

DORTMUNDER MODELL BAUWESEN

ARCHITEKT UND INGENIEUR

Melanie Krause

Ein neues Konzept zum Nachweis der
Standicherheit von Dübelbefestigungen
in Wärmedämm-Verbundsystemen (WDVS)

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DORTMUND
SCHRIFTENREIHE BETONBAU
Herausgeber: Professor Dr.-Ing. Reinhard Maurer

HEFT 3
2010

**Ein neues Konzept zum Nachweis der
Standicherheit von Dübelbefestigungen
in Wärmedämm-Verbundsystemen (WDVS)**

Melanie Krause

Die *Schriftenreihe Betonbau* der Technischen Universität Dortmund – Fakultät Architektur und Bauingenieurwesen umfasst Veröffentlichungen des Lehrstuhls Betonbau in den Bereichen Lehre, Forschung und Praxis.

Herausgeber

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Reinhard Maurer
Lehrstuhl Betonbau
Technische Universität Dortmund
August-Schmidt-Str. 8
44227 Dortmund

Eigenverlag der TU Dortmund, Fachbereich Architektur und Bauingenieurwesen

Heft 3 der Schriftenreihe Betonbau

Druck und Herstellung: Hitzegrad Print Medien & Service

ISBN 978-3-921823-49-1

ISSN 1867-7886

© 2010 Lehrstuhl Betonbau der Technischen Universität Dortmund – Fakultät Architektur und Bauingenieurwesen
Alle Rechte vorbehalten

Vorwort des Herausgebers

Laut Statistik entfallen derzeit in Deutschland etwa 35% des gesamten Energieverbrauchs sowie 35% des Emissionsaufkommens auf den Bausektor. Insbesondere in Altbauten erfolgt häufig eine Energieverschwendung großen Ausmaßes. Das Einsparpotential an Heizenergie in Altbauten ist riesig, hinzu kommt der ökologische Gewinn. Werden weniger fossile Brennstoffe verbrannt, so fallen im Hinblick auf den Klimawandel auch weniger schädliche Treibhausgase an.

Wärmedämm-Verbundsysteme (WDVS) stellen für die Realisierung der Wärmedämmung von Gebäuden eine sehr kostengünstige Variante dar. Sie können sowohl bei Neubauten als auch bei den älteren Bestandsgebäuden mit fehlender oder nach heutigen Gesichtspunkten völlig unzureichender Wärmedämmung einen wesentlichen Beitrag zur Steigerung der Energieeffizienz leisten. Dadurch kann in erheblichem Umfang Heizenergie durch das Verbrennen fossiler Brennstoffe eingespart werden und gleichzeitig findet eine erhebliche Reduzierung von CO₂ Emissionen statt. Insbesondere bei der Nachrüstung von Bestandsgebäuden im Wohnungsbau haben sich WDVS als äußerst effiziente Maßnahme erwiesen.

Neben energetischen und bauphysikalischen Aspekten ist bei WDVS auch deren ausreichende Standsicherheit zu beachten. WDVS sind zwar keine tragenden Bauteile, allerdings werden sie durch ihre Eigenlast, hygrothermische Einwirkungen sowie ganz erheblich durch Windsoglasten mechanisch beansprucht. Daher sind sie unter bauaufsichtlichen Aspekten an den Gebäudefassaden zur Gewährleistung der öffentlichen Ordnung und Sicherheit ausreichend standsicher zu befestigen. Geregelt wird dies bisher durch allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen des Deutschen Instituts für Bautechnik, bzw. durch europäisch technische Zulassungen. Grundlage für die Erteilung europäisch technischer Zulassungen für WDVS ist ETAG 004 – Guideline for European Technical Approval of external thermal insulation composite systems with rendering. Diese stellt die Grundlage für eine einheitliche Prüfung und Bewertung von WDVS in Europa dar, um diese Systeme europaweit mit ETAs – European Technical Approvals – anwenden zu können.

Die ETAG 004 war seinerzeit zügig erarbeitet und verabschiedet worden, um den Erfordernissen des Marktes gerecht zu werden. Die darin enthaltenen Bewertungs- und Prüfungskriterien waren allerdings noch nicht im vollen Umfang erprobt und ausgereift. Zwischenzeitlich wurden auch neue Systeme und Dämmstoffe entwickelt. Dies hat zur Folge, dass auf der Basis von ETAG 004 heute nicht mehr alle Systeme zuverlässig und praxistauglich geprüft werden können. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit von Frau Krause werden erhebliche Schwächen der bisherigen Prüfverfahren aufgedeckt und es erfolgt eine kritische Betrachtung der bisherigen Vorgehensweise. Daraus leitet sich der Bedarf nach der Entwicklung neuer Methoden für die reproduzierbare Prüfung und Auswertung der Versuchsergebnisse auf ingenieurwissenschaftlich abgesicherter Grundlage ab.

Hier setzt die Arbeit von Frau Krause ein. Zunächst erfolgen gezielte experimentelle Untersuchungen zur Klärung der physikalischen bzw. mechanischen Grundlagen sowie der maßgebenden Versagensmechanismen. Eingehend wird dabei das spezielle Tragverhalten von Dübeln für WDVS mit Mineralwolle unter Windsoglasten untersucht. Frau Krause stellt in diesem Zusammenhang von ihr neu entwickelte Testmethoden vor, mit denen eine realistische und praxisnahe Prüfung der WDVS möglich ist.

Darauf aufbauend wird ein Bemessungskonzept unter Berücksichtigung eines probabilistischen Sicherheitskonzepts auf der Grundlage von DIN EN 1990 entwickelt. Bei der Ermittlung des charakteristischen Wertes für den Tragwiderstand werden die Unzulänglichkeiten der bisherigen Vorgehensweise unter Verwendung der Kleinstwerte aus den vorliegenden Versuchswerten aufgezeigt. Anschließend wird die Bestimmung des charakteristischen Wertes als Quantilwert einer geeigneten statistischen Verteilung, unter Berücksichtigung der Unsicherheiten aus der i.d.R. geringen Anzahl von Versuchswerten, vorgeschlagen. Das zugehörige Vertrauensniveau wird angegeben. Auf dieser statistischen Grundlage wird anschließend der Teilsicherheitsbeiwert für den Tragwiderstand bestimmt. Die hierbei angewendete Methodik ist durchaus auch für ähnlich gelagerte Probleme im Bereich der Material- bzw. Bauteilforschung von Interesse.

Die von Frau Krause gegenüber der bisherigen Zulassungspraxis weiter entwickelten und verbesserten Prüf- und Auswertungsmethoden sollten künftig als Grundlage für die Erteilung Europäisch Technischer Zulassungen für WDVS dienen.

Prof. Dr.-Ing. Reinhard Maurer

November 2009

EIN NEUES KONZEPT ZUM NACHWEIS DER STANDSICHERHEIT VON DÜBELBEFESTIGUNGEN IN WÄRMEDÄMM-VERBUNDSYSTEMEN (WDVS)

Von der Fakultät Architektur und Bauingenieurwesen der TU Dortmund genehmigte

Dissertation

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

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Melanie Krause

Vorsitzender der Prüfungskommission: Prof. Dr. rer. nat. Bernhard Middendorf

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Reinhard Maurer

2. Gutachter: PD Dr.-Ing. Klaus Block

Tag der mündlichen Prüfung: 03. September 2009

Dortmund 2009

KURZFASSUNG

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Regelungen gemäß der Leitlinie ETAG 004 [01], in Bezug auf die Prüfung des Tragverhaltens von Dübeln für Wärmedämm-Verbundsysteme bei Windsogeinwirkung und unter Berücksichtigung der Dämmstoffeigenschaften, kritisch betrachtet und vor allem das bisher angewandte Sicherheitskonzept, auf der Grundlage der heute gültigen Normen und Regelwerken unter Berücksichtigung probabilistischer Methoden, überarbeitet.

Die Nachweise zur Tragfähigkeit eines WDVS werden seit März 2000 in der ETAG 004 [01] geregelt. Die in der Leitlinie enthaltenen Prüfverfahren und Beurteilungen beruhen auf Erfahrungswerten, die man in der langjährigen Beurteilung der Tragfähigkeit von Wärmedämm-Verbundsystemen gewonnen hat.

Durch die Entwicklung von neuartigen Dämmstoffen, Dübeln und Putzsystemen in den letzten Jahren sind die in der Leitlinie genannten Prüfverfahren teilweise nicht anwendbar oder liefern keine aussagekräftigen Ergebnisse. Ein Ziel dieser Arbeit war es daher, ein praxisnahes Prüfverfahren zu entwickeln.

Die Qualität der Dämmplatten wird bisher über die Querkzugfestigkeit bestimmt. Diese Anforderung wurde 1995 empfohlen [Obe93] und bisher nicht weiter überprüft. In dieser Arbeit werden weitere Steifigkeits- und Festigkeitskennwerte der Dämmplatten untersucht. Die Auswirkung der Materialeigenschaften der Dämmplatten auf das Tragverhalten mit Dübeln bei Windsogeinwirkung wird überprüft, um eine fundierte Empfehlung an die Qualitätssicherung zu geben.

Ein weiteres Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Nachweiskonzeptes für Wärmedämm-Verbundsysteme mit der Grundlage eines probabilistischen Sicherheitskonzeptes.

Bisher wird lediglich die Verankerung der Dübel zur Befestigung von Wärmedämm-Verbundsystemen durch die ETAG 014 [02] und dem TR 26 [04] nach bekannten statistischen Regeln beurteilt. Eine übergreifende, einheitliche und wissenschaftlich begründete Beurteilung für Wärmedämm-Verbundsysteme fehlt in der ETAG 004 [01].

Ebenso ist derzeit die Annahme eines Materialsicherheitsfaktors für das WDVS eher als ein auf Erfahrungen beruhender Wert als eine aus Versuchsergebnissen abgeleitete Größe zu betrachten.

Der Teilsicherheitsbeiwert γ_m für die Materialeigenschaft eines Dämmstoffes wird hier unter Berücksichtigung der Streuungen der Versuchsergebnisse, in Anlehnung an den Eurocode [11], die Reduktion der Tragfähigkeiten durch Bewitterung (Alterungsverhalten), das Arbeitsvermögen (Duktilität) des Materials und anhand der Montagesicherheit des Systems bestimmt.

Der bisherige Nachweis zur Standsicherheit von Dübeln für Wärmedämm-Verbundsysteme unter Windsogeinwirkung, beruht auf sehr konservativen Annahmen und führt teilweise zu unwirtschaftlichen Dübelmengen. Aufgrund der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Prüfverfahren und der statistisch begründeten Auswertung können gedübelte Wärmedämm-Verbundsysteme wirtschaftlicher und zugleich sicherer bemessen werden.

VORWORT DER AUTORIN

An dieser Stelle möchte ich die Möglichkeit ergreifen, mich bei den vielen Menschen zu bedanken, die mich bei dieser Arbeit unterstützt haben.

Meinem Betreuer Herrn Prof. Dr.-Ing. Reinhard Maurer danke ich für die Möglichkeit zu dieser Arbeit und der mir damit zuteil gewordenen Unterstützung, ständige Bereitschaft zur Diskussion sowie für die wertvollen Ratschläge.

Bei meinem Zweitgutachter Herrn PD Dr.-Ing. Klaus Block bedanke ich mich für die stets vorhandene Diskussionsbereitschaft, die kritische Beurteilung der Arbeit und dafür, dass er mir immer wieder die Augen geöffnet hat, wenn ich kurz vor der Verzweiflung stand.

Für den Vorsitz der Prüfungskommission danke ich ganz herzlich Herrn Prof. Dr. rer. nat. Bernhard Middendorf. *Eine Gleichung mit zwei Unbekannten* wird mir stets in guter Erinnerung bleiben.

Ohne die Unterstützung meiner Kollegen, unserer studentischen Hilfskräfte, Diplomanden und den Mitarbeitern des Instituts für Bauforschung, wäre diese Arbeit nur schwer zu bewältigen gewesen. Daher möchte ich an dieser Stelle ganz besonders die freundschaftliche Atmosphäre in unserem Team hervorheben. Danke an meine Kollegen die immer ein offenes Ohr hatten, mir mit Rat und Tat zur Seite standen und meine oft schwankenden Launen ertragen mussten und haben. Ein besonderer Dank geht vor allem an die Mitarbeiter des Instituts für Bauforschung, welche mir mit ihrer handwerklichen Unterstützung und ihren Ratschlägen eine große Hilfe waren.

Bedanken möchte ich mich auch bei Detlef Kessler, der es zu verantworten hat, dass ich überhaupt mit dem Thema Wärmedämm-Verbundsysteme in Berührung gekommen bin. Herr Kessler und Dr. Heribert Oberhaus haben mir die Geheimnisse der WDVS näher gebracht und standen mir stets mit Ratschlägen zur Seite. Zudem gilt mein Dank Dr. Friedrich Dreier, der mich mit größter Geduld in die Tiefen der Statistik eingearbeitet hat.

Ein besonderer Dank geht außerdem an den Fachverband Wärmedämm-Verbundsysteme für die finanzielle Unterstützung und an Herrn Dr. Bagda und Herrn Dr. Dratschmidt, die es ermöglichen, meine Forschungsergebnisse in zukünftigen Prüfvorschriften mit einzubeziehen.

Nicht zuletzt gebührt mein größter Dank meinen Eltern, die mir seit jeher die größte Unterstützung zuteil werden lassen, immer für mich da sind und mir somit den nötigen Rückhalt geben um meine Ziele zu erreichen. Ebenso danke ich meinem Freund und meinen Freunden für die aufgebrachte Geduld und die Motivation die sie mir stets geschenkt haben. Sie haben alle einen wesentlichen Teil zu dieser Arbeit beigetragen.

Dortmund, im November 2009

Melanie Krause

INHALT	SEITE
1 Veranlassung - Zielsetzung	1
1.1 Anforderungen an den Wärmeschutz und die Energie-Einsparung.....	1
1.2 Entwicklung von Dämmstoffen.....	3
1.3 Entwicklung von Wärmedämm-Verbundsystemen	5
1.4 Zielsetzung.....	7
2 Dämmstoffe und WDV-Systeme im Überblick	9
2.1 Dämmstoffe.....	9
2.1.1 Allgemeines – Bewertungskriterien von Dämmstoffen.....	9
2.1.2 Anorganische Dämmstoffe.....	12
2.1.3 Organische Dämmstoffe aus synthetischen Rohstoffen	17
2.1.4 Natürliche Dämmstoffe.....	22
2.1.5 Spezialdämmung	26
2.2 Wärmedämm-Verbundsysteme	27
2.2.1 Allgemeines – Anforderungen an Wärmedämm-Verbundsysteme	27
2.2.2 Wärmedämm-Verbundsystem mit Verklebung der Dämmplatten.....	30
2.2.3 Wärmedämm-Verbundsystem mit Verklebung und Dübelung der Dämmplatten	32
2.2.4 Wärmedämm-Verbundsystem mit keramischer Bekleidung	37
2.2.5 Wärmedämm-Verbundsysteme mit Schienenbefestigung	40
3 Tragverhalten von Wärmedämm-Verbundsystemen	41
3.1 Beanspruchungen	41
3.1.1 Beanspruchungen aus Eigengewicht und hygrothermischen Einwirkungen.....	41
3.1.2 Lastabtrag aus der Windbeanspruchung	44
3.1.3 Standsicherheit	45
3.2 Beanspruchbarkeiten	46
3.2.1 Erforderliche Materialeigenschaften.....	46
3.2.2 Mechanische Eigenschaften von Dämmplatten	47
3.2.3 Tragfähigkeiten der Dübel.....	50
3.2.4 Systemeigenschaften unter Windlasten.....	52
3.3 Mechanische Anforderungen an den Tragwiderstand	54
4 Tragverhalten von Dübeln für Wärmedämm-Verbundsysteme mit Mineralwolle bei Windsogeinwirkungen	56
4.1 Allgemeines.....	56
4.2 Problemstellung	58
4.3 Untersuchungen zum Einfluss der Tellersteifigkeit	64
4.3.1 Bestimmung der Tellersteifigkeit verschiedener WDV-S-Dübel	64
4.3.2 Durchziehversuch mit Dübeln unterschiedlicher Tellersteifigkeit	64
4.4 Einfluss der Materialeigenschaften von Mineralwolle-Dämmplatten auf das Versagensbild	66

4.4.1	Bestimmung der Systemtragfähigkeit im Lastfall Windsog	66
4.4.2	Materialeigenschaften der Dämmplatten und Ihre Auswirkung auf das Versagen	67
4.5	Kritische Betrachtung der bisherigen Prüfmethode	72
4.6	Neue Testmethode	76
4.6.1	Herleitung einer neuen Testmethode	76
4.6.2	Versuchsergebnisse	83
4.6.3	kritische Betrachtung der neuen Testmethode	87
5	Einfluss der Materialeigenschaften von Dämmstoffen auf das Systemtragverhalten	89
5.1	Allgemeines	89
5.2	Experimentelle Ermittlung des Einflusses der Materialeigenschaften der Dämmstoffe auf die Systemtragfähigkeit	90
5.3	Numerische Simulation mit Hilfe der FE-Methode	94
5.3.1	Wahl des zu untersuchenden Dämmstoffes	94
5.3.2	Identifikation der Materialparameter zur Bestimmung des Stoffmodells	99
5.3.3	Bestimmung des Stoffmodells für FE-Berechnung	101
5.3.4	Kontrolle des Stoffmodells über numerische Simulation der Zug- und Druckversuche	103
5.3.5	Numerische Simulation der Windsogversuche	106
5.4	Vergleich der experimentellen und rechnerischen Ermittlung der maßgebenden Materialeigenschaften von Dämmstoffen auf das Systemtragverhalten	107
6	Sicherheitskonzept	109
6.1	Problemstellung	109
6.2	Grundlagen der Statistik	113
6.2.1	Allgemeines	113
6.2.2	Häufigkeitsverteilung	114
6.2.3	Verteilungsdichte	114
6.2.4	Verteilungsfunktion der Grundgesamtheit	115
6.2.5	Logarithmische Normalverteilung	116
6.2.6	Mittel-, Kleinst- und Größtwertverteilungsfunktion	117
6.2.7	Quantilwert	118
6.2.8	Vertrauensniveau	118
6.3	Vorhandene Verfahren zur statistischen Bestimmung von charakteristischen Werten	119
6.3.1	Bestimmung der charakteristischen Werte über den Kleinstwert	119
6.3.2	Bestimmung der charakteristischen Werte über den Quantilwert	122
6.4	Bestimmung geeigneter Teilsicherheitsbeiwerte für die Tragfähigkeit von Dübeln für WDVS	123
6.4.1	Allgemeines	123

6.4.2	Teilsicherheitsbeiwert γ_{m1} auf Basis der versuchsgestützten Bemessung nach EC1	123
6.4.3	Teilsicherheitsbeiwert γ_1 infolge des Alterungsverhaltens des Dämmstoffs	131
6.4.4	Teilsicherheitsbeiwert γ_2 infolge des Arbeitsvermögens des Dämmstoffs	132
6.4.5	Empfehlung zur Bestimmung des Teilsicherheitsbeiwertes γ_m für Dämmstoffe	134
6.5	Empfehlung zur Bemessung von Dübeln für WDVS bei Windsogeinwirkungen	136
6.5.1	Bestimmung der mittleren Versagenslast $\bar{F}_{\text{Dübel}}$	136
6.5.2	Bestimmung des Reduktionsfaktors α_{Fuge} für Fugendübelung	136
6.5.3	Bestimmung des charakteristischen Wertes $F_{\text{Dübel},5\%}$	137
6.5.4	Bestimmung des Bemessungswertes $F_{\text{Dübel},d}$	138
6.5.5	Nachweis für den Grenzzustand der Tragfähigkeit für WDVS bei Windsogeinwirkungen und Festlegung der benötigten Dübel / m ²	138
7	Zusammenfassung und Ausblick	141
7.1	Zusammenfassung	141
7.2	Ausblick	146
7.3	Fazit	147
8	Quellen	148
8.1	Normen und Regelwerke	148
8.2	Literatur	150

1 VERANLASSUNG - ZIELSETZUNG

1.1 ANFORDERUNGEN AN DEN WÄRMESCHUTZ UND DIE ENERGIE-EINSPARUNG

Bereits Ende des 19. Jahrhunderts wurden die ersten Anforderungen an den Wärmeschutz von Gebäuden gestellt. Da es unter ungünstigen klimatischen Bedingungen oftmals nicht möglich war, Gebäude ständig und ausreichend zu wärmen, beeinträchtigten kalte, feuchte Wände nicht nur die Behaglichkeit und das Wohlbefinden sondern auch die Gesundheit der Bewohner.

Während die Forderung nach Energieeinsparmaßnahmen und dem Wärmeschutz im Bauwesen durch die Kohleknappheit nach dem ersten Weltkrieg immer lauter wurde, leitete die Wohnungsnot nach dem zweiten Weltkrieg eine gegenläufige Entwicklung ein. Die Konstruktionen der Gebäude wurden auf ein statisch notwendiges Maß beschränkt, um Wohngebäude preiswert zu errichten (z.B. Notwohnungsbau). Durch minimierte Außenwanddicken wurde der Wärmeschutz der Gebäude erheblich herabgesetzt. Dabei blieben grundlegende physikalische Gesetzmäßigkeiten - wie z.B. der Taupunkt - unbeachtet. Die Gewährleistung von Hygiene und Behaglichkeit in Wohnräumen konnte nicht mehr erbracht werden und Bauschäden infolge Tauwasserbildung waren unvermeidlich.

1952 wurde die erste deutsche Norm zum Mindestwärmeschutz, die heute noch gültige DIN 4108 „Wärmeschutz im Hochbau“, durch den Normenausschuss Bauwesen (NABau) des Deutschen Instituts für Normung e.V. (DIN) festgeschrieben. In dieser Norm wurden für die Außenbauteile von beheizten Gebäuden erste nicht zu überschreitende Wärmedurchgangskoeffizienten als Mindestwärmeschutzstandard eingeführt. Die seinerzeit festgelegten Höchstwerte sollten insbesondere zur Vermeidung von Tauwasser-, Schimmelpilzbildungen und zur Vermeidung thermischer Formänderungen, nicht jedoch der Energiereduzierung dienen. [Bon04] Anforderungen für Dämmstoffe folgten, wie z.B. Faserdämmstoffe für das Bauwesen (DIN 18 165, 1. Ausgabe August 1957) und Schaumkunststoffe als Dämmstoffe für das Bauwesen (DIN 18 164, 1. Ausgabe Januar 1963).

Erst durch die Ölkrise im Herbst 1973 wurde der breiten Öffentlichkeit bewusst, dass Rohstoffe zur Energiegewinnung nicht unbegrenzt zur Verfügung stehen und dass Preise für Energiequellen wie Rohöl stark von politischen Vorgängen abhängen. Das Verständnis für die Notwendigkeit der Energieeinsparung wurde zunehmend geweckt [Cam95].

Als Folge der Ölkrise wurde 1976 das erste Energieeinsparungsgesetz (EnEG vom 22. Juli 1976) erlassen. Dieses Gesetz stellte Anforderungen an die Energieeinsparung bei Gebäuden, Heizungsanlagen, an den Betrieb und die Abrechnung. Auf dieser Grundlage ergab sich die Durchführungsverordnung zum Wärmeschutz, die sogenannte Wärmeschutzverordnung (WSVO) vom 11.8.1977. Bereits 1982 trat die 2. Fassung der Wärmeschutzverordnung in Kraft und 1995 die 3. Fassung. Seit 2002 hat die Energieeinsparverordnung (EnEV) die Wärmeschutzverordnung ersetzt, ihr liegen ökonomische und technische Aspekte zugrunde. Der ökonomische Gesichtspunkt befasst sich mit der Wirtschaftlichkeit der Gebäudedämmung. Dabei stellt sich die Frage, ob die Investitionskosten in einer bestimmten Zeit über die Energieeinsparung ausgeglichen werden (Amortisation). Der technische Aspekt beinhaltet den Wärmeschutz von Bauteilen durch neu entwickelte Wand- und Deckenbaustoffe sowie Fenster und der damit verbundenen Reduzierung des Heizwärmeverbrauchs.

Die DIN 4108 „Wärmeschutz im Hochbau“ regelt lediglich Mindestanforderungen des Wärmeschutzes aus bauphysikalischer Sicht. Die Energieeinsparverordnung hat den Zweck,

die Einsparung von Heiz- und Kühlenergie und somit die Reduzierung des CO₂-Ausstoßes durch baulichen Wärmeschutz zu sichern.

Wärmeschutzmaßnahmen von Gebäuden haben somit eine große Bedeutung für [Cam95]:

- die Gesundheit der Bewohner von Wohngebäuden durch ein hygienisches Raumklima,
- die Behaglichkeit in Räumen durch höhere Oberflächentemperaturen der Außenbauteile,
- den Schallschutz eines Gebäudes je nach Dämmstoff,
- den Schutz der Baukonstruktion vor bauphysikalischen Schäden durch klimabedingte Feuchteeinwirkungen,
- einen geringeren Energieverbrauch bei Heizung und Kühlung von Wohngebäuden durch Reduktion der Wärmeverluste und dadurch des Wärmebedarfs,
- den Umweltschutz, da bei der Gewinnung von Heizenergie durch fossile Brennstoffe schädliche Produkte wie CO₂ entstehen, das für die weltweite Klimaveränderung hauptverantwortlich ist (Treibhauseffekt).

Seit den 70er Jahren des 20. Jahrhunderts ist der Energieverbrauch für Raumheizungen trotz gesteigener Wohnfläche je Bewohner deutlich zurückgegangen. Dies kann sowohl auf Energiepreissteigerungen als auch aufgrund der energieeinsparenden Vorschriften bei der Ausführung von Gebäuden, der Wärmeschutz- und Energiesparverordnung und einem steigenden Verständnis der Bevölkerung für wärmedämmende Maßnahmen von Wohngebäuden zurückgeführt werden.

1.2 ENTWICKLUNG VON DÄMMSTOFFEN

Dämmstoffe sind Baustoffe, die aufgrund vieler Hohlräume mit eingeschlossener, ruhender Luft in hohem Maße wärme- und schalldämmende Eigenschaften aufweisen. Gemäß DIN 4108 Teil 4 [15] gilt eine Schicht als Wärmedämmstoff, wenn sie eine Wärmeleitfähigkeit von $\lambda < 0,15 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ aufweist.

Als Wärmedämmung für Wände und Decken benutzte man ursprünglich Platten aus expandiertem Kork und Torf sowie Matten aus Holz- und Kokosfasern oder Seegras, ferner Leichtbauplatten aus mineralisch gebundener Holzwolle. Um 1870 wurden die ersten Fäden durch Schmelzen von Glas, Stein und Hochofenschlacke hergestellt. Aus diesen Fäden wurden die ersten Faserdämmstoffe für die Wärmedämmung entwickelt. Die Fäden waren jedoch noch relativ dick und die Dämmstoffe hatten entsprechend große Luftzwischenräume, welche keine guten Wärmeleitfähigkeitswerte bewirkten [Cam95]. Im Oktober 1918 wurde das „Forschungsheim für Wärmeschutz (e.V.)“ gegründet. Dessen Forschungsergebnisse hatten einen wesentlichen Einfluss auf die Entwicklung der Wärmedämmstoffe. So wurden im Jahre 1924 Korkschröt, Schaf- und Baumwolle, Flachsfasern, Sägemehl, Sisal und Getreidekornschalen auf Dämmeigenschaften untersucht. *„Berechnungen ergaben, dass alleine die Verbesserung der Dämmstoffe in den Jahren von 1924 bis 1927 dem deutschen Volksvermögen jährlich eine Summe von 10 Millionen RM ersparte“* [Rai27].

„Durch Entwicklung der Dämmstoffindustrie sowie der Kunststoffchemie etwa ab Mitte des 20. Jahrhunderts gelang es, Dämmstoffe aus sehr dünnen Mineralfasern von großem Wärmedämmvermögen und hoher Temperaturbeständigkeit sowie weiche und harte Schaumstoffe aus Kunststoffen und poröse Stoffe aus anorganischen Materialien herzustellen“ [Cam95].

Heute ist eine Vielzahl von Wärmedämmstoffen auf dem Markt erhältlich, von denen nicht alle Dämmstoffe für den Einsatz von Wärmedämm-Verbundsystemen geeignet sind. Man unterscheidet anorganische (mineralische) und organische Dämmstoffe, wobei die organischen Dämmstoffe zwischen künstlichen und natürlichen Rohstoffen differenziert werden.

Anorganische Dämmstoffe	Organische Dämmstoffe aus synthetischen Rohstoffen	Organische Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen
- Mineralwolle (MW)	- Polystyrol-Partikelschaum (EPS)	- Kork (ICB)
- Schaumglas (CG)	- Polystyrol-Extruderschaum (XPS)	- Holzwolle (WW)
- Perlite (EPB)	- Polyurethan-Hartschaum (PUR)	- Holzfasern (WF)
- Calciumsilikat	- Phenolharz-Hartschaum (PF)	- Schilf
- Gipschaum	- Polyuretha-Ortschaum (PUR)	- Kokosfasern
- Blähglas	- Harnstoff-Formaldehydharz-	- Schafwolle
- Blähton	Ortschaum (UF)	- Baumwolle
- Naturbims		- Flachs
- Vermiculit		- Hanf
		- Torf
		- Zellulose

Bild 1.1 Übersicht über Dämmstoffe nach ihrer Rohstoffbasis [Lün00]

Betrachtet man die Struktur der Dämmstoffe, so kann man zwischen Faserdämmstoffen und geschäumten Dämmstoffen unterscheiden. Die geschäumten Dämmstoffe weisen eine nahezu isotrope Struktur auf, die Faserdämmstoffe eine anisotrope Struktur (vgl. Abschnitt 4.4.2 und 5.3.1), wobei die Fasern eine Art Haufwerk bilden, in dem Luft eingeschlossen ist. Geschäumte Dämmstoffe bestehen aus mit Luft gefüllten Hohlräumen.

Die Produktion der Dämmstoffe hat Ende des 20. Jahrhunderts stark zugenommen. Dies liegt vor allem an den erhöhten Forderungen nach Wärmeschutzmaßnahmen im Wohnungsbau. Der Marktanteil von Polystyrol-Hartschaum-Dämmplatten bei Wärmedämm-Verbundsystemen liegt bei 88%, Mineralfaserdämmstoffe bei 11% und die sonstigen Dämmstoffe bei 1%, wobei hier überwiegend Kork zum Einsatz kommt (Bild 1.2) [Lün00]. Künstliche Dämmstoffe wie Polyurethan-Hartschaum (PUR) oder Phenolharz-Hartschaum (PF) bekommen mehr Bedeutung, da sie mit geringerer Dämmstoffdicke eine niedrigere Wärmeleitfähigkeit haben. Sie sind jedoch wesentlich teurer. Die Verwendung von Dämmstoffen aus natürlichen Rohstoffen hat aus ökologischen Aspekten in den letzten Jahren zugenommen.

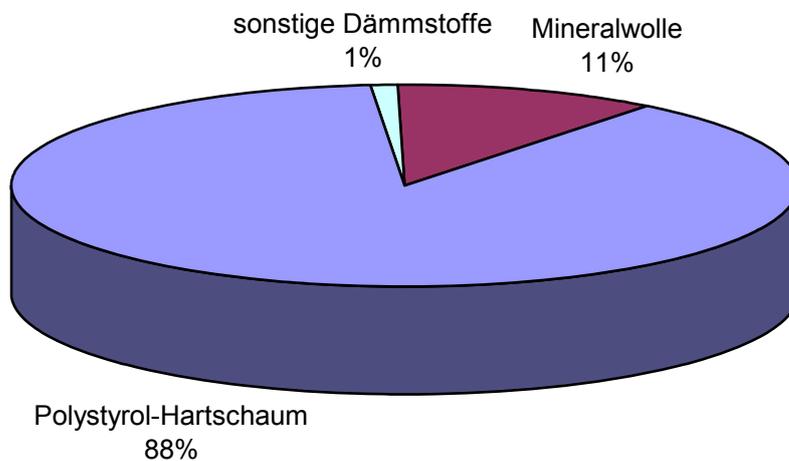


Bild 1.2 Marktanteil der Dämmstoffe bei Wärmedämm-Verbundsystemen

1.3 ENTWICKLUNG VON WÄRMEDÄMM-VERBUNDSYSTEMEN

Wärmedämm-Verbundsysteme sind Systeme zur Wärmedämmung aus Dämmstoffen und zwei Beschichtungen, von denen mindestens eine armiert ist. Die Materialien der Wärmedämm-Verbundsysteme müssen aufeinander abgestimmt sein (systemzugehörig) [31].

Die Wärmedämmstoffe (z.B. Polystyrol-Hartschaum, Mineralwolle etc.) werden auf den Außenwänden eines Gebäudes z.B. mit Klebemörtel und / oder Dübeln befestigt. Anschließend wird eine Beschichtung aus Unterputz und eine Oberflächenschicht (z.B. Putz, keramische Bekleidung) aufgebracht, die möglichst wasserabweisend (hydrophobiert) und dennoch wasserdampfdurchlässig (diffusionsoffen) sein sollte (Bild 1.3).

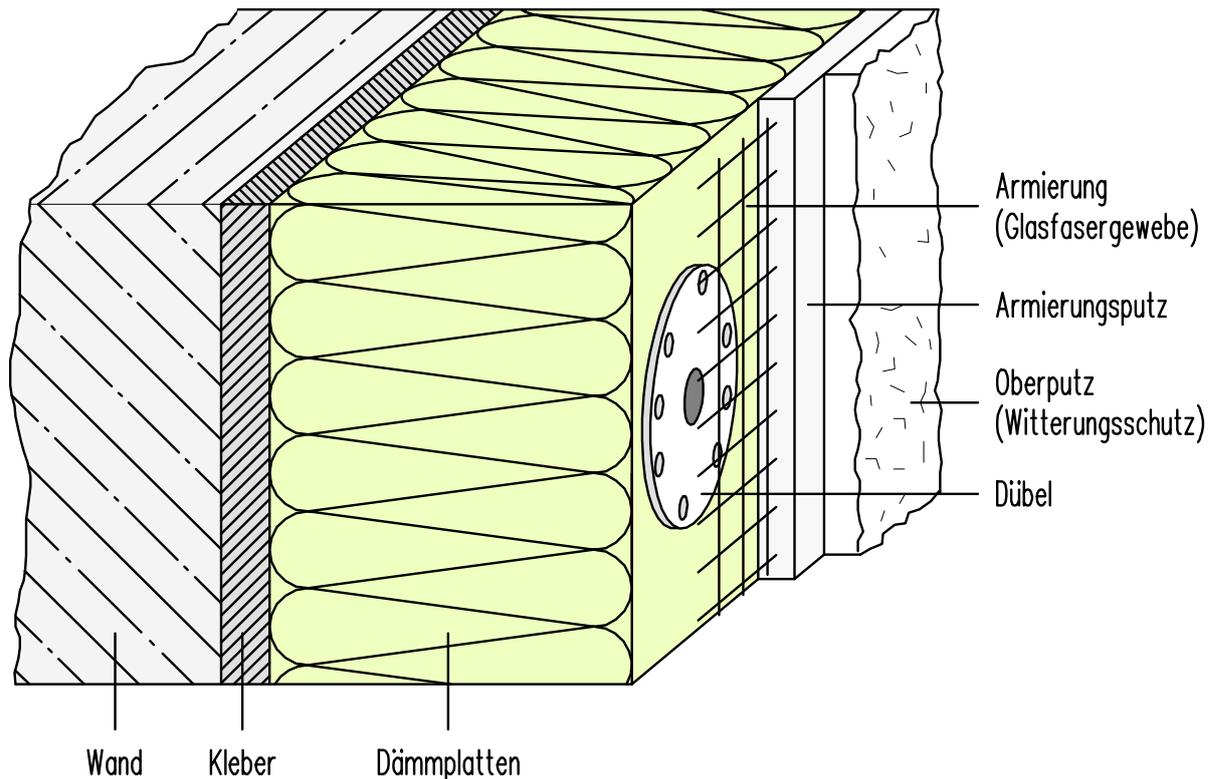


Bild 1.3 Aufbau eines Wärmedämm-Verbundsystems

In den fünfziger Jahren des 20. Jahrhunderts wurde das erste Patent zur Herstellung von expandiertem Polystyrol eingereicht. Zum Ende der fünfziger Jahre gab es die erste Patentanmeldung für ein Wärmedämm-Verbundsystem, das Ende der sechziger Jahre in den Markt eingeführt wurde [Lün00]. Es herrschte jedoch große Skepsis, ob Putz auf einer weichen Dämmschicht dauerhaft und beständig gegenüber hygrometrischen Einflüssen sein könnte.

Im Jahr 1975 wurde das erste mineralische, nicht brennbare Wärmedämm-Verbundsystem auf den Markt gebracht. Mit Wärmedämm-Verbundsystemen auf der Basis von Mineralwolle konnten auch Geschossbauten und Hochhäuser gedämmt werden.

Seitdem wurden über 490 Mio. m² Wärmedämm-Verbundsystem in Neu- und Altbauten verlegt, jährlich kommen ca. 40 Mio. m² hinzu. (Bild 1.4)

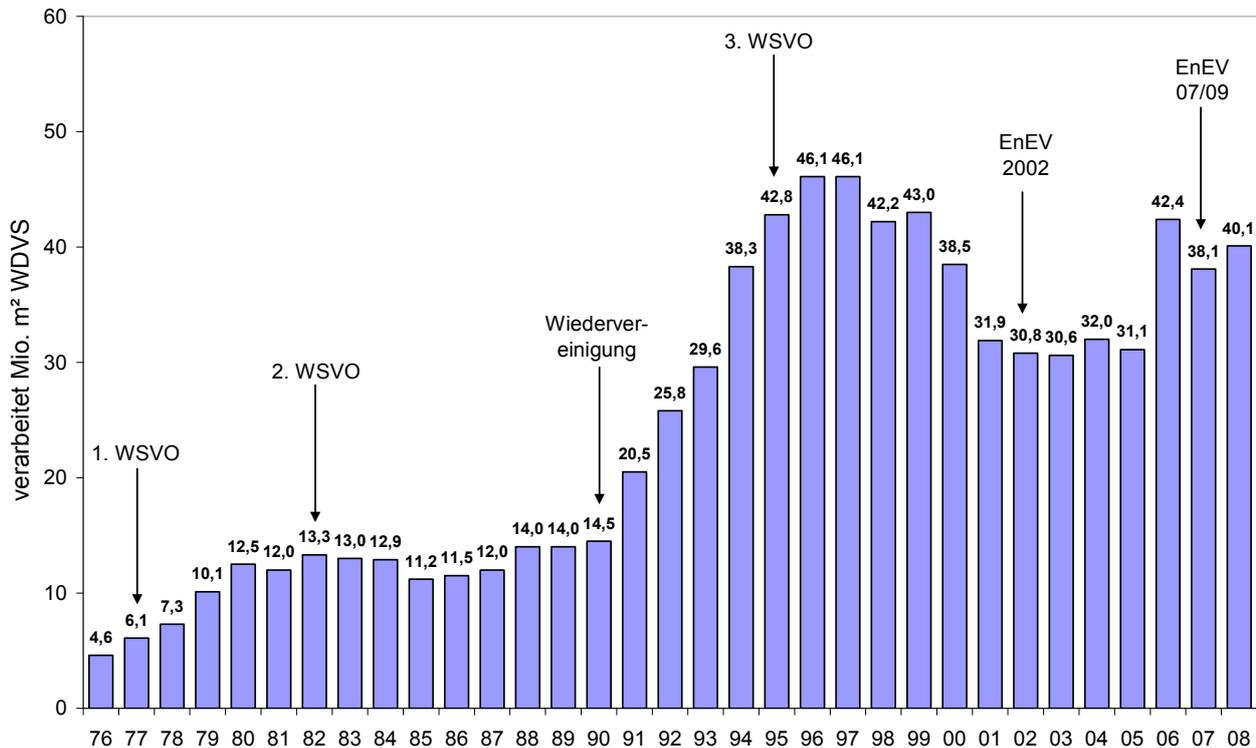


Bild 1.4 Marktentwicklung von Wärmedämm-Verbundsystemen von 1976 - 2004

1975 wurde der Fachverband Wärmedämmverbundsysteme e.V. durch einen Zusammenschluss von WDVS-Herstellern gegründet. Er fördert die Anwendung, Qualitätssicherung und Weiterentwicklung geprüfter und bewährter Wärmedämm-Verbundsysteme.

Trotz des langjährigen Einsatzes von Wärmedämm-Verbundsystemen wurden erst 1980/84 bauaufsichtliche Regelungen vom Institut für Bautechnik (IfBt) wie folgt eingeführt [Czi07]:

- Mitteilung des IfBt: Kunstharzbeschichtete WDVS, Heft 7, 4/1980
- Mitteilung des IfBt: Zur Standsicherheit von WDVS mit Mineralfaser-Dämmstoffen und mineralischem Putz, Heft 6, 6/1984
- Mitteilung des IfBt: Zum Nachweis der Standsicherheit von WDVS mit Mineralfaser-Dämmstoffen und mineralischem Putz, Heft 4, 4/1990 [Bau90]

Mittlerweile ist eine Vielzahl von Wärmedämm-Verbundsystemen auf dem Markt. Sie unterscheiden sich neben den verschiedenen Dämmstoffen auch durch die Art ihrer Befestigung und der Oberflächenbeschichtung (Abschnitt 2.2). Im Wesentlichen unterscheidet man Wärmedämm-Verbundsysteme nach Art ihrer Befestigung. Die Wahl der Befestigung hängt von der Untergrundbeschaffenheit, dem Dämmstoff und der Einbauhöhe über der Geländeoberfläche ab. Die Art der Befestigung ist so zu wählen, dass alle auftretenden Beanspruchungen sicher in den Untergrund abgeleitet werden können.

Der Nachweis der Brauchbarkeit (gemäß Musterbauordnung - MBO) von Wärmedämm-Verbundsystemen wird seit 1997 durch allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen (AbZ) für WDVS geregelt. Darin sind z.B. technische Angaben oder Verwendbarkeitsangaben sowie die Systemkomponenten festgelegt und benannt. Da die aufeinander abgestimmten Systemkomponenten nicht ausgetauscht werden dürfen, nennt man diese Zulassungen auch Systemzulassungen. Bei Verwendung von systemfremden Bestandteilen erlischt die Zulassung.

Wärmedämm-Verbundsysteme werden in der Bauregelliste B, Teil 1 [DIBt05] als Bausatz geführt und dürfen als solcher in den Verkehr gebracht werden. Aufgrund des Bauproduktengesetzes (BauPG) müssen sie eine CE-Kennzeichnung tragen.

Seit 2004 werden in Europa für Wärmedämm-Verbundsysteme "European Technical Approvals" (ETA's) erteilt. Sie enthalten eine Beurteilung der Standsicherheit, der Dauerhaftigkeit und der Gebrauchstauglichkeit auf Grundlage der durch die "European Organisation for Technical Approvals" (EOTA) erarbeiteten Leitlinie (Guideline) ETAG 004 für "External Thermal Insulation Composite Systems" (ETICS) [01]. Diese Zulassungsleitlinie wurde nach den Maßgaben der Bauproduktenrichtlinie erarbeitet. Um die Bauprodukte in den Verkehr und Handel zu bringen, ist der Teil II der "Liste der technischen Baubestimmungen" [05] zu berücksichtigen.

1.4 ZIELSETZUNG

Die Nachweise zur **Tragfähigkeit eines WDVS** werden seit März 2000 in der ETAG 004 [01] geregelt. Die in der Leitlinie enthaltenen Prüfverfahren und Beurteilungen beruhen auf Erfahrungswerten, die man in der langjährigen Beurteilung der Tragfähigkeit von Wärmedämm-Verbundsystemen gewonnen hat.

Durch die Entwicklung von neuartigen Dämmstoffen, Dübeln und Putzsystemen in den letzten Jahren, sind die in der Leitlinie genannten Prüfverfahren teilweise nicht anwendbar oder liefern keine aussagekräftigen Ergebnisse.

Zudem enthält die ETAG 004 [01] kein wissenschaftlich begründetes Sicherheitskonzept. Der charakteristische Widerstand des WDVS wird anhand eines Kleinstwertes aus 3 bzw. 5 Versuchen festgelegt. Die Zuordnung einer statistisch begründeten Zuverlässigkeit ist damit nicht möglich.

Ebenso ist derzeit die Annahme eines Materialsicherheitsfaktors für das WDVS eher als ein auf Erfahrungen beruhender Wert als eine aus Versuchsergebnissen abgeleitete Größe zu betrachten.

Im Rahmen dieser Arbeit wird die ETAG 004 in Bezug auf die Prüfung des Tragverhaltens von Dübeln für WDVS bei Windsogwirkung und der Dämmstoffeigenschaften kritisch betrachtet und ein neues Nachweiskonzept unter Berücksichtigung eines probabilistischen Sicherheitskonzeptes entwickelt.

Die Beurteilung der Tragfähigkeit eines Dübels (zur Befestigung von Wärmedämm-Verbundsystemen) im **Verankerungsgrund** ist durch die ETAG 014 [02] wesentlich zutreffender geregelt.

Die Auswertung der Versuche nach ETAG 014 erfolgt anhand bekannter Regeln der Statistik, um z. B. die charakteristische Tragfähigkeit zu bestimmen. Der so ermittelte charakteristische Wert der Tragfähigkeit wird anhand von Lastklassen für verschiedene Untergründe definiert.

Das Bindeglied zwischen dem Dübel im Verankerungsgrund und dem Wärmedämm-Verbundsystem ist der Dübelteller. Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Prüfung der **Dübeltellersteifigkeit** und **Dübeltellertragfähigkeit** entwickelt. Seit Juni 2007 sind diese

Kennwerte im Technical Report (TR 026) [04] geregelt. Die Tragfähigkeit des Dübeltellers wird ebenfalls anhand der bekannten statistischen Regeln bewertet.

In Bild 1.5 ist die Zuordnung der unterschiedlichen Leitlinien zur Beurteilung der einzelnen Komponenten eines Wärmedämm-Verbundsystems dargestellt.

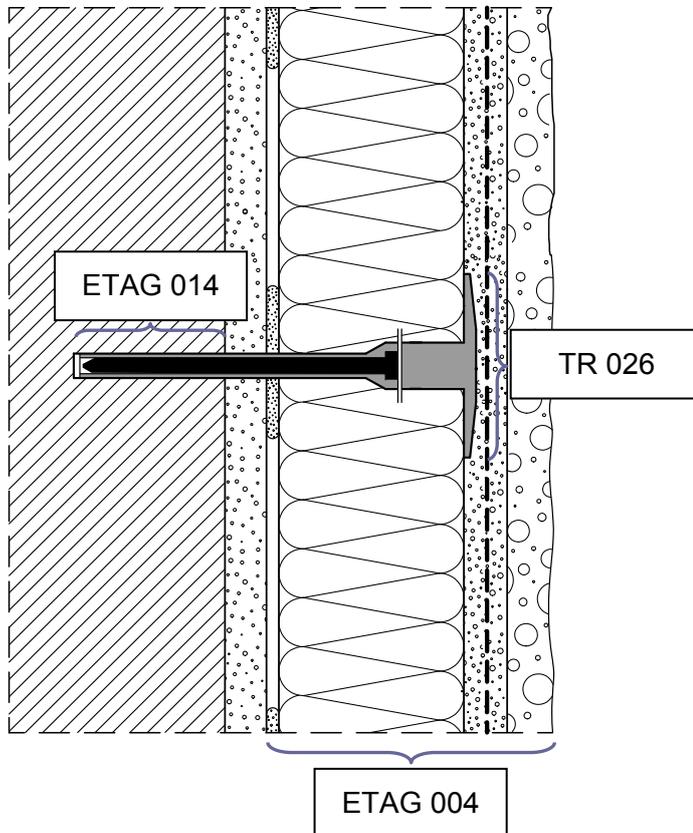


Bild 1.5 Zuordnung der entsprechenden Leitlinien

Bisher wird lediglich der Dübel zur Befestigung von Wärmedämm-Verbundsystemen durch die ETAG 014 [02] und dem TR 26 [04] nach bekannten statistischen Regeln beurteilt. Eine übergreifende, einheitliche und wissenschaftlich begründete Beurteilung für Wärmedämm-Verbundsysteme fehlt in der ETAG 004 [01].

Ein weiteres Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Nachweiskonzeptes für Wärmedämm-Verbundsysteme mit der Grundlage eines probabilistischen Sicherheitskonzeptes. Das Bemessungskonzept ist kompatibel zu der Beurteilung gemäß ETAG 014 und dem TR 26.

Die Qualität der Dämmplatten wird bisher über die Querkzugfestigkeit bestimmt. Diese Anforderung wurde 1995 empfohlen [Obe93] und bisher nicht weiter überprüft. In dieser Arbeit werden weitere Steifigkeits- und Festigkeitskennwerte der Dämmplatten untersucht. Die Auswirkung der Materialeigenschaften der Dämmplatten auf das Tragverhalten mit Dübeln bei Windsogeinwirkung wird überprüft, um eine fundierte Empfehlung an die Qualitätssicherung zu geben.

2 DÄMMSTOFFE UND WDV-SYSTEME IM ÜBERBLICK

2.1 DÄMMSTOFFE

2.1.1 Allgemeines – Bewertungskriterien von Dämmstoffen

Je nach dem in Frage kommenden Anwendungsbereich, besonders bezüglich der Temperaturbeanspruchung, müssen Wärmedämmstoffe, um ihre Funktion erfüllen zu können, einige wichtige Eigenschaften aufweisen. Neben den im Nachfolgenden genannten Anforderungen wie Wärmeleitfähigkeit, Temperaturbeständigkeit und Festigkeitseigenschaften sind auch ökologische und ökonomische Aspekte von Bedeutung.

WÄRMESCHUTZ:

Um eine möglichst hohe Wärmedämmung zu erreichen, sollte der Dämmstoff eine möglichst niedrige Wärmeleitfähigkeit aufweisen. Die Dämmstoffe werden daher nach dem Rechenwert der Wärmeleitfähigkeit λ_R in Wärmeleitfähigkeitsgruppen (WLG) eingestuft und gekennzeichnet. Die Zahlenwerte der Wärmeleitfähigkeitsgruppen werden durch drei Ziffern nach dem Komma des Rechenwertes gebildet, beispielsweise „040“ für λ_R von 0,040 W/(m·K). Die Gruppen sind in Stufen mit 005 gestaffelt.

Je niedriger die Wärmeleitfähigkeitsgruppe ist, desto höher ist der erreichbare Wärmeschutz. Da die Dicke der Dämmschicht oft aus baulichen Gründen begrenzt ist, sind Dämmstoffe mit einer niedrigen Wärmeleitfähigkeit oft von Vorteil.

SCHALLDÄMMUNG:

Eine hohe Rohdichte und ein möglichst niedriger dynamischer E-Modul der Dämmstoffe sorgen für eine gute Schalldämmung. Elastische Dämmstoffe weisen im Gegensatz zu steifen Dämmstoffen ein gutes Schalldämmmaß auf. Der Schallabsorptionsgrad α ist nach EN ISO 354/A1 [06] zu bestimmen.

BRANDVERHALTEN:

In den europäischen Dämmstoffnormen wird die Klassifizierung des Brandverhaltens nach DIN EN 13501-1 [29] gefordert (vergleiche dazu Abschnitt 2.2.1 - zum Brandschutz von Wärmedämm-Verbundsystemen). Nach deutscher Normung gemäß DIN 4102-1 [12] unterscheidet man zwischen **nichtbrennbaren** (Baustoffklasse A1 und A2) und **brennbaren** Baustoffen (Baustoffklasse B1, B2 und B3). Die brennbaren Baustoffe werden nach ihrem Entflammbarkeitsgrad in die Baustoffklassen B1 „schwerentflammbar“, B2 „normalentflammbar“ und B3 „leichtentflammbar“ unterteilt. Die Verwendung leichtentflammbarer Bau- oder Dämmstoffe ist im Allgemeinen bauaufsichtlich nicht zulässig. Das gleiche gilt für Dämmstoffe, die eine hohe Rauch- und Gasbildung beim Brennen erzeugen und Schadstoffe freisetzen.

WASSERDAMPFDIFFUSION:

Durch Diffusionsvorgänge im Bauteil können Tauwasserbildungen entstehen. Je diffusions-offener ein Dämmstoff ist, umso schneller kann die Feuchte durch ihn entweichen. Für Dämmstoffe wird die Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl μ bestimmt. Über diese Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl und die Schichtdicke des Dämmstoffs kann der Diffusionswiderstand eines Bauteils bestimmt werden. Ein rechnerischer Nachweis des Tauwasserschutzes eines Bauteilquerschnitts muss nach DIN 4108-3 [14] geführt werden.

WASSERAUFNAHME:

Feuchte Dämmstoffe verlieren an Dämmwirkung. Daher ist es wichtig, dass Dämmstoffe ein geringes Wasseraufnahmevermögen aufweisen. Dies wird über den Wasseraufnahmekoeffizienten ω [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2})$] bestimmt, welcher die von einem Probekörper je Flächeneinheit und Wurzel aus der Zeit aufgenommene Wassermenge beschreibt.

FESTIGKEITSEIGENSCHAFTEN:

Nach den Dämmstoffnormen ist eine Angabe der Druckfestigkeit und der Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene gefordert. Die Festigkeiten werden in Stufen angegeben, wobei kein Ergebnis kleiner als die angegebene Stufe sein darf. Weitere wichtige Festigkeitseigenschaften werden im Rahmen dieser Arbeit beschrieben.

TEMPERATURBESTÄNDIGKEIT:

Eine Temperaturbeständigkeit für Dämmstoffe wird in dem Bereich der Dimensionsstabilität gefordert. Dämmstoffe dürfen sich unter dem Einfluss von verschiedenen Temperaturen nicht ausdehnen oder schrumpfen, da sonst eine Schädigung der Fassade möglich ist.

VERFÜGBARKEIT VON ROHSTOFFEN:

Dämmstoffe werden zum einen aus endlichen oder knappen Ressourcen und zum anderen aus nachwachsenden oder wiederverwerteten Rohstoffen hergestellt. Dämmstoffe aus nachwachsenden oder wiederverwerteten Rohstoffen schonen endliche Ressourcen. Der Anbau von nachwachsenden Rohstoffen kann jedoch auch ökologische Schäden verursachen. Dämmstoffe die beispielsweise auf der Basis von Erdöl hergestellt werden sind kritisch zu betrachten, da Erdöl mit einer Verfügbarkeit von ca. 50 Jahren als sehr knapper Rohstoff gilt.

GESUNDHEIT- UND UMWELTSCHUTZ:

Bei der Verarbeitung von Dämmstoffen ist es wichtig, dass keine gesundheitsgefährdenden Schadstoffe sowie Fasern und Stäube freigesetzt werden. Vor allem der Zusatz von Flammschutzmitteln, Insektiziden und Fungiziden in organischen Dämmstoffen stellt eine Gefährdung der Gesundheit dar.

Lungengängige künstliche Mineralfasern sowie organische Fasern und Stäube stehen im Verdacht, beim Menschen Krebs zu erzeugen. Daher müssen Dämmstoffe mit dem Kanzerogenitätsindex KI oder anhand ihrer Biolöslichkeit als unbedenklich nachgewiesen werden. Fasern mit einem KI ≥ 40 gelten nach der Gefahrstoffverordnung als unbedenklich.

PRIMÄRENERGIEVERBRAUCH:

Der Primärenergiegehalt eines Dämmstoffes setzt sich aus dem Energieverbrauch zur Gewinnung der Rohstoffe, deren Transport und für die Herstellung zusammen. Anhand des Primärenergiegehaltes wird ermittelt, wie schnell sich Wärmeschutzmaßnahmen energetisch amortisieren. In den meisten Fällen amortisiert sich der Energieaufwand innerhalb weniger Monate, da sich mit dem Dämmstoff mehr Energie einsparen lässt, als bei seiner Herstellung verbraucht wird. Generell soll ein niedriger Primärenergiegehalt angestrebt werden.

DAUERHAFTIGKEIT:

Dämmstoffe sollten während ihrer Nutzungsdauer (Wärmedämm-Verbundsystem mindesten 25 Jahre) resistent gegen physikalische, chemische und biologische Einwirkungen sein.

An Dämmplatten gemäß der europäischen Normung DIN EN 13162 bis 13171 werden die zuvor genannten Anforderungen gestellt und müssen vom Hersteller mit einem Bezeichnungsschlüssel gekennzeichnet sein, der die in Tabelle 2.1 genannten Angaben enthalten muss:

Tabelle 2.1 Angaben für den Bezeichnungsschlüssel eines Dämmstoffes

Abkürzung des Dämmstoffes	
Nummer der Europäischen Norm	
Grenzmaß für die Dicke	Ti
Grenzmaß für die Länge	Li
Grenzmaß für die Breite	Wi
Grenzmaß für Rechtwinkligkeit	Si
Grenzmaß für die Ebenheit	Pi
Dimensionsstabilität bei definierten Temperatur- und Feuchtebedingungen	DS(TH)i
Biegefestigkeit	BSi
Druckspannung bei 10% Stauchung	CS10i
Dimensionsstabilität im Normklima	DS(N)i
Verformung bei Druck- und Temperaturbeanspruchung	DLT(i)5
Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene	TRi
Kriechverhalten	CC(i ₁ /i ₂ /y) σ _c
Langzeitige Wasseraufnahme	WL(T)i
Wasseraufnahme durch Diffusion	WD(V)i
Wasserdampfdurchlässigkeit	MUi oder Zi
Dynamische Steifigkeit	SDi
Zusammendrückbarkeit	CPi

Wobei „i“ für die entsprechende Klassen- oder Stufennummern, für „σ_c“ die Nenndruckspannung und für „y“ die Anzahl der Jahre anzugeben ist.

