



Frank U. Vogdt, Michael Schober

**Bestimmung der Teilsicherheitsbeiwerte
auf der Widerstandsseite für den
Nachweis der Standsicherheit von
geklebten Wärmedämmverbundsystemen
(WDVS)**

Frank U. Vogdt, Michael Schober

T 3389

**Bestimmung der Teilsicherheitsbeiwerte
auf der Widerstandsseite für den
Nachweis der Standsicherheit von
geklebten Wärmedämmverbundsystemen
(WDVS)**

T 3389

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.

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

© by Fraunhofer IRB Verlag

2021

ISBN 978-3-7388-0666-3

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

Forschungsbericht

Bestimmung der Teilsicherheitsbeiwerte auf der Widerstandsseite für den Nachweis der Standsicherheit von geklebten Wärmedämmverbundsystemen (WDVS)

vom 22.01.2020

Auftraggeber: Deutsches Institut für Bautechnik
Kolonnenstraße 30 b
10829 Berlin

Geschäftszeichen: P 52-5-5.120-1489/16

Autoren: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Frank U. Vogdt
Dipl.-Ing. Michael Schober

Mitarbeit von: Dipl.-Ing. Nawar Andrews

Dieser Bericht umfasst einen Textteil mit 41 Seiten
und eine Anlage mit 42 Seiten.

Inhalt

1.	Gegenstand des Forschungsvorhabens	3
2.	Bauaufsichtliche Regelung von Wärmedämmverbundsystemen	5
3.	Grundlagen zum Nachweis der Standsicherheit und Dauerhaftigkeit	8
3.1	Kriterien der Anwendbarkeit von Wärmedämmverbundsystemen.....	8
3.2	Komponenten- und Systemprüfung	10
3.3	Ansatz des statischen Systems	12
3.4	Sicherheitskonzept.....	14
3.5	Nachweisverfahren	16
4.	Auswertung der vorhandenen Daten	17
5.	Statisches System.....	23
5.1	Einflussparameter	23
5.2	Systemmodellierung	27
6.	Empfehlungen.....	29
6.1	Festlegung der Teilsicherheitsbeiwerte.....	29
6.2	Ergänzend erforderliche Untersuchungen	36
7.	Zusammenfassung	38
	Literatur und verwendete Unterlagen.....	40

1. Gegenstand des Forschungsvorhabens

Die Anwendbarkeit eines Wärmedämmverbundsystems (WDVS) ist durch eine *allgemeine Bauartgenehmigung (aBG)* oder mit einer *europäischen technischen Bewertung (ETA)* unter Berücksichtigung der Vorgaben der Musterverwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen – MVV TB [1] nachzuweisen. Der erforderliche Nachweis ist "produkt- / systemgebunden" und gilt damit nur bei Verwendung der für ein konkretes WDVS eindeutig definierten Komponenten. Grundlage ist u. a. eine ausreichende Standsicherheit und Dauerhaftigkeit unter

- Eigenlasten,
- Windlasten und
- hygrothermischen Einwirkungen.

Die in diesem Zusammenhang notwendigen Untersuchungen erfolgen – mit Ergänzungen – nach den Vorgaben der EOTA-Leitlinie ETAG 004 [2] in ihrer Funktion als *europäisches Bewertungsdokument (EAD)*.

Kennzeichnend für die Standsicherheit und Dauerhaftigkeit von geklebten WDVS sind:

- Unter Windsoglasten die Haftzug- und Querkzugfestigkeiten sowie – bei zusätzlicher Verdübelung – der Auszug- und Durchstanzwiderstand der Dübel. (Winddrucklasten können für den Nachweis der Standsicherheit in der Regel vernachlässigt werden.)
- Unter Eigenlasten und unter hygrothermischen Einwirkungen das Verhalten der Putzschicht als (in der Putzebene) elastisch gebettete Scheibe mit einer Kraftübertragung durch Schub in den tragenden Untergrund.

Aufgrund von jahrzehntelangen Erfahrungen mit WDVS erfolgt die abschließende Bewertung im Zulassungsverfahren (*aBG* bzw. *abZ*) unter der Annahme von vereinfachten Tragmodellen mit dem konservativen (und bislang erfolgreichen) Ansatz von globalen Sicherheitsbeiwerten. Für die Anpassung an das im Bauwesen gebräuchliche semiprobabilistische Nachweisverfahren müssen nunmehr jedoch Teilsicherheitsbeiwerte für den Widerstand unter den genannten Einwirkungen bestimmt werden.

Mit diesem Forschungsvorhaben sollen Grundlagen für die erforderliche qualitative und quantitative Festlegung der Teilsicherheitsbeiwerte für geklebte WDVS auf mineralischen Untergründen erarbeitet werden. Schwerpunkt der Untersuchungen ist eine – gegenüber dem derzeitigen Erkenntnisstand – genauere Beschreibung des Tragverhaltens von WDVS sowie der Versagensmechanismen und der diesbezüglich prägenden bauprodukt- bzw. bau-

stoffspezifischen Eigenschaften. Von besonderer Bedeutung ist dabei die Analyse der Wechselwirkungen zwischen den unterschiedlichen Einwirkungen in Bezug zu den Versagensursachen und die detaillierte Erfassung von "Alterungsprozessen" und Streuungen auf der Widerstandsseite der Komponenten und der Bauart WDVS insgesamt.

Im Ergebnis sollen mit den Untersuchungen Vorgaben für den Ansatz eines geschlossenen Modells zum Tragverhalten von WDVS entwickelt werden, aus dem die für die unterschiedlichen Bemessungssituationen erforderlichen Teilsicherheitsbeiwerte zum semiprobabilistisch begründeten Nachweis einer ausreichenden Standsicherheit und Dauerhaftigkeit abgeleitet werden können.

Die einzelnen Arbeitsschritte sind vor diesem Hintergrund wie folgt zu skizzieren:

1. Zusammenstellung der vorhandenen Erkenntnisse zum Tragverhalten von geklebten WDVS unter Lasteinwirkungen und unter hygrothermischen Einwirkungen auf Basis der (in erster Linie in den Zulassungsverfahren) durchgeführten Prüfungen.
2. Entwicklung eines ersten Modellansatzes auf Grundlage einer vergleichenden Auswertung der gewonnenen Daten.
3. Ausarbeitung von Empfehlungen zur Ermittlung von Teilsicherheitsbeiwerten für den Widerstand von WDVS.
4. Ausarbeitung von Empfehlungen für die in Ergänzung notwendigen Einzel- und Bauteilversuche zur Verifizierung der Modell- und Sicherheitsansätze unter Parametervariation für Einwirkung und Widerstand.

Auf der Basis der Ergebnisse dieser ergänzenden Versuche kann ein geschlossenes Modell für die realitätsgerechte Simulation und Prognose des Verhaltens von geklebten WDVS unter Lasteinwirkungen und unter hygrothermischen Einwirkungen formuliert werden. Mit diesem Modell können die kennzeichnenden Bemessungsgrößen erfasst und die für den Widerstand von WDVS erforderlichen Teilsicherheitsbeiwerte unter Ansatz der bemessungsrelevanten sicherheitstheoretischen Kenngrößen (wie Sicherheitsindex und Aussagewahrscheinlichkeit) ermittelt werden.

Die in den nachfolgenden Abschnitten zusammengefassten Ergebnisse stellen eine Weiterentwicklung und Ergänzung der bisherigen Ansätze dar und sind insofern als Empfehlungen für die Diskussion über ein einheitliches Teilsicherheitskonzept für WDVS durch das *Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt)* und die diesbezüglich beratenden (externen) Sachverständigen zu verstehen.

2. Bauaufsichtliche Regelung von Wärmedämmverbundsystemen

Die Anwendung von Wärmedämmverbundsystemen mit Dämmplatten aus Polystyrol-Hartschaum kann bis in die 1950-er Jahre und mit Dämmplatten aus Mineralwolle bis in die 1970-er Jahre zurückverfolgt werden. In größerem Umfang erfolgt der Einsatz von WDVS seit Ende der 1970-er Jahre in der Folge der (ersten) Wärmeschutzverordnung auf Grundlage des Energieeinsparungsgesetzes – EnEG (Gesetz zur Einsparung von Energie in Gebäuden) von 1976 und nochmals deutlich zunehmend seit Beginn der 1990-er Jahre.

Die ersten einheitlichen bauaufsichtlichen Regelungen wurden in Deutschland 1980 und 1984 vom *Institut für Bautechnik (IfBt)* – heute *Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt)* – mit den *Mitteilungen des IfBt 4/1980* (Kunstharzbeschichtete Wärmedämmverbundsysteme) [3] und *6/1984* (Zur Standsicherheit von Wärmedämmverbundsystemen mit Mineralfaser-Dämmstoffen und mineralischem Putz) [4] eingeführt. Eine Aktualisierung und Ergänzung der letztgenannten Regelung erfolgte mit den *Mitteilungen des IfBt 4/1990* (Zum Nachweis der Standsicherheit von Wärmedämmverbundsystemen mit Mineralfaser-Dämmstoffen und mineralischem Putz) [5].

Die Notwendigkeit einer weitergehenden bauaufsichtlichen Regelung wurde zunächst nicht gesehen, zumal die brandschutztechnischen Belange hinsichtlich der geforderten Baustoffklasse (wie "nichtbrennbar" oder "schwerentflammbar") durch Prüfbescheide (mit Prüfzeichen PA-III) des *IfBt* erfasst wurden. Für die Verwendung von nichtgenormten Bauprodukten bzw. Baustoffen in bauaufsichtlich relevanten Bereichen war jedoch auch zu diesem Zeitpunkt eine *allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (abZ)* erforderlich.

Eine prinzipielle Änderung des bauaufsichtlichen Regelungsbedarfs ergab sich mit der nationalen Umsetzung der europäischen Bauproduktenrichtlinie [6] von 1989 durch das Bauproduktengesetz [7] von 1992. Durch den Wegfall der Rechtsgrundlage für PA-III-Bescheide für WDVS musste in der Folge der nach den Landesbauordnungen bzw. der Musterbauordnung geforderte Nachweis der Verwendbarkeit – zentral im Hinblick auf den Brandschutz – durch Normen oder durch *allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen* geregelt werden.

Da für die Erarbeitung von europäischen Normen für WDVS zunächst kein Mandat erteilt wurde, wurden für WDVS nach 1997 *allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen* erforderlich. Der mit diesen Zulassungen erbrachte Nachweis der Verwendbarkeit erfolgte in Weiterentwicklung der vormaligen *IfBt*-Regelungen im Wesentlichen auf der Grundlage der durch die *European Organisation for Technical Approvals (EOTA)* erarbeiteten Leitlinie ETAG 004 (Guideline for European Technical Approval of "External Thermal Insulation Composite Systems (ETICS) with Rendering") [2].

Alternativ wurden im Rahmen der europäischen Harmonisierung WDVS mit *europäischer technischer Zulassung (ETA – European Technical Approval)* als "Bausätze" im Geltungsbereich der ETAG 004 in den Teil 1 der Bauregelliste B [8] aufgenommen. Gemäß der Bauproduktenrichtlinie waren damit das Inverkehrbringen und Handeln dieser WDVS geregelt, die Bedingungen für die Anwendung wurden im Teil II der Liste der Technischen Baubestimmungen [9] formuliert. Mit der hier vorgenommenen Unterteilung der WDVS nach ETAG 004 in zwei Gruppen und den explizit aufgeführten Anforderungen zur Standsicherheit und insbesondere zum Brandschutz und Schallschutz sowie zum Wärmeschutz ergab sich in der Regel zusätzlich zur *europäischen technischen Zulassung* die Notwendigkeit einer *allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung* als nationales Instrument für den Nachweis der Anwendbarkeit.

Mit der Aufhebung der (Bauregel-) Listen A, B und C – und der auf dieser Basis verfassten Liste der Technischen Baubestimmungen – gemäß den *Mitteilungen des DIBt 1/2019* [10] wird die Anwendung von WDVS mit *europäischer technischer Bewertung (ETA – European Technical Assessment)* aktuell durch die Bestimmungen der Musterverwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen – MVV TB [1] geregelt. Aufgenommen sind im diesbezüglichen Anhang 11

- WDVS mit geklebten EPS-Dämmplatten,
- WDVS mit geklebten MW-Lamellendämmplatten (kurz: MW-Lamellen) sowie
- WDVS mit gedübelten und geklebten EPS-Dämmplatten, MW-Lamellen oder MW-Dämmplatten.

Die *europäische technische Bewertung* ist bei gleichbleibendem Kürzel *ETA* als "Nachfolgerin" der *europäischen technischen Zulassung* nach dem – baurechtlich prägenden – Ersatz der Bauproduktenrichtlinie durch die Bauproduktenverordnung [11] aufzufassen. Die Grundlage für das Bewertungsverfahren ist weiterhin die ETAG 004, nunmehr verstanden in ihrer Funktion als *europäisches Bewertungsdokument (EAD – European Assessment Document)*.

Auf nationaler Ebene wurde die *allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (abZ)* für WDVS als Bauprodukt durch die *allgemeine Bauartgenehmigung (aBG)* ergänzt, mit der die Planung, Bemessung und Ausführung eines WDVS als Bauart, d.h. in der Definition als "bauliche Anlage aus zusammengefügteten Bauprodukten", geregelt wird. Für WDVS ist die *Bauartgenehmigung* in der Regel mit einer *Zulassung* gekoppelt. In diesem Sinne können auch die unterschiedlichen Begrifflichkeiten verstanden werden: Verwendbarkeit als Bauprodukt und Anwendbarkeit als Bauart.

Aktuell ergeben sich somit für den Nachweis der Anwendbarkeit drei Varianten:

- WDVS mit *ETA* und Regelung der Anwendung durch die MVV TB,
- WDVS mit *ETA* und Regelung der Anwendung durch eine (ergänzende) *aBG*,
- WDVS mit *aBG* in Kombination mit *abZ*.

In der Perspektive der voranschreitenden Harmonisierung des europäischen Regelwerkes ist für (bewährte) WDVS eine entsprechende normative Vereinheitlichung absehbar. Aktuell erfolgen in diesem Zusammenhang die Beratungen zum Normentwurf prEN 17237:2019 (Wärmedämmstoffe für Gebäude – Außenseitige Wärmedämmverbundsysteme mit Putzoberfläche (WDVS) – Spezifikation) [12]. Mit diesem Normentwurf wird eine Vielzahl von Varianten mit einer Unterscheidung primär hinsichtlich der Art der Befestigung und der eingesetzten Wärmedämmstoffe erfasst. Darüber hinaus beinhaltet der Normentwurf umfassende Vorgaben zur Ermittlung der Eigenschaften und Leistungen des WDVS und seiner Komponenten. Kern der Regelungen ist jeweils der Bezug zu den europäischen Produkt- bzw. Prüfnormen.

Für die Anwendung des WDVS wird die Umsetzung der europäischen normativen Vorgaben in eine nationale bauaufsichtliche Regelung erforderlich. Zu diesem Zweck müssen u.a. die Eigenschaften und Leistungen in Form von z.B. normativ deklarierten Werten, Grenzwerten oder Klassen durch ein Sicherheitskonzept ergänzt werden, mit dem die Anwendbarkeit im Einzelfall nachgewiesen wird, so z.B. für den Nachweis der Standsicherheit im Verhältnis der Beanspruchung zur Beanspruchbarkeit. Für diese Umsetzung sind die (höchst-) richterlichen Entscheidungen zur Unzulässigkeit einer nationalen "Nachregelung" von Eigenschaften für Bauprodukte zu beachten, die bereits durch europäisch harmonisierte Normen (hEN) erfasst sind. So ist für Wärmedämmstoffe nach europäischer Norm – wie der DIN EN 13162:2015-04 für "... Produkte aus Mineralwolle (MW)" oder der DIN EN 13163:2017-02 für "... Produkte aus Polystyrol (EPS)" – die Ermittlung der kennzeichnenden Eigenschaften in Verbindung mit der (zukünftigen) EN 17237 qualitativ und quantitativ eindeutig geregelt, eine national abweichende Definition – z.B. zur Querkzugfestigkeit – ist damit nicht möglich. Die Anwendung kann jedoch mit dem nationalen Baurecht z.B. über den Einschluss bzw. Ausschluss von bestimmten Leistungsklassen oder über ein Sicherheitskonzept mit entsprechenden Teilsicherheitsbeiwerten reglementiert werden.

In der Perspektive geht aus dem Anwendungsbereich des Entwurfs prEN 17237:2019 hervor, dass auch nach der Einführung und (nationalen) Umsetzung ein nicht unerheblicher Anteil von WDVS weiterhin nicht normativ geregelt sein wird. Gemeint sind z.B. WDVS mit einer (angeklebten) Bekleidung aus Glas, Keramik oder Naturstein.

3. Grundlagen zum Nachweis der Standsicherheit und Dauerhaftigkeit

3.1 Kriterien der Anwendbarkeit von Wärmedämmverbundsystemen

Standsicherheit

Für die Anwendung von Wärmedämmverbundsystemen auf Außenwänden ist die Standsicherheit unter den folgenden äußeren Einwirkungen nachzuweisen:

- Eigenlasten,
- Windlasten und
- hygrothermische Einwirkungen.

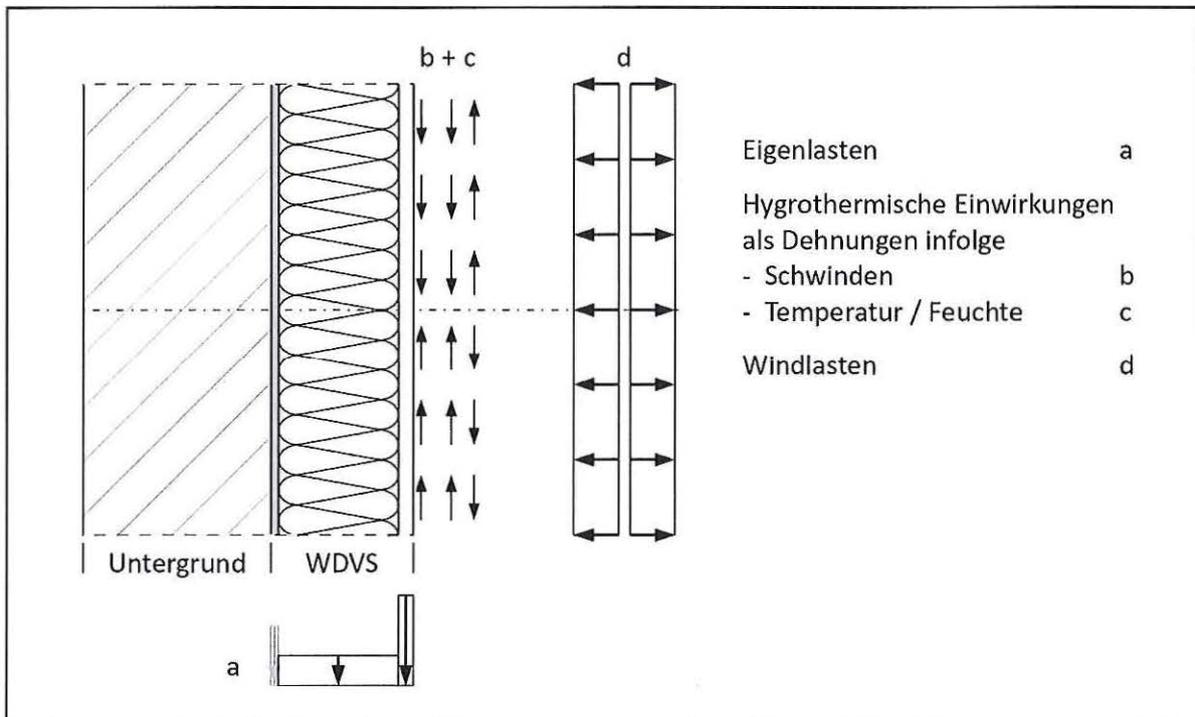


Bild 1: Schematische Darstellung der Einwirkungen

Die Eigenlasten sind mit den verwendeten Komponenten vorgegeben, d.h. mit dem Wärmedämmstoff und dem Aufbau der Putzschicht (aus bewehrtem Unterputz und Schlussbeschichtung). Für geklebte und gedübelte WDVS kann zudem als mögliche Variante eine "massive" Bekleidung (aus z.B. Keramik oder Naturstein) bemessungsrelevant werden. Für die Windlasten sind neben der regionalen und lokalen Lage die Abmessungen des Gebäudes und die räumliche Anordnung des WDVS in den Außenwandflächen prägend. Mit den hygrothermischen Einwirkungen werden die von den klimatisch bedingten Temperatur- und Feuchte-Wechselzyklen sowie vom Schwinden der Putzschicht ausgelösten mechanischen Beanspruchungen erfasst.

Der Nachweis einer ausreichenden Sicherheit gegenüber den jeweiligen Bruchmechanismen ist in allen (praktisch möglichen) Versagensebenen zu führen, so wie folgt z.B. bei überwiegender Querkzugbeanspruchung:

- | Kohäsionsversagen im | Adhäsionsversagen zwischen |
|----------------------|------------------------------|
| · Oberputz | · Ober- und Unterputz |
| · Unterputz | · Unterputz und Dämmstoff |
| · Dämmstoff | · Dämmstoff und Klebemörtel |
| · Klebemörtel | · Klebemörtel und Untergrund |
| · Untergrund | |

Dauerhaftigkeit

Die Anforderungen an die Standsicherheit – und auch an die Kriterien der Anwendbarkeit des WDVS insgesamt – sind über die gesamte avisierte Nutzungsdauer einzuhalten. Konkret muss sowohl das erforderliche Niveau der Standsicherheit als auch z.B. der energetisch notwendige Wärmeschutz nach den Planungsvorgaben auf Dauer und mit ausreichender Sicherheit gewährleistet sein.

Maßgebend für die Dauerhaftigkeit wird damit die quantitativ eindeutig zu fassende Begrenzung des (Teil-) Verlustes einer Eigenschaft (wie der Festigkeit) auf ein für die Anwendbarkeit und Funktion noch zulässiges Maß. Dieser Verlust ist wiederum das Resultat von bauart- und (eher) bauprodukt-spezifischen "Alterungs- und Ermüdungsprozessen" in der Folge der diesbezüglich relevanten Einwirkungen. Von Bedeutung sind in dieser Hinsicht insbesondere die o.g. hygrothermischen Einwirkungen sowie größere Dauer- oder Wechsellasten.

Für den Nachweis einer Dauerhaftigkeit wird die notwendige Wartung und Instandhaltung des WDVS selbstverständlich vorausgesetzt.

Gebrauchstauglichkeit

Mit der Gebrauchstauglichkeit kann prinzipiell die Anwendbarkeit des WDVS in ihrer Gesamtheit beschrieben werden. Den Kern bilden die zentralen bauaufsichtlichen Anforderungen, neben der Standsicherheit und der "eigentlichen" Funktion des WDVS im Sinne des Wärmeschutzes (primär hinsichtlich der Energieeinsparung) sind der Brandschutz und der Schallschutz zu nennen.

In Ergänzung zu diesen bauaufsichtlich eindeutig definierten Vorgaben umfasst die Gebrauchstauglichkeit auch den Bereich der eher praktischen orientierten "Handhabbarkeit" und "Nutzbarkeit". Beschrieben wird damit z.B.

