	Masse	Dichte	Bruchkraft	f_BZ	Bruchkraft	f_m	E_33	f_m
Nr.					[q]	[mm]	[mm]	[mm]	[6]	[kg/dm ³]	[kN]	[N/mm ²]	[kN]	[N/mm ²]	[N/mm²]	[N/mm²]
٢	MB, MD-1- MG III	Silka DM	23.03.2015	23.04.2015	31	40,3	39,9	160,3	461	1,789	2,11	4,92	26,93	16,75	6304,90	13,07
2	MB, MD-2- MG III	Silka DM	23.03.2015	23.04.2015	31	40,1	39,8	160,4	461	1,801	1,77	4,17	24,86	15,58	5867,49	13,16
ю	MB, MD-3- MG III	Silka DM	23.03.2015	23.04.2015	31	40,4	40,1	160,9	468	1,795	2,04	4,70	26,31	16,24	7009,24	13,54
4	MB, MD-4- MG III	Silka DM	23.03.2015	23.04.2015	31	39,9	40,0	160,2	460	1,799	1,82	4,28	27,52	17,24	6528,44	13,71
2	MB, MD-5- MG III	Silka DM	23.03.2015	23.04.2015	31	40,2	39,8	160,4	458	1,785	1,96	4,62	24,62	15,39	6766,66	13,57
9	MB, MD-6- MG III	Silka DM	23.03.2015	23.04.2015	31	39,9	40,3	160,3	468	1,816	1,69	3,90	28,18	17,52	7199,52	13,97
										1,797	1,90	4,43	26,40	16,45	6613	13,50
٢	MB, MD-1-MG IIa	Baumit MG Ila	20.03.2015	23.04.2015	34	41,0	40,3	160,2	377	1,424	1,07	2,41	15,63	9,46	7704,27	6,86
2	MB, MD-2-MG IIa	Baumit MG Ila	20.03.2015	23.04.2015	34	41,2	40,0	160,2	384	1,454	0,95	2,17	15,78	9,57	7309,78	6,48
С	MB, MD-3-MG IIa	Baumit MG Ila	20.03.2015	23.04.2015	34	41,1	39,9	160,2	386	1,469	1,14	2,61	16,81	10,25	7736,18	6,95
4	MB, MD-4-MG IIa	Baumit MG Ila	20.03.2015	23.04.2015	34	40,2	40,1	161,2	381	1,466	0,89	2,06	15,66	9,71	7527,92	6,97
2	MB, MD-5-MG IIa	Baumit MG Ila	20.03.2015	23.04.2015	34	40,1	40,4	161,3	382	1,462	0,89	2,04	15,14	9,34	7673,73	6,82
9	MB, MD-6-MG IIa	Baumit MG Ila	20.03.2015	23.04.2015	34	40,2	40,2	161,5	379	1,452	0,86	1,98	14,31	8,86	6970,22	6,52
										1,455	26'0	2,21	15,55	9,53	7487	6,77
					ĺ	ĺ		ĺ								

Bestimmung der Biegezugfestigkeit, Druckfestigkeit und des E-Modules der geprüften Mörtelgruppen Tabelle 91





Bild 245 Spannungs-Dehnungs-Linie für MG IIa



Bild 246 Spannungs-Dehnungs-Linie für DM, MG III



14.1.2. Mauerwerksprüfungen



- Prüfkörper Serie MWV in Verbindung mit a) Mauermörtel MGIIa (Abmessungen 390x492x115 mm)
- Bild 247 Herstellung der Prüfkörper (MG IIa)



Prüfkörper Serie MWH in Verbindung b) mit Mauermörtel MGIII (Abmessungen 498x750x175 mm)



- b) Prüfkörper Versagen Serie MWH PK 1
- Bild 248 Versuchsdurchführung Serie MWH (MG III)





a) Messstellen

b) Prüfkörper Versagen Serie MWV PK 1



Taballa 00	Englanda dan	N A a a m a ml . a	du valu vanav vala a	Carlan	A / A / A / A / A / A / A / A	1
I and I d U /	Επαρηίζεα παι	N/2	$nn n k v \Delta r C n n \Delta$	Sanan	$N/N/N/N/ \pm N/N/N/P$	-
		IVIAUCIVVCING		JUIUI	IVIVV V TIVIVVI.	1
	. /					

Nr.	aufgemauert	geprüft	Alter	Länge	Breite	Höhe	F_Bruch	f_Bruch	E Modul	Querdehnzahl
	[dd.mm.yyyy]	[dd.mm.yyyy]	[d]	[mm]	[mm]	[mm]	[kN]	[N/mm ²]	[N/mm²]	
MWV-1	23.03.2015	20.04.2015	28	486,2	112,0	410,8	1072,40	19,70	13597,63	0,17
MWV-2	23.03.2015	21.04.2015	29	482,8	112,7	409,0	921,78	16,94	12954,11	0,22
MWV-3	23.03.2015	21.04.2015	29	483,5	112,3	417,0	988,23	18,20	13192,97	0,20
		Mitt	elwert	e			994,14	18,28	13248,24	0,20
MWH-1	23.03.2015	21.04.2015	29	496,0	515,41	5,92	4569,65	0,03		
MWH-2	23.03.2015	21.04.2015	29	496,3	176,0	752,0	531,68	6,09	4846,02	0,11
MWH-3	23.03.2015	21.04.2015	29	497,0	176,2	752,0	534,00	6,10	4622,61	0,23
		Mitt	elwert	e	527,03	6,03	4679,43	0,12		





Bild 250 Zusammenstellung der Mauerdruckversuche, Serie MWV (Vormauer) in Verbindung mit MG IIa





Bild 251 Zusammenstellung der Mauerdruckversuche, Serie MWH (Hintermauer) in Verbindung mit MG III

14.1.3. Haftscherfestigkeitsversuche



 a) Prüfkörper Serie HV in Verbindung mit Mauermörtel MG IIa (Abmessungen 240x237x115 mm)



 b) Prüfkörper Serie HH in Verbindung mit Mauermörtel MG III (Abmessungen 248x376 x175 mm)

Bild 252 Herstellung der Prüfkörper für Haftscherfestigkeitsversuche





a) Versuchsaufbau



- b) Prüfkörper beim Versagen
- Bild 253 Versuchsdurchführung der Prüfkörper für Haftscherfestigkeitsversuche, Serie HH



a) Versuchsaufbau



- b) Prüfkörper beim Versagen
- Bild 254 Versuchsdurchführung der Prüfkörper für Haftscherfestigkeitsversuche, Serie HV

	Stein-Mörtel-				Abmessungen			Bruc	shbild %		Ę	estigkeit
Serie HH	Kombination	L1	L2	L	t1	12	t	а	q	c	Bruchkraft	Haftscherfestigkeit
	III WN	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	(Haftfläche St-Mö)	(Mörtel)	(Stein)	[KN]	[N/mm²]
	PK 1- VSO	248,6	248,6	248,6	174,8	175,2	175,0	100			15,0	0,3
B) 3	PK 2- VS0	248,0	248,0	248,0	175,5	175,8	175,7	100			21,8	0,4
ונפט 025-	PK 3- VSO	248,5	248,4	248,5	175,6	175,6	175,6	100			16,8	0,3
r NIG Stat	PK 4- VS0	248,3	248,3	248,3	175,3	175,2	175,3	100			22,7	0,4
a D	PK 5- VSO	248,3	248,5	248,4	175,4	175,3	175,4	95	0	5	12,4	0,2
	PK 6- VS0	248,6	248,3	248,5	175,6	175,4	175,5	86	2		15,6	0,3
											MW	0,33
											Stabw	0,08



			MM	Ctabut	OLAUW	MW	Ctabur	OLAUW
	Bruchkraft	[N]	24,616	110022630	8,62770814		5,66610859	
	Haftscherfestigkeit	[zww/N]	0,464	733000031 0	0,100203001	1,419	0 10357/979	0, 10001 4212
it	Bruchkraft	[N]	25,196	32,939	15,713	81,365	70,249	73,899
Festigke	Haftscherfestigkeit	[Zmm/N]	0,476	0,620	0,295	1,531	1,327	1,398
	c	(Stein)						
ruchbild %	q	(Mörtel)	5	5	5	5	5	5
B	a	(Haftfläche St-Mö)	96	96	95	96	96	96
	t	[mm]	112,3	112,4	112,5	112,2	111,8	112,0
	12	[mm]	112,5	112,0	112,6	111,9	111,9	112,1
sungen	t1	[mm]	112,1	112,8	112,4	112,5	111,7	111,9
Abmes	L	[mm]	235,9	236,2	237,0	236,8	236,7	236,1
	L2	[mm]	236, 3	236, 3	236,5	237,0	237,4	235,9
	L1	[աա]	235,4	236,0	237,4	236,6	236,0	236,2
Ste in-Mörte I-	Kombination	III MN	PK 1- VS0	PK 2- VSO	PK 2- VS0	PK 1- VS1	PK 2- VS1	PK 3- VS1
	Serie HV	DIN 1022-3						