Beispiel für den Bezeichnungsschlüssel eines Mineralwolle-Produktes:

MW - EN 13162 - T6 - DS(T+) - CS1070 - TR15 - PL5100 - MU1 - CP3

Dieser Bezeichnungsschlüssel erleichtert es dem Anwender, die Dämmplatteneigenschaften zu überprüfen und sicher zu stellen, dass die Anforderungen der Zulassung eingehalten sind. Er muss außerdem auf dem Etikett der Dämmplattenverpackung, neben den Angaben zur Abmessung, Wärmeleitfähigkeit, Zulassungsnummer, Herstelldatum etc., wieder zu finden sein.

 [Herstelldatum, ggf. codiert]  Reg.Nr. XXX	Produktbezeichnung lt. Hersteller			Mineralwolle-Dämmplatte nach DIN V 4108-10 WAP-zg und Richtlinie FV WDV5 EAN Code 	
	Frei nach GefStoffV, ChemVerbotsV und EU-Richtlinie 97/69 (Anm.Q)				
	Abmessung XX mm x XX mm	Nennstärke XXmm			
	Nennwert Wärmedurchlass- widerstand R _D = XX m ² /K/W	Platten XX Stück	Fläche XX m ²		
Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit XX W/(m ² ·K) [DIN V 4108-4]	Brandverhalten Euroklasse A1 (DIN EN 13 501)				
MW-EN13162-T5-DS(T+)-CS(10)5-TR5-WL(P)-MU1 Hersteller: XXX					

Bild 2.1 Beispielticket für die Kennzeichnung von Dämmplatten

2.1.2 Anorganische Dämmstoffe

MINERALWOLLE gemäß DIN EN 13162 [19]

Mineralwolle ist ein Dämmstoff mit wolliger Beschaffenheit, der aus geschmolzenem Stein, Schlacke oder Glas hergestellt wird. Je nach Rohstoffen unterscheidet man so Glaswolle oder Steinwolle.

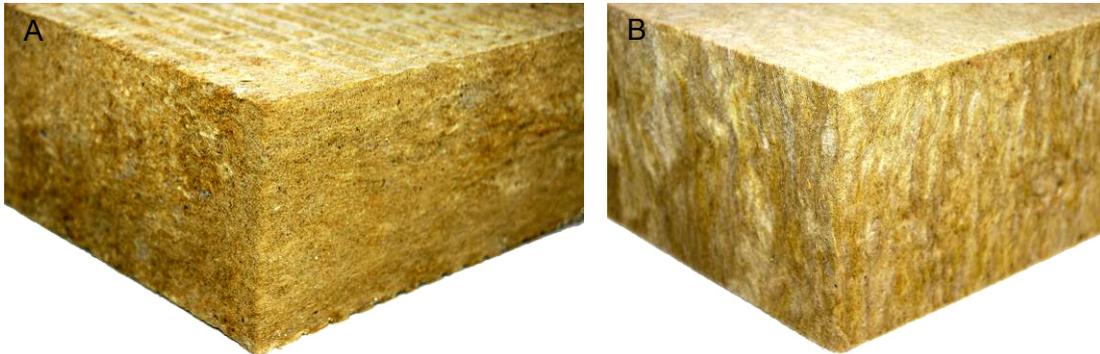


Bild 2.2 A: Mineralwolle-Dämmplatte mit liegenden Fasern
B: Mineralwolle-Lamelle mit stehenden Fasern

Glaswolle besteht aus Quarzsand, Soda, Dolomit, Kalkstein, Borax, Feldspat und Natriumsulfat. Es können bis zu 60 % Altglas beigemischt sein. Als Bindemittel kommen Phenol- und Harnstoff-Formaldehydharze zum Einsatz.

Steinwolle setzt sich aus Basalt oder Diabas sowie Kalkstein, Zement und Koks zusammen. Das Bindemittel besteht aus Phenol-Harnstoff-Formaldehydharz mit Ammoniakzusatz.

Die Rohstoffe werden eingeschmolzen und zu Fasern geschleudert, die durch die Bindemittel zusammen gehalten werden.

Mineralwolle ist diffusionsoffen und nichtbrennbar. Steinwolle besitzt meist einen höheren Schmelzpunkt als Glaswolle ($>1000^{\circ}\text{C}$). Mineralwollefasern sind gegen Schimmel, Fäulnis und Ungeziefer resistent. Die Dämmwirkung wird durch den Einschluss ruhender Luft in den Faserzwischenräumen erzeugt. Die Dämmfähigkeit und die Festigkeit wird jedoch durch Feuchte deutlich herabgesetzt.

Wärmeleitfähigkeitsgruppe	035 - 045
Rohdichte ρ [kg/m^3]	15 - 250
Wasserdampfdiffusionswiderstand	1 - 1,4
Wasseraufnahme	1,5 %
Querzugfestigkeit σ_{mt} [kN/m^2]	5 - 80
Druckfestigkeit	nicht definiert
Baustoffklasse	A1, A2, B1 (abhängig vom Kunstharzanteil)
Beständigkeit	resistent gegen Verrottung, Ungeziefer, Pilzbefall

Man unterscheidet Platten und Lamellen: Bei den Mineralwolle-**Platten** verlaufen die Fasern parallel zum Untergrund (Bild 2.2 und Bild 2.3). Mineralwolle-Platten mit einer Wärmeleitfähigkeit λ_{R} von $0,040 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ haben meist eine Rohdichte ρ von 100 bis $200 \text{ kg}/\text{m}^3$. Die Querzugfestigkeit σ_{mt} beträgt mindestens $15 \text{ kN}/\text{m}^2$. Mineralwolle-Platten mit einer Wärmeleitfähigkeit λ_{R} von $0,035 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ weisen eine Rohdichte ρ von 80 bis $100 \text{ kg}/\text{m}^3$ auf. Die Querzugfestigkeit σ_{mt} beträgt hier nur mindestens $5 \text{ kN}/\text{m}^2$. Das macht eine Verdübelung

beider Dämmplattentypen in jedem Fall erforderlich. Mineralwolle darf für Gebäudehöhen bis 100 m eingesetzt werden, da sie nicht brennbar (Baustoffklasse A nach DIN 4102 [12]) ist.

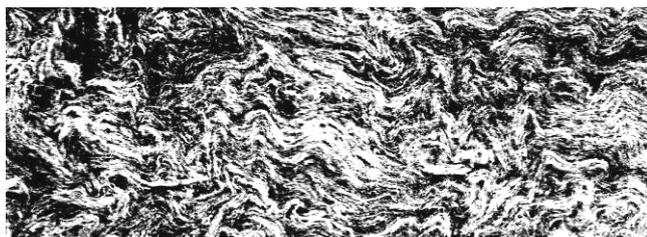


Bild 2.3 Faserverlauf bei Mineralwolle-Platten

Bei der Mineralwolle-**Lamelle** laufen die Fasern senkrecht zum Untergrund (Bild 2.2 und Bild 2.4). Die Platte hat eine Wärmeleitfähigkeit λ_R von 0,040 W/(m·K) bei einer Rohdichte ρ von 70 bis 90 kg/m³. Aufgrund der "Bürstenstruktur" beträgt die Querkzugfestigkeit σ_{mt} mindestens 80 kN/m². Dies macht eine Verdübelung bei klebegeeignetem und tragfähigem Untergrund überflüssig. Die Lamelle gibt es auch ein- oder zweiseitig beschichtet. Dabei entfällt die sonst erforderliche Vorspachtelung vor dem eigentlichen Kleberauftrag.



Bild 2.4 Faserverlauf bei Mineralwolle-Lamellen

Mineralwolle muss frei von Krebsverdacht sein (vgl. Abschnitt 2.1 - Faser und Stäube). Den Nachweis, dass eine Mineralwolle diesen Kriterien genügt, erkennt man am RAL-Gütezeichen Mineralwolle.

SCHAUMGLAS gemäß DIN EN 13167 [24]

Schaumglas ist ein fester, geschlossenzelliger Dämmstoff, welcher aus silikatischem Glas durch Zugabe von Treibmitteln (Kohlenstoffpulver) werksmäßig aufgeschäumt wird.



Bild 2.5 Schaumglas

Der Rohstoff Quarzsand wird mit Zusätzen wie Calciumcarbonat, Feldspat, Eisenoxyd etc. zu Glas geschmolzen. Dieses Glas wird abgekühlt, zerkleinert und zu Pulver gemahlen, welchem Kohlenstoffpulver zugemischt wird. Beim Erhitzen in Öfen über 1000°C oxydiert der Kohlenstoff unter Bildung von Gasblasen, die den Aufschäumprozess auslösen.

Die Herstellung von Schaumglas erfolgt in Blöcken, aus denen die Platten in gewünschter Dicke geschnitten werden. Die Dämmwirkung wird durch eingeschlossene, ruhende Gase in den hermetisch abgeschlossenen Zellen erzeugt.

Schaumglas besitzt eine hohe Druckfestigkeit, ist nichtbrennbar, nimmt kein Wasser auf und ist frostbeständig nach DIN 52104 [32].

Wärmeleitfähigkeitsgruppe	040 - 060
Rohdichte ρ [kg/m ³]	100 – 165
Wasserdampfdiffusionswiderstand	dampfdicht
Wasseraufnahme	0 %
Querzugfestigkeit σ_{mt} [kN/m ²]	nicht definiert
Druckfestigkeit [kN/m ²]	700 – 1.700 (hoch)
Baustoffklasse	A1 (unkaschiert)
Beständigkeit	resistent gegen Verrottung, Ungeziefer, Pilzbefall sowie gegen Säuren und organische Lösemittel

Aufgrund seiner Sprödigkeit kann Schaumglas keine Punktlasten aufnehmen und muss deshalb plan aufliegen. Es ist ein idealer Ersatzstoff für Polystyrol im Außenbereich jedoch teurer.

Bei der Herstellung entsteht in geringen Mengen Schwefelwasserstoff aus dem Schwefelanteil im Kohlenstoff, der in den Zellen verbleibt. Bei der Verarbeitung können daher geringe Mengen Schwefelwasserstoff freigesetzt werden, wobei ein spezifischer Geruch entstehen kann.

PERLITE (EPB) gemäß DIN EN 13169 [26]

Blähperlit ist ein leichter, körniger Dämmstoff, der aus natürlich vorkommendem vulkanischem Gestein hergestellt wird, indem durch Hitzeeinwirkung eine Zellstruktur gebildet wird.



Bild 2.6 Perlitdämmplatten

Der Hauptbestandteil Rohperlit ist ein glasartiges Gestein, das aus unterseeischer Vulkanaktivität entstanden ist. Als Bindemittel werden anorganische und/oder organische Fasern und Kunstharze verarbeitet.

Blähperlit wird durch schockartiges Erhitzen und Expandieren von fein gemahlene Perlitkörnern bei Temperaturen von mehr als 1000°C hergestellt. Dabei dehnt sich das im Stein enthaltene Wasser aus und bläht diesen bis auf 20-fache seines ursprünglichen Volumens auf.

Die Dämmwirkung wird durch kleinste Luftzellen erzeugt, die durch das Expandieren des Rohperlits entstehen. Durch ihre offenporige Oberfläche können sich die Perlitkörner untereinander gut verzahnen.

Wärmeleitfähigkeitsgruppe	045 - 070
Rohdichte ρ [kg/m ³]	150 - 210
Wasserdampfdiffusionswiderstand	5
Wasseraufnahme	gering (bei Hydrophobierung)
Querzugfestigkeit σ_{mt} [kN/m ²]	80 - 100
Druckfestigkeit [kN/m ²]	100 - 400 (mittel)
Baustoffklasse	A2, B1, B2
Beständigkeit	resistent gegen Verrottung, Ungeziefer, Pilzbefall

Dämmplatten aus Perlit sind temperaturbeständig, druckfest und hochbelastbar. Sie besitzen jedoch nur ein mäßiges Wärmedämmvermögen.

MINERALSCHAUM (bisher nicht genormt)

Mineralschaum ist ein fester Dämmstoff, welcher aus Zement mit Protein als Porenbildner hergestellt wird. Dieser Dämmstoff ist bisher nicht genormt aber mit einer ETA zugelassen.



Bild 2.7 Mineralschaumdämmplatten

Der Hauptbestandteil Portlandzement wird mit fein gemahlenem Natursand und Wasser vermischt und mittels eines Proteinschaums poriert. Durch Abbinden des Zementes stabilisiert sich die in Formen gefüllte Masse. Nach dem Erhärten werden die so entstandenen Blöcke in die gewünschte Plattengröße geschnitten und in Härtekesseln dampfgehärtet. Der Härtevorgang erfolgt mit Satttdampf von etwa 16 bar Druck und 200 °C Temperatur. Während des Härtevorgangs zersetzen sich die im Proteinschaum enthaltenen Substanzen. Die so entstandenen feinen Luftporen sorgen für die gute Dämmwirkung.

Wärmeleitfähigkeitsgruppe	045 - 070
Rohdichte ρ [kg/m ³]	130
Wasserdampfdiffusionswiderstand	5
Wasseraufnahme	5 %
Querzugfestigkeit σ_{mt} [kN/m ²]	70 - 85
Druckfestigkeit [kN/m ²]	360 (mittel)
Baustoffklasse	A1, A2
Beständigkeit	resistent gegen Verrottung, Ungeziefer, Pilzbefall

Aufgrund ihrer Sprödigkeit können Mineralschaumplatten keine Punktlasten aufnehmen. Der Untergrund muss daher eben sein, Unebenheiten von > 1 cm müssen ausgeglichen werden.

Da Mineralschaumplatten frei von Kunststoffen, Fasern und gesundheitsbedenklichen Inhaltsstoffen sind, gilt dieser Dämmstoff als ökologisch vorteilhaft und weist eine sehr gute Ökobilanz auf.

2.1.3 Organische Dämmstoffe aus synthetischen Rohstoffen

EXPANDIERTES POLYSTYROL (EPS) gemäß DIN EN 13163 [20]

Expandiertes Polystyrol ist ein fester Dämmstoff mit Zellstruktur, der aus verschweißtem, geblähtem Polystyrol hergestellt wird und eine geschlossenzellige, luftgefüllte Struktur hat.

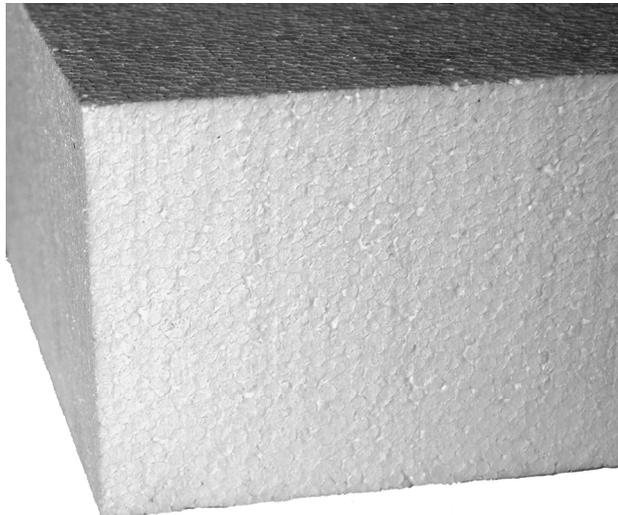


Bild 2.8 EPS-Dämmplatten

Ausgangsstoff zur Herstellung von expandiertem Polystyrol ist Styrol. Dies ist eine farblose, leicht süßlich riechende Flüssigkeit, die leicht zu Polystyrol polymerisiert. Diesem Polystyrolgranulat wird beim Vorschäumen von expandiertem Polystyrol das Treibmittel Pentan bei einer Temperatur von 90 °C zugesetzt. Durch die Temperatur verdampft das Treibmittel Pentan und die Polystyrolgranulate blähen sich um etwa das zwanzig bis fünfzigfache auf. Die vorgeschäumten Perlen werden bei einer zweiten Heißdampfbehandlung mit einer Temperatur zwischen 110 °C und 120 °C zu Blöcken aufgeschäumt, aus denen die Platten in der gewünschten Dicke geschnitten werden.

Expandiertes Polystyrol ist ein überwiegend geschlossenzelliger Dämmstoff, er besteht zu ca. 2 % aus Polystyrol und zu 98 % aus Luft. Dadurch haben die Dämmplatten eine sehr gute Dämmwirkung und sind extrem leicht. Sie sind unverrottbar, wenig elastisch und feuchtebeständig. EPS ist nicht UV-beständig, die Oberfläche vergilbt und versprödet unter Sonneneinstrahlung.

Wärmeleitfähigkeitsgruppe	035 - 040
Rohdichte ρ [kg/m ³]	15 - 30
Wasserdampfdiffusionswiderstand	20 - 100
Wasseraufnahme	2 - 5 % (gering)
Querzugfestigkeit σ_{mt} [kN/m ²]	100 - 150
Druckfestigkeit [kN/m ²]	70 - 260 (mittel)
Baustoffklasse	B1
Beständigkeit	resistent gegen Verrottung, Ungeziefer, Pilzbefall sowie gegen Laugen und nicht oxidierende Säuren; nicht resistent gegen Lösemittel und UV-Strahlung

Aufgrund der Anforderungen des Bauordnungsrechts wird EPS mit Flammschutzmitteln (1 % Bromverbindungen) versehen.

Das hauptsächlich für WDV-Systeme verwendete Material EPS 040 und EPS 035 darf bis zu einer Gebäudehöhe von ca. 22 m (Hochhausgrenze) eingesetzt werden. EPS 030 wird als Perimeterdämmung für den erdberührten Bereich eingesetzt.

Um eine bessere Schalldämmung bei Wärmedämm-Verbundsystemen zu erzielen, gibt es die so genannten elastifizierten EPS-Dämmplatten. Diese Dämmplatten weisen eine deutlich geringere dynamische Steifigkeit und eine hohe Rohdichte auf. Die Elastifizierung erfolgt durch Stauchung der Platten, wobei das Stoffgefüge zum Teil zerstört wird. Die Querkzugfestigkeit der elastifizierten EPS-Dämmplatten wird dadurch fast um die Hälfte herab gesetzt.

Zur Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit können den Polystyrolgranulaten Grafitpartikel zugefügt werden. Diese Partikel wirken wie winzige Infrarotabsorber und -reflektoren in den Zellen, die die Wärmeleitfähigkeit der Dämmplatten weiter herab setzen. Somit kann bei grauem EPS mit einer wesentlich geringeren Rohdichte die gleiche Dämmleistung erzielt werden. Die Wärmeleitfähigkeitsklasse 035 erreicht man bei grauem EPS mit einer Rohdichte von 15 kg/m^3 und bei Standard-EPS mit einer Rohdichte von ca. 23 kg/m^3 .

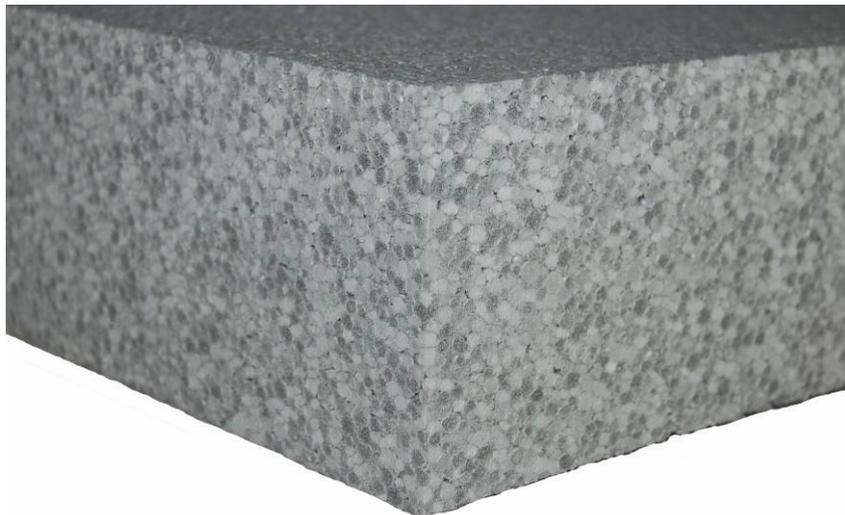


Bild 2.9 graue EPS-Dämmplatten

Zu beachten ist das Schwindverhalten von Dämmplatten aus Polystyrol nach der Herstellung durch das Ausdiffundieren herstellungsbedingter Feuchte und Treibmittelgase in dem ersten Monat nach Herstellung. Um Risse in dem auf das WDVS aufgebrauchten Putzsystem zu vermeiden, ist unbedingt darauf zu achten, dass nur ausreichend abgelagerte Dämmstoffplatten verwendet werden, bei denen das Nachschwinden schon weitgehend abgeschlossen ist [Czi07].

EXTRUDIERTER POLYSTYROLSCHAUM (XPS) gemäß DIN EN 13164 [21]

Extrudierter Polystyrolschaum ist ein harter Dämmstoff aus Schaumkunststoff, der durch Blähen und Extrudieren von Polystyrol hergestellt wird und der eine homogene, geschlossenzellige Struktur aufweist.



Bild 2.10 XPS-Dämmplatten

Zur Herstellung von XPS wird Polystyrolgranulat in einem Extruder aufgeschmolzen und mit einem speziellen Treibmittel homogen vermischt. Über eine Breitschlitzdüse wird die Polystyrol-Treibmittelschmelze zu einem Schaumstoffstrang ausgebildet, der danach eine Kühlzone durchläuft. Nach dem Abkühlen wird der Strang zu Platten gesägt. Auf den Deckflächen der Platten bleibt eine Schaumhaut erhalten, die für die Anwendung in Wärmedämm-Verbundsystemen entfernt wird. Die Platte hat dann eine leicht raue Oberfläche oder sie erhält eine waffelförmige Prägung.

Wärmeleitfähigkeitsgruppe	035 - 040
Rohdichte ρ [kg/m ³]	25 - 45
Wasserdampfdiffusionswiderstand	80 - 200
Wasseraufnahme	0,1 - 0,5 % (sehr gering)
Querzugfestigkeit σ_{mt} [kN/m ²]	300 - 400
Druckfestigkeit [kN/m ²]	150 - 700 (mittel)
Baustoffklasse	B1, B2
Beständigkeit	resistent gegen Verrottung, Ungeziefer, Pilzbefall sowie gegen Laugen und nicht oxidierende Säuren; nicht resistent gegen Lösemittel und UV-Strahlung

Extrudierter Polystyrol-Hartschaum ist ein homogener, geschlossenzelliger Schaumstoff und nimmt nur geringe Mengen an Feuchtigkeit auf. XPS ist druckfest und elastisch, verrottungsfest und alterungsbeständig, jedoch nicht UV-beständig.

POLYURETHAN HARTSCHAUM (PUR) gemäß DIN EN 13165 [22]

Polyurethan Hartschaum ist ein harter oder halbharter Schaumkunststoff auf der Basis von Polyurethan, der eine überwiegend geschlossenzellige Struktur aufweist.



Bild 2.11 PUR-Dämmplatten

Polyurethan Hartschaum basiert auf dem Rohstoff Erdöl, aus dem Polyisocyanat und Polyole gewonnen werden. Aus diesen flüssigen Grundstoffen entsteht durch chemische Reaktion und unter Zusatz des Treibmittels Pentan Polyurethan Hartschaum.

Die Dämmplatten werden im Blockschaumverfahren hergestellt, wobei das Reaktionsgemisch aus einem Mischkopf in eine Blockform aufgeschäumt wird. Nach dem Aushärten werden die Blöcke in Platten geschnitten.

Wärmeleitfähigkeitsgruppe	035 - 040
Rohdichte ρ [kg/m ³]	25 - 45
Wasserdampfdiffusionswiderstand	40 - 200
Wasseraufnahme	ca. 3 % (gering)
Querzugfestigkeit σ_{mt} [kN/m ²]	90 - 120
Druckfestigkeit [kN/m ²]	> 100 (mittel)
Baustoffklasse	B2
Beständigkeit	resistent gegen Verrottung, Ungeziefer, Pilzbefall sowie gegen Laugen und nicht oxidierende Säuren; nicht resistent gegen Lösemittel und UV-Strahlung

Polyurethan Hartschaum ist ein überwiegend geschlossenzelliger, harter Dämmstoff. Er ist alterungsbeständig, schimmel- und fäulnisresistent, verrottet nicht und nimmt kaum Feuchtigkeit auf. Polyurethan ist jedoch nicht UV-beständig und versprödet unter Sonneneinstrahlung.

PHENOLHARZSCHAUM (PF) gemäß DIN EN 13166 [23]

Phenolharzschaum ist ein harter Dämmstoff aus Schaumkunststoff, der durch seine geschlossene Zellstruktur eine sehr geringe Wärmeleitfähigkeit aufweist.



Bild 2.12 Phenolharzschaum-Dämmplatten

Phenolharzschaum wird aus Phenolharzen durch Zugabe eines Treibmittels und eines Härters mit oder ohne Zufuhr äußerer Wärme erzeugt. Die Herstellung erfolgt im Doppelbandverfahren, wobei das Reaktionsgemisch aus mehreren Düsen ausströmt und zwischen zwei Deckschichten auf der Doppelbandanlage verteilt wird. Als Deckschichten wird Glasvlies eingesetzt. Das aufschäumende Gemisch verklebt mit der unteren und der oberen Deckschicht und durchläuft Walzen, die die Dicke der herzustellenden Dämmplatten vorgeben. Nach dem Aushärten werden die gewünschten Dämmplattengrößen zugeschnitten.

Phenolharzschaum ist ein überwiegend geschlossenzelliger, harter Schaumstoff und besitzt sehr gute Wärmedämmeigenschaften. Er ist resistent gegen Verrottung, bietet gute Brandschutzeigenschaften, ist jedoch nicht UV-beständig.

Wärmeleitfähigkeitsgruppe	022 - 025
Rohdichte ρ [kg/m ³]	> 35
Wasserdampfdiffusionswiderstand	35
Wasseraufnahme	ca. 3 % (gering)
Querzugfestigkeit σ_{mt} [kN/m ²]	80
Druckfestigkeit [kN/m ²]	120 - 150 (mittel)
Baustoffklasse	B1, B2
Beständigkeit	resistent gegen Verrottung, Ungeziefer, Pilzbefall sowie gegen Laugen und nicht oxidierende Säuren; nicht resistent gegen Lösemittel und UV-Strahlung

2.1.4 Natürliche Dämmstoffe

EXPANDIERTER KORK (ICB) gemäß DIN EN 13170 [27]

Expandierte Korkdämmplatten sind ein vorgeformtes Produkt aus Korkgranulat, das durch Erhitzen unter Druck expandiert und ausschließlich durch sein aus den Zellwänden des Korks austretendes Bindemittel gebunden wird.



Bild 2.13 Kork-Dämmplatten

Die Baumrinde der Korkeiche wird überwiegend im Mittelmeerraum (besonders in Portugal) abgebaut. Die Korkeiche lässt sich alle 9 bis 10 Jahre schälen, ohne dass der Baum dabei Schaden nimmt. Kork ist alterungsbeständig, schalldämmend und hochbelastbar. Er besitzt eine gute Wärmespeicherfähigkeit sowie gute Wärmedämmeigenschaften und ist atmungsaktiv. Kork ist verrottungs- und fäulnisresistent.

Backkorkdämmplatten werden aus Granulat von gemahlener, geschälter Korkrinde hergestellt, das durch Erhitzen unter Druck expandiert und durch die korceigenen Harze (Suberin) gebunden wird. Aus den so entstandenen Blöcken werden die Dämmplatten geschnitten. Die Dämmplatten sind hart oder halbhart, aber leicht und bieten einen guten Wärmespeicher.

Wärmeleitfähigkeitsgruppe	045 - 060
Rohdichte ρ [kg/m ³]	100 - 220
Wasserdampfdiffusionswiderstand	5 - 10
Wasseraufnahme	ca. 10 %
Querzugfestigkeit σ_{mt} [kN/m ²]	80
Druckfestigkeit [kN/m ²]	< 100 (mittel)
Baustoffklasse	B2
Beständigkeit	resistent gegen Verrottung, Schädlinge, Pilzbefall

Kork ist alterungsbeständig, verrottungs- und fäulnisresistent, schalldämmend und hochbelastbar. Er besitzt gute Wärmedämmeigenschaften.

HOLZWOLLE (WW) gemäß DIN EN 13168 [25]

Holzwolle-Platten sind ein hartes Dämmprodukt, das aus loser Holzwolle besteht, die mit einem mineralischen Bindemittel gebunden wird.



Bild 2.14 Holzwolle-Dämmplatten

Holzwolle-Dämmplatten bestehen aus langfaserigem, gehobeltem Fichten- oder Kiefernholz. Durch Magnesit oder Zement wird die Holzwolle zu steifen Platten gebunden. Durch die mineralischen Bindemittel wird die Holzwolle schwer entflammbar. Eine Imprägnierung schützt die Wolle vor Verrottung.

Holzfasern sind dampfdiffusionsoffen und wirken feuchteregulierend. Die Dämmplatten weisen eine relativ hohe Wärmeleitfähigkeit auf.

Wärmeleitfähigkeitsgruppe	065 - 090
Rohdichte ρ [kg/m ³]	360 - 570
Wasserdampfdiffusionswiderstand	2 - 5
Wasseraufnahme	ca. 13 %
Querzugfestigkeit σ_{mt} [kN/m ²]	nicht definiert
Druckfestigkeit [kN/m ²]	150 - 200
Baustoffklasse	B1
Beständigkeit	resistent gegen Schädlinge

HOLZFASERN (WF) gemäß DIN EN 13171 [28]

Holzfaserdämmplatten sind werkmäßig hergestellte Wärmedämmstoffe aus Holzfasern, gegebenenfalls unter Hinzufügen von Bindemitteln und/oder Zusatzmitteln.



Bild 2.15 Holzfaser-Dämmplatten

Zur Herstellung von Holzfaser-Dämmplatten oder Weichfaserplatten wird fast ausschließlich Restholz verwendet, das zerkleinert und zerfasert wird. Unter Druck bei Temperaturen von ca. 380 °C werden die Holzfasern gepresst, wobei eine Verfilzung und Verklebung der Fasern durch die holzeigenen Harze stattfindet, es werden keine weiteren Bindemittel zugegeben. Durch die Zugabe von Ammoniumsulfat wird der Flammschutz erhöht und die Dämmplatte gegen Schimmelpilzbefall geschützt.

Holzfaserdämmplatten werden erst seit Anfang der 1990er Jahre großmaschinell gefertigt.

Wärmeleitfähigkeitsgruppe	040 - 070
Rohdichte ρ [kg/m ³]	120 - 190
Wasserdampfdiffusionswiderstand	5 - 10
Wasseraufnahme	ca. 15 %
Querzugfestigkeit σ_{mt} [kN/m ²]	8 - 30
Druckfestigkeit [kN/m ²]	100 - 180
Baustoffklasse	B2
Beständigkeit	resistent gegen Schädlinge, jedoch nicht feuchtebeständig

Holzfaserdämmplatten weisen gute Wärmedämm- und Schalldämmeigenschaften auf. Sie sind resistent gegen Schädlinge und Pilzbefall, jedoch nicht feuchte beständig.

SCHILF

Dämmplatten aus Schilf sind bauaufsichtlich nicht geregelt und genormt, werden aber schon seit Jahrhunderten als Baustoff eingesetzt. Früher wurden dünne Schilfmatten als Putzträger an Holzbalkendecken benutzt.



Bild 2.16 Schilf-Dämmplatten

Schilf-Dämmplatten eignen sich als dämmende Putzträgerplatte und werden vor allem für die Außenwanddämmung (WDVS) eingesetzt.

Bei der Herstellung werden eine Vielzahl parallel neben- und übereinander liegende Schilfrohrhalme mechanisch zusammengepresst und durch verzinkte Stahldrähte zu festen aber biegsamen Platten von 2 bis 10 cm Stärke verbunden.

Schilf hat nur mäßige Wärmedämmeigenschaften.

Wärmeleitfähigkeitsgruppe	055
Rohdichte ρ [kg/m ³]	ca. 129
Wasserdampfdiffusionswiderstand	2
Wasseraufnahme	gering
Querzugfestigkeit σ_{mt} [kN/m ²]	nicht bekannt
Druckfestigkeit [kN/m ²]	nicht bekannt
Baustoffklasse	B2
Beständigkeit	nicht Wasser saugend und weitestgehend fäulnisresistent

Schilf ist von Natur aus feuchteresistent und weist kein Schwind- und Quellverhalten auf, daher bleibt das Schilf unbehandelt um die natürlichen Eigenschaften nicht zu verlieren. Sein hoher Kieselsäureanteil wirkt brandhemmend und es treten keine Faserbildungen auf.

Schilf steht unter Naturschutz und ist für eine Nutzung im größeren Maßstab nicht geeignet. Die Hersteller beziehen das Schilf überwiegend aus dem Donaudelta, dem Plattensee in Ungarn, Polen und Österreich.

2.1.5 Spezialdämmung

VAKUUMGEDÄMMTE ISOLATIONSPANEELE (VIP) / VAKUUMDÄMMUNG

Vakuumdämmplatten werden in der Regel aus einem Kern aus gepresstem Pulver und einer gasdichten Umhüllung (Metallverbundfolie) hergestellt.



Bild 2.17 VIP-Dämmplatten

Dem Dämmkern aus mikroporöser Kieselsäure werden Infrarottrübungsmittel zur Minimierung des Wärmestrahlungsdurchgangs beigegeben. Der Dämmkern ist nicht brennbar. Um die Langzeitstabilität des Vakuums zu verbessern werden Getter (gasabsorbierende Stoffe) zugesetzt.

In einer Vakuumkammer wird der, mit einer gas- und wasserdampfdichten Folie umhüllte, Pulverkern evakuiert und gasdicht versiegelt.

Dämmkerne aus Kieselsäurematerial sind nicht brennbar, langlebig und hitzebeständig. Durch den sehr geringen Innendruck werden sehr niedrige Wärmeleitfähigkeitswerte erreicht.

Wärmeleitfähigkeitsgruppe	002 - 008
Rohdichte ρ [kg/m ³]	150 - 180
Wasserdampfdiffusionswiderstand	dicht
Wasseraufnahme	0
Querzugfestigkeit σ_{mt} [kN/m ²]	nicht definiert
Druckfestigkeit [kN/m ²]	160
Baustoffklasse	B2
Beständigkeit	Lebensdauer bis zu 50 Jahre, so lange die Verbundfolie nicht beschädigt wird

Die Vakuumdämmplatte darf nicht beschädigt werden (z.B. durch Bohren, Schneiden, Nageln), da sonst der Innendruck steigt und die geringe Wärmeleitfähigkeit verloren geht.

Durch die geringe Wärmeleitfähigkeit kann mit einer sehr geringen Dämmstoffdicke ein hoher Wärmeschutz erreicht werden.

2.2 WÄRMEDÄMM-VERBUNDSYSTEME

2.2.1 Allgemeines – Anforderungen an Wärmedämm-Verbundsysteme

Wärmedämm-Verbundsysteme dienen vor allem zum Wärme- und Feuchteschutz von Gebäuden. Dabei sind sie mechanischen Beanspruchungen sowie physikalischen Einflüssen ausgesetzt und müssen die Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit dauerhaft erfüllen.

STANDSICHERHEIT:

Gemäß der Musterbauordnung (MBO) muss die Standsicherheit einer Außenwandkonstruktion insgesamt sowie des WDVS im Speziellen dauerhaft gewährleistet sein. Beanspruchungen aus Eigengewicht, Wind, Temperatur und Feuchte sind nachzuweisen (vergleiche Abschnitt 3).

WÄRMESCHUTZ:

Die Anforderungen an den winterlichen und sommerlichen Wärmeschutz sind in der DIN 4108 - 02 [13], sowie in der Energieeinsparverordnung (EnEV) festgelegt.

Der erzeugte Wärmeschutz hängt im Wesentlichen von dem verwendeten Dämmstoff und dessen Wärmeleitfähigkeit ab sowie der Dicke (vgl. Abschnitt 2.1.1). Gängige Dämmstoffdicken liegen zwischen 80 mm und 200 mm. Mittlerweile werden aber auch Systeme mit Dämmstoffdicken von 400 mm zugelassen.

Bei der Ermittlung des Wärmedurchgangskoeffizienten von Wärmedämm-Verbundsystemen ist darauf zu achten, ob das System verdübelt ist. Hier ist der Einfluss der punktuellen Wärmebrücke infolge der mechanischen Befestigungsmittel (Dübel) zu berücksichtigen. Gemäß ETAG 004, Abschnitt 5.1.6.1 muss der Wärmedurchgangskoeffizient eines Wärmedämm-Verbundsystem um $\Delta\chi = \chi_p \cdot n$ erhöht werden. Der Chi-Wert χ_p wird für Dübel gemäß dem TR 25 [03] ermittelt und angegeben. Systeme bei denen der Dübel in die Dämmplatten versenkt wird und mit einem Dämmstoffrondeil abgedeckt wird, mindern diese Problematik deutlich, sind jedoch mit einem erhöhten Arbeitsaufwand verbunden.

FEUCHTE- UND WITTERUNGSSCHUTZ:

Gemäß DIN 4108 - 3 [14] ist für eine Außenwandkonstruktion der Nachweis auf TAUWASSER-BILDUNG infolge von Dampfdiffusion zu führen. Durch eine außenseitige Dämmmaßnahme wird die Temperatur einer Außenwand erheblich angehoben. Dadurch ist eine Tauwasserbildung auf der Wandinnenseite nicht mehr möglich. Auf der Wandaußenseite können geringe Mengen Tauwasser anfallen, die jedoch während der Verdunstungsperiode im Sommer wieder ausdiffundieren können.

Durch ein Wärmedämm-Verbundsystem sind Außenwände gegen SCHLAGREGEN und SPRITZWASSER geschützt. Die Putzschicht eines Wärmedämm-Verbundsystems muss daher einen möglichst geringen Wasseraufnahmekoeffizienten aufweisen und darf zulässige Rissbreiten nicht überschreiten. Durch hohe Wasseraufnahmekoeffizienten und Risse in der Putzschicht von Wärmedämm-Verbundsystemen kann Feuchtigkeit in das System eindringen und eine Verminderung der Haftzugfestigkeit sowie der Frost-Tau-Wechsel-Beständigkeit zur Folge haben.

SCHALLSCHUTZ:

Die Anforderungen an den Schallschutz gegen Außenlärm sind in der DIN 4109 [16] geregelt. Das Schalldämmmaß einer Außenwand hängt, ebenso wie der Wärmeschutz, im Wesentlichen von dem verwendeten Dämmstoff ab. Die dynamische Steifigkeit und die flächenbezogene Masse der Putzschicht sind wichtige Faktoren. Elastische Dämmstoffe mit einem schweren

Putzsystem sind für das Schalldämmmaß von Vorteil. Steife Dämmstoffe in Verbindung mit einem Dünnputzsystem können sich negativ auswirken. Ebenso kann die Verdübelung eines WDV-S zu einer Verminderung der Schalldämmung führen. Die Dübel versteifen das System und wirken nicht nur als „Wärmebrücken“ sondern auch als „Schallbrücken“.

BRANDSCHUTZ:

Für den Brandschutz sind die Anforderungen nach DIN 4102 -1 [12], der Musterbauordnung (MBO), sowie den Richtlinien für die Verwendung brennbarer Baustoffe im Hochbau (RbBH) zu beachten. Die Einstufung von Wärmedämm-Verbundsystemen in Baustoffklassen ist abhängig vom Dämmstoff und dem Putzsystem. Organisch gebundene Putzsysteme werden in der Regel der Baustoffklasse B1 zugeordnet, Silikat- und Mineralputze der Baustoffklasse A. Wärmedämm-Verbundsysteme mit Dämmplatten der Baustoffklasse A und einem Putzsystem der Baustoffklasse B1 werden der Baustoffklasse B1 zugeordnet und dürfen nur bis zur Hochhausgrenze und nicht für öffentliche Gebäude eingesetzt werden. Wärmedämm-Verbundsysteme der Baustoffklasse A dürfen für alle Gebäudetypen und oberhalb der Hochhausgrenze eingesetzt werden.

Gemäß der europäischen Normung nach DIN EN 13501 -1 [29] werden differenzierte Klassifizierungen hinsichtlich der Brennbarkeit von Baustoffen vorgenommen (vgl. Tabelle 2.2) und zusätzlich die Rauchentwicklung und das brennende Abtropfen/Abfallen klassifiziert. Dabei wird die Rauchentwicklung in die Klassen s1, s2 und s3 eingestuft und die Klassifizierung des brennenden Abtropfen/Abfallen mit d0, d1 und d2 angegeben.

Tabelle 2.2 Klassifizierung des Brandverhaltens von Wärmedämm-Verbundsystemen nach europäischer und deutscher Normung

Brandverhalten	Europäische Klasse nach DIN EN 13501 -1 [29]	Deutsche Klasse nach DIN 4102 -1 [12]
nichtbrennbar ohne brennbare Bestandteile	A1	A1
nichtbrennbar mit brennbaren Bestandteilen	A2 *	A2
schwerentflammbar kein Brandbeitrag	A2 *	B1
schwerentflammbar sehr begrenzter Brandbeitrag	B *	
schwer entflammbar begrenzter Brandbeitrag	C *	
normalentflammbar hinnehmbarer Brandbeitrag	D *	B2
normalentflammbar hinnehmbares Brandverhalten	E *	
leichtentflammbar keine Brandschutzleistung	F *	B3

* in Abhängigkeit von der Rauchentwicklung (s = smoke) und dem brennenden Abtropfen (d = droplet)

Bei Gebäuden, die mit Polystyrol-Hartschaum-Dämmplatten verkleidet sind und direkt an Nachbargebäude grenzen, muss ein 1 m breiter Streifen aus nichtbrennbarem Material zur Haus-trennwand als Brandbarriere angeordnet werden. Gemäß den bauaufsichtlichen Zulassungen muss bei Polystyrol-Hartschaum-Dämmplatten mit einer Dicke von über 100 mm oberhalb jeder Wandöffnung im Bereich von Stürzen ein mindestens 200 mm breiter und mindestens 300 mm

seitlich überstehender (links und rechts der Öffnung) nichtbrennbarer Mineralfaser-Lamellendämmstreifen (Baustoffklasse DIN 4102-A1) vollflächig angeklebt werden. Werden hierbei auch Laibungen gedämmt, ist für die Dämmung der horizontalen Laibung im Sturzbereich ebenfalls nichtbrennbarer Mineralfaser-Dämmstoff (Baustoffklasse DIN 4102-A1) zu verwenden. Die Mineralfaser-Lamellendämmstreifen sollen im Falle eines Brandes das Wegschmelzen des Polystyrols verhindern.

DAUERHAFTIGKEIT:

Wärmedämm-Verbundsysteme sind auf eine Nutzungsdauer von 25 Jahren ausgelegt, wobei erwartet wird, dass die tatsächliche Lebensdauer unter normalen Nutzungsbedingungen wesentlich länger sein kann. Als dauerhaft und gebrauchstauglich gelten Wärmedämm-Verbundsysteme, deren Putzschicht unter Langzeitverhalten, insbesondere unter hygrothermischen Wechselbeanspruchungen keine Risse, Blasenbildungen, Abplatzungen oder Verfärbungen aufweisen. Zur Langzeitbeständigkeit der Glasfasergewebe ist eine Alkali-resistenz gefordert, dies gilt ebenso für den Kunststoff der Dübel. Metallteile von Dübeln müssen gegen Korrosion geschützt sein. Die Dübelkopfauslenkung infolge hygrothermischer Längenänderungen des Putzes ist begrenzt. Dämmstoffe müssen gegen Durchfeuchtung geschützt werden, da gerade Mineralfaser-Dämmstoffe unter Feuchteeinwirkung an Festigkeit verlieren und keinen ausreichenden Wärmeschutz mehr aufweisen.

UNTERGRUNDBESCHAFFENHEIT:

Der Untergrund, auf dem Wärmedämm-Verbundsysteme befestigt werden, muss tragfähig, frei von Verschmutzungen und ausreichend eben sein.

Im Wesentlichen unterscheidet man die folgenden Systemvarianten in der Verankerung zum Untergrund, dem Dämmstoff und der Beschichtung (Bild 2.18).

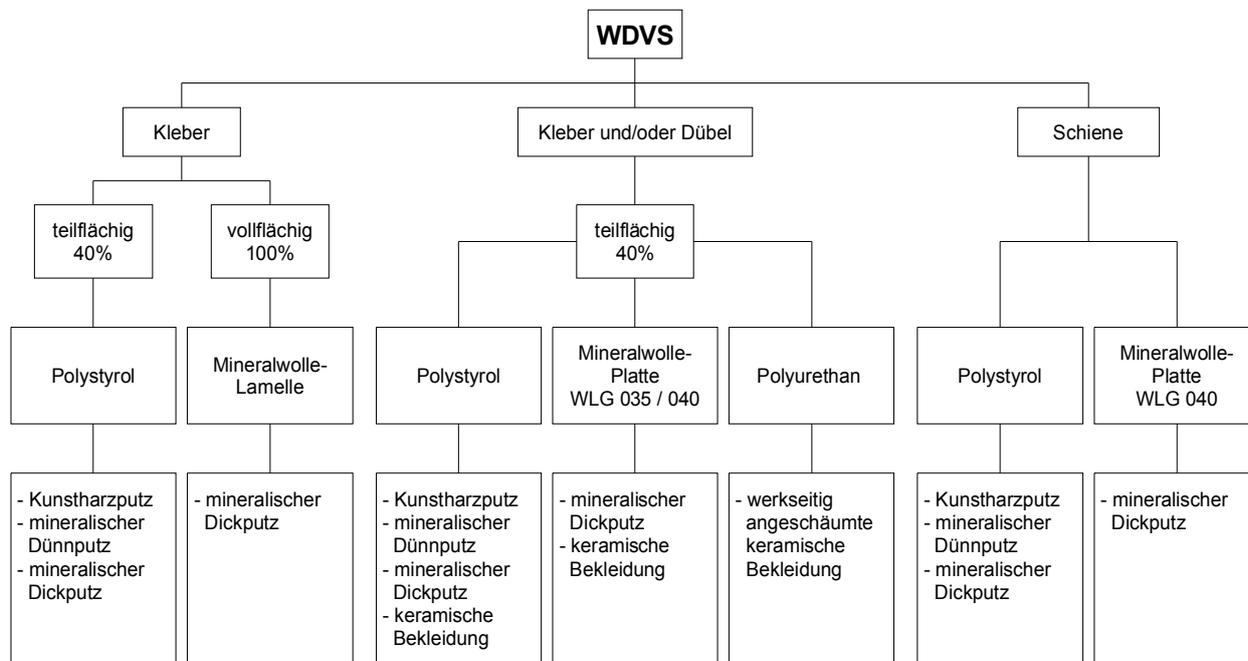


Bild 2.18 Übersicht über Wärmedämm-Verbundsysteme [Czi07]

2.2.2 Wärmedämm-Verbundsystem mit Verklebung der Dämmplatten

Nur Wärmedämm-Verbundsysteme mit einer Dämmschicht aus Polystyrol-Hartschaum-Dämmplatten oder Mineralwolle-Lamellen dürfen, bei einer Gebäudehöhe unterhalb der Hochhausgrenze, ausschließlich verklebt werden. Die Befestigung zum Untergrund nur mit einer Verklebung muss in der Zulassung des Systems beschrieben sein.

Der Untergrund muss tragfähig, frei von Verschmutzungen und ausreichend eben sein. Bei Altbauten müssen Verschmutzungen durch Staub, Algen, Moose, abblätternde Farbschichten sowie lose Putzteile entfernt werden. Unebenheiten von über 1 cm/m sind auszugleichen. Wenn vor der Montage Zweifel an der Tragfähigkeit des Untergrundes bestehen, ist die Abreißfestigkeit des Untergrundes nachzuweisen.

WDVS MIT TEILFLÄCHIGER VERKLEBUNG DER DÄMMPLATTEN

Die Verklebung von Polystyrol-Hartschaum-Dämmplatten erfolgt nach der Randwulst-Punkt-Methode (Bild 2.19). Dabei wird die Dämmplatte mit einer an den Rändern umlaufenden Wulst versehen und in Plattenmitte zwei Mörtelbatzen gesetzt. Durch die Randverklebung soll eine Verschiebung der Dämmplattenränder infolge Temperaturänderungen oder Restschwinden sowie ein Aufschüsseln der Dämmplatten verhindert werden. Somit wird eine Zwangsbeanspruchung der Putzschicht im Stoßbereich der Dämmplatten erheblich reduziert.

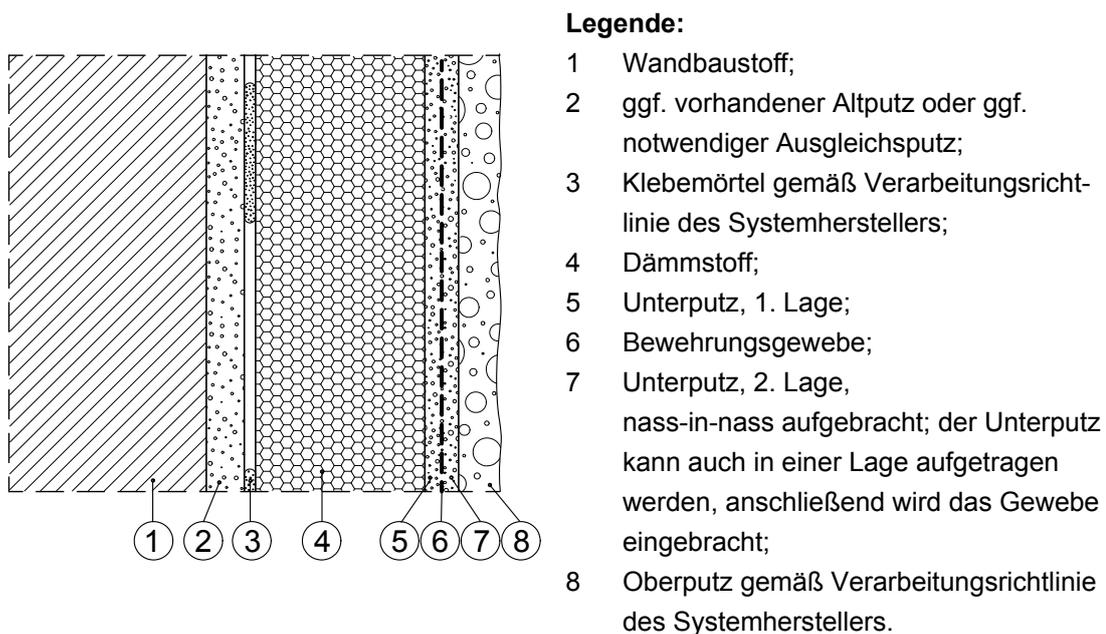


Bild 2.19 Aufbau eines WDVS mit teilflächiger Verklebung

Um eine dauerhafte Verklebung zu gewährleisten, muss gemäß ETAG 004 [01] der Untergrund für eine teilflächige Verklebung eine Mindestabreißfestigkeit von $\sigma_{HZ} \geq 0,8 \text{ N/mm}^2$ aufweisen.

Auf Polystyrol-Hartschaum-Dämmplatten wird in der Regel ein mineralisches kunstharz-modifiziertes Putzsystem (Marktanteil 90%), seltener ein reines Kunstharzsystem (Marktanteil 10%) aufgebracht. Bei den mineralischen Putzsystemen kommen sowohl Dünn- als auch Dickputzsysteme zur Anwendung [Czi07].

WDVS MIT VOLLFLÄCHIGER VERKLEBUNG VON MINERalfASER-LAMELLEN

Bei Mineralwolle-Lamellen verlaufen die Fasern senkrecht zum Untergrund, wodurch eine Querkzugfestigkeit von $\sigma_{mt} \geq 80 \text{ kN/m}^2$ erzielt werden kann (vgl. Abschnitt 2.1.2 – Mineralwolle). Eine reine Verklebung zum Untergrund zur Aufnahme der Windsogkräfte ist durch die sehr hohe Querkzugfestigkeit ausreichend. Die Verklebung erfolgt hier vollflächig (100%) (Bild 2.20). Um eine ausreichende Haftung des Klebers auf der Lamelle zu gewährleisten, sind die Mineralfaser-Lamellen werkseitig vorbeschichtet und es muss eine Vorspachtelung erfolgen.

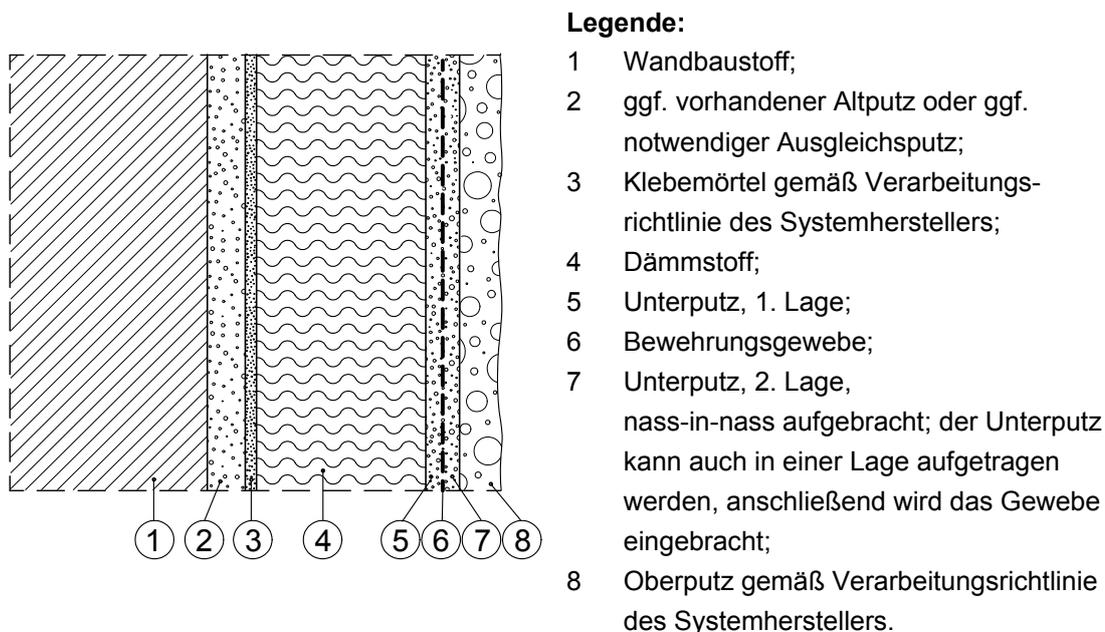


Bild 2.20 Aufbau eines WDVS mit vollflächiger Verklebung

Um eine dauerhafte Verklebung zu gewährleisten, muss der Untergrund für eine vollflächige Verklebung eine Mindestabreißfestigkeit von $\sigma_{HZ} \geq 0,3 \text{ N/mm}^2$ aufweisen.

In Randbereichen eines Gebäudes oberhalb 20 m mit erhöhter Windsogbelastung ist eine zusätzliche Verdübelung (Dübelteller $\geq 140 \text{ mm}$) erforderlich (vgl. Abschnitt 2.2.3).

Auf die Mineralfaser-Lamellen wird in der Regel ein mineralisches, kunstharzmodifiziertes Putzsystem aufgebracht [Czi07].

2.2.3 Wärmedämm-Verbundsystem mit Verklebung und Dübelung der Dämmplatten

Bei verdübelten Wärmedämm-Verbundsystemen unterscheidet man eine konstruktive Verdübelung und eine statisch notwendige Verdübelung. Die konstruktive Verdübelung wird vor allem zur Sicherung des Systems eingesetzt, wenn der Klebemörtel noch nicht völlig ausgehärtet ist und zur Sicherung im Falle eines Brandes.

Eine Verdübelung des Systems wird notwendig, wenn die Oberfläche des Untergrundes nicht ausreichend tragfähig ist oder das Eigengewicht des Wärmedämm-Verbundsystems zu groß ist. Die Verklebung dient hier zur Ausrichtung der Dämmplatten und zur Übertragung von Schubkräften in den Untergrund (Konsoltragmodell, vgl. Abschnitt 3.1.1). Eine Mindestanforderung an die Abreißfestigkeit des Untergrundes wird vor der Montage der Dämmplatten nicht gefordert. Unebenheiten von über 2 cm/m sind auszugleichen.

Die Auswahl des Dübels hängt von dem Material des Untergrundes und der Dicke der Dämmschicht ab. Gemäß ETAG 014 [02] werden spezielle Anforderungen an Dübel für Wärmedämm-Verbundsysteme und an den zu verankernden Untergrund gestellt. Die Dübellänge ist so zu wählen, dass die erforderliche Verankerungstiefe h_{ef} im Untergrund unter Berücksichtigung der Toleranzen immer gewährleistet ist.