- die schadensfreie Aufnahme von wechselnden (Rand-) Verformungen sowohl im WDVS als auch in den Anschlüssen und Fugen zu angrenzenden Bauteilen,
- die Vermeidung von signifikanten Veränderungen des visuellen Erscheinungsbildes oder auch grundsätzlich
- die Vermeidung von direkten Beeinträchtigungen bei planmäßiger Anwendung und Nutzung.

Dieser Bereich der Nutzbarkeit ist nicht grundsätzlich Thema des bauaufsichtlichen Zulassungsverfahrens (*aBG* bzw. *abZ*), jedoch ergibt sich immer wieder die Frage der Abgrenzung. So können z.B. Rissbildungen in Abhängigkeit von der jeweiligen Rissbreite für die Bewertung der Dauerhaftigkeit herangezogen werden und gleichzeitig den Maßstab für eine mögliche Beeinträchtigung des visuellen Erscheinungsbildes darstellen.

Das Verfahren zum Nachweis einer ausreichenden Gebrauchstauglichkeit ist in der Summe der notwendigen Eigenschaften nicht Gegenstand dieser Arbeit. So sind z.B. Fragen zur Sicherstellung des Wärmeschutzes über die avisierte Nutzungsdauer – und damit zur Gewährleistung der angestrebten Energieeinsparung – einer anderen Diskussion vorbehalten. Die nachfolgenden Abschnitte konzentrieren sich vor diesem Hintergrund auf die Kriterien der Standsicherheit und Dauerhaftigkeit.

3.2 Komponenten- und Systemprüfung

Grundlage für den Nachweis der Anwendbarkeit sind die Ergebnisse von sowohl an den einzelnen Komponenten als auch im System durchgeführten Untersuchungen. Das diesbezügliche Prüfprogramm entspricht in weiten Teilen den Vorgaben der ETAG 004 [2]. Für z.B. WDVS mit angeklebten MW-Lamellen können in diesem Zusammenhang exemplarisch die folgenden Prüfungen genannt werden:

- a. Nachweis der Komponenten
 - Querkzugfestigkeit des Wärmedämmstoffs (trocken und nach Wasserdampflagerung),
 - Schubfestigkeit und Schubmodul des Wärmedämmstoffs,
 - Reißfestigkeit und Dehnung des Bewehrungsgewebes / Textilglasgitters (im Anlieferungszustand und nach Alterung in alkalischer Lösung).

b. Nachweis im System

- Verhalten unter hygrothermischer Beanspruchung infolge von Temperatur- und Feuchte-Wechselzyklen,
- Haftzugfestigkeit zwischen Unterputz und Wärmedämmstoff (trocken und nach hygrothermischer Einwirkung),
- Haftzugfestigkeit zwischen Wärmedämmstoff und Kleber (trocken und nach Wasserlagerung),
- Haftzugfestigkeit zwischen Kleber und Untergrund (trocken und nach Wasserlagerung),
- je nach Eigenschaft ggf. weitere Untersuchungen (z.B. zum Verhalten unter Frost-Tau-Wechseleinwirkung).

Wie der exemplarischen Zusammenstellung zu entnehmen ist, haben für die Bewertung der Dauerhaftigkeit Prüfungen unter Feuchteeinwirkung besonderes Gewicht, d.h. konkret die Einzelversuche nach Wasserdampf- oder Wasserlagerung der Proben sowie die Bauteilversuche unter Temperatur- und Feuchte- Wechselzyklen. In Erweiterung dieser Prüfungen nach den Vorgaben der ETAG 004 werden im Zulassungsverfahren durch das DIBt in Abstimmung mit den zuständigen Sachverständigenausschüssen ggf. notwendige zusätzliche Untersuchungen insbesondere zum Nachweis im System gefordert, hier wieder exemplarisch aufgeführt für WDVS mit MW-Lamellen (mit einer Dicke $d > 200$ mm):

- Tragverhalten unter Schubbeanspruchung,
- Tragverhalten unter kombinierter Querkzug- und Schubbeanspruchung, d.h. mit Simulation der Beanspruchung infolge von Eigenlasten und Windsoglasten sowie hygrothermisch bedingten Verformungen,
- Dauerstandsverhalten unter Schubbeanspruchung und unter Biegebeanspruchung.

Die Art und der Umfang dieser Prüfungen richten sich nach dem Zulassungsgegenstand und damit konkret nach dem Stand der Erkenntnis und der Bewährung der Bauart. In diesem Sinne kann bei ausreichender Erkenntnis eine Vereinheitlichung des Prüfprogramms – so wie aktuell für WDVS mit angeklebter Bekleidung [13] – erfolgen.

Mit dem vorliegenden Normentwurf prEN 17237:2019 [12] als normative "Umsetzung" und Weiterentwicklung der ETAG 004 werden ebenfalls detaillierte Vorgaben zu den Eigenschaften und Leistungen des WDVS und seiner Komponenten formuliert. Kern der Regelungen ist in Fortsetzung der ETAG 004 der eindeutige Bezug zu den europäischen Produkt- und Prüf-

normen und die Festlegung von Mindestanforderungen z.B. an die Haftzugfestigkeit (Unterputz – Wärmedämmstoff, Wärmedämmstoff – Kleber, Kleber – Untergrund) und in größerem Umfang an die Eigenschaften der Wärmedämmstoffe.

Soweit aktuell absehbar, ergeben sich mit den Vorgaben des Normentwurfs keine prinzipiellen inhaltlichen Veränderungen für die notwendige Komponenten- und Systemprüfung. Wie bereits in Abschnitt 2 beschrieben, ist für die Umsetzung durch nationale bauaufsichtliche Bestimmungen jedoch zu berücksichtigen, dass eine "Nachregelung" der Eigenschaften von Bauprodukten nach harmonisierten europäischen Normen unzulässig ist. Eine Reglementierung kann insofern nur durch z.B. den Ausschluss von für die Anwendung ungeeigneten Leistungsklassen oder über ein Sicherheitskonzept mit entsprechenden Teilsicherheitsbeiwerten erfolgen.

3.3 Ansatz des statischen Systems

Kombinationstragverhalten

Mit den in Abschnitt 3.1 skizzierten Einwirkungen ergibt sich für den Nachweis einer ausreichenden Standsicherheit für ausschließlich geklebte WDVS ein vergleichsweise einfaches ("pragmatisches") Modell:

- Aufnahme und Weiterleitung der Windlasten (maßgebend Windsog) direkt über Querzug und Haftzug vom WDVS (d.h. von der Putzschicht über den Wärmedämmstoff und die teil- bzw. vollflächige Verklebung) in den Untergrund.
- Aufnahme und Weiterleitung der Eigenlasten und der Zwängungsbeanspruchungen infolge hygrothermischer Einwirkungen über Schub im WDVS.

Insbesondere bei eher "schubweichen" WDVS mit einer Wärmedämmung aus Mineralwolle wird für das Tragverhalten die gleichzeitige Beanspruchung aus Quer- / Haftzug und Schub maßgebend. Der Nachweis einer ausreichenden Standsicherheit erfolgt insofern durch Bauteilversuche zur Ermittlung des Tragverhaltens bei entsprechend kombinierter Einwirkung ("Kombiversuche"). Die Schubbeanspruchung wird in der Ebene der Putzschicht über die vorab ermittelten Verschiebungen eingepreßt, die Simulation der Windsogeinwirkung erfolgt in der Regel im "Schaumblockverfahren". Alternativ kann für die Schubbeanspruchung eine Krafteinleitung über das anhand der Bettungssteifigkeit ermittelte Spannungs-Dehnungsverhalten angesetzt werden.

Mit diesen Kombiversuchen kann die Tragfähigkeit unter vorgegebenen Einwirkungskombinationen explizit ermittelt werden, damit ist der Ansatz für einen eher konservativen – in der Regel auf der sicheren Seite liegenden – Nachweis gegeben. Eine weitergehende Analyse des

Tragverhaltens ist jedoch nur bedingt möglich, da das Zusammenwirken der Komponenten nicht in der diesbezüglich notwendigen Detaillierung erfasst wird. So können mit den Bruchkräften, Hauptverformungen und Versagensbildern z.B. die Kraft- und Spannungsverläufe im WDVS nur in Näherung modelliert werden.

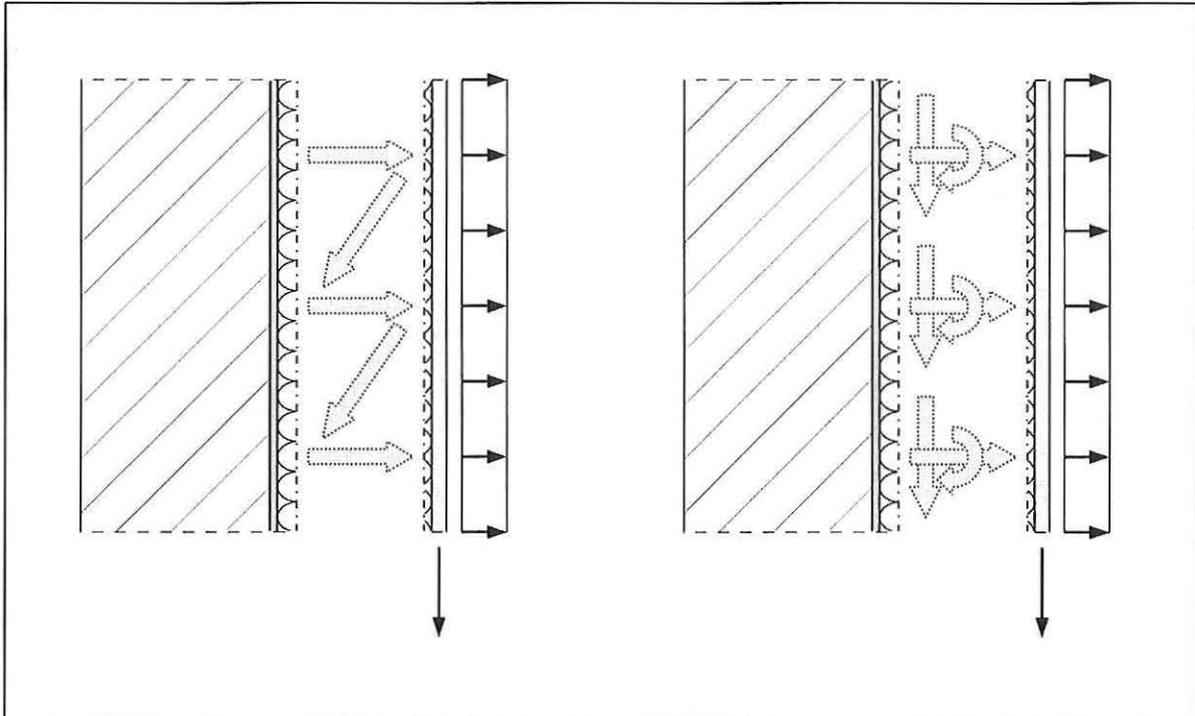


Bild 2: Beispiele für den vereinfachten Ansatz einer möglichen Kraftübertragung im WDVS

Eine realitätsgerechte Prognose des Tragverhaltens ist ohne eine exakte Modellierung jedoch problematisch, so dass z.B. der Nachweis der Standsicherheit von WDVS mit neuen Wärmedämmstoffen mit ausgeprägter Querkontraktion auf dieser Basis mit erheblichen Unsicherheiten behaftet wäre.

Der Entwurf prEN 17237:2019 [12] enthält in diesem Sinne keine Erweiterungen, d.h., auch hier wird kein umfassendes statisches Modell für die Analyse oder den Nachweis des Tragverhaltens von WDVS beschrieben.

Verformungsbegrenzung

Die rechnerische Ermittlung der Verschiebungen und Normalkräfte in der Putzschicht infolge der Eigenlasten und der hygrothermischen Einwirkungen erfolgt unter Annahme des Modells der Putzschicht als eine in ihrer Ebene elastisch gebettete Scheibe oder vereinfacht durch die vektorielle Addition der an einem entsprechenden Balken berechneten Verformungen. Die Bettungssteifigkeit ergibt sich dabei aus der Schubsteifigkeit des WDVS. Eine "Kalibrierung" der getroffenen Berechnungsannahmen kann mit der experimentellen Ermittlung des

Verhaltens unter hygrothermischer Einwirkung im Bauteilversuch erfolgen. Im Hinblick auf die Dauerhaftigkeit und Gebrauchstauglichkeit (z.B. im Anschluss an angrenzende Bauteile) ist eine Begrenzung der Verschiebungen in der Putzebene erforderlich. Für WDVS mit "schubweichem" Wärmedämmstoff und / oder mit "dehnsteifer" Putzschicht bzw. Bekleidung kann zu diesem Zweck eine feldweise Unterteilung durch Dehnungsfugen notwendig werden.

Nachteilig beim Ansatz des theoretischen Modells der elastisch gebetteten Scheibe ist die Vernachlässigung der dreidimensional (d.h. auch senkrecht zur Putzschicht) wirkenden Beanspruchungen insbesondere in Form von zusätzlichen Querkzugspannungen im Randbereich des WDVS. In der Versuchspraxis werden diese Beanspruchungen jedoch mit den Bauteilversuchen unter Bewitterungssimulation sowie durch die eingepprägten Vorverformungen in den Kombiversuchen (s.o.) zumindest in Näherung erfasst.

Soweit ersichtlich, enthält der aktuelle Entwurf prEN 17237:2019 keine explizit formulierten Vorgaben zur Begrenzung von möglichen Verformungen.

3.4 Sicherheitskonzept

Der derzeitige Ansatz in der Bauartgenehmigung (*aBG*) oder Zulassung (*abZ*) manifestiert sich in der Vorgabe von Bestimmungen für das Bauprodukt (d.h. für die einzelnen Komponenten und für das WDVS als Bauart), für die Planung, die Bemessung und die Ausführung sowie für die Nutzung, den Unterhalt und die Wartung. Im Rahmen dieser Vorgaben werden "zulässige" (Grenz-) Werte für die Anwendung definiert, hier wieder exemplarisch für WDVS mit angeklebten MW-Lamellen u.a. für

- die Putzschicht,
- die charakteristischen Einwirkungen aus Wind w_{ek} und
- die Feldgrößen ohne Dehnungsfugen.

Die Ermittlung dieser Werte basiert auf einer gutachtlichen Bewertung der Ergebnisse der Untersuchungen nach Abschnitt 3.2, zentrale Aspekte der Betrachtung über Teilsicherheitsbeiwerte werden dabei in unterschiedlichem Umfang bereits berücksichtigt. In diesem Zusammenhang ist u.a. auf die Empfehlungen des Sachverständigen Dr.-Ing. Heribert Oberhaus in der gutachtlichen Stellungnahme 13.5.010 [14] zu verweisen, die im Rahmen der Beratungen des Arbeitskreises "Konzept zur Abschätzung ausreichender Sicherheiten von WDVS" am DIBt erstellt wurden.

Soll der Nachweis der Standsicherheit mit semiprobabilistischem Ansatz erfolgen, sind auf

der Bemessungsebene (Index d) Teilsicherheitsbeiwerte sowohl für die Einwirkungen E als auch für den Widerstand R zu formulieren:

$$E_d \leq R_d$$

$$E_d = \gamma_F \cdot E_k \leq \frac{R_k}{\gamma_M} = R_d$$

Auf der Einwirkungsseite werden Unsicherheiten (primär über die Eintrittswahrscheinlichkeit und Streuung der Einwirkungen) durch individuelle Teilsicherheitsbeiwerte $\gamma_{F,i}$ für

- Eigenlasten,
- Windlasten und
- hygrothermische Einwirkungen

erfasst. Für die Kombination der Einwirkungen ist die Wahrscheinlichkeit des gleichzeitigen Auftretens im Bemessungsfall über den Beiwert ψ zu berücksichtigen.

Bei der Ermittlung des Widerstandes müssen Unsicherheiten durch den Ansatz eines Multiplikationsproduktes von einzelnen Teilsicherheitsbeiwerten $\gamma_{M,i}$ (bzw. Abminderungsfaktoren) berücksichtigt werden:

$$\gamma_M = \prod \gamma_{M,i}$$

Mit den Teilsicherheitsbeiwerten $\gamma_{M,i}$ sind zunächst die Streuung und die Dauerhaftigkeit der unterschiedlichen Eigenschaften bzw. Festigkeiten der Komponenten einzeln und im Zusammenwirken wie folgt zu erfassen:

- Streuung $\rightarrow \gamma_{M,1}$
In $\gamma_{M,1}$ geht die Streuung (durch den Variationskoeffizienten v) und der systembedingt notwendige Zuverlässigkeitsindex β ein.
- Festigkeitsminderung infolge Alterung $\rightarrow \gamma_{M,2}$
Mit $\gamma_{M,2}$ wird eine mögliche Festigkeitsminderung über die Nutzungsdauer durch überwiegend hygrothermische Einwirkungen erfasst.
- Festigkeitsminderung bei klimatisch bedingter Einwirkung $\rightarrow \gamma_{M,3}$
Neben einer Alterung können hygrothermische Einwirkungen auch direkt einen (begrenzten) Festigkeitsverlust auslösen, der durch $\gamma_{M,3}$ berücksichtigt wird.
- Festigkeitsminderung infolge Dauerlast-Einwirkung $\rightarrow \gamma_{M,4}$
Eine mögliche Festigkeitsminderung durch statische Dauerlast-Einwirkung wird mit $\gamma_{M,4}$ erfasst.

Darüber hinaus müssen Unsicherheiten oder Ungenauigkeiten in der theoretischen Modellbildung und in der praktischen Ausführung des WDVS durch entsprechende Teilsicherheitsbeiwerte berücksichtigt werden:

- Ungenauigkeiten in der Ausführung $\rightarrow \gamma_{M,5}$

Die unterschiedlichen Wahrscheinlichkeiten und möglichen Folgen von Ungenauigkeiten in den einzelnen Arbeitsschritten der Ausführung eines WDVS vor Ort werden mit $\gamma_{M,5}$ erfasst.

- Ungenauigkeiten in der Modellbildung $\rightarrow \gamma_{M,6}$

Der Nachweis der Anwendbarkeit basiert auf der Annahme von konkreten Modellen z.B. zum Tragverhalten von WDVS. Diesbezügliche Ungenauigkeiten oder auch begrenzte Erkenntnisse werden mit $\gamma_{M,6}$ geschätzt.

3.5 Nachweisverfahren

Mit den beschriebenen Ansätzen kann der Ablauf zum Nachweis der Standsicherheit und Dauerhaftigkeit im Zulassungsverfahren für WDVS (mit aBG bzw. abZ) in Kürze wie folgt beschrieben werden:

- (Nach Abstimmung mit dem DIBt) Durchführung der Einzel- und Bauteilprüfungen an den Komponenten sowie im System und Dokumentation der Ergebnisse.
- Auswertung der Ergebnisse u.a. im Hinblick auf die Ermittlung der einzelnen Teilsicherheitsbeiwerte.
- Festlegung der zulässigen Anwendungsbereiche und der Anwendungsgrenzen in erster Linie anhand der Ergebnisse der Bauteilversuche und der zugehörigen rechnerischen Nachweise.
- Formulierung der Bestimmungen für die Bauartgenehmigung bzw. Produktzulassung.

Die Ausarbeitung erfolgt in der Regel im Rahmen einer gutachtlichen Bewertung mit zusammenfassenden Vorschlägen für die Zulassung.

4. Auswertung der vorhandenen Daten

Datenerhebung

Die Zusammenstellung von Daten zum Tragverhalten und zur Dauerhaftigkeit von Wärmedämmverbundsystemen hat sich als weitaus problematischer erwiesen, als bei der Formulierung des Forschungsantrages zunächst angenommen wurde. Es wurden – trotz z.T. mehrfach geäußertem Wunsch – weder von allen im zuständigen Ausschuss des DIBt vertretenen und in den Zulassungsverfahren tätigen Sachverständigen noch von den Herstellern Daten zur Verfügung gestellt.

Die Auswertung erfolgte insofern primär auf der Basis der Daten, die von den Sachverständigen Dr.-Ing. Heribert Oberhaus (Sachverständigenbüro Bauforschung Oberhaus) und Dr.-Ing. Mathias Reuschel (Sahlmann & Partner GbR) dankenswerterweise zur Verfügung gestellt wurden. In Ergänzung wurden weitere Daten aus den Zulassungsverfahren für WDVS verwendet.

Die nachfolgenden Ausführungen konzentrieren sich auf geklebte WDVS mit MW-Lamellen der Dicken $d = 400$ mm und $d = 200$ mm, da sich die vorliegenden Erkenntnisse auf jeweils vergleichsweise aktuelle Bauprodukte beziehen und die Untersuchungen im Sinne der Vergleichbarkeit von drei Prüfinstituten parallel an drei Fabrikaten durchgeführt wurden. Aus Gründen der Aktualität wurden zusätzlich Ergebnisse von Vergleichsuntersuchungen an geklebten WDVS mit MW-Lamellen und MW-Dämmplatten der Dicke $d = 200$ mm herangezogen. Die Zusammenstellung der Daten erfolgte dabei exemplarisch (und insofern inhaltlich begrenzt) in Bezug auf die für die angestrebte Modellierung eines geschlossenen statischen Systems zentral notwendigen Einflussparameter.

Ergebnisse der Einzelversuche

In den Tabellen 1 bis 11 der Anlage sind zunächst die Ergebnisse der von drei Prüfinstituten an drei Fabrikaten von MW-Lamellen ($d = 400$ mm und $d = 200$ mm) ermittelten Werte der Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene (Querzugfestigkeit) zusammenfassend dargestellt. Die Tabellen enthalten für die Referenzserien (nach Lagerung bei Normalklima) neben dem Mittelwert und der Standardabweichung jeweils alternative Werte für das 5%-Quantil. Die Ermittlung erfolgte unter Ansatz einer nichtzentralen t-Verteilung (d.h. mit unbekanntem Mittelwert μ und unbekannter Standardabweichung σ der Grundgesamtheit) bei Variation der folgenden statistischen Parameter:

- Annahme der Grundgesamtheit mit einer normalverteilten Zufallsvariable und alternativ mit einer logarithmisch transformierten und normalverteilten Zufallsvariable. Mit dem

mathematischen Ansatz der logarithmischen Transformation können physikalisch unmögliche Ereignisse bzw. Ergebnisse (wie negative Festigkeitswerte) in der statistischen Auswertung ausgeschlossen werden.

- Ansatz einer Aussagewahrscheinlichkeit von 75 % ($W = 0,75$) und statistisch strenger von 90 % ($W = 0,90$).

Für die Prüfserien nach Vorbeanspruchung (Feuchte- / Wasserdampflagerung) wurde – wie gewohnt – auf die Ermittlung der 5%-Quantile verzichtet. Von Bedeutung ist hier vielmehr die durch die Beanspruchung hervorgerufene Reduzierung der Querkzugfestigkeit, die in den Tabellen als Abminderungsfaktor im Verhältnis der Mittelwerte der zugehörigen Prüfserien angegeben ist

In Ergänzung zur Querkzugfestigkeit enthalten die Tabellen 12 bis 16 die Ergebnisse der Ermittlung der Schubfestigkeit mit dem Mittelwert und der Standardabweichung. Aufgrund des z.T. sehr geringen Prüfumfangs musste auf die Ermittlung der 5%-Quantile verzichtet werden.