Tabelle 94 Bestimmung der Haftscherfestigkeit, bei der Hintermauer (Serie HV)





14.1.4. Ankerversuche an sich

14.1.5. Herstellung der Prüfkörper



Bild 255 Herstellung der Prüfkörper Serie AV in Verbindung mit Mauermörtel MGIIa (Abmessungen 240x237x115 mm)



Bild 256 Herstellung der Prüfkörper Serien AHF, AScH und ADH in Verbindung mit Leichtmörtel LM, MG III (Abmessungen 248x248x175 mm), (Nach der Aushärtung wurden die Anker in die Fuge bzw. den Stein eingebracht)

14.1.6.Durchführung



a) Versuchsaufbau



b) Ausziehlast manuell Anbringen



c) Ankerschlupf aus IWA

Bild 257 Versuchsdurchführung, Serie AV – Versuchsaufbau: Anbringen der Ausziehlast manuell durch einen hydraulischen Zylinder und Prüfkörpervorlast(0,1 N/mm2) durch Kraftmessdosen- Messen des Ankerschlupfes durch am Anker befestigten zwei induktiven Wegaufnehmer





- a) Serie AV, PK 1
- b) Serie AV, PK 2
- c) Serie AV, PK 3



d) Serie AV, PK 4

e) Serie AV, PK 5

Bild 258 Prüfkörper nach dem Versagen, Serie AV



a) Zyklische Vorbelastung

b) Ausziehlast manuell Anbringen c) Ankerauszug am Versuchsende

Bild 259 Versuchsdurchführung, Serie AHF – Versuchsaufbau: Aufbringen der zyklischen Vorbelastung durch die Prüfmaschine, Anbringen der Ausziehlast manuell durch einen hydraulischen Zylinder und Prüfkörpervorlast(0,1 N/mm2) durch Kraftmessdosen- Messen des Ankerschlupfes durch am Anker befestigten zwei induktiven Wegaufnehmer- Ankerauszug aus der Fuge





a) Serie AHF, PK 1

b) Serie AHF, PK 2



c) Serie AHF, PK 3



d) Serie AHF, PK 4



e) Serie AHF, PK 5

Bild 260 Prüfkörper nach dem Auszugversuch, Serie AHF



a) Zyklische Vorbelastung



b) Ausziehlast der Querbelastung



c) Ankerversagen am Versuchsende

Bild 261 Versuchsdurchführung, Serie AScH – Versuchsaufbau: Aufbringen der zyklischen Vorbelastung durch die Prüfmaschine, Anbringen der Querbelastung durch die Prüfmaschine und Prüfkörpervorlast (0,1 N/mm2) durch Kraftmessdosen- Messen der Ankerverformung durch den Maschinenweg



a) Serie AScH, PK 1

b) Serie AScH, PK 2

c) Serie AsCH, PK 3

Bild 262 Prüfkörper nach dem Schubversuch, Serie AScH



Bild 263 Versuchsdurchführung, Serie AHS – Versuchsaufbau: Aufbringen der zyklischen Vorbelastung durch die Prüfmaschine, Anbringen der Ausziehlast manuell durch einen hydraulischen Zylinder und Prüfkörpervorlast(0,1 N/mm2) durch Kraftmessdosen- Messen des Ankerschlupfes durch am Anker befestigten zwei induktiven Wegaufnehmer- Ankerauszug aus dem Mauerstein





Serie AHS, PK 1 a)

b) Serie AHS, PK 2

c) Serie AHS, PK 3



d) Serie AHS, PK 4

e) Serie AHS, PK 5

Serie AHS

O Ene Mar

PK-Nr: 0

12-05-19

Bild 264 Prüfkörper nach dem Auszugversuch, Serie AHS



Zyklische Vorbelastung a)

b) Drucklast durch die Prüfmaschine

Ankerversagen am C) Versuchsende

Bild 265 Versuchsdurchführung, Serie ADH – Versuchsaufbau: Aufbringen der zyklischen Vorbelastung durch die Prüfmaschine, Anbringen der Drucklast durch die Prüfmaschine und Prüfkörpervorlast (0,1 N/mm2) durch Kraftmessdosen-Messen der Ankerverformung durch den Maschinenweg





Bild 266 Prüfkörper nach dem Druckversuch, Serie ADH

14.2. Konsolenbelastungsversuche (Serie K)



a) Belastung der Konsole in der Prüfmaschine



 b) Versagen des Konsolensystems (Versagen des schwachsten Querschnitt es des Polyamidteiles auf Zugbeanspruchung)

Bild 267 Versuchsdurchführung- Serie K- Prüfkörper 1




a) Belastung der Konsole in der Prüfmaschine



 b) Versagen des Konsolensystems (Versagen des schwachsten Querschnitt es des Polyamidteiles auf Zugbeanspruchung)

Bild 268 Versuchsdurchführung- Serie K- Prüfkörper 2



a) Belastung der Konsole in der Prüfmaschine



 b) Versagen des Konsolensystems (Versagen des schwachste Querschnitt es des Polyamidteiles auf Zugbeanspruchung)

Bild 269 Versuchsdurchführung- Serie K- Prüfkörper 3





c) PK3

Bild 270 Versagen des Konsolensystems- Serie K-

a) PK1





Bild 271 Belastungsversuch- Serie K- Prüfkörper 1



Bild 272 Belastungsversuch- Serie K- Prüfkörper 1- Schienenverdrehung





Bild 273 Belastungsversuch- Serie K- Prüfkörper 2



Bild 274 Belastungsversuch- Serie K- Prüfkörper 2- Schienenverdrehung





Bild 275 Belastungsversuch- Serie K- Prüfkörper 3



Bild 276 Belastungsversuch- Serie K- Prüfkörper 3- Schienenverdrehung



14.3. Luftkissenversuche

14.3.1. Materialprüfung- Mörtelprüfungen



a) Fels Dünnbettmörtel DM (MG III) Bild 277 Geprüfte Mörtelsorten



b) Baumit MG IIa



Prüfkörper Serien MD und MB a) (Prismen 160x40x40 mm)



Prüfkörper für Serie MSD b) (Prismen 160x40x40 mm)

Bild 278 Herstellung der Prüfkörper (MG III)



a) Prüfkörper Serien MD und MB (Prismen 160x40x40 mm)

Prüfkörper für Serie MSD b) (Prismen 200x100x100 mm)

Bild 279 Herstellung der Prüfkörper vom Dünnbettmörtel (MG III)





Bild 280 a) Bestimmung der Biegezugfestigkeit (DIN EN 1015-11); b) Prismendruckfestigkeit und Spaltzugfestigkeit an halbierten Mörtelprismen; c) Spannungs-Dehnungs-Beziehungen an Mörtelprismen (DIN 18555-4)





Bild 281 a) Bestimmung der Biegezugfestigkeit (DIN EN 1015-11); b) Prismendruckfestigkeit an halbierten Mörtelprismen; c) Spannungs-Dehnungs-Beziehungen an Mörtelprismen (DIN 18555-4)

Fels	
örtel,	
ettm	
Dünnb	
_	

a)