Die Dübel müssen so gesetzt werden, dass der Dübelteller bündig mit der Dämmplattenoberfläche abschließt, Bild 2.22. Wird der Dübel nicht tief genug gesetzt, kann der Putz nicht gleichmäßig auf die Dämmplatte aufgetragen werden. Bei zu tief gesetzten Dübeln kann es zu so genannten Dübelkopfabzeichnungen auf der Fassade kommen. Diese Verfärbungen (Algenbildung) der Fassade entstehen durch erhöhte Temperaturen der punktuellen Wärmebrückenwirkung der Dübel und der höheren Saugfähigkeit der größeren Putzdicken in den Bereichen der zu tief gesetzten Dübel. Systeme, bei denen der Dübel in die Dämmplatten versenkt wird und mit einer Dämmstoffrondelle abgedeckt wird, mindern diese Problematik deutlich, sind jedoch mit einem erhöhten Arbeitsaufwand verbunden, Bild 2.24.

Die erforderliche Anzahl der zu setzenden Dübel ist der jeweiligen Systemzulassung zu entnehmen und resultiert aus den Windsogbeanspruchungen eines Gebäudes gemäß DIN 1055-4 [09]. Als Mindestanzahl sind 4 Dübel/m² für ein Wärmedämm-Verbundsystem gefordert, in den meisten Fällen werden jedoch 6 Dübel/m² gesetzt. Im Folgenden ist ein Beispiel (Bild 2.21) zur Dübelanordnung mit 6 Dübeln/m² dargestellt, bei einer Dämmplattenfläche von 0,5 m². Verzichtet man auf den Dübel in Plattenmitte, so erhält man eine Dübelanordnung mit 4 Dübeln/m².

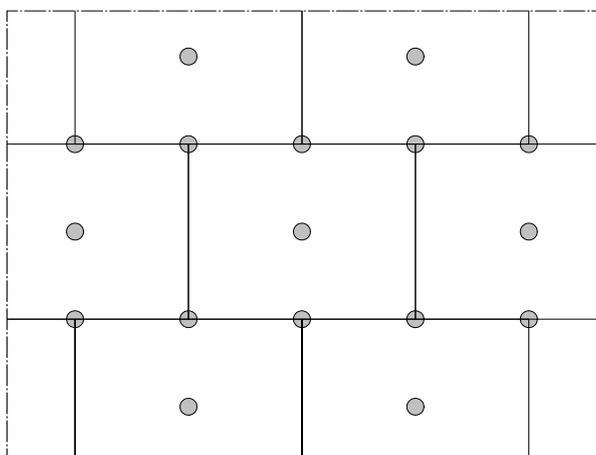
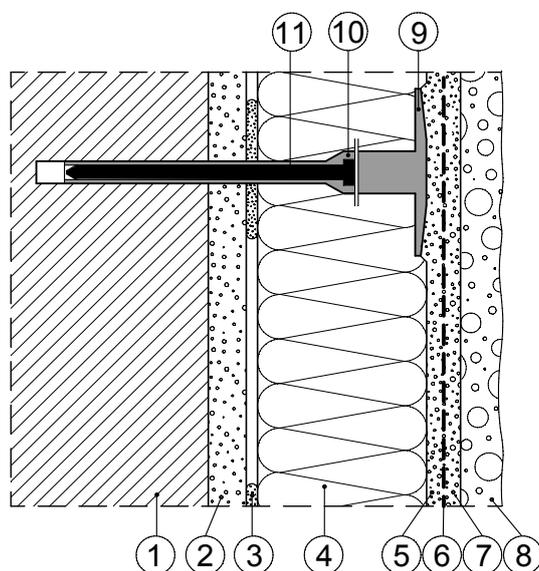


Bild 2.21 Beispiel für eine Dübelanordnung mit 6 Dübel/m²

WDVS MIT GEKLEBTEN UND GEDÜBELTEN DÄMMPLATTEN

Die Verklebung der Dämmplatten erfolgt hier ebenfalls nach der Randwulst-Punkt-Methode, (vgl. Abschnitt 2.2.2). Zusätzlich zu der Verklebung wird das System verdübelt, wobei die Dübel direkt auf die Dämmplatte (Bild 2.22) als auch durch das Gewebe gesetzt werden können. Bei der Dübelung durch das Gewebe kann die Dübelmenge pro m² reduziert werden.



Legende:

- 1 Wandbaustoff;
- 2 Altputz oder Ausgleichputz;
- 3 Klebemörtel gemäß Verarbeitungsrichtlinie des Systemherstellers;
- 4 Dämmstoff;
- 5 Unterputz, 1. Lage;
- 6 Bewehrungsgewebe;
- 7 Unterputz, 2. Lage,
nass-in-nass aufgebracht; der Unterputz kann auch in einer Lage aufgetragen werden, anschließend wird das Gewebe eingebracht;
- 8 Oberputz gemäß Verarbeitungsrichtlinie des Systemherstellers;
- 9 Dübelteller;
- 10 Dübelschaft;
- 11 Spreizelement.

Bild 2.22 Aufbau eines WDVS mit Klebung und Dübelung, hier dargestellt mit Teilflächenverklebung am Untergrund und Dübelung unter dem Bewehrungsgewebe

WDVS MIT GEKLEBTEN UND GEDÜBELTEN DÄMMPLATTEN MIT AUFSTECKBAREM DÜBELTELLER

Mineralwolle-Lamellen müssen ab einer Gebäudehöhe von 20 m zusätzlich verdübelt werden, da hier eine erhöhte Windsogbeanspruchung vorliegt (vgl. Abschnitt 2.2.2). Da durch die "Bürstenstruktur" der Dämmplatte, ein Dübelteller von \varnothing 60 mm durch die Dämmplatte durchstanzen würde, werden hier zusätzliche Teller mit \varnothing 140 mm verwendet, die auf den Dübel mit einem Teller \varnothing 60 mm aufgesteckt werden (Bild 2.23). Durch die Öffnungen in dem zusätzlichen Teller kann sich der Putz mit dem Teller "verkrallen" und die Lasten aus Windsog und Schub können über die Putzscheibe mit den verbundenen Dübeln in den Untergrund geleitet werden.

Dübelteller mit \varnothing 90/110 mm werden bei Mineralwolle-Dämmplatten mit einer geringen Querkzugfestigkeit eingesetzt, um auch hier die Kräfte aus der Putzscheibe direkt in den Untergrund zu leiten.

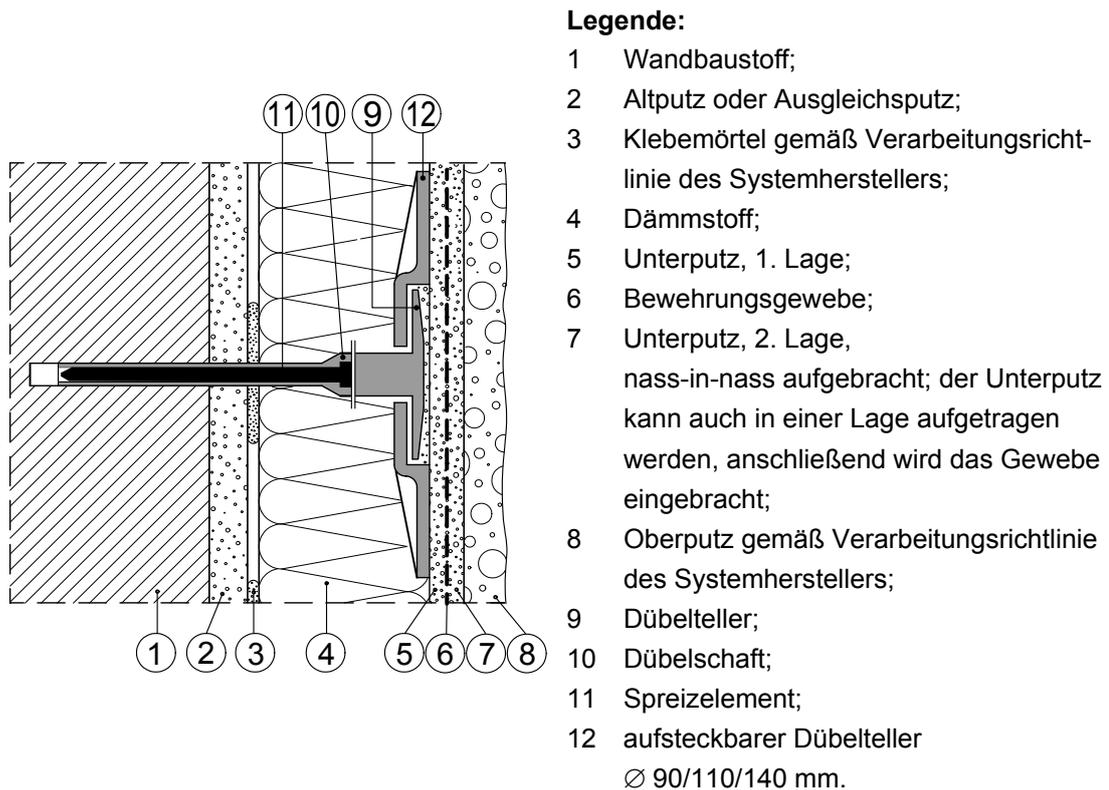
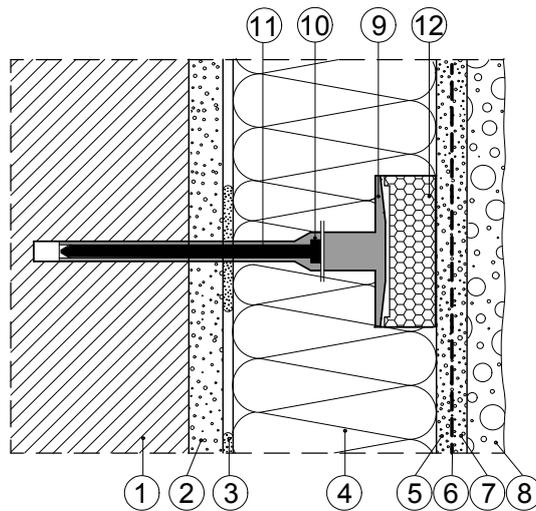


Bild 2.23 Aufbau eines WDVS mit Klebung und Dübelung, hier dargestellt mit Teilflächenverklebung am Untergrund und Dübelung mit aufsteckbarem Dübelteller

WDVS MIT GEKLEBTEN UND GEDÜBELTEN DÄMMPLATTEN MIT VERSENKTEM DÜBELKOPF

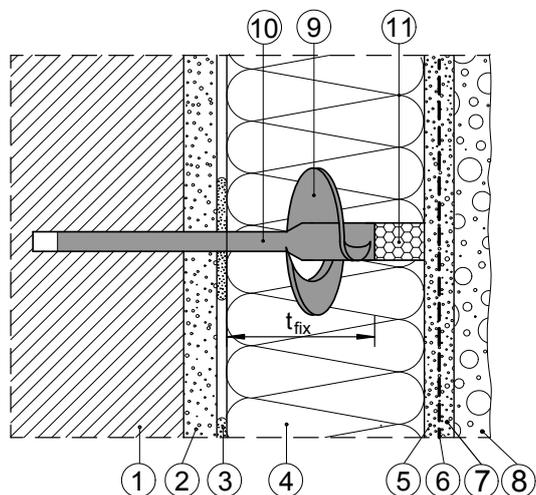
Um die Wirkung von Wärmebrücken zu reduzieren und um eine ebene Dämmstoffoberfläche zu schaffen, können Dübel auch in den Dämmstoff versenkt werden. Dazu wird der Dübel mit einem speziellen Setzwerkzeug gesetzt und anschließend mit einer Dämmstoffrondelle abgedeckt (Bild 2.24). Diese Setzmethode kann jedoch nicht bei allen Dämmstoffen angewendet werden, da die Tragfähigkeit der Dämmplatte durch das Versenken herabgesetzt wird.

Zu den versenkten Dübeln zählen auch die neu entwickelten Dübel mit einer Dämmstoff-Wendel (Helix) als Dübelkopf. Die Dämmstoff-Wendel schneidet sich selbständig in den Dämmstoff ein und fixiert so den Dämmstoff. (Bild 2.26) Das Bohrloch im Dämmstoff wird mit einem Stopfen verschlossen. Die Dübellänge ist unabhängig von den Dämmstoffdicken, da der Dübel immer mit dem gleichen Abstand zum Untergrund t_{fix} gesetzt wird.

**Legende:**

- 1 Wandbaustoff;
- 2 Altputz oder Ausgleichputz;
- 3 Klebemörtel gemäß Verarbeitungsrichtlinie des Systemherstellers;
- 4 Dämmstoff;
- 5 Unterputz, 1. Lage;
- 6 Bewehrungsgewebe;
- 7 Unterputz, 2. Lage,
nass-in-nass aufgebracht; der Unterputz kann auch in einer Lage aufgetragen werden, anschließend wird das Gewebe eingebracht;
- 8 Oberputz gemäß Verarbeitungsrichtlinie des Systemherstellers;
- 9 Dübelteller;
- 10 Dübelschaft;
- 11 Spreizelement;
- 12 Dämmstofffrondell.

Bild 2.24 Aufbau eines WDV-Systems mit Klebung und Dübelung, hier dargestellt mit Teilflächenverklebung am Untergrund und Dübelung mit versenktem Dübelkopf

**Legende:**

- 1 Wandbaustoff;
- 2 Altputz oder Ausgleichputz;
- 3 Klebemörtel gemäß Verarbeitungsrichtlinie des Systemherstellers;
- 4 Dämmstoff;
- 5 Unterputz, 1. Lage;
- 6 Bewehrungsgewebe;
- 7 Unterputz, 2. Lage,
nass-in-nass aufgebracht; der Unterputz kann auch in einer Lage aufgetragen werden, anschließend wird das Gewebe eingebracht;
- 8 Oberputz gemäß Verarbeitungsrichtlinie des Systemherstellers;
- 9 Dämmstoff-Wendel (Helix);
- 10 Dübelschaft;
- 11 Dämmstoffstopfen.

Bild 2.25 Aufbau eines WDV-Systems mit Klebung und Dübelung, hier dargestellt mit Teilflächenverklebung am Untergrund und Dübelung mit versenkter Dämmstoff-Wendel

WDVS MIT PUTZTRÄGERPLATTEN

Um ein Wärmedämm-Verbundsystem besonders stoßfest auszubilden, wird auf die Dämmplatte eine Putzträgerplatte verklebt und verdübelt, anschließend wird auf diese Platte das Putzsystem aufgetragen (Bild 2.26). Auch zur Sanierung von schadhafte Wärmedämm-Verbundsystemen kann dieser Aufbau eingesetzt werden.

Im Bereich der Plattenstöße ist das Putzsystem jedoch anfällig für Rissbildungen.

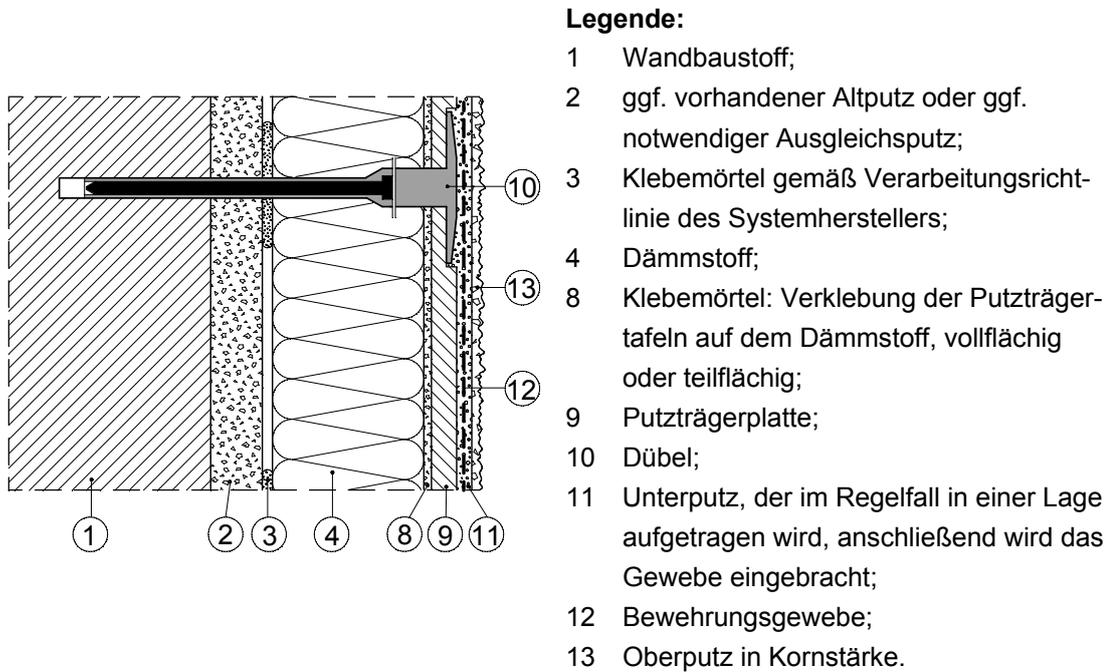


Bild 2.26 Aufbau eines WDVS mit Putzträgerplatte sowie Klebung und Verdübelung

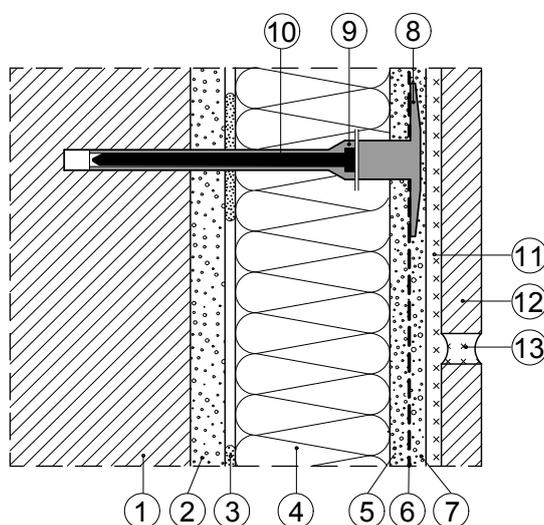
2.2.4 Wärmedämm-Verbundsystem mit keramischer Bekleidung

WDVS mit keramischer Bekleidung sind stets zu verkleben und zusätzlich durch das Gewebe zu verdübeln. Da die keramische Bekleidung ein relativ hohes Eigengewicht hat, wird so eine Verbindung zwischen der Bekleidung und dem Untergrund geschaffen, unabhängig von der Verbindung über den Dämmstoff.

Der Untergrund muss tragfähig, frei von Verschmutzungen und ausreichend eben sein. Die Abreißfestigkeit des Untergrundes ist nachzuweisen, wenn Zweifel an der Tragfähigkeit der Oberfläche des Untergrundes bestehen. Um eine dauerhafte Verklebung zu gewährleisten, muss der Untergrund für eine teilflächige Verklebung eine Mindestabreißfestigkeit von $\sigma_{HZ} \geq 0,8 \text{ N/mm}^2$ aufweisen.

WDVS MIT KERAMISCHER BEKLEIDUNG

Die Verklebung der Dämmplatten erfolgt hier im Randwulst-Punkt-Verfahren (vgl. Abschnitt 2.2.2). Die Dübelung wird durch das Gewebe gesetzt. Das Verkleben der keramischen Bekleidung erfolgt im Floating-Buttering-Verfahren, wobei sowohl der Untergrund als auch die Fliese mit Mörtel beschichtet werden. Dadurch wird eine wesentlich höhere Haftzugfestigkeit der keramischen Bekleidung zum Unterputz erzielt (Bild 2.27). Eine zeitliche Verzögerung zum Ansetzen sollte jedoch vermieden werden, da eine Hautbildung auf den Mörteln zu einer Reduzierung der Haftzugfestigkeit führen kann.



Legende:

- 1 Wandbaustoff;
- 2 ggf. vorhandener Altputz oder ggf. notwendiger Ausgleichsputz;
- 3 Klebemörtel gemäß Verarbeitungsrichtlinie des Systemherstellers;
- 4 Dämmstoff;
- 5 Unterputz, 1. Lage;
- 6 Bewehrungsgewebe;
- 7 Unterputz, 2. Lage, nass-in-nass aufgebracht; der Unterputz kann auch in einer Lage aufgetragen werden, anschließend wird das Gewebe eingebracht;
- 8 Dübelteller;
- 9 Dübelschaft;
- 10 Dübelschraube;
- 11 Dünnbettmörtel;
- 12 Keramische Bekleidung;
- 13 Fugenmörtel.

Bild 2.27 Aufbau eines WDVS mit keramischer Bekleidung sowie Klebung und Verdübelung

FUGENLEITSYSTEM (nur mit Dämmplatten aus Hartschaum)

Bei Fugenleitsystemen wird die keramische Bekleidung direkt auf die Dämmplatte geklebt, wobei die Dämmplatten Profilierungen aufweisen, auf die die Ziegel- bzw. Klinkerriemchen abgestützt werden (Bild 2.28). Das Eigengewicht der Riemchen wird so über den Dämmstoff abgetragen. Daher dürfen hier nur sehr feste Dämmplatten aus Polystyrol-Hartschaum eingesetzt werden.

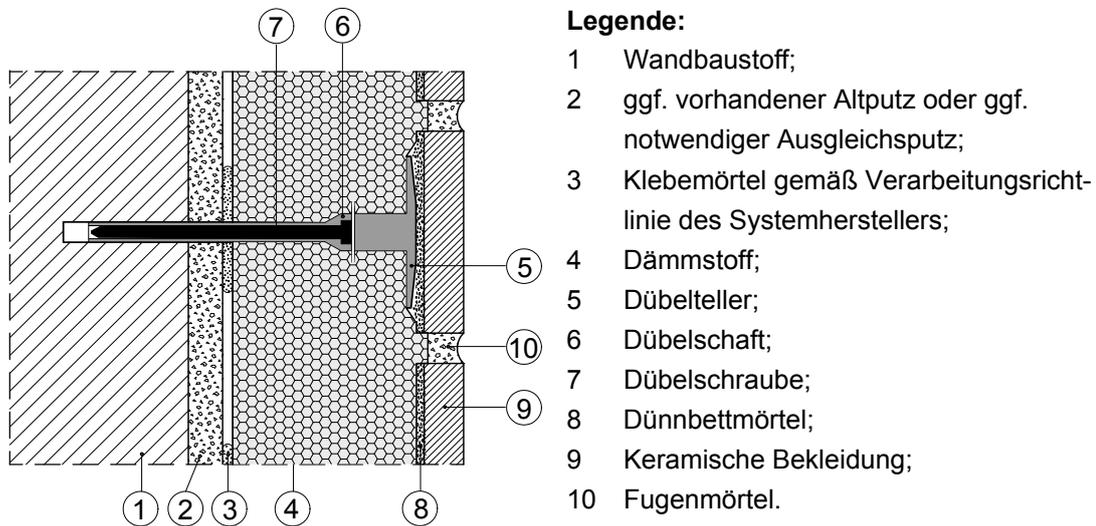


Bild 2.28 Aufbau eines WDV-Systems mit keramischer Bekleidung im Fugenleitsystem sowie Klebung und Verdübelung

RIEMCHENBEKLEIDUNG MIT WERKSEITIG ANGESCHÄUMTER DÄMMUNG – WDV- FERTIGTEILE

Bei den WDV-Fertigteilen handelt es sich um werkseitig vorgefertigte Verbundelemente aus Polyurethan-Hartschaum mit Riemchenbekleidung. Dabei werden die Riemchen direkt hinterschäumt. Die Fugenbereiche werden mit Quarzsand bestreut, um eine Haftbrücke für die spätere baustellenseitige Verfugung zu gewährleisten.

Die Fertigteilelemente werden zunächst mit PUR-Schaum teilflächig verklebt und anschließend über integrierte Dübelteller zum Untergrund verankert. Vor dem Ansetzen des nächsten Elementes werden im Fugenbereich Nut und Feder mit PUR-Schaum ausgeschäumt. Für Fenster und Eckbereiche gibt es spezielle Elemente (Bild 2.29).

Die Fugenriemchen über den Plattenstößen werden mit einem Zweikomponentenkleber angebracht (Bild 2.30).

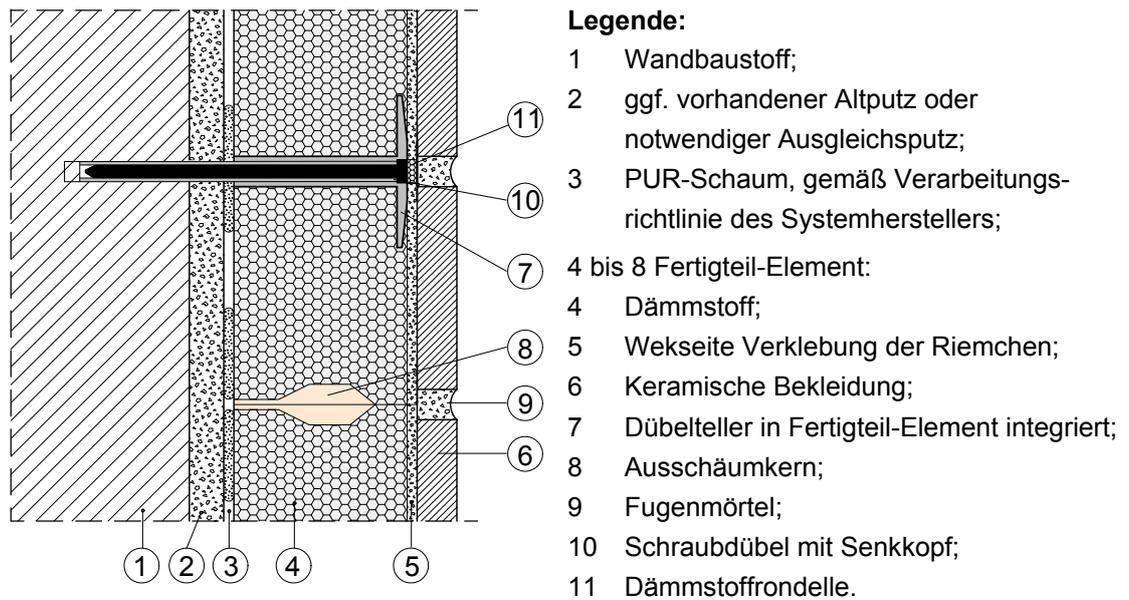


Bild 2.29 Aufbau eines WDV-Fertigteils mit keramischer Bekleidung sowie Klebung und Verdübelung

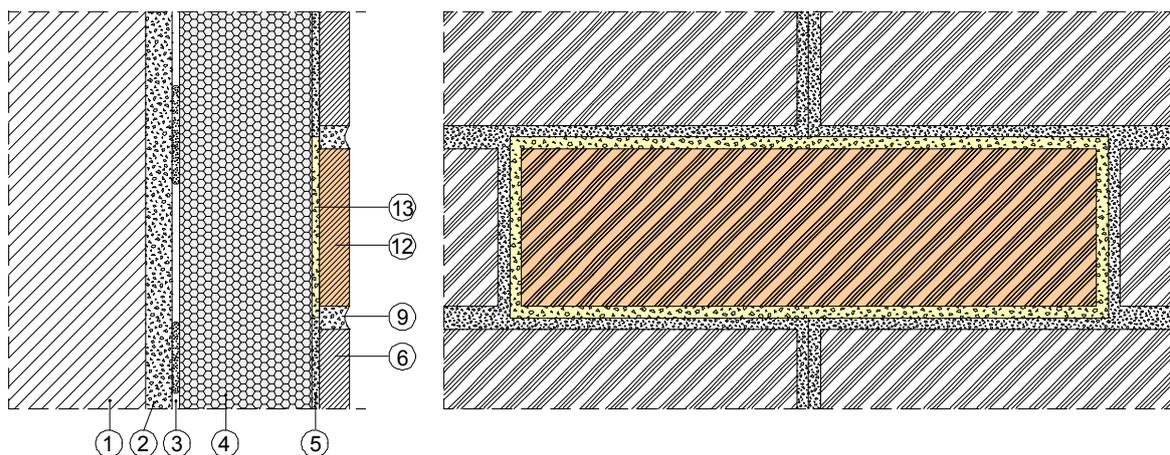


Bild 2.30 Aufbau eines WDV-Fertigteils mit keramischer Bekleidung sowie Klebung und Verdübelung, hier dargestellt mit Verklebung des Fugenriemchens

2.2.5 Wärmedämmverbundsysteme mit Schienenbefestigung

Durch WDV-S mit Schienenbefestigung wird es ermöglicht, größere Unebenheiten des Untergrundes bis zu 3 cm/m auszugleichen. Die Schienen können mit unterschiedlich dicken Distanzscheiben angebracht werden. Außerdem werden Schienensysteme eingesetzt, wenn die Oberfläche des Untergrundes nicht ausreichend tragfähig für andere WDV-S ist.

Als Dämmstoffe werden Polystyrol-Hartschaum- und Mineralwolle-Dämmplatten verwendet. Die Stirnseiten sind umlaufend mit einer Nut versehen, in die horizontal Befestigungsschienen und vertikal T-Profile greifen. Zusätzlich wird in Plattenmitte ein Klebebatzen auf die Dämmplatten aufgetragen und zur Aufnahme der Windsoglasten zusätzlich eine Verdübelung in Plattenmitte vorgesehen.

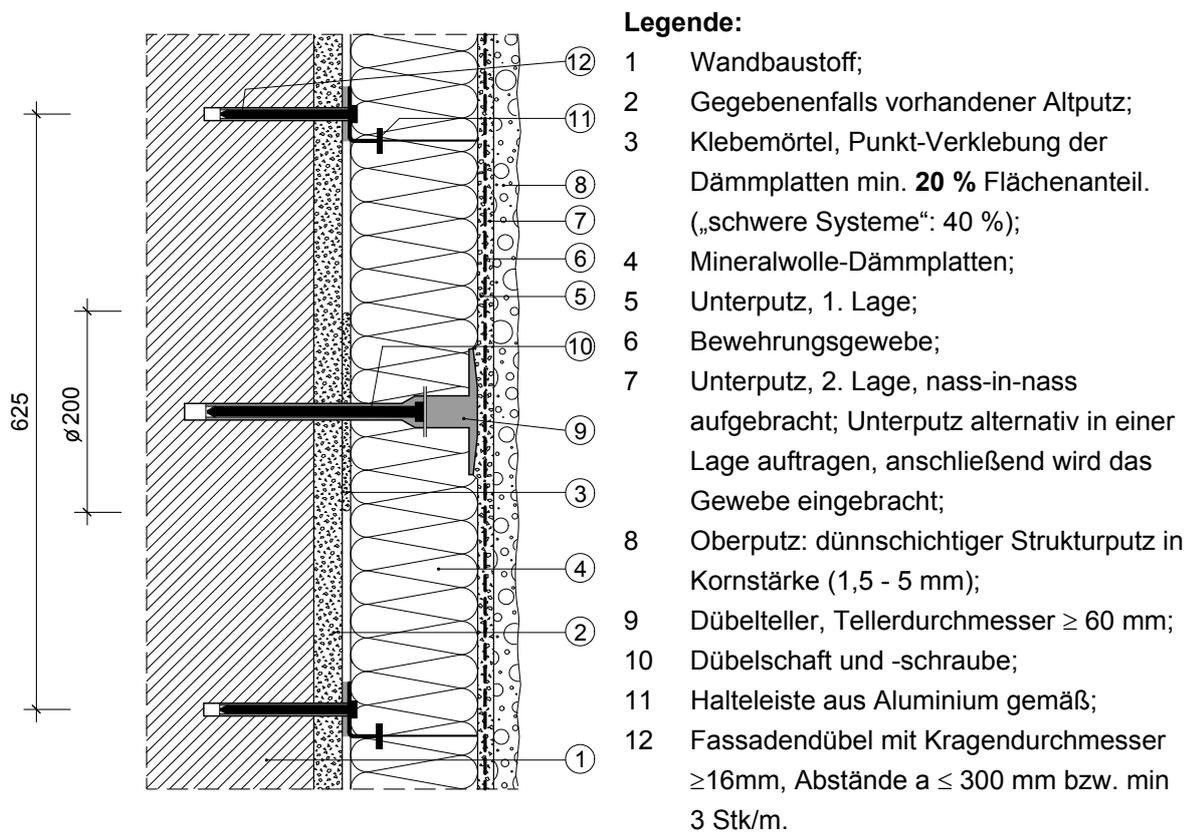


Bild 2.31 Aufbau eines WDV-S mit Halteleistenbefestigung (Maße in mm)

3 TRAGVERHALTEN VON WÄRMEDÄMM-VERBUNDSYSTEMEN

3.1 BEANSPRUCHUNGEN

Die Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit eines Wärmedämm-Verbundsystems muss dauerhaft gewährleistet sein. Aufgrund vielfältiger Beanspruchungsarten werden Anforderungen aus statischer und bauphysikalischer Sicht gestellt, die über den Nutzungszeitraum eines WDVS erfüllt werden müssen.

Beanspruchungen aus folgenden Einwirkungen sind daher nachzuweisen:

- Eigenlast g (DIN 1055-3)
- Hygrothermische Einwirkungen ε_{H+T} aus
 - Erstswinden des Putzes ε_S
 - Feuchteschwankungen $\varepsilon_H = \alpha_u \cdot \Delta u$
 - Temperaturschwankungen $\varepsilon_T = \alpha_T \cdot \Delta T$
- Winddruck w_D und Windsog w_S (DIN 1055-4)

3.1.1 Beanspruchungen aus Eigengewicht und hygrothermischen Einwirkungen

Das Eigengewicht der Dämmplatten und der Putzschicht sowie die Kräfte und Verformungen aus hygrothermischen Einwirkungen führen zu einer Schubbeanspruchung des Wärmedämm-Verbundsystems, parallel zur Wandfläche.

Die Beanspruchung aus Eigenlasten wird durch das Gewicht der Putzschicht und der Dämmplatte bestimmt. Je nach Systemaufbau schwankt das Gewicht zwischen ca. 10 kg/m^2 und 50 kg/m^2 .

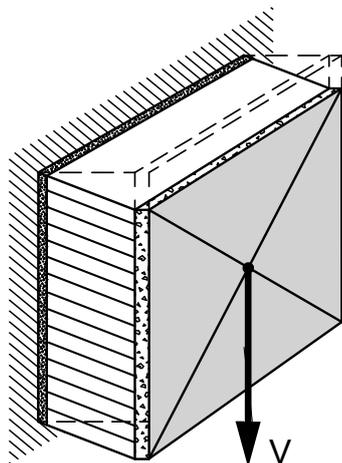


Bild 3.1 Bettungssteifigkeit c eines WDVS mit Klebung ohne Verdübelung

Bei ausschließlich verklebten Systemen erfolgt der Lastabtrag für die Eigenlasten über die „Scheibentragwirkung“ des Dämmstoffs (Bild 3.1). Die Scheibentragwirkung entsteht, indem die Putzschicht in ihrer Ebene (Scheibe) indirekte mit dem tragenden Untergrund über den Dämmstoff verbunden und elastisch gebettet ist.

Neben den Eigenlasten wirken auch unterschiedliche hygrothermische Beanspruchungen. Nach der Herstellung des WDVS treten zunächst Zwängungsspannungen in Form des Erstschrindens ε_S der Putzschicht auf. Zudem treten in der Putzschicht Dehnungen infolge Temperaturänderungen $\varepsilon_T = \alpha_T \cdot \Delta T$ und hygrische Dehnungen $\varepsilon_H = \alpha_H \cdot \Delta u$ durch Änderungen der Ausgleichsfeuchte auf.

Die Putzdehnungen aus hygrothermischen Beanspruchungen werden ebenfalls über die „Scheibentragwirkung“ des Dämmstoffs in den Untergrund geleitet.

Bei geklebten und gleichzeitig gedübelten Systemen stellt sich eine „Konsoltragwirkung“ ein, bei der die „Schubverzahnung“ (Detail A) zwischen Klebemörtel und der rauen Wandoberfläche schräg gerichtete Druckkräfte überträgt, wenn die senkrecht zur Wand gerichtete Zugkraftkomponente durch einen Dübel aufgenommen werden kann (Bild 3.2). Der Dübel wirkt somit als „Zugband“ Z und der Dämmstoff als „Druckstrebe“ D.

Durch diese Schubverzahnung werden die Lasten aus Eigengewicht und hygrothermischen Beanspruchungen sicher in den Untergrund geleitet. Diese wirkt auch, wenn der Kleber zum Untergrund versagen sollte, da infolge der Druckstrebe die mechanische Verzahnung allein ausreichend ist, die vertikale Kraftkomponente V in den Untergrund zu leiten.

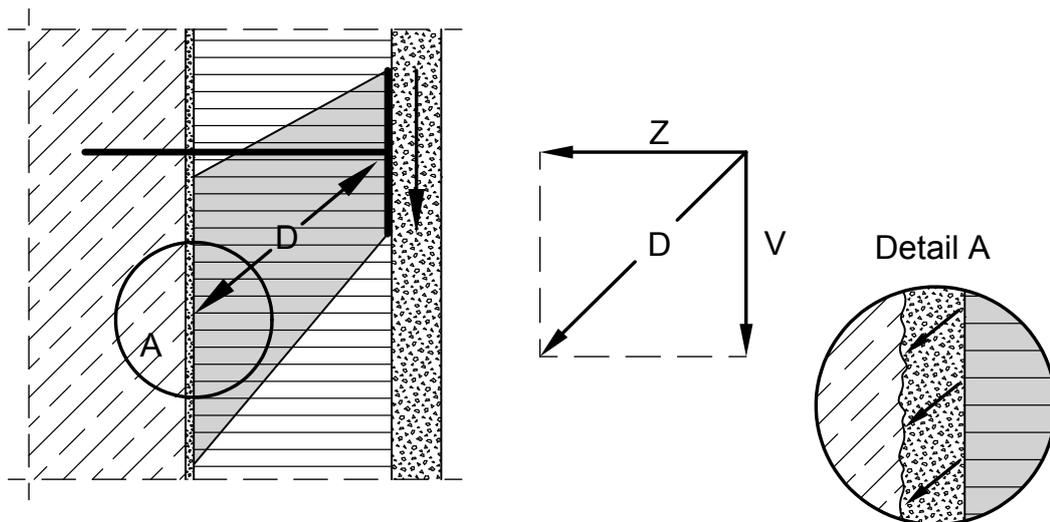


Bild 3.2 Lastabtrag eines WDVS mit Klebung und Verdübelung: „Konsoltragwirkung“ mit Dübel als „Zugband“, Dämmstoff als „Druckstrebe“ und „Schubverzahnung“ des Klebemörtels auf dem rauen Untergrund

Der Dübel erhält allerdings bei einer Schubverformung des Systems eine Biegebeanspruchung, die für die Bemessung der Dübel maßgebend sein kann (Bild 3.3).

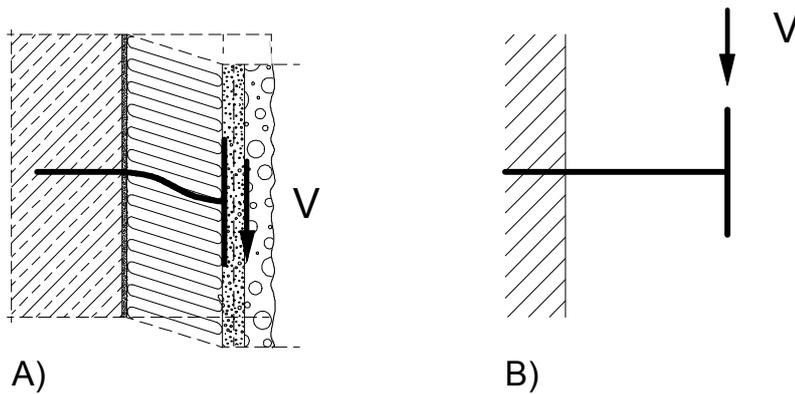


Bild 3.3 A) Biegebeanspruchung des Dübels in einem Wärmedämm-Verbundsystem bei einer Schubverformung des Systems
B) mechanisches Modell zum Nachweis des Dübels unter Biegebeanspruchung

Bis zum Zeitpunkt der Veröffentlichung der Regelung des DIBT [Bau90] schien es für den Tragwerksplaner selbstverständlich zu sein, die Schraube des Dübels durch das Eigengewicht des Putzsystems und des Dämmstoffs senkrecht zu seiner Achse zu belasten, da ein anderer Lastabtrag nicht offensichtlich war. Außerdem gab es für diese Art der Bemessung ein klares mechanisches Modell für den Lastabtrag: den Kragarm (Bild 3.3 B). Daher erfolgte der Nachweis der Schraube auf Biegung durch das Eigengewicht des Putzes [Blo94].

Diese Nachweise erfüllen zwar die Gleichgewichtsbedingungen, aber sie beachten nicht die Verformungsbedingungen, wenn man die tatsächlichen Last-Verformungsbeziehungen eines WDVS für den Lastfall „Eigengewicht“ berücksichtigt. Das in Bild 3.4 gezeigte Last-Verformungsverhalten zeigt deutlich, dass das Kragarmmodell nicht zutreffen kann, da die tatsächlichen Verformungen weitaus geringer sind als die des Kragarms. Daher kann man die Schlussfolgerung ziehen, dass das Eigengewicht über die Schubsteifigkeit der Dämmplatte und die rückseitige Verzahnung durch den Klebmörtel zur Wand abgetragen wird. Die Lage-sicherung erfolgt durch die Dübel und Dämmstoffhalter. Somit erhält der Dübel nahezu ausschließlich Zugkräfte, überwiegend aus den Windsogeinwirkungen (Abschnitt 3.1.2) und zum geringeren Teil aus dem Eigengewicht.

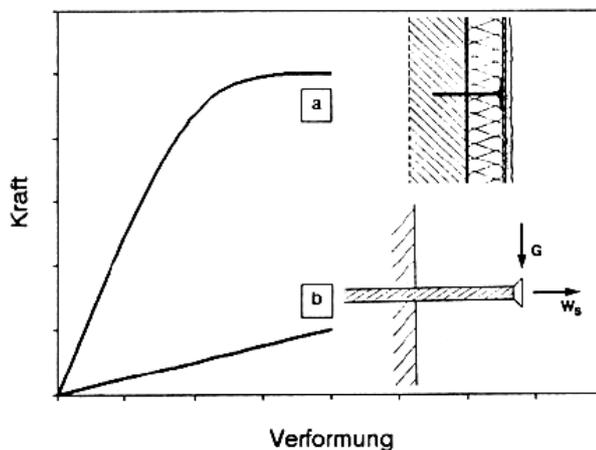


Bild 3.4 A) Gemessene Kraft-Verformungs-Beziehungen eines Dübels im WDVS und
B) Berechnete Kraft-Verformungs-Beziehungen eines Kragarms bei Einwirkungen in der Putzebene (z.B. Eigengewicht) [Blo94]

3.1.2 Lastabtrag aus der Windbeanspruchung

Als maximale Windsogkräfte werden die Werte nach DIN 1055-4 [09] angesetzt. Es wird angenommen, dass die Windsogbeanspruchung dabei senkrecht zur Putzebene des Wärmedämm-Verbundsystems wirkt.

Bei rein verklebten Wärmedämm-Verbundsystemen wird die Windsoglast w_s über die Verklebung in den Untergrund geleitet. Der Nachweis der Standsicherheit erfolgt hier über die Haftzugfestigkeit des Systems.

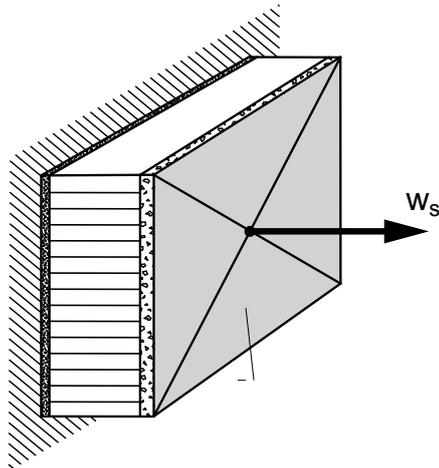


Bild 3.5 Haftzugfestigkeit eines WDVS mit Klebung ohne Verdübelung

Die Haftzugfestigkeit ist die Zugfestigkeit senkrecht zur Wandebene. Bei einer vollflächigen Verklebung wird die Last gleichförmig vom System in den Untergrund weitergeleitet. Bei einer teilflächigen Verklebung muss das System die Lasten über eine Plattentragwirkung weiterleiten und über die Klebestellen konzentriert in den Untergrund übertragen.

Bei Wärmedämm-Verbundsystemen mit Verklebung und Verdübelung wird die Verklebung als nicht tragfähig angenommen, so dass die Windsogkräfte allein über die Dübelung in den Untergrund weitergeleitet werden. Dabei wird die Dämmplatte punktuell durch den Dübelkopf gehalten und auf Biegung und Querlast beansprucht. Der Nachweis zur Biegetragfähigkeit und Durchstanzfestigkeit der Dämmplatte sowie der Steifigkeit des Dübeltellers ist daher erforderlich.

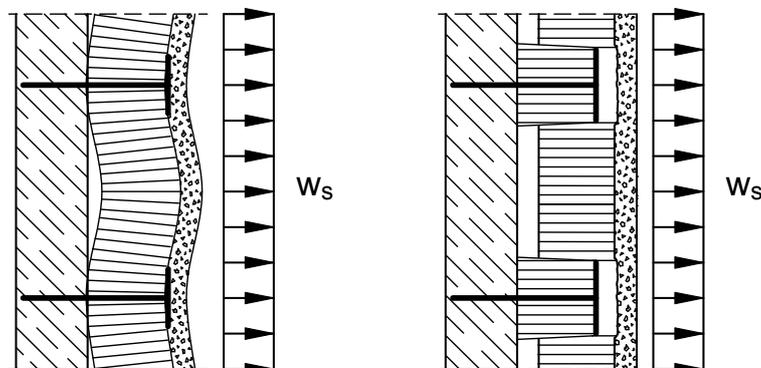


Bild 3.6 Biegebeanspruchung und Durchstanzen eines WDVS beim Lastfall Windsog

3.1.3 Standsicherheit

Für den Nachweis der Standsicherheit werden die Lastfälle aus Eigenlast und hygromischen Einwirkungen mit den Windbeanspruchungen überlagert. Dabei wird das System gleichzeitig auf Schub und Haftzug beansprucht, vgl. Bild 3.7.

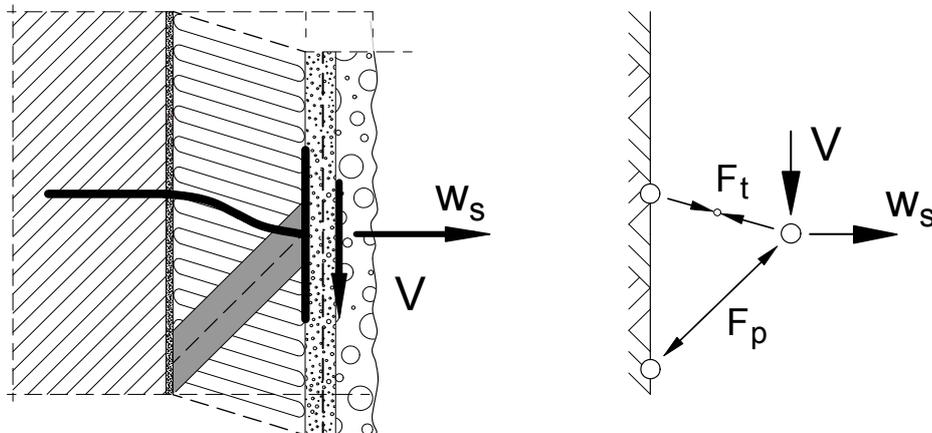


Bild 3.7 Lastabtrag eines WDVS mit Klebung und Verdübelung unter Beanspruchung von Eigenlast, hygromischen Einwirkungen und Wind

Bei dem Nachweis der Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit von geklebten Wärmedämm-Verbundsystemen werden die einzelnen Lastfälle jedoch getrennt betrachtet und Einzelnachweise geführt.

Nur bei unverklebten Wärmedämm-Verbundsystemen müssen die Lastfälle allerdings kombiniert untersucht werden, da hier durch den fehlenden Kleber keine „Schubverzahnung“ zur Wandoberfläche vorliegt und somit die „Konsoltragwirkung“ nicht zuverlässig aktiviert werden kann. Die Lasten werden hier nur über die Dübel in den Untergrund geleitet, vgl. Bild 3.8. Dieser Lastfall wird im weiteren aber nicht weiter betrachtet, da im Folgenden nur WDVS mit Verklebung beurteilt werden.

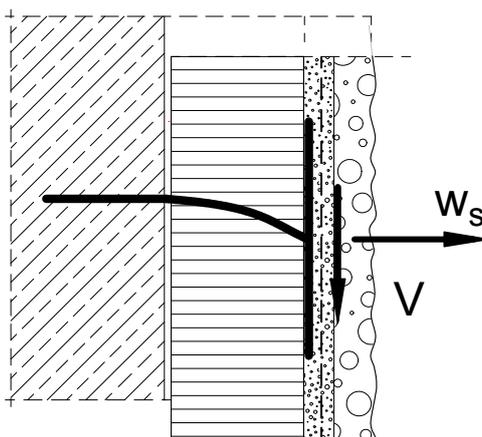
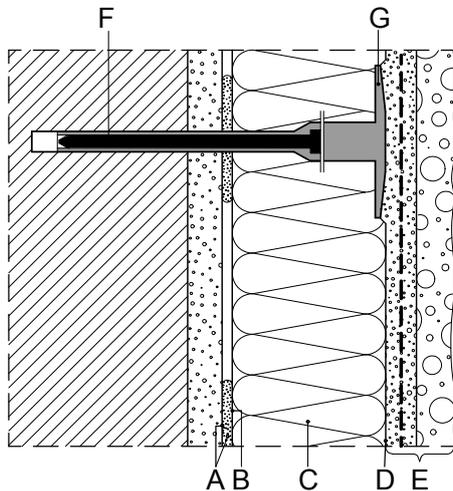


Bild 3.8 Lastabtrag eines WDVS ohne Klebung, nur mit Verdübelung unter Beanspruchung von Eigenlast, hygromischen Einwirkungen und Wind

3.2 BEANSPRUCHBARKEITEN

3.2.1 Erforderliche Materialeigenschaften

Infolge der auftretenden Beanspruchungen und möglichen Versagensebenen (vgl. Bild 3.9) sind folgende Materialeigenschaften der Systemkomponenten und die Systemtragfähigkeiten maßgebend für die Beanspruchbarkeit eines geklebten und gedübelten Wärmedämm-Verbundsystems:



Legende:

- A Klebemörtel: Querkzugversagen oder Haftzugversagen Klebemörtel-Untergrund
- B Klebemörtel: Haftzugversagen Klebemörtel-Dämmstoff
- C Dämmstoff: Querkzug-, Schub- oder Biegeversagen
- D Unterputz: Haftzugversagen Dämmstoff-Unterputz
- E Putzsystem: Querkzugversagen
- F Dübel: Tragfähigkeit im Untergrund
- G Dübel: Tragfähigkeit im System

Bild 3.9 Versagensebenen in einem geklebten und gedübelten WDVS

KLEBEMÖRTEL (A-B)

- Haftzugfestigkeit auf dem Untergrund (A)
- Haftzugfestigkeit auf dem Dämmstoff (B)

DÄMMSTOFF (C)

- Schubmodul
- Scherfestigkeit
- Querkzugfestigkeit

PUTZSYSTEM (D-E)

- Haftzugfestigkeit auf dem Dämmstoff (D)
- Haftzugfestigkeit von Oberputz auf Unterputz
- Dehnsteifigkeit

DÜBEL (F-G)

- Tragfähigkeit im Untergrund (Spreizzone) (F)
- Tragfähigkeit im System (Dübelteller) (G)
- Dübelkopfauslenkung

SYSTEM

- Dauerhaftigkeit
- Zugtragfähigkeit im Lastfall Windsog

In ETAG 004 [01] - guideline for European technical approval of external thermal insulation composite systems with rendering - werden die derzeit erforderlichen Nachweise zur Prüfung der Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit von Wärmedämm-Verbundsystemen aufgeführt.

Es werden hier nur die Nachweise für den Dämmstoff, den Dübel und den Lastfall Windsog gezeigt, da nur diese Nachweise für die vorliegende Fragestellung von Interesse sind.

3.2.2 Mechanische Eigenschaften von Dämmplatten

ZUGFESTIGKEIT SENKRECHT ZUR PLATTENEbene gemäß ETAG 004 [01] - 5.2.4.1.2 und DIN EN 1607 [10]

Die Prüfung der Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene (Querzugfestigkeit) erfolgt an quadratischen Probekörpern die aus den Dämmplatten, unter Beachtung von Rand- und Mittelzonen, gesägt werden. Zur Krafteinleitung werden beidseitig der Probekörper Lasteinleitungsplatten aus Stahl gleicher Größe aufgeklebt (Bild 3.10). Die Kraft wird verformungsregelt mit einer Prüfgeschwindigkeit von 10 mm/min aufgebracht.

Die Querzugfestigkeit des Dämmstoffes ist nach folgender Gleichung zu berechnen:

$$\sigma_{mt} = F_m / A \quad [\text{kPa}] \quad \dots \quad (3.1)$$

Anmerkung:

Die Querzugfestigkeit wird mit σ_{mt} angegeben. Heute ist die Verwendung des griechischen Buchstaben σ für eine Festigkeit unüblich, man bezeichnet damit Spannungen. Da diese Bezeichnung in der DIN EN 1607 [10] verwendet wird, soll sie auch hier weiter genutzt werden.

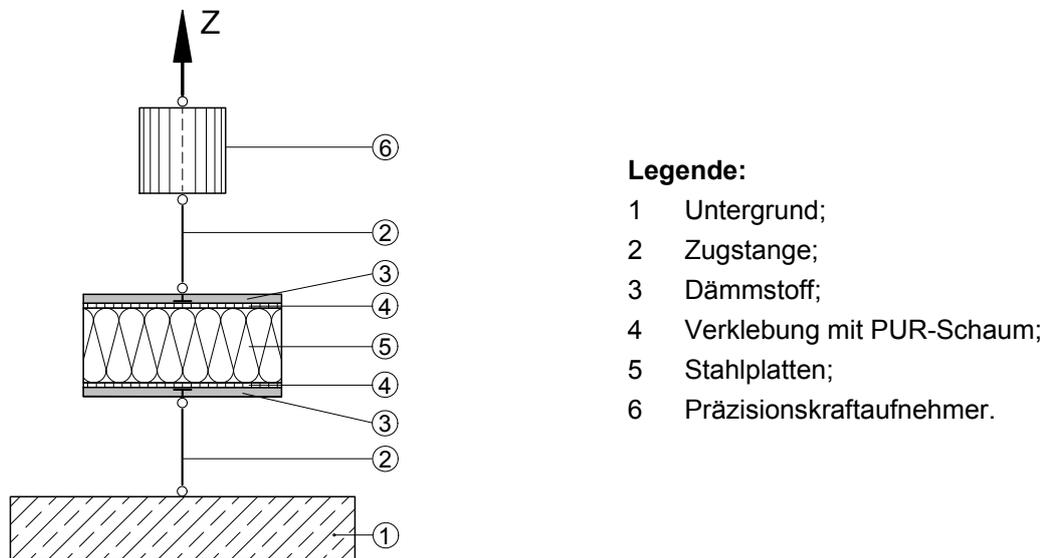
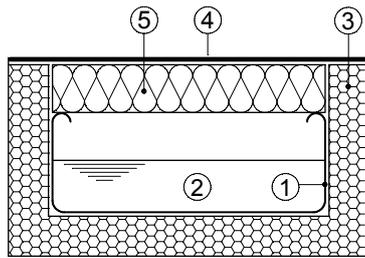


Bild 3.10 Versuchsaufbau zur Ermittlung der Querzugfestigkeit σ_{mt}

Die Prüfungen werden unter trockenen Bedingungen, gemäß ETAG 004 [01], 5.2.4.1.1 und unter feuchten Bedingungen, gemäß ETAG 004 [01], 5.2.4.1.2, durchgeführt. Zur Konditionierung werden die Prüflinge über einem Wasserbecken gemäß Bild 3.11 gelagert. Die Proben werden dampfdicht abgedeckt und das Wasser wird bei einer konstanten Temperatur von 60 °C gehalten. Die Lagerung über Wasserdampf dauert 5 Tage. Anschließend werden die Proben wie folgt konditioniert:

- Reihe 1 7 Tage in einem Kunststoffbeutel bei Normklima (23°C / 50% r.F.), gefolgt von einer Trockenzeit außerhalb des Beutels in Normklima (23°C / 50% r.F.);
- Reihe 2 28 Tage in einem Kunststoffbeutel bei Normklima (23°C / 50% r.F.) und 2 Stunden außerhalb des Beutels in Normklima (23°C / 50% r.F.);
- Reihe 3 28 Tage in einem Kunststoffbeutel bei Normklima (23°C / 50% r.F.), gefolgt von einer Trockenzeit außerhalb des Beutels in Normklima (23°C / 50% r.F.).