Die Ergebnisse dieser Einzelversuche können wie folgt bewertet werden:

- Für die Querkzugfestigkeit ergibt sich für $d = 400$ mm bei geringeren Mittelwerten eine deutlich höhere Streuung als für $d = 200$ mm, die diesbezüglichen Variationskoeffizienten sind der folgenden Tabelle zu entnehmen. Auffällig sind zudem – wieder vornehmlich für $d = 400$ mm – die z.T. ebenfalls vergleichsweise großen Unterschiede zwischen den Prüfinstituten.

MW-Lamellen		Var.-Koeffizient	MW-Lamellen		Var.-Koeffizient		
d = 200 mm	X	Prüfinst. A	0,11	d = 400 mm	X	Prüfinst. A	0,18
		Prüfinst. B	0,17			Prüfinst. B	0,29
		Prüfinst. C	0,28			Prüfinst. C	0,37
		Gesamtheit	0,19			Gesamtheit	0,29
	Y	Prüfinst. B	0,14		Y	Prüfinst. B	0,21
	Z	Prüfinst. A	0,12		Z	Prüfinst. A	0,17
		Prüfinst. B	0,11			Prüfinst. B	0,41
Gesamtheit		0,12	Gesamtheit	0,28			

Tab. 1: Variationskoeffizienten in der Prüfung der Querkzugfestigkeit

- Gerade für die Prüfserien mit hoher Streuung zeigt sich in der Vermeidung von negativen Werten die Sinnhaftigkeit des Ansatzes einer logarithmischen Transformation für die Auswertung. Dabei bleibt anzumerken, dass für die Ermittlung der 5%-Quantile auf

Grundlage der vorliegenden Daten neben der Streuung wieder der z.T. geringe Prüfumfang prägend ist.

- Aus der klimatischen Einwirkung in Form einer Feuchte- / Wasserdampflagerung folgt gerade für $d = 400$ mm ein z.T. deutlicher Festigkeitsverlust. Die Querkzugfestigkeit nach Vorbeanspruchung liegt in ungünstigen Fällen im Bereich von 40 % der Referenzfestigkeit. Im Vergleich beträgt für $d = 200$ mm die Querkzugfestigkeit nach Vorbeanspruchung in der Regel deutlich mehr als 50 % der Referenzfestigkeit.
- Für die Schub- bzw. Scherfestigkeit zeigt sich gemäß der folgenden Tabelle eine wesentlich geringere Streuung.

MW-Lamellen		Var.-Koeffizient	MW-Lamellen		Var.-Koeffizient	
d = 200 mm	X		d = 400 mm	H	Prüf- inst. A	0,06
				V	inst. A	0,07
		L		Prüf- inst. C	0,16	
	Q	inst. C		0,10		
	Y			L	Prüf- inst. B	0,10
				Q	inst. B	0,01
Z		H	Prüf- inst. A	0,13		
		V	inst. A	0,16		

Tab. 2: Variationskoeffizienten in der Prüfung der Schubfestigkeit (Probenzuschnitt auf $d = 60$ mm mit Orientierung horizontal/vertikal bzw. längs/quer)

Bei Einbeziehung der Einzelwerte sind auch hier deutliche Unterschiede zwischen den Ergebnissen der Prüfinstitute festzustellen. Im Hinblick auf eine mögliche Richtungsabhängigkeit der Schubfestigkeit und des Schubmoduls ist zwar keine eindeutige Tendenz erkennbar, einzelne Prüfserien zeigen jedoch erhebliche Unterschiede zwischen der Längs- und der Querrichtung der MW-Lamellen.

- Hinsichtlich der Probengeometrie zeigt sich bei gleichen MW-Lamellen mit $d = 400$ mm an Proben ohne Dickenzuschnitt eine signifikant geringere Schubfestigkeit als an Proben mit Dickenzuschnitt auf $d = 60$ mm.

In den Tabellen 17 bis 20 der Anlage sind die Ergebnisse der im Rahmen eines späteren Zulassungsverfahrens an MW-Lamellen ($d = 200$ mm) und an MW-Dämmplatten ($d = 200$ mm) durchgeführten Vergleichsprüfung der Querkzugfestigkeit und der Schubfestigkeit zusammengefasst. Für die MW-Lamellen werden die o.g. Ergebnisse in der Tendenz weitgehend bestätigt, davon abweichend kann jedoch eine signifikante Richtungsabhängigkeit der Schubfestigkeit und des Schubmoduls festgestellt werden. Die MW-Dämmplatten zeigen ausgehend von einem sehr viel geringerem Niveau der Referenzfestigkeiten anders als die

MW-Lamellen keine offensichtliche Richtungsabhängigkeit und einen deutlich geringeren Festigkeitsverlust nach klimatischer Vorbeanspruchung.

Ergebnisse der Bauteilversuche

Die Ergebnisse der entsprechend den Einzelversuchen von drei Prüfinstituten an MW-Lamellen durchgeführten Bauteilversuche sind in der Anlage in den Tabellen 21 bis 23 (Tragverhalten unter Schubbeanspruchung, $d = 400$ mm und $d = 200$ mm), in den Tabellen 24 bis 26 (Tragverhalten unter kombinierter Beanspruchung, $d = 400$ mm) sowie in der Tabelle 27 (Verformungen unter hygrothermischer Einwirkung, $d = 400$ mm) zusammengefasst.

Die Tabellen 28 und 29 der Anlage enthalten wieder die Ergebnisse der in einem späteren Zulassungsverfahren im Vergleich sowohl an MW-Lamellen ($d = 200$ mm) als auch an MW-Dämmplatten ($d = 200$ mm) durchgeführten Kombiversuche, in der Tabelle 30 sind die unter hygrothermischer Einwirkung ermittelten Verformungen dargestellt.

Die Ergebnisse dieser Bauteilversuche können wie folgt bewertet werden:

- In geringerem Umfang als in den Einzelversuchen zeigt sich auch in einzelnen Serien der Bauteilversuche eine z.T. hohe Streuung. Zu beachten ist hier jedoch der von vornherein begrenzte Prüfumfang auf jeweils $n \leq 3$ Bauteilversuche.
- In den Bauteilversuchen zur Ermittlung des Tragverhaltens der MW-Lamellen unter Schubbeanspruchung ergeben sich wie in den Einzelversuchen zur Schubfestigkeit bei größerer Dicke deutlich verringerte Versagenslasten. Ursache ist mit hoher Wahrscheinlichkeit die Überlagerung von Schub und Biegung mit einem im Verhältnis zur Dicke entsprechend deutlich zunehmenden Biegeanteil der Beanspruchung.
- In den Kombiversuchen ist das qualitativ signifikant unterschiedliche Tragverhalten der MW-Lamellen und der MW-Dämmplatten auffällig. In den diesbezüglichen Diagrammen der Anlage sind die Versagenslasten dargestellt, Bezugsgrößen sind die Querkzugfestigkeit und die Schubfestigkeit der MW-Lamellen und MW-Dämmplatten unter Ansatz des Klebeflächenteils (50 % bzw. 100 %). Das Versagen erfolgte in den Kombiversuchen überwiegend durch "Fellabriss" bzw. Bruch im Wärmedämmstoff zum Klebemörtel.

Zum direkten Vergleich sind in den folgenden Diagrammen für drei Versuchsserien die "normierten" (prozentual auf die Einzelfestigkeiten bezogenen) Versagenslasten der Kombiversuche neben den Absolutwerten dargestellt.

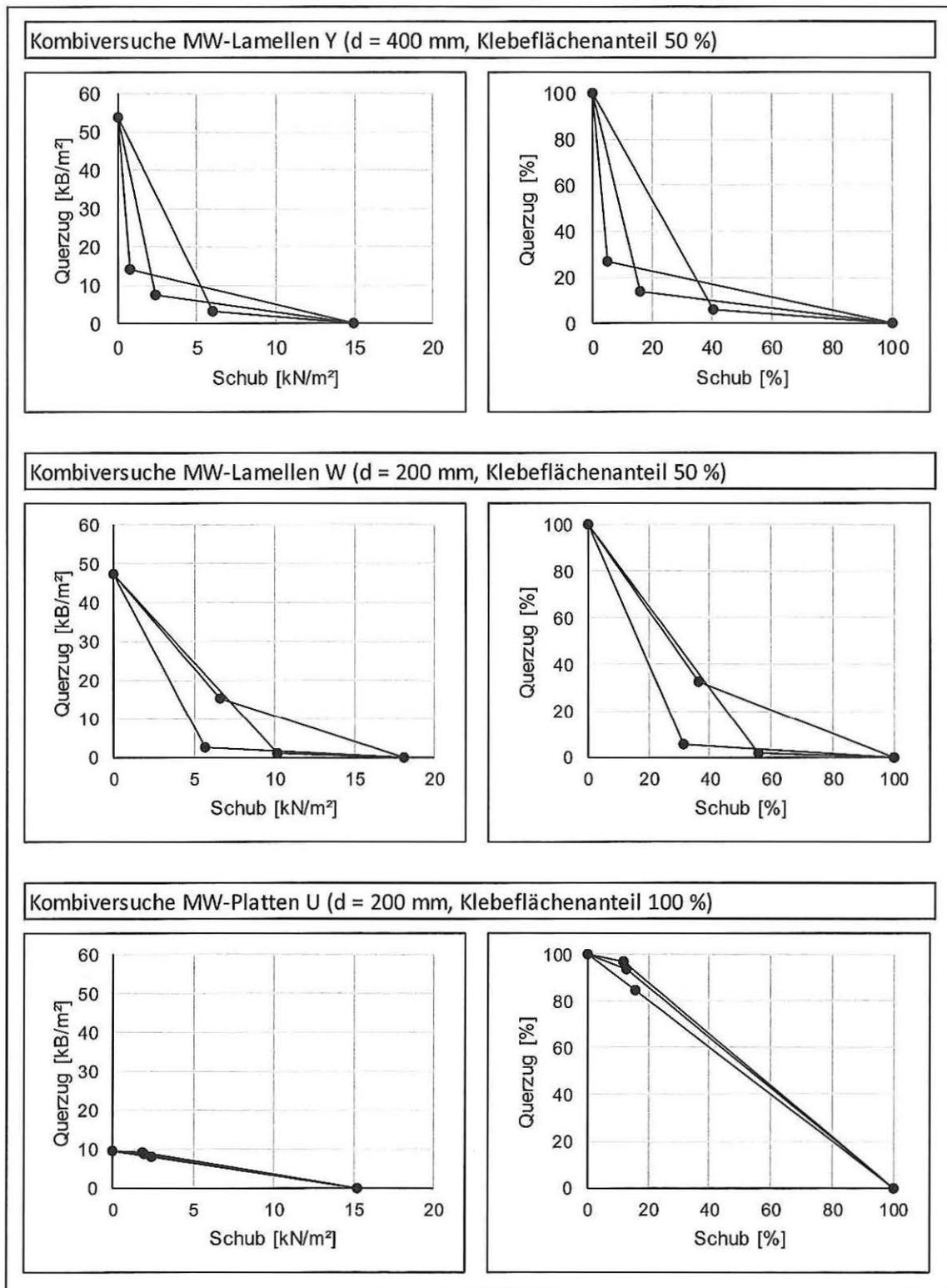


Bild 3: Tragverhalten von MW-Lamellen und MW-Dämmplatten exemplarisch im Vergleich (Einzelfestigigkeiten Querzug – Schub unter Berücksichtigung des Klebeflächenanteils)

Die Unterschiede zwischen den MW-Lamellen (unterschiedliche benannte Produkte "W" und "Y" eines Anbieters) mit $d = 200$ mm und $d = 400$ mm können ggf. durch "Ausreißer" oder auch mögliche Variationen im konkreten Prüfablauf erklärt werden. Demgegenüber sind die Unterschiede zwischen den MW-Lamellen und den MW-Dämmplatten signifikant. Die MW-Dämmplatten weisen unter Berücksichtigung des Klebeflächenanteils bei ähnlicher Schubfestigkeit zwar eine erheblich geringere Querkzugfestigkeit auf, mit den ebenfalls geringeren Versagenslasten zeigt sich in den Kombiversuchen jedoch eine wesentlich höhere "Ausnutzung" dieser Einzelfestigkeiten. Der für die MW-Lamellen festgestellte Abfall der Versagenslasten gegenüber den Einzelfestigkeiten ist in seiner deutlichen Ausprägung demgegenüber auch im Vergleich zu den bekannten Interaktionsdiagrammen für Befestigungs- bzw. Verankerungsmittel ungewöhnlich. In der Regel kann hier – bereits auf der sicheren Seite liegend – ein weitgehend linearer Verlauf angenommen werden.

- In den Bauteilversuchen unter hygrothermischer Einwirkung zeigen sich für die WDVS mit unterschiedlichen MW-Lamellen mit $d = 400$ mm bei ähnlichen Randbedingungen (Wärme-Kälte-Wechselzyklen mit einer Temperaturdifferenz $\Delta\Phi \approx 70$ K und einer Messlänge von $L = 2,9$ m bis $L = 3,4$ m) Unterschiede in den Verformungen von $\Delta L = 0,9$ mm bis $\Delta L = 1,5$ mm.

Im Vergleich ergeben sich bei $d = 200$ mm für MW-Dämmplatten mit $\Delta L = 0,8 - 1,1$ mm deutlich geringere Verformungen als für MW-Lamellen mit $\Delta L = 1,4 - 2,6$ mm, dabei zeigen organisch gebundene Putze gegenüber mineralisch gebundenen Putzen die jeweils größeren Verformungen. Eine umfassendere Darstellung der hygrothermisch bedingten Verformungen unter Ansatz der Bettungssteifigkeit ist dem folgenden Abschnitt zu entnehmen.

5. Statisches System

5.1 Einflussparameter

Voraussetzung für die Entwicklung eines statischen Modells zur Erfassung und Prognose des Verhaltens von Wärmedämmverbundsystemen ist die realitätsgerechte Formulierung der Einflussparameter in Form der spezifischen Eigenschaften der Komponenten und ihres Zusammenwirkens im System. Für diese zentrale Aufgabe der Modellierung ergibt sich mit den aktuell vorliegenden Daten für geklebte WDVS mit MW-Lamellen insofern die Problematik der teilweisen Unkenntnis (und z.T. auch Widersprüchlichkeit) von Eigenschaften, die das Tragverhalten maßgebend prägen. Die in dieser Hinsicht kritischen Punkte können wie folgt zusammengefasst werden.

Zugfestigkeit und Zugelastizitätsmodul senkrecht zur Lamellen- / Plattenebene

Mit der z.T. erheblichen Streuung der Einzelwerte der Querkzugfestigkeit in einzelnen Prüfserien (mit einem Variationskoeffizienten bis zu $v = 0,41$, vgl. Tab. 1) und auch zwischen den Prüfinstituten (mit abweichenden Mittelwerten von $m = 82 \text{ kN/m}^2$ bis $m = 110 \text{ kN/m}^2$ für MW-Lamellen gleichen Fabrikats, vgl. Tab. 8 der Anlage) kann – auch ohne Berücksichtigung von Teilsicherheitsbeiwerten – für die Modellbildung zunächst nur ein restriktiver Festigkeitsansatz gewählt werden. Von Bedeutung ist in diesem Zusammenhang zudem die Frage, inwieweit die Streuung herstellungsbedingt das Ergebnis von Unterschieden zwischen den MW-Lamellen ist oder auch innerhalb der einzelnen MW-Lamellen auftritt. Im Rahmen der Dissertation [15] von Dr.-Ing. Melanie Krause wurde in dieser Hinsicht bereits exemplarisch eine große Streuung innerhalb von MW-Dämmplatten nachgewiesen.

Zum E-Modul unter Querkzugbeanspruchung liegen keine Zahlen vor, anhand der (nicht für alle Prüfserien vorliegenden) Kraft-Verformungs-Diagramme könnte der E-Modul jedoch als Kenngröße explizit ermittelt oder – genauer – das Spannungs-Dehnungs-Verhalten als Funktion mathematisch beschrieben werden. Soweit anhand der Diagramme ersichtlich, ist für einzelne Prüfserien eine entsprechende Interpretation aufgrund von zumindest "Ausreißen" jedoch wiederum nur mit Unschärfe möglich.

Zugfestigkeit und Zugelastizitätsmodul parallel zur Lamellen- / Plattenebene

Daten zur Zugfestigkeit und zum E-Modul parallel zur Ebene liegen für MW-Lamellen nicht vor. Von Bedeutung für die Modellbildung ist hier insbesondere eine mögliche (und anhand der Ergebnisse der Prüfung der Schubfestigkeit wahrscheinliche) Richtungsabhängigkeit (längs – quer) der baustofflichen Eigenschaften.

Für die notwendige Weiterentwicklung unter Einbeziehung von neuen Wärmedämmstoffen

ist grundsätzlich die Isotropie – Anisotropie der (mechanischen) Eigenschaften zu bestimmen. Die Ergebnisse von im Vergleich an bereits bekannten Wärmedämmstoffen (EPS-, MW- und PF-Dämmplatten) durchgeführten Untersuchungen zur Zug- und Druckfestigkeit in den drei Ebenen sind ebenfalls der o.g. Dissertation zu entnehmen.

Kraftübertragung über die Fugen

In den Bauteilversuchen unter Schubbeanspruchung zeigte sich für die Dicke $d = 400$ mm ein "Kippen" der einzelnen MW-Lamellen mit einer entsprechend gegensinnigen Relativverschiebung im Bereich der Stoßfugen, so dass für die Modellierung nicht mehr ohne weiteres von einer homogenen (geschlossenen) Schicht ausgegangen werden kann. Insofern sind für die hier relevanten Wärmedämmstoffe (wie MW-Lamellen) zunächst die grundlegenden Bedingungen und Mechanismen der Kraftübertragung in den Stoßfugen zu ermitteln. Einflussparameter sind u.a. die Querkontraktion und das Temperatur- und Feuchtedehnverhalten (mit ggf. irreversibler Klaffung der Fuge) sowie die "Qualität" der Verlegung der Dämmplatten vor Ort.

Schubfestigkeit und Schubmodul

Für einen vereinfachten Ansatz könnten die Schubfestigkeit und der Schubmodul zunächst anhand der Ergebnisse der Einzelversuche an Proben mit der (Zuschnitt-) Dicke $d = 60$ mm festgelegt werden. Für Proben mit größerer Dicke ($d = 200$ mm / 400 mm) ergeben sich in den Einzel- und Bauteilversuchen zumindest an MW-Lamellen jedoch z.T. deutlich geringere Werte, exemplarisch dargestellt für den Schubmodul in der Tabelle 31 der Anlage. Ursache ist mit hoher Wahrscheinlichkeit die Überlagerung der Schubbeanspruchung durch eine Biegebeanspruchung, die mit der Dicke kontinuierlich zunimmt. Neben der Streuung (und den vorhandenen Unterschieden zwischen den Prüfinstituten) zeigen die Ergebnisse damit auch eine versuchsbedingte Abhängigkeit von der Dicke der Proben, so dass derzeit weder die Schubfestigkeit noch der Schubmodul als konstante Werte zweifelsfrei definiert werden können. Für eine fundamentale Auswertung ist darüber hinaus zu berücksichtigen, dass eine direkte Übertragung der Ergebnisse von den Einzel- auf die Bauteilversuche (und vice versa) aufgrund der unterschiedlichen Prüfbedingungen nur bedingt möglich ist (so z.B. hinsichtlich der Auswirkung des Klebeflächenanteils auf den Schubmodul).

Vor diesem Hintergrund sind für die abschließende Festlegung der Schubfestigkeit und des Schubmoduls als bauproduktspezifische Eigenschaften die folgenden Punkte zu klären:

- Der Einfluss der Überlagerung der Schubbeanspruchung durch eine Biegebeanspruchung auch bei einer Probendicke $d = 60$ mm.

- Die mögliche Veränderung insbesondere des Schubmoduls über die Dicke des Wärmedämmstoffs (d.h. bezogen auf den Querschnitt oberflächennah oder mittig).
- Die Richtungsabhängigkeit der Eigenschaften (d.h. wieder als Ausdruck der Anisotropie).

Parameter der hygrothermischen Beanspruchung

Für das Verhalten von WDVS unter wechselnder Temperatur und Feuchte ist auf der Seite der "Einwirkung" in erster Linie die hygrothermisch bedingte freie Dehnung der Putzschicht und für den "Widerstand" die Behinderung dieser Dehnung durch den Wärmedämmstoff maßgebend. Die Ermittlung der resultierenden Verformungen und Spannungen in der Putzschicht kann vereinfacht unter Ansatz jeweils eines in Längsrichtung (ein-achsig) elastisch gebetteten Balkens erfolgen. Für die Festlegung der diesbezüglichen Parameter gilt folgendes:

- Die Untersuchung der kennzeichnenden Eigenschaften der Putzsysteme erfolgte ab den 1980-er Jahren, neuere Untersuchungen wurden – soweit bekannt – z.B. durch den Sachverständigen Dr.-Ing. H. Oberhaus im Rahmen der gutachtlichen Stellungnahme 10.2.701 [16] durchgeführt. Es erscheint jedoch fraglich, ob mit den bislang vorliegenden Ergebnissen die gesamte Bandbreite der mittlerweile angebotenen Putzsysteme im Zusammenwirken zwischen Unterputz, Bewehrung (Textilglas-Gittergewebe) und Schlussbeschichtung (Oberputz) erfasst wird. Kennzeichnend sind in diesem Sinne
 - die Temperaturdehnung und die Feuchtedehnung (Quellen und Schwinden),
 - der E-Modul unter Druck- und unter Zugspannung,
 - das Rissbildungsverhalten mit Riss-Spannung und Riss-Dehnung sowie
 - der zeitliche Verlauf und die Abhängigkeit der Kenngrößen vom Alter und von der Art, Größe und Dauer der Einwirkung.

Der Einfluss von unterschiedlichen Putzsystemen auf die Verformungen wird anhand der exemplarisch an MW-Lamellen und MW-Dämmplatten durchgeführten Bauteilversuche offensichtlich. Unter gleichen Randbedingungen ergeben sich in der oben aufgeführten Vergleichsprüfung bei organischer Bindung (anders als z.B. auch in der o.g. Stellungnahme formuliert) signifikant größere Verformungen als bei mineralischer Bindung (vgl. Tab. 30 der Anlage).

- In der Tabelle 32 der Anlage sind die aus den Einzel- und Bauteilversuchen berechneten Werte der Bettungsziffer für die rechnerische Ermittlung der Verformungen der untersuchten WDVS mit MW-Lamellen der Dicke $d = 400$ mm angegeben. Die Werte sind aus dem jeweiligen Schubmodul rückgerechnet, d.h., es gelten auch hier die oben geäußerten kritischen Anmerkungen. Die Grenzwerte (MIN / MAX) umschließen jedoch eine große Bandbreite, so dass damit z.B. auch die nur für einen Bauteilversuch vorliegenden

Werte der Bettungsziffer in Längsrichtung nach hygrothermischer Beanspruchung (d.h. nach Alterung) erfasst werden.

Der Berechnungsgang zur rechnerischen Ermittlung der Verformungen unter hygrothermischen Einwirkungen ist in der (dreiteiligen) Tabelle 33 der Anlage dargestellt. Die Ergebnisse der Vergleichsrechnung bei Ansatz von z.T. weit gefassten Grenzwerten für die das maßgebende Steifigkeitsverhältnis zwischen Putzschicht und Wärmedämmstoff prägenden Eigenschaften (Dicke und E-Modul der Putzschicht sowie Bettungsziffer des Systems) sind in der Tabelle 34 der Anlage zusammengefasst. Die Berechnung erfolgte exemplarisch für einen Wärme-Kälte-Wechselzyklus der Bauteilversuche (Temperaturdifferenz $\Delta\Phi \approx 70$ K).