											Biegezugfe	stigkeit	Druckfest	tigkeit	E-Mo	dul
Ifd.	Name	Material	erstellt	geprüft	Alter	Breite	Höhe	Länge	Masse	Dichte	Bruchkraft	f_BZ	Bruchkraft	۳ ۳	E_33	_ع أ
ž					<u>व</u>	[mm]	[mm]	[mm]	[6]	[kg/dm ³]	[kN]	[N/mm ²]	[kN]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
-	MBz1, MD1- MG III	Fels DM	09.09.2016	17.10.2016	38	40,5	40,1	160,1	425,6	1,635	1,61	3,7	21,9	13,5		
2	MBz2, MD2- MG III	Fels DM	09.09.2016	17.10.2016	38	40,6	40,2	161,9	425,4	1,610	1,63	3,7	22,3	13,7		
e	MBz3, MD3- MG III	Fels DM	09.09.2016	17.10.2016	38	40,4	39,9	161,3	419,3	1,615	1,60	3,7	22,0	13,8		
4	MD4- MG III	Fels DM	09.09.2016	17.10.2016	38	40,0	40,0						21,8	13,6	3478	13,6
2	MD5- MG III	Fels DM	09.09.2016	17.10.2016	38	40,0	40,0						22,3	13,9	3388	12,4
9	MD6- MG III	Fels DM	09.09.2016	17.10.2016	38	40,0	40,0						21,8	13,6	3321	12,5
			Mittelwe	tte						1,6	1,6	3,7	22,0	13,7	3395,7	12,8
1																

b) Normalmörtel, Baumit

											Biegezugfe	stigke it	Druckfest	tigke it	Spaltzugfe	stigkeit	E-Mo	lub
Ifd.	Name	Material	erstellt	geprüft	Alter	Breite F	löhe L	änge M	asse L	Dichte I	Bruchkraft	f_BZ	Bruchkraft	f m	Bruchkraft	f_m	E_33	m_f
ŗ.					[d]	[mm]	mm] [i	mm]	[g] [k	(g/dm ³]	[kN]	[N/mm ²]	[kN]	[N/mm ²]	[kN]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
-	MBz1, MD-1-MG IIa	Baumit MG Ila	21.09.2016	26.10.2016	35	40,6	39,6 1	61,2 5	202	1,956	1,08	2,54	15,90	9,89	3,71	2,31		
2	MBz2, MD-2-MG IIa	Baumit MG Ila	21.09.2016	26.10.2016	35	40,3	39,9 1	59,4 5	511	1,994	1,30	3,04	19,08	11,87	4,59	2,86		
ო	MBz3, MD-3-MG IIa	Baumit MG Ila	21.09.2016	26.10.2016	35	39,7	39,8 1	59,3 4	199	1,982	1,17	2,78	16,41	10,39	3,18	2,01		
4	MSpz1-MG IIa	Baumit MG Ila	21.09.2016	26.10.2016	35	41,1	39,7 1	57,7 1	205	1,963							3626	8,10
2	MSpz2-MG IIa	Baumit MG Ila	21.09.2016	26.10.2016	35	40,7	39,9 1	57,2 5	201	1,963							2555	8,50
9	MSpz3-MG IIa	Baumit MG Ila	21.09.2016	26.10.2016	35	40,2	39,9 1	57,5 4	198	1,971							3424	8,00
										1,971	1,18	2,79	17,13	10,71	3,83	2,39	3202	8,20

Bestimmung der Biegezugfestigkeit, Druckfestigkeit und des E-Modules der geprüften Mörtelgruppen Tabelle 95





Bild 282

14.3.2. Mauersteinprüfungen



a) Kalksandstein für Hintermauer, 6DF (Abmessungen 248x175x248 mm)

Verwendete Steine



b) Fassadenklinker für Vormauerschale, NF (Abmessungen 240x115x71 mm)



Bild 283 Druckversuche an KS-Steinen





a) PK1

b) PK 2



Bild 284 Druckversuche an Fassadenklinker



a) PK1

b) PK 2

c) PK 3

Bild 285 Biegezugversuche an Fassadenklinker

Tabelle 96 Ergebnisse aus Mauersteinprüfungen

									Biegezug	estigkeit	Druckfes	stigkeit
lfd.	Nama	Matarial	aonriitt	Breite	Höhe	Länge	Masse	Dichte	Bruchkraft	f_BZ	Bruchkraft	f_m
Nr.	Name	Wateriai	gepruit	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[kg/dm ³]	[kN]	[N/mm ²]	[kN]	[N/mm ²]
1		KS-6DF	18.11.2016	175,9	248,4	249,4	20584	1,89	_	_	1155,10	26,3
2	KS-Druckversuche	KS-6DF	18.11.2016	175,8	248,2	248,3	20261	1,87	_		1099,10	25,2
3		KS-6DF	18.11.2016	175,1	248,7	249,1	20623	1,90	_	I	1161,30	26,6
		Mittelwerte						1,89	_	1	1138,5	26,0
1		Klinker NF-halbiert	18.11.2016	112,8	67,5	113,3	1654	1,92	_		1658,4	129,8
2	Fassadenklinker-Druckversuche	Klinker NF-halbiert	18.11.2016	112,9	67,6	113,1	1607	1,86	_		1503,8	117,8
3		Klinker NF-halbiert	18.11.2016	112,9	67,6	111,3	1632	1,92	_	I	1581,3	125,8
		Mittelwerte						1,90	_	-	1581,2	124,5
1		Klinker NF	28.11.2016	114,1	68,6	239,2	3544	1,89	11,14	10,74	_	_
2	Fassadenklinker-Biegezugversuche	Klinker NF	28.11.2016	114,1	69,3	240,2	3541	1,86	12,09	11,42	_	_
3		Klinker NF	28.11.2016	113,9	69,3	238,2	3549	1,89	5,50	5,20	_	_
		Mittelwerte						1,88	9,58	9,12	_	_



14.3.3. Mauerwerksprüfungen



- a) Prüfkörper Serie MWV in Verbindung mit Mauermörtel MGIIa (Abmessungen 390x492x115 mm)
- Bild 286 Herstellung der Prüfkörper (MG IIa)



 b) Prüfkörper Serie MWH in Verbindung mit Mauermörtel MGIII (Abmessungen 498x750x175 mm)



a) Messstellen





b) Prüfkörper Versagen Serie MWH PK 1

Bild 287 Versuchsdurchführung Serie MWH (MG III)





c) Messstellen

d) Prüfkörper Versagen Serie MWV PK 1

Bild 288 Versuchsdurchführung Serie MWV (MG III)

Tabelle 97	Ergebnisse der	Mauerwerksdruckversuche	Serien MWV+MWH
------------	----------------	-------------------------	----------------

Nr	aufgemauert	geprüft	Alter	Länge	Breite	Höhe	F_Bruch	f_Bruch	E Modul	Querdehnzahl
INI.	[dd.mm.yyyy]	[dd.mm.yyyy]	[d]	[mm]	[mm]	[mm]	[kN]	[N/mm ²]	[N/mm²]	
MWV-1	21.09.2016	19.10.2016	28	490,0	115,0	405,0	1261,4	22,4	8774	0,17
MWV-2	21.09.2016	19.10.2016	29	490,0	115,0	410,0	1063,6	18,9	12954	0,22
MWV-3	21.09.2016	19.10.2016	29	490,0	115,0	420,0	1149,6	20,4	13193	0,20
		Mitt	elwert	е			1158,2	20,6	11640	0,20
MWH-1	09.09.2016	18.10.2016	39	500,0	177,0	755,0	1706,0	19,3	9174	0,36
MWH-2	09.09.2016	18.10.2016	39	500,0	175,0	757,0	1718,0	19,6	9957	0,42
MWH-3	09.09.2016	18.10.2016	39	500,0	175,0	758,0	1755,0	20,1	9311	0,38
		Mitt	elwert	е			1726,3	19,7	9481	0,39



Bild 289 Zusammenstellung der Mauerdruckversuche, Serie MWV (Vormauer) in Verbindung mit MG IIa



Bild 290 Zusammenstellung der Mauerdruckversuche, Serie MWH (Hintermauer) in Verbindung mit MG III