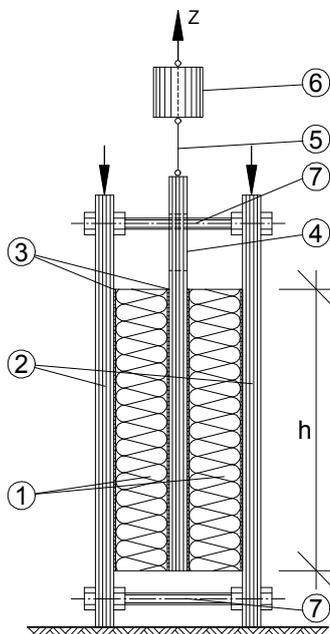
Legende:

- 1 Wasserbecken;
- 2 Wasser mit Temperatur 60°C (thermostatgesteuert);
- 3 Dämmung des Wasserbeckens und der Stirnseiten der Proben;
- 4 wasser- und dampfdichte Abdeckung;
- 5 Dämmstoffprobe.

Bild 3.11 Versuchsaufbau für die Konditionierung eines Dämmstoffes in Anlehnung an einen Vorschlag des CSTB (französische Zulassungsstelle in Paris)

SCHUBFESTIGKEIT DER DÄMMLATTEN gemäß ETAG 004 [01] - 5.2.4.2 und DIN EN 12090 [18]

Zur Ermittlung des Schubtragverhaltens von Dämmstoffen werden jeweils zwei Dämmstoffstreifen der Abmessung 200 mm x 100 mm in Längs- und Querrichtung aus den Dämmplatten zugeschnitten und zu einem symmetrischen Probekörper gemäß DIN EN 12090 [18] zusammengefügt (Bild 3.12). Dazu werden die beiden Dämmstoffstreifen jeweils mit PUR-Schaum auf eine Trägerplatte aufgeklebt und dann mit Hilfe der Lasteinleitungsplatte miteinander verbunden. Die Probe wird über die äußeren Trägerplatten auf den Boden der Prüfmaschine aufgespannt. Über die Lasteinleitungsplatte wird die Zugkraft verformungsgeregelt mit einer Prüfgeschwindigkeit von 3 mm / min eingeleitet. Die Kraft wird in Abhängigkeit der Verformung zwischen dem Untergrund und der Lasteinleitungsplatte gemessen und aufgezeichnet.



Legende:

- 1 Dämmstoff;
- 2 Trägerplatten, am Boden aufgespannt;
- 3 Verklebung mit PUR-Schaum;
- 4 Lasteinleitungsplatte;
- 5 Zugstange;
- 6 Präzisionskraftaufnehmer;
- 7 Verbindungen zur Gewährleistung der Formstabilität.

Bild 3.12 Versuchsaufbau zur Ermittlung der Schubtragfähigkeit nach DIN EN 12090

Aus den Last-Verformungs-Kurven errechnet sich der Schubmodul G mit Hilfe des Sekantenmoduls über die Bettungssteifigkeit c . Der Sekanten-/Schubmodul wird zunächst als G_γ gemäß DIN EN 12090 [18] im Bereich der Gebrauchslast ermittelt und optional als $G_{1\text{mm}}$ und $G_{2\text{mm}}$ im Bereich der Verformungen bei 1 mm und 2 mm.

Aus der Kraft-Verschiebungs-Beziehung ergibt sich die Bettungszahl (c) für die vollflächige Verklebung des Dämmstoffes zu:

$$c = \Delta\tau / \Delta u = \Delta Q / (2A \cdot \Delta u) \quad \dots \quad (3.2)$$

Darin sind ΔQ eine Differenzschubkraft und Δu die zugehörige Differenzverschiebung. Die Fläche A ist die Probenfläche, im hier behandelten Fall der symmetrischen Probenanordnung somit die zweifache Probenfläche.

Der Schubmodul des Dämmstoffes errechnet sich aus Gl. 2:

$$G = \Delta\tau / \Delta\gamma = c \cdot d = (\Delta Q \cdot d) / (2A \cdot \Delta u) \quad \dots \quad (3.3)$$

Die Schubtragfähigkeit des Dämmstoffes bzw. die Scherfestigkeit (τ_u) wird nach folgender Gleichung aus der größten Schubkraft ($\max Q = Q_u$) bei Versagen der Proben berechnet

$$\tau_u = Q_u / 2A \quad \dots \quad (3.4)$$

BIEGEFESTIGKEIT DER DÄMMPLATTEN gemäß DIN EN 12089 [17]

Die Biegefestigkeit wird nach dem Prüfverfahren B der DIN EN 12089 [17] geprüft, sie wird bisher nicht in der ETAG 004 [01] gefordert. Dazu werden Proben der Abmessung von $b \times l \times d = 150 \times (5 \times d + 50) \times d$ [mm] in Längs- und in Querrichtung aus den Dämmplatten zugeschnitten. Die Proben werden jeweils symmetrisch auf die Auflager gelegt, die Belastungsrichtung verläuft vertikal zur Längsachse des Probekörpers (Bild 3.13). Über die Biegeschneide wird die Kraft verformungsgeregelt mit einer Prüfgeschwindigkeit von 10 mm / min eingeleitet.

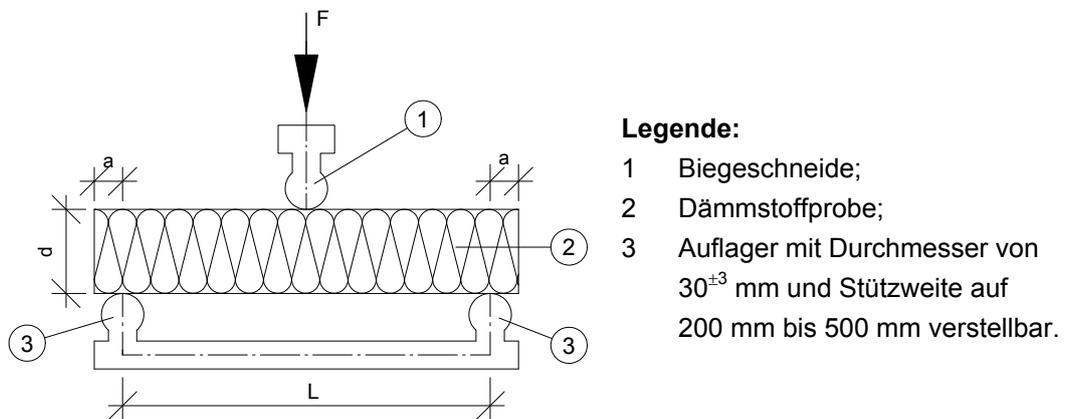


Bild 3.13 Versuchsaufbau zur Ermittlung der Biegefestigkeit nach DIN EN 12089 [17]

Die Biegefestigkeit wird wie folgt berechnet:

$$\sigma_b = 3 \cdot 10^3 \frac{F_m \cdot L}{2 \cdot b \cdot d^2} \quad [\text{kPa}] \quad \dots \quad (3.5)$$

mit F_m [N] aufgebrachte Höchstkraft
 L [mm] Stützweite zwischen den Auflagern

3.2.3 Tragfähigkeiten der Dübel

TRAGFÄHIGKEITEN VON **WDVS-DÜBELN IM UNTERGRUND** gemäß ETAG 014 [02]

Kunststoffdübel zur Befestigung von Wärmedämm-Verbundsystemen mit Putzschichten werden gemäß ETAG 014 [02] - guideline for European technical approval of plastic anchors for fixing of external thermal insulation composite systems with rendering - untersucht.

Die charakteristischen Tragfähigkeiten werden in folgenden Untergründen bestimmt und in die entsprechenden Nutzungskategorien eingeteilt:

Kategorie A	Kunststoffdübel für die Verwendung in Normalbeton
Kategorie B	Kunststoffdübel für die Verwendung in Vollsteinen
Kategorie C	Kunststoffdübel für die Verwendung in Hohl- oder Lochsteinen
Kategorie D	Kunststoffdübel für die Verwendung in haufwerksporigem Leichtbeton
Kategorie E	Kunststoffdübel für die Verwendung in Porenbeton

Aus den Prüfergebnissen gemäß ETAG 014 [02] werden die folgenden Lastklassen für die charakteristischen Tragfähigkeiten je nach Untergrund angegeben:

300 N 400 N 500 N 600 N 750 N 900 N 1.200 N 1.500 N

Diese Lastklassen sind in der jeweiligen europäisch Technischen Zulassung (ETA) genannt.

TELLERSTEIFIGKEIT VON **DÜBELN FÜR WÄRMEDÄMM-VERBUNDSYSTEME** gemäß TR 026 [04]

Damit die Untersuchungen an Wärmedämm-Verbundsystemen gemäß ETAG 004 [01] mit einem nach ETAG 014 [02] geprüften Dübel auch auf andere Dübel gemäß ETAG 014 [02] übertragbar sind, sollen bestimmte mechanische Eigenschaften der Schnittstelle (des Dübeltellers) bestimmt werden. Dazu gehören

- die Tragfähigkeit und
- die Steifigkeit

des Dübeltellers.

Die Versagenslast des Dübeltellers wird bestimmt, indem der Dübelteller auf einem massiven Abstützring aus Stahl mit einem lichten inneren Durchmesser von 30 mm aufgelegt wird. Die Zuglast wird über den Dübelschaft mit einer Belastungsgeschwindigkeit von 1 kN/min eingeleitet (Bild 3.14).

Aus den maximal aufnehmbaren Lasten des Dübeltellers ist die charakteristische **Tragfähigkeit** zu bestimmen. Dieser Wert wird in der jeweiligen europäisch Technischen Zulassung (ETA) angegeben.

Um ein vergleichbares Maß für die **Tellersteifigkeit** zu erhalten, ermittelt man aus jedem Versuch die Tangentensteifigkeit c . Diese gibt im Last-Verformungs-Diagramm die Steigung einer idealisierten Gerade zwischen den Punkten bei $N_u = 0$ mm mit dem dazugehörigen Weg s_u und $N_o = 0,5$ kN mit der dazugehörigen Verformung s_o an:

$$c = \frac{\Delta N}{\Delta s} = \frac{N_o - N_u}{s_o - s_u} = \frac{N_o}{1\text{mm} - s_u} \quad \dots \quad (3.6)$$

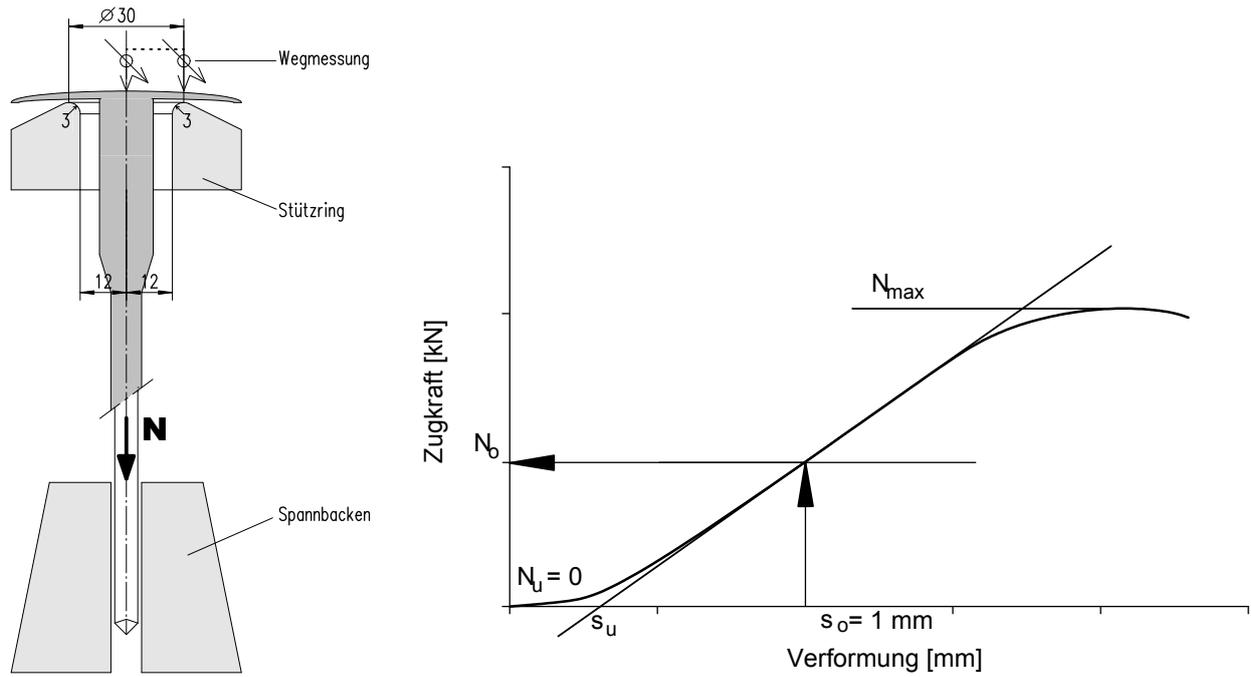


Bild 3.14 Versuchsaufbau zur Ermittlung der Tellersteifigkeit gemäß TR 026 [04] und die entsprechende Last-Verformungskurve mit idealisierter Gerade

Die Tellersteifigkeit und der Tellerdurchmesser werden ebenfalls in den europäisch technischen Zulassungen (ETA) genannt.

3.2.4 Systemeigenschaften unter Windlasten

STATISCHER VERSUCH MIT SCHAUMBLOCK gemäß ETAG 004 [01] - 5.1.4.3.2 und DIN EN 13495 [30]

Die experimentelle Untersuchung der Systemtragfähigkeit eines Wärmedämm-Verbundsystems im Lastfall Windsog erfolgt nach dem "Schaumblock-Verfahren" (Bild 3.15). Dabei wird die Windsogkraft über die dehnweiche Schaumstoffschicht - 300 mm bis 500 mm hohe Schaumstoffblöcke - in die Putzschicht eingeleitet. Oberseitig sind die Schaumstoffblöcke mit einer Lasteinleitungsplatte beklebt, in die über eine aufgeschraubte Stahltraverse die Zugkräfte mit einem hydraulischen Prüfzylinder verformungsgeregelt eingeleitet werden. Da die Schaumstoffblöcke wie Federn mit großen Federwegen wirken, werden einerseits die Prüfkörper nahezu kraftgesteuert gleichmäßig belastet und andererseits eine nahezu unbehinderte Biegeverformung des Systems ermöglicht. Dieses Verfahren wurde im Institut für Bauforschung der Universität Dortmund entwickelt und später europäisch genormt [30].

Zur Herstellung der Probekörper wird die Dämmplatte des zu prüfenden WDVS mit den Dübeln gemäß Bild 3.15 B) auf einer Betonplatte befestigt und anschließend mit dem Putzsystem beschichtet. Nach dem vollständigen Aushärten der Putzschicht, werden die oben beschriebenen Schaumstoffblöcke auf den Probekörper aufgeklebt, vgl. Bild 3.15 A). Die Kraft wird verformungsgeregelt mit einer Prüfgeschwindigkeit von 10 mm/min eingeleitet. Die größte Zugkraft wird bis zum Versagen des Systems gemessen und anschließend durch vier geteilt um die Kraft pro Dübel anzugeben.

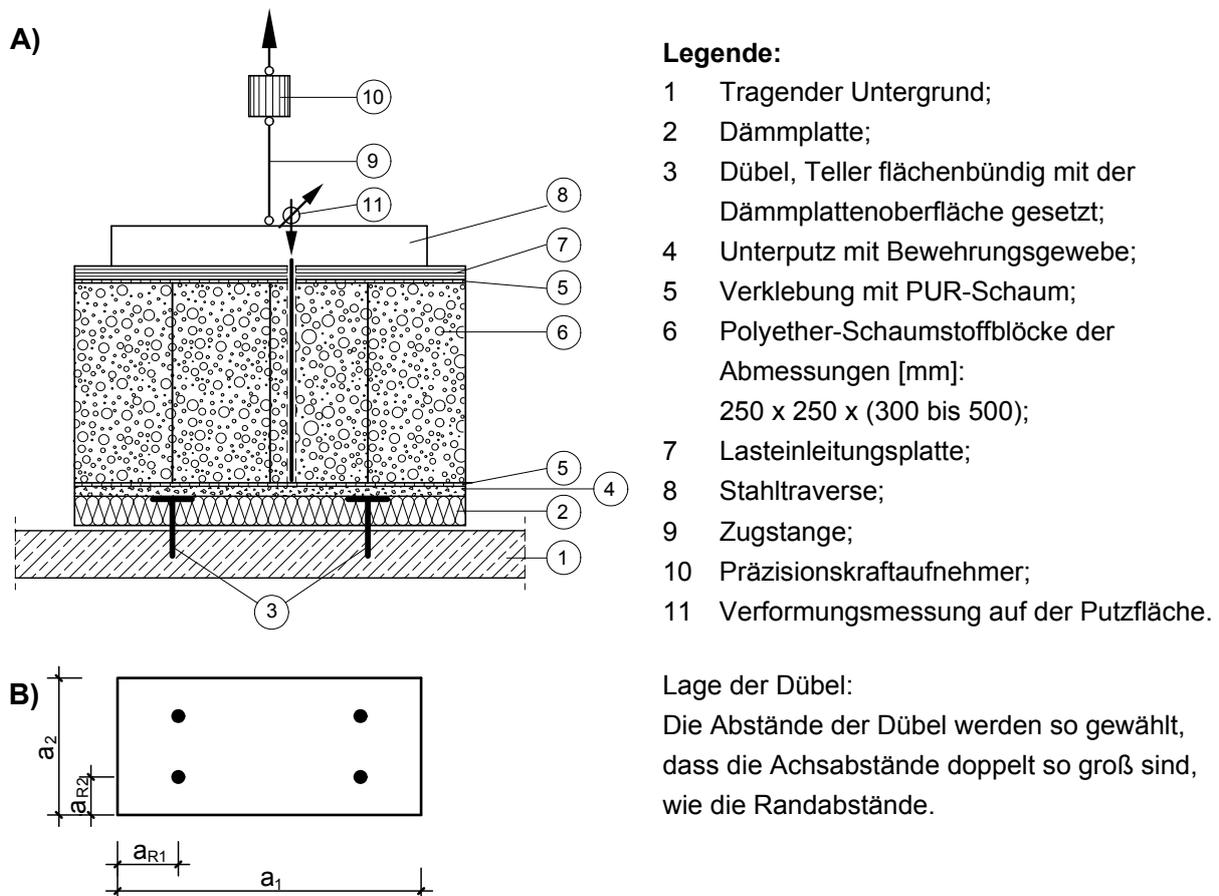


Bild 3.15 Bauteilversuch zur Tragfähigkeit einer gedübelten Dämmplatte im Lastfall Windsog

DURCHZIEHVERSUCH AN BEFESTIGUNGEN gemäß ETAG 004 [01] - 5.1.4.3.1

Im Durchziehversuch wird die Tragfähigkeit einer Einzelbefestigung untersucht. Dieser Versuch dient vor allem dazu, den festigkeitsmindernden Einfluss nach künstlicher Alterung und den Tragfähigkeitsunterschied zwischen einer Flächendübelung und einer Fugendübelung zu ermitteln. Die so ermittelten Abminderungsfaktoren werden auf die ermittelte Tragfähigkeit des o.g. Systemversuchs umgerechnet.

Es werden Dämmstoffproben der Abmessung 350 mm x 350 mm unter Vermeidung von Randzonen aus den Dämmplatten zugeschnitten. Anschließend wird ein Dübel mit Tellerdurchmesser 60 mm in die Mitte der Probe gesetzt. Auf die Probe wird eine Furnierholzplatte gleicher Größe aufgeklebt. Um einen Verbund der Verklebung zum Dübelteller und damit eine positive Beeinflussung der Versuchsergebnisse zu verhindern, werden die Dübelteller mit einer Folie abgedeckt (Bild 3.16).

Die Prüfungen werden nach Raumklimalagerung und nach Konditionierung durchgeführt. Die Konditionierung erfolgt wie in Abschnitt 3.2.2 (Bild 3.11) beschrieben.

Die Kraft wird verformungsgeregelt mit einer Prüfgeschwindigkeit von 20 mm/min eingeleitet. Die größte Zugkraft wird bis zum Versagen des Systems gemessen.

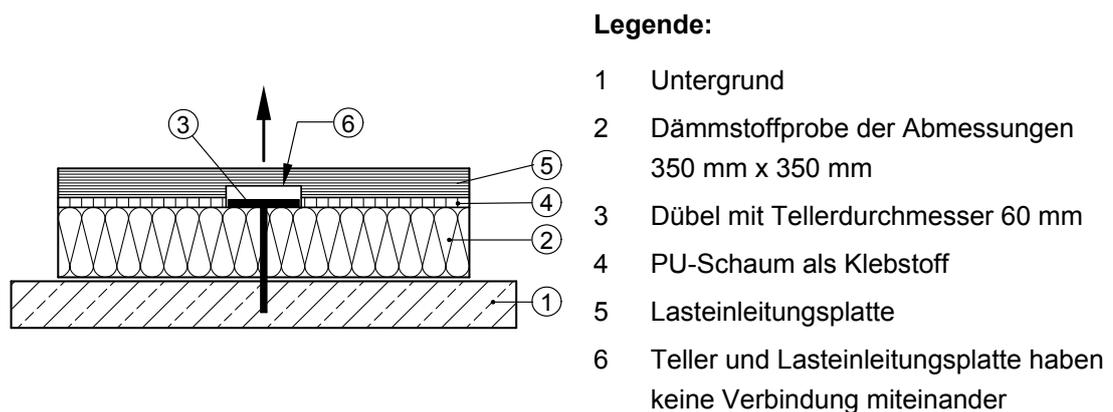


Bild 3.16 Dübel-Durchziehversuch („Pull-through Test“)



Bild 3.17 Versuchsplanung: A) Dübel im Bereich der Plattenfläche
B) Dübel im Bereich der Plattenfuge

3.3 MECHANISCHE ANFORDERUNGEN AN DEN TRAGWIDERSTAND

Zum Nachweis der Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit eines geklebten Wärmedämm-Verbundsystems müssen folgende Tragfähigkeiten gemäß ETAG 004 [01] – guideline for European technical approval of external thermal insulation composite systems with rendering – eingehalten werden:

- Widerstand gegen Windlasten

Die Standsicherheit eines WDVS gegen Windsoglast ist nachgewiesen, wenn der Bemessungswert der Tragfähigkeit R_d (unter Berücksichtigung der nationalen Sicherheitsfaktoren) gleich oder größer ist als der Bemessungswert der Beanspruchung E_d infolge der Windsoglast

$$R_d \geq E_d$$

Hierzu wird die charakteristische Tragfähigkeit benötigt. Der charakteristische Wert wird normalerweise anhand einer statistischen Auswertung als 5 %-Quantil einer mechanischen Eigenschaft bestimmt. Jedoch wird zu Vereinfachung der Kleinstwert einer Versuchsreihe als Ersatz für den 5 %-Quantilwert angenommen.

- Schubfestigkeit und Schubmodul betragen mindestens:

Schubfestigkeit $f_{tk} \geq 0,02 \text{ N/mm}^2$ (20 kN/m²)

Schubmodul $G_m \geq 1,0 \text{ N/mm}^2$ (1.000 kN/m²)

Der Index „k“ bezeichnet den charakteristischen Wert und „m“ den Mittelwert.

Um die nach ETAG 004 geprüften Wärmedämm-Verbundsysteme jedoch anwenden zu können, ist die Liste des Teil II der Technischen Baubestimmungen [05] zu berücksichtigen. Hier werden Wärmedämm-Verbundsysteme im Hinblick auf die Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit in zwei Anwendungsgruppen unterteilt.

Zur **Gruppe I** gehören WDVS, die zusätzlich zu den nach ETAG 004 [01] geforderten Werten folgende Anforderungen erfüllen:

- Es handelt sich um ein geklebtes System ohne mechanische Befestigungsmittel.
- Als Dämmstoff werden Mineralwolle-Platten oder Mineralwolle-Lamellen nach DIN EN 13162 [19] oder expandierte Polystyrol-Hartschaum-Platten nach DIN EN 13163 [20] verwendet.
- Die Dämmstoffdicke beträgt maximal 200 mm.
- Die Bewehrung des Unterputzes ist ein Textilglas-Gittergewebe.
- Die Querkzugfestigkeit des Dämmstoffs unter trockenen Bedingungen beträgt mindestens:
0,08 N/mm² (80 kN/m²)

Zur **Gruppe II** gehören alle WDVS, die nicht der Gruppe I zugeordnet werden können, dabei sind zusätzlich folgende Bedingungen einzuhalten:

- Der Untergrund, auf dem das WDVS angebracht wird, muss aus Mauerwerk oder Beton mit oder ohne Putz bestehen.
- Die Abreißfestigkeit der Oberfläche des Untergrundes muss mindestens $0,08 \text{ N/mm}^2$ betragen.
- Der Dämmstoff muss grundsätzlich vollflächig verklebt werden; abweichend davon darf der Klebeflächenanteil bis auf 40 % reduziert werden, so lange mindestens $0,03 \text{ N/mm}^2$ horizontale Flächenlast über die Klebung auf den Untergrund abgeleitet werden kann.

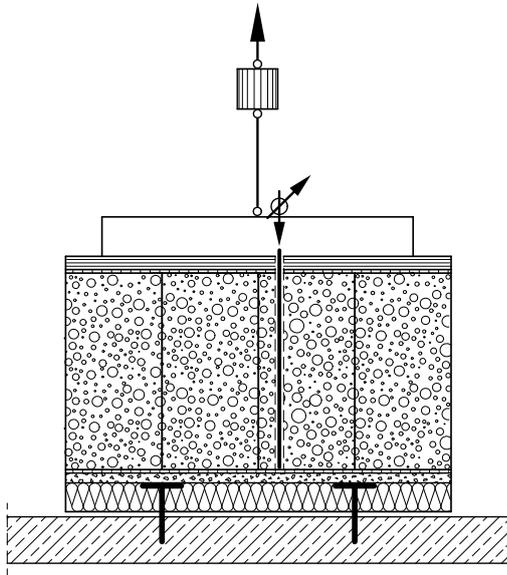
Alle WDVS der Gruppe II sowie WDVS der Gruppe I, die von den vorstehenden Anwendungsregeln abweichen, bedürfen für die Anwendung einer nationalen allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung. Der derzeitige Stand der bauaufsichtlichen Regelung für Wärmedämm-Verbundsysteme ist somit in den jeweiligen nationalen und europäischen bauaufsichtlichen Zulassungen geregelt [Czi07].

Für nicht geregelte Bauprodukte, für die keine technischen Regeln oder technische Baubestimmungen existieren, ist ein Verwendungsnachweis über eine Zustimmung im Einzelfall durch die oberste Bauaufsicht des jeweiligen Bundeslandes erforderlich. Dabei muss ihre Verwendbarkeit durch ein unabhängiges, anerkanntes Institut nachgewiesen und bestätigt werden [Neu09].

4 TRAGVERHALTEN VON DÜBELN FÜR WÄRMEDÄMM-VERBUNDSYSTEME MIT MINERALWOLLE BEI WINDSOGEINWIRKUNGEN

4.1 ALLGEMEINES

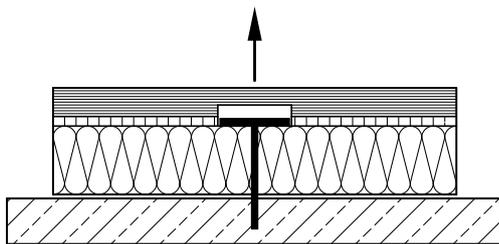
Gemäß [01] ist die Windsogtragfähigkeit eines Wärmedämm-Verbundsystems anhand von zwei unterschiedlichen Testverfahren zu bestimmen, siehe Bild 4.1.



Foam-Block Test / Schaumblockversuch

ETAG 004 – 5.1.4.3.2

Versuch mit vier Dübeln an einer Dämmplatte, zur Bestimmung der Systemtragfähigkeit



Pull-Through Test / Durchziehversuch

ETAG 004 – 5.1.4.3.1

Versuch mit einem Dübel, zur Bestimmung möglicher Abminderungsfaktoren

Bild 4.1 Gegenüberstellung der beiden Testmethoden nach [01]

Beim **Schaumblock-Versuch** (vgl. Abschnitt 3.2.4) wird u. a. das Zusammenwirken aller Komponenten, wie z. B. die Putzhaftung auf dem Dübelteller oder auch die Putzhaftung auf den untersuchten Dämmstoffen, berücksichtigt. Dieser Versuch soll zur Ermittlung der zulässigen Tragfähigkeiten von Systemen für den „Lastfall Windsog“ herangezogen werden. Eine Verformung des Systems wird hier nicht verhindert.

Der **Durchziehversuch** (vgl. Abschnitt 3.2.4) dient vor allem dazu, den festigkeitsmindernden Einfluss nach künstlicher Alterung und den Tragfähigkeitsunterschied zwischen einer Flächendübelung und einer Fugendübelung zu ermitteln, da der Durchziehversuch nicht so aufwendig und damit kostengünstiger gegenüber dem Schaumblock-Versuch durchzuführen ist. Diese Reduktionen werden in die Ergebnisse der Schaumblock-Versuche eingerechnet.

Neben der Durchführung von Parameterstudien zur Systemtragfähigkeit wurde der Durchziehversuch entwickelt, um das Durchstanzverhalten einer durch einen Dübel gehaltenen Dämmplatte im Rahmen der Qualitätskontrolle zu prüfen.

Das Durchstanzen einer Mineralwolle-Dämmplatte wird provoziert, wenn z.B. die Verwirbelung in der Dämmplatte zu stark ist und dabei viele Fasern senkrecht zur Plattenebene stehen, wie z. B. bei Mineralwolle-Lamellen. Liegen die Fasern jedoch eher waagrecht in der Dämmplattenebene, kann über die Flächenpressung des Dübels auch die Biegetragfähigkeit der Dämmplatte aktiviert werden (vgl. Bild 4.2 und Bild 4.3).

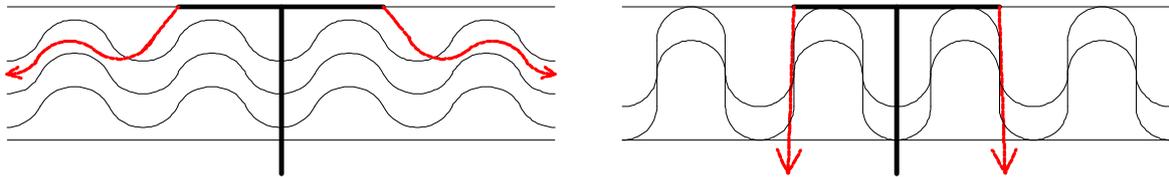


Bild 4.2 Schematische Darstellung des Einflusses der Faserverläufe bei Mineralwolle



Bild 4.3 Versagensbilder zum Einfluss der Faserverläufe bei Mineralwolle

Da im Durchziehversuch die Lasteinleitungsplatte direkt auf die Probe geklebt wird, erfolgt dadurch eine Versteifung der Dämmplatte (vgl. Bild 4.4 a). Im Schaumblockversuch kann die Dämmplatte trotz der Putzschicht, infolge der fehlenden Verklebung zum Untergrund und einer nicht praxisnahen aber unvermeidbarer Dübelpositionen, erheblich auf Biegung beansprucht werden (vgl. Bild 4.4 b), wodurch unterschiedliche Versagensformen auftreten können.

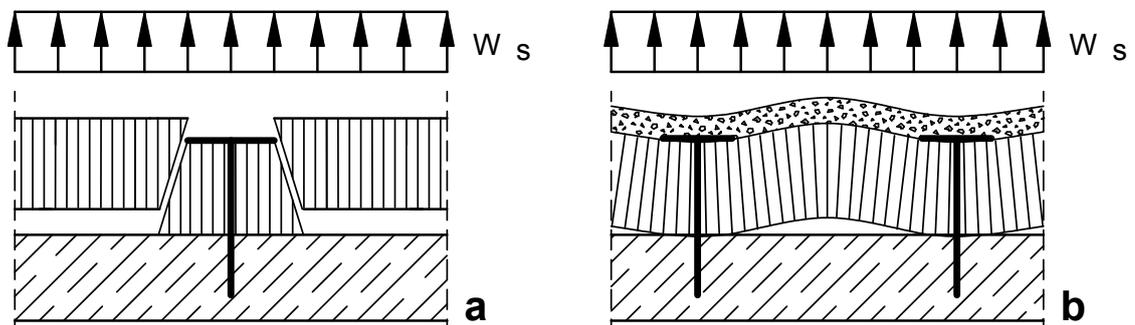


Bild 4.4 Beanspruchung der Dämmplatte im Durchziehversuch (a) und im Schaumblockversuch (b) – schematisch –

4.2 PROBLEMSTELLUNG

Im Jahr 2004 wurden Versuche zur Windsogtragfähigkeit von Wärmedämm-Verbundsystemen (WDVS), gemäß ETAG 004, mit einem neu entwickelten Dübel bzw. Dübelteller zur Befestigung von Dämmplatten durchgeführt.

Die Versuche erfolgten an WDVS mit Polystyrol-Hartschaum-Dämmplatten PS 15 SE und Mineralwolle-Dämmplatten des Typs HD. Gleichzeitig erfolgten Vergleichsversuche mit einem bereits seit langem bauaufsichtlich zugelassenen Dübel (hier: Referenzdübel genannt).

Die Grundlagenuntersuchungen mit dem oben angegebenen Referenzdübel aus den Jahren 1995/1996 führten zu der erforderlichen Anzahl an Dübeln, die auch heute noch in den Systemzulassungen für Wärmedämm-Verbundsysteme angegeben werden.

Bei der Untersuchung des neu entwickelten Dübels wurde zunächst der Dübel mit der Mineralwolle-Dämmplatte Typ HD des Herstellers 1 geprüft (hier: „Typ HD – 1“ genannt). Da die Ergebnisse aus dem Schaumblockversuch im Gegensatz zu dem Durchziehversuch relativ niedrig waren und das Versagensbild (Bild 4.5) auf ein Biegeversagen der Dämmung hinweist, wurden die Versuche an der Mineralwolle-Dämmplatte Typ HD - 2 eines anderen Herstellers wiederholt.

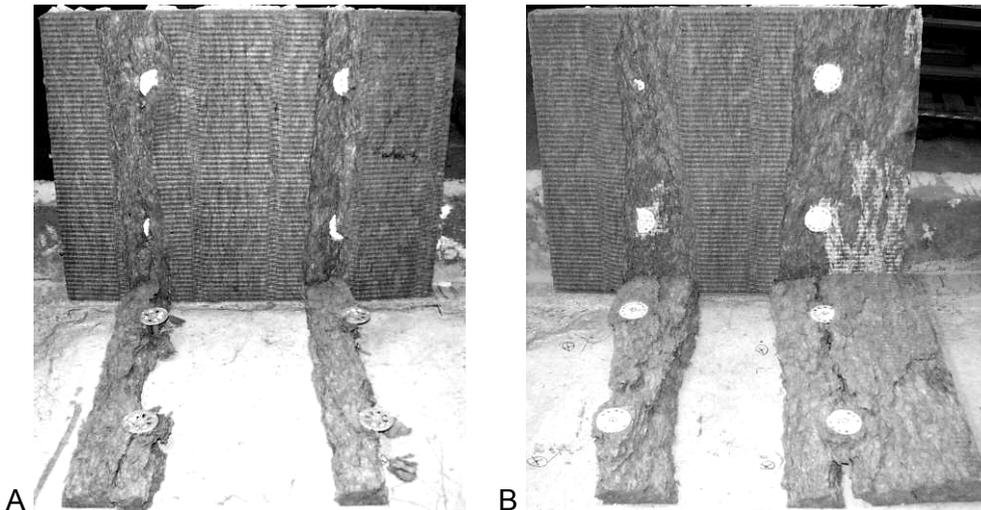


Bild 4.5 Charakteristische Versagensbilder der Systeme mit der Mineralwolle-Dämmplatte Typ HD - 1 im Schaumblockversuch – Biegeversagen der Dämmplatte
A: Versuch mit dem neu entwickelten Dübel
B: Versuch mit dem Referenzdübel

Diese Versuche aus dem Jahr 2004 mit dem neu entwickelten Dübel und dem Referenzdübel sowie die Grundlagenuntersuchungen aus den Jahren 1995/96 lieferten die in den Tabelle 4.1 und Tabelle 4.2 genannten Ergebnisse.

Tabelle 4.1 Dämmplatteneigenschaften

		Prüfungen an Mineralwolle-Dämmplatten			Prüfung an Polystyrol	
		2004		1995/1996	2004	1995/1996
		Typ HD - 1	Typ HD - 2	Typ HD	PS 15 SE	PS 15 SE
ρ	[kg/m ³]	158	125	172	14,2	14,7
σ_{mt}	[kN/m ²]	18,7	21,5	15,5	116	120

ρ Rohdichte

σ_{mt} Querkzugfestigkeit

Tabelle 4.2 Vergleich der Windsogtragfähigkeiten

		Prüfungen an Mineralwolle-Dämmplatten				Prüfung an Polystyrol			
		2004		1995/1996		2004		1995/1996	
		Typ HD - 1		Typ HD - 2		Typ HD		PS 15 SE	
<i>Dübel</i>	<i>NEU</i>	<i>Referenz</i>	<i>NEU</i>	<i>Referenz</i>	<i>Referenz</i>	<i>NEU</i>	<i>Referenz</i>	<i>Referenz</i>	
DZ _{Platte}	[kN/Dübel] Mittel	0,77	0,63	0,51	0,57	0,83	0,51	0,52	0,57
DZ _{Fuge}	[kN/Dübel] Mittel	0,54	-	-	-	0,44	0,44	-	0,43
SB	[kN/Dübel] Mittel	0,55	0,62	0,44	0,45	0,86	0,44	0,48	0,51

DZ Durchziehversuch

SB Schaumblockversuch

Bei dem Vergleich der Windsogtragfähigkeiten ist zu erkennen, dass die Ergebnisse aus dem Jahr 2004 mit Polystyrol-Hartschaum-Dämmplatten mit denen der Grundlagenuntersuchungen und den Versuchen mit dem Referenzdübel gut übereinstimmen. Bei den Versuchen mit Mineralwolle-Dämmplatten hingegen konnten die Werte der Grundlagenuntersuchungen nicht mehr erreicht werden. Es zeigt sich jedoch, dass mit dem neu entwickelten Dübel die gleichen Tragfähigkeiten erzielt werden wie mit dem Referenzdübel. Die geringeren Tragfähigkeiten bei Mineralwolle-Dämmplatten scheinen daher nicht von dem Dübel beeinflusst zu sein.

Die Tragfähigkeiten in den Schaumblockversuchen liegen hier deutlich unter den Ergebnissen aus den Durchziehversuchen. In den Grundlagenuntersuchungen (1995) lieferten die Prüfungen mit dem Schaumblockversuch und dem Durchziehversuch annähernd die gleichen Ergebnisse.

Ein Vergleich der Querkzugfestigkeit von Polystyrol-Hartschaum-Dämmplatten und Mineralwoll-Dämmplatten mit den Windsogtragfähigkeiten führen zum **ersten Paradoxon**:

Warum sind bei achtfacher Querkzugfestigkeit der Polystyrol-Hartschaum-Dämmplatten im Vergleich zu den Mineralwolle-Dämmplatten die Tragfähigkeiten je Dübel ca. 30 % geringer?

Aus den Versagensbildern der Proben (Bild 4.5) mit der Mineralwolle-Dämmplatte Typ HD - 1 lässt sich ein Biegeversagen ableiten, welches mit der Biegesteifigkeit und Biegefestigkeit der Dämmplatten zusammenhängen kann. Bei der Mineralwolle-Dämmplatte Typ HD - 2 trat ein kombiniertes Durchstanzen und Biegeversagen der Dämmplatten auf (Bild 4.6).

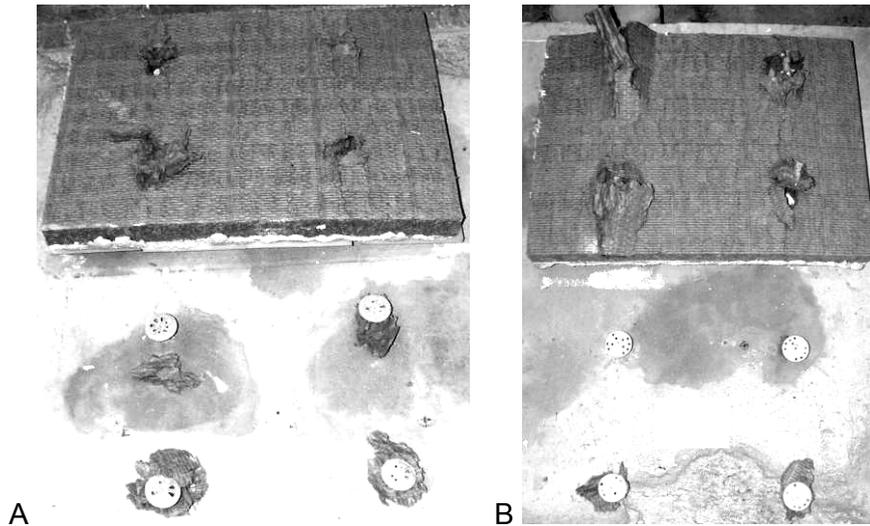


Bild 4.6 Charakteristische Versagensbilder der Windsogprüfungen mit der Mineralwolle-Dämmplatte Typ HD - 2 – Durchstanzen der Dämmplatte

A: Versuch mit dem neu entwickelten Dübel B: Versuch mit dem Referenzdübel

Im Durchziehversuch mit den Mineralwolle-Dämmplatten traten bei den Produkten beider Hersteller ebenfalls unterschiedliche Versagensarten auf, vgl. Bild 4.7.

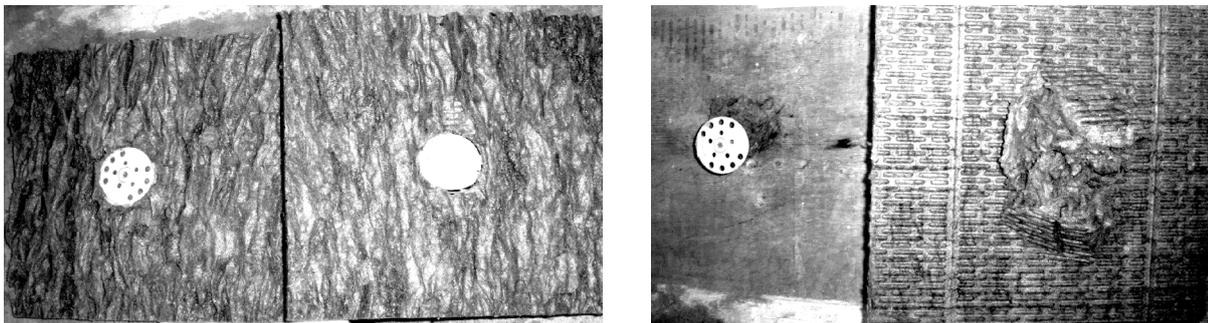


Bild 4.7 Charakteristische Versagensbilder im Durchziehversuch mit den Mineralwolle-Dämmplatten Typ HD - 1 und Typ HD - 2

Aufgrund dieser Ergebnisse und der unterschiedlichen Versagensbilder (vgl. Bild 4.5 und Bild 4.6) stellte sich die Frage, ob und welche mechanischen Eigenschaften der verschiedenen Mineralwolle-Dämmplatten auch unter Einbeziehung des Herstelldatums vergleichbar sind. Die Querkzugfestigkeiten liegen heute über denen der Grundlagenuntersuchungen von 1995/96, die Rohdichte ist jedoch geringer. Dies kann auch mit der Faserorientierung, Bindemittelanteil, Produkt- und Produktionseigenschaften sowie vom Anwender nicht erkennbaren Parametern zusammenhängen.

In Bild 4.8 werden Ergebnisse seit der Grundlagenuntersuchung im Durchzieh- und im Schaumblockversuch im Laufe der Zeit aufgetragen, um die Entwicklung in den letzten Jahren zu verdeutlichen.

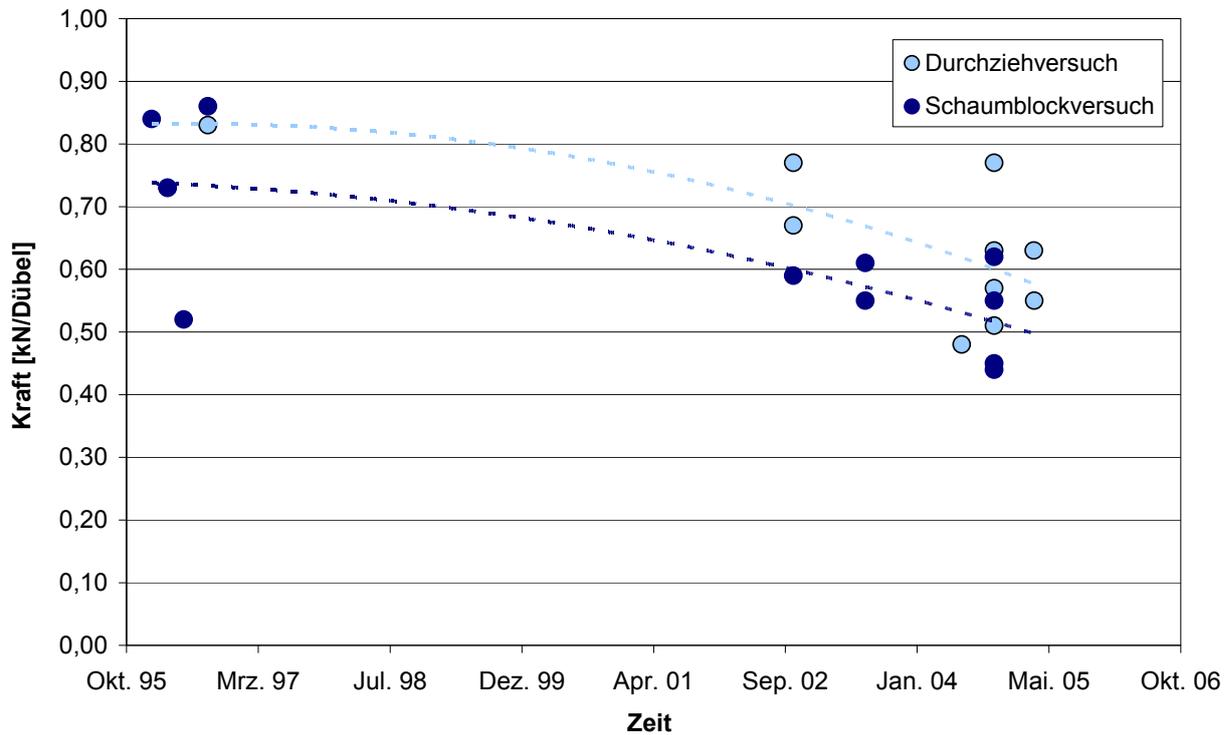


Bild 4.8 Veränderung im Laufe der Zeit bei Mineralwolle-Dämmplatten

Man erkennt deutlich einen Abfall der Tragfähigkeit in den letzten Jahren, obwohl die Anforderungen gemäß Normen und Zulassungen für die Dämmplatten stets erfüllt wurden.

Eine wesentliche Anforderung an die Qualität der Dämmplatten wurde bisher über die Querkzugfestigkeit (damals: Abreißfestigkeit β_A) bestimmt. Hier zeigte sich 1995 eine deutliche Korrelation zwischen der Querkzugfestigkeit der Dämmstoffe und der Zugtragfähigkeit im System. (Bild 4.9)

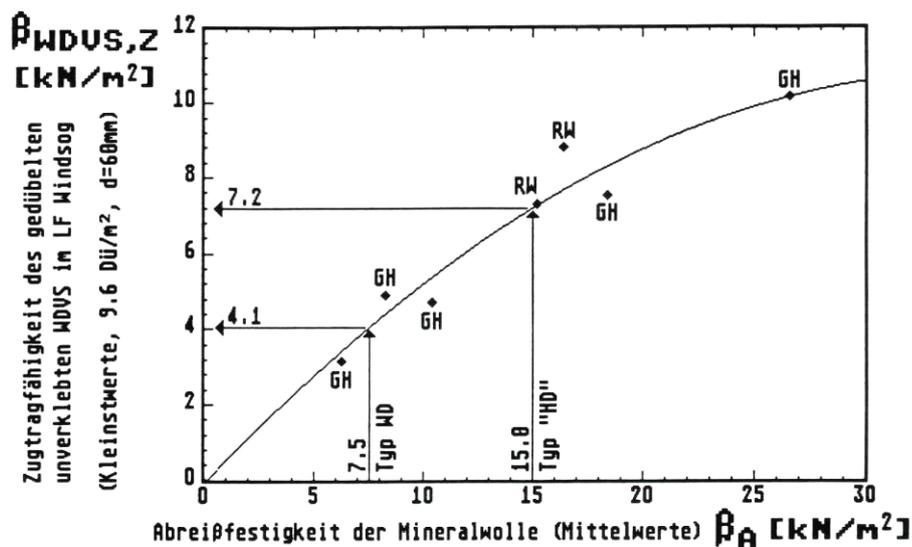


Bild 4.9 Zugtragfähigkeit des WDVS über alle Bauteilversuche der Abmessung 1.000 mm x 625 mm, 9,6 Dübel je m² (jeweils Kleinstwert) [Obe93]

„Im Einvernehmen mit den Dämmstoffherstellern und dem DIBt wurde für die Mineralfaserplatten der Anwendungstyp „hochfest“ (Typ „HD“) mit den Abreißfestigkeiten $\beta_A \geq 15,0 \text{ kN/m}^2$ (Mittelwert) bzw. $\beta_A \geq 14,0 \text{ kN/m}^2$ (Kleinstwert) definiert.“ [Obe93]

Stellt man nun die neueren Ergebnisse der Querkzugfestigkeit der Mineralwolle-Dämmplatten mit der Tragfähigkeit im Lastfall Windsog gegenüber (Bild 4.10), erkennt man keine Abhängigkeit zwischen diesen beiden Parametern mehr. Man könnte sogar annehmen, dass die Tragfähigkeit im Lastfall Windsog mit zunehmender Querkzugfestigkeit in der Tendenz abnimmt.

Zum besseren Vergleich wurden in Bild 4.10 zusätzlich die Ergebnisse aus Bild 4.9 mit aufgezeichnet. Durch diesen Vergleich wird sehr deutlich, dass die Ergebnisse aus dem Jahr 1995 mit den heutigen nicht mehr übereinstimmen. Die Korrelation zwischen der Zunahme der Querkzugfestigkeit der Dämmstoffe und der gleichzeitig ansteigenden Zugtragfähigkeit im System ist heute nicht mehr wieder zu finden.

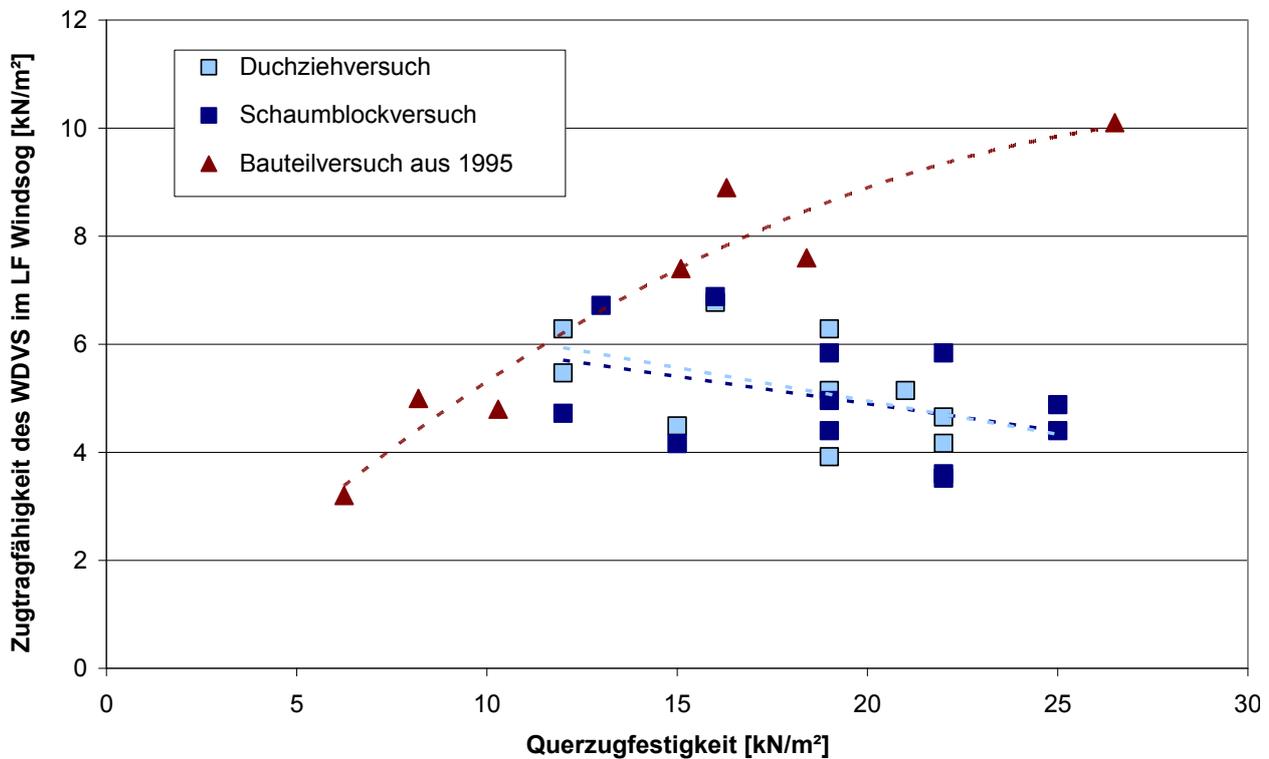


Bild 4.10 Ergebnisse in Abhängigkeit von der Querkzugfestigkeit der Mineralwolle

Die Ergebnisse in Tabelle 4.1 zeigen, dass die Rohdichte der Dämmplatten als Materialkennwert der Mineralwolle-Dämmplatten zum Teil deutlich geringer ist als die der Grundlagenuntersuchungen. Bringt man nun die Tragfähigkeit im Lastfall Windsog in Korrelation zu der Rohdichte der Dämmplatten (Bild 4.11), so erkennt man eine Abhängigkeit beider Parameter voneinander. Die Tragfähigkeit im Lastfall Windsog steigt eindeutig mit Zunahme der Rohdichte der Mineralwolle-Dämmplatten.

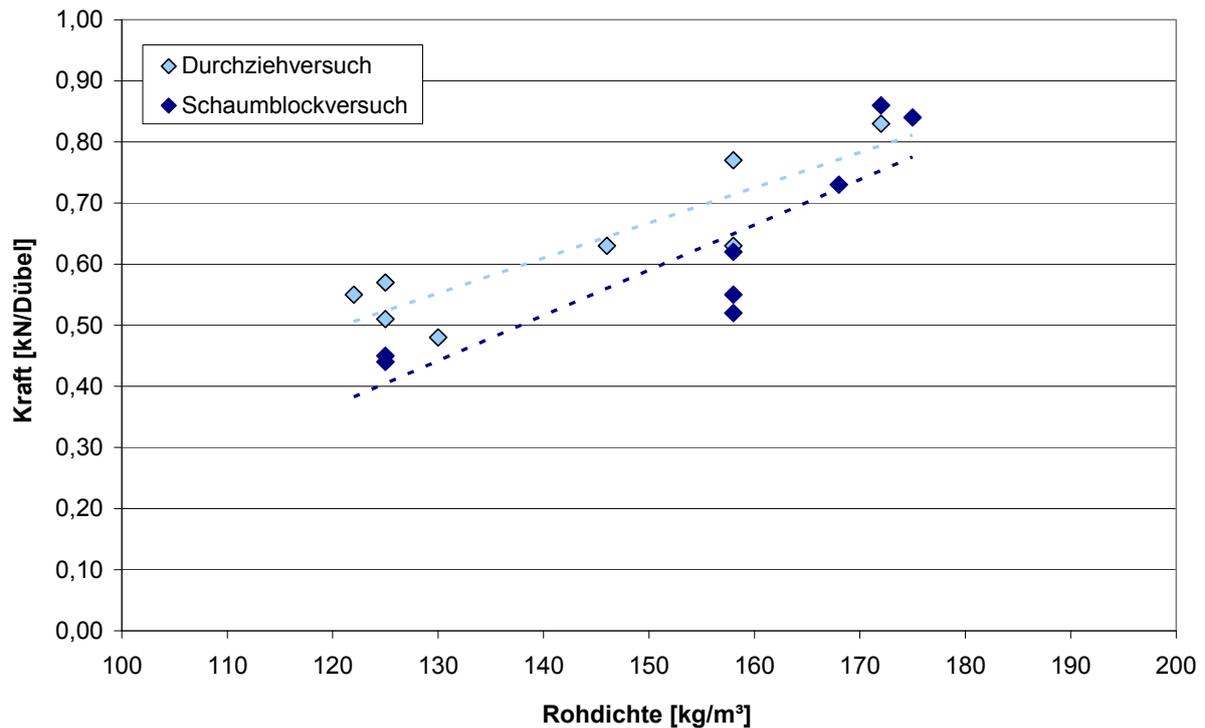


Bild 4.11 Ergebnisse in Abhängigkeit von der Rohdichte der Mineralwolle

Die Rohdichte kann aber nicht allein der maßgebende Faktor für die unterschiedlichen Versagensbilder und Tragfähigkeiten sein.