Die realen Verformungen nach Tabelle 27 der Anlage können im Ergebnis nur für einen Bauteilversuch mit $\Delta L = 1,5$ mm durch die Berechnung reproduziert werden. Die deutlich geringeren Verformungen ($\Delta L = 0,9 - 1,1$ mm) der beiden anderen Bauteilversuche können mit den bislang getroffenen Annahmen rechnerisch nicht korrekt dargestellt werden. Ursache für die Diskrepanz ist mit hoher Wahrscheinlichkeit die im Zusammenhang mit den bislang nicht gänzlich erfassten Eigenschaften ebenfalls nicht vollständig beschriebene Wechselwirkung zwischen der Temperaturdehnung, der Feuchtedehnung und der Relaxation, die bei gegenläufiger und komplexer Tendenz zu einer signifikanten Reduzierung der Beanspruchungen im Spannungs-Dehnungs-Verhalten führen kann. Diesbezügliche Angaben enthält bereits die o.g. Stellungnahme des Sachverständigen Dr.-Ing. H. Oberhaus.

- Bei Betrachtung der später im direkten Vergleich durchgeführten Untersuchungen an MW-Lamellen und MW-Platten der Dicke $d = 200$ mm fällt bereits ohne weitergehende Berechnung auf, dass die Verformungen des WDVS im Bauteilversuch unter identischen Bedingungen (d.h. mit gleicher Putzschicht und unter gleicher hygrothermischer Einwirkung) bei Verwendung von MW-Lamellen trotz deutlich größerem Schubmodul signifikant größer sind als bei Verwendung von MW-Platten. Eine Erklärung für diesen Widerspruch ist derzeit nur bedingt möglich. So wie vom Sachverständigen Dr.-Ing. M. Reuschel in der gutachtlichen Stellungnahme G 160608_3 [17] bereits vermutet, könnten z.B. – im Detail nicht näher beschriebene – (Mikro-) Rissbildungen in der Putzschicht oder – sehr viel wahrscheinlicher – ein reduzierter Verbund in der Grenz- / Übergangsschicht zwischen dem Unterputz und dem Wärmedämmstoff für die größeren Verformungen ursächlich sein.

Wenn bereits für das Modell eines elastisch gebetteten Balkens (oder einer Scheibe) bislang

nicht alle Einflussparameter vollständig oder widerspruchsfrei erfasst sind, so gilt dieser Umstand erst recht für ein noch zu formulierendes Modell, mit dem das Tragverhalten von WDVS unter allen Einwirkungen sowohl einheitlich als auch komplett beschrieben und prognostiziert werden soll.

5.2 Systemmodellierung

Da für die realitätsgerechte Formulierung eines Modells zum Tragverhalten von WDVS zentrale Kennwerte fehlen und im Einzelfall bislang getroffene Annahmen auch zu Fehldeutungen führen, wurde zunächst ein "fiktives" (oder rein theoretisches) Vor-Modell für eine erste Analyse auf Grundlage der Methode der finiten Elemente (FEM) entwickelt. Ziel dieser Analyse unter Ansatz von vereinfachten baustofflichen Annahmen war die Identifizierung von Bereichen, für die deutlich detailliertere praktische und theoretische Untersuchungen erforderlich werden. Eine exemplarische Darstellung der Ergebnisse dieser derzeit noch groben Berechnungen in Form der Hauptspannungsvektoren am verformten System ist den Bildern 1 bis 5 der Anlage zu entnehmen.

Erste kritische Bereiche konnten mit den Berechnungen ermittelt werden. So zeigt sich z.B. in der folgenden Darstellung der Verformungen – wenn auch überdeutlich – eine mögliche Trennung der Dämmplatten in den Stoßfugen.

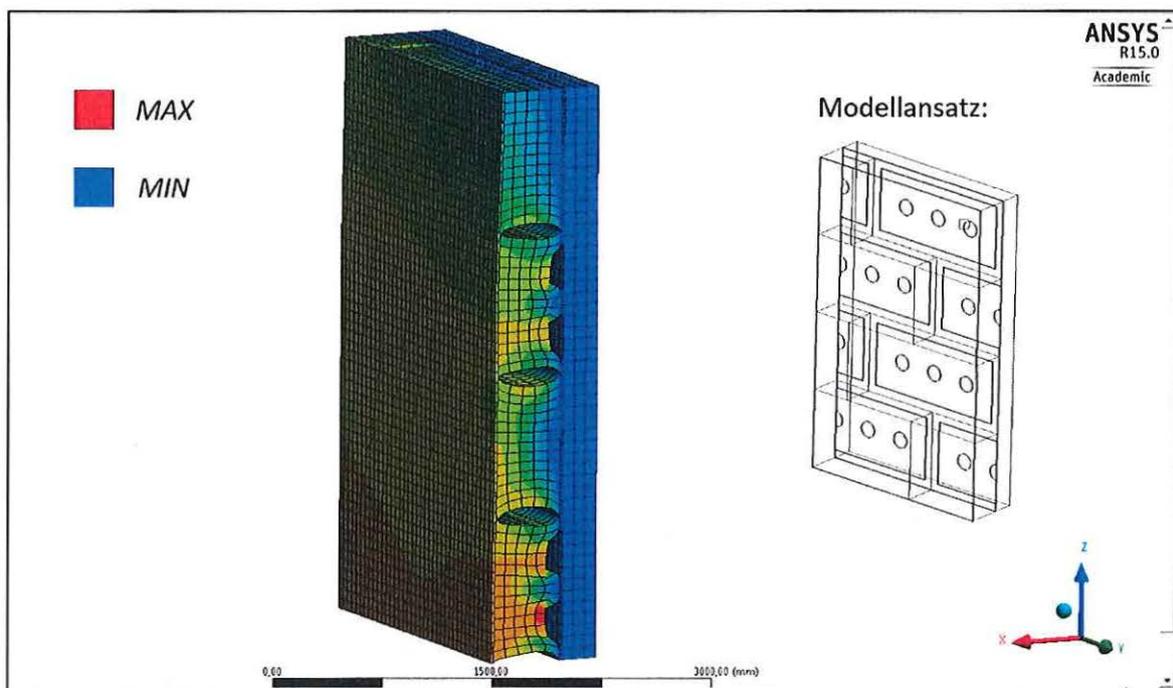


Bild 4: Verformungen des WDVS unter Eigenlasten, Windsoglasten und hygrothermischer Einwirkung

Der folgenden Darstellung kann (anders als bei ein-achsiger Simulation) die erhebliche Beanspruchung des WDVS senkrecht zur Putzschicht unter hygrothermischer Einwirkung entnommen werden.

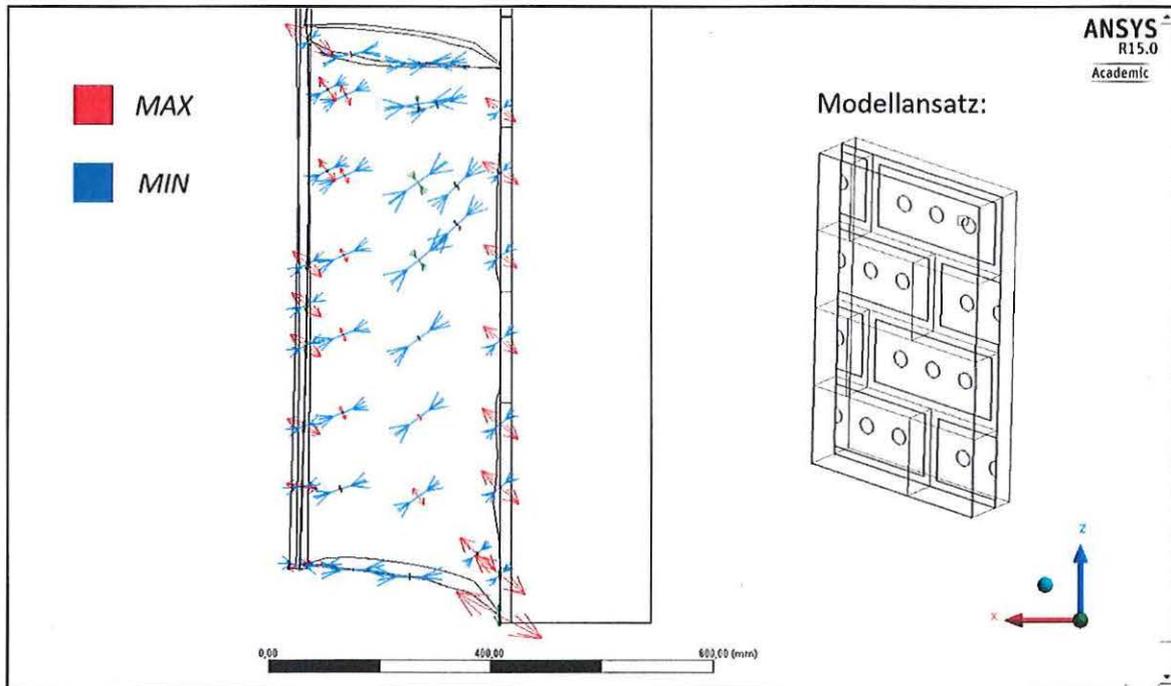


Bild 5: Hauptspannungsvektor im WDVS (unterer Abschluss) unter hygrothermischer Einwirkung

Eine weitergehende Parametervariation oder eine detaillierte quantitative Auswertung wurden nicht durchgeführt, da die Berechnungen aufgrund der Vielzahl der derzeit noch nicht definierten Einflussparameter auf zu vielen Unbekannten beruhen und die Ergebnisse damit eine erhebliche Unschärfe aufweisen.

6. Empfehlungen

6.1 Festlegung der Teilsicherheitsbeiwerte

Wie in Kapitel 3.4 bereits skizziert, sind vorhandene Unsicherheiten bei der Ermittlung des Widerstandes eines Wärmedämmverbundsystems durch den Ansatz eines Multiplikationsproduktes von Teilsicherheitsbeiwerten zu berücksichtigen:

$$\gamma_M = \prod \gamma_{M,i}$$

Die Definition der einzelnen Teilsicherheitsbeiwerte $\gamma_{M,i}$ auf Grundlage eines präzisen Modells zur Simulation und Prognose des Tragverhaltens und der Dauerhaftigkeit von WDVS ist aktuell nicht möglich, mit den derzeitigen Erkenntnissen können jedoch die nachfolgenden Empfehlungen zur Diskussion gestellt werden:

1. Streuung der Festigkeit $\rightarrow \gamma_{M,1}$

Der Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{M,1}$ zur Berücksichtigung der Streuung der Einzelwerte der Festigkeit kann mit vereinfachtem Ansatz wie folgt ermittelt werden:

$$\gamma_{M,1} = e^{(0,8 \cdot \beta - 1,645) \cdot v}$$

mit

β Zuverlässigkeitsindex

v Variationskoeffizient.

Der Zuverlässigkeitsindex β wird als Ausdruck einer noch akzeptierten – theoretischen – Versagenswahrscheinlichkeit gemäß DIN EN 1990:2010-12 [18] über die Zuverlässigkeitsklasse RC definiert, die ihrerseits mit einer Versagensfolgeklasse CC verknüpft ist. Gebräuchlicher Ansatz für das Tragwerk von Wohn- und Verwaltungsgebäuden ist die Zuverlässigkeitsklasse RC 2 mit dem Zuverlässigkeitsindex $\beta = 3,8$ für einen Bezugszeitraum von 50 Jahren. Bei darüber hinausgehenden Anforderungen an die Sicherheit von Konstruktionen mit hohen Versagensfolgen gilt die Zuverlässigkeitsklasse RC 3 mit dem Zuverlässigkeitsindex $\beta = 4,3$.

Der Variationskoeffizient v ist eine abgeleitete statistische Kenngröße für die Ergebnisse der Festigkeitsprüfung und ergibt sich als Verhältnis der Standardabweichung s zum Mittelwert m ($v = s/m$).

Die mögliche Bandbreite eines mit diesem vereinfachten Ansatz ermittelten Teilsicherheitsbeiwertes ist bis zum Variationskoeffizienten $v = 0,5$ in der folgenden Abbildung dargestellt.

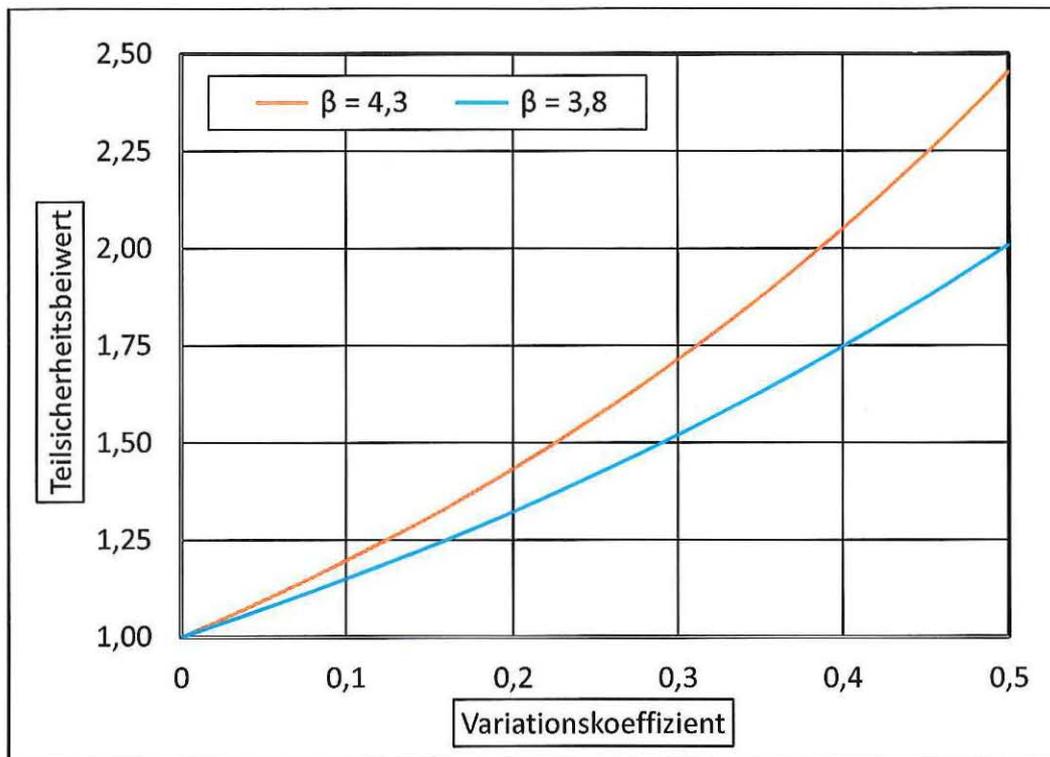


Bild 6: Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{M,1}$ in Abhängigkeit vom Zuverlässigkeitsindex β und dem Variationskoeffizienten v

Wie vom Sachverständigen Dr.-Ing. H. Oberhaus in der gutachtlichen Stellungnahme 13.5.010 [14] auf Basis der Dissertation [15] von Dr.-Ing. M. Krause erläutert, kann für die Ermittlung des Teilsicherheitsbeiwerts $\gamma_{M,1}$ auch ein mathematisch strengeres Verfahren über Quantilfaktoren gewählt werden:

$$\gamma_{M,1} = (1 - k_n * v) / (1 - k_{d,n} * v)$$

mit

k_n Quantilfaktor für den charakteristischen Wert

$k_{d,n}$ Quantilfaktor für den Bemessungswert.

In die Bestimmung der Quantilfaktoren gehen u.a. die Stichprobenanzahl n , der Sensitivitätsfaktor α_R und der Zuverlässigkeitsindex β sowie ggf. vorhandene Vorkenntnisse zum Variationskoeffizienten v , ein.

Im Hinblick auf die skizzierten Berechnungsverfahren für $\gamma_{M,1}$ ist zu berücksichtigen, dass mit den vorliegenden Daten (insbesondere zur Zugfestigkeit des Wärmedämmstoffs senkrecht zur Plattenebene – Querzugfestigkeit) häufig eine deutlich über den Erwartungen an eine industrielle Produktion liegende Streuung bereits für die Ermittlung des

Quantilwerts – d.h. ohne Teilsicherheitsansatz – prägend wird. In diesem Zusammenhang ist z.B. auch für MW-Lamellen zu klären, in welchem Umfang diese Streuung das Ergebnis von Unterschieden zwischen den Lamellendämmplatten oder auch innerhalb der einzelnen Lamellendämmplatten ist (und wie bereits für MW-Dämmplatten anhand der o.g. Dissertation bekannt).

Mit den hier in Zusammenfassung dargestellten sicherheitstheoretischen Überlegungen ergeben sich für WDVS nach (zukünftig) EN 17237 – und bereits derzeit für WDVS mit ETA – aufgrund der normativen Vorgaben erhebliche Probleme für die Bestimmung des Bemessungswertes der Querkzugfestigkeit als eine der zentralen (mechanischen) Kenngrößen von Wärmedämmstoffen und in der Folge für die Festlegung des konkreten Anwendungsbereiches:

- Der Kern der Definition eines Bemessungswertes ist der Quantilwert als Ausdruck des "statistisch abgesicherten Kleinstwertes" der Festigkeit. Die Ermittlung erfolgt in der Regel als 5%-Quantil mit einer Aussagewahrscheinlichkeit von 90 % oder 75 %. In die Berechnung dieses Quantils x_p gehen (mit $x_p = m - k_s \cdot s$) der Mittelwert m und die Standardabweichung s der konkreten Prüfung ein, d.h., die Streuung der Eigenschaften bzw. Festigkeiten wird direkt erfasst.
- Die Vorgaben des derzeitigen Entwurfs prEN 17237:2019 [12] beziehen sich explizit auf Wärmedämmstoffe nach den europäischen Normen von EN 13162:2015-04 bis (mit Ausnahmen) zu EN 13171:2015-04. Mit diesen Produktnormen wird die Querkzugfestigkeit in Form von Stufen (z.B. TR80 für die Querkzugfestigkeit $\sigma_{mt} \geq 80$ kPa) festgelegt, für die Bestimmung der Querkzugfestigkeit wird auf die EN 1607:2013-05 [19] verwiesen. Mit dieser Prüfnorm wird die Querkzugfestigkeit wiederum als Mittelwert einer Prüfserie mit in der Regel 5 Proben definiert (Zitat: "*Das Ergebnis wird als Mittelwert der Messungen mit zwei wertanzeigenden Ziffern angegeben.*").

Auf der Grundlage dieses Normensystems ist für die Querkzugfestigkeit von Wärmedämmstoffen nur der Mittelwert bzw. mit der Festigkeitsstufe TR der (in etwa) kleinste Wert der Mittelwerte bekannt (Zitat: "*Kein Prüfergebnis darf kleiner als die angegebene Stufe TR sein.*"). Die Angabe oder Berücksichtigung der Streuung (als Standardabweichung s oder Variationskoeffizient v) ist nicht vorgesehen. Die Einzelwerte der Prüfung können nur den in der Regel nicht zugänglichen Prüfberichten entnommen werden. Aus dem Mittelwert allein kann jedoch kein Quantilwert und damit auch kein Bemessungswert ("statistisch korrekt") abgeleitet werden.

2. Festigkeitsminderung infolge Alterung → $\gamma_{M,2}$

Mit $\gamma_{M,2}$ wird eine mögliche Festigkeitsminderung über die Nutzungsdauer durch insbesondere hygrothermische Einwirkungen als Ausdruck der Alterung der Komponenten des WDVS erfasst:

$$\gamma_{M,2} = m_0 / m_a$$

mit

m_0 Mittelwert der Prüfsérie im Ausgangszustand (Null- oder Referenzserie)

m_a Mittelwert der Prüfsérie nach Alterung durch z.B. simulierte klimatische Einwirkungen.

Der Teilsicherheitsbeiwert ist damit der Kehrwert der anhand der Prüfung direkt bestimmten Festigkeitsminderung (m_a / m_0). In diesem Zusammenhang ist zu beachten, dass von der Veränderung in der Regel nicht nur die direkt geprüfte Festigkeit (wie die Querkzugfestigkeit), sondern auch andere Eigenschaften bzw. Festigkeiten (wie die Schubfestigkeit) betroffen sind.

Für den Nachweis einer ausreichenden Dauerhaftigkeit sind hinsichtlich der Festigkeitsminderung oder auch der verbleibenden Festigkeit nach Alterung weiterhin Grenz- oder Mindestwerte als "absolute" Anforderung zu definieren. Insbesondere auch vor dem Hintergrund der Gleichbehandlung ist zu überlegen, inwieweit auch hier statistische Methoden – wie z.B. für den Nachweis von Produkten aus Faserzement gefordert – greifen sollten. Für eine "noch zulässige" Festigkeitsminderung könnte z.B. das Verhältnis der Vertrauensbereiche der Mittelwerte ($(m_a - k_m \cdot s_a) / (m_0 + k_m \cdot s_0)$) als strenger formulierter Maßstab herangezogen werden.

Basis der im Prüfverfahren für WDVS erforderlichen Simulation der Alterung aufgrund von hygrothermischen Einwirkungen sind – mit Ergänzungen – die Bestimmungen der ETAG 004 bzw. perspektivisch der EN 17237. Kern ist jeweils ein Bauteilversuch unter Temperatur- und Feuchte-Wechselzyklen:

ETAG 004	80 Wärme-Regen-Zyklen (+ 70 °C / + 15 °C), 5 Wärme-Kälte-Zyklen (+50 °C / -20 °C) und ggf. getrennte Frost-Tau-Wechselprüfung.
prEN 17237:2019	80 Wärme-Regen-Zyklen (+ 70 °C / + 15 °C), 5 Wärme-Kälte-Zyklen (+50 °C / -20 °C) und 30 Frost- Tau/Regen-Zyklen (+20 °C / -20 °C) nach EN 16383 [20].

In Anbetracht der Bandbreite von möglichen Neu- oder Weiterentwicklungen für WDVS

wird angeregt, die Übereinstimmung dieser experimentellen Simulation mit den klimatisch bedingten Einwirkungen innerhalb der angestrebten Nutzungsdauer bzw. Standzeit (25 Jahre nach ETAG 004 bzw. 50 Jahre nach prEN 17237:2019) zu verifizieren.

3. Festigkeitsminderung bei klimatisch bedingter Einwirkung → $\gamma_{M,3}$

Neben der Alterung kann durch hygrothermische Einwirkungen (wie hohe Feuchtegehalte oder extreme Temperaturen) ein begrenzter Festigkeitsverlust auch direkt hervorgerufen werden, der durch $\gamma_{M,3}$ berücksichtigt wird:

$$\gamma_{M,3} = m_0/m_k$$

mit

m_0 Mittelwert der Prüfserie im Ausgangszustand (Null- oder Referenzserie)

m_k Mittelwert der Prüfserie unter simulierter klimatischer Einwirkung.

Neben dem Teilsicherheitsbeiwert ist im Sinne der Begrenzung der direkten Auswirkungen auch der Ansatz von absolut definierten Grenzwerten (wie unter Pkt. 2) zu berücksichtigen.

Die konkreten Prüfungen beziehen sich gemäß den normativen Vorgaben primär auf die Beanspruchung des WDVS durch Wasser (hinsichtlich der Haftzugfestigkeit zwischen den Komponenten) bzw. Wasserdampf (hinsichtlich der Quersugfestigkeit des Wärmedämmstoffs). Die Prüfung erfolgt nach unterschiedlich begrenzter Rücktrocknung, die resultierende Festigkeitsminderung ist dabei in der Regel auch mit gewissen Alterungsprozessen verknüpft.