14.3.4.Rissbildung



Bild 291 Rissbildung beim Bruch-Luftkissenversuch- Versuch 1





Bild 292 Rissbreite beim Bruch-Luftkissenversuch- Versuch 1





Bild 293 Rissbildung beim Bruch-Luftkissenversuch- Versuch 2





Bild 294 Rissbreite beim Bruch-Luftkissenversuch- Versuch 2



14.3.5. Verformung



Bild 295 Horizontale Verformung – IWA 6- Luftkissenversuch-Versuch 1



Bild 296 Maximale Verformung – IWA 8- Luftkissenversuch-Versuch 1





Bild 297 Horizontale Verformung – IWA 10- Luftkissenversuch-Versuch 1



Bild 298 Horizontale Verformung – IWA 6- Luftkissenversuch-Versuch 2





Bild 299 Maximale Verformung – IWA 8- Luftkissenversuch-Versuch 2



Bild 300 Horizontale Verformung – IWA 10- Luftkissenversuch-Versuch 2

Versuch	Windzone	Einwirkung (Bemessungs-wert)	Teilsicherheits-beiwert der Linienverankerung	Tragfähigkeit bei 1 mm Schlupf	Tragfähigkeit bei 5 mm Schlupf	Tragfähigkeit im Bruchzustand	A	uslastung E _d /R₀ R _d =R _m *0,8/ g _M	_
		[kN/m2]		[kWm2]	[kN/m2]	[kN/m2]	Verformung 1mm	Verformung 5mm	Bruchzu- stand
	Windzone 1, Binnenland	1,58	1,5	9'9	5 '6	10,5	96,0	0,25	0,23
_	Windzone 2, Binnenland	1,89	1,5	6,6	9,5	10,5	0,54	0,37	0,34
	Windzone 2, Küste und Inseln der Ostsee	2,31	1,5	6,6	9,5	10,5	0,66	0,46	0,41
Versuch-1	Windzone 3, Binnenland	2,31	1,5	6,6	9,5	10,5	0,66	0,46	0,41
	Windzone 3, Küste und Inseln der Ostsee	2,73	1,5	6,6	9,5	10,5	0,78	0,54	0,49
_	Windzone 4, Binnenland	2,73	1,5	6,6	9,5	10,5	0,78	0,54	0,49
	Windzone 4, Küste der Nord- und Ostsee und Inseln der Ostsee	3,26	1,5	9'9	6,5	10,5	0,92	0,64	0,58
	Windzone 4, Küste und Inseln der Ostsee	2,94	1,5	6,6	9,5	10,5	0,84	0,58	0,53
	Windzone 1, Binnenland	1,58	1,5	2'0	6,1	7,2	65'0	0,48	0,41
_	Windzone 2, Binnenland	1,89	1,5	5,0	6,1	7,2	0,71	0,58	0,49
	Windzone 2, Küste und Inseln der Ostsee	2,31	1,5	5,0	6,1	7,2	0,87	0,71	09'0
_	Windzone 3, Binnenland	2,31	1,5	5,0	6,1	7,2	0,87	0,71	0,60
Versuch-2	Windzone 3, Küste und Inseln der Ostsee	2,73	1,5	5,0	6,1	7,2	1,02	0,84	0,71
_	Windzone 4, Binnenland	2,73	1,5	5,0	6,1	7,2	1,02	0,84	0,71
	Windzone 4, Küste der Nord- und Ostsee und Inseln der Ostsee	3,26	1,5	2'0	6,1	7,2	1,22	1,00	0,85
_	Windzone 4, Küste und Inseln der Ostsee	2,94	1,5	5,0	6,1	7,2	1,10	0,90	0,77
	Windzone 1, Binnenland	1,58	1,5	5,8	7,8	8,9	0,51	0,38	0,33
	Windzone 2, Binnenland	1,89	1,5	5,8	7,8	8,9	0,61	0,45	0,40
	Windzone 2, Küste und Inseln der Ostsee	2,31	1,5	2,8	2,8	8,9	0,75	0,56	0,49
	Windzone 3, Binnenland	2,31	1,5	5,8	7,8	8,9	0,75	0,56	0,49
Mittelwerte	Windzone 3, Küste und Inseln der Ostsee	2,73	1,5	5,8	7,8	8,9	0,88	0,66	0,58
	Windzone 4, Binnenland	2,73	1,5	5,8	7,8	8,9	0,88	0,66	0,58
_	Windzone 4, Küste der Nord- und Ostsee und Inseln der Ostsee	3,26	1,5	2'8	8'2	8,9	1,05	0,78	0,69
	Windzone 4, Küste und Inseln der Ostsee	2,94	1,5	5,8	7,8	8,9	0,76	0,71	0,62

14.3.6. Sicherheitsbeiwert der Linienverankerung

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

~

Tabelle 98 Überblick-Sicherheitsbeiwert der Linienverankerung in den verschiedenen Windzonen



14.4. Brandversuch [154]



Bild 301 Systemaufbau

Bild 302 Prüfaufbau



Bild 303 Verlegen der Vakuum-Isolationspaneele (in der massiven Wand des Prüfstandes verankert)

der Bild 304

Befestigungsmittel (Schraube/Dübel/ Polymermutter) Bild 305

5 Anordnung der Brandriegel ca. 0,1 m und 3,3 m oberhalb des Sturzes, jeweils darüber Konsolen und Stahlschiene



aus



Bild 306 Ausführung im Bereich der Ecke

Bild 307 Außenwandschale Fassadenklinkern



Bild 308 Sturzunterseite



Bild 309 Verankerung des Mauerwerks – Duplexstahlflügel





Bild 310 Brandkammerleibung



Bild 311 Prüfaufbau nach Fertigstellung





Bild 312 Konsole (Polyamid) mittig oberhalb der Brandkammer ohne Brandschäden



Bild 313 Detail





Bild 314 Brandschäden am Paneel (PUR- Bild 315 Schicht) links neben der Brandkammer



315 Brandriegel oberhalb des Sturzes teilweise ausgebaut





Bild 316 Ausgebautes Teilstück – verfärbt Bild 317 und tlw. thermisch verändert aber formstabil



Bild 317 VIP – Ansicht von unten – nach Entfernung des Brandriegels



Bild 318 Detail – Brandschädigung an einem VIP - unterhalb des ersten Brandriegels ausgebaut / PUR – Hartschaum thermisch verändert / verkrackt; die PVC-Kaschierung ist lokal begrenzt geschmolzen / verbrannt

In diesem Anhang zu den Brandversuchen sind ausschließlich zusätzliche Bilder enthalten, die noch nicht im vorstehenden Text Erwähnung fanden. Insofern ist diese Fotodokumentation im Zusammenhang mit dem Text des Abschlussberichts zu sehen.

15. Quellen

Die Liste der Quellen ist über die Laufzeit des Forschungsvorhabens fortgeschrieben worden. Es sind damit auch Quellen aufgelistet, auf die nur in den Zwischenberichten Bezug genommen wird. Durch die hier vorgenommenen Einfügungen stimmen dann die Verweise aus den bisherigen Zwischenberichten mit den hier angegebenen Quellennummern nicht überein.

- [1] Jäger, W.; Masou, R.: (1.) Zwischenbericht "0-EneMau". Innovative Dämmtechnik zur Reduzierung der Transmissionswärmeverluste im Mauerwerksbau mit dem Ziel der Gewährleistung des 0-Energie-Standards. Forschungsbericht. TU Dresden, Lehrstuhl Tragwerksplanung. Erarbeitung im Rahmen des vom BBSR geförderten gleichnamigen Forschungsvorhabens. TU Dresden, Lehrstuhl Tragwerksplanung: 27.09.2013
- [2] Jäger, W.; Forstner, M.; Masou, R. & Al-Khateeb, E.: 2. Zwischenbericht "0-EneMau". Innovative Dämmtechnik zur Reduzierung der Transmissionswärmeverluste im Mauerwerksbau mit dem Ziel der Gewährleistung des 0-Energie-Standards. Forschungsbericht. TU Dresden, Lehrstuhl Tragwerksplanung. Erarbeitung im Rahmen des vom BBSR geförderten gleichnamigen Forschungsvorhabens. TU Dresden, Lehrstuhl Tragwerksplanung: 25.03.2014
- [3] Jäger, W.; Al-Khateeb. E.; Youssef, H. & Masou, R.: 3. Zwischenbericht "0-EneMau". Innovative Dämmtechnik zur Reduzierung der Transmissionswärmeverluste im Mauerwerksbau mit dem Ziel der Gewährleistung des 0-Energie-Standards. Forschungsbericht. TU Dresden, Lehrstuhl Tragwerksplanung. Erarbeitung im Rahmen des vom BBSR geförderten gleichnamigen Forschungsvorhabens. TU Dresden, Lehrstuhl Tragwerksplanung: 04.10.2016
- [4] Masou, R.; Forstner, M.: Einsatz von Vakuumisolationspaneelen (VIP) bei zweischaligem Verblendmauerwerk. In: Mauerwerk-Kalender 39 (2014), S. 433–473. Hrsg. W. Jäger. Ernst & Sohn, Berlin.
- [5] Altaha, N.: Aktueller Stand der Abdichtungstechnik bei zweischaligem Verblendmauerwerk, Mauerwerk 13 (2009), Heft 6, S. 326-330
- [6] Altaha, N.: Konstruktion und Ausführung von zweischaligem Mauerwerk, Mauerwerk-Kalender 34 (2009), S. 291–318, Hrsg. W. Jäger. Ernst & Sohn, Berlin 2009.
- [7] Altaha, N.: Zweischaliges Ziegelverblendmauerwerk Stand der Technik, Mauerwerk 15 (2011), Heft 4, S. 214-222, Hrsg. W. Jäger. Ernst & Sohn, Berlin 2011.
- [8] Altaha, N.; Seim, W.: Eurocode 6 Kommentare und Anwendungshilfe: DIN EN 1996-2/NA: Nationaler Anhang – Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten – Teil
 2: Planung und Auswahl der Baustoffe und Ausführung von Mauerwerk, Mauerwerk-Kalender 37 (2012), S. 197-208, Hrsg. W. Jäger. Ernst & Sohn, Berlin 2012.
- [9] Fechner, O.: Wärmedämmstoffe und Wärmedämmsysteme mit Zulassung Aktuelle Übersicht. In: Mauerwerk-Kalender 33 (2008), S. 193–250. Hrsg. W. Jäger. Ernst & Sohn: Berlin.
- [10] Willems, W.M.; Schild, K.: Dämmstoffe im Bauwesen. In: Bauphysik-Kalender 13 (2013), S. 93–168. Hrsg. N. Fouad. Ernst & Sohn, Berlin.
- [11] Hegner, H.-D.; Schoch, T.: Zukunftssicher Bauen Wie die Energiewende das Bauen beeinflusst. In: Mauerwerk-Kalender 38 (2013), S. 447–476. Hrsg. W. Jäger. Ernst & Sohn, Berlin.