Schon damals hat Oberhaus [Obe93] vermutet, dass bei einer Verringerung der Plattenrohichte die Querkzugfestigkeit beibehalten werden kann, indem die Längs-Höhenstauchung der Fasern in den Mineralwolle-Dämmplatten verändert wird. Dadurch werden jedoch die Biege- und Durchstanzeigenschaften der Dämmplatten verschlechtert.

Es wurden bisher jedoch keine weiteren standsicherheitsrelevanten Steifigkeits- und Festigkeitskennwerte der Dämmplatten in Korrelation zu der Tragfähigkeit im Lastfall Windsog gebracht.

Aus diesen Überlegungen resultiert die Frage, welche mechanischen und geometrischen Materialeigenschaften der Mineralwolle-Dämmplatten Auswirkungen auf das Tragverhalten der Dübel im System haben oder ob die Systemtragfähigkeit durch den Dübel bzw. den Dübelteller bestimmt wird.

Außerdem ist es fraglich, ob die hier genannten Prüfverfahren zur Bestimmung der Systemtragfähigkeit das tatsächliche Tragverhalten von Wärmedämm-Verbundsystemen realistisch wiedergeben.

4.3 UNTERSUCHUNGEN ZUM EINFLUSS DER TELLERSTEIFIGKEIT

4.3.1 Bestimmung der Tellersteifigkeit verschiedener WDVS-Dübel

Um den Einfluss der Tellersteifigkeit eines WDVS-Dübels auf das Tragverhalten im System zu ermitteln, wurden neun verschiedene, größtenteils durch eine jeweilige ETA zugelassene, WDVS-Dübel untersucht. Zunächst wurde die Tellersteifigkeit gemäß des im TR 026 [04] genannten Verfahrens (vgl. Abschnitt 3.2.3) ermittelt.

Die in dem folgenden Bild 4.12 angegebenen Versuchsergebnisse sind jeweils Mittelwerte aus fünf Versuchen.

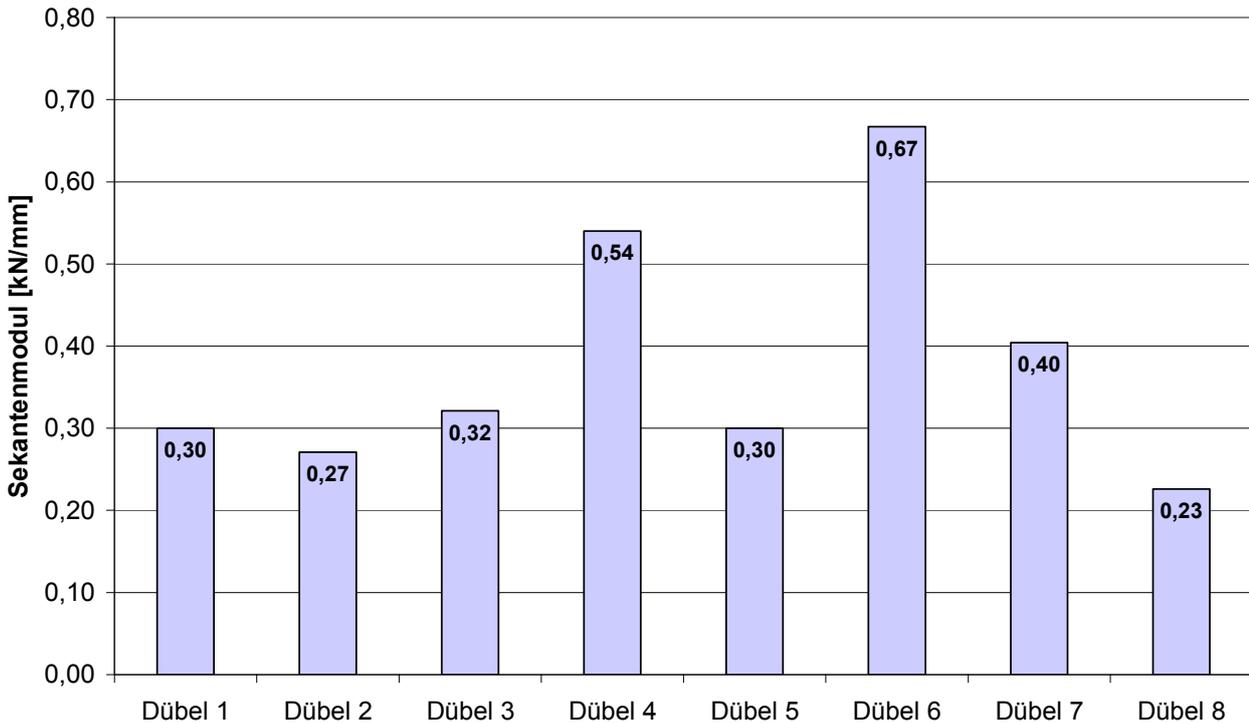


Bild 4.12 Vergleich der Tellersteifigkeiten

Das Steifigkeitskriterium aus der Mitteilung des DIBt (IfBt 4/90) [Bau90] von maximal 1 mm Verformung bei einer Last von 0,5 kN, wurde nicht experimentell begründet, sondern basiert auf einer Abschätzung der maximalen Nutzlast und einer tolerierbaren Verformung.

4.3.2 Durchziehversuch mit Dübeln unterschiedlicher Tellersteifigkeit

Um der Frage der erforderlichen Tragfähigkeit und der optimalen Steifigkeit der Teller von Dübeln für WDVS nachzugehen und deren Einfluss auf das Tragverhalten im System zu ermitteln, wurden vier der zuvor geprüften Dübel mit unterschiedlicher Tellersteifigkeit im System untersucht. Um eine maximale Tellersteifigkeit mit in die Untersuchungen aufzunehmen, wurde zusätzlich ein Dübel mit Stahlteller in das Prüfprogramm aufgenommen.

Die Tragfähigkeit der Dübel im System wurde mit Mineralwolle-Dämmplatten des Typs HD, von drei unterschiedlichen Herstellern, die jeweils aus einer Dämmstoffcharge stammten, sowie mit Polystyrol-Hartschaum-Dämmplatten (EPS 040) ermittelt.

Der Durchziehversuch wurde gemäß ETAG 004 - 5.1.4.3.1 (vgl. Abschnitt 3.2.4) durchgeführt. Wegen der systembedingten Unterschiede – insbesondere infolge der verschiedenen Mineralwollen – werden die verwendeten Materialien weiterhin nicht namentlich genannt. Die Tellersteifigkeiten lagen zwischen 0,3 kN/mm und 0,67 kN/mm. Der ebenfalls verwendete Referenzdübel hat eine Tellersteifigkeit von ca. 0,5 kN/mm.

Die in der folgenden Tabelle angegebenen Versuchsergebnisse sind Mittelwerte aus 5 Versuchen.

Tabelle 4.3 Durchziehversuch von Dübeln in WDVS mit Mineralwolle und Polystyrol

Tellersteifigkeit	kN/mm	0,3	0,3	0,5	0,67	Stahlsteller $\approx \infty$
MW Typ HD - A	kN/Dübel	0,64	0,59	0,63	0,65	0,69
MW Typ HD - B	kN/Dübel	0,49	0,48	0,56	0,48	0,42
MW Typ HD - C	kN/Dübel	0,71	0,71	0,68	0,79	0,73
Mittelwerte an MW		0,61	0,59	0,62	0,64	0,61
EPS 040	kN/Dübel	0,50	0,53	0,52	0,50	0,56

Die Tragfähigkeit im EPS ist unabhängig von der Tellersteifigkeit, wenn diese mindestens 0,3 kN/mm beträgt. Ob diese Steifigkeit ein absoluter Grenzwert ist, kann derzeit noch nicht gesagt werden. Das Versagen war immer durch das Nachgeben des Dämmstoffs gekennzeichnet. Bei genauer Betrachtung erkennt man, dass die Eigenschaften der Mineralwolle einen erheblichen Anteil an den Versagenswerten haben. Hierauf wird in Abschnitt 4.4 näher eingegangen.

Es fällt auf, dass bei Versuchen mit Mineralwolle die Abweichungen vom Mittelwert bei ca. $\pm 25\%$ liegen können (vgl. Abschnitt 5), während sich beim EPS die Streuungen im Bereich der Messgenauigkeit befinden.

Die Systemtragfähigkeit wird danach primär nicht von der Tellersteifigkeit bestimmt, sondern ist vermutlich von der Gleichmäßigkeit der mechanischen Eigenschaften der Mineralwolle abhängig.

4.4 EINFLUSS DER MATERIALEIGENSCHAFTEN VON MINERALWOLLE-DÄMMLATTEN AUF DAS VERSAGENSBILD

4.4.1 Bestimmung der Systemtragfähigkeit im Lastfall Windsog

Da die untersuchten Mineralwolle-Dämmplatten eines Herstellers aus dem vorherigen Kapitel alle aus einer Charge stammen und kein Einfluss der Tellersteifigkeit auf die Tragfähigkeit der Dübel im System nachgewiesen werden konnte, können nun die ermittelten Tragfähigkeiten im Durchziehversuch (DZ) an den Dämmplatten eines Herstellers zusammengefasst werden. Die Mineralwolle-Dämmplatten der verschiedenen Hersteller werden wie in Kapitel 4.3 mit den Buchstaben A, B und C unterschieden. Es ergeben sich die in Tabelle 4.4 aufgeführten Mittelwerte für einen Dämmplattentypen aus 5 Versuchsserien mit jeweils 5 Versuchen. Außerdem wurde für jeden Dämmplattentyp die Tragfähigkeit im System am Schaumblockversuch (SB) mit dem in Kapitel 4.2 genannten Referenzdübel ermittelt. Zum Vergleich werden hier noch einmal die Systemtragfähigkeiten aus den Jahren 1995/96 aufgeführt.

Tabelle 4.4 Systemtragfähigkeiten der Mineralwolle- und Polystyrol-Dämmplatten im Vergleich zu den Grundlagenuntersuchungen aus den Jahren 1995/1996

Prüfung		Mineralwolle-Dämmplatten			Polystyrol		
		2005			1995/96	2005	1995/96
		A	B	C	Typ HD	EPS	PS 15
DZ _{Platte}	[kN/Dübel]	0,63	0,55	0,72	0,83	0,51	0,57
SB	[kN/Dübel]	0,54	0,38	0,54	0,86	0,46	0,51

Im Vergleich zu den Grundlagenuntersuchungen wird auch hier wieder deutlich, dass diese Werte nicht mehr erreicht werden konnten und die Tragfähigkeiten in den Schaumblockversuchen unter den Ergebnissen der Durchziehversuche liegen (vgl. Kapitel 4.2).

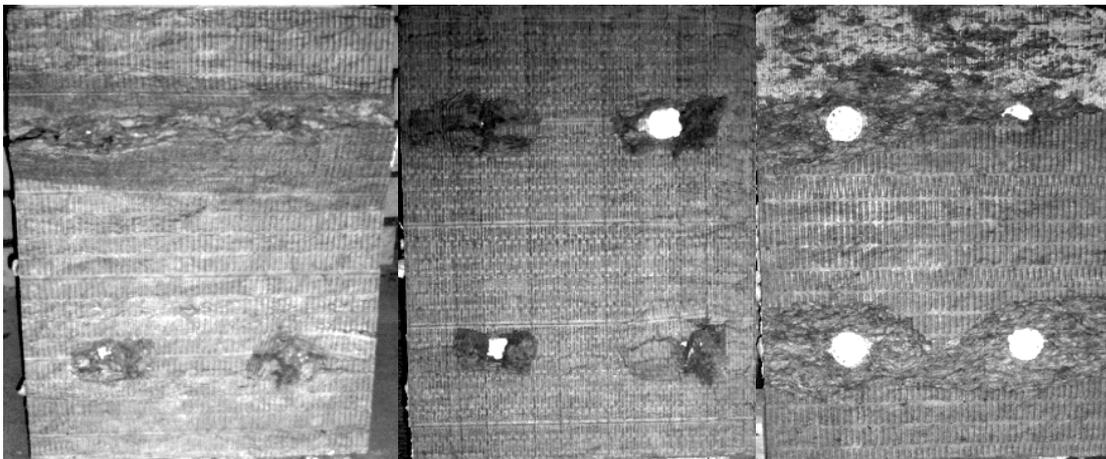


Bild 4.13 Vergleich der charakteristischen Versagensbilder im Schaumblockversuch

Vergleicht man nun die charakteristischen Versagensbilder aus dem Schaumblockversuch (Bild 4.13), so lassen sich ganz unterschiedliche Bruchbilder erkennen. Bei der Dämmplatte A erkennt man ein kombiniertes Versagen von Durchstanzen und Biegebruch, an der Dämmplatte B trat hauptsächlich ein Durchstanzen auf. Das Versagensbild der Dämmplatte C deutet auf ein überwiegendes Biegeversagen hin. Die Biegetragfähigkeit der Dämmplatten könnte hier einen Einfluss auf das Versagen haben.

4.4.2 Materialeigenschaften der Dämmplatten und die Auswirkungen auf das Versagen

Um nun der Frage nach den Auswirkungen der Materialeigenschaften auf das Tragverhalten der Dübel im System nachzugehen, wurden folgende Materialeigenschaften an den zuvor untersuchten Mineralwolle-Dämmplatten des Typs HD untersucht:

- Rohdichte ρ
- Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene σ_{mt}
- Scherfestigkeit τ_u / Schubmodul G
- Biegefestigkeit σ_b

Damit die Eigenschaften der Mineralwolle-Dämmplatten anhand eines relativ isotropen Werkstoffes verglichen werden können, wurden alle Eigenschaften zusätzlich an Polystyrol-Hartschaum-Dämmplatten ermittelt.

Die ermittelten Materialeigenschaften der Dämmplatten sind in der nachfolgenden Tabelle 4.5 aufgeführt. Zum Vergleich wurden die Materialeigenschaften aus dem Jahr 1995/96 mit aufgeführt. Werte für die Scherfestigkeit, den Schubmodul und die Biegefestigkeit der damals untersuchten Dämmplatten liegen nicht vor.

Tabelle 4.5 Materialeigenschaften der Mineralwolle- und Polystyrol-Dämmplatten im Vergleich zu den Grundlagenuntersuchungen aus den Jahren 1995/1996

Prüfung	Mineralwolle-Dämmplatten				Polystyrol	
	A	2005 B	C	1995/96 Typ HD	2005 EPS	1995/96 PS 15
ρ [kg/m ³]	147	132	153	172	14	15
σ_{mt} [kN/m ²]	19	15	17	16	129	120
G_{Quer} [N/mm ²]	1.700	2.450	3.140	-	1.300	-
$G_{\text{Längs}}$ [kN/m ²]	980	1.650	1.790	-	1.400	-
$\tau_{u \text{ Quer}}$ [N/mm ²]	39	32	48	-	59	-
$\tau_{u \text{ Längs}}$ [N/mm ²]	27	27	36	-	60	-
$\sigma_b \text{ Quer}$ [kN/m ²]	249	230	394	-	105	-
$\sigma_b \text{ Längs}$ [kN/m ²]	75	55	105	-	113	-

Betrachtet man nun die Ergebnisse mit den Mineralwolle-Dämmplatten, so erkennt man zunächst, dass die Anforderungen an die Qualität durch die Querkzugfestigkeit der Dämmplatte erfüllt sind. Bei der Mineralwolle-Dämmplatte des Herstellers A liegt der Wert sogar deutlich über dem der Grundlagenuntersuchung. Es fällt jedoch auf, dass die Rohdichte der neueren Dämmplatten deutlich abgenommen hat. Bei der Mineralwolle-Dämmplatte des Herstellers B liegt die Rohdichte 25 % unter dem Wert der Grundlagenuntersuchung. Wie in Abschnitt 4.1 bereits erwähnt, kann dies an einer veränderten Längs-Höhenstauchung der Fasern in den Mineralwolle-Dämmplatten liegen. Die Rohdichte wurde verringert, um eine bessere thermische Dämmwirkung der Dämmplatten zu erhalten.

Bei den Schubversuchen mit den Mineralwolle-Dämmplatten lässt sich ein Festigkeits- und Steifigkeitsunterschied in Plattenlängs- und -querrichtung erkennen (Bild 4.14). Die Festigkeit nimmt in Plattenlängsrichtung um ca. 25 % im Vergleich zur Plattenquerrichtung ab. Bei der Steifigkeit sind es in Plattenlängsrichtung ca. 40 %. Dies hängt eindeutig von der Plattenstruktur ab.

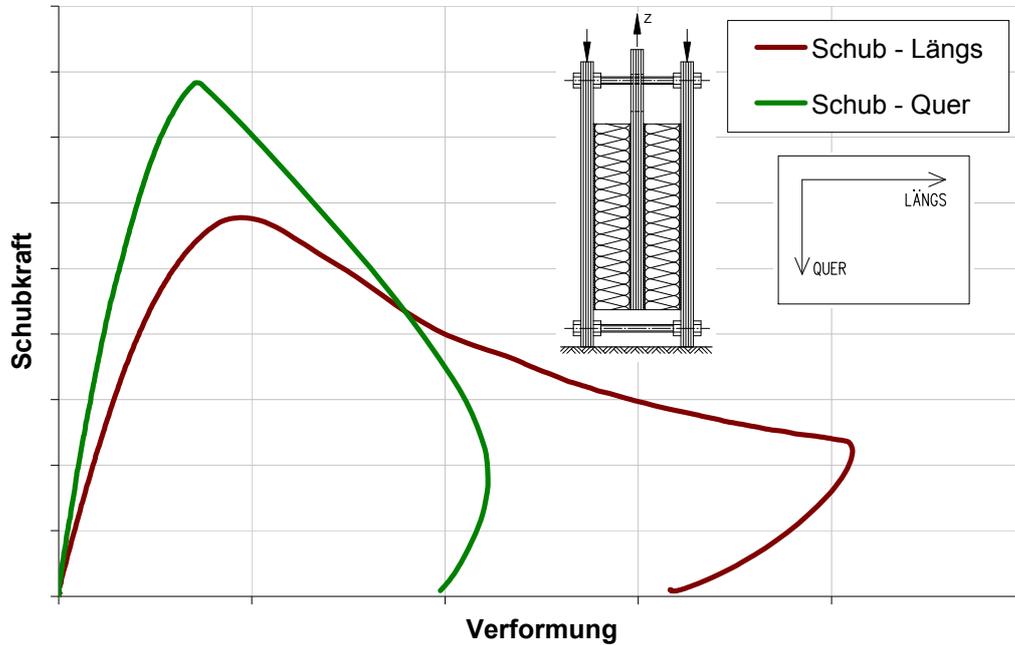


Bild 4.14 typische Kraft-Verformungskurve im Schubversuch bei Mineralwolle-Dämmplatten in Längs- und Querrichtung

Betrachtet man den Faserverlauf in einer Mineralwolle-Dämmplatte (Bild 4.15), so erkennt man in Platten-Längsrichtung eine ungleichmäßige und leicht verwirbelte Lage der Fasern, welche hingegen in Platten-Querrichtung eher gleichmäßig aufeinander liegen und parallel zur Plattenebene verlaufen. Diese Struktur der Platte hängt mit den Herstellungsverfahren der Mineralwolle-Dämmplatten zusammen, worauf hier nicht näher eingegangen wird.



Bild 4.15 Faserverlauf in den Mineralwolle-Dämmplatten in Längs- und Querrichtung

Beim Schubversuch in Platten-Längsrichtung werden die verwirbelten Fasern auseinander gezogen (Zerfaserung) und bilden dadurch eine schubweiche Ebene (Bild 4.16 Längs). Durch das Zerfasern kann jedoch eine größere Verformung bis zum Versagen aufgenommen werden (Bild 4.14). In Platten-Querrichtung werden die Fasern direkt belastet und scheren voneinander ab, hierdurch wird eine anfänglich höhere Steifigkeit erzielt (Bild 4.16 Quer).

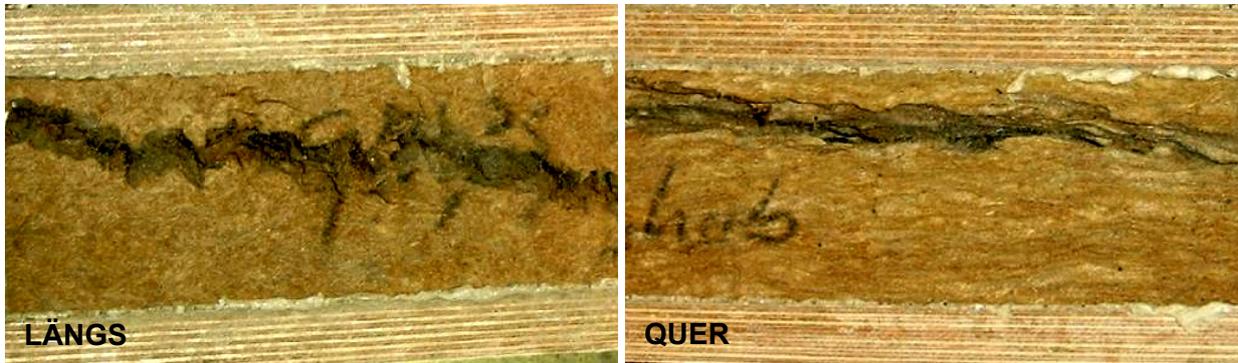


Bild 4.16 Bruchbild im Schubversuch der Mineralwolle-Dämmplatten in Längs- und Querrichtung

Ein erheblicher Festigkeits- und Steifigkeitsunterschied in Platten Längs- und Querrichtung der Mineralwolle-Dämmplatten lässt sich jedoch bei der Biegefestigkeit erkennen (Bild 4.17). Die Festigkeit nimmt in Platten Längsrichtung um ca. 75 % zur Querrichtung ab!

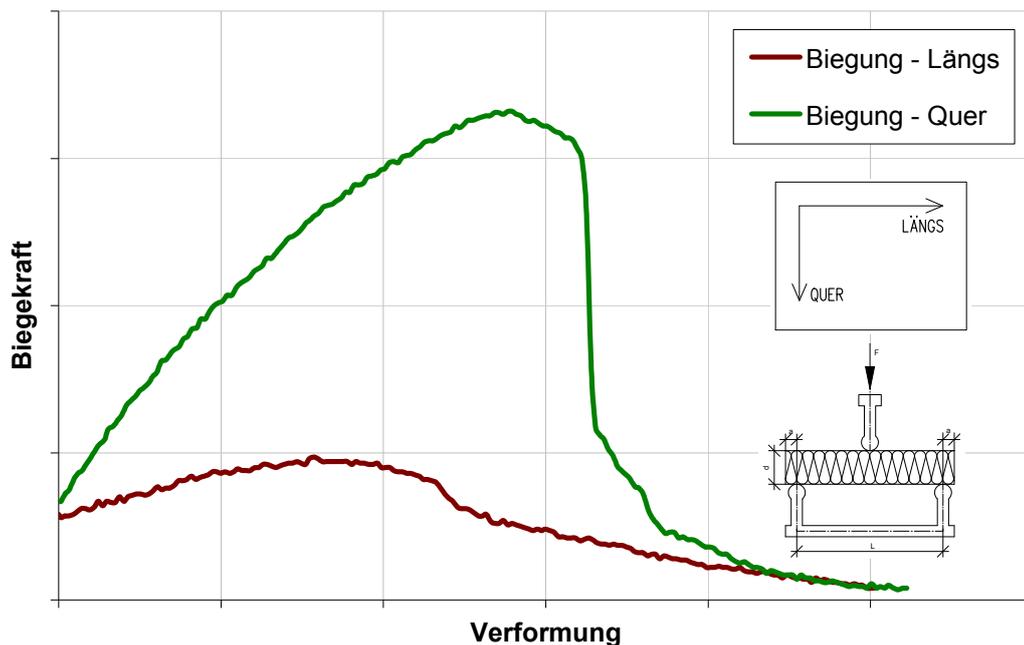


Bild 4.17 typische Kraft-Verformungskurve im Biegeversuch bei Mineralwolle-Dämmplatten in Längs- und Querrichtung

Wie beim Schubversuch in Platten-Längsrichtung werden auch im Biegeversuch die verwirbelten Fasern auseinander gezogen. Der Bruch der Dämmplatte verläuft parallel zum Faserverlauf; dies wird in Bild 4.18 deutlich. In Platten-Querrichtung wird die Last über die parallel zur Plattenebene verlaufenden Fasern eingeleitet, hier müssen die Fasern zerstört werden, wodurch eine wesentlich höhere Belastung aufgenommen werden kann (Bild 4.17).



Bild 4.18 Bruchbild im Biegeversuch der Mineralwolle-Dämmplatten in Längs- und Querrichtung

Zur Verdeutlichung der Festigkeitsunterschiede bei den untersuchten Mineralwolle-Dämmplatten im Vergleich zu den Polystyrol-Hartschaum-Dämmplatten wurden die Biegefestigkeiten aller drei Hersteller in Bild 4.19 aufgetragen. Bei den Polystyrol-Hartschaum-Dämmplatten ist kaum ein Festigkeitsunterschied in den Plattenrichtungen zu erkennen.

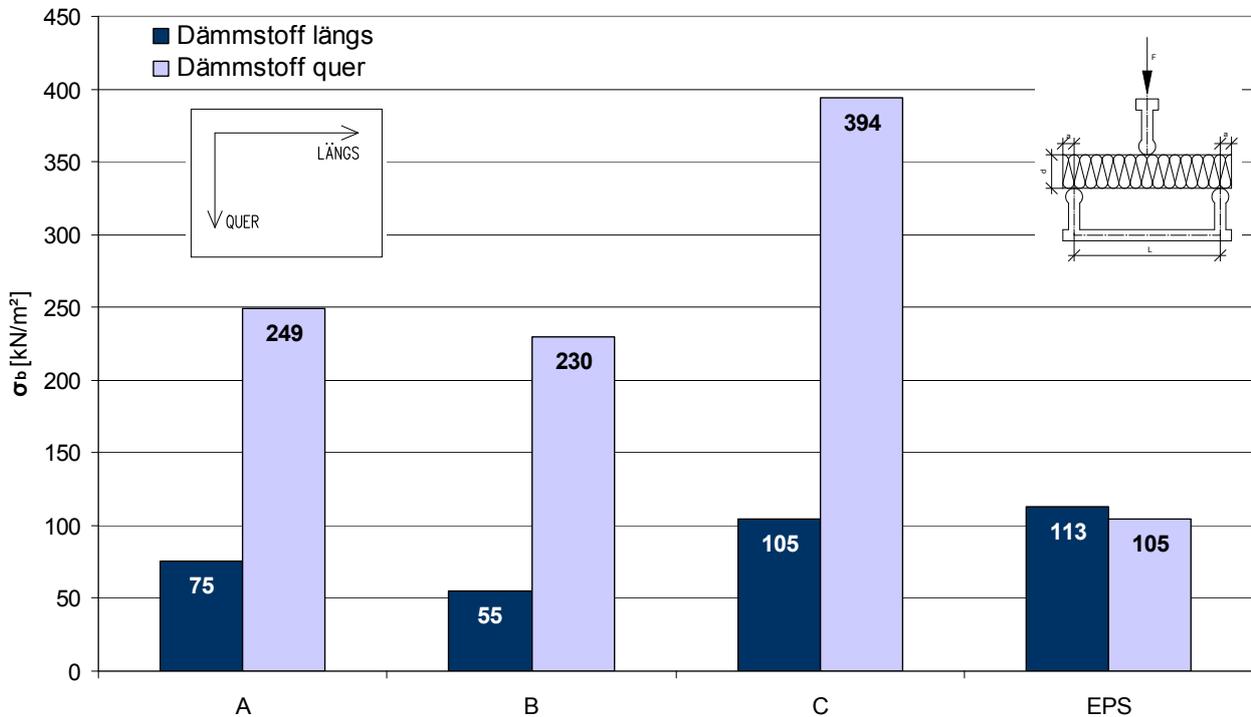


Bild 4.19 Biegefestigkeit der Dämmstoffe in Längs- und Querrichtung

Vergleicht man nun den Festigkeitsunterschied mit dem Versagensbild im Schaumblockversuch so ist zu erkennen, dass im Schaumblockversuch mit Mineralwolle-Dämmplatten überwiegend

die schwache Richtung geprüft wird, die dann zum Biegeversagen führen kann. Dies wird vor allem im Bild 4.20 deutlich.



Bild 4.20 Typisches Versagensbild im Schaumblockversuche bei Mineralwolle-Dämmplatten

Der Dübelabstand in Platten-Längsrichtung ist hier größer als in Platten-Querrichtung und provoziert somit eine stärkere Biegebeanspruchung der Dämmplatte in Längsrichtung.

Dies führt zum **2. Paradoxon**:

Bei einer um 90° gedrehten Schnittrichtung der Mineralwolle-Dämmplatten, würde man im Schaumblockversuch sehr wahrscheinlich andere Ergebnisse erhalten, da dann die schwache Richtung über die kürzere Spannweite und die starke Richtung über die längere Seite geprüft wird, obwohl sonst nichts am System geändert würde.

Somit stellt sich die Frage, ob der Schaumblockversuch geeignet ist, das Tragverhalten eines WDVS wirklichkeitsnah zu beschreiben. Die Verdübelung entspricht nicht einem praxisnahen Dübelbild und der Lastabtrag wird in eine Richtung provoziert. Ziel sollte es sein im Systemversuch praxisnah zu prüfen und den Lastabtrag in alle Plattenrichtungen zu ermöglichen.

4.5 KRITISCHE BETRACHTUNG DER BISHERIGEN PRÜFMETHODEN

Wie zuvor beschrieben, scheint der Schaumblockversuch nicht geeignet zu sein, um das Tragverhalten eines WDVS wirklichkeitsnah abzubilden. In Bild 4.21 ist das Dübelbild mit der daraus resultierenden Verformungsfigur im Schaumblockversuch dargestellt.

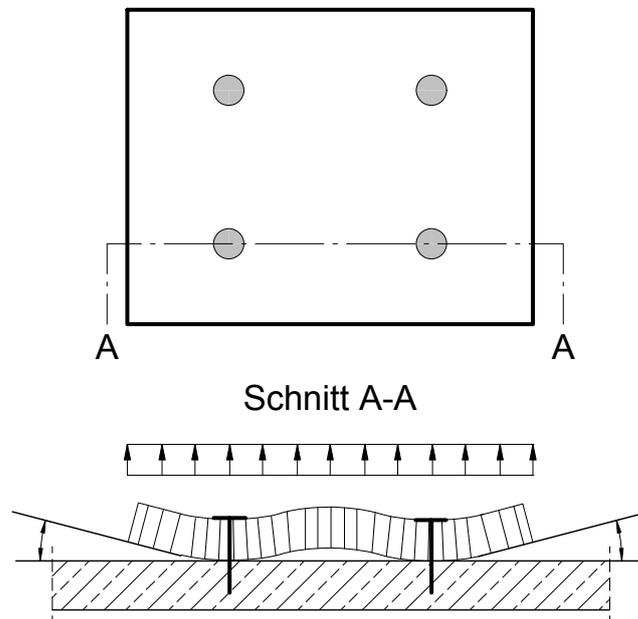


Bild 4.21 Dübelbild und daraus resultierende Verformungsfiguren im Schaumblockversuch

Das Abheben der Dämmplattenränder über die Längsseite der Dämmplatte könnte man evt. durch eine Umschnürung verhindern oder durch eine Umspannung mit einem Rahmen, sodass die Dämmplattenränder horizontal gehalten werden und eine horizontale Tangente vorhanden ist. Dabei würde man aber zusätzliche Lasten in der Dämmplattenebene erzeugen, die die Ergebnisse ungewollt beeinflussen können.

In der Realität wird man das Dübelbild aus Bild 4.21 kaum vorfinden, es ist für diesen Versuch jedoch unvermeidbar. Würde man eine Platte mit zwei Dübeln prüfen, würden sich immer exzentrische Belastungen der Dübel einstellen, die zu einem ungünstigen Versagen führen. Bei einer Verdübelung mit drei Dübeln ergibt sich eine unsymmetrische Verteilung über die Fläche und es werden nicht alle Dübel gleichmäßig belastet. Die Verdübelung mit 4 Dübeln ist ein Kompromiss und entspricht einer Verteilung von 8 Dübeln/m². 5, 6 oder mehr Dübel pro Platte ergeben eine zu große und unrealistische Dübelanzahl/m².

Die Prüfergebnisse von Vier-Punkt Befestigungen (Schaumblockversuch) sind mit den Ergebnissen der Prüfung an Ein-Punkt Befestigungen (Durchziehversuch) nicht direkt vergleichbar. Bei spröden Dämmstoffen (z.B. Polystyrol-Hartschaum-Dämmplatten), welche direkt nach dem Erreichen der Maximalkraft versagen, wird bei einer symmetrischen Vier-Punkt Befestigung immer der schwächste Befestigungspunkt das Versagen des Systems hervorrufen. Versagt ein Dübel, so wird der diagonal gegenüberliegende Dübel aus Gleichgewichtsgründen entlastet und die beiden verbleibenden Dübel müssen die gesamte Last aufnehmen (Bild 4.22). Dies führt zum sofortigen Gesamtversagen.

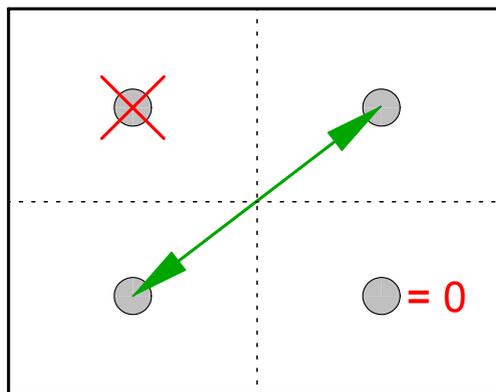


Bild 4.22 Versagensprozess bei einer symmetrischen Vier-Punkt Befestigung mit einem spröden Dämmstoff

Gemäß ETAG 004 [01] wird die Versagenslast aus dem Schaumblockversuch durch die Anzahl der Dübel dividiert. Damit erhält man aber nicht den Mittelwert der Tragfähigkeit der vier einzelnen Dübel, sondern der Kleinstwert von 4 Dübeln wird als Mittelwert für 4 Dübel interpretiert. Eine zuverlässige und realistische statistische Bewertung der Dübeltragfähigkeit aus 3 Schaumblockversuchen ist so nicht möglich.

Um die Versuchsergebnisse an Vier-Punkt Befestigungen mit denen einer Ein-Punkt Befestigung zu vergleichen, werden die Ergebnisse entsprechender Untersuchungen an Polystyrol-Hartschaum-Dämmplatten, die aus einer Charge stammen, statistisch betrachtet. Die Grundlagen der statistischen Darstellungen werden in Abschnitt 6.2 erläutert.

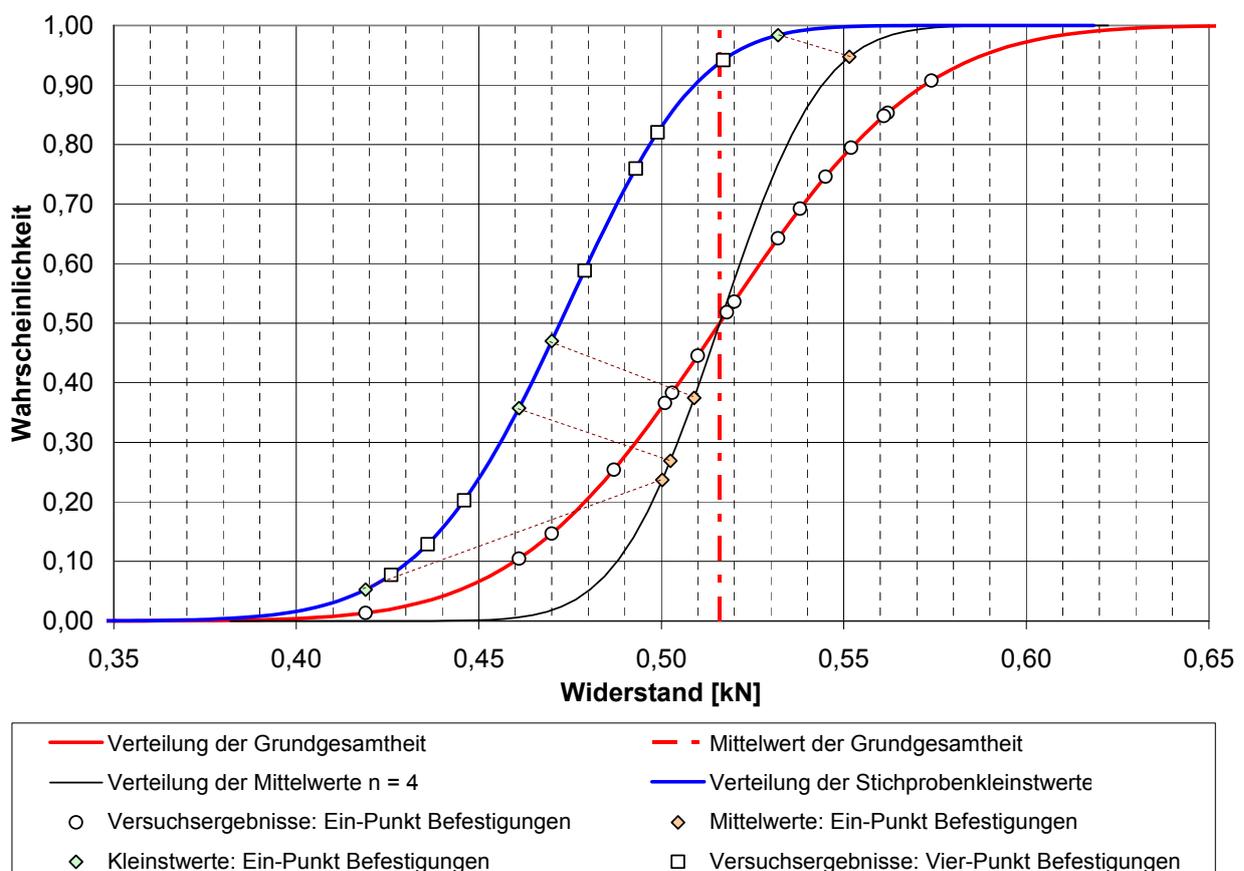


Bild 4.23 Theoretische Verteilung und Versuchsauswertung der Einfach- und Mehrfachbefestigung am Beispiel von Polystyrol-Hartschaum-Dämmplatten

Aus den Ergebnissen von vier Versuchsserien mit der Ein-Punkt Befestigung (mit $n = 4$) wurde auf die Grundgesamtheit geschlossen, welche durch die Verteilungsfunktion (rot) in Bild 4.23 dargestellt ist. Auf dieser Verteilung liegen somit die Einzelergebnisse \circ der Ein-Punkt Befestigung. Auf der Mittelwertfunktion (schwarz) sind die Mittelwerte \blacklozenge der vier Versuchsserien an Ein-Punkt Befestigungen angegeben und auf der Kleinstwertfunktion (blau) die zugehörigen Kleinstwerte \blacklozenge der Versuchsserien (vgl. Kleinstwertfunktion 6.2.5).

Werden nun die Versagenslasten aus der Vier-Punkt Befestigung durch vier geteilt, um den Wert für eine Ein-Punkt Befestigung zu erlangen, so liegen diese Werte \square zwischen den Kleinstwerten aus den Versuchen der Ein-Punkt Befestigung auf der Kleinstwertfunktion. Auch der Mittelwert der vier Kleinstwerte aus den Versuchen der Ein-Punkt Befestigung und der Mittelwert aus den Versuchen der Vier-Punkt Befestigung sind nahezu identisch. Somit wird deutlich, dass bei einer Vier-Punkt Befestigung immer nur Kleinstwerte ermittelt werden und ein Rückschluss auf die statistische Verteilung einer Ein-Punkt Befestigung nicht sinnvoll ist.

Für die Ermittlung des Windsogwiderstandes eines WDVS ist es daher empfehlenswert die charakteristischen Werte über die Einzelbefestigung nach bekannten statistischen Regeln zu bestimmen.

Bei der Prüfung im Durchziehversuch wird nur ein Dübel in der Dämmplatte geprüft. Dieser wesentlich einfacher durchzuführende Versuch wird zur Bestimmung möglicher Abminderungsfaktoren herangezogen, wie in Abschnitt 4.1 bereits beschrieben.

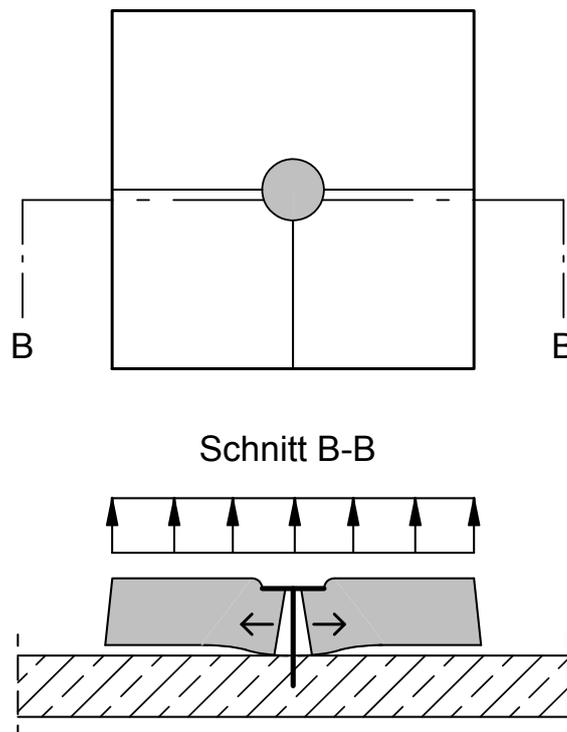


Bild 4.24 provozierte Verformungsfiguren im Durchziehversuch mit Dübelung in der T-Fuge

Betrachtet man die Prüfung der Fugendübelung im Durchziehversuch, so erkennt man, dass sich die Dämmplattenstöße aufweiten. Die sehr kleinen Dämmplattenteile werden dadurch unter dem Dübelteller weg gezogen (Bild 4.24) oder bei sehr steifen Platten von der Lasteinleitungs-

platte abgeschält (Bild 4.25). Um diesen Effekt zu verhindern, werden bei der Versuchsdurchführung die Dämmplattenteile umschnürt. Schon allein um den Dübel in die T-Fuge setzen zu können, müssen die Dämmplattenteile während des Setzvorgangs zusammengehalten werden, da sie beim Einziehen des Dübels auseinander gedrückt werden.

Durch eine Umschnürung können jedoch, wie bereits oben erwähnt, Spannungen in der Dämmplattenebene erzeugt werden, die die Ergebnisse ungewollt beeinflussen und das realistische Tragverhalten in der Fassade nicht widerspiegeln. Bei einer praxisnah verdübelten Fassade können die Dämmplatten seitlich nicht verschoben oder unter dem Dübel weggezogen werden, da sie in der Ebene durch die anderen Dämmplatten gehalten werden.



Bild 4.25 Vergleich der charakteristischen Versagensbilder der Dämmplatten im Durchziehversuch – Fugendübelung

Vergleicht man die Ergebnisse im Durchziehversuch (Tabelle 4.6) mit einer Verdübelung in der Plattenfläche und in der T-Fuge, so erkennt man einen deutlichen Tragfähigkeitsverlust von durchschnittlich 30 % bei Fugendübelung, mit einer überdurchschnittlich starken Streuungen der Versuchsergebnisse. Aus den oben genannten Beobachtungen während der Versuchsdurchführungen ist jedoch fraglich, ob dieser Tragfähigkeitsverlust auch in der Realität wieder zu finden ist. Die Prüfung der Fugendübelung im Durchziehversuch scheint erhebliche Tragfähigkeitsverluste zu provozieren.

Tabelle 4.6 Systemtragfähigkeiten im Durchziehversuch mit Flächen- und Fugendübelung der Mineralwolle- und Polystyrol-Dämmplatten im Vergleich zu den Grundlagenuntersuchungen aus 1995/1996

Prüfung	Mineralwolle-Dämmplatten				Polystyrol	
	2005			1995/96	2005	1995/96
	A	B	C	Typ HD	EPS	PS 15
DZ _{Platte} [kN/Dübel]	0,63	0,55	0,72	0,83	0,51	0,57
DZ _{Fuge} [kN/Dübel]	0,43	0,35	0,57	0,44	0,44	0,43
Tragfähigkeitsverlust	32%	36%	21%	47%	14%	25%

Eine neue Prüfmethode zur Bestimmung der Tragfähigkeit eines Dübels in einer T-Fuge ist zwingend erforderlich, um ein realitätsnahes Tragverhalten bestimmen zu können.

4.6 NEUE TESTMETHODE

4.6.1 Herleitung einer neuen Testmethode

Ein praxisnahes Prüfverfahren hat die folgenden Bedingungen zu erfüllen:

- praxisnahe Dübelanordnung
- Analogie zur tatsächlichen Verformungsfigur
- Lastabtrag in mehreren Richtungen
- sämtliche Versagensarten müssen auftreten können.

In Bild 4.26 wird eine praxisnahe Dübelanordnung und Verformungsverhalten im Vergleich zum derzeitigen Prüfverfahren im Schaumblockversuch gezeigt.

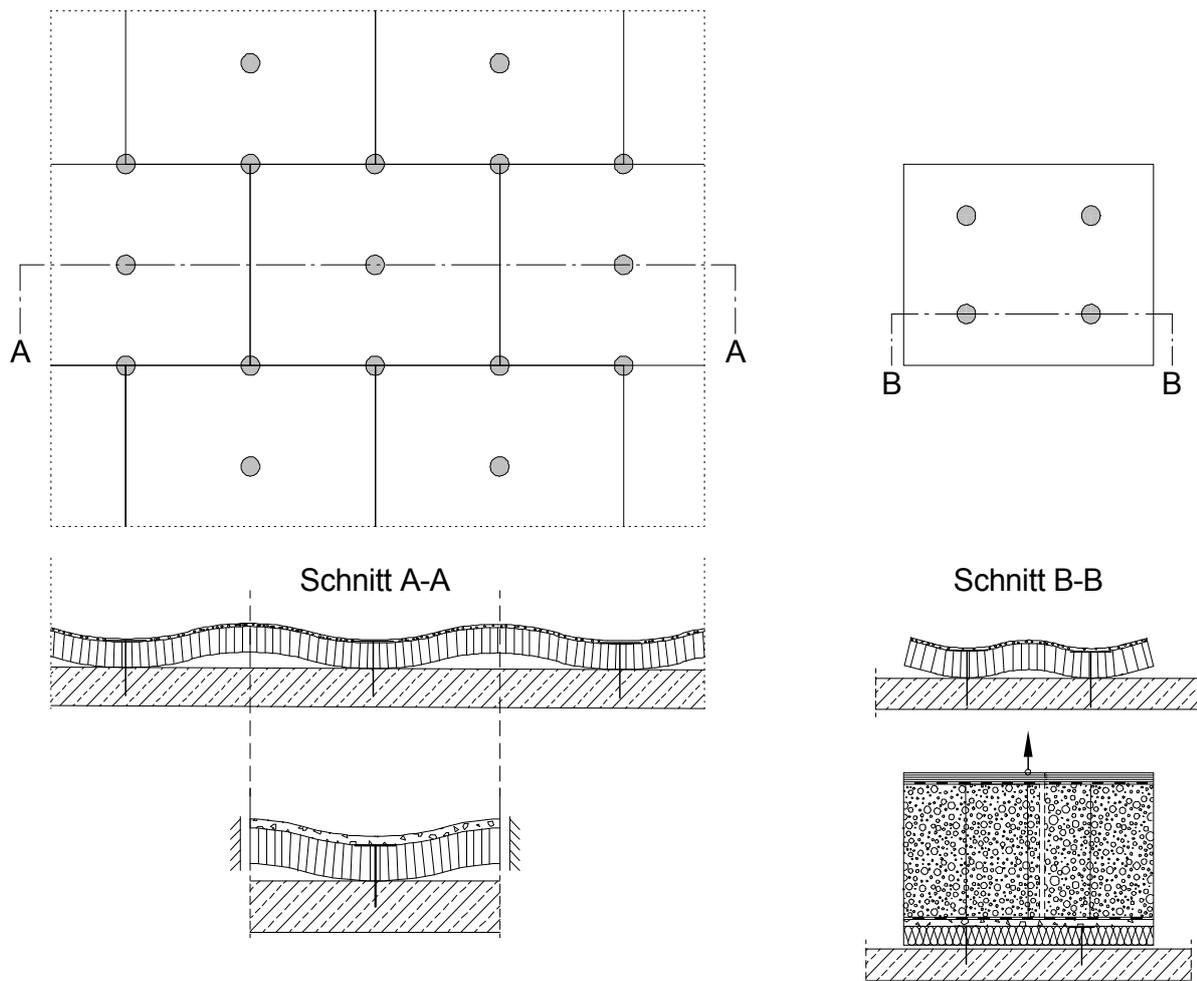


Bild 4.26 Herleitung einer neuen Testmethode im Vergleich zu dem Schaumblockversuch

Im Schaumblockversuch wird eine Verdübelung geprüft, die in der Praxis nicht oder nur sehr selten vorkommt. Außerdem heben sich beim Schaumblockversuch die Ränder ab, während an einer Fassade diese Dämmplattenränder durch die kontinuierlich vorhandene Putzschicht gehalten werden und somit eine Unstetigkeit verhindert wird. Betrachtet man nun einen Ausschnitt von Bild 4.26, so erhält man eine Verformungsfigur, die in der Prüfung abgebildet werden sollte.

PRAXISNAHE VERFORMUNGSFIGUR

Zunächst ist es erforderlich, dass die Ränder der Dämmplatte horizontal gehalten werden und eine horizontale Tangente haben. Dies erreicht man durch eine Einspannung der Dämmplattenränder. Auf die Platten Ober- und Unterseite werden hierzu Platten (z.B. aus Holz) gelegt und gegeneinander verspannt ohne das die Dämmplatte belastet wird, vgl. Bild 4.27. Die Platten haben eine kreisrunde Aussparung, um einen gleichmäßigen Lastabtrag in alle Plattenrichtungen zu ermöglichen.

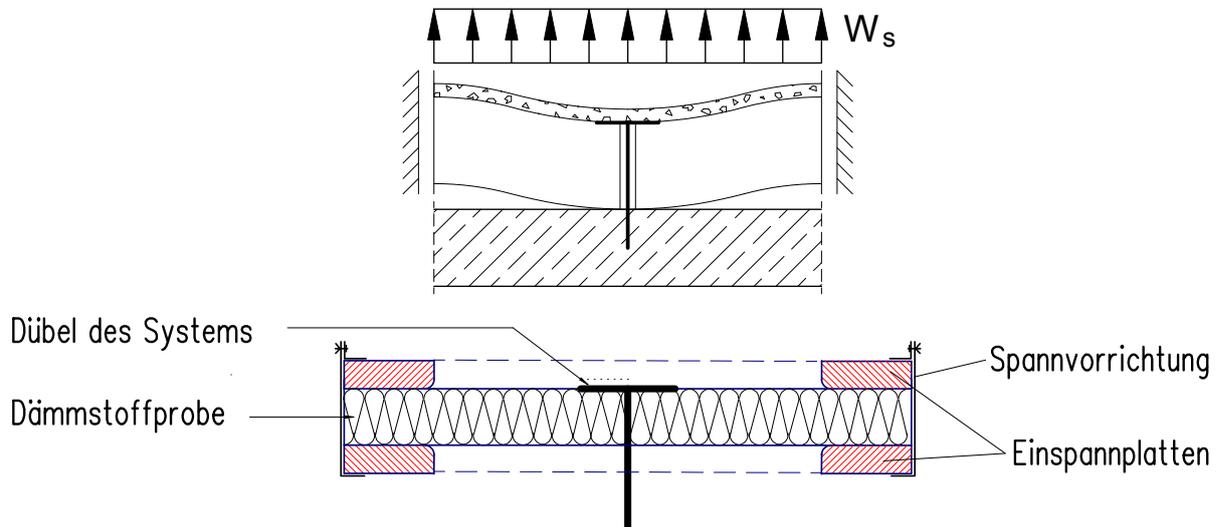


Bild 4.27 Einspannung der Dämmplattenränder

HERLEITUNG DER ABMESSUNGEN

Wegen der unterschiedlichen Steifigkeiten in den **Mineralwolle-Dämmplatten** (vgl. Abschnitt 4.4.2) in den Plattenrichtungen A-A, B-B und C-C wird näherungsweise ein Balkenmodell gewählt, um mit einer mittleren Steifigkeit zu prüfen (Bild 4.28).

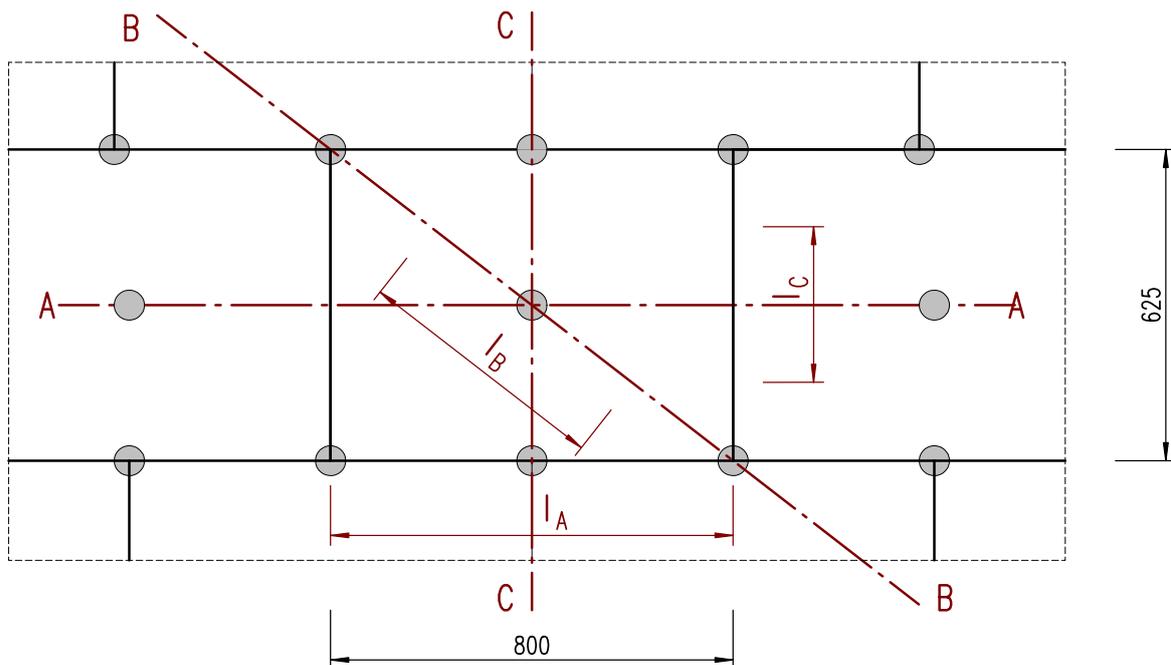


Bild 4.28 Lastabtrag über die Achsen A-A, B-B und C-C

Berechnung der Steifigkeit in den verschiedenen Achsen, mit $c \sim \frac{EI}{l^3}$:

A-A	$l_A \approx 800 \text{ mm};$	$EI_A \sim \frac{1}{4} EI_C$	\Rightarrow	$c_A \sim 0,5$	$\rightarrow 1 \%$
B-B	$l_B \approx 500 \text{ mm};$	$EI_B \sim \frac{1}{2} EI_C$	\Rightarrow	$c_B \sim 4,0$	$\rightarrow 11 \%$
C-C	$l_C \approx 310 \text{ mm};$	$EI_C \sim 1$	\Rightarrow	$c_C \sim 33,6$	$\rightarrow 88 \%$
				$\Sigma c \sim 38,1$	$\rightarrow 100 \%$

\Rightarrow Minstdurchmesser bei Mineralwolle-Dämmplatten des Typs HD:

$$\varnothing_{\min} = 0,01 \cdot 800 \text{ mm} + 0,11 \cdot 500 \text{ mm} + 0,88 \cdot 310 \text{ mm} \approx \mathbf{335 \text{ mm}}$$

Dies entspricht ungefähr: $\varnothing \approx d_T + 4 d_D$ mit d_T Tellerdurchmesser
 d_D minimale Dämmstoffdicke z. B. 60 mm

Dieses Vorgehen hat zur Folge, dass bei anderen Steifigkeitsverhältnissen auch mit angepassten Durchmessern zu prüfen wäre.

Bei **Polystyrol-Hartschaum-Dämmplatten** ist das Steifigkeitsverhältnis in alle Richtungen gleich, dies wird auch durch den kreisrunden Durchstanzkegel deutlich. Der Durchstanzkegel bei Polystyrol-Hartschaum-Dämmplatten erfolgt normalerweise mit einem Steigungswinkel von 45° über die Dämmstoffdicke d_D . Um auch größere Durchstanzkegel mit geringerem Winkel zu ermöglichen wird daher ein Abstand von mindestens $1,5 d_D$ gewählt, vgl. Bild 4.29.