Vor dem Hintergrund der Weiterentwicklung von WDVS sollte der Einfluss von abweichenden und weitergehenden klimatischen Einwirkungen diskutiert werden. Ein Beispiel wäre die mögliche Festigkeitsminderung von organisch gebundenen Putzen mit geringem Hellbezugswert (in der aktuellen Entwicklung unter 20) und geringem TSR-Wert (mindestens jedoch 25) bei hoher Intensität der Sonneneinstrahlung. Zur Berücksichtigung von unterschiedlichen (gegensätzlichen) klimatischen Beanspruchungen wäre mit diesem Ansatz bei genauerer Kenntnis zusätzlich ein Kombinationsfaktor – wie auf der Seite der Einwirkungen – zur Berücksichtigung der Eintrittswahrscheinlichkeit und des Verlaufs einzuführen.

4. Festigkeitsminderung infolge Dauerlast-Einwirkung $\rightarrow \gamma_{M,4}$

Ein mögliche Festigkeitsminderung durch die Einwirkung von statischen Dauerlasten wird mit $\gamma_{M,4}$ erfasst:

$$\gamma_{M,4} = m_0/m_d$$

mit

m_0 Mittelwert der Prüferie im Ausgangszustand (Null- oder Referenzserie)

m_d Mittelwert der Prüferie nach Dauerlast-Einwirkung.

Bei vorgegebener Begrenzung der Eigenlast der Putzschicht bzw. der Dicke des Wärmedämmstoffs kann für geklebte WDVS eine mögliche Festigkeitsminderung durch eine Dauerlast-Einwirkung in der Regel vernachlässigt werden.

Der Einfluss von wechselnden Lasten im Sinne einer dynamischen Beanspruchung des WDVS scheint unter den bislang bekannten Bedingungen ebenfalls vernachlässigbar. Im Hinblick auf mögliche Weiterentwicklungen sollte jedoch der Einfluss von dauerhaft zyklisch wechselnden Verformungen und insofern auch hier die Übereinstimmung zwischen den experimentell simulierten Einwirkungen und den real über die gesamte Nutzungsdauer zu erwartenden Einwirkungen überprüft werden.

5. Ungenauigkeiten in der Ausführung $\rightarrow \gamma_{M,5}$

Die Auswirkungen von möglichen "Ungenauigkeiten" in der Ausführung des WDVS vor Ort können mit $\gamma_{M,5}$ geschätzt werden. Für die konkrete Festlegung ist unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Folgen und Wahrscheinlichkeiten dieser Ungenauigkeiten zwischen den einzelnen Arbeitsschritten zu differenzieren, z.B. zwischen dem Verkleben des Wärmedämmstoffs am Untergrund (mit nachträglich nicht eindeutig identifizierbaren Unregelmäßigkeiten) und dem Aufbringen des Unterputzes (mit nachträglich eher offensichtlichen Unregelmäßigkeiten). Unter der Voraussetzung der Überwachung der Ausführung erscheint für $\gamma_{M,5}$ eine in der Größe begrenzte Festlegung in folgender Bandbreite angemessen:

$$\gamma_{M,5} = 1,0 \dots 1,2$$

6. Ungenauigkeiten in der Modellbildung $\rightarrow \gamma_{M,6}$

Der Nachweis der Anwendbarkeit basiert prinzipiell auf der Annahme von Modellen z.B. zum Tragverhalten von WDVS. Ungenauigkeiten in der Modellbildung oder der Ansatz von nur begrenzten Erkenntnissen können mit $\gamma_{M,6}$ berücksichtigt werden. Zusätzlich

kann mit $\gamma_{M,6}$ der Einfluss der Duktilität auf das Tragverhalten erfasst werden. Die derzeitigen Ansätze zum Nachweis von WDVS können im Hinblick auf die Festlegung dieses Teilsicherheitsbeiwerte wie folgt bewertet werden:

- Im Zulassungsverfahren (*aBG / abZ*) sind Bauteilversuche zentrale Bestandteile für den Nachweis der Anwendbarkeit, dabei können Kombiversuche am WDVS unter gleichzeitiger Schub- und Querkzugbeanspruchung als Kern des Nachweises einer ausreichenden Standsicherheit betrachtet werden. Mit diesen Kombiversuchen wird das reale Tragverhalten experimentell nachgebildet, die Festlegung der Versuchsbedingungen und die Auswertung der Versuchsergebnisse erfolgen bei Kenntnis der – auch statistisch – relevanten Größen unter Ansatz des Produkts der jeweils maßgebenden Teilsicherheitsbeiwerte γ_{M1} bis γ_{M5} . Auf dieser Basis können aus den Versagenslasten die zulässigen Anwendungsbereiche und entsprechende Anforderungen an die Bauprodukte und an die Planung und Ausführung abgeleitet werden. Mit den Kombiversuchen ergibt sich für den Nachweis der Standsicherheit ein eher konservativer Ansatz (auf der "sicheren Seite"), da in Regel jeweils nur die erwartungsgemäß ungünstigsten baukonstruktiven Zusammensetzungen der Komponenten konkret geprüft werden.
- Wie bereits zum Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{M,1}$ skizziert, ist bei fehlender Kenntnis von elementaren statistischen Größen (wie der Standardabweichung) die Ermittlung von Bemessungswerten mit erheblichen Unsicherheiten behaftet. Diese Unsicherheiten können (wie konkret für die Querkzugfestigkeit von Wärmedämmstoffen nach "neuer" europäischer Normung) auch als Unsicherheiten in der (statistischen) Modellbildung aufgefasst und mit $\gamma_{M,6}$ geschätzt werden. Diese Schätzung ist jedoch nur "grob" möglich und muss zwingend auf der "sicheren Seite" erfolgen, einfließen sollten vorhandene Vor- bzw. Vergleichskennnisse zu entsprechenden Wärmedämmstoffen. Mit der Annahme von möglichen Streuungen mit einem Variationskoeffizienten bis zu $v = 0,50$ kann der bereits in die Musterverwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen – MVV TB [1] im Anhang 11 für "WDVS mit ETA nach ETAG 004" (d.h. mit Wärmedämmstoffen nach DIN EN 13162:2015-04 oder nach DIN EN 13163:2017-02) indirekt eingeführte zusätzliche Teilsicherheitsbeiwert als angemessen bewertet werden:

$$\gamma_{M,6} = 2,0$$

- Da die Formulierung eines geschlossenen neuen Modells für geklebte WDVS auf der

Grundlage der vorhandenen Daten derzeit nicht möglich ist, kann auch ein diesbezüglicher notwendiger Teilsicherheitsbeiwert für die angestrebte Simulation und Prognose des Tragverhaltens und der Dauerhaftigkeit nicht angegeben werden.

6.2 Ergänzend erforderliche Untersuchungen

Wie in den vorangegangenen Abschnitten dargestellt, ist der Umfang der vorliegenden Daten und konkret der Versuchsergebnisse zu gering (und im Inhalt z.T. auch zu widersprüchlich), um auf dieser Basis ein theoretisches Modell für geklebte WDVS zu formulieren, mit dem sich das Tragverhalten realitätsgerecht simulieren und die Standsicherheit und Dauerhaftigkeit sicher prognostizieren ließe.

Die zentralen Inhalte der – in Ergänzung zum derzeitigen Erkenntnisstand – erforderlichen Einzel- und Bauteilversuche zur Entwicklung eines exakten Modells sind wie folgt zu beschreiben:

- Bestimmung der Isotropie – Anisotropie der Wärmedämmstoffe.

Schwerpunkt der Versuche ist die Ermittlung der Festigkeiten und Dehnungen in den drei Achsen der Dämmplatten. Wie in der Dissertation [15] von Dr.-Ing. M. Krause bereits exemplarisch gezeigt, ist in diesem Zusammenhang auch die Streuung innerhalb der einzelnen Dämmplatten im Vergleich zur Streuung zwischen den Dämmplatten zu untersuchen.

- Untersuchung des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens der Putzschicht unter hygrothermischen Einwirkungen.

Mit den Versuchen sind die zeitabhängigen und gegenläufigen Dehnungen unter Ansatz von wechselnder Temperatur, Feuchte und Relaxation zu ermitteln. Versuchstechnisch einzubeziehen ist der Einfluss der in unterschiedlichem Maße dehnungsbehindernden Verbundwirkung zwischen dem Unterputz und dem Wärmedämmstoff sowie der Einfluss von möglichen (Mikro-) Rissbildungsprozessen in der Putzschicht mit Erstrissbildung und Rissaufweitung. Die Untersuchungen sind dabei in der Bandbreite der aktuell gängigen (mineralisch und organisch gebundenen) Putze durchzuführen.

- Untersuchung des Kraft-Verformungs-Verhaltens in den Dämmplattenstößen.

Unter Ansatz der unterschiedlich geneigten Spannungstrajektorien sind hier die Mechanismen der möglichen Kraft- und Verformungsübertragung zwischen den Dämmplatten zu bestimmen.

- Durchführung von Kombiversuchen unter Variation der Versagenslasten / Ziellasten

Für die Erweiterung der Kenntnisse über die "Ausnutzung" der Einzelfestigkeiten in Form von Interaktionsdiagrammen zum Versagen unter kombinierter Beanspruchung sind Kombiversuche in größerer Bandbreite der "Bruchlastpaare" (d.h. unter Variation der Neigung der resultierenden Schrägzugkräfte) durchzuführen.

Aufgrund der im WDVS und im Wärmedämmstoff geneigten Spannungstrajektorien wird in Ergänzung zu den Kombiversuchen empfohlen, die Weiterleitung der (z.B. Schrägzug-) Kräfte über den Verbund in die Verklebung und den Untergrund in Einzelversuchen systematisch zu überprüfen (z.B. im Hinblick auf ein mögliches "Abschälen" (vgl. Bild 5)).

Vor dem Hintergrund von Neu- und Weiterentwicklungen für WDVS wird abschließend die Frage zur Diskussion gestellt, ob und inwieweit mit den bislang (für eine Nutzungsdauer von 25 Jahren) angewandten Verfahren die jetzt (für eine Nutzungsdauer von 50 Jahren) zu erwartenden hygrothermischen Einwirkungen ausreichend sicher experimentell simuliert werden können

7. Zusammenfassung

Die Anwendbarkeit eines Wärmedämmverbundsystems (WDVS) ist durch eine *allgemeine Bauartgenehmigung (aBG)* oder mit einer *europäischen technischen Bewertung (ETA)* unter Berücksichtigung der Vorgaben der Musterverwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen – MVV TB [1] nachzuweisen. Grundlage ist u. a. eine ausreichende Standsicherheit und Dauerhaftigkeit unter Eigenlasten, Windlasten und hygrothermischen Einwirkungen. Die diesbezüglich erforderlichen Untersuchungen werden – mit notwendigen Ergänzungen – auf Basis der EOTA-Leitlinie ETAG 004 [2] durchgeführt. Die abschließende Bewertung im Zulassungsverfahren (*aBG* bzw. *abZ*) erfolgt aufgrund von jahrzehntelangen Erfahrungen unter der Annahme von vereinfachten Tragmodellen mit dem konservativen (und erfolgreichen) Ansatz von globalen Sicherheitsbeiwerten. Für die Anpassung an das im Bauwesen gebräuchliche semiprobabilistische Nachweisverfahren müssen nunmehr jedoch Teilsicherheitsbeiwerte für den Widerstand unter den genannten Einwirkungen bestimmt werden.

Mit diesem Forschungsvorhaben sollten Grundlagen für die qualitative und quantitative Festlegung der Teilsicherheitsbeiwerte für geklebte WDVS auf mineralischen Untergründen erarbeitet werden. In einem ersten Arbeitsschritt erfolgte die Auswertung der Daten, die von den Sachverständigen Dr.-Ing. Heribert Oberhaus (Sachverständigenbüro Bauforschung Oberhaus) und Dr.-Ing. Mathias Reuschel (Sahlmann & Partner GbR) dankenswerterweise zur Verfügung gestellt wurden. In die Auswertung wurden weitere Erkenntnisse aus den Zulassungsverfahren für WDVS einbezogen.

Im Ergebnis ist zunächst festzustellen, dass der Umfang der vorliegenden Daten zu gering (und der Inhalt z.T. auch zu widersprüchlich) ist, um auf dieser Basis ein Modell zur realitätsgerechten Simulation des Tragverhaltens von geklebten WDVS in aktueller Ausführung (mit z.B. MW-Lamellen) zu erstellen. Mit einem vereinfachten (FEM-) "Vor-Modell" konnten jedoch erste kritische Bereiche (wie die mögliche Trennung der Dämmplatten im Bereich der Stoßfugen oder die erhebliche Beanspruchung des WDVS senkrecht zur Putzschicht unter hygrothermischer Einwirkung) identifiziert werden. Eine Darstellung dieses Vor-Modells und der – für eine präzise Modellierung – fehlenden bzw. kritischen Parameter ist den Kapiteln 4 und 5 dieses Berichts zu entnehmen.

Da aktuell kein exaktes Modell für das Tragverhalten entwickelt werden kann, können auch die den Widerstand kennzeichnenden Einflussparameter nicht ausreichend genau und sicher beschrieben werden. Damit wird zwar die abschließende Definition von Teilsicherheitsbeiwerten im ursprünglichen Ansatz unmöglich, auf der Grundlage der derzeitigen Erkenntnisse können jedoch Empfehlungen für die weitere Diskussion des Sicherheitskonzeptes formuliert

werden. Im Rahmen dieses Sicherheitskonzeptes werden die Bemessungswerte für den Widerstand von WDVS unter Ansatz des Produktes von Teilsicherheitsbeiwerten ermittelt. Mit diesen einzelnen Teilsicherheitsbeiwerten $\gamma_{M,i}$ sind die folgenden Einflussparameter zu erfassen:

- $\gamma_{M,1}$ für die Streuung der Festigkeit
- $\gamma_{M,2}$ für die Festigkeitsminderung durch Alterung infolge von klimatischen Einwirkungen
- $\gamma_{M,3}$ für die direkte Festigkeitsminderung bei klimatischer Einwirkung
- $\gamma_{M,4}$ für die Festigkeitsminderung infolge von Dauerlast-Einwirkungen
- $\gamma_{M,5}$ für mögliche Ungenauigkeiten in der Ausführung vor Ort
- $\gamma_{M,6}$ für mögliche Ungenauigkeiten in der theoretischen Modellbildung

Zusammenfassende Empfehlungen zur Festlegung der Teilsicherheitsbeiwerte und zur diesbezüglichen Diskussion der Prüfverfahren sind dem Kapitel 6.1 zu entnehmen.

Die für die Entwicklung eines geschlossenen Modells zur Simulation des Tragverhaltens und zur Prognose der Standsicherheit und Dauerhaftigkeit von geklebten WDVS erforderlichen experimentellen Untersuchungen können abschließend wie folgt zusammengefasst werden:

- Bestimmung der Isotropie – Anisotropie der Dämmplatten hinsichtlich der Festigkeiten und Dehnungen sowie Ermittlung der Streuung zwischen und in den Dämmplatten.
- Untersuchung des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens der Putzschicht unter hygrothermischen Einwirkungen bei Ansatz von Relaxation, Verbundwirkung und Rissbildungen.
- Untersuchung der Kraft- und Verformungsübertragung in den Dämmplattenstößen unter Ansatz von unterschiedlich geneigten Spannungstrajektorien.
- Durchführung von Kombiversuchen unter Variation der Versagenslasten (Zug- und Querkraft).

Weitere Angaben enthält der Abschnitt 6.2.



Univ.-Prof. Dr.-Ing. Frank U. Vogdt



Dipl.-Ing. Michael Schober

Literatur und verwendete Unterlagen

- [1] DIBt: Musterverwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen (MVV TB), Ausgabe 2019/1 (Mitteilungen des DIBt 15.01.2020)
- [2] EOTA: ETAG 004 (Guideline for European Technical Approval of "External Thermal Insulation Composite Systems (ETICS) with Rendering" – Leitlinie für Europäische Technische Zulassungen für "Außenseitige Wärmedämm-Verbundsysteme mit Putzschicht"), Ausgabe Februar 2013
- [3] IfBt: Kunstharzbeschichtete Wärmedämmverbundsysteme (Mitteilungen des IfBt 4/1980)
- [4] IfBt: Zur Standsicherheit von Wärmedämmverbundsystemen mit Mineralfaser-Dämmstoffen und mineralischem Putz (Mitteilungen des IfBt 6/1984)
- [5] IfBt: Zum Nachweis der Standsicherheit von Wärmedämmverbundsystemen mit Mineralfaser-Dämmstoffen und mineralischem Putz (Mitteilungen des IfBt 4/1990)
- [6] Bauproduktenrichtlinie – BPR (Richtlinie 89/106/EWG zur Angleichung der Rechts- und Verwaltungsvorschriften der Mitgliedstaaten über Bauprodukte), 21.12.1988
- [7] Bauproduktengesetz – BauPG, 10.08.1992
- [8] DIBt: Bauregelliste A, Bauregelliste B und Liste C, (letzte) Ausgabe 2015/2 mit Änderungen 2016/1 und 2016/2 (Mitteilungen des DIBt 06.10.2015, 10.10.2016 und 22.12.2016)
- [9] DIBt: Teil II der Liste der Technischen Baubestimmungen, (letzte) Ausgabe März 2014 (Mitteilungen des DIBt 13.11.2014)
- [10] DIBt: Aufhebung der Bauregellisten A und B und Liste C (Ausgabe 2015/2 mit Änderungen 2016/1 und 2016/2), 29.03.2019 (Mitteilungen des DIBt 1/2019)
- [11] Bauproduktenverordnung – BauPVo (Verordnung (EU) Nr. 305/2011 zur Festlegung harmonisierter Bedingungen für die Vermarktung von Bauprodukten und zur Aufhebung der Richtlinie 89/106/EWG), 09.03.2011
- [12] prEN 17237:2019: Wärmedämmstoffe für Gebäude – Außenseitige Wärmedämmverbundsysteme mit Putzoberfläche (WDVS) – Spezifikation
- [13] DIBt / SVA "WDVS auf mineralischen Untergründen" (B2): Internes Prüfprogramm für WDVS mit angeklebter Bekleidung, Diskussion und Empfehlungen (41. Sitzung)

- [14] Ingenieurgesellschaft Bauforschung Oberhaus mbH: Gutachtliche Stellungnahme 13.5.010 – Nachweis der Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit der Wärmedämm-Verbundsysteme (WDVS) mit Klebung und Dübelung.
Hier: Grundlagen der Beurteilung der Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit des WDVS – Anforderungen, Nachweisführung und Sicherheitsbeiwerte – Vorschlag einer Nachweisstruktur, 16.10.2013
- [15] Melanie Krause: Ein neues Konzept zum Nachweis der Standsicherheit von Dübelbefestigungen in Wärmedämm-Verbundsystemen (WDVS) (in: Technische Universität Dortmund – Schriftenreihe Betonbau Heft 3/2010 – Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Reinhard Maurer)
- [16] Ingenieurgesellschaft Bauforschung Oberhaus mbH: Gutachtliche Stellungnahme 10.2.701 – Nachweis der Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit der Wärmedämm-Verbundsysteme (WDVS) mit Mineralwolle-Lamellendämmplatten der Dicken 200 bis 400 mm, 24.09.2014
- [17] Sahlmann & Partner GbR: Gutachtliche Stellungnahme G 160608_3 – Geklebttes WDVS mit Mineralwolle-Platten im Vergleich zum geklebten WDVS mit Lamelle, 07.06.2018
- [18] DIN EN 1990:2010-12: Eurocode – Grundlagen der Tragwerksplanung (mit DIN EN 1990/NA:2010-12 und DIN EN 1990/NA/A1:2012-08)
- [19] DIN EN 1607:2013-05: Wärmedämmstoffe für das Bauwesen – Bestimmung der Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene
- [20] DIN EN 16383:2017-01 Wärmedämmstoffe für das Bauwesen – Bestimmung des hygrothermischen Verhaltens von außenseitigen Wärmedämm-Verbundsystemen mit Putzen (WDVS)

Anlage zum Forschungsbericht

a) Einzelversuche an MW-Lamellen (d = 200 mm und d = 400 mm)

- **Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene**
- **Schub- / Scherfestigkeit**

Querzugfestigkeit					
	Werte	nv	log nv		
Prüfinstitut C	Normalklima				
	Mittelwert		105	[kN/m ²]	
	Standardabweichung		29	[kN/m ²]	
	5 % Quantile	[W = 0,75]	42	50	[kN/m ²]
		[W = 0,90]	25	42	[kN/m ²]
	Wasserdampflagerung				
	5 d DL / 7 d FL / GK RT				
	Mittelwert		60	[kN/m ²]	
	Standardabweichung		5	[kN/m ²]	
	Abminderung		0,57		
	5 d DL / 28 d FL / GK RT				
	Mittelwert		77	[kN/m ²]	
	Standardabweichung		15	[kN/m ²]	
	Abminderung		0,73		
	5 d DL / 28 d FL / 2 h RT				
Mittelwert		56	[kN/m ²]		
Standardabweichung		5	[kN/m ²]		
Abminderung		0,54			

Tab. 1: MW-Lamellen X, Dicke d = 200 mm
 Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene nach Lagerung bei Normalklima und nach Feuchtelagerung (Wasserdampf)

Querzugfestigkeit					
Prüfinstitut A		Werte	nv	log nv	
	Mittelwert		109	2,04	[kN/m ²]
	Standardabweichung		12	0,05	[kN/m ²]
	5 % Quantile	[W = 0,75]	83	86	[kN/m ²]
		[W = 0,90]	76	80	[kN/m ²]
Prüfinstitut B		Werte	nv	log nv	
	Mittelwert		118	2,07	[kN/m ²]
	Standardabweichung		20	0,08	[kN/m ²]
	5 % Quantile	[W = 0,75]	69	73	[kN/m ²]
		[W = 0,90]	51	62	[kN/m ²]
Prüfinstitut C		Werte	nv	log nv	
	Mittelwert		105	2,01	[kN/m ²]
	Standardabweichung		29	0,14	[kN/m ²]
	5 % Quantile	[W = 0,75]	42	50	[kN/m ²]
		[W = 0,90]	25	42	[kN/m ²]
Gesamtheit		Werte	nv	log nv	
	Mittelwert		110	2,03	[kN/m ²]
	Standardabweichung		21	0,10	[kN/m ²]
	5 % Quantile	[W = 0,75]	69	70	[kN/m ²]
		[W = 0,90]	63	66	[kN/m ²]

 Tab. 2: MW-Lamellen X, Dicke $d = 200$ mm

Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene nach Normallagerung im Vergleich zwischen den Prüfinstituten

Querzugfestigkeit					
	Werte	nv	log nv		
Prüfinstitut B	Normalklima				
	Mittelwert		98	[kN/m ²]	
	Standardabweichung		14	[kN/m ²]	
	5 % Quantile	[W = 0,75]	64	69	[kN/m ²]
		[W = 0,90]	51	60	[kN/m ²]
	Wasserdampflagerung				
	5 d DL / 7 d FL / GK RT				
	Mittelwert		68	[kN/m ²]	
	Standardabweichung		9	[kN/m ²]	
	Abminderung		0,69		
	5 d DL / 28 d FL / GK RT				
	Mittelwert		66	[kN/m ²]	
	Standardabweichung		8	[kN/m ²]	
	Abminderung		0,67		
	5 d DL / 28 d FL / 2 h RT				
Mittelwert		69	[kN/m ²]		
Standardabweichung		17	[kN/m ²]		
Abminderung		0,70			