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

- [12] Jäger, W.; Hirsch, R.: Neuentwicklungen beim Mauerwerksbau mit allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung. In: Mauerwerk-Kalender 39 (2014). Hrsg. W. Jäger. Verlag Ernst & Sohn: Berlin. S. 35 – 67
- [13] Fostner, M.: VIP/QASA Vakuumdämmung im Stand. Vortrag auf dem 7. Mauerwerk-Kalendertag am 25.03.2014 in Dresden. TU Dresden, Lehrstuhl Tragwerksplanung/Verlag Ernst & Sohn. Tagungsunterlagen
- [14] Bosch, A.; Heinemann M.: HDK Pyrogenic Silica and the Nano Debate, Wacker Chemie AG, Burghausen, November 2009
- [15] Heinemann, M.: Manufactured nanomaterials, nanostructured metaloxides. Wacker Chemie AG, Vortrag ACHEMA, Frankfurt am Main, 14.05.2009
- [16] Heinemann, M.: Manufactured nanomaterials, nanostructured metaloxides, Wacker Chemie AG, Vortrag ACHEMA, Frankfurt am Main, 14.05.2009
- [17] IARC Silica, some silicates, coaldustand para-aramidfibrils Monografie über die Bewertung des Krebsrisikos beim Menschen; Vol. 68, Lyon, Frankreich, 1997, S. 41– 242
- [18] ISO/TS 27687:2008 Nanotechnologies -- Terminology and definitions for nano-objects --Nanoparticle, nanofibre and nanoplate, 15. August 2008
- [19] Synthetic Amorphous Silica; Chemical Abstracts CAS No. 7631-86-9 und Pyrogenic Silica CAS No. 112945-52-5:ECE-TOC JACC Report des European Centre for Ecotoxicology and Toxicology of Chemical, Brussels, September 2006
- [20] Wacker Chemie AG, Pressemitteilung Nr. 11 vom 24. April 2009: Wacker's Pyrogenic Silica Successfully Completes REACH Registration by ECHA European Chemicals Agency, Helsinki
- [21] Caps, R.: Strahlungsströme in Evakuierten thermischen Superisolationen, Dissertation, Bayrische Julius-Maximilian Universität Würzburg 1985
- [22] Heinemann, U.; Caps, R.; Fricke, J.: Characterization and Optimation of Filler Materials for Super Insulation, Vuoto Scienza e Tecnologia, Vol. 18, N 1-2, 1999, S. 42–46
- [23] Willems, W.M; Schild, K.: Schlanke Wände warme Zimmer, Wenn Bauland oder Wohnraum teuer ist, RUBIN Wissenschaftsmagazin der Ruhr-Universität Bochum, Nr. 212 vom 08.07.2004, S. 49–52
- [24] Barthel, H.: Wasser auf hochdisperser Kieselsäure (HDK); Beitrag zum 2. Expertenkreis "Anwendung von VIP in der Baupraxis", Bundesinstitut für Bau-, stadt- und Raumforschung (BBSR), Berlin, ZAE Bayern Würzburg, Würzburg 25.05.2009
- [25] Barthel, H.: Wasser auf hochdisperser Kieselsäure (HDK); Beitrag zum 3. Expertenkreis "Anwendung von VIP in der Baupraxis", Bundesinstitut für Bau-, stadt- und Raumforschung (BBSR), Berlin, 08.09.2009
- [26] Schwab H.: Vakuumisolationspaneele Gas und Feuchteeintrag sowie Feuchte und Wärmetransport, Dissertation, Bayrische Julius-Maximilian Universität Würzburg 2009
- [27] Brendler, E.: Strukturveränderungen hydrophiler pyrogener Kieselsäure bei Feuchtlagerung. Forschungsbericht der TU Bergakademie Freiberg, Institut für Analytische Chemie, Fachgruppe NMR-Spektroskopie, Dezember 2007
- [28] VIS Vacuum Insulating Sandwiches. Webseite Vakuumdämmung. TU Dortmund, Lehrstuhl für Bauphysik und Technische Gebäudeausrüstung. <u>http://www.vakuumdaemmung.de/vis/</u>. 20.03.2014

- [29] Arbeitskreis Kostengünstige Passivhäuser Phase II: 2006-2008: Protokollband 16: Wärmebrückenfreies Konstruieren; Hersg.: Feist, W. Passivhaus Institut, 8. Auflage, Darmstadt Januar 2009
- [30] Arbeitskreis Kostengünstige Passivhäuser Phase IV: 2006-2008: Protokollband 35: Wärmebrücken und Tragwerksplanung – die Grenzen des wärmebrückenfreien Konstruierens. Hrsg. W. Feist, Passivhaus Institut, Darmstadt 2007.
- [31] Brameshuber, W.; Koster, M.; Hannawald, J.: Berechnung des punktbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten von Luftschichtankern mit dreidimensionalen Finite-Elemente-Methoden, Prüfbericht M1405, RWTH Aachen, Institut für Bauforschung Aachen, Aachen 17.02.2010
- [32] Brenner, V.; Altinisik, L.: Integration der TGA, LCA und thermische Bauphysik, Aktennotiz GT0944 Projekt ReMoMaBStuttgart, 27.04.2011
- [33] Brenner, V.; Altinisik, L.: Festlegung und Herleitung der technischen Kennwerte im ReMoMaB, Aktennotiz GT0944 Projekt ReMoMaBStuttgart, 23.5.2011
- [34] Brenner, V.; Altinisik, L.: Wandaufbauten Dämmstoffe und Materialstärken, Aktennotiz GT0944 Projekt ReMoMaBStuttgart, 23.05.2011
- [35] Brockmann, T.; Herr, R.; Rössig, S.: Vakuumisolationspaneele (VIP) in der Baupraxis, ed. S.-. Bundesinstitut für Bau-, und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, Selbstverlag des Bundesinstitut für Bau-, Stadt-, und Raumforschung (BBSR): Bonn 2011
- [36] Burkert, T.; Plagge, R.: Elbphilharmonie Hamburg: Statisch-konstruktive und bauphysikalische Untersuchungen am Bestandmauerwerk des Kaispeichers A. In: Mauerwerk-Kalender 38 (2013), S. 299–361. Hrsg. W. Jäger. Ernst & Sohn, Berlin 2013.
- [37] Deplazes, A.: Architektur Konstruieren: Vom Rohmaterial zum Bauwerk. Ein Handbuch.3. erweiterte Auflage, Birkhäuser Basel, Boston, Berlin 2008.
- [38] DIN 105-100:2012-01: Mauerziegel Teil 100: Mauerziegel mit besonderen Eigenschaften, Ausgabe 2012-01
- [39] DIN 1053-1:1996-11: Mauerwerk -Teil 1: Berechnung und Ausführung, Ausgabe 1996-11
- [40] DIN 1055-4:2005-03: Einwirkungen auf Tragwerke Teil 4: Windlasten, Ausgabe 2005-03
- [41] DIN 106:2012-12: Kalksandsteine mit besonderen Eigenschaften, Ausgabe 2012-12
- [42] DIN 18195-1:2011-12: Bauwerksabdichtungen Teil 1: Grundsätze, Definitionen, Zuordnung der Abdichtungsarten, Ausgabe 2011-12
- [43] DIN 18195-2:2009-04: Bauwerksabdichtungen Teil 2: Stoffe, Ausgabe 2009-04
- [44] DIN 18195-4:2011-12: Bauwerksabdichtungen Teil 4: Abdichtungen gegen Bodenfeuchte (Kapillarwasser, Haftwasser) und nichtstauendes Sickerwasser an Bodenplatten und Wänden, Bemessung und Ausführung, Ausgabe 2011-12
- [45] DIN 18542:2009-07: Abdichten von Außenwandfugen mit imprägnierten Fugendichtungsbändern aus Schaumkunststoff - Imprägnierte Fugendichtungsbänder - Anforderungen und Prüfung, Ausgabe 2009-07