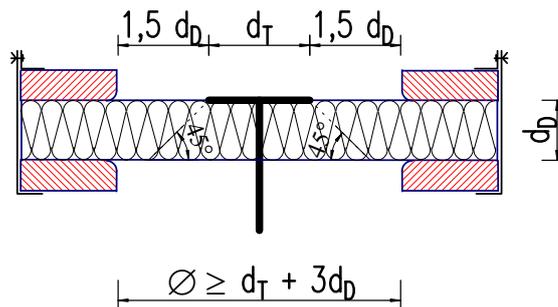


Bild 4.29 Minstdurchmesser im modifizierten Schaumblock- und Durchziehversuch

Somit ergibt sich hier durch die Geometrie des Versagensbildes folgender Durchmesser:

$$\varnothing = d_T + 3 d_D \quad \text{mit } d_T \text{ Tellerdurchmesser}$$

d_D minimale Dämmstoffdicke z. B. 60 mm

Im Folgenden wird für den Prüfdurchmesser die Variable χ eingeführt, welche für jeden Dämmstoff bestimmt werden muss, da sie von dessen Versagensverhalten abhängt. Je größer der Ausbruchkegel ist, umso größer muss χ gewählt werden.

$$\varnothing = d_T + \chi d_D \quad \text{mit } d_T \text{ Tellerdurchmesser}$$

d_D minimale Dämmstoffdicke z. B. 60 mm
 χ Dämmstoffvariable ($\chi = 3$ für EPS und $\chi = 4$ für MW)

Aufgrund der Steifigkeitsverhältnisse von Mineralwolle-Dämmplatten sollte dabei ein Minstdurchmesser von $d_{D,\min} = 335 \text{ mm}$ nicht unterschritten werden!

MÖGLICHE VERSAGENSARTEN

Neben einer praxisnahen Verformungsfigur sollen auch die möglichen Versagensarten im System berücksichtigt werden (Bild 4.30). Ein Durchstanzen der Dämmplatte soll möglich sein, sowie ein Quersugversagen in der Dämmplatte und ein Haftzugversagen bzw. ein sog. „Fellabriss“ vom Unterputz zum Dämmstoff.

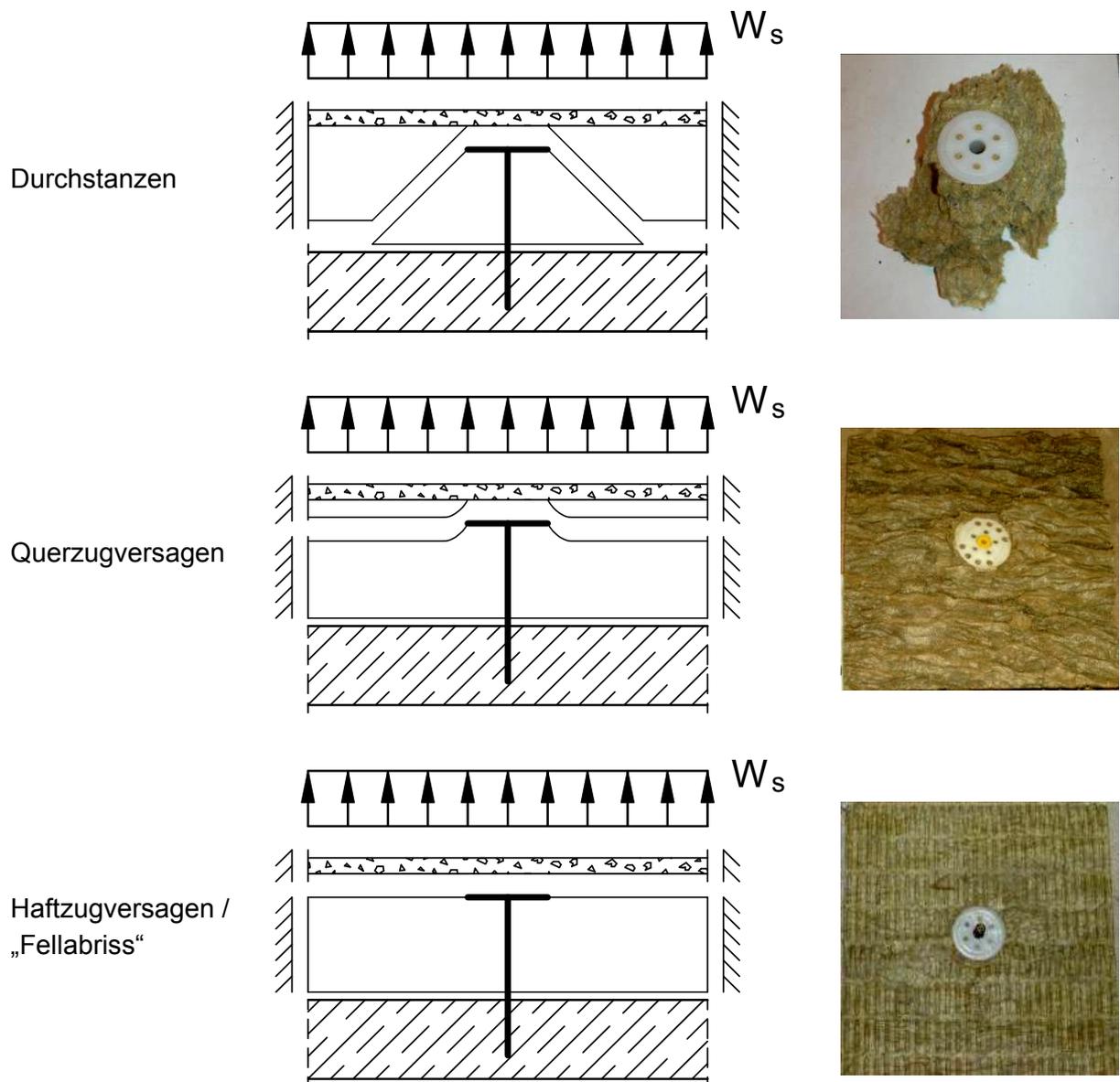


Bild 4.30 mögliche Versagensarten im Windsogversuch

Diese möglichen Versagensarten können nur erzielt werden, wenn die simulierte Windsogkraft über die Putzfläche oder Dämmstoffoberfläche eingeleitet wird und die Randeinspannung der Dämmplatten ein Versagen auf Haftzug oder Quersug nicht verhindert.

Daher sollte ein Randabstand von der Putzschicht und Lasteinleitung zur Randeinspannung von 1 cm eingehalten werden.

NEUE TESTMETHODE

Durch diese Überlegungen kann ein praxisnahes Prüfen über die folgende Testmethode erzielt werden, die in Anlehnung an den bekannten Schaumblockversuch entwickelt wurde und daher mit ‚modifizierter Schaumblockversuch‘ bezeichnet wird (Bild 4.31).

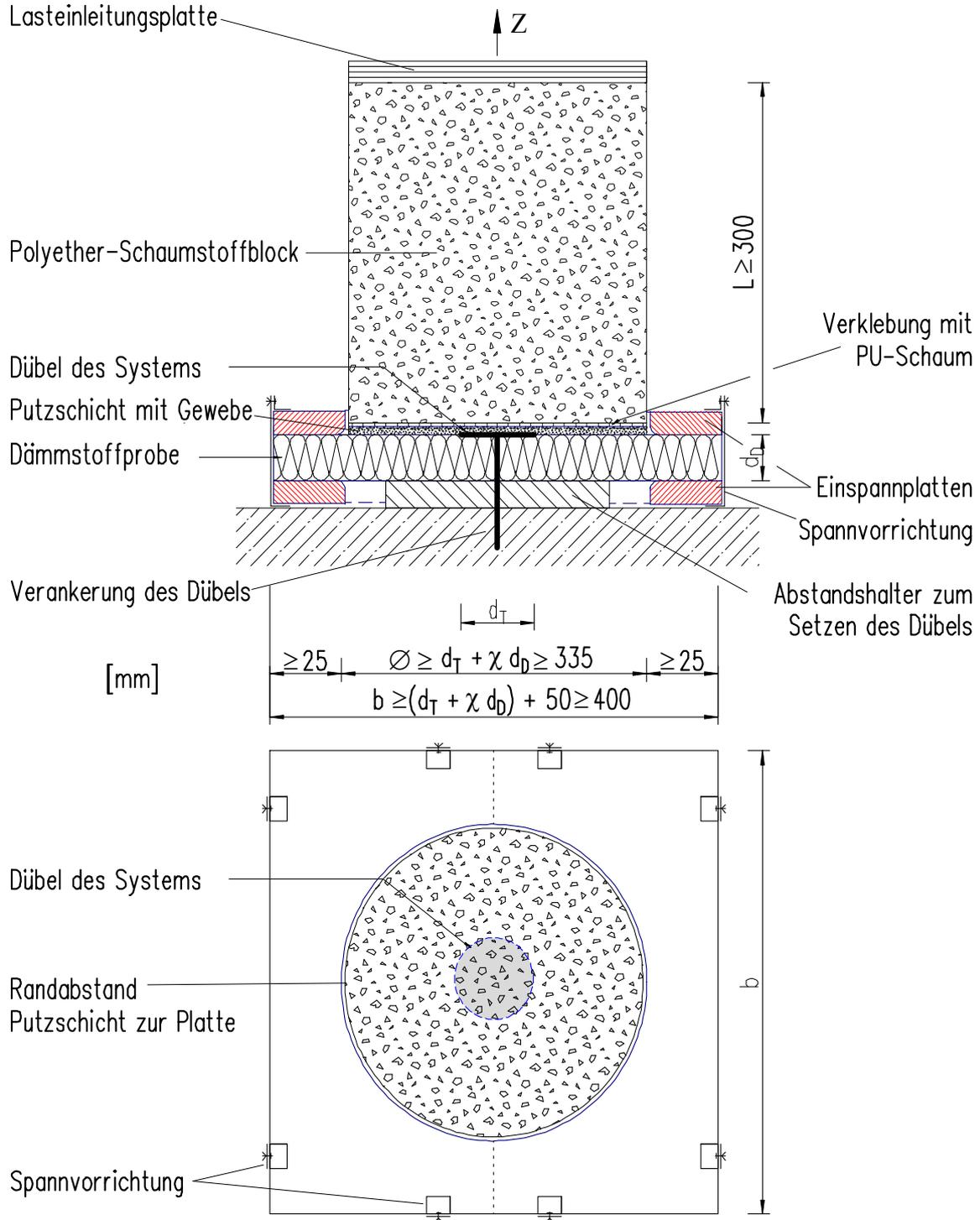


Bild 4.31 neue Testmethode – modifizierter Schaumblockversuch

MODIFIZIERTER SCHAUMBLOCKVERSUCH

Es wird eine quadratische Dämmstoffprobe mit einer Kantenlänge von $b = (d_T + \chi d_D) + 50$ mm in Abhängigkeit von der Dämmstoffdicke d_D und Tellerdurchmesser d_T zugeschnitten, ein Mindestmaß von 400 mm x 400 mm sollte eingehalten werden. Ein Dübel mit Tellerdurchmesser d_T wird in die Mitte der Probe in einen tragfähigen Untergrund gesetzt. Damit die Randeinspannung später unter die Dämmplatte geschoben und der Dübel fest angezogen werden kann, muss vor dem Setzen des Dübels ein Abstandshalter unter die Dämmstoffprobe gelegt werden. Mit Hilfe einer Putzschablone wird eine Putzschicht mit Bewehrungsgewebe kreisrund in Plattenmitte aufgetragen. Die Putzschicht soll im Durchmesser kleiner sein als die Randeinspannung der Dämmplatte, damit ein Versagen auf Haftzug oder Querzug nicht behindert wird.

Nach dem vollständigen Aushärten der Putzschicht, wird ein Schaumblock auf den Putz geklebt. Die überstehenden Dämmplattenränder werden eingespannt, hierzu werden Einspannplatten mit kreisrunder Aussparung auf und unter die Probe gelegt. Über Spannvorrichtungen werden die Einspannplatten so gegen die Dämmplatte gespannt, dass die Dämmplatte nicht belastet wird. Die untere Platte muss vor dem Herstellen der Proben unter die Dämmplatte gelegt oder kann durch eine Zweiteilung hinterher unter die Probe geschoben werden.

Die Zugkräfte werden über eine auf den Schaumblock aufgeklebte Lasteinleitungsplatte mit einem hydraulischen Prüfzylinder verformungsgeregelt eingeleitet. Die Prüfgeschwindigkeit beträgt 50 mm/min, da hier auch der nachgiebige Schaumblock gedehnt wird. Die Last-Verformungskurve wird aufgezeichnet und die größte Zugkraft gemessen.

Da der modifizierte Schaumblockversuch durch das Auftragen und Aushärten des Putzes relativ aufwendig ist, wurde ein vereinfachter Versuchsaufbau in Anlehnung an den Durchziehversuch entwickelt (Bild 4.32 und Bild 4.33).

MODIFIZIERTER DURCHZIEHVERSUCH

Es wird eine quadratische Dämmstoffprobe, wie oben beschrieben, zugeschnitten. Ein Dübel mit Tellerdurchmesser d_T wird in die Mitte der Probe in einen tragfähigen Untergrund gesetzt. Damit die Randeinspannung später unter die Dämmplatte geschoben und der Dübel fest angezogen werden kann, muss vor dem Setzen des Dübels ein Abstandshalter unter die Dämmstoffprobe gelegt werden. Auf die Probe wird eine kreisrunde Lasteinleitungsplatte aufgeklebt dessen Größe im Durchmesser kleiner ist als die Öffnung der Einspannplatten, damit ein Versagen auf Haftzug oder Querzug nicht behindert wird und kein Verkanten in der Versuchsdurchführung auftritt. Um einen Verbund der Verklebung zum Dübelteller und damit eine positive Beeinflussung der Versuchsergebnisse zu verhindern, werden die Dübelteller vor dem Verkleben mit einer Folie abgedeckt. Die überstehenden Dämmplattenränder sind auch hier, wie oben beschrieben, eingespannt.

Die Zugkräfte werden über einen hydraulischen Prüfzylinder verformungsgeregelt eingeleitet. Die Prüfgeschwindigkeit beträgt 20 mm/min, da hier die Probe im Gegensatz zum Versuch mit dem Schaumblock direkt belastet wird. Die Last-Verformungskurve wird aufgezeichnet und die größte Zugkraft gemessen.

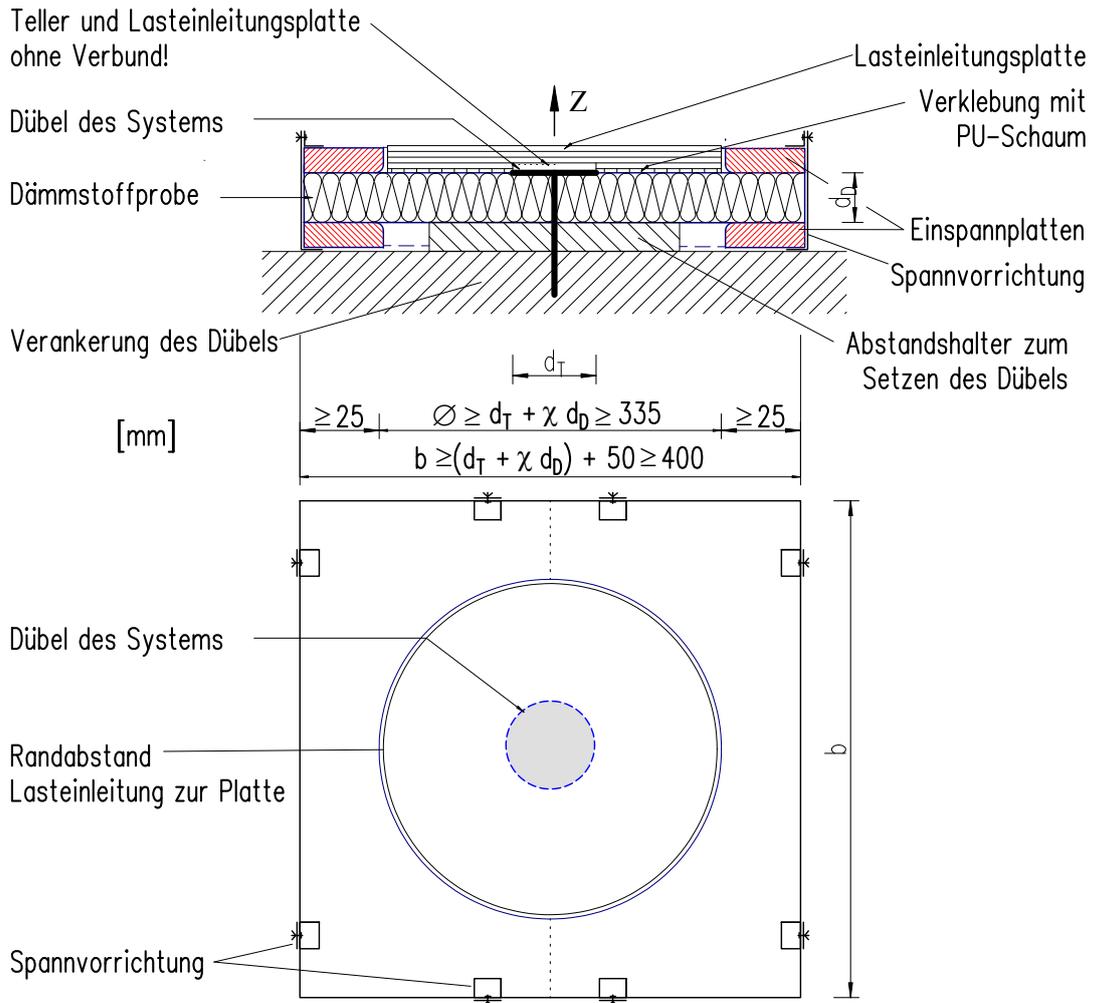


Bild 4.32 neue Testmethode – modifizierter Durchziehversuch



modifizierter Schaumblockversuch



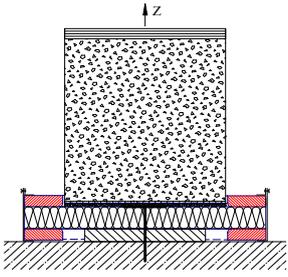
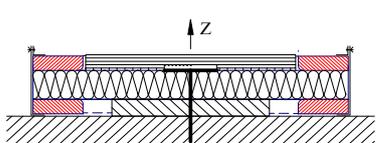
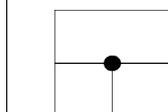
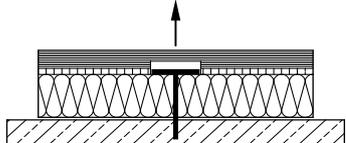
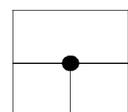
modifizierter Durchziehversuch

Bild 4.33 Aufbau der neuen Testmethoden

4.6.2 Versuchsergebnisse

Versuche mit den neuen Testmethoden ergaben die in der folgenden Tabelle 4.7 wiedergegebenen Tragfähigkeiten, im Vergleich zum Durchziehversuch mit Polystyrol-Hartschaum- (EPS), Mineralwolle- (MW) und Holzwolle-Dämmplatten (HW). Das Eigengewicht der Versuchseinrichtung wurde dabei berücksichtigt. Der Lastabtrag erfolgt entsprechend der Biege- und Schubsteifigkeiten der Dämmplatten und nicht mehr durch eine im realen WDVS nicht vorhandene und durch die Dübelung erzwungene Richtung mit geringer Biegefestigkeit.

Tabelle 4.7 Tragfähigkeiten im modifizierten Schaumblock- und Durchziehversuch

	mod. SB-Versuch	mod. Durchziehversuch		Durchziehversuch	
					
	[kN/Dübel]	[kN/Dübel]	[kN/Dübel]	[kN/Dübel]	[kN/Dübel]
EPS d = 60 mm	0,55	0,59	0,57 -3%	0,58	0,51 -12%
MW d = 60 mm	0,65	0,71	0,65 -8%	0,70	0,55 -21%
HW d = 60 mm	-	0,88	0,68 -23%	0,87	0,34 -61%

Weiterhin ist es in diesem Test vergleichsweise einfach möglich, die Tragfähigkeit eines Dübels in einer T-Fuge zu bestimmen (Bild 4.34).

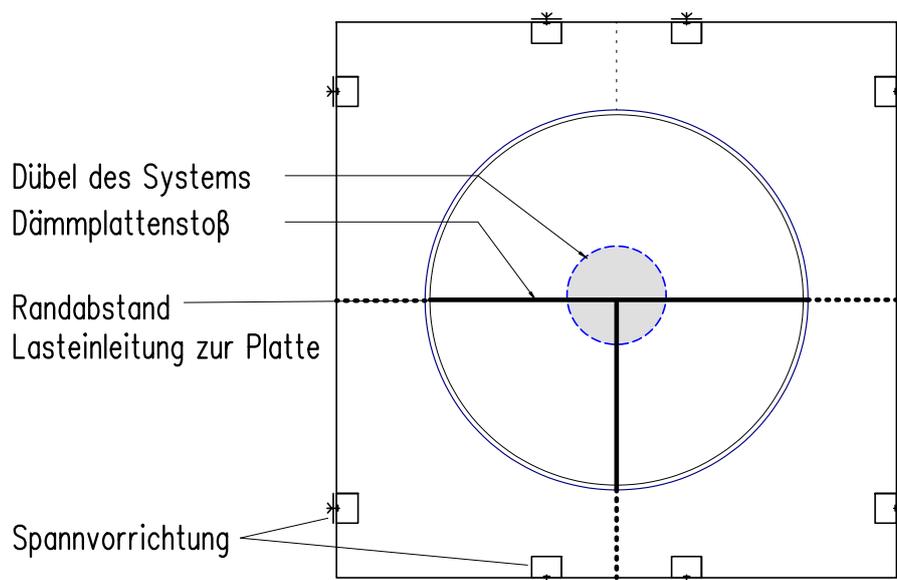


Bild 4.34 Verdübelung in der T-Fuge im modifizierten Schaumblock- und Durchziehversuch

Die zuvor geforderten **möglichen Versagensarten** konnten mit der neuen Testmethode ebenfalls abgebildet werden, vgl. Bild 4.35.

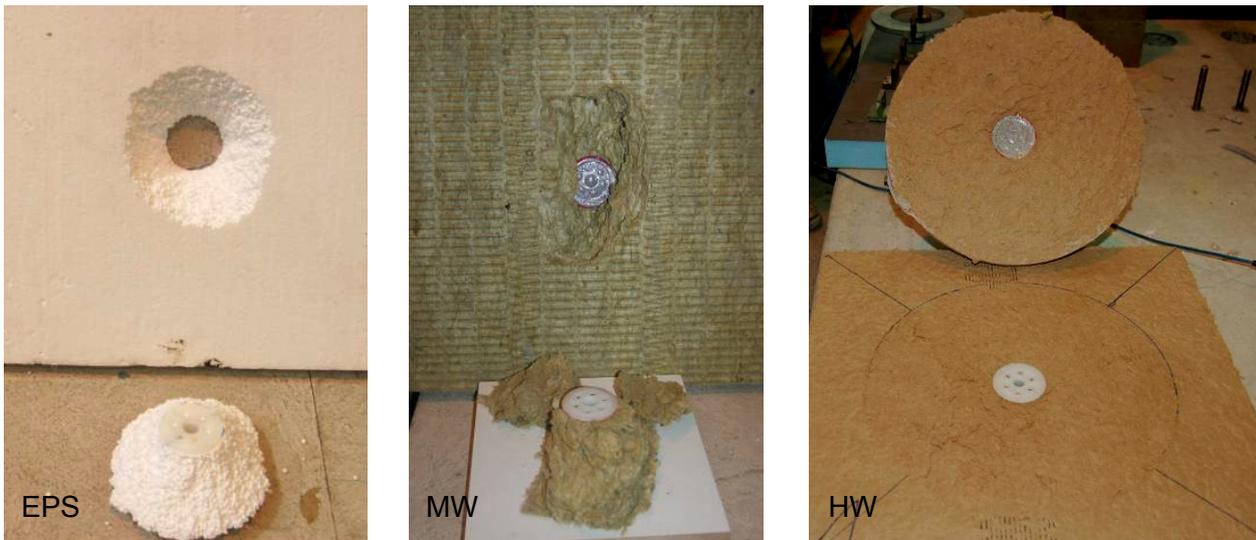


Bild 4.35 Versagensarten im modifizierten Schaumblock- und Durchziehversuch

Bei den Polystyrol-Hartschaum-Dämmplatten trat grundsätzlich ein Durchstanzen mit einem kreisrunden Durchstanzkegel auf. Anhand der Bruchbilder bei Polystyrol-Hartschaum-Dämmplatten (Bild 4.36) erkennt man, dass beim Dübeldurchziehversuch ein reines Schubversagen mit einer Neigung von etwa 45° der Dämmplatten eintritt. Beim 'modifizierten Schaumblockversuch' tritt ein kombiniertes Versagen aus Schub und Biegung auf, der Winkel an der Unterseite des Durchstanzkegels ist hier erkennbar kleiner als 45° .

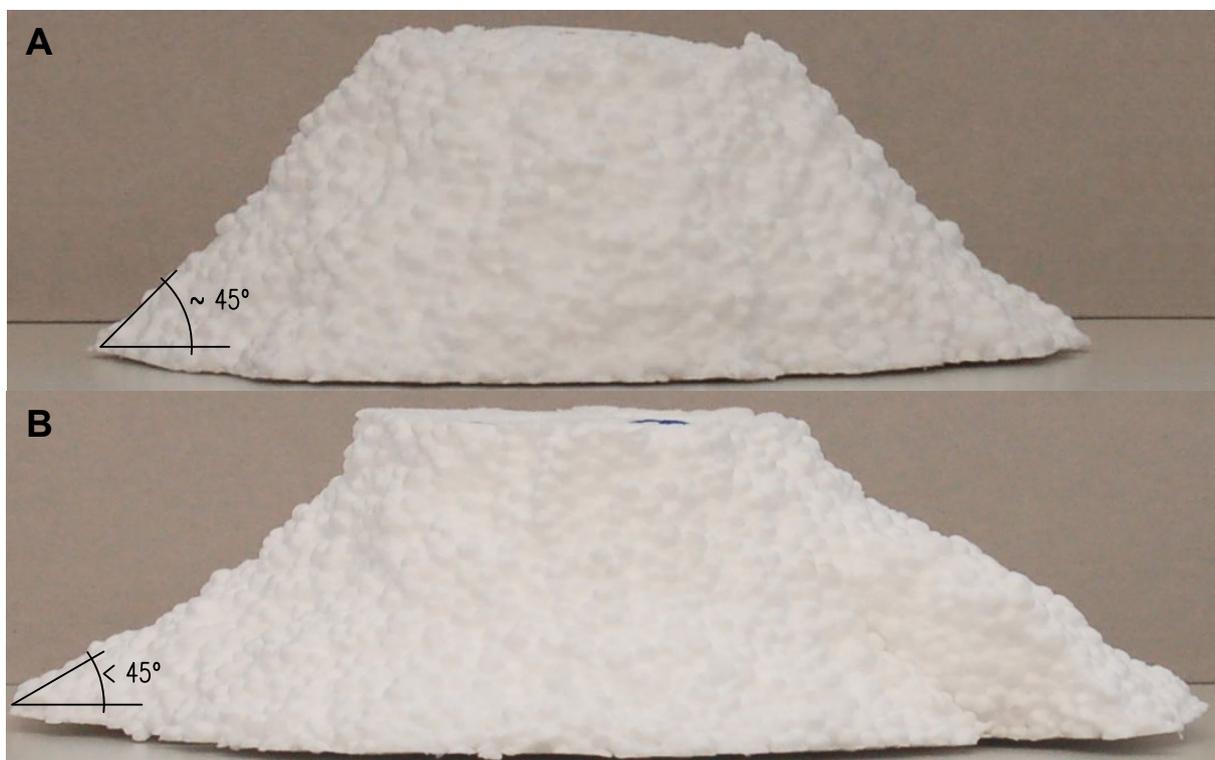


Bild 4.36 Vergleich der Bruchbilder bei Polystyrol-Hartschaum-Dämmplatten:
A Durchziehversuch B modifizierter Schaumblockversuch

Bei den Mineralwolle-Dämmplatten trat ebenfalls ein Durchstanzen auf, hier erkennt man jedoch an dem ovalen Ausbruch die starke und schwache Richtung der Dämmplatte. Der Ausbruch über die wesentlich steifere Plattenrichtung ist länger. Ein Biegeversagen über die biegeschwache Plattenrichtung wie im Schaumblockversuch wird hier nicht provoziert sondern durch die Aktivierung des Lastabtrags in der starken Plattenrichtung verhindert.

Bei den Holzwolle-Dämmplatten trat ein Querkzugversagen in der Dämmplattenoberfläche auf. Die Holzwolle-Dämmplatten weisen eine so hohe Steifigkeit auf, dass hier die Querkzugfestigkeit der Dämmplatte maßgebend ist und die Dämmplatte auf Querkzug versagt.

Ein deutlich geringerer Tragfähigkeitsunterschied zwischen der Verdübelung in der Plattenfläche und der Verdübelung in der **T-Fuge** ist im Vergleich zum Durchziehversuch zu erkennen. Im Durchziehversuch ist die Reduktion für die Fugendübelung im Mittel dreimal so groß wie bei dem 'modifizierten Durchziehversuch'.

Betrachtet man bei der Durchführung des 'modifizierten Schaumblockversuchs' mit Polystyrol das Versagensbild der Dämmplatte an der Plattenunterseite, so erkennt man (Bild 4.37), dass sich bei der Prüfung in der Dämmplattenfläche, vor dem Versagen der Dämmplatten, Risse bilden. Die einzelnen Sektoren haben etwa einen Winkel von 120° . Bei der Prüfung in der Dämmplattenfuge hingegen weiten sich nur die Dämmplattenstöße. Hier sind durch die Fugenanordnung die Sektoren ($180^\circ - 90^\circ - 90^\circ$) bereits vorhanden. Die Fugen entsprechen etwa den Rissen im Versuch ohne Fuge. Die Last-Verformungskurven bei Versuchen mit und ohne Fuge sind nahezu gleich.

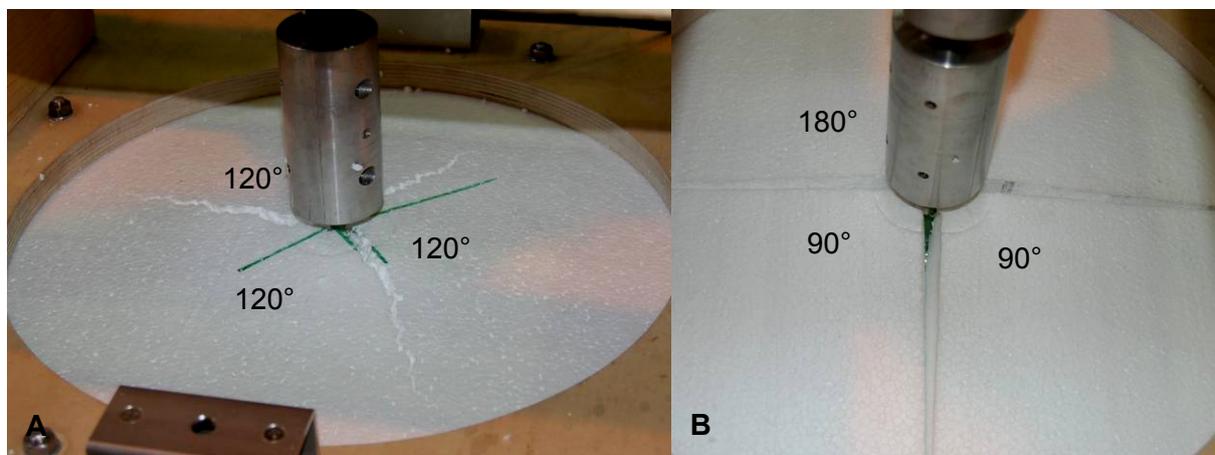


Bild 4.37 Verformungsverhalten der Dämmplatten während der Durchführung im modifizierten Schaumblockversuch auf der Plattenunterseite

A: Prüfung in der Dämmplatten**fläche** B: Prüfung in der Dämmplatten**fuge**

Bei der Prüfung in der Dämmplattenfuge im 'modifizierten Schaumblockversuch' (Bild 4.37 B) wird deutlich, dass sich hier die Dämmplattenteile nicht unter dem Dübel weg ziehen können. Außerdem ist zu erkennen, dass die Aufweitung der Dämmplattenfuge nur unter dem Dübel eintritt, an der Randeinspannung sind die Stöße weiterhin zusammengehalten.

Die Abbildungen in Bild 4.38 und Bild 4.39 veranschaulichen den Versuchsaufbau und das Versagen beim Versuch in der T-Fuge an Mineralwolle-Dämmplatten. Hier handelt es sich um

eine sehr steife Dämmplatte, wodurch ein Abschälen der Dämmplattenteile von der Lasteinleitungsplatte, wie in Abschnitt 4.5 beschrieben, nicht provoziert wird.



Bild 4.38 T-Fuge im modifizierten Schaumblockversuch auf der Plattenunterseite

Am Bruchbild innerhalb der Mineralwolle-Dämmplatte beim Versuch in der T-Fuge, ist gut zu erkennen, dass hier die Lastverteilung in der Dämmplatte sehr unterschiedlich verlaufen ist. Dieses Bruchbild bestätigt die Annahme, dass in dem 'modifizierten Schaumblockversuch' der Lastabtrag entsprechend der Biege- und Schubsteifigkeiten der Dämmplatten erfolgt.

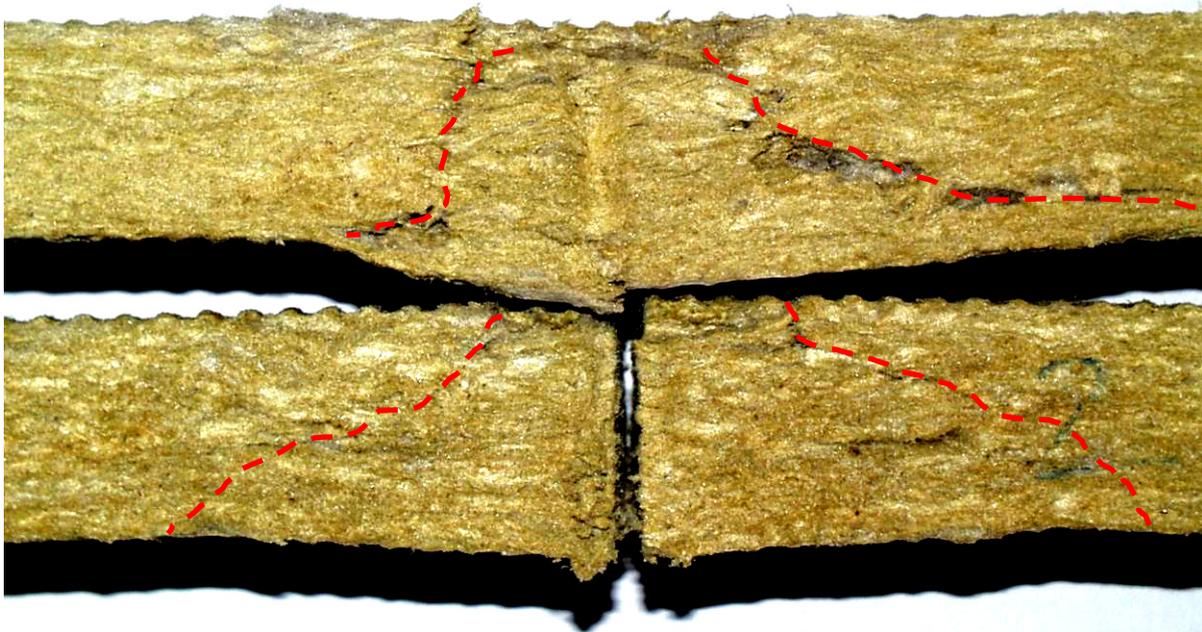


Bild 4.39 Bruchbild innerhalb der Mineralwollendämmplatte beim Versuch mit einer T-Fuge
oben: Bruch in der schwachen Richtung
unten: Bruch in der starken Richtung

4.6.3 Kritische Betrachtung der neuen Testmethoden

Der 'modifizierte Schaumblockversuch' und der 'modifizierte Durchziehversuch' bieten ein praxisnahes Prüfverfahren, welches auf alle Dübelanordnungen übertragen werden kann, eine Analogie zur Verformungsfigur aufweist, den Lastabtrag in mehrere Richtungen ermöglicht und in dem alle Versagensarten eines gedübelten WDV-Systems auftreten können.

SYSTEMSTEIFIGKEIT

Die Lasteinleitung im 'modifizierten Durchziehversuch' könnte die Dämmplattenoberfläche zu sehr versteifen, so dass mögliche Biegeeinflüsse behindert werden. Die Ergebnisse aus dem 'modifizierten Durchziehversuch' liegen durchschnittlich 10 % höher als bei der Prüfung im 'modifizierte Schaumblockversuch' (Tabelle 4.7). Dies kann an der Versteifung der Dämmplattenoberfläche oder an einer bisher gleichen Prüfgeschwindigkeit liegen.

Der 'modifizierte Schaumblockversuch' sollte daher immer als Systemversuch dienen und der 'modifizierten Durchziehversuch' für Parameterstudien, wie den Einfluss der Fugendübelung und der Alterung der Dämmplatten. Ansonsten wäre es auch durchaus möglich, den 'modifizierten Durchziehversuch' mit einer Tragfähigkeitsreduktion von 10 % zu beaufschlagen.

Bei unbekanntem Dämmstoff, deren Systemtragverhalten nicht bekannt ist, kann aufgrund der Mehrfachbefestigung und der Systemsteifigkeit jedoch weiterhin ein großer Bauteilversuch (Schaumblockversuch) erforderlich sein. Es sollte jedoch für das jeweilige System ein optimierter Versuchsaufbau, wie z.B. die Verdübelung, gewählt werden.

DICKENBESCHRÄNKUNG

Neuerdings werden auch die Tragfähigkeiten eines Dübels im WDVS an dicken Dämmstoffen geprüft, da heute ein höherer Wärmeschutz erforderlich ist. Infolge der Dämmplattenabmessungen können im 'modifizierten Schaumblockversuch' und 'modifizierten Durchziehversuch' nicht alle Dämmplattendicken geprüft werden.

Das Liefermaß von Polystyrol-Hartschaumd-Dämmplatten beträgt 1.000 mm x 500 mm, die maximale Probengröße ist daher mit einer Kantenlänge von $b_{\max} = 500$ mm beschränkt. Der maximal prüfbare Durchmesser beträgt somit $\varnothing_{\max} = b_{\max} - 50 = 450$ mm. Mit $\varnothing_{\max} = (d_T + 3 d_D)$ und einem Tellerdurchmesser $d_T = 60$ mm erhält man eine maximal prüfbare Dämmstoffdicke von $d_{D,\max} = (450 - 60) / 3 = 130$ mm.

Bei Mineralwolle-Dämmplatten mit einer Dämmplattenabmessung von 800 mm x 625 mm beträgt die maximal prüfbare Dämmstoffdicke $d_{D,\max} = (625 - 50 - 60) / 4 \approx 130$ mm mit $\varnothing_{\max} = (d_T + 4 d_D)$.

Mit den neuen Testmethoden wäre es somit nur möglich, Dämmstoffdicken von **$d_{D,\max} = 130$ mm** zu prüfen. Es können jedoch für größere Dämmstoffdicken mehrere Dämmplatten verwendet werden (Bild 4.40). Dabei muss die kreisrunde Aussparung der Einspannplatten entsprechend der Steifigkeitsverhältnisse der Dämmplatte oder des Durchstanzkegels vergrößert werden.

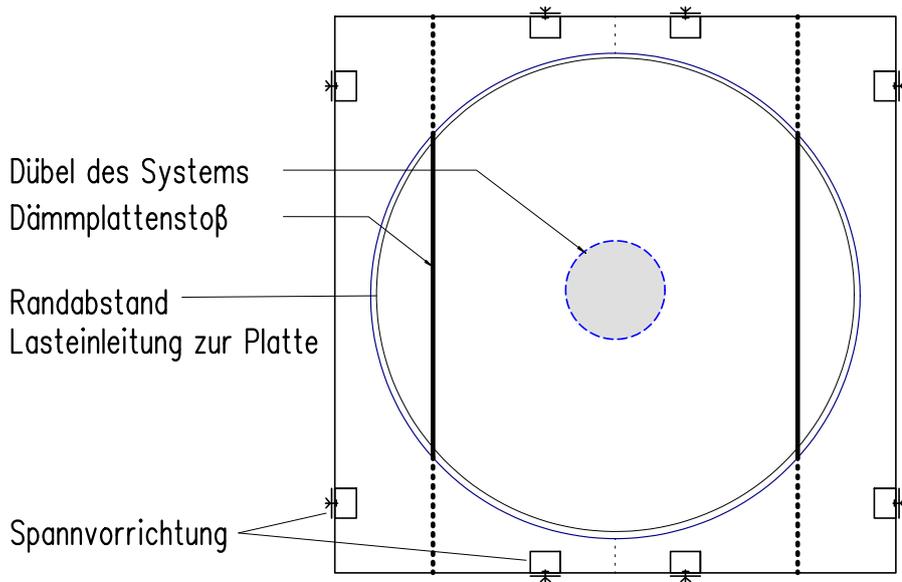


Bild 4.40 Prüfaufbau für Dämmstoffdicken $d_D > 130$ mm mit mehreren Dämmplatten

Hierbei kann es nun sein, dass die Aussparung größer ist, als die Dämmplatte. Zwischen den Einspannplatten können mehrere Dämmplatten angeordnet werden. Dazu wird die größte Dämmplatte in die Mitte des Versuchsaufbaus gelegt und die freien Flächen zwischen den Einspannplatten werden mit Dämmstoff gefüllt (Bild 4.40).

5 EINFLUSS DER MATERIALEIGENSCHAFTEN VON DÄMMSTOFFEN AUF DAS SYSTEMTRAGVERHALTEN

5.1 ALLGEMEINES

In diesem Abschnitt soll untersucht werden, welche mechanischen und geometrischen Eigenschaften der Mineralwolle-Dämmplatten Auswirkungen auf das Tragverhalten der Dübel im System haben.

Betrachtet man die Beanspruchungen in einer Dämmplatte (Bild 5.1), die bei dem Durchziehversuch auftreten, so wird deutlich, dass neben den Zug- auch Druckkräfte senkrecht zur Plattenebene auftreten und durch Biegung auch Druck- und Zugkräfte in der Plattenebene geweckt werden.

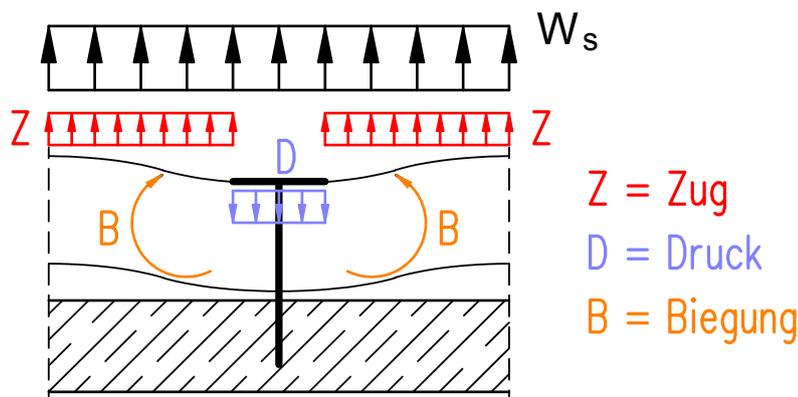


Bild 5.1 Belastungen des Dämmstoffes beim Durchziehversuch

Eine wesentliche Anforderung an die Qualität der Dämmplatten wurde bisher über die Querkzugfestigkeit (Zugfestigkeit senkrecht zu Plattenebene) bestimmt. In Abschnitt 4.2 wurde jedoch schon gezeigt, dass keine Abhängigkeit zwischen der Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene und der Tragfähigkeit im Lastfall Windsog (Dübeldurchzug) erkennbar ist.

Außerdem wurde in Abschnitt 4.2 das **erste Paradoxon** auffällig, das bei einem Vergleich der Querkzugfestigkeit von Polystyrol-Hartschaum-Dämmplatten und Mineralwoll-Dämmplatten mit den Windsogtragfähigkeiten, bei 8-facher Querkzugfestigkeit der Polystyrol-Hartschaum-Dämmplatten im Vergleich zu den Mineralwolle-Dämmplatten die Tragfähigkeiten je Dübel ca. 30 % geringer ist. Die Querkzugfestigkeit kann daher nicht allein für die Systemtragfähigkeit im Lastfall Windsog maßgebend sein!

Welche Materialeigenschaft der Dämmplatten ist jedoch maßgebend für das Versagen im Lastfall Windsog (Dübeldurchzug)? Und ist die maßgebende Materialeigenschaft für das Versagen bei allen Dämmstoffen die gleiche oder werden bei verschiedenen Dämmstoff-Arten unterschiedliche Materialeigenschaften maßgebend?

Ziel ist es, eine aussagekräftige Prüfung für alle Dämmstoff-Arten zu haben, um eine gleichmäßige Bewertung vornehmen zu können!

5.2 EXPERIMENTELLE ERMITTLUNG DES EINFLUSSES DER MATERIALEIGENSCHAFTEN DER DÄMMSTOFFE AUF DIE SYSTEMTRAGFÄHIGKEIT

Um den Einfluss der Materialeigenschaften einer Dämmplatte auf das Tragverhalten der Dübel im System zu bestimmen, wurden folgende Materialparameter der Dämmstoffe bestimmt:

- Rohdichte ρ
- Querkzugfestigkeit σ_{mt}
- Biegetragfähigkeit σ_b in Platten Längs- und Querrichtung
- Systemtragfähigkeit im Durchziehversuch DZ_{Platte} mit einem Dübel in Plattenmitte

Die Untersuchung erfolgte an den in Tabelle 5.1 aufgeführten Dämmstoffen um eine Aussage für möglichst unterschiedliche Dämmstoffarten zu erhalten.

Tabelle 5.1 Untersuchte Dämmstoffe

Dämmstoff		Material	Besonderheiten
synthetisch organische Dämmstoffe	EPS 1	expandiertes Polystyrol	
	EPS 2		
	el. EPS		
	XPS	extrudiertes Poystyrol	
	PF	Phenolharz	
anorganische Dämmstoffe	MW 1	Mineralwolle	
	MW 2		
	MW 3		
	MW 4		
	Perlite	Perlite	
	MS	Mineralschaum	
natürlich organische Dämmstoffe	HW 1	Holzfasern	dreischichtig
	HW 2		dreischichtig
	HW 3		dreischichtig

Die einzelnen Ergebnisse der Materialeigenschaften sind in Tabelle 5.2 zusammengestellt. Die Ergebnisse sind Mittelwerte aus mindestens 5 Versuchen.

Der jeweilige Kleinst- und Größtwert einer Materialeigenschaft ist farblich in der Tabelle gekennzeichnet um den Unterschied in den einzelnen Dämmplattentypen hervorzuheben.

Um nur einen Wert für die Biegetragfähigkeit angeben zu können, werden die Werte in Platten Längs- und Querrichtung gemittelt und mit σ_b Mittel angeben.

Tabelle 5.2 Materialeigenschaften der untersuchten Dämmstoffe

Dämmstoff		ρ [kg/m ³]	σ_{mt} [kN/m ²]	σ_b Längs [kN/m ²]	σ_b Quer [kN/m ²]	σ_b Mittel [kN/m ²]	DZ _{Platte} [kN/Dübel]
synthetisch organische Dämmstoffe	EPS 1	14	129	113	105	109	0,51
	EPS 2	15	164	148	140	144	0,58
	el. EPS	17	91	116	124	120	0,39
	XPS	36	340	540	564	552	1,23
	PF	44	83	315	273	294	0,94
anorganische Dämmstoffe	MW 1	153	17	105	394	249	0,72
	MW 2	147	19	75	249	162	0,63
	MW 3	132	15	55	230	143	0,55
	MW 4	154	14	122	405	264	0,70
	Perlite	103	90	169	174	171	0,75
	MS	134	106	129	172	151	0,54
natürlich organische Dämmstoffe	HW 1	270	28	879	965	922	2,48
	HW 2	214	19	590	618	604	1,52
	HW 3	184	10	453	398	426	0,87

Farbliche Kennzeichnung:

Minimum	Maximum
---------	---------

Die Rohdichte der verschiedenen Dämmstoffe liegt hier zwischen 14 und 270 kg/m³, die Querkzugfestigkeit zwischen 10 und 340 kN/m² und die Systemtragfähigkeit bei 0,39 bis 2,48 kN/Dübel.

Bringt man die Rohdichte der Dämmplatten in Abhängigkeit zu der Tragfähigkeit im Lastfall Windsog (Bild 5.2), so könnte man annehmen, dass zwischen beiden Parametern eine Abhängigkeit besteht. Die Tragfähigkeit scheint in der Tendenz mit zunehmender Rohdichte anzusteigen. Jedoch liegen die Tragfähigkeiten von XPS mit 1,23 kN/Dübel und Phenolharz (PF) mit 0,94 kN/Dübel mit geringer Rohdichte weit über dem Durchschnitt und scheinen nicht mit der restlichen Verteilung zu korrelieren. Eine eindeutige Korrelation zwischen der Rohdichte und der Tragfähigkeit im Lastfall Windsog, wie in Abschnitt 4.2, Bild 4.11 mit Mineralwolle-Dämmplatten gezeigt, findet sich hier nicht wieder.

Außerdem wurde bereits in Abschnitt 4.2 erwähnt, dass die Rohdichte nicht allein der maßgebende Faktor für die unterschiedlichen Versagensbilder und Tragfähigkeiten der Dämmplatten sein kann. Vor allem bei Mineralwolle-Dämmplatten kann die Tragfähigkeit durch eine Veränderung der Längs-Höhenstauchung der Fasern beibehalten werden, obwohl die Rohdichte herabgesetzt wird.

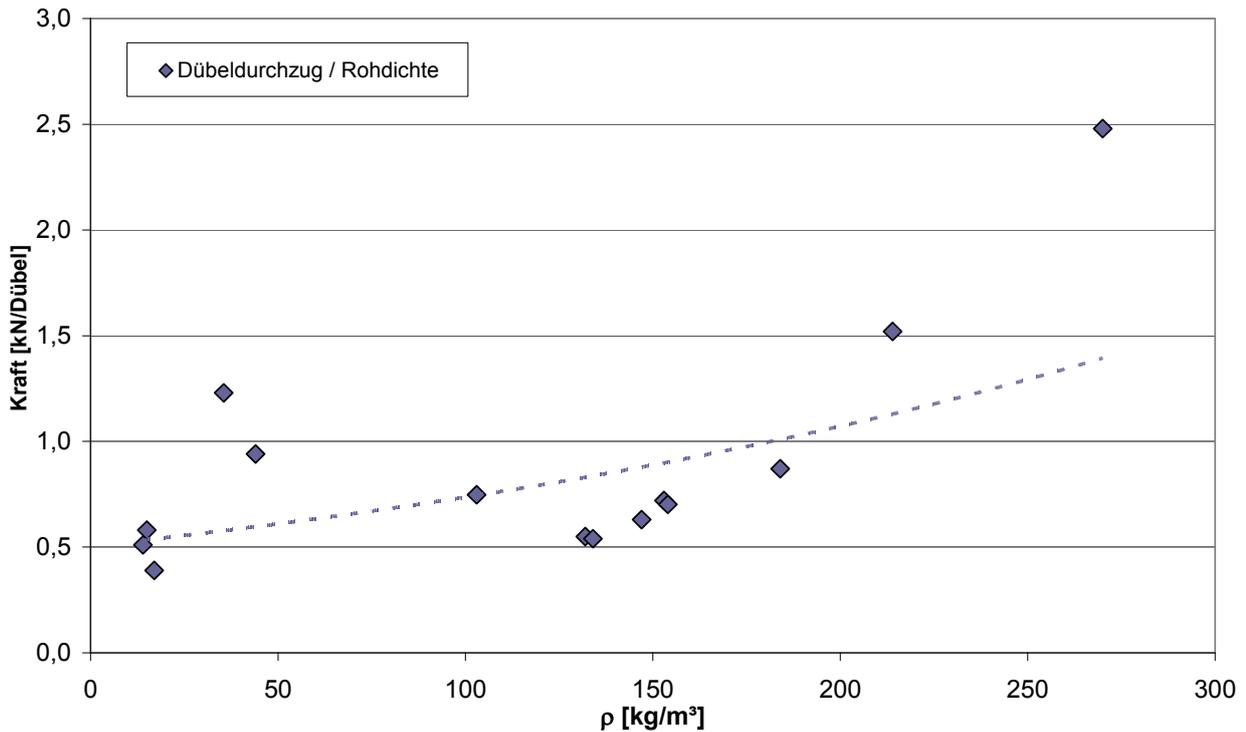


Bild 5.2 Systemtragfähigkeit (Durchziehversuche) in Abhängigkeit zur Rohdichte der untersuchten Dämmstoffe

Stellt man nun die Ergebnisse der Querkzugfestigkeit der Dämmplatten mit der Tragfähigkeit im Lastfall Windsog gegenüber (Bild 5.3), so erkennt man ebenfalls keine eindeutige Abhängigkeit zwischen beiden Parametern.

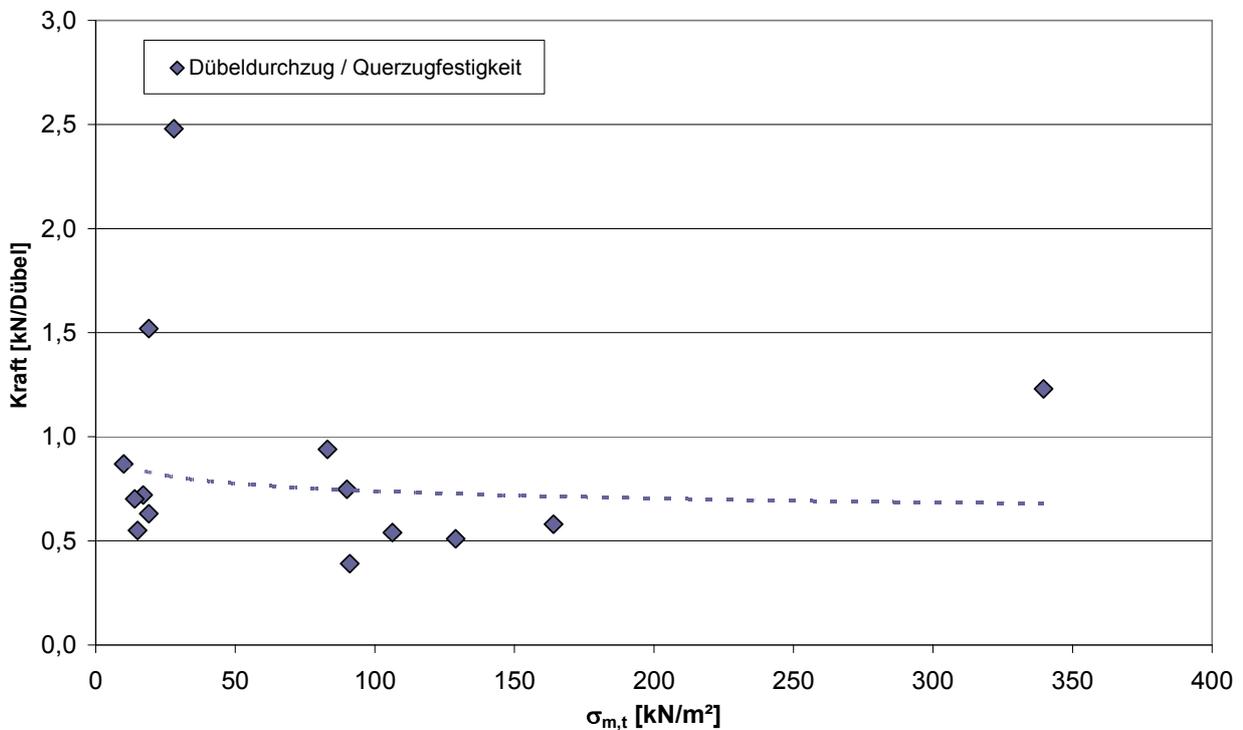


Bild 5.3 Systemtragfähigkeit (Durchziehversuche) in Abhängigkeit zur Querkzugfestigkeit der untersuchten Dämmstoffe

Wie in Abschnitt 4.2, Bild 4.10 mit Mineralwolle-Dämmplatten gezeigt, findet sich auch hier keine Korrelation zwischen der Querkzugfestigkeit und der Tragfähigkeit im Lastfall Windsog. Die Qualitätskontrolle der Dämmstoffe kann somit nicht über die Querkzugfestigkeit der Dämmplatten erfolgen!

Als weitere Materialeigenschaft wurde die Biegefestigkeit der Dämmplatten bestimmt, da sich in Abschnitt 4.4 bereits zeigte, dass diese Materialeigenschaft einen erheblichen Einfluss auf das Versagensbild im Schaumblockversuch zur Ermittlung der Tragfähigkeit im Lastfall Windsog bei Mineralwoll-Dämmplatten hat.