Tab. 3: MW-Lamellen Y, Dicke d = 200 mm

Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene nach Lagerung bei Normalklima und nach Feuchtelagerung (Wasserdampf)

Querzugfestigkeit					
	Werte	nv	log nv		
Prüfinstitut A	Normalklima				
	Mittelwert		114	[kN/m ²]	
	Standardabweichung		14	[kN/m ²]	
	5 % Quantile	[W = 0,75]	83	86	[kN/m ²]
		[W = 0,90]	75	80	[kN/m ²]
	Wasserdampflagerung				
	5 d DL / 7 d FL / GK RT				
	Mittelwert		86	[kN/m ²]	
	Standardabweichung		15	[kN/m ²]	
	Abminderung		0,76		
	5 d DL / 28 d FL / GK RT				
	Mittelwert		79	[kN/m ²]	
	Standardabweichung		32	[kN/m ²]	
	Abminderung		0,70		
	5 d DL / 28 d FL / 2 h RT				
Mittelwert		56	[kN/m ²]		
Standardabweichung		11	[kN/m ²]		
Abminderung		0,49			

Tab. 4: MW-Lamellen Z, Dicke d = 200 mm

Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene nach Lagerung bei Normalklima und nach Feuchtelagerung (Wasserdampf)

Querzugfestigkeit					
Prüfinstitut A		Werte	nv	log nv	
	Mittelwert		114	2,05	[kN/m ²]
	Standardabweichung		14	0,05	[kN/m ²]
	5 % Quantile	[W = 0,75]	83	86	[kN/m ²]
		[W = 0,90]	75	80	[kN/m ²]
Prüfinstitut B		Werte	nv	log nv	
	Mittelwert		105	2,02	[kN/m ²]
	Standardabweichung		12	0,05	[kN/m ²]
	5 % Quantile	[W = 0,75]	76	79	[kN/m ²]
		[W = 0,90]	64	71	[kN/m ²]
Gesamtheit		Werte	nv	log nv	
	Mittelwert		111	2,04	[kN/m ²]
	Standardabweichung		14	0,05	[kN/m ²]
	5 % Quantile	[W = 0,75]	83	86	[kN/m ²]
		[W = 0,90]	78	82	[kN/m ²]

Tab. 5: MW-Lamellen Z, Dicke d = 200 mm

Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene nach Normallagerung im Vergleich zwischen den Prüfinstituten

Querzugfestigkeit					
	Werte	nv	log nv		
Prüfinstitut A	Normalklima				
	Mittelwert	110	[kN/m ²]		
	Standardabweichung	20	[kN/m ²]		
	5 % Quantile	[W = 0,75]	67	73	[kN/m ²]
		[W = 0,90]	55	66	[kN/m ²]
	Wasserdampflagerung				
	5 d DL / 7 d FL / GK RT				
	Mittelwert	58	[kN/m ²]		
	Standardabweichung	10	[kN/m ²]		
	Abminderung	0,53			
	5 d DL / 28 d FL / GK RT				
	Mittelwert	48	[kN/m ²]		
	Standardabweichung	12	[kN/m ²]		
	Abminderung	0,44			
	5 d DL / 28 d FL / 2 h RT				
	Mittelwert	42	[kN/m ²]		
Standardabweichung	10	[kN/m ²]			
Abminderung	0,38				

Tab. 6: MW-Lamellen X, Dicke d = 400 mm

Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene nach Lagerung bei Normalklima und nach Feuchtelagerung (Wasserdampf)

Querzugfestigkeit					
Prüfinstitut C	Werte		nv	log nv	
	Normalklima				
	Mittelwert		98		[kN/m ²]
	Standardabweichung		36		[kN/m ²]
	5 % Quantile	[W = 0,75]	19	41	[kN/m ²]
		[W = 0,90]	-2	33	[kN/m ²]
	Wasserdampflagerung				
	5 d DL / 7 d FL / GK RT				
	Mittelwert		68		[kN/m ²]
	Standardabweichung		9		[kN/m ²]
	Abminderung		0,70		
	5 d DL / 28 d FL / GK RT				
	Mittelwert		78		[kN/m ²]
	Standardabweichung		12		[kN/m ²]
	Abminderung		0,79		
	5 d DL / 28 d FL / 2 h RT				
	Mittelwert		47		[kN/m ²]
	Standardabweichung		11		[kN/m ²]
	Abminderung		0,48		

Tab. 7: MW-Lamellen X, Dicke d = 400 mm

Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene nach Lagerung bei Normalklima und nach Feuchtelagerung (Wasserdampf)

Querzugfestigkeit					
Prüfinstitut A		Werte	nv	log nv	
	Mittelwert		110	2,04	[kN/m ²]
	Standardabweichung		20	0,08	[kN/m ²]
	5 % Quantile	[W = 0,75]	67	73	[kN/m ²]
		[W = 0,90]	55	66	[kN/m ²]
Prüfinstitut B		Werte	nv	log nv	
	Mittelwert		82	1,90	[kN/m ²]
	Standardabweichung		23	0,15	[kN/m ²]
	5 % Quantile	[W = 0,75]	24	33	[kN/m ²]
		[W = 0,90]	2	24	[kN/m ²]
Prüfinstitut C		Werte	nv	log nv	
	Mittelwert		98	1,96	[kN/m ²]
	Standardabweichung		36	0,16	[kN/m ²]
	5 % Quantile	[W = 0,75]	19	41	[kN/m ²]
		[W = 0,90]	-2	33	[kN/m ²]
Gesamtheit		Werte	nv	log nv	
	Mittelwert		99	1,98	[kN/m ²]
	Standardabweichung		29	0,14	[kN/m ²]
	5 % Quantile	[W = 0,75]	44	51	[kN/m ²]
		[W = 0,90]	36	47	[kN/m ²]

 Tab. 8: MW-Lamellen X, Dicke $d = 400$ mm

Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene nach Normallagerung im Vergleich zwischen den Prüfinstituten

Querzugfestigkeit					
Prüfinstitut B	Werte		nv	log nv	
	Normalklima				
	Mittelwert		108		[kN/m ²]
	Standardabweichung		23		[kN/m ²]
	5 % Quantile	[W = 0,75]	51	62	[kN/m ²]
		[W = 0,90]	30	51	[kN/m ²]
	Wasserdampflagerung				
	5 d DL / 7 d FL / GK RT				
	Mittelwert		44		[kN/m ²]
	Standardabweichung		6		[kN/m ²]
	Abminderung		0,41		
	5 d DL / 28 d FL / GK RT				
	Mittelwert		49		[kN/m ²]
	Standardabweichung		13		[kN/m ²]
	Abminderung		0,45		
	5 d DL / 28 d FL / 2 h RT				
	Mittelwert		45		[kN/m ²]
	Standardabweichung		7		[kN/m ²]
	Abminderung		0,42		

Tab. 9: MW-Lamellen Y, Dicke d = 400 mm

Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene nach Lagerung bei Normalklima und nach Feuchtelagerung (Wasserdampf)

Querzugfestigkeit					
Prüfinstitut A	Werte	nv	log nv		
	Normalklima				
	Mittelwert	108	[kN/m ²]		
	Standardabweichung	19	[kN/m ²]		
	5 % Quantile	[W = 0,75]	67	74	[kN/m ²]
		[W = 0,90]	56	67	[kN/m ²]
	Wasserdampflagerung				
	5 d DL / 7 d FL / GK RT				
	Mittelwert	63	1,78	[kN/m ²]	
	Standardabweichung	19	0,13	[kN/m ²]	
	Abminderung	0,58			
	5 d DL / 28 d FL / GK RT				
	Mittelwert	57	1,75	[kN/m ²]	
	Standardabweichung	11	0,08	[kN/m ²]	
	Abminderung	0,53			
	5 d DL / 28 d FL / 2 h RT				
	Mittelwert	46	1,65	[kN/m ²]	
	Standardabweichung	9	0,09	[kN/m ²]	
	Abminderung	0,42			

Tab. 10: MW-Lamellen Z, Dicke d = 400 mm

Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene nach Lagerung bei Normalklima und nach Feuchtelagerung (Wasserdampf)

Querzugfestigkeit				
	Werte	nv	log nv	
Prüfinstitut A	Mittelwert	108	2,03	[kN/m ²]
	Standardabweichung	19	0,07	[kN/m ²]
	5 % Quantile [W = 0,75]	67	74	[kN/m ²]
	[W = 0,90]	56	67	[kN/m ²]
Prüfinstitut B	Werte	nv	log nv	
	Mittelwert	83	1,89	[kN/m ²]
	Standardabweichung	34	0,18	[kN/m ²]
	5 % Quantile [W = 0,75]	0	27	[kN/m ²]
	[W = 0,90]	-32	18	[kN/m ²]
Gesamtheit	Werte	nv	log nv	
	Mittelwert	98	1,97	[kN/m ²]
	Standardabweichung	27	0,14	[kN/m ²]
	5 % Quantile [W = 0,75]	43	49	[kN/m ²]
	[W = 0,90]	32	43	[kN/m ²]

Tab. 11: MW-Lamellen Z, Dicke d = 400 mm

Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene nach Normallagerung im Vergleich zwischen den Prüfinstituten

		Schubfestigkeit		Schubmodul	
Prüfinstitut C	L 60 mm	Mittelwert	22,16	579	[kN/m ²]
		Standardabweichung	3,47	143	[kN/m ²]
	Q 60 mm	Mittelwert	30,81	905	[kN/m ²]
		Standardabweichung	3,18	38	[kN/m ²]

Tab. 12: MW-Lamellen X, Dicke d = 200 mm
Schub-/Scherfestigkeit nach Lagerung bei Normalklima

		Schubfestigkeit		Schubmodul	
Prüfinstitut B	L 200 mm	Mittelwert	21,68	1.122	[kN/m ²]
		Standardabweichung	2,09	58	[kN/m ²]
	Q 200 mm	Mittelwert	19,90	1.162	[kN/m ²]
		Standardabweichung	1,08	144	[kN/m ²]

Tab. 13: MW-Lamellen Y, Dicke d = 200 mm
Schub-/Scherfestigkeit nach Lagerung bei Normalklima

		Schubfestigkeit		Schubmodul	
Prüfinstitut A	H 60 mm	Mittelwert	38,16	1.719	[kN/m ²]
		Standardabweichung	2,45	97	[kN/m ²]
	V 60 mm	Mittelwert	34,50	1.412	[kN/m ²]
		Standardabweichung	2,29	325	[kN/m ²]
Prüfinstitut C	L 60 mm	Mittelwert	22,76	626	[kN/m ²]
		Standardabweichung	3,40	129	[kN/m ²]
	Q 60 mm	Mittelwert	28,69	952	[kN/m ²]
		Standardabweichung	1,61	121	[kN/m ²]

Tab. 14: MW-Lamellen X, Dicke d = 400 mm
Schub-/Scherfestigkeit nach Lagerung bei Normalklima

		Schubfestigkeit		Schubmodul	
Prüfinstitut B	L 60 mm	Mittelwert	37,06	1.695	[kN/m ²]
		Standardabweichung	3,66	132	[kN/m ²]
	Q 60 mm	Mittelwert	29,86	1.394	[kN/m ²]
		Standardabweichung	0,40	70	[kN/m ²]
	L 400 mm	Mittelwert	12,32	801	[kN/m ²]
		Standardabweichung	3,36	107	[kN/m ²]
	Q 400 mm	Mittelwert	13,92	1.014	[kN/m ²]
		Standardabweichung	3,67	174	[kN/m ²]

Tab. 15: MW-Lamellen Y, Dicke d = 400 mm
Schub-/Scherfestigkeit nach Lagerung bei Normalklima

		Schubfestigkeit		Schubmodul	
Prüfinstitut A	H 60 mm	Mittelwert	27,29	1.070	[kN/m ²]
		Standardabweichung	3,56	192	[kN/m ²]
	V 60 mm	Mittelwert	28,69	1.296	[kN/m ²]
		Standardabweichung	4,56	301	[kN/m ²]

Tab. 16: MW-Lamellen Z, Dicke d = 400 mm
Schub-/Scherfestigkeit nach Lagerung bei Normalklima

Anlage zum Forschungsbericht

b) Einzelversuche an MW-Lamellen und MW-Platten (jeweils $d = 200$ mm)

- **Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene**
- **Schub- / Scherfestigkeit**

Querzugfestigkeit				
	Werte	nv	log nv	
Prüfinstitut B	Normalklima			
	Mittelwert		94,6	1,97 [kN/m ²]
	Standardabweichung		10,5	0,05 [kN/m ²]
	5 % Quantile	[W = 0,75]	68,7	70,0 [kN/m ²]
		[W = 0,90]	58,9	62,5 [kN/m ²]
	28 d (70 °C 95 % r.L.) / GK RT			
	Mittelwert		48,3	[kN/m ²]
	Standardabweichung		3,5	[kN/m ²]
	Abminderung		0,51	
	Hygroth. Beanspruchung 80 WRZ + 5 WKZ (Putzsystem 1)			
	Mittelwert		85,8	[kN/m ²]
	Standardabweichung		13,7	[kN/m ²]
	Abminderung		0,91	
	Hygroth. Beanspruchung 80 WRZ + 5 WKZ (Putzsystem 2)			
	Mittelwert		67,9	[kN/m ²]
Standardabweichung		15,1	[kN/m ²]	
Abminderung		0,72		

Tab. 17: MW-Lamellen W, Dicke d = 200 mm

Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene nach Lagerung bei Normalklima und nach klimatischer Vorbeanspruchung

Querzugfestigkeit					
	Werte	nv	log nv		
Prüfinstitut B	Normalklima				
	Mittelwert		9,4	0,97	[kN/m ²]
	Standardabweichung		0,9	0,04	[kN/m ²]
	5 % Quantile	[W = 0,75]	7,2	7,5	[kN/m ²]
		[W = 0,90]	6,4	6,9	[kN/m ²]
	28 d (70 °C 95 % r.L.) / GK RT				
	Mittelwert		7,0		[kN/m ²]
	Standardabweichung		0,5		[kN/m ²]
	Abminderung		0,74		
	Hygroth. Beanspruchung 80 WRZ + 5 WKZ (Putzsystem 1)				
	Mittelwert		8,9		[kN/m ²]
	Standardabweichung		0,4		[kN/m ²]
	Abminderung		0,94		
	Hygroth. Beanspruchung 80 WRZ + 5 WKZ (Putzsystem 2)				
	Mittelwert		8,4		[kN/m ²]
Standardabweichung		0,9		[kN/m ²]	
Abminderung		0,89			

Tab. 18: MW-Platten U, Dicke d = 200 mm

Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene nach Lagerung bei Normalklima und nach klimatischer Vorbeanspruchung

		Schubfestigkeit		Schubmodul	
Prüfinstitut B	Normalklima				
	H 60 mm	Mittelwert	25,2	945	[kN/m ²]
		Standardabweichung	1,8	57	[kN/m ²]
	V 60 mm	Mittelwert	36,3	1.834	[kN/m ²]
		Standardabweichung	2,6	98	[kN/m ²]
	Feuchtelagerung 28 d (70 °C 95 % r.L.) / GK RT				
	H 60 mm	Mittelwert	14,2	806	[kN/m ²]
		Standardabweichung	1,5	114	[kN/m ²]
		Abminderung	0,56	0,85	
	V 60 mm	Mittelwert	15,7	1.416	[kN/m ²]
		Standardabweichung	5,9	176	[kN/m ²]
		Abminderung	0,43	0,77	
	Hygroth. Beanspruchung 80 WRZ + 5 WKZ (P 1)				
	H 60 mm	Mittelwert	22,6	886	[kN/m ²]
		Standardabweichung	1,1	39	[kN/m ²]
		Abminderung	0,90	0,94	
	V 60 mm	Mittelwert	27,0	1.526	[kN/m ²]
		Standardabweichung	2,0	91	[kN/m ²]
		Abminderung	0,74	0,83	
	Hygroth. Beanspruchung 80 WRZ + 5 WKZ (P 2)				
H 60 mm	Mittelwert	16,3	784	[kN/m ²]	
	Standardabweichung	0,6	40	[kN/m ²]	
	Abminderung	0,65	0,83		
V 60 mm	Mittelwert	19,7	1.195	[kN/m ²]	
	Standardabweichung	3,6	274	[kN/m ²]	
	Abminderung	0,54	0,65		

Tab. 19: MW-Lamellen W, Dicke d = 200 mm

Schub- / Scherfestigkeit nach Lagerung bei Normalklima und nach klimatischer Vorbeanspruchung

		Schubfestigkeit	Schubmodul		
Prüfinstitut B	Normalklima				
	H 60 mm	Mittelwert	15,1	459	[kN/m ²]
		Standardabweichung	0,0	8	[kN/m ²]
	V 60 mm	Mittelwert	15,2	495	[kN/m ²]
		Standardabweichung	0,9	26	[kN/m ²]
	Feuchtelagerung 28 d (70 °C 95 % r.L.) / GK RT				
	H 60 mm	Mittelwert	14,0	488	[kN/m ²]
		Standardabweichung	1,2	53	[kN/m ²]
		Abminderung	0,93	1,06	
	V 60 mm	Mittelwert	14,7	601	[kN/m ²]
		Standardabweichung	0,5	52	[kN/m ²]
		Abminderung	0,97	1,21	
	Hygroth. Beanspruchung 80 WRZ + 5 WKZ (P 1)				
	H 60 mm	Mittelwert	14,2	394	[kN/m ²]
		Standardabweichung	1,1	30	[kN/m ²]
		Abminderung	0,94	0,86	
	V 60 mm	Mittelwert	16,6	595	[kN/m ²]
		Standardabweichung	1,6	72	[kN/m ²]
		Abminderung	1,09	1,20	
	Hygroth. Beanspruchung 80 WRZ + 5 WKZ (P 2)				
H 60 mm	Mittelwert	12,5	353	[kN/m ²]	
	Standardabweichung	0,4	8	[kN/m ²]	
	Abminderung	0,83	0,77		
V 60 mm	Mittelwert	14,5	486	[kN/m ²]	
	Standardabweichung	0,9	46	[kN/m ²]	
	Abminderung	0,95	0,98		

Tab. 20: MW-Platten U, Dicke d = 200 mm

Schub- / Scherfestigkeit nach Lagerung bei Normalklima und nach klimatischer Vorbeanspruchung

Anlage zum Forschungsbericht

- c) Bauteilversuche an MW-Lamellen ($d = 200 \text{ mm}$ und $d = 400 \text{ mm}$)**
- **Schubversuche**
 - **Kombiversuche**
 - **Versuche unter hygrothermischer Beanspruchung**

Schubtragverhalten			
Prüfinstitut A	200 mm	Tragfähigkeit	11,27 [kN/m ²]
		Bettungssteifigkeit	0,0031 [N/mm ³]
	400 mm	Tragfähigkeit	7,36 [kN/m ²]
		Bettungssteifigkeit	0,0014 [N/mm ³]
Prüfinstitut B	200 mm	Tragfähigkeit	13,96 [kN/m ²]
		Bettungssteifigkeit	0,0065 [N/mm ³]
	400 mm	Tragfähigkeit	5,11 [kN/m ²]
		Bettungssteifigkeit	0,0018 [N/mm ³]
Prüfinstitut C	200 mm	Tragfähigkeit	14,65 [kN/m ²]
		Bettungssteifigkeit	0,0038 [N/mm ³]
	400 mm	Tragfähigkeit	7,08 [kN/m ²]
		Bettungssteifigkeit	0,0008 [N/mm ³]
Gesamtheit	200 mm	Schubtragfähigkeit	
		- Mittelwert	13,29 [kN/m ²]
		- Standardabweichung	1,79 [kN/m ²]
		Bettungssteifigkeit	
	- Mittelwert	0,0045 [N/mm ³]	
	- Standardabweichung	0,0018 [N/mm ³]	
	400 mm	Schubtragfähigkeit	
		- Mittelwert	6,52 [kN/m ²]
- Standardabweichung		1,23 [kN/m ²]	
Bettungssteifigkeit			
- Mittelwert	0,0013 [N/mm ³]		
- Standardabweichung	0,0005 [N/mm ³]		

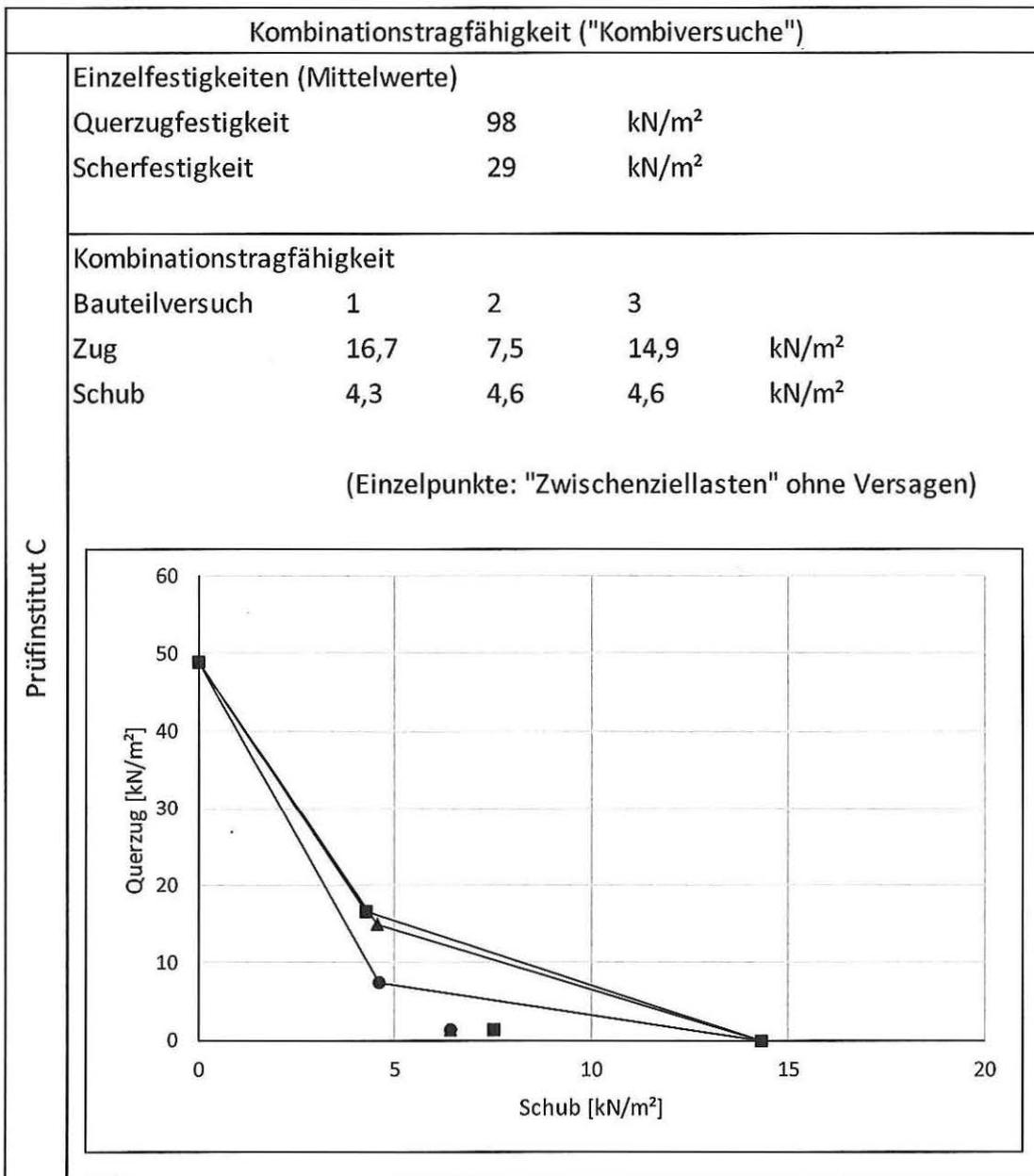
Tab. 21: MW-Lamellen X, d = 200 mm und d = 400 mm
 Schubtragverhalten im Bauteilversuch
 - Klebeflächenanteil 50 %