- [46] DIN 4102-1:1998-05: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen Teil 1: Baustoffe; Begriffe, Anforderungen und Prüfungen. Ausgabe 1998-05
- [47] Weller, B.; Heilmann, S.: Brandschutz. In: Wendehorst Bautechnische Zahlentafeln. 35. Auflage. Springer, Vieweg, Beuth: Wiesbaden 2015, S. 249 – 283
- [48] DIN EN 13501-1:2010-01: Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten. Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten; Deutsche Fassung EN 13501-1:2007+A1:2009. Ausgabe 2010-01
- [49] Brandverhalten von Bauprodukten und Bauarten nach DIN EN 13501 und DIN 4102. <u>http://www.baulinks.de/security-sicherheitstechnik/brandverhalten.php</u>. Aufruf 10.04.2017
- [50] CALOSTAT die mineralische Dämmung von heute. http://www.calostat.com/product/calostat/de/Pages/default.aspx. Aufruf: 23.04.2017
- [51] DIN 4102-2:1977-09: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen Teil 2: Begriffe, Anforderungen und Prüfungen. Ausgabe 1977-09
- [52] DIN 4102-3:1977-09: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen Teil 3: Brandwände und nichttragende Außenwände, Begriffe, Anforderungen und Prüfungen. Ausgabe 1977-09
- [53] DIN 4102-22:2004-11: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen Teil 22: Anwendungsnorm zu DIN 4102-4 auf der Bemessungsbasis von Teilsicherheitsbeiwerten. Ausgabe 2004-11
- [54] DIN 4102-4 A1:2004-11: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen Teil 4: Zusammenstellung und Anwendung klassifizierter Baustoffe, Bauteile und Sonderbauteile; Änderung A1, Ausgabe 2004-11
- [55] DIN 4108-10:2008-06: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden Teil 10: Anwendungsbezogene Anforderungen an Wärmedämmstoffe - Werkmäßig hergestellte Wärmedämmstoffe, Ausgabe 2008-06
- [56] DIN 4108-2:2013-02: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz, Ausgabe 2013-02
- [57] DIN 4108-3:2012-01: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz - Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung, Ausgabe 2012-01
- [58] EnEV . Energieeinsparverordnung EnEV 2014 / EnEV ab 2016. <u>http://www.enev-online.com/enev_2014_volltext/</u>. Aufruf 12.02.2017
- [59] DIN 4109:1989-11: Schallschutz im Hochbau Anforderungen und Nachweise, Ausgabe 1989-11
- [60] DIN EN 1990:2010-12: Grundlagen der Tragwerksplanung; Deutsche Fassung EN 1990:2002 + A1:2005 + A1:2005/AC:2010, Ausgabe 2010-12
- [61] DIN EN 1990/NA:2010-12: Nationaler Anhang National fetsgelegte Parameter. Grundlagen der Tragwerksplanung. Ausgabe 2010-12
- [62] DIN EN 1991-1-4/NA:2010-12: Nationaler Anhang National festgelegte Parameter -Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen -Windlasten, Ausgabe 2010-12



- [63] DIN EN 1996-1-1:2013-02: Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten - Teil 1-1: Allgemeine Regeln f
 ür bewehrtes und unbewehrtes Mauerwerk, Ausgabe 2013-02
- [64] DIN EN 1996-1-1:2012-05/NA: Nationaler Anhang. National festzulegende Parameter, Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten - Teil 1-1: Allgemeine Regeln für bewehrtes und unbewehrtes Mauerwerk, Ausgabe 2012-05
- [65] DIN EN 1996-3: Nationaler Anhang National festgelegte Parameter Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten – Teil 3: Vereinfachte Berechnungsmethoden für unbewehrte Mauerwerksbauten. NABau im DIN e.V.: Berlin
- [66] DIN EN 771-1:2011-07: Festlegungen für Mauersteine Teil 1: Mauerziegel, Ausgabe 2011-07
- [67] DIN EN 845-1:2008-06: Festlegungen für Ergänzungsbauteile für Mauerwerk Teil 1: Maueranker, Zugbänder, Auflager und Konsolen, Ausgabe 2008-06
- [68] DIN EN 846-5:2012-11: Prüfverfahren für Ergänzungsbauteile für MAuerwerk Teil 5: Bestimmung der Zug- und Drucktragfähigkeit sowie der Steifigkeit von Mauerankern (Steinpaar-Prüfung). NABau im DIN: Berlin 2012
- [69] DIN EN 846-6:2012-11: Prüfverfahren für Ergänzungsbauteile für Mauerwerk Teil 6: Bestimmung der Zug- und Drucktragfähigkeit sowie der Steifigkeit von Mauerankern (Einseitige Prüfung). NABau im DIN: Berlin 2012
- [70] DIN EN 998-2:2010-12: Festlegungen für Mörtel im Mauerwerksbau Teil 2: Mauermörtel
- [71] DIN EN ISO 10211:2008-04: Wärmebrücken im Hochbau Wärmeströme und Oberflächentemperaturen - Detaillierte Berechnungen, Ausgabe 2008-04
- [72] DIN EN ISO 14040:2009-11: Umweltmanagement Ökobilanz Grundsätze und Rahmenbedingungen, Deutsche und Englische Fassung, Ausgabe 2009-11
- [73] DIN EN ISO 14044:2006-10: Umweltmanagement Ökobilanz Anforderungen und Anleitungen, Deutsche und Englische Fassung, Ausgabe 2006-10
- [74] DIN EN ISO 6946:2008-04: Bauteile Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient Berechnungsverfahren, Ausgabe 2008-04
- [75] DIN V 18599-1:2011-12: Energetische Bewertung von Gebäuden Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 1: Allgemeine Bilanzierungsverfahren, Begriffe, Zonierung und Bewertung der Energieträger, Ausgabe 2011-12
- [76] DIN V 20000-401: 2012-11: Anwendung von Bauprodukten in Bauwerken Teil 401: Regeln für die Verwendung von Mauerziegeln, Vornorm Ausgabe 2012-11
- [77] DIN V 20000-412: 2004-03: Anwendung von Bauprodukten in Bauwerken Teil 412: Regeln für die Verwendung von Mauermörtel nach DIN EN 998-2:2003-09,Vornorm
- [78] DVZ Dienstleistungs- und Verwaltungszentrum Theaterstrasse in Winterthur. Urs Burkard und Adrian Meyer, Baden in Architektur Schweizer Ingenieur und Architekt, Nr. 31/32. 8, August 2000
- [79] Figge, D.: Ausführung von zweischaligem Mauerwerk, Mauerwerk 13 (2009), Heft 6, S. 337-344, Hrsg. W. Jäger. Ernst & Sohn, Berlin 2009.