Bringt man nun die gemittelte Biegefestigkeit der Dämmplatten in Korrelation zu den Tragfähigkeiten im Lastfall Windsog (Bild 5.4), so zeigt sich, dass die Tragfähigkeit im Lastfall Windsog eindeutig mit Zunahme der Biegefestigkeit der Dämmplatten ansteigt.

Unterschieden wurde hier zwischen einschichtigen und mehrschichtigen Dämmplatten, da bei den mehrschichtigen Dämmplatten die Versagensart durch ein Haftzugversagen gekennzeichnet war und somit nicht direkt mit der Biegefestigkeit in Verbindung gebracht werden sollte.

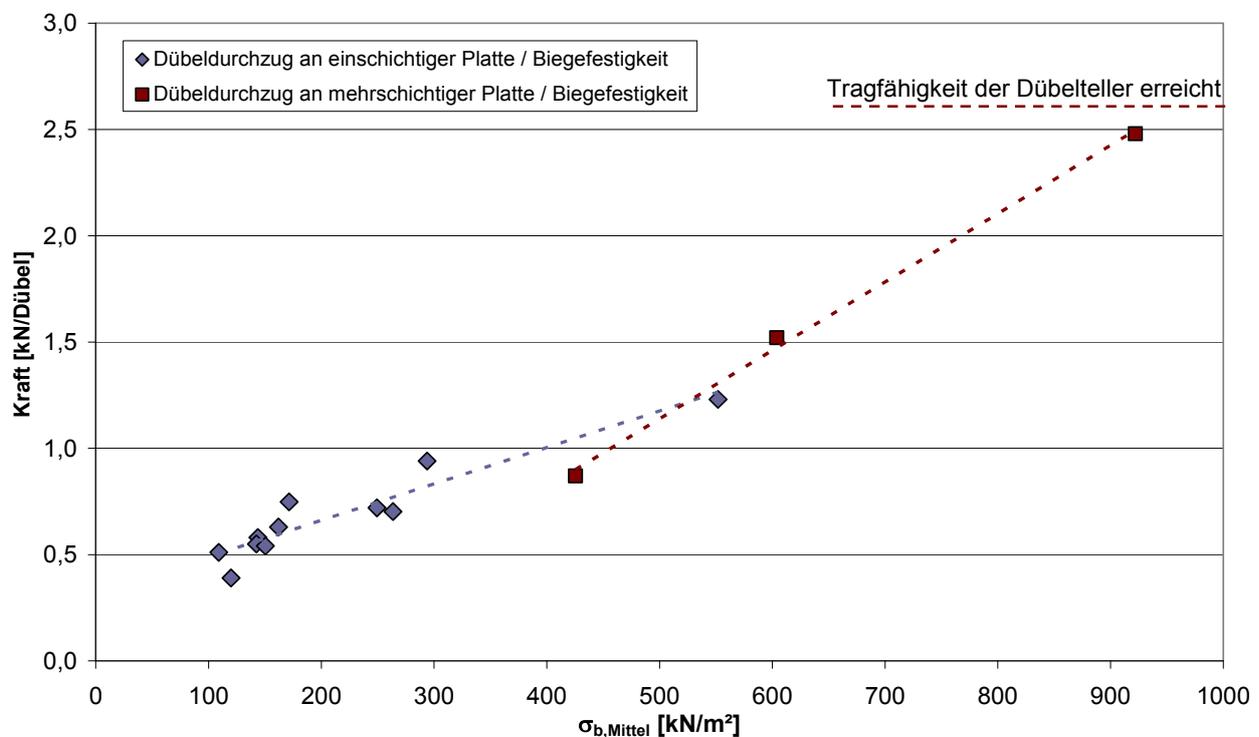


Bild 5.4 Systemtragfähigkeit (Durchziehversuche) in Abhängigkeit zur Biegefestigkeit

Die Biegefestigkeit einer Dämmplatte scheint einen maßgebenden Einfluss für das Tragverhalten der Dübel im System zu haben!

Eine Qualitätskontrolle der Dämmstoffe über die Bestimmung der Biegefestigkeit in Platten Längs- und Querrichtung kann mit diesem Versuch einfach durchgeführt werden und liefert wesentlich zuverlässigere Aussagen über die mögliche Tragfähigkeit einer Dämmplatte als über die Querkzugfestigkeit.

Dieser Einfluss soll zusätzlich mit einer numerischen Simulation an einem möglichst isotropen Dämmstoff untersucht werden, um eine zuverlässige Aussage über die tatsächlich wirkenden Kräfte im Durchziehversuch und den damit maßgebenden Materialeigenschaften treffen zu können.

5.3 NUMERISCHE SIMULATION MIT HILFE DER FE-METHODE

5.3.1 Wahl des zu untersuchenden Dämmstoffes

Da Mineralwolle im Gegensatz zu Polystyrol ein sehr anisotroper Werkstoff ist, bei dem vor allem die Faserorientierung einen weiteren großen Einfluss auf das Tragverhalten hat (vgl. Abschnitt 4.4.2), lassen sich die Erkenntnisse zur Untersuchung mit Mineralwolle-Dämmplatten nicht auf andere Dämmstoffe übertragen. Daher werden die folgenden numerischen Untersuchungen, zur Simulation des Einflusses der Materialeigenschaften der Dämmstoffe auf die Systemtragfähigkeit, zunächst an einem weitestgehend isotropen Dämmstoff durchgeführt.

Die Wahl des zu untersuchenden Dämmstoffes erfolgt, nach der Bestimmung der Zug- und Druckfestigkeit, in X-, Y- und Z-Richtung der Dämmplatten, Bild 5.5.

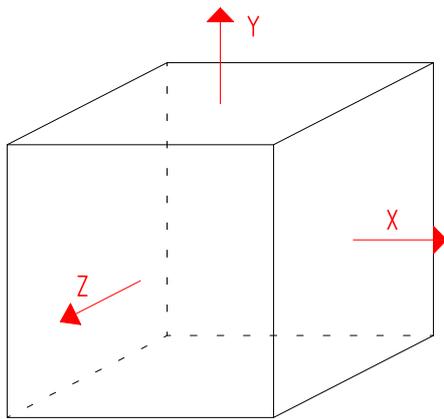


Bild 5.5 Dämmstoffwürfel zur Untersuchung des isotropen Verhaltens

Es ist bekannt, dass Polystyrol-Hartschaum-Dämmplatten (EPS) [20] ein relativ isotropes Verhalten aufweisen. Als weiterer in Betracht kommender Dämmstoff wurden Phenolharzschaum-Dämmplatten (PF) [23] mit in die Untersuchung aufgenommen, da auch diese ein recht isotropes Verhalten zeigen. Zum Vergleich erfolgt hier die Untersuchung an Mineralwolle-Dämmplatten (MW) [19] um deren anisotropes Verhalten zu bestätigen und gegebenenfalls weitere Erkenntnisse über die Materialeigenschaften der Dämmplatten zu erhalten.

Zur Bestimmung der **Zugfestigkeit** in allen Dämmstoffebenen wurden Würfel mit einer Kantenlänge, abhängig von der Dämmplattendicke, in 60 mm x 60 mm x 60 mm zugeschnitten (Bild 5.5). Die Prüfung der Zugfestigkeit erfolgte gemäß Abschnitt 3.2.2.

Die Ergebnisse der Zugfestigkeiten in allen Dämmstoffebenen sind in Bild 5.6 aufgetragen. Es wird noch einmal sehr deutlich, dass Mineralwolle-Dämmplatten in allen Dämmplattenrichtungen ein sehr unterschiedliches Verhalten aufweisen. Senkrecht zur Plattenebene beträgt die Zugtragfähigkeit nur 4 % der Zugtragfähigkeit in der starken Plattenebene. Bei Phenolharzschaum-Dämmplatten ist auch kein isotropes Verhalten zu erkennen. Die Unterschiede in den Plattenebenen sind geringer als bei Mineralwolle-Dämmplatten, aber es zeigt sich auch hier ein anisotropes Verhalten. Bei Polystyrol-Hartschaum-Dämmplatten sind die Ergebnisse der Zugtragfähigkeit gleich. Die leichten Unterschiede sind auf Versuchsstreuungen zurückzuführen.

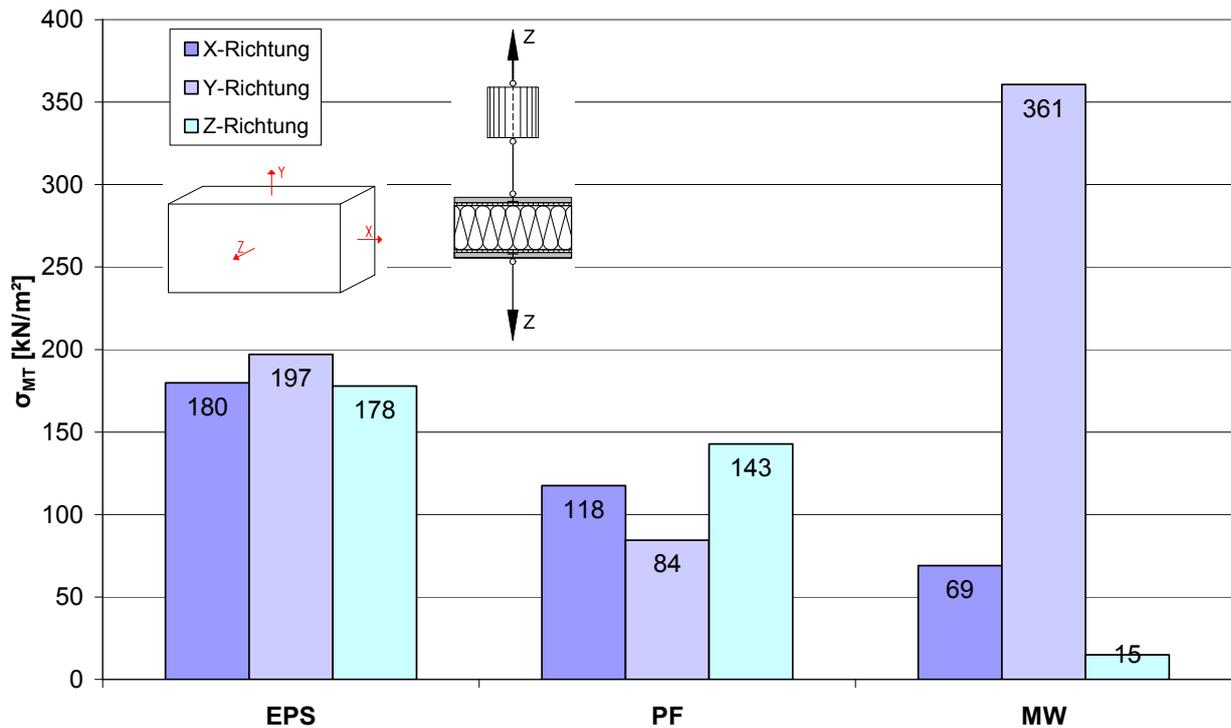


Bild 5.6 Zugfestigkeit der Dämmstoffe in alle Plattenrichtungen

Zur Bestimmung der **Druckfestigkeit** in allen Dämmstoffebene (Bild 5.7) wurden ebenfalls Würfel mit einer Kantenlänge, Abhängig von der Dämmplattendicke, in 60 mm x 60 mm x 60 mm zugeschnitten. Die Prüfung der Druckfestigkeit erfolgte gemäß DIN EN 826 [07]. Der Probekörper wird zentrisch zwischen den beiden parallelen Platten der Druckprüfmaschine eingebaut. Die Kraft wird verformungsgeregelt mit einer Prüfgeschwindigkeit von 6 mm/min aufgebracht. Die Last-Verformungskurve wird aufgezeichnet. Der Versuch endet, wenn der Probekörper versagt und somit die maximale Druckspannung erreicht ist oder bis eine Stauchung von 10 % erreicht wird und die zugehörige Druckspannung bestimmt werden kann (Bild 5.8).

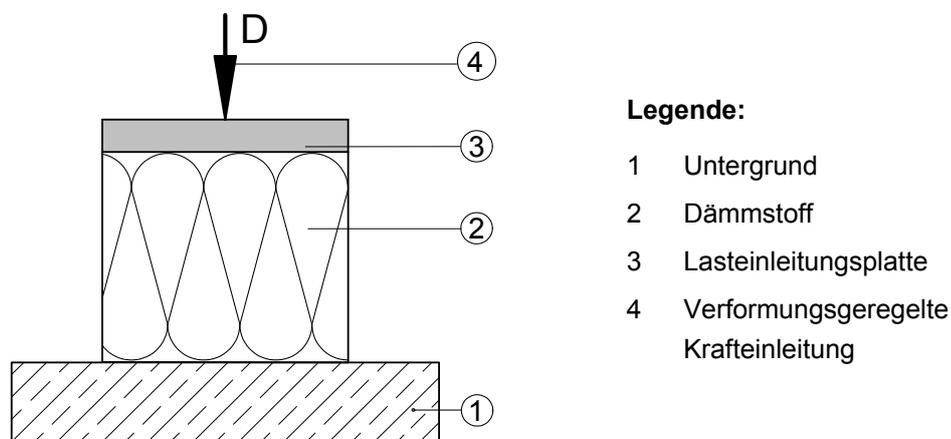


Bild 5.7 Versuchsaufbau zur Ermittlung der Druckfestigkeit σ_m

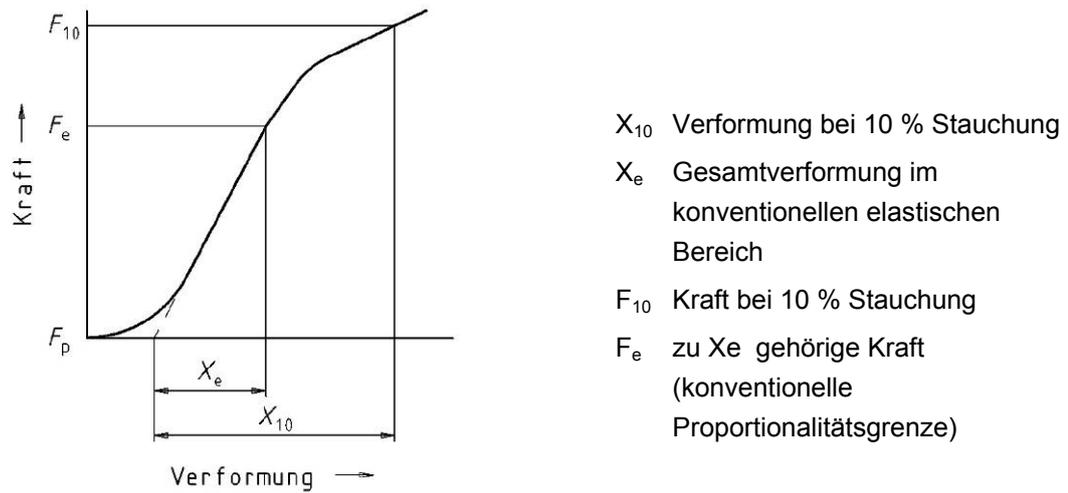


Bild 5.8 Beispiel einer Last-Verformungskurve und deren Auswertung gemäß [07]

Die Ergebnisse der Druckfestigkeiten in allen Dämmstoffebenen sind in Bild 5.9 aufgetragen. Auch hier wird deutlich, dass Mineralwolle-Dämmplatten in allen Dämmplattenrichtungen sehr unterschiedliche Festigkeiten aufweisen, die Festigkeitsunterschiede sind jedoch nicht so hoch wie bei der Zugtragfähigkeit. Bei Phenolharzschaum-Dämmplatten zeigt sich auch hier ein anisotropes Verhalten, die größte Festigkeit ist hier jedoch in der X-Richtung der Plattenebene zu finden, bei der Zugtragfähigkeit wurde die größte Festigkeit quer zur Plattenebene (Z-Richtung) ermittelt. Hierdurch wird deutlich das Phenolharzschaum-Dämmplatten kein isotroper Dämmstoff sind. Bei Polystyrol-Hartschaum-Dämmplatten sind die Ergebnisse der Druckfestigkeit in allen Dämmplattenebenen gleich. Für die folgenden Untersuchungen wird daher angenommen, dass es sich bei Polystyrol um einen isotropen Werkstoff handelt.

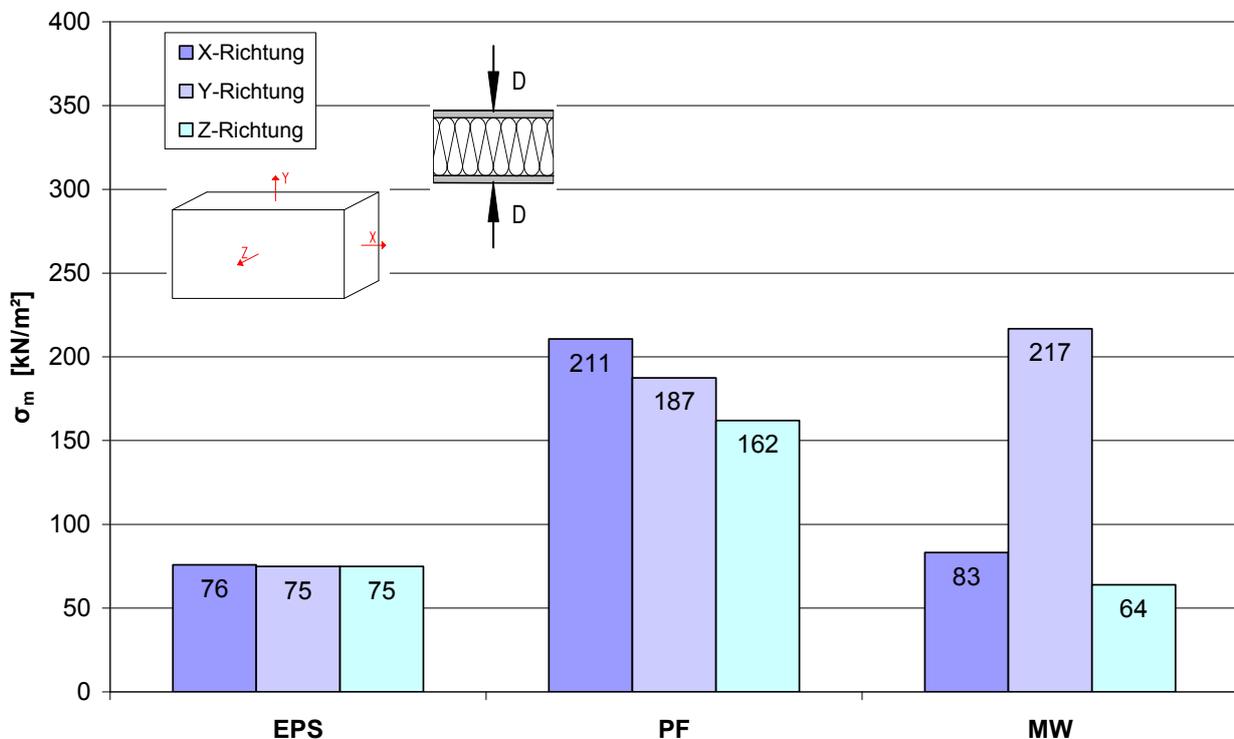


Bild 5.9 Druckfestigkeit der Dämmstoffe in alle Plattenrichtungen

Charakteristisch für Polystyrol-Hartschaum-Dämmplatten ist der zelluläre Aufbau (Bild 5.10), welcher aus dem Verschweißen des expandierten Polystyrolgranulats (Perlen) während des Aufschäumens der Polystyrol-Hartschaum-Dämmplatten entsteht. Die Größe der Perlen beträgt ca. 2 - 4 mm.

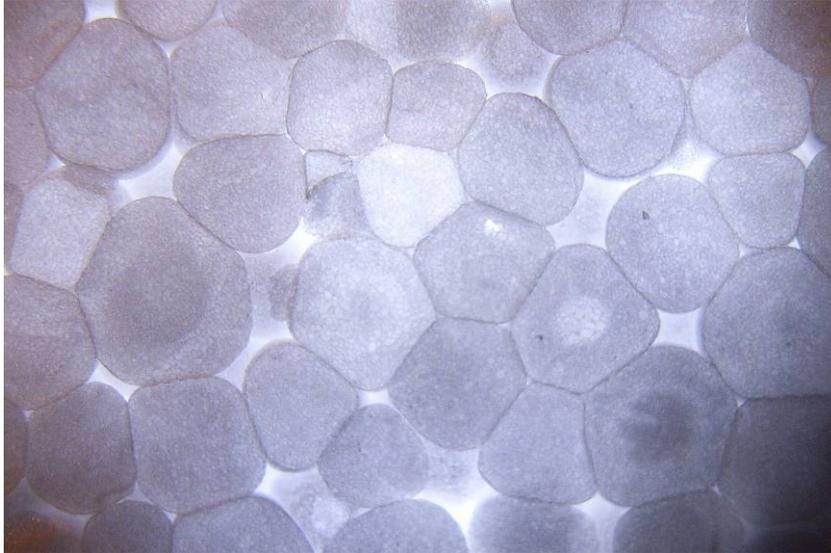


Bild 5.10 Schnitt durch eine Polystyrol-Hartschaum-Dämmplatte

Für das Bruchverhalten im Zugversuch bei Polystyrol-Hartschaum-Dämmplatten scheint die Verschweißung der Perlen maßgebend zu sein. Dies wird auch im Bruchbild der Zugversuche deutlich (Bild 5.11). Die einzelnen Perlen sind unbeschädigt und klar zu erkennen.

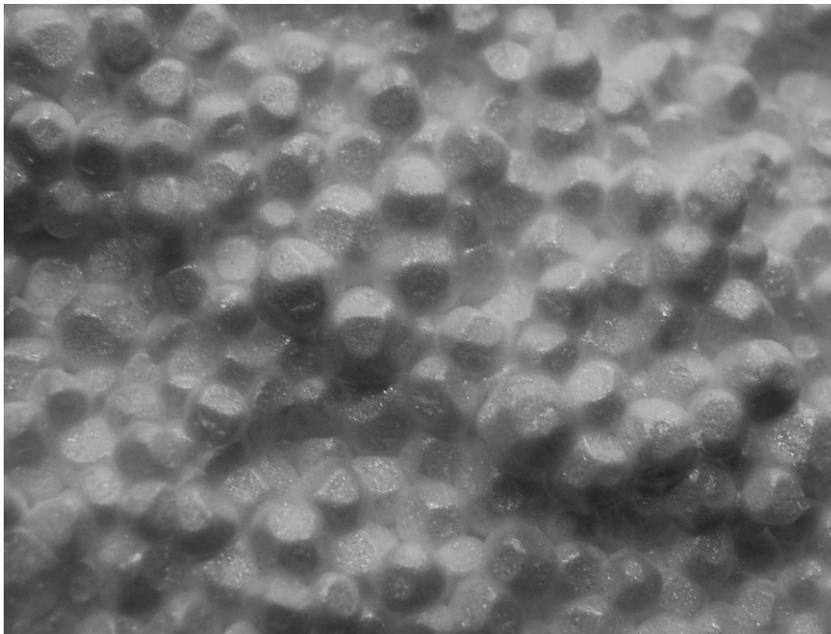


Bild 5.11 Bruchfläche einer Polystyrol-Hartschaum-Dämmplatte im Zugversuch

In Bild 5.12 ist die Aufnahme mit einem Rasterelektronenmikroskop (REM) einer Polystyrol-Hartschaum-Dämmplatte (EPS 15) gezeigt.

Im oberen Teil ist das Ende des Heißdrahtschnitts erkennbar, im mittleren Teil ist der Schnitt mit einer Messerklinge ersichtlich und im unteren Teil kann der Beginn der Bruchfläche erkannt werden. Mit Hilfe einer 20-fachen Vergrößerung können die Perlen des EPS näher betrachtet werden. Ein kompaktes Erscheinungsbild durch die Verschweißung der Perlen ist erkennbar. Um die Zellstruktur zu sehen, wurden die durchschnittenen Perlen mit 50-facher und 200-facher Vergrößerung aufgenommen [Haf01].

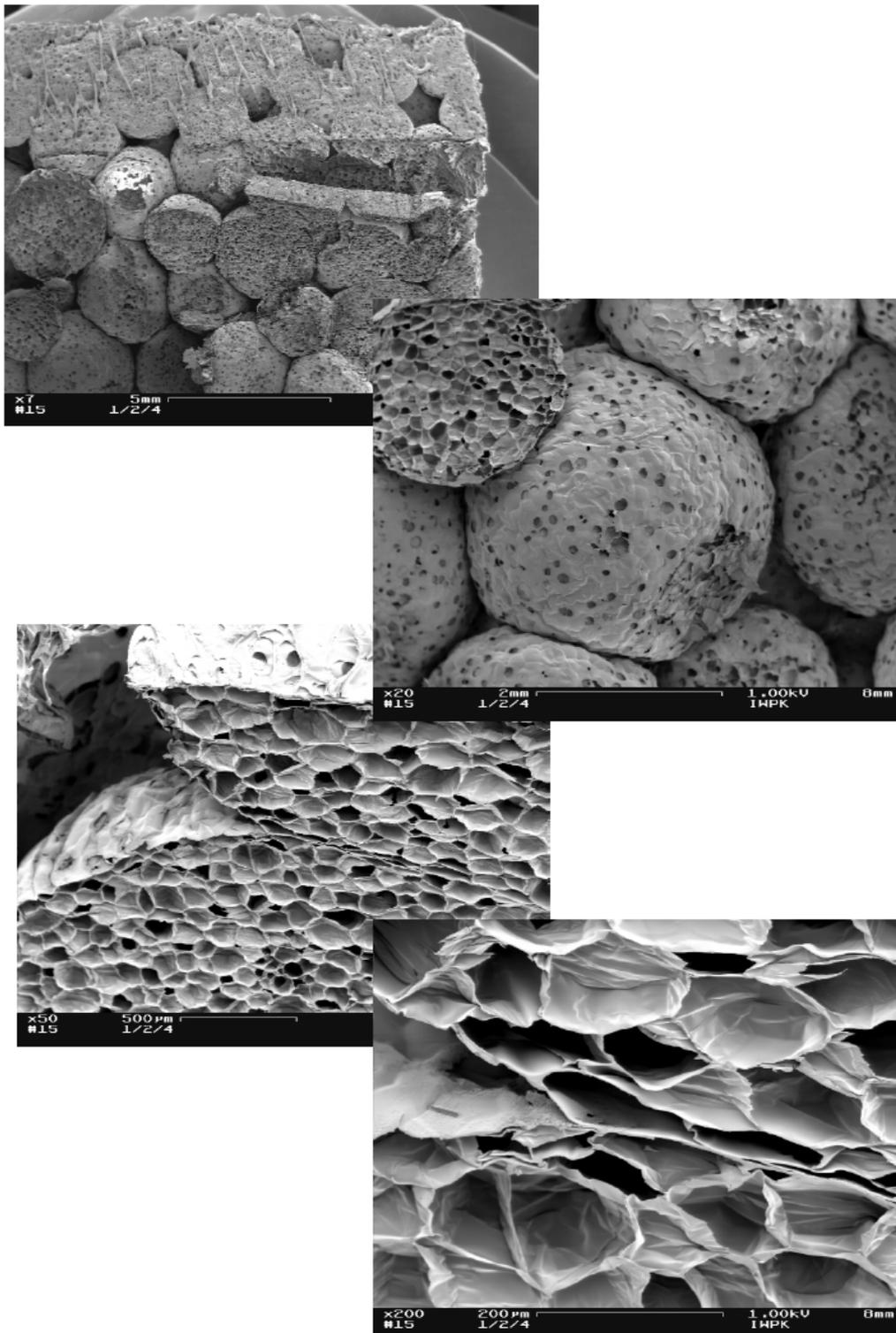


Bild 5.12 Rasterelektronenmikroskop (REM) Aufnahme einer Polystyrol-Hartschaum-Dämmplatte (EPS 15) [Haf01]

bezeichnet, weil davon ausgegangen wird, dass in diesem Bereich die Zellebenen kollabieren. Ein ausgeprägter anfänglicher linearer Verlauf wie im Zugbereich ist hier nicht erkennbar.

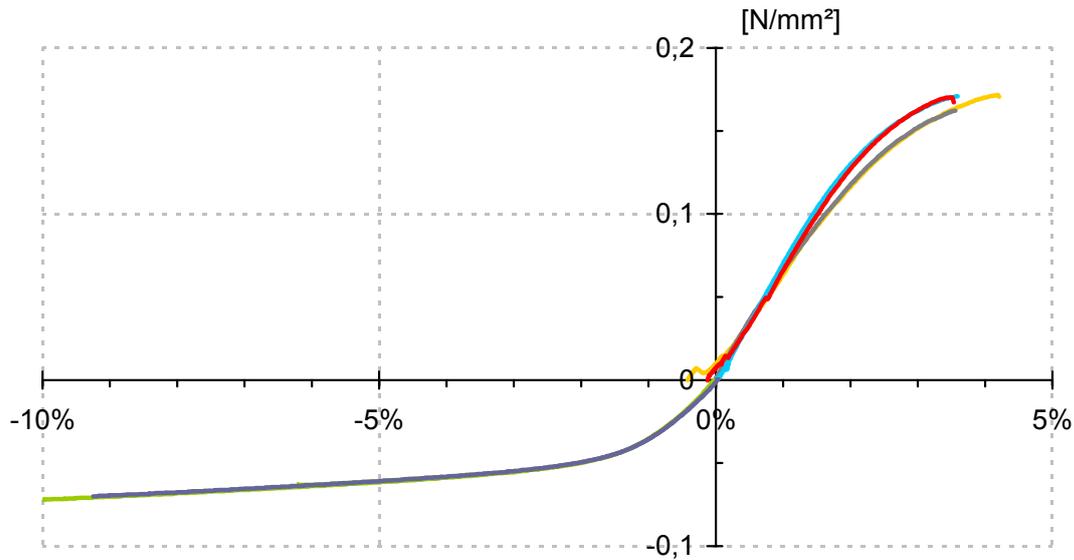


Bild 5.14 Spannungs-Dehnungsdiagramm für Zug und Druck

Unter Annahme des Hookeschen Gesetzes wurde im linearen Kurvenbereich der Zug- und Druckversuche für die hier untersuchten Polystyrol-Hartschaum-Dämmplatten folgender E-Modul bestimmt: $E_{EPS} = 6,5 \text{ N/mm}^2$

Bei der Ermittlung der Verschiebung in Querrichtung konnten im Druckbereich nur sehr geringe Querdehnungen gemessen werden. Dies ist eine typische Eigenschaft von schaumartigen Materialien und wird auch in [Zha98] und [Gib88] beschrieben.

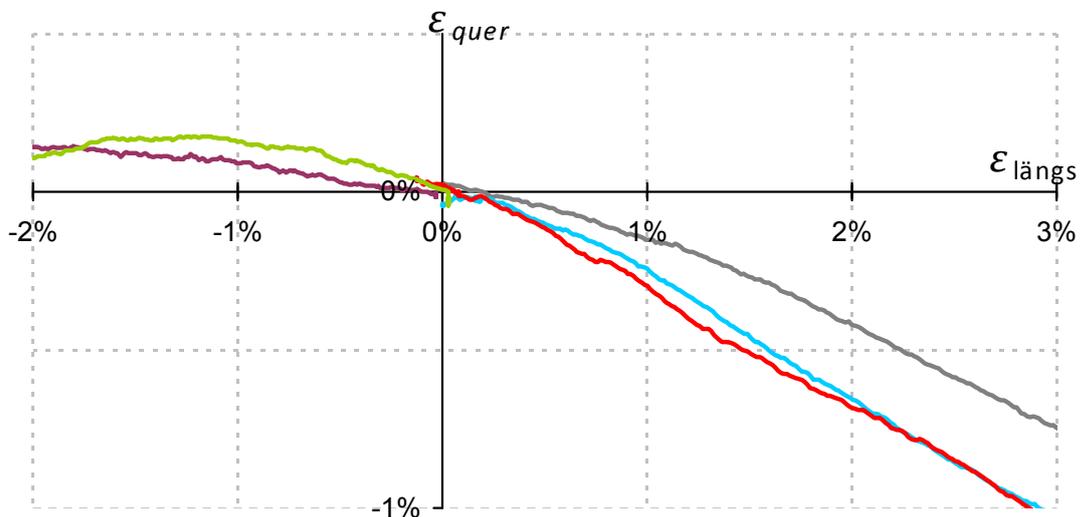


Bild 5.15 Spannungs-Dehnungsdiagramm für Zug- und Druck

Eine Erklärung für die fast nicht vorhandene Querdehnung unter Druckbeanspruchung könnte in der porösen Struktur des Materials zu finden sein (Bild 5.12). Die Zellwände weichen unter Druck seitlich aus (knicken).

Über den linearen Kurvenbereich konnte bei Zugbeanspruchung eine mittlere Querdehnungszahl von $\nu = 0,28$ gemessen werden.

5.3.3 Bestimmung des Stoffmodells für FE-Berechnung

Für die Anpassung des Stoffmodells wurden zunächst die Versuchsdaten aus Zug- und Druckversuchen mit Polystyrol-Hartschaum in wahre Spannungen σ_w gemäß Gl. (5.1) und logarithmische Verzerrungen ε_ℓ gemäß Gl. (5.2) wie folgt umgerechnet [Gro07]:

$$\sigma_w = \frac{F}{A} = \frac{F\ell}{A_0\ell_0} = \sigma \frac{\ell}{\ell_0} = \sigma(1 + \varepsilon) \quad \dots \quad (5.1)$$

$$\varepsilon_\ell = \ln\left(1 + \frac{(\ell - \ell_0)}{\ell_0}\right) = \ln(1 + \varepsilon) \quad \dots \quad (5.2)$$

mit	σ	konventionelle Spannung
	ε	konventionelle Dehnung
	F	Kraft
	A_0	Ausgangsquerschnittsfläche
	A	aktuelle Querschnittsfläche
	ℓ_0	Ausgangslänge
	ℓ	aktuelle Länge

Anschließend wurden die plastischen Verzerrungen für den eindimensionalen Fall nach folgender Gleichung ermittelt:

$$\varepsilon^{pl} = \varepsilon - \frac{\sigma}{E} \quad \dots \quad (5.3)$$

Zur numerischen Simulation des elastisch-plastischen Materialverhaltens von Polystyrol-Hartschaum wurde das verallgemeinerte Drucker-Prager-Modell kombiniert mit nichtlinearer isotroper Verfestigung verwendet.

Das Verfestigungsverhalten im plastischen Bereich [Rec67] wird mit Hilfe der Exponentialfunktion R gemäß Gl. (5.4) dargestellt:

$$R = R(\varepsilon^{pl}) = k + R_0\varepsilon^{pl} + R_\infty(1 - e^{-b\varepsilon^{pl}}) \quad \dots \quad (5.4)$$

mit	k	Fließspannung
	R_0, R_∞, b	Materialparameter zur Beschreibung des isotropen Verfestigungsverhaltens
	ε^{pl}	äquivalente plastische Verzerrung

Unter Annahme eines eindimensionalen Spannungszustandes und der Fließbedingung nach Drucker-Prager lassen sich die Spannungs-Dehnungs-Kurven für die Zug- und Druckversuche wie folgt beschreiben [Brü07]:

Zugversuch:
$$\sigma_1 = \frac{R}{\alpha \frac{1}{3} + 1} \quad \dots \quad (5.5)$$

Druckversuch:
$$\sigma_1 = \frac{R}{-\alpha \frac{1}{3} + 1} \quad \dots \quad (5.6)$$

mit α Materialparameter
 R gemäß Gl. (5.4)

Sämtliche Materialparameter ermöglichen es nun, den Verlauf der theoretischen Kurve im Spannungs-Dehnungs-Diagramm zu beeinflussen. Dadurch ist es möglich, das Spannungs-Dehnungs-Verhalten der numerischen Simulation an das Spannungs-Dehnungs-Verhalten aus dem Versuch anzupassen.

Die zuvor ermittelten wahren Spannungen und logarithmischen plastischen Verzerrungen der Versuchskurven wurde zusammen mit den theoretischen Kurven des Materialmodells für die Zug- und Druckversuche im Spannungs-Dehnungsdiagramm aufgetragen (Bild 5.16) und die Parameter des Materialmodells so bestimmt, dass die Versuchskurven mit den theoretischen Kurven möglichst gut übereinstimmen.

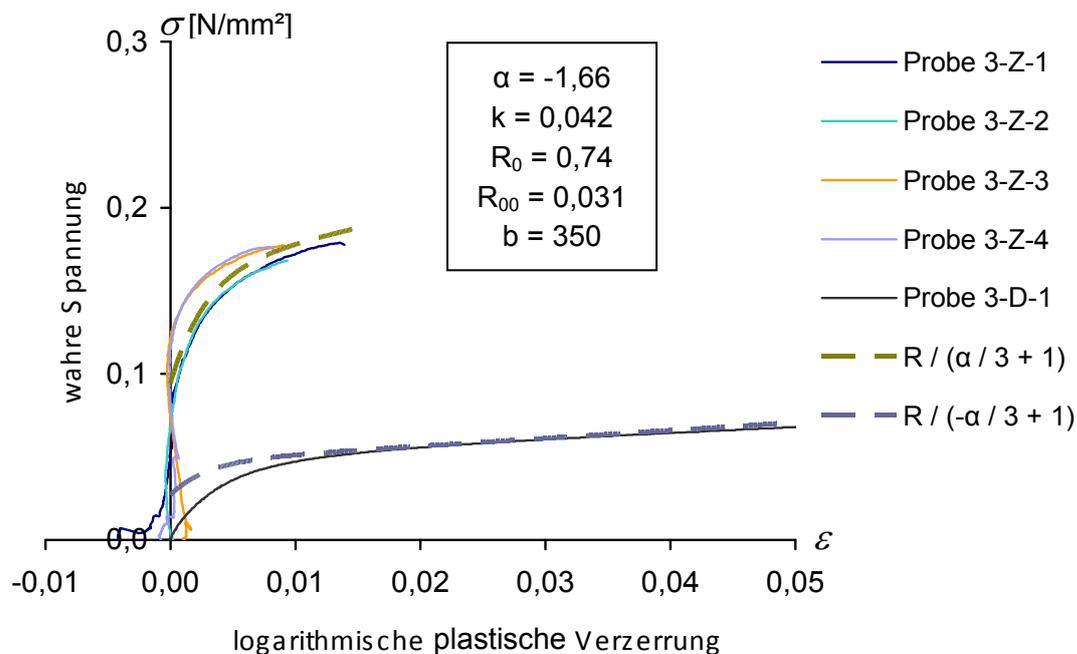


Bild 5.16 Anpassung des Stoffmodells im Spannungs-Dehnungsdiagramm für Zug- und Druck

5.3.4 Kontrolle des Stoffmodells über numerische Simulation der Zug- und Druckversuche

Das zuvor ermittelte Stoffmodell für das Materialverhalten von Polystyrol-Hartschaum soll nun an einer numerischen Simulation der zuvor durchgeführten Zug- und Druckversuche verifiziert werden. Hierfür wurde das FE-Programm ANSYS verwendet.

Zur Eingabe der Geometrie wurde die Symmetrie der Probekörper ausgenutzt und nur ein Achtel der Proben modelliert (Bild 5.17).

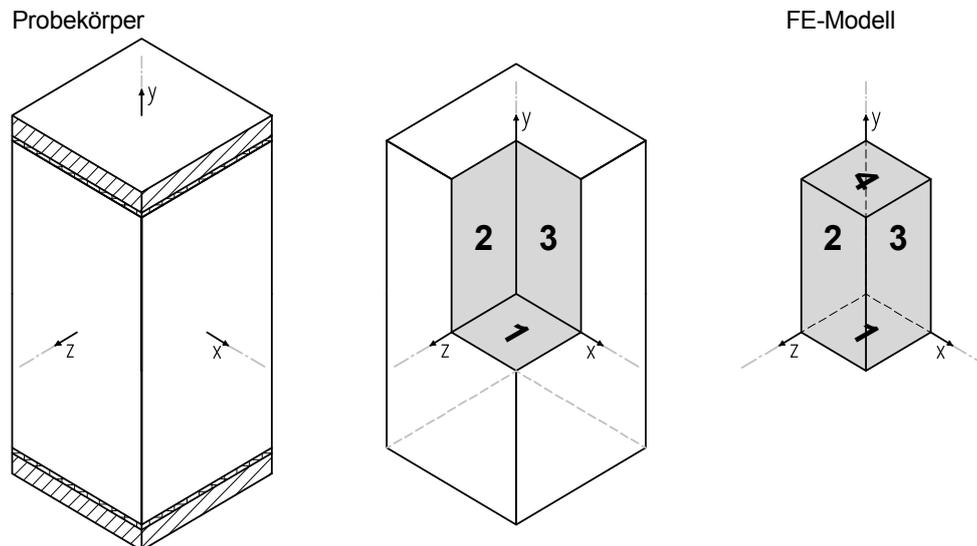


Bild 5.17 FE-Modell für die numerische Simulation der Zugversuche

Bei den folgenden Berechnungen ist zu beachten, dass das zuvor ermittelte Stoffmodell das Materialverhalten nur bis zum Beginn der Schädigung beschreibt. Eine Schädigungsbedingung ist im Stoffmodell nicht enthalten.

In den folgenden Spannungs- Dehnungsdiagrammen sind die aus den Messdaten berechneten Spannungen und Verzerrungen zusammen mit den in der Simulation berechneten Ergebnissen dargestellt. Dabei werden die Kurven wie folgt unterschieden:

———— Versuch
 - - - - - Simulation

Betrachtet man das Spannungs-Dehnungs-Diagramm in Bild 5.18 so ist eine gute Übereinstimmung der Simulation der Zugversuche im elastischen Bereich mit den Messdaten zu erkennen. Der anschließende kurze nichtlineare Bereich bis zum Versagen wird im Zugversuch durch das Stoffmodell nicht gut abgebildet. Dies kann auf das Fehlen eines Schädigungsgesetzes zurückgeführt werden. Sobald erste Schädigungen der Mikrostruktur eintreten wird das Materialverhalten durch die Simulation nicht mehr richtig erfasst. Daher wird der in Bild 5.18 markierte Punkt als Schädigungspunkt angenommen, mit einer Spannung von $\sigma = 108 \text{ kN/m}^2$ und einer Dehnung von $\varepsilon = 16,4 \%$, der in weiteren Berechnungen nicht überschritten wird.

Die Simulation der Druckversuche liefert ebenfalls eine gute Übereinstimmung mit den Messdaten. Das in den Versuchen beobachtete Verfestigungsverhalten wird durch das Stoffmodell gut abgebildet.

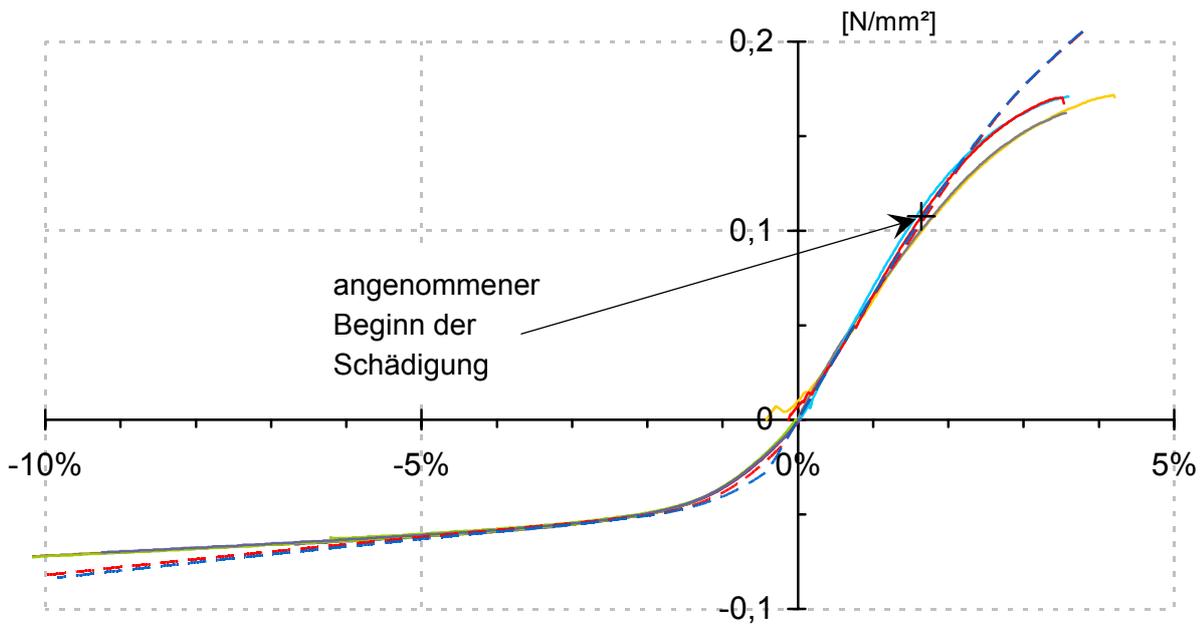


Bild 5.18 Spannungs-Dehnungs-Diagramm der numerische Simulation und der durchgeführten Zug- und Druckversuche

Auf den folgenden Spannungsplots (Bild 5.19 und Bild 5.20) ist das FE-Modell auf der linken Seite von vorne und auf der rechten Seite von hinten dargestellt, so dass alle sechs Flächen des Modells sichtbar sind.

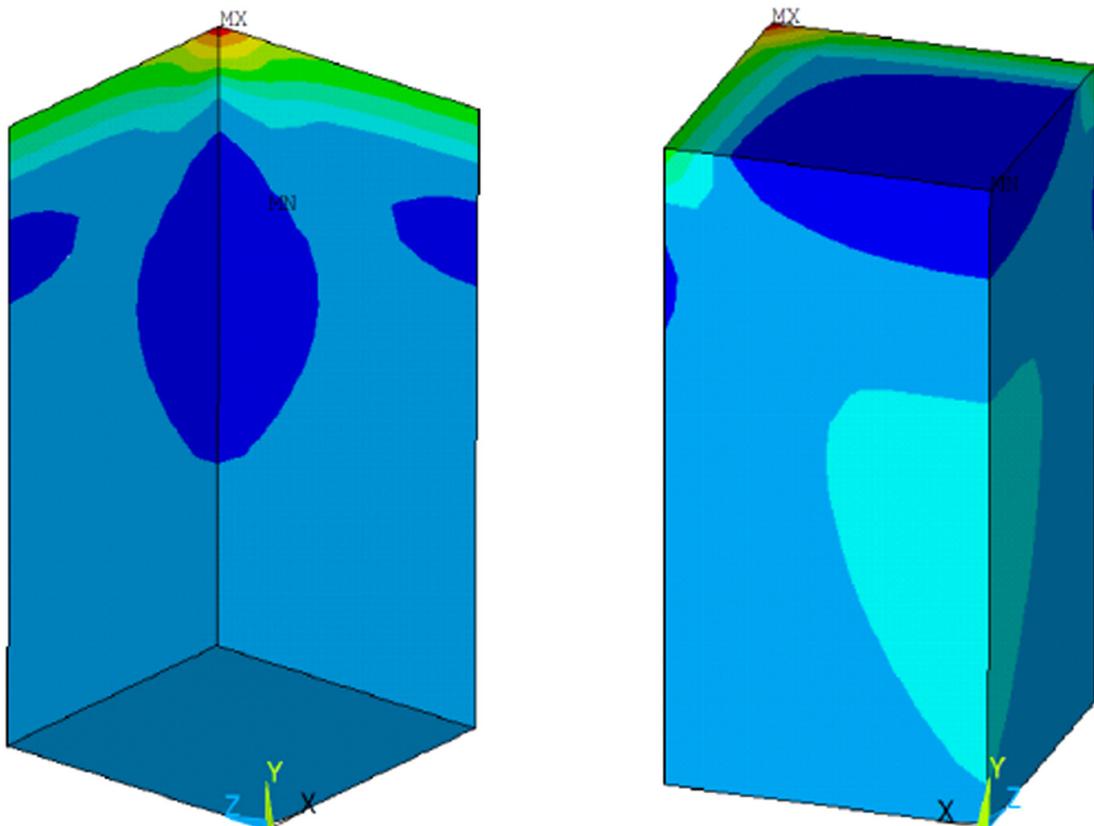


Bild 5.19 charakteristischer Spannungsverlauf in y-Richtung im Zugversuch

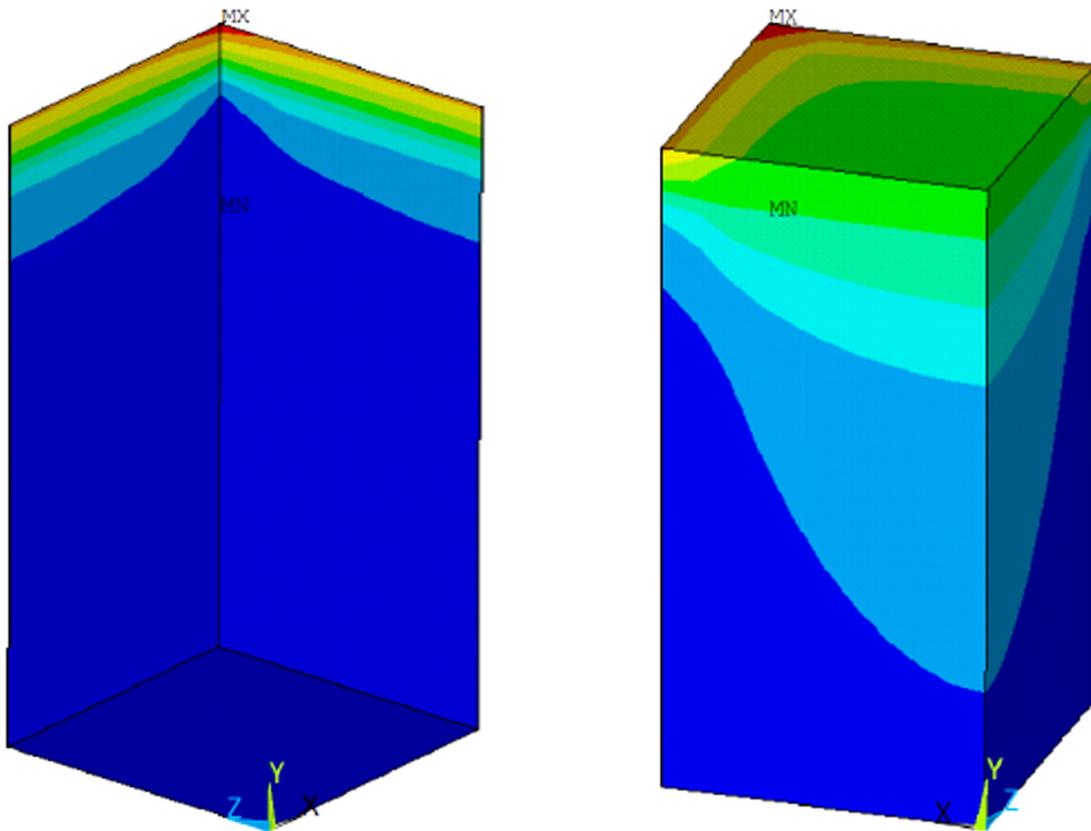


Bild 5.20 charakteristischer Verlauf der hydrostatischen Spannungen im Zugversuch

Es wird deutlich, dass die maximalen Spannungen in der Simulation in der Außenecke der Lasteinleitung auftreten. Geht man davon aus, dass die zum Versagen des Materials führenden Spannungen in diesem Punkt erreicht werden, so würde dies das in den Versuchen beobachtete Versagen in der Nähe der Lasteinleitung erklären.

Dass die Proben nicht genau in diesem Punkt, sondern meistens etwas unterhalb der Lasteinleitung versagen, könnte mit der Verklebung der Lasteinleitung zusammenhängen. Vermutlich dringt beim Kleben ein Teil des Klebers in die Poren der Struktur ein und verfestigt diese in unmittelbarer Nähe der Verklebung.

Prinzipiell liefern die numerischen Simulationen eine gute Übereinstimmung mit den durchgeführten Versuchen. Das hier ermittelte Stoffmodell kann somit für weitere Berechnungen mit Polystyrol-Hartschaum angewendet werden.

5.3.5 Numerische Simulation der Windsogversuche

Mit dem zuvor bestimmten Stoffmodell für Polystyrol-Hartschaum-Dämmplatten kann nun der Windsogversuch, mit einem Dübel in der Dämmplatte, bis zum Schädigungspunkt simuliert werden. Der Windsogversuch wird in einem rotationssymmetrischen Modell (Bild 5.21 und Bild 5.22) abgebildet und mit dem elastisch-plastischen Stoffmodell berechnet.

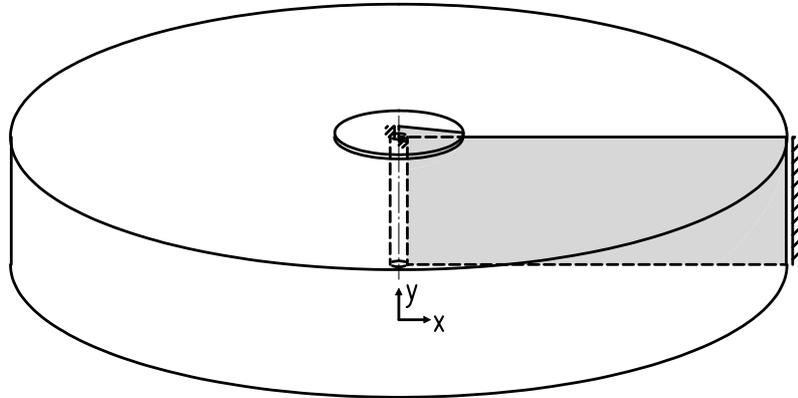


Bild 5.21 rotationssymmetrisches Modell des Windsogversuchs

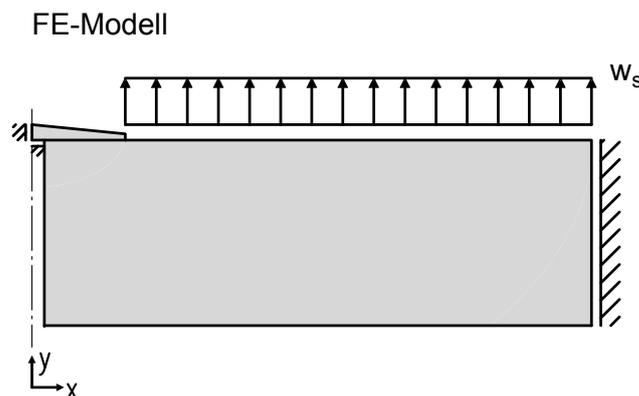


Bild 5.22 FE-Modell für die numerische Simulation des Windsogversuchs

Unter dem Dübelteller wird im Spannungsverlauf in Y-Richtung der Simulation ein erhöhter Druckbereich deutlich (Bild 5.23). Außerdem sind am Rand des Dübeltellers Zugspannungen erkennbar. In X-Richtung treten an der Dämmplattenunterseite und direkt am Rand des Dübeltellers hohe Zugspannungen auf (Bild 5.24).

Im Vergleichsspannungszustand (Bild 5.25) wird deutlich, dass durch die Spannungsspitzen im Zugbereich am Rand des Dübeltellers und an der Dämmplattenunterseite der Bruch der Dämmplatte eingeleitet wird.

Der hier ermittelte Spannungsverlauf im Windsogversuch deckt sich mit den Versuchsbeobachtungen aus Abschnitt 4.6.2. Hier haben sich während der Versuchsdurchführung zunächst Risse an der Unterseite der Dämmplatte gebildet, bevor sich ein Durchstanzkegel als Bruchbild gebildet hat. Dieser Durchstanzkegel scheint somit durch die Spannungsspitzen am Rand des Dübeltellers und durch die Durchbiegung des Dämmstoffes ausgelöst zu werden.