Schubtragverhalten			
Prüfinstitut A	200 mm	Tragfähigkeit	8,78 [kN/m ²]
		Bettungssteifigkeit	0,0036 [N/mm ³]
	400 mm	Tragfähigkeit	8,00 [kN/m ²]
		Bettungssteifigkeit	0,0015 [N/mm ³]
Prüfinstitut B	200 mm	Tragfähigkeit	12,36 [kN/m ²]
		Bettungssteifigkeit	0,0070 [N/mm ³]
	400 mm	Tragfähigkeit	8,71 [kN/m ²]
		Bettungssteifigkeit	0,0012 [N/mm ³]
Prüfinstitut C	200 mm	Tragfähigkeit	16,67 [kN/m ²]
		Bettungssteifigkeit	0,0025 [N/mm ³]
	400 mm	Tragfähigkeit	9,40 [kN/m ²]
		Bettungssteifigkeit	0,0006 [N/mm ³]
Gesamtheit	200 mm	Schubtragfähigkeit	
		- Mittelwert	12,60 [kN/m ²]
		- Standardabweichung	3,95 [kN/m ²]
		Bettungssteifigkeit	
	- Mittelwert	0,0044 [N/mm ³]	
	- Standardabweichung	0,0023 [N/mm ³]	
	400 mm	Schubtragfähigkeit	
		- Mittelwert	8,70 [kN/m ²]
- Standardabweichung		0,70 [kN/m ²]	
Bettungssteifigkeit			
- Mittelwert	0,0011 [N/mm ³]		
- Standardabweichung	0,0005 [N/mm ³]		

Tab. 22: MW-Lamellen Y, d = 200 mm und d = 400 mm
 Schubtragverhalten im Bauteilversuch
 - Klebeflächenanteil 50 %

Schubtragverhalten			
Prüfinstitut A	200 mm	Tragfähigkeit	12,36 [kN/m ²]
		Bettungssteifigkeit	0,0029 [N/mm ³]
	400 mm	Tragfähigkeit	5,59 [kN/m ²]
		Bettungssteifigkeit	0,0010 [N/mm ³]
Prüfinstitut B	200 mm	Tragfähigkeit	15,71 [kN/m ²]
		Bettungssteifigkeit	0,0061 [N/mm ³]
	400 mm	Tragfähigkeit	9,20 [kN/m ²]
		Bettungssteifigkeit	0,0018 [N/mm ³]
Prüfinstitut C	200 mm	Tragfähigkeit	10,80 [kN/m ²]
		Bettungssteifigkeit	0,0026 [N/mm ³]
	400 mm	Tragfähigkeit	8,40 [kN/m ²]
		Bettungssteifigkeit	0,0014 [N/mm ³]
Gesamtheit	200 mm	Schubtragfähigkeit	
		- Mittelwert	12,96 [kN/m ²]
		- Standardabweichung	2,51 [kN/m ²]
		Bettungssteifigkeit	
	- Mittelwert	0,0039 [N/mm ³]	
	- Standardabweichung	0,0019 [N/mm ³]	
	400 mm	Schubtragfähigkeit	
		- Mittelwert	7,73 [kN/m ²]
- Standardabweichung		1,90 [kN/m ²]	
Bettungssteifigkeit			
- Mittelwert	0,0014 [N/mm ³]		
- Standardabweichung	0,0004 [N/mm ³]		

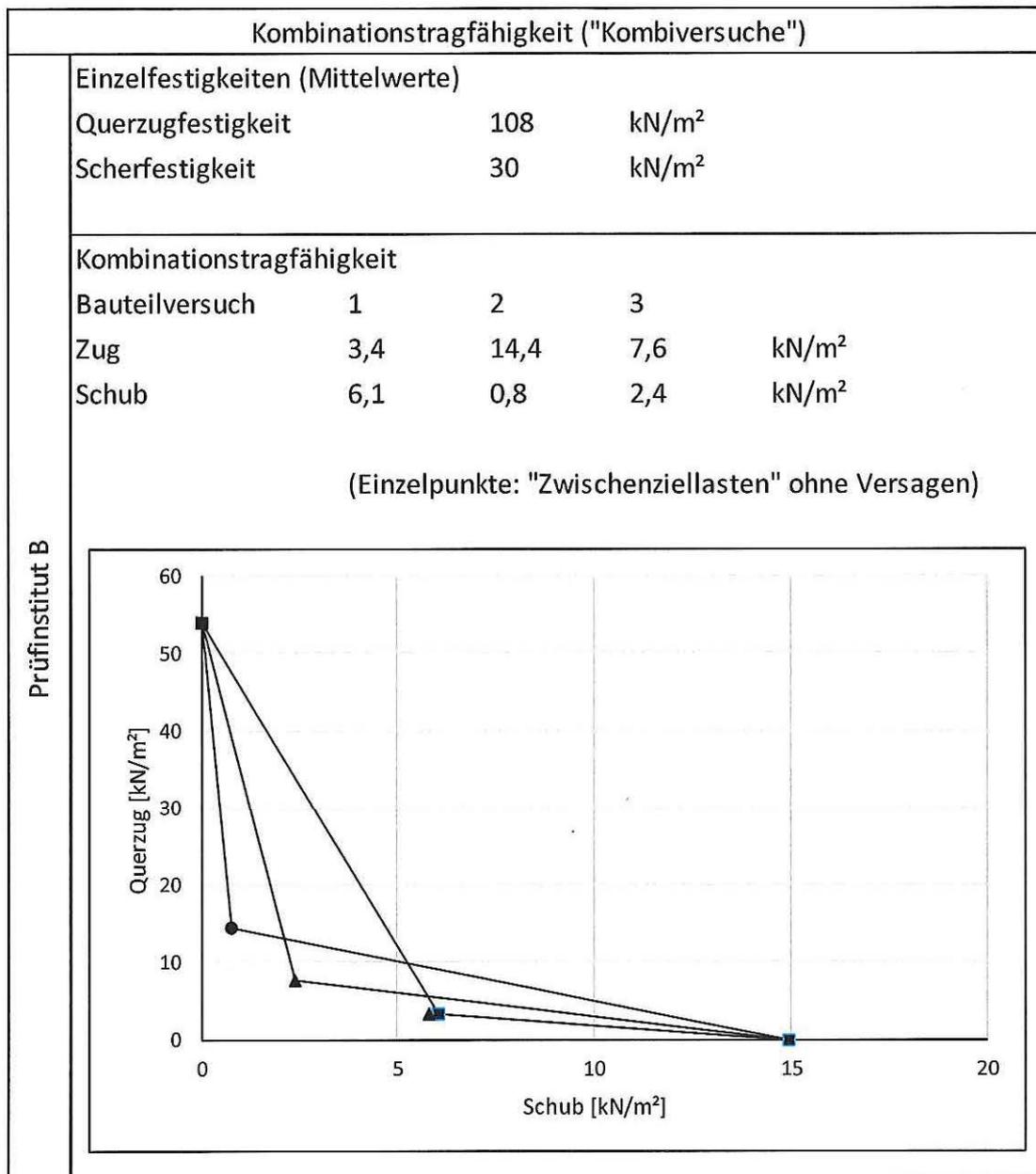
Tab. 23: MW-Lamellen Z, d = 200 mm und d = 400 mm
 Schubtragverhalten im Bauteilversuch
 - Klebeflächenanteil 50 %



Tab. 24: MW-Lamellen X, d = 400 mm

Kombiversuche

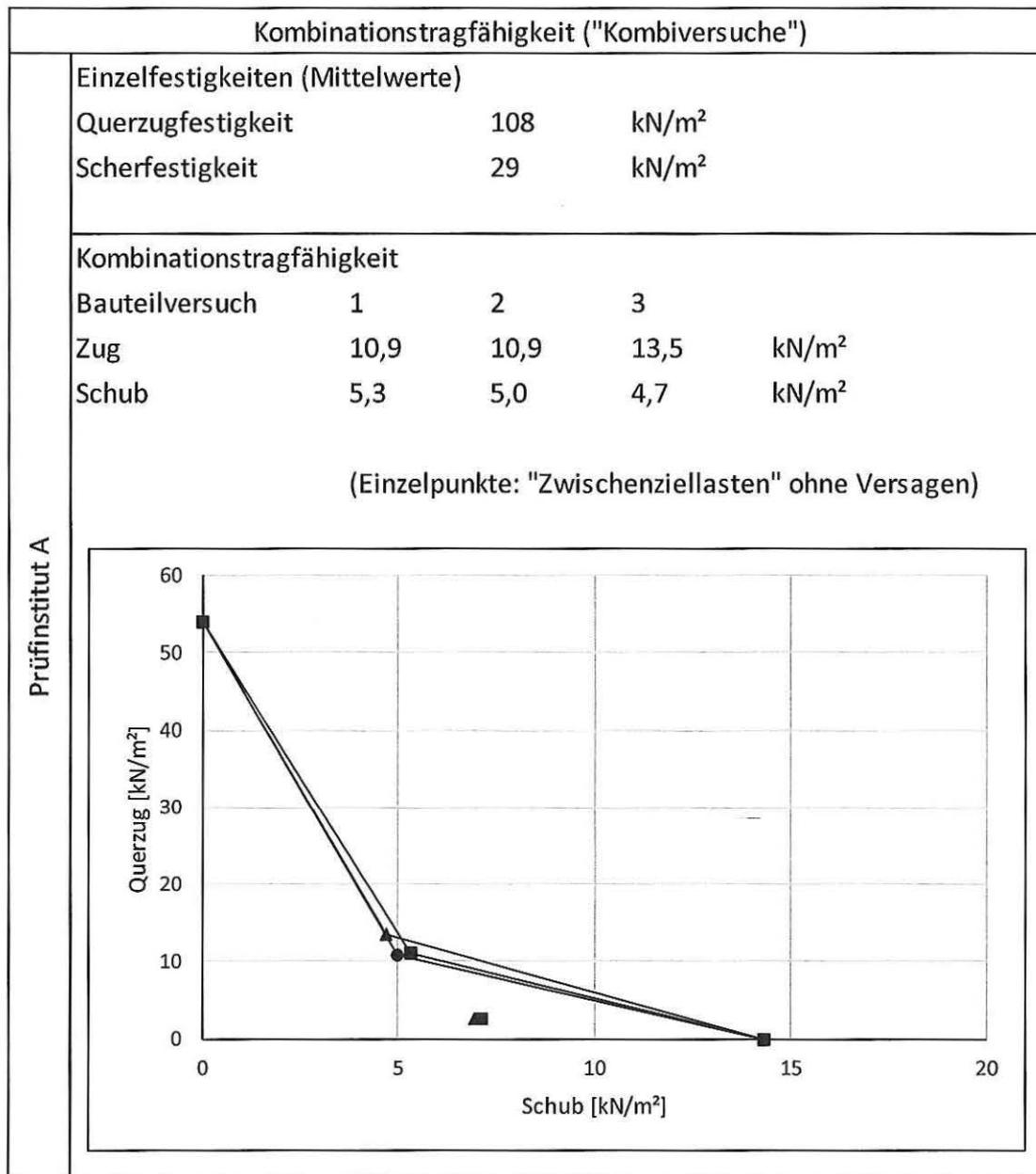
- Klebeflächenanteil 50 %



Tab. 25: MW-Lamellen Y, d = 400 mm

Kombiversuche

- Klebeflächenanteil 50 %



Tab. 26: MW-Lamellen Z, d = 400 mm

Kombiversuche

- Klebeflächenanteil 50 %

Längenänderung unter hygrothermischer Beanspruchung		
MW-Lamellen X d = 400 mm 50 % Verklebung min. Putz	Prüfinstitut A	Messlänge (bewitterte Fläche) 3,4 m
		Verformung ΔL bei $\Delta\Phi$ 1,1 mm 70 K
MW-Lamellen Y d = 400 mm 50 % Verklebung min. Putz	Prüfinstitut B	Messlänge 2,8 m
		Verformung ΔL bei $\Delta\Phi$ 1,5 mm 76 K
MW-Lamellen Z d = 400 mm 50 % Verklebung min. Putz	Prüfinstitut C	Messlänge (bewitterte Fläche) 3,4 m
		Verformung ΔL bei $\Delta\Phi$ 0,9 mm 70 K

Tab. 27: MW-Lamellen d = 400 mm

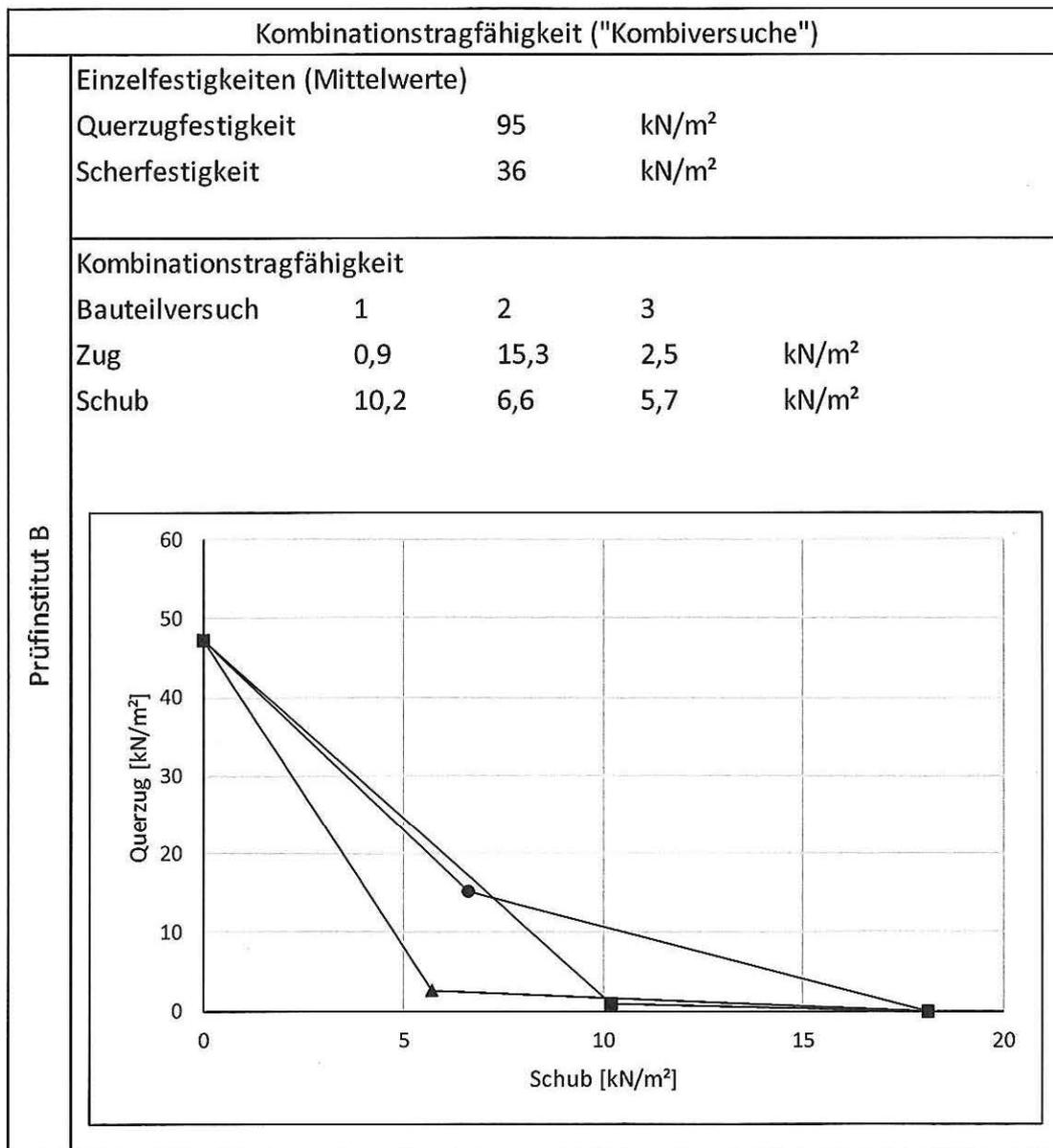
Verformungen in den Bauteilversuchen unter hygrothermischer Beanspruchung
(Kälte- Wärme-Wechselzyklus)

- Messung in Längsrichtung (horizontal) im mittleren / unteren Wandbereich

Anlage zum Forschungsbericht

d) Bauteilversuche an MW-Lamellen und MW-Platten (jeweils $d = 200$ mm)

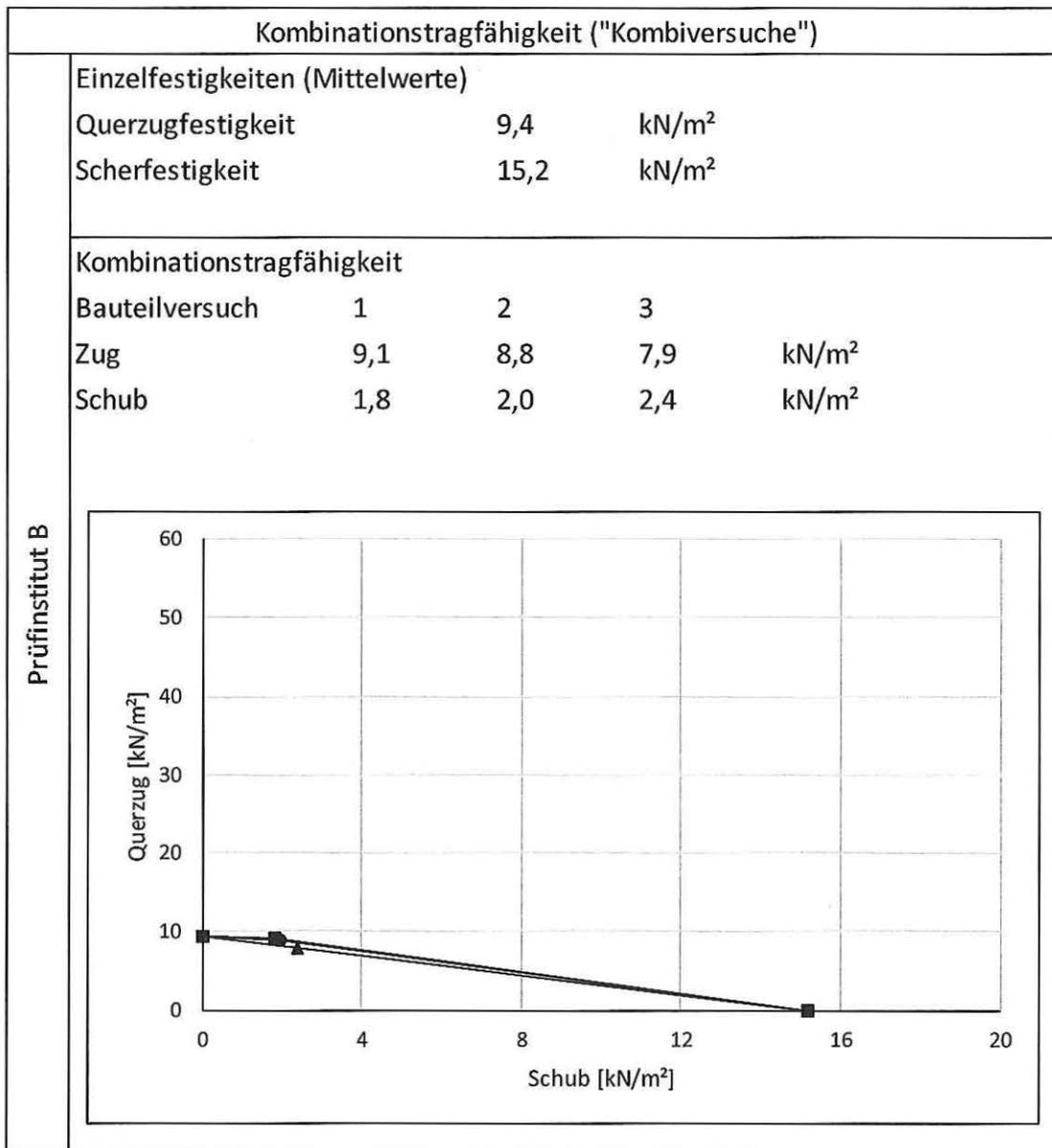
- **Kombiversuche**
- **Versuche unter hygrothermischer Beanspruchung**



Tab. 28: MW-Lamellen W, d = 200 mm

Kombiversuche

- Klebeflächenanteil 50 %



Tab. 29: MW-Platten U, d = 200 mm

Kombiversuche

- Klebeflächenanteil 100 %

Längenänderung unter hygrothermischer Beanspruchung		
MW-Lamellen W d = 200 mm 50 % Verklebung org. Putz	Prüfinstitut B	Messlänge 3,0 m
		Verformung ΔL 2,6 mm bei $\Delta\Phi$ 70 K
MW-Lamellen W d = 200 mm 50 % Verklebung min. Putz		Messlänge 3,0 m
		Verformung ΔL 1,4 mm bei $\Delta\Phi$ 70 K
MW-Platten U d = 200 mm 100 % Verklebung org. Putz		Messlänge 3,0 m
		Verformung ΔL 1,1 mm bei $\Delta\Phi$ 70 K
MW-Platten U d = 200 mm 100 % Verklebung min. Putz		Messlänge 3,0 m
		Verformung ΔL 0,8 mm bei $\Delta\Phi$ 70 K

Tab. 30: MW-Lamellen W, d = 200 mm und MW-Platten U, d = 200 mm

Verformungen in den Bauteilversuchen unter hygrothermischer Beanspruchung
(Kälte- Wärme-Wechselzyklus)

- Messung in Längsrichtung (horizontal)

Anlage zum Forschungsbericht

e) Vergleichsberechnungen

Schubmodul								
			Einzelversuche		Bauteilversuche			
			60 mm	200 mm	400 mm	200 mm	400 mm	
X	200 mm	Prüfinstitut A				620	[kN/m ²]	
		Prüfinstitut B				1.300	[kN/m ²]	
		Prüfinstitut C	905			767	[kN/m ²]	
	400 mm	Prüfinstitut A	1.412				552	[kN/m ²]
		Prüfinstitut B					720	[kN/m ²]
		Prüfinstitut C	952				299	[kN/m ²]
						(667)	[kN/m ²]	
Y	200 mm	Prüfinstitut A				726	[kN/m ²]	
		Prüfinstitut B		1.162		1.400	[kN/m ²]	
		Prüfinstitut C				496	[kN/m ²]	
	400 mm	Prüfinstitut A					612	[kN/m ²]
		Prüfinstitut B	1.394		1.014		480	[kN/m ²]
		Prüfinstitut C					(1.160)	[kN/m ²]
						250	[kN/m ²]	
Z	200 mm	Prüfinstitut A				582	[kN/m ²]	
		Prüfinstitut B				1.220	[kN/m ²]	
		Prüfinstitut C				519	[kN/m ²]	
	400 mm	Prüfinstitut A	1.296				412	[kN/m ²]
							(561)	[kN/m ²]
		Prüfinstitut B					720	[kN/m ²]
						562	[kN/m ²]	