- [80] Figge, D.: Konstruktionen und Ausführung von unbewehrtem Mauerwerk nach DIN 1053-12, Mauerwerk 13 (2009), Heft 5, S. 307-315, Hrsg. W. Jäger. Ernst & Sohn, Berlin 2009.
- [81] Gigla, B.: Nachhaltige und schadensfreie Konstruktionen von Verblendmauerwerk, Mauerwerk-Kalender 35 (2010), S. 79-101, Hrsg. W. Jäger. Ernst & Sohn, Berlin 2010.
- [82] Feistel, G.; Scheller, E.: Befestigungsmittel f
 ür den Mauerwerksbau, Teil 2: Anker, Konsolen und Schienen. In: Mauerwerk-Kalender 33 (2008). Hrsg. W. J
 äger. Ernst & Sohn: Berlin, S. 439 - 453
- [83] Glitza, H.: Berechnungsansätze für Luftschichtanker. In: Mauerwerk-Kalender 11, S. 753 769. Berlin: Ernst & Sohn, 1986.
- [84] Glitza, H.: Handbuch Sichtmauerwerk Bautechnik im Detail, Hrsg. KANN GmbH Baustoffwerke MBI Beton GmbH, 1. Auflage 2002
- [85] Graubner, C.-A.: Entwicklung eines Bemessungskonzeptes für in Linie verankerte Vorsatzschalen aus Mauerziegeln. Forschungsbericht A 086/2007-N1, TU Darmstadt, 2007
- [86] Horst, G.: Handbuch Sichtmauerwerk. Bautechnik im Detail, ed. K.G.B. Thomas Gutmann, Bendorf and M.B.G. Peter Bock, Wuppertal, Kisselbach 2002
- [87] <u>http://www.baukatlog.ch/swissbrick_ag/bk/ch/b8288/b828811/pages/backsteine_mit_besonderen_eigenschaften_bk_15.html</u>, Webseite der Firma SwissBrick, Zugriff 28.06.2013
- [88] <u>http://www.bine.info/publikationen/publikation/vakuum-isolation-in-fassadenelementen/</u>, BINE Informationsdienst, Zugriff 19.09.2013
- [89] <u>http://www.calostat.de/product/calostat/de/Pages/default.aspx</u>, Webseite der Evonik Industries, Zugriff 19.09.2013
- [90] <u>http://www.kingspaninsulation.de/Produkte/Kingspan-Therma/TW50-Plus-Kerndammplatte.aspx</u>, Webseite der Firma Kingspan, Zugriff 19.09.2013
- [91] <u>http://www.ks-eco.de/systemelemente/daemmung/kingspan-therma-tw-50.html</u>, Webseite zum System KS-ECO, Zugriff 19.09.2013
- [92] <u>http://www.nachhaltigesbauen.de/baustoff-und-gebaeudedaten/oekobaudat.html</u>, Baustoffdatenbank, Informationsportal Nachhaltiges Bauen des BMVBS Zugriff 19.09.2013
- [93] <u>http://www.nachhaltigesbauen.de/bewertungssystem-nachhaltiges-bauen-fuerbundesgebaeude-bnb.html</u>, Informationsportal Nachhaltiges des Bauen Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS), Zugriff 19.09.2013
- [94] <u>http://www.nachhaltigesbauen.de/fileadmin/pdf/aktuelles/Anlage1-Definition-PEH.pdf</u>, Wohnhäuser mit Plus-Energie Niveau - Definition und Berechnungsmethode, Informationsportal Nachhaltiges Bauen des BMVBS, Zugriff 04.10.2011
- [95] <u>http://www.nachhaltigesbauen.de/leitfaeden-und-arbeitshilfen-veroeffentlichungen/leitfaden-nachhaltiges-bauen-2013.html</u>, Informationsportal Nachhaltiges Bauen des BMVBS, Zugriff 19.09.2013
- [96] <u>http://www.vakuumdaemmung.de/</u>, Webseite der TU Dortmund, Lehrstuhl Bauphysik und Technische Gebäudeausrüstung, Zugriff 30.01.2014

- [97] http://www.calostat.de/, Webseite der CALOSTAT Produkte von Evonic, Zugriff 30.01.2014
- [98] <u>http://www.wienerberger.de/fassadenloesungen/argeton</u>, Webseite des Argeton Fassadensystems von Wienerberger, Zugriff 15.05.2015
- [99] Jäger, W.: Konstruktionsregeln für Mauerwerk Teil 2: Anschlussdetails. Mauerwerk-Kalender 31 (2006). Ed. P. Funk. Ernst und Sohn: Berlin, S. 231-365.
- [100] Jäger, W.; Hirsch, R.: Mauerwerksbau mit allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung. In: Mauerwerk-Kalender 37 (2012), S. 35 – 194. Hrsg. W. Jäger. Ernst & Sohn, Berlin 2012
- [101] Jäger, W.; Hirsch, R.: Mauerwerksbau mit allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung. In: Mauerwerk-Kalender 38 (2013), S. 35 – 62. Hrsg. W. Jäger. Ernst & Sohn, Berlin 2013
- [102] Jäger, W.; Pfeifer, G.: Konstruktionsregeln für Mauerwerk Teil 1: Mauerwerksarten, Verbände und Maßordnung. In: Mauerwerk-Kalender 30 (2005), S. 233–264. Hrsg. W. Jäger. Ernst & Sohn, Berlin 2005.
- [103] Jedamzik, H.-W.; Junge, K.: Untersuchung der Flächentragwirkung bei geschoss- bzw. abschnittsweiser Verankerung von Vormauerschalen im Gebrauchs- und Bruchzustand. Forschungsvereinigung Ziegelindustrie, Nr. 7023. Essen, 1992.
- [104] König, H.; Kohler, N.; Kreißig, J.; Lützkendorf, T.: Lebenszyklusanalyse in der Gebäudeplanung: Grundlagen - Berechnung - Planungswerkzeuge. Institut für Technologie, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Lehrstuhl Ökonomie und Ökologie des Wohnbaus, 2009.
- [105] Künzel, H.: Zweischaliges Mauerwerk mit oder ohne Belüftung. In: Festschrift zum 60. Geburtstag von Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. habil. Dr. h.c. mult. Dr. h.c. mult. Karl Gertis, Holzkirchen 1998, Seite 9 bis 14
- [106] Merkblatt 876: Edelstahl Rostfrei im Mauerwerksbau, Hrsg.: Informationsstelle Edelstahl Rostfrei, Düsseldorf
- [107] Modersohn, W.; Hübers, R.: Mauerwerksbefestigungen für zweischalige Fassaden -Stand der Technik, Mauerwerk 15 (2011), Heft 4, S. 201-213, Hrsg. W. Jäger. Ernst & Sohn, Berlin 2011.
- [108] Musterbauordnung MBO, Fassung November 2002, zuletzt geändert durch Beschluss der Bauministerkonferenz vom Oktober 2008. Bauministerkonferenz (ARGEBAU).
- [109] Oswald, R.: Sturzabdichtungen in Verblendfassaden, Mauerwerk 13 (2009), Heft 6, S. 332-336, Hrsg. W. Jäger. Ernst & Sohn, Berlin 2009.
- [110] Prüfbericht P1-123/2010, Prüfung: Zweikomponentiges, mit Hohlglaskugeln gefülltes Epoxidharzsystem im Zweiplattenverfahren, Auftraggeber Wilhelm Modersohn GmbH & Co. KG, Fraunhofer-Institut für Bauphysik IRB, Stuttgart, 19.03.2013.
- [111] Schellbach, G. &Zumbroich, H.: Geschossweise Verankerung der Vorsatzschale von Zweischaligen Wänden. Institut für Ziegelforschung. Bericht Nr. F1969. Essen 1984
- [112] Schlussbericht zum Forschungsprojekt ReMoMaB Entwicklung von Grundprinzipien für vollrezyklierbare, modulare, massive Bauweisen in Breitenanwendung auf 0-Energiebasis vom 22.02.2013. Forschungsprojekt im Rahmen der Forschungsinitiative "Zukunft Bau". TU Dresden, Lehrstuhl Tragwerksplanung; Institut für Leichtbau,



Entwurf und Konstruktion der Universität Stuttgart; Werner Sobek Green Technology Stuttgart.