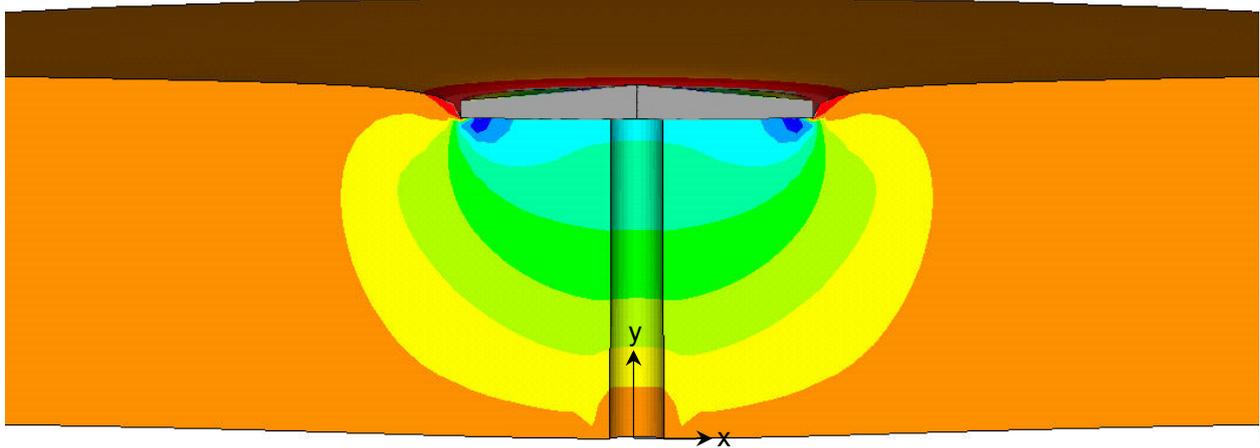


Bild 5.23 charakteristischer Spannungsverlauf in Y-Richtung im Windsogversuch

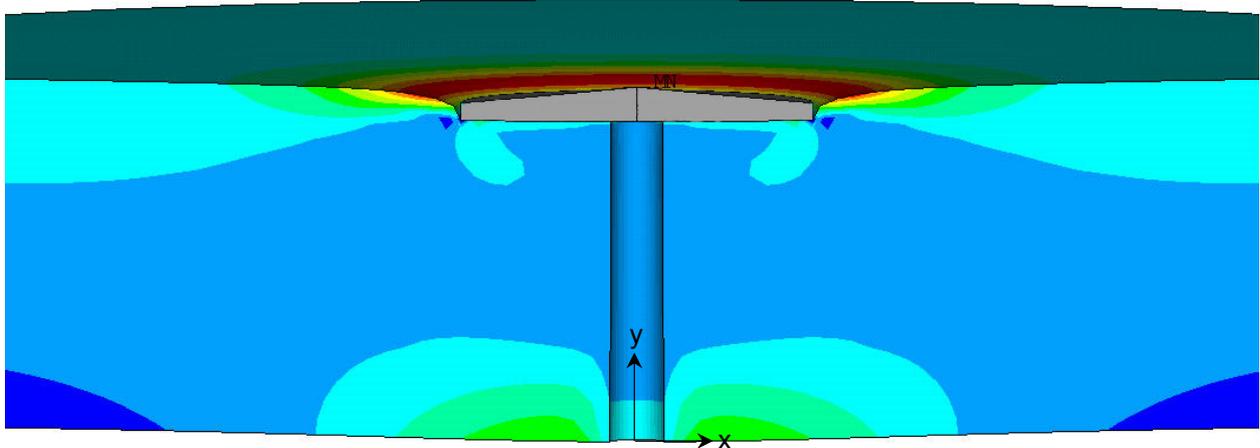


Bild 5.24 charakteristischer Spannungsverlauf in X- Richtung im Windsogversuch

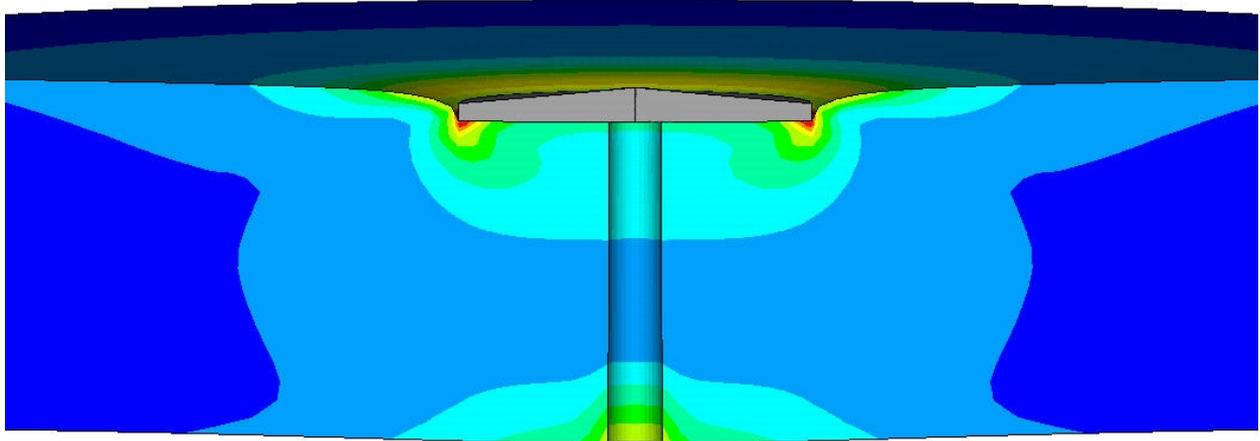


Bild 5.25 charakteristischer Verlauf der Vergleichsspannungen im Windsogversuch

Eine Simulation des Versagensprozesses konnte an dieser Stelle nicht geführt werden, da aus den bereits zuvor genannten Gründen mit dem hier verwendeten Stoffmodell nur bis zu dem Schädigungspunkt gerechnet werden konnte. Es wäre jedoch in einem weiteren Schritt möglich, eine Schädigungsbedingung für das Stoffmodell für Polystyrol-Hartschaum zu bestimmen, um den Windsogversuche bis zum Bruch zu simulieren.

5.4 VERGLEICH DER EXPERIMENTELLEN UND RECHNERISCHEN ERMITTLUNG DER MAßGEBENDEN MATERIALEIGENSCHAFTEN VON DÄMMSTOFFEN AUF DAS SYSTEMTRAGVERHALTEN

In Abschnitt 5.2 wurden verschiedene Materialeigenschaften verschiedener Dämmstoff-Arten experimentell ermittelt und mit der Tragfähigkeit im Lastfall Windsog gegenüber gestellt. Dabei stellte sich heraus, dass die Biegetragfähigkeit der Dämmplatten in Platten Längs- und Querrichtung einen deutlichen Zusammenhang zu den ermittelten Tragfähigkeiten im Lastfall Windsog zeigt. Die Biegetragfähigkeit der Dämmplatten scheint maßgebend für das Tragverhalten der Dübel im System zu sein.

In Abschnitt 5.3 wurde das Tragverhalten der Dübel im Windsogversuch numerisch simuliert. Dabei wurde die numerische Analyse an einem möglichst homogenen Dämmstoff durchgeführt, hierzu wurde Polystyrol-Hartschaum ausgewählt. Die mechanischen Eigenschaften von Faserdämmstoffen wie Mineralwolle sind sehr schwierig in einem Stoffmodell abzubilden, da sie ein anisotropes Verhalten aufweisen.

In [Haf01] wurde eine FE-Analyse für den Biegeversuch an Polystyrol-Hartschaum-Dämmplatten bis zum Erreichen des Schädigungspunktes geführt (Bild 5.26). Hierbei zeigt sich, dass die Zugnormalspannungen an der Unterseite der Dämmstoffprobe den Versagensprozess einleiten.

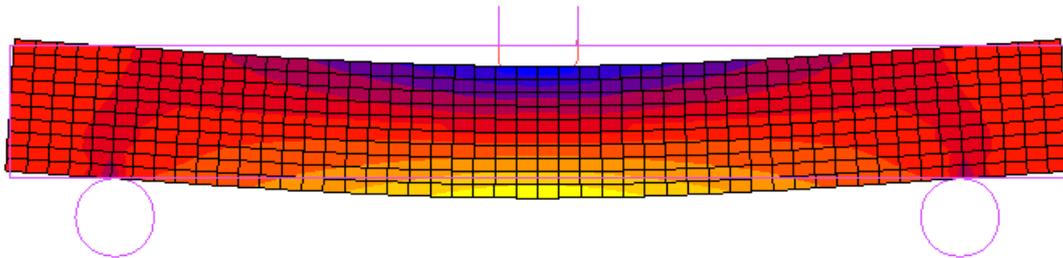


Bild 5.26 Spannungszustand im Biegeversuch [Haf01]

Eine annähernde Vergleichbarkeit der Spannungsverläufe im Biegeversuch zu dem Windsogversuch ist zu erkennen, vor allem an der Dämmplattenunterseite, wobei im Biegeversuch keine Zugzone an der Dämmplattenoberfläche auftritt und dadurch die Druckzone an der Plattenoberfläche weiter ausläuft.

Eine Prüfung der Dämmstoffe auf Druckfestigkeit ist nicht erforderlich, da nur ein kleiner Bereich unter dem Dübel auf Druck beansprucht wird und das Versagen durch Zug- und Schubkräfte in der Dämmplatte hervorgerufen wird.

Eine Abhängigkeit der Tragfähigkeit einer verdübelten Dämmplatte im Lastfall Windsog von der Biegetragfähigkeit der Dämmplatte wird durch die numerische Simulationen bestätigt. Eine Qualitätskontrolle bei der Herstellung der Dämmstoffe über die Bestimmung der Biegetragfähigkeit in Platten Längs- und Querrichtung mit dem Biegeversuch ist somit zu empfehlen.

6 SICHERHEITSKONZEPT

6.1 PROBLEMSTELLUNG

In der Statistik wird eine Prüfserie als Stichprobe bezeichnet. Sie ist eine beliebige Teilmenge einer Grundgesamtheit. Die statistische Auswertung einer Stichprobe soll einen Rückschluss auf die Grundgesamtheit liefern. Das bedeutet, dass aus der Stichprobe die Verteilung aller wahrscheinlichen Prüfergebnisse ermittelt wird, die man theoretisch aus der Grundgesamtheit gewinnen kann.

Bei den Versuchsergebnissen mit Mineralwolle-Dämmplatten treten sehr starke Streuungen mit einem Variationskoeffizienten von bis zu 30 % auf. Es ist daher fraglich ob die Auswertung einer Stichprobe von 3 bis 5 Elementen nicht eher ein zufälliges Ergebnis liefert, das mit großen Unsicherheiten behaftet ist.

Um die Streuungen der Versuchsergebnisse in einer Dämmplatte nachvollziehen zu können, wurde daher eine Dämmplatte in zwölf Teile mit der Abmessung 200 mm x 200 mm zerschnitten (Bild 6.1) und die Verteilung der Rohdichte ermittelt. Anschließend wurde die Querkzugfestigkeit gemäß ETAG 004 dieser Probekörper geprüft. Um die Streuung in der Dämmplatte noch detaillierter zu bestimmen, wurde die Dämmplatte zum Vergleich an einem kleineren Raster untersucht, mit Probekörpern der Abmessung 100 mm x 100 mm (Bild 6.1).

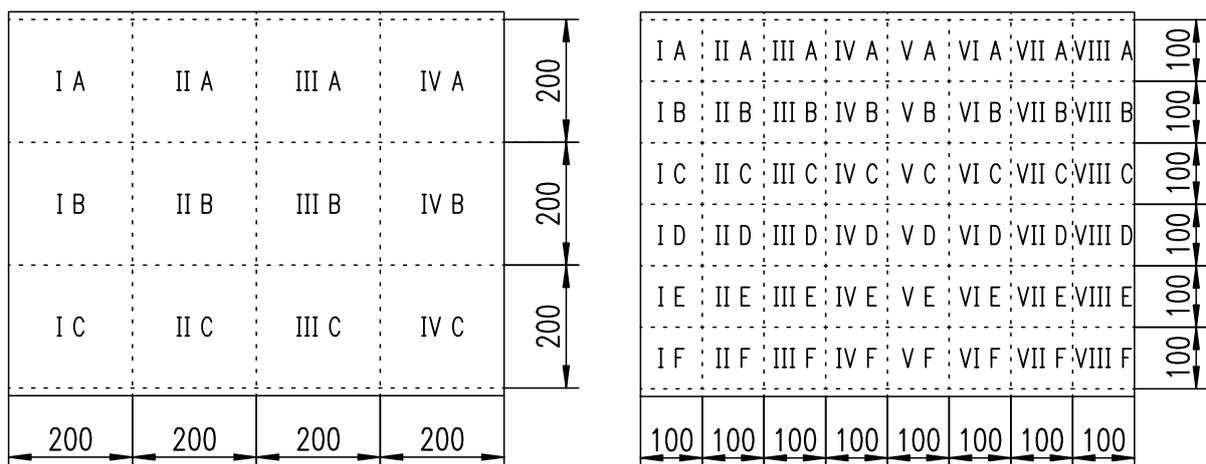


Bild 6.1 Zuschnitt der Dämmplatten in mm

Die Untersuchung erfolgte an drei unterschiedlichen Mineralwolle-Dämmplatten des Typs HD, welche bereits in Abschnitt 4.3.2 und 4.4 beschrieben wurden. Es ergaben sich folgende Mittelwerte mit dem zugehörigen Variationskoeffizienten nach (6.3):

Tabelle 6.1 Rohdichte und Querkzugfestigkeit der Dämmplatten im Vergleich

Prüfung	Mineralwolle-Dämmplatten			Mineralwolle-Dämmplatten		
	A	B	C	A	B	C
	Probenabmessung 200 mm x 200 mm			Probenabmessung 100 mm x 100 mm		
ρ_{mittel} [kg/m ³]	155	121	159	144	126	153
v	4,6%	9,1%	2,0%	6,5%	5,3%	4,4%
$\sigma_{\text{mt,mittel}}$ [kN/m ²]	19	16	22	17	12	19
v	19,0%	19,1%	6,8%	18,3%	29,6%	16,3%

In den folgenden Bildern sind die ermittelten Parameter mit ihrer Verteilung über die Mineralwolle-Dämmplatte des Herstellers A, aus den Probengrößen 200 mm x 200 mm (Bild 6.2 und Bild 6.3) sowie aus den Probengrößen 100 mm x 100 mm (Bild 6.4 und Bild 6.5), dargestellt.

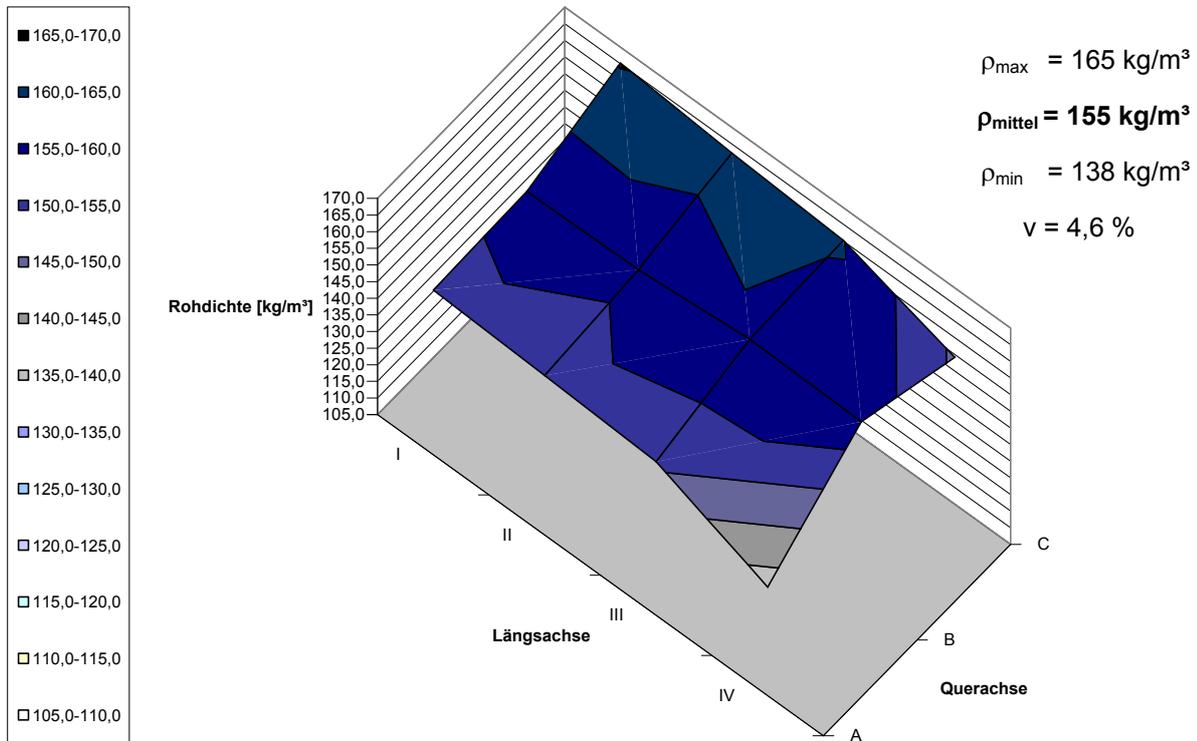


Bild 6.2 Verteilung der Rohdichte in der Dämmplatte an Proben 200 mm x 200 mm

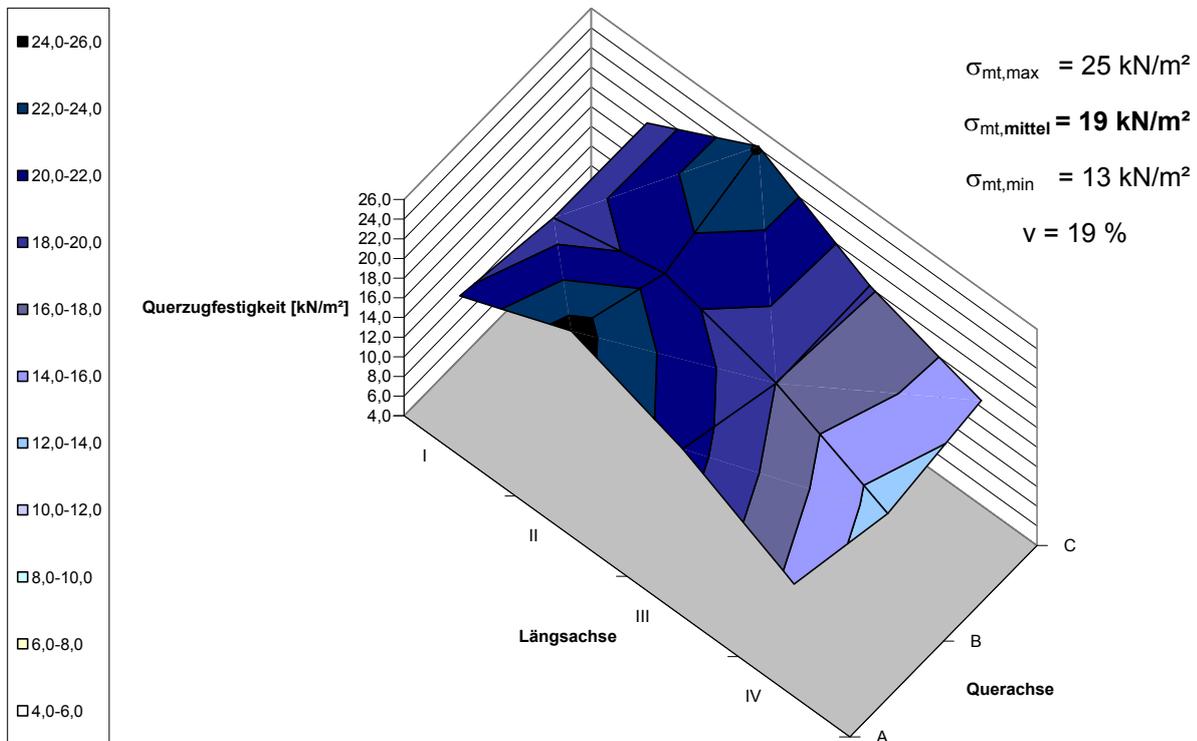


Bild 6.3 Verteilung der Querzugfestigkeit in einer Dämmplatte an Proben 200 mm x 200 mm

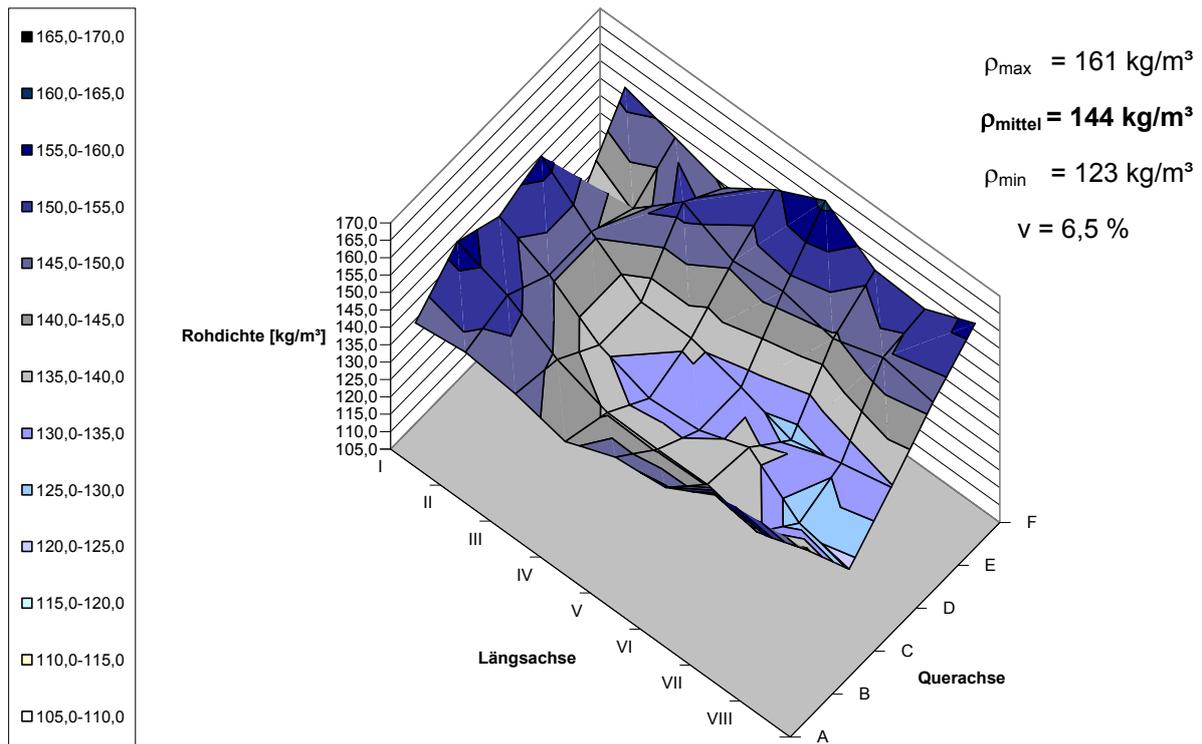


Bild 6.4 Verteilung der Rohdichte in der Dämmplatte an Proben 100 mm x 100 mm

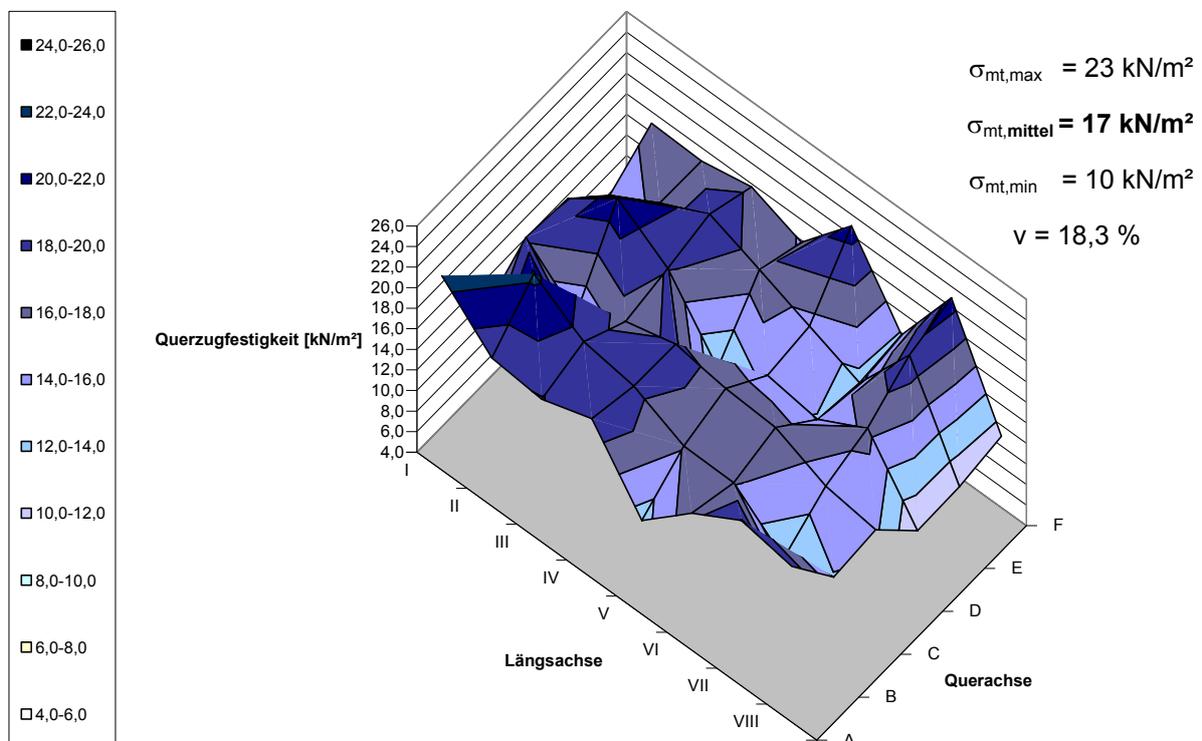


Bild 6.5 Verteilung der Querzugfestigkeit in einer Dämmplatte an Proben 100 mm x 100 mm

Die Verteilung der Rohdichte und der Querzugfestigkeit der Mineralwolle-Dämmplatten der Herstellers B und C verhalten sich in gleicher Weise.

Gemäß der europäischen Prüfleitlinie ETAG 004 [01] werden Mindestwerte für die Beurteilung von Prüfungen angegeben, die nicht unterschritten werden dürfen. Wird bei einer Stichprobe der geforderte Mindestwert mit dem Kleinstwert der Stichprobe erreicht, so wird dieser Kleinstwert als charakteristischer Widerstand verwendet.

Betrachtet man sich nun die gezeigten Streuungen in einer Mineralwolle-Dämmplatte, so wird deutlich, dass die Ergebnisse der Auswertung auf Basis von Kleinstwerten bei einer Stichprobe von 3 Elementen stark davon abhängen, aus welchem Bereich die Probekörper für die Untersuchung entnommen wurden.

Bei dieser Art der Bestimmung eines charakteristischen Widerstandes erkennt man das **3. Paradoxon**:

Die Wahrscheinlichkeit wird größer, einen noch kleineren Wert zu finden, wenn man die Anzahl der Elemente der Stichprobe erhöht!

Wendet man bekannte statistische Regeln an, so steigt der charakteristische Wert, wenn man die Anzahl der Versuche erhöht. Daher kann die Auswertung auf der Basis von Kleinstwerten nur ein zufälliges Ergebnis liefern und keinen charakteristischen Widerstand im eigentlichen Sinne.

Im Folgenden wird ein Sicherheitskonzept entwickelt, mit dem der Widerstand eines WDVS bei Windsogwirkung in Anlehnung an bestehende Regelwerke beschrieben wird. Dabei werden die Einhaltung der Grenzzustände der Tragfähigkeit, der Gebrauchstauglichkeit sowie eine ausreichende Dauerhaftigkeit gefordert. Die Nachweise zum Grenzzustand der Tragfähigkeit wird über folgende Gleichung geführt:

$$E_d \leq R_d$$

mit E_d Bemessungswert der Auswirkung der Einwirkungen

R_d Bemessungswert der zugehörigen Tragfähigkeit

wobei $R_d = R_k / \gamma_m$

R_k charakteristischer Wert der Tragfähigkeit

γ_m Teilsicherheitsbeiwert für die Materialeigenschaft

Dabei ist es wünschenswert, das unterschiedliche Materialverhalten der verschiedensten Dämmstoffe über die Bestimmung der Teilsicherheitsbeiwerte zu berücksichtigen.

6.2 GRUNDLAGEN DER STATISTIK

6.2.1 Allgemeines

Aus einer Stichprobe (Prüfserie) werden die statistischen Werte abgeleitet, wie der Mittelwert m_x , die Standardabweichung s_x und der Variationskoeffizient v_x , um eine Prüfserie zu bewerten. Dabei beschreibt n die Anzahl der Elemente einer Stichprobe.

Der **Mittelwert** m_x einer Stichprobe ist wie folgt definiert:

$$\text{Mittelwert:} \quad m_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad \dots \quad (6.1)$$

Der Mittelwert für die Grundgesamtheit wird mit μ_x gekennzeichnet.

Die **Standardabweichung** s_x beschreibt, wie groß die Streuung der einzelnen Messwerte x_i zu dem ermittelten Mittelwert m_x ist.

$$\text{Standardabweichung:} \quad s_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^2} \quad \dots \quad (6.2)$$

Die Standardabweichung der Grundgesamtheit wird mit σ_x bezeichnet.

Der **Variationskoeffizient** stellt die relative Standardabweichung dar und wird aus der Division der Standardabweichung durch den Mittelwert gewonnen:

$$\text{Variationskoeffizient:} \quad v_x = \frac{s_x}{m_x} \cdot 100\% \quad \dots \quad (6.3)$$

6.2.2 Häufigkeitsverteilung

Mit einer Häufigkeitsverteilung lassen sich Messwerte statistisch beschreiben. Zu jedem Wert wird angegeben, wie häufig dieser Wert vorkommt. Die Häufigkeitsverteilung kann in einem Häufigkeitsdiagramm dargestellt werden. Dabei wird auf der Abszissenachse die Merkmalsausprägung, wie zum Beispiel die max. Kraft, und auf der Ordinatenachse die Häufigkeit eingetragen. In Bild 6.6 ist beispielhaft die Häufigkeitsverteilung einer Stichprobe mit $n = 44$ einem Mittelwert von $m_x = 9,98$ und einer Standardabweichung von $s_x = 1,76$ dargestellt.

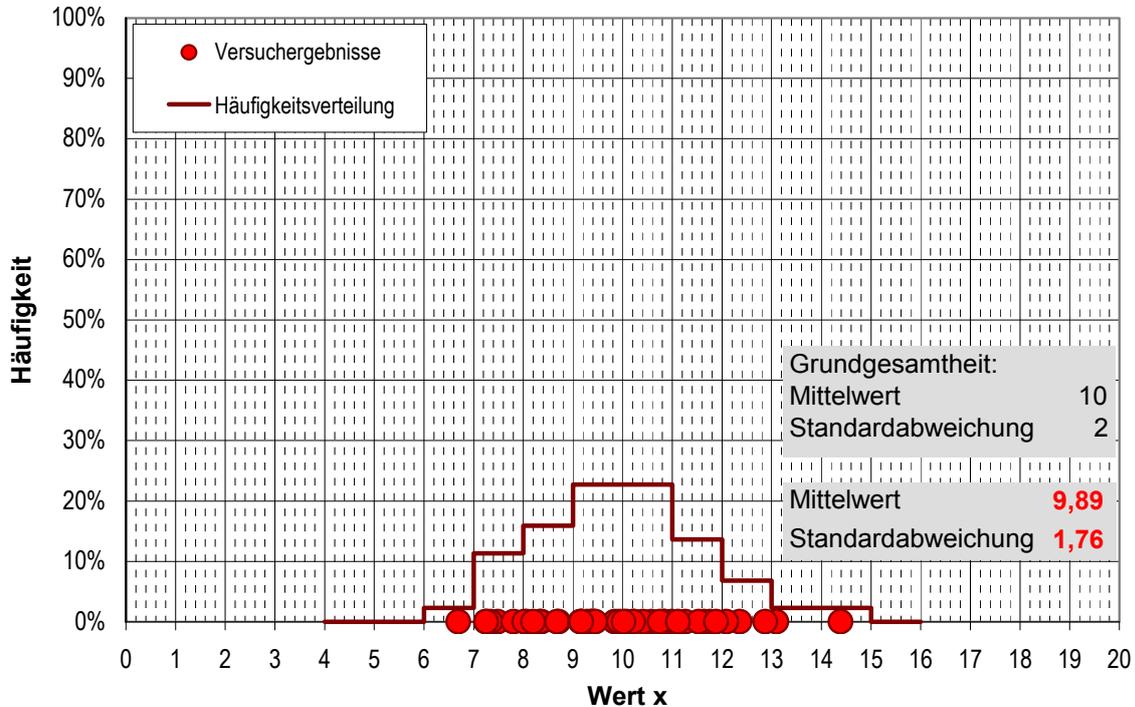


Bild 6.6 Beispiel für ein Häufigkeitsdiagramm für $n = 44$, $m_x = 9,98$ und $s_x = 1,76$

6.2.3 Verteilungsdichte

Die Häufigkeitsverteilung lässt sich über eine Funktionsgleichung beschreiben, der Verteilungsdichte $f(x)$, Werte die innerhalb eines Intervalls dx um x liegen werden mit $f(x)dx$ angeben.

Wird im Häufigkeitsdiagramm die Verteilungsdichte der Grundgesamtheit angeben, so wird sichtbar, dass die Häufigkeitsverteilung der Verteilungsdichte annähernd entspricht (Bild 6.7). Bei einer kleinen Anzahl n ist die Verteilung noch nicht ersichtlich, aber die Häufigkeitsverteilung nähert sich mit größer Anzahl an Elementen n immer schneller der Verteilungsdichte an.

Die Streuung von Messergebnissen wird häufig über eine Normalverteilung beschrieben. Hierbei ist von Bedeutung, wie viele Messpunkte innerhalb einer gewissen Streubreite liegen. Die Standardabweichung σ_x beschreibt den Abstand vom Mittelpunkt bis zum Wendepunkt der Normalverteilung.

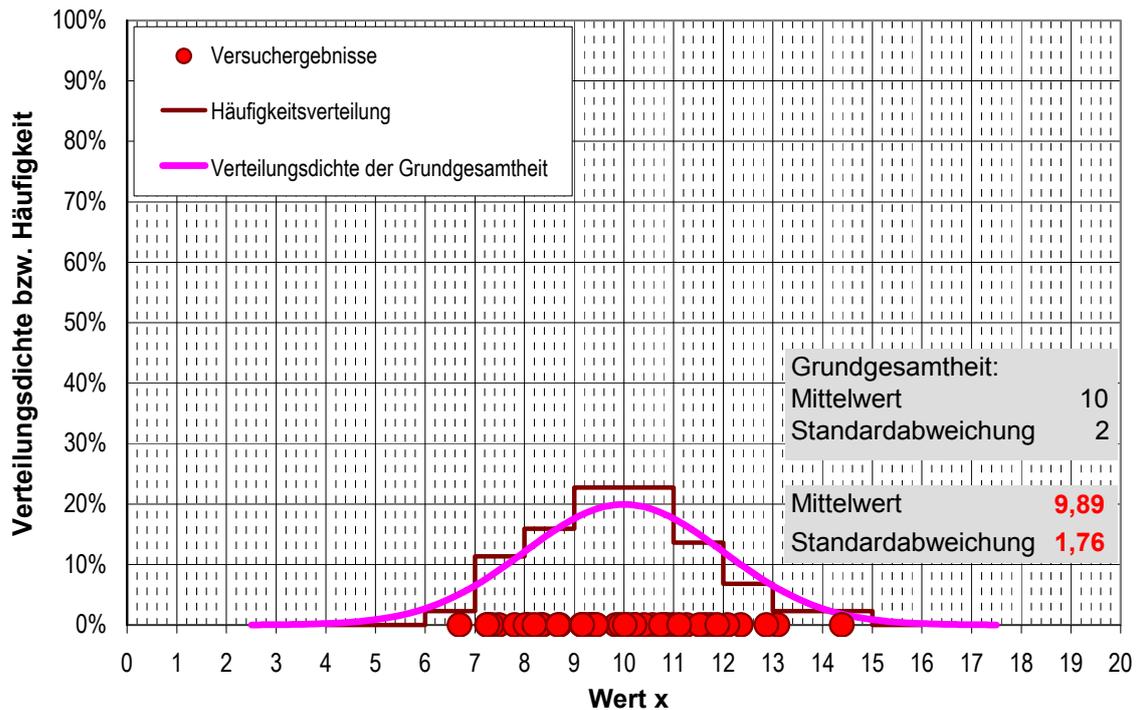


Bild 6.7 Beispiel einer Häufigkeitsverteilung und Verteilungsdichte der Grundgesamtheit

Die Verteilungsdichte der Normalverteilung wird auch Normal- oder Gaußverteilung (nach Carl Friedrich Gauß) genannt.

6.2.4 Verteilungsfunktion der Grundgesamtheit

Die Häufigkeitsverteilung lässt sich auch über die Verteilungsfunktion $F(x)$ beschreiben. Diese gibt den Anteil der Werte einer Messreihe an, die kleiner oder gleich dem Wert x sind.

Die Verteilungsfunktion einer Stichprobe erhält man, indem die Stichprobe vom kleinsten Wert aus aufsummiert wird, dabei verläuft sie immer im Bereich der Wahrscheinlichkeit zwischen 0 und 1. Die Stichprobe muss hierfür jedoch aus ausreichend vielen Elementen bestehen. Durch die Symmetrie der Dichtefunktion verläuft die Verteilungsfunktion bei einer Wahrscheinlichkeit von 50 % durch den Mittelwert μ_x der Dichtefunktion. (Bild 6.8)

Auch aus der Dichtefunktion der Normalverteilung für die Grundgesamtheit kann man die Verteilungsfunktion ableiten, indem man den Wahrscheinlichkeitsanteil der Dichtefunktion aufsummiert.

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_x \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \exp\left(-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{x - \mu_x}{\sigma_x}\right)^2\right) \quad \text{Verteilungsdichte der Normalverteilung}$$

$$F(x) = \frac{1}{\sigma_x \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{x - \mu_x}{\sigma_x}\right)^2\right) dx \quad \text{Verteilungsfunktion der Normalverteilung}$$

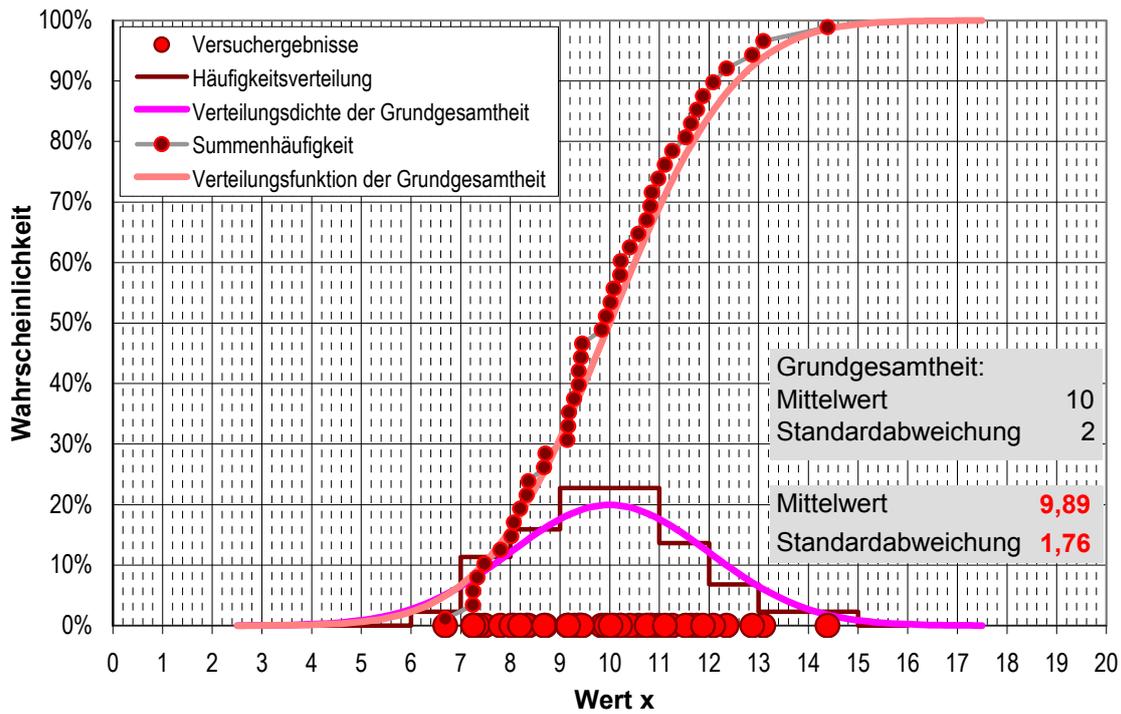


Bild 6.8 Summenhäufigkeit der Stichprobe und die Verteilungsfunktion der Grundgesamtheit

6.2.5 Logarithmische Normalverteilung

Die Normalverteilung ist eine beidseitig unbegrenzte Verteilung. Ihr Nachteil liegt darin, dass auch negative Werte beschrieben werden können, die z.B. bei Versuchen zur Bestimmung der Zugfestigkeit nie auftreten würden. Daher wird für die statistische Bewertung von Messwerten oft die logarithmische Normalverteilung herangezogen.

Die Werte der logarithmischen Normalverteilung können nicht kleiner als Null werden und sind nur in der positiven Richtung unbegrenzt. Die Verteilungen lassen sich wie folgt beschreiben:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi \cdot \sigma_x \cdot x}} \cdot \exp\left(-\left(\frac{\ln x - \mu_x}{2\sigma_x^2}\right)^2\right) & x > 0 \\ 0 & x \leq 0 \end{cases} \quad \text{Verteilungsdichte der log. Normalverteilung}$$

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi \cdot \sigma_x}} \cdot \int_0^x \frac{1}{x} e^{\left(-\left(\frac{\ln x - \mu_x}{2\sigma_x^2}\right)^2\right)} dx \quad \text{Verteilungsfunktion der log. Normalverteilung}$$

Bei größeren Variationskoeffizienten ist der Verlauf der logarithmischen Normalverteilung positiv schief orientiert. Hier liegen mehr Werte über dem Mittelwert der Grundgesamtheit, dies bietet eine zusätzliche Sicherheit in der Auswertung.

Da sich die logarithmische Normalverteilung bei einer geringen Streuung σ_x der Normalverteilung angleicht, wird nach Lutz Fischer [Fis01] empfohlen, die logarithmische Normalverteilung bei großen Streuungen mit einem Variationskoeffizienten von $v > 0,20$ zu wählen. Sie kann aber auch grundsätzlich angewendet werden und wird empfohlen, wenn keine näheren Angaben zur Merkmalsverteilung vorliegen [Nab86].

6.2.6 Mittel-, Kleinst- und Größtwertverteilungsfunktion

Zusätzlich gibt es die Möglichkeit, eine Mittelwertfunktion anzugeben, welche die Verteilung der Mittelwerte beschreibt. Dazu wird von den vielen Stichproben einer Grundgesamtheit jeweils der Mittelwert vom kleinsten Wert aus aufsummiert. Es stellt sich eine Funktion ein, die der Grundgesamtheit ähnelt, aber eine kleinere Streuung (steilerer Verlauf) aufweist (Bild 6.9).

Wie bei der Mittelwertfunktion lässt sich auch eine Funktion für die Kleinstwerte angeben, indem die Kleinstwerte vieler Stichproben einer Grundgesamtheit aufsummiert werden.

$$F_L(x) = 1 - [1 - F_x(x)]^n \quad \text{Verteilungsfunktion der Kleinstwerte}$$

$$f_L(x) = n \cdot [1 - F_x(x)]^{n-1} \cdot f_x(x) \quad \text{Verteilungsdichte der Kleinstwerte}$$

Analog dazu gibt es noch den Fall für die Größtwerte:

$$F_U(x) = [F_x(x)]^n \quad \text{Verteilungsfunktion der Größtwerte}$$

$$f_U(x) = n \cdot [F_x(x)]^{n-1} \cdot f_x(x) \quad \text{Verteilungsdichte der Größtwerte}$$

Diese Gleichungen enthalten die Verteilung der Grundgesamtheit $F(x)$ und die Anzahl der Elemente n . Der Wertebereich x für die Extremwerte wird mit wachsendem n kleiner.

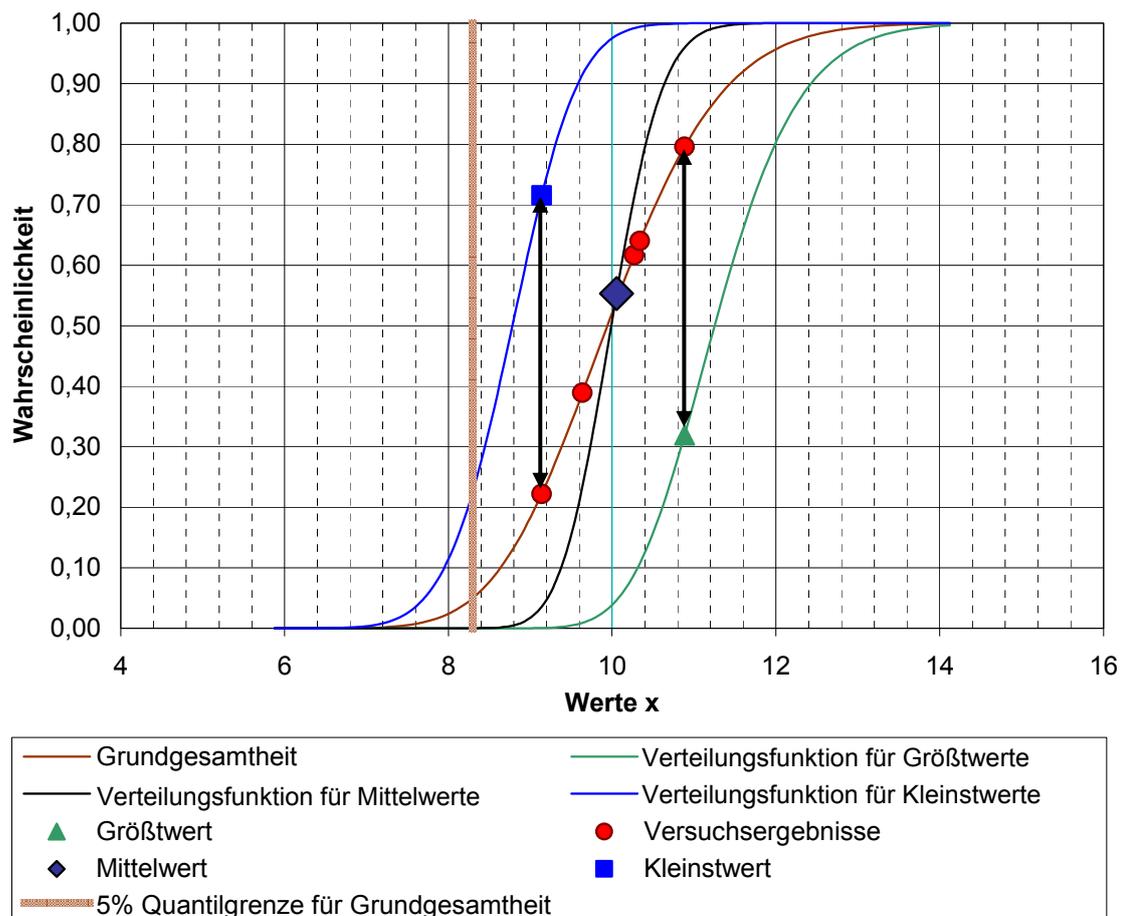


Bild 6.9 Grundgesamtheit, Verteilungsfunktion für Mittelwert, Kleinstwert, Größtwert und zugehörige Stichprobe mit 5 Versuchsergebnissen, ihrem Mittelwert und Kleinstwert

6.2.7 Quantilwert

Der Quantilwert gibt den Wert x_p der Grundgesamtheit an, unter dem p % der Werte einer Verteilung liegen. Er wird mit p - Quantil oder auch Q_p bezeichnet, wobei p den Merkmalswert angibt, mit einer reellen Zahl zwischen 0 und 1.

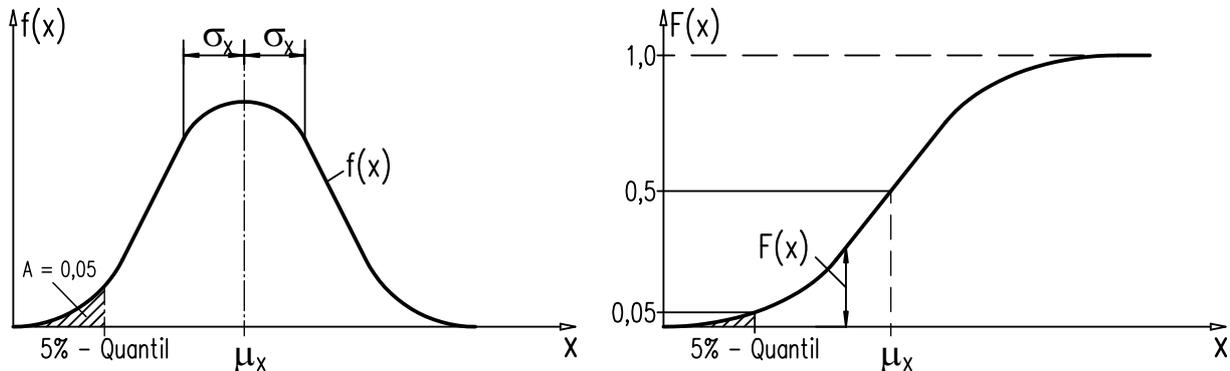


Bild 6.10 5% - Quantil der Verteilungsdichte und Verteilungsfunktion einer Normalverteilung

Bestehende Sicherheitskonzepte, wie zum Beispiel nach [11], haben den 5 % - Quantilwert der Grundgesamtheit als charakteristischen Wert normativ festgelegt.

Die Berechnung des p - Quantilwertes einer Stichprobe, mit Hilfe ihres Mittelwertes m_x und der Standardabweichung s_x , wird in Abschnitt 6.3.2 beschrieben.

6.2.8 Vertrauensniveau

Bei der Auswertung von Stichproben soll eine Aussage darüber getroffen werden, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein bestimmter Wert der Grundgesamtheit, z.B. der Mittelwert oder das Quantil, kleiner oder größer ist, als der berechnete Wert einer Stichprobe.

Die Wahrscheinlichkeit schließt einen festgelegten Anteil p der Grundgesamtheit auf einem vorgegebenen Vertrauensniveau $1-\alpha$ ein. [33]

Wie groß das Vertrauensniveau sein muss, kommt auf die Bedeutung der Aussage an. Im Bauwesen wird bei dem Nachweisen für die Standsicherheit tragender Elemente meist eine Aussagewahrscheinlichkeit von 90 % oder mehr gefordert, das Vertrauensniveau wird somit zu $1 - \alpha = 0,90$ gewählt.

Anmerkung:

Der Begriff "Aussagewahrscheinlichkeit" wird in den aktuellen Regelwerken nicht mehr verwendet, die "Aussagewahrscheinlichkeit" wird nun mit "Vertrauensniveau" bezeichnet.

6.3 VORHANDENE VERFAHREN ZUR STATISTISCHEN BESTIMMUNG VON CHARAKTERISTISCHEN WERTEN

6.3.1 Bestimmung der charakteristischen Werte über den Kleinstwert

In der Prüfleitlinie ETAG 004 [01] erfolgt die Beurteilung der Prüfergebnisse über den Kleinstwert. So wird aus einer Stichprobe mit einem Umfang von 3 bis 5 Elementen der Kleinstwert als maßgebender Wert herangezogen.

Betrachtet man noch einmal die Ergebnisse aus Abschnitt 6.1 und unterteilt die Prüfungen einer Dämmplatte in verschiedene Stichproben mit einer Größe von $n = 4$, so erhält man bei der Stichprobe A (Tabelle 6.2) einen Kleinstwert von 15,5 kN/m² und bei der Stichprobe B (Tabelle 6.3) einen Kleinstwert von 12,9 kN/m².

Tabelle 6.2 Querkzugfestigkeit – Stichprobe A

Probe [-]	Last [kN]	Abmessungen		σ_{mt} [kN/m ²]	
		[mm]	[mm]		
I A	0,772	200	200	20,3	
II A	0,980	200	200	24,9	
III A	0,809	200	200	21,0	
IV A	0,581	199	200	15,5	
Mittelwert				$\sigma_{mt,mittel}$ [kN/m ²]	20,4
Kleinstwert				$\sigma_{mt,min}$ [kN/m ²]	15,5
Standardabweichung					3,9
Variationskoeffizient					19%

Tabelle 6.3 Querkzugfestigkeit – Stichprobe B

Probe [-]	Last [kN]	Abmessungen		σ_{mt} [kN/m ²]	
		[mm]	[mm]		
I B	0,707	200	200	18,5	
II B	0,807	200	200	21,0	
III B	0,687	200	200	18,0	
IV B	0,471	196	200	12,9	
Mittelwert				$\sigma_{mt,mittel}$ [kN/m ²]	17,6
Kleinstwert				$\sigma_{mt,min}$ [kN/m ²]	12,9
Standardabweichung					3,4
Variationskoeffizient					19%

Hätte man in beiden Fällen nur die ersten 3 Prüfungen durchgeführt anstatt 4, würde für Stichprobe A der Kleinstwert 20,3 kN/m² betragen und für Stichprobe B 18,0 kN/m².

Noch deutlicher wird die Ungenauigkeit der Auswertung über die Kleinstwerte, wenn man die Stichprobenverteilung anhand der Grundgesamtheit vergleicht.

Da die Grundgesamtheit der zuvor genannten experimentellen Stichproben nicht bekannt ist, wird im Folgenden eine theoretische Verteilung angenommen, deren Grundgesamtheit bekannt ist. Diese theoretische Verteilung wurde über Zufallswerte, mit einem Variationskoeffizienten von $v = 20 \%$, generiert.

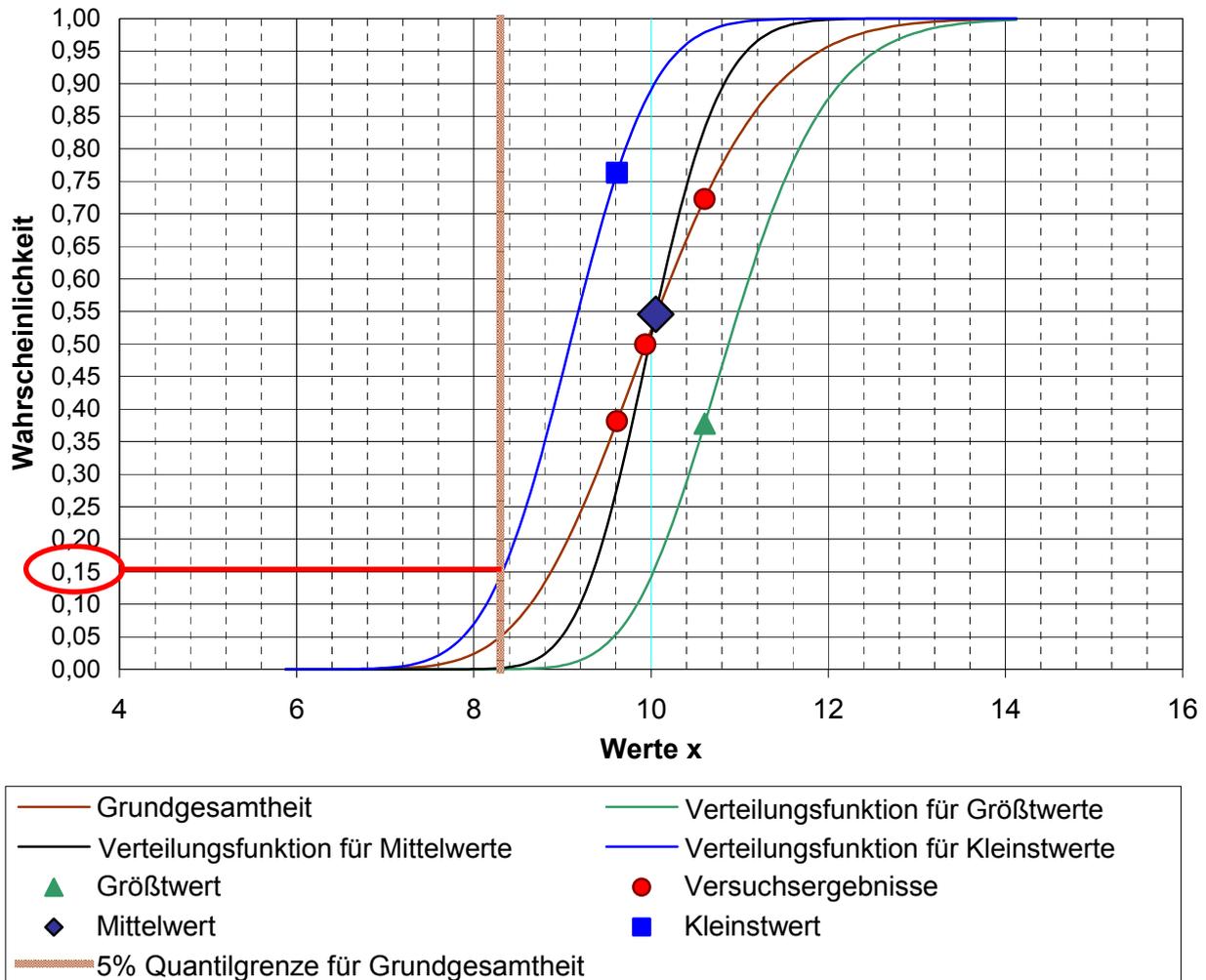


Bild 6.11 Verteilung einer Stichprobe von $n = 3$ auf der Grundgesamtheit mit Kleinst-, Mittel-, und Größtwertverteilungsfunktion bei einem Variationskoeffizienten von $v = 0,20$

Bild 6.11 zeigt die Verteilung der Einzelwerte einer Stichprobe von $n = 3$ auf der Grundgesamtheit, mit der zugehörigen Kleinst-, Mittel- und Größtwertverteilungsfunktion für Stichproben mit $n = 3$.

Zeichnet man die 5 % - Quantilgrenze der Grundgesamtheit ein (vgl. Bild 6.11), so wird deutlich, dass nur ein Anteil von ca. 15 % der Kleinstwertverteilungsfunktion unterhalb der 5 % - Quantilgrenze liegt.

⇒ Dies entspricht einem