Tab. 31: MW-Lamellen

Schubmodul in Querrichtung in den Einzel- und Bauteilversuchen

- Einzelversuche mit Orientierung Q bzw. V und Zuschnitt d = 60 / 200 / 400 mm
- Bauteilversuche unter Schubbeanspruchung, d = 200 mm und d = 400 mm
- Bauteilversuche unter kombinierter Beanspruchung, d = 400 mm (Klammerwerte)
- Klebeflächenanteil Einzelversuche - 100 % und Bauteilversuche - 50 %

Bettungsziffer für d = 400 mm								
		aus	Einzelversuchen			Bauteilversuchen		
		an	60 mm	200 mm	400 mm	200 mm	400 mm	
X	200 mm	Prüfinstitut A				0,00155	[N/mm ³]	
		Prüfinstitut B				0,00325	[N/mm ³]	
		Prüfinstitut C	0,00113			0,00192	[N/mm ³]	
	400 mm	Prüfinstitut A	0,00176				0,00138	[N/mm ³]
		Prüfinstitut B					0,00180	[N/mm ³]
		Prüfinstitut C	0,00119				0,00075	[N/mm ³]
Y	200 mm	Prüfinstitut A				0,00182	[N/mm ³]	
		Prüfinstitut B		0,00145		0,00350	[N/mm ³]	
		Prüfinstitut C				0,00124	[N/mm ³]	
	400 mm	Prüfinstitut A					0,00153	[N/mm ³]
		Prüfinstitut B	0,00174		0,00127		0,00120	[N/mm ³]
		Prüfinstitut C					0,00063	[N/mm ³]
Z	200 mm	Prüfinstitut A				0,00146	[N/mm ³]	
		Prüfinstitut B				0,00305	[N/mm ³]	
		Prüfinstitut C				0,00130	[N/mm ³]	
	400 mm	Prüfinstitut A	0,00162				0,00103	[N/mm ³]
		Prüfinstitut B					0,00180	[N/mm ³]
		Prüfinstitut C					0,00141	[N/mm ³]

Tab. 32: MW-Lamellen

Aus dem Schubmodul (Tab. 31) berechnete Bettungsziffer für die Dicke d = 400 mm

- Ansatz $c = k \cdot G/d$

$k = 0,5$ für Einzelversuche (Klebeflächenanteil 100 %)

$K = 1,0$ für Bauteilversuche (Klebeflächenanteil 50 %)

Zum Vergleich: Die explizit nach einem Bauteilversuch unter hygrothermischer Einwirkung ermittelten Werte der Bettungsziffer in (Wand-) Längsrichtung liegen im Bereich um $0,0025 \text{ N/mm}^3$

Systemeigenschaften	Dämmstoff	Gx Gy d cx max cx min cy max cy min g' g		
	Unterputz	es,1 min es,1 max $\alpha_{T,1}$ E1,x E1,y E1,eff,S,x E1,eff,S,y E1,eff,T,x E1,eff,T,y d1 g' g		(= E/ 9) (= 0,4 * E für ΔT -)
	Oberputz	es,2 min es,2 max $\alpha_{T,2}$ E2,x E2,y E2,eff,S,x E2,eff,S,y E2,eff,T,x E2,eff,T,y d2 g' g		(= E/ 9) (= 0,4 * E für ΔT -)
	Abmessungen	Lx Ly ax ay		(B) (H) "Bemessungspunkt a"

Tab. 33-1: Berechnungsgang zur Ermittlung der Verformungen unter hygrothermischer Beanspruchung
1. Systemdaten

Beanspruchung	Schwinden UP	$\epsilon_{s,1} \min$ $\epsilon_{s,1} \max$		
	Schwinden OP	$\epsilon_{s,2} \min$ $\epsilon_{s,2} \max$		
	Temp.-Änderung	$\Delta T +$ $\Delta T -$		
	Eigenlast	g		
Zwischenwerte	Schwinden UP	$D_{1,eff,S,x}$ $D_{1,eff,S,y}$ $k_{1,eff,S,x} \max$ $k_{1,eff,S,x} \min$ $k_{1,eff,S,y} \max$ $k_{1,eff,S,y} \min$	$(= d * E_{eff,S})$ $(= v (c / D_{eff,S}))$	
	Schwinden OP	$D_{eff,S,x}$ $D_{eff,S,y}$ $\epsilon_{s,x} \min$ $\epsilon_{s,x} \max$ $\epsilon_{s,y} \min$ $\epsilon_{s,y} \max$ $k_{eff,S,x} \max$ $k_{eff,S,x} \min$ $k_{eff,S,y} \max$ $k_{eff,S,y} \min$	$(= d_1 * E_1 + d_2 * E_{2,eff,S})$ $(= \epsilon_{s \min} * (d_2 * E_{2,eff,S}) / D_{eff,S})$ $(= v (c / D_{eff,S}))$	
	Temp.-Änderung	$D_{eff,T,x}$ $D_{eff,T,y}$ $\alpha_{T,x}$ $\alpha_{T,y}$ $k_{eff,T,x} \max$ $k_{eff,T,x} \min$ $k_{eff,T,y} \max$ $k_{eff,T,y} \min$	$(= d_1 * E_{1,eff,T} + d_2 * E_{2,eff,T})$ $(= (\alpha_{T,1} * d_1 * E_{1,eff,T} + \alpha_{T,2} * d_2 * E_{2,eff,T}) / D_{eff,T})$ $(= v (c / D_{eff,T}))$	$\Delta T -$
		$D_{eff,T,x}$ $D_{eff,T,y}$ $\alpha_{T,x}$ $\alpha_{T,y}$ $k_{eff,T,x} \max$ $k_{eff,T,x} \min$ $k_{eff,T,y} \max$ $k_{eff,T,y} \min$	$(= d_1 * E_1 + d_2 * E_2)$ $(= (\alpha_{T,1} * d_1 * E_1 + \alpha_{T,2} * d_2 * E_2) / D_{eff,T})$ $(= v (c / D_{eff,T}))$	$\Delta T +$

Tab. 33-2: Berechnungsgang zur Ermittlung der Verformungen unter hygrothermischer Beanspruchung

2. Einwirkungen und Zwischenwerte der Systemsteifigkeit

Verformungen	Einzelverformungen		
	Schwinden Unterputz		
	ur,1,S,x min	[mm]	(= $\epsilon_s \cdot v(D/c) \cdot (\sinh(k \cdot a \cdot 1000/2) / \cosh(k \cdot L \cdot 1000/2))$)
	ur,1,S,x max	[mm]	
	ur,1,S,y min	[mm]	
	ur,1,S,y max	[mm]	
	Schwinden Oberputz		
	ur,S,x min	[mm]	(= $\epsilon_s \cdot v(D/c) \cdot (\sinh(k \cdot a \cdot 1000/2) / \cosh(k \cdot L \cdot 1000/2))$)
	ur,S,x max	[mm]	
	ur,S,y min	[mm]	
	ur,S,y max	[mm]	
	Temperaturänderung		
	ur,T,x min	[mm]	(= $\alpha_T \cdot \Delta T \cdot v(D/c) \cdot (\sinh(k \cdot a \cdot 1000/2) / \cosh(k \cdot L \cdot 1000/2))$)
	ur,T,x max	[mm]	
	ur,T,y min	[mm]	
ur,T,y max	[mm]		
Eigenlast			
ur,g,y	[mm]		
Gesamtverformung			
MIN ur,x	[mm]		
MAX ur,x	[mm]		
MIN ur,y	[mm]		
MAX ur,y	[mm]		
MIN ur	[mm]		
MAX ur	[mm]		

Tab. 33-3: Berechnungsgang zur Ermittlung der Verformungen unter hygrothermischer Beanspruchung
 3. Resultierende Verformungen

MW-Lamellen			Putz (UP + OP)			Temp.-Wechsel		System	
d	cx		d	α	E	$\Delta T +$	$\Delta T -$	Länge	$\Delta u_{x,T}$
[mm]	[N/mm ³]		[mm]	[1/K]	[N/mm ²]	[K]	[K]	[m]	[mm]
X	400	0,00075	18	8,E-06	8.000	30	-40	3,4	1,8
			8		6.000				1,7
		0,00325	18		8.000				1,7
			8		6.000				1,3
Y		0,00063	18		8.000	33	-43	2,9	1,7
			8		6.000				1,7
		0,00350	18		8.000				1,6
			8		6.000				1,3
Z	400	0,00103	18	8,E-06	8.000	30	-40	3,4	1,8
			8		6.000				1,7
		0,00305	18		8.000				1,7
			8		6.000				1,4

Tab. 34: MW-Lamellen

Berechnung der Verformungen unter Temperaturwechselzyklen

Anlage zum Forschungsbericht

f) FEM-Modellierung

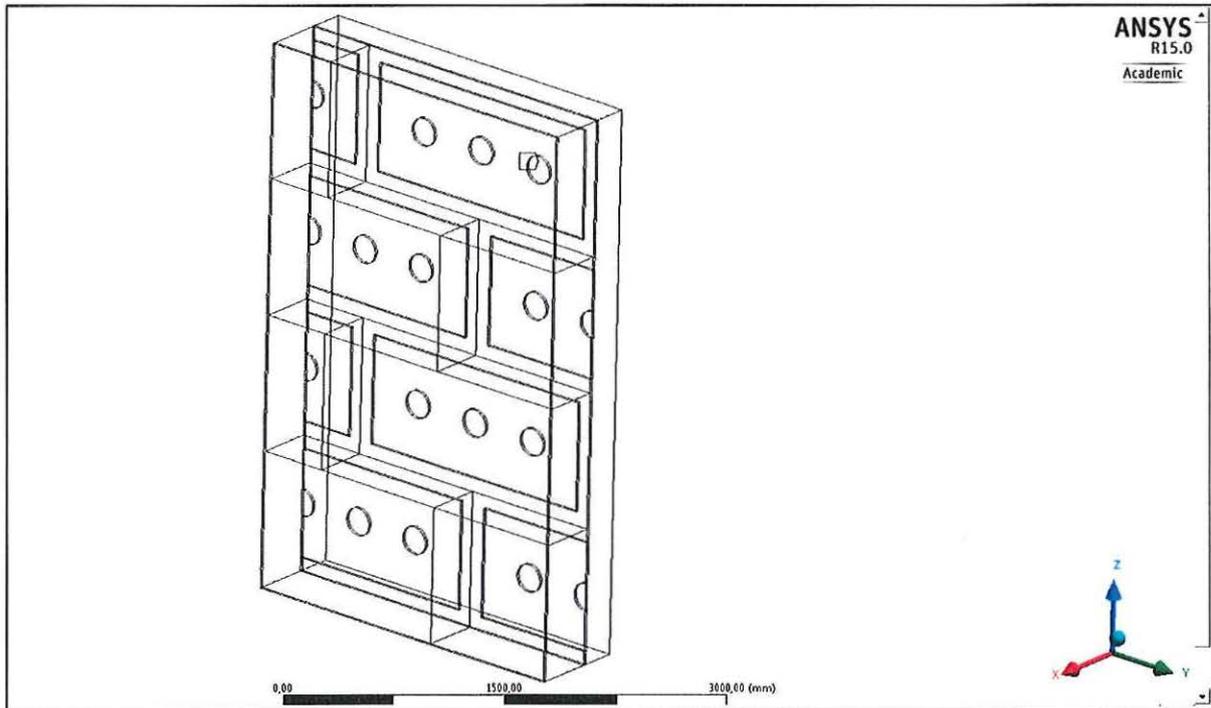


Bild 1: Modell-Ansatz mit Punkt-Wulst-Verklebung (Klebeflächenanteil 40 %)

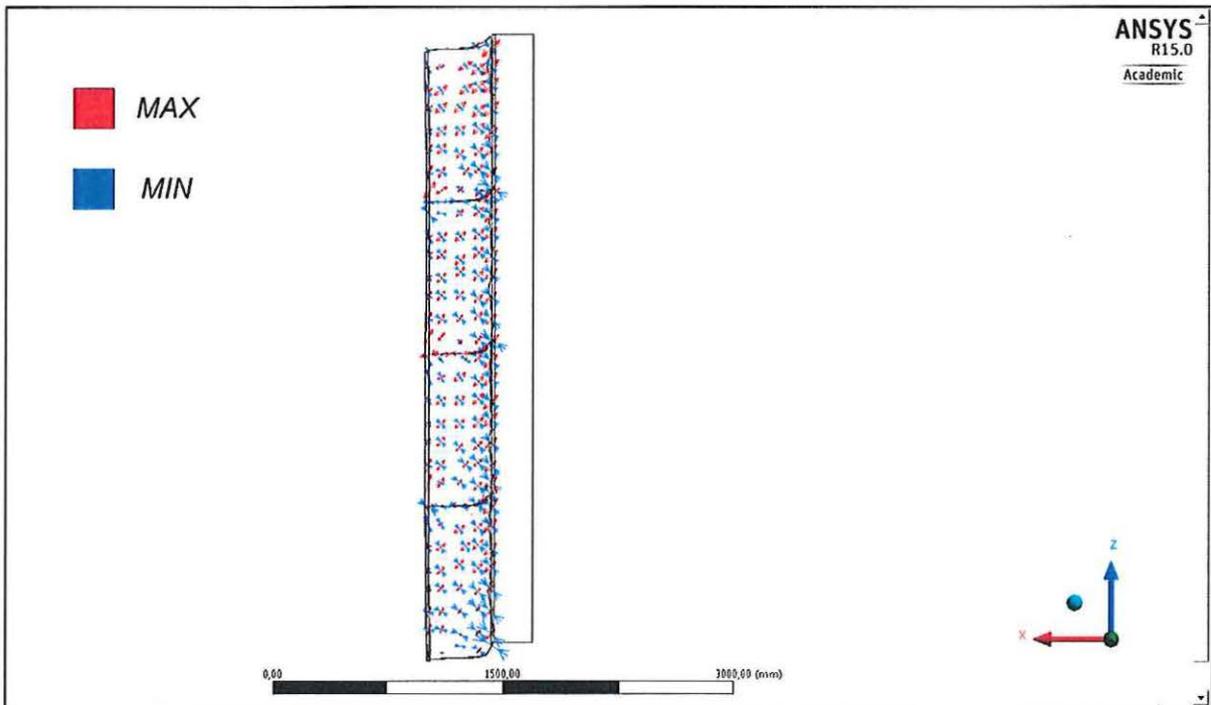


Bild 2: Hauptspannungsvektor unter Eigenlasten

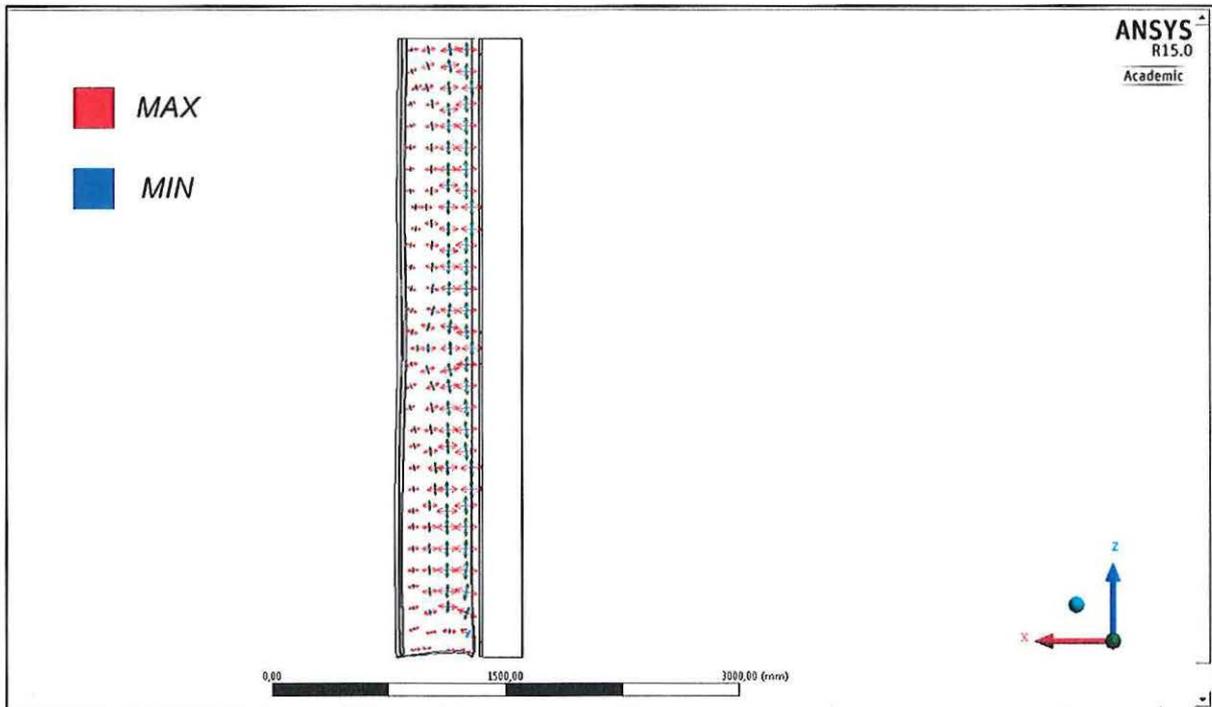


Bild 3: Hauptspannungsvektor unter Windsoglasten

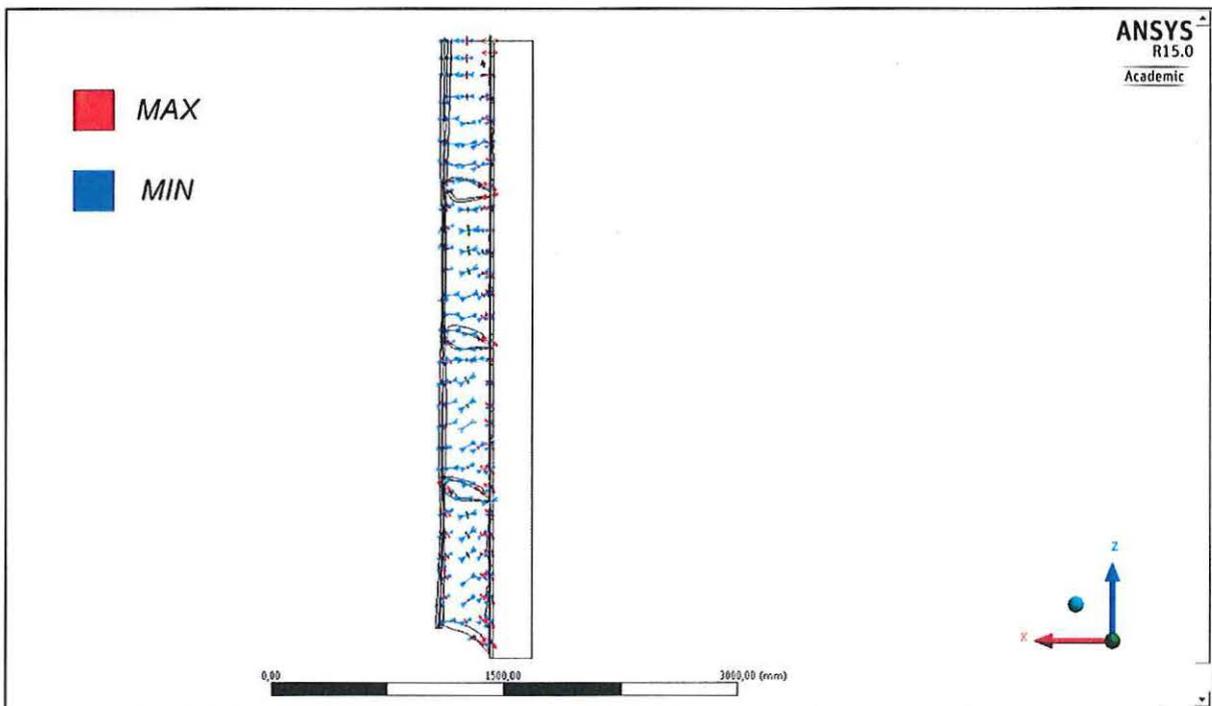


Bild 4: Hauptspannungsvektor unter hygrothermischer Einwirkung

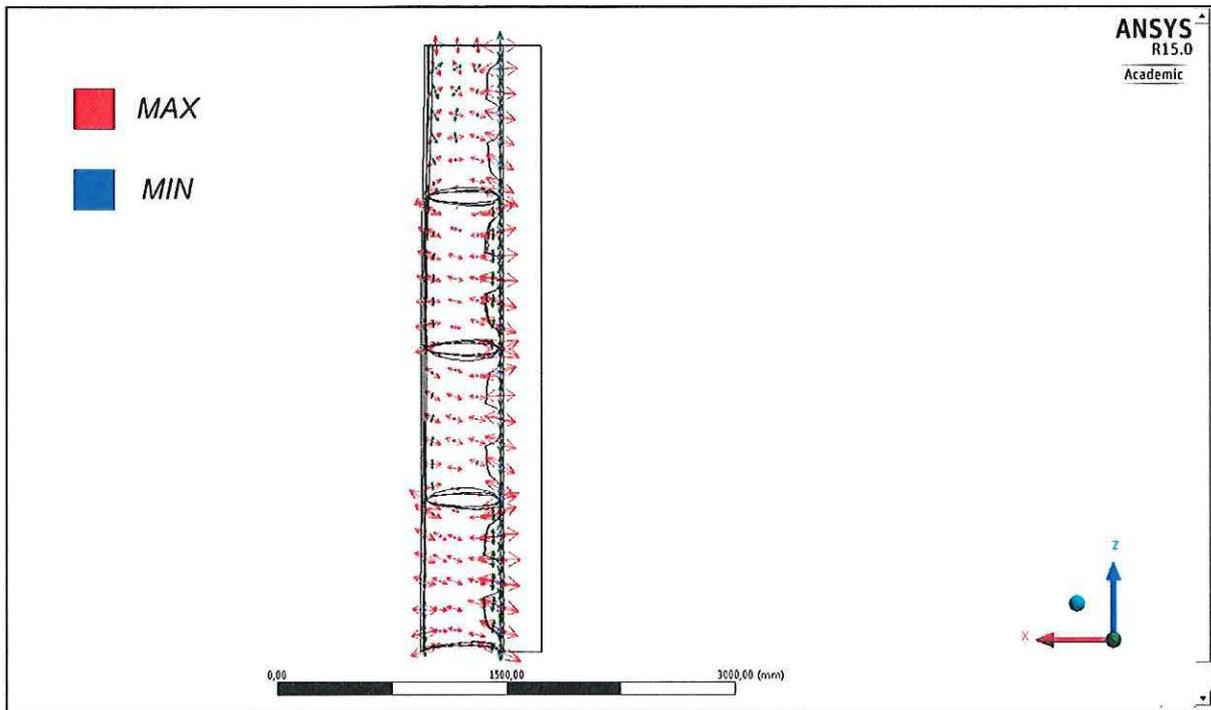


Bild 5: Hauptspannungsvektor unter Gesamteinwirkung