- [113] Schneider, Bautabellen für Ingenieure, 19. Auflage, Wernerverlag, Siegen ,2010
- [114] Schneider, F.: Arbeitsblätter zur Baukonstruktion: Mauerwerk, Lehrstuhl Tragwerksplanung, Fakultät Architektur, TU- Dresden, 2008.
- [115] Strähle, E.; Gigla, B.; Lühr, J.: Numerische Simulation des Tauwasseranfalls in zweischaligem Verblendmauerwerk Prüfbericht P 213-08b, MPA Schleswig-Holstein, Lübeck 2008
- [116] Zulassung Nr.: Z-17.1-1062, Luftschichtanker DUO für zweischaliges Mauerwerk, BEVER Gesellschaft für Befestigungsteile Verbindungselemente mbH, vom 30.09.2011, Geltungsdauer bis 30.09.2016.
- [117] Zulassung Nr.: Z-17.1-466, KE-Gelenkanker zur Verbindung von zweischaligem Mauerwerk, MURINOX AG, Schweiz, vom 08.04.2010, Geltungsdauer bis 21.12.2011.
- [118] Zulassung Nr.: Z-17.1-888, Multi-Luftschichtanker Plus für zweischaliges Mauerwerk mit Schalenabständen von 120 mm bis 200 mm und Vormauer- bzw., Verblendmauerschalen auch im Dünnbettverfahren, BEVER Gesellschaft für Befestigungsteile Verbindungselemente mbH, vom 18.10.2010, Geltungsdauer bis 30.06.2012.
- [119] Zulassung Nr.: Z-17.1-933, Zweischalige Außenwände mit Verblendschalen aus trocken gestapelten Ziegeln mit besonderem Befestigungssystem (bezeichnet als ClickBrick-System), daasClickBrickbv, vom 02.04.2017, Geltungsdauer bis 01.04.2012.
- [120] Zulassung Nr.: Z-21.3-1833, Hilti- Gelenkanker HGA zur nachträglichen Verankerung von Vormauerschalen, Hilti Deutschland GmbH, vom 13.02.2007, Geltungsdauer bis 31.01.2012.
- [121] Zulassung Nr.: Z-30.3-19, Halterungen aus Duplex Stahlsorten 1.4362 und 1.4062, Wilhelm Modersohn GmbH & Co. KG, vom 24.02.2012, Geltungsdauer bis 01.06.2016.
- [122] Zumbroich, H.: Einfaches Verfahren zur Ermittlung von maximalen Wärmeeigenspannungen in mehrschichtigen Außenbauteilen. Dissertation, RWTH Aachen, 1980.
- [123] http://www.schoeck.co.uk/en_gb/solutions-and-details
- [124] http://www.schueco.com/web2/de/architekten/produkte/fenster/aluminium/schueco_a ws_112_ic
- [125] Zumbroich, H.: Maximale Temperaturbelastungen der Vormauerschale von Außenwandkonstruktionen mit Kerndämmung. Forschungsbericht, IZF Essen, 1984.
- [126] Zuwendungsantrag 0-EneMau, Aktenzeichen SWD-10.08.18.7-12.33 für das Forschungsprojekt Innovative Dämmtechnik zur Reduzierung der Transmissionswärmeverluste im Mauerwerksbau mit dem Ziel der Gewährleistung des 0-Energiestandards, Kurztitel: 0-Energiemauerwerk, 15.07.2010, aktualisiert 13.07.2012
- [127] Jäger, W.; Sobek, W. et al: REMOMAB Entwicklung der Grundprinzipien für voll rezyklierbare, modulare, massive Bauweisen in Breitenanwendung auf 0-Energiebasis. Forschungsvorhaben im Rahmen der Forschungsinitiative des BMVBS "Zukunft Bau", gefördert durch das BBSR und die XELLA Forschungs- und Technologie GmbH. TU Dresden/ Universität Stuttgart: 2013



- [128] DIN EN 1993-1-1:2014-07: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten –Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1993-1-1:2005, A1: 2014.
- [129] DIN EN 1993-1-1/NA:2015-08: Nationaler Anhang, National fetsgelegte Parameter. Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten –Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau, 2015
- [130] DIN EN 846-5:2012-11: Prüfverfahren für Ergänzungsbauteile für Mauerwerk Teil 5: Bestimmung der Zug- und Drucktragfähigkeit sowie der Steifigkeit von Mauerankern (Steinpaar-Prüfung); Deutsche Fassung, Ausgabe 2012-11.
- [131] DIN EN 1052-1:1998: Prüfverfahren für Mauerwerk, Teil 1: Bestimmung der Druck festigkeit. Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, 1998.
- [132] DIN EN 846-7:2012: Prüfverfahren für Ergänzungsbauteile für Mauerwerk Teil 7: Bestimmung der Schubtragfähigkeit und der Steifigkeit von Mauerverbindern (Steinpaar- Prüfung in Mörtelfugen); Deutsche Fassung, Ausgabe 2012.
- [133] DIN EN 845-1:2012: Prüfverfahren für Ergänzungsbauteile für Mauerwerk Teil 1: Maueranker, Zugbänder, Auflager und Konsolen; Deutsche Fassung, Ausgabe 2013.
- [134] DIN EN 846-10:2012: Prüfverfahren für Ergänzungsbauteile für Mauerwerk Teil 10: Bestimmung der Tragfähigkeit und der Last-Verformungseigenschaften von Konsolen; Deutsche Fassung, Ausgabe 2000.
- [135] DIN EN 772-1: Prüfverfahren für Mauersteine Teil 1: Bestimmung der Druckfestigkeit; Deutsche Fassung EN 772-1, Ausgabe 2011.
- [136] DIN EN 1015-11:2006: Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk, Teil 11: Bestimmung der Biegezug- und Druckfestigkeit von Festmörtel. Deutsche Fassung EN1015-11, Ausgabe 2006.
- [137] DIN 18516-3: NA 005-06-01 AA N 1097: Außenwandbekleidungen, hinterlüftet Teil 3: Naturwerkstein; Anforderungen, Bemessung. Ausgabe 2013.
- [138] DIN 18555-4: Prüfung von Mörteln mit mineralischen Bindemitteln, Bestimmung der Längs- und Querdehnung sowie von Verformungskenngrößen von Mauermörteln im statischen Druckversuch. Ausgabe März 1986.
- [139] DIN 1048-5: Prüfverfahren für Beton Festbeton, gesondert hergestellte Probekörper. Ausgabe Juni 1991.
- [140] DIN EN 1052-3: Prüfverfahren für Mauerwerk –Teil 3: Bestimmung der Anfangsscherfestigkeit (Haftscherfestigkeit); Deutsche Fassung EN 1052-3:2002 + A1:2007.
- [141] DIN EN ISO 527-1: Kunststoffe Bestimmung der Zugeigenschaften –Teil 1: Allgemeine Grundsätze (ISO 527-1:2012); Deutsche Fassung EN ISO 527-1:2012
- [142] Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung; Z-30.3-6 vom 22. April 2014 "Erzeugnisse, Verbindungsmittel und Bauteile aus nichtrostenden Stählen"
- [143] Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk –Teil 11: Bestimmung der Biegezug- und Druckfestigkeit von Festmörtel; Deutsche Fassung EN 1015-11:1999+A1:2006
- [144] Prüfung von Mörteln mit mineralischen Bindemitteln; Festmörtel; Bestimmung der Längs- und Querdehnung sowie von Verformungskenngrößen von Mauermörteln im statischen Druckversuch, Ausgabe März 1986.



- [145] DIN 914, EN ISO: Gewindestifte mit Innensechskant und Spitze; Deutsche Fassung 1980.
- [146] Europäische technische Zulassung ETA-12/0253: Kunststoffdübel zur Mehrfachbefestigung in Beton und Mauerwerk für nichttragende Anbauteile. ETA Danmark A/S, Kollegievej 6, DK-2920 Charlottenlund. Geltungsdauer: 25-06-2013/25-06-2018.
- [147] DIN 1053-100 Mauerwerk Teil 100: Berechnung auf der Grundlage des semiprobabilistischen Sicherheitskonzepts, Ausgabe September 2007
- [148] DIN 1055-100 Einwirkungen auf Tragwerke Teil 100: Grundlagen der Tragwerksplanung, Sicherheitskonzept und Bemessungsregeln, Ausgabe März 2001
- [149] DIN EN 1996-1-1: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten –Teil 1-1: Allgemeine Regeln f
 ür bewehrtes und unbewehrtes Mauerwerk; Deutsche Fassung EN 1996-1-1:2005+A1:2012
- [150] Europäische Technische Zulassung ETA-05/0069: fischer Ankerbolzen FAZ II, FAZ II-A4, FAZ II-C. Geltungsdauer: bis 07-06-2018.
- [151] ETAG 020: Bekanntmachung der Leitlinie f
 ür die europ
 äische technische Zulassung f
 ür Kunststoffd
 übel als Mehrfachbefestigung von nichtragenden Systemen zur Verankerung im Beton und Mauerwerk
- [152] Halfen Konsolanker. Produktinformation Technik. Halfen 2017, FM 17.2. www.halfen.de Zugriff 29.09.2016
- [153] Baunutzungsverordnung. (BauNVO). Verordnung über die bauliche Nutzung der Grundstücke. 26.06.1962 i.d.F. v. 11.06.2013. <u>http://www.bmub.bund.de/themen/stadt-</u> wohnen/staedtebaurecht/baunutzungsverordnung/, Aufruf: 12.05.2017
- [154] Originalbrandversuch nach den Zulassungsgrundsätzen des DIBt an einem Fassadensystem (zweischaliges Mauerwerk) unter Verwendung von Vakuum-Isolations-Paneelen, einem speziell entwickelten Verankerungssystem im Bereich von "Betondecken" und darunter angeordneten Brandriegeln. MFPA Leipzig, Untersuchungsbericht-Nr. UB 3.2/15-237-1 vom 24. November 2015. Unveröffentlicht. Erarbeitet im Auftrag der TU Dresden, Lehrstuhl für Tragwerksplanung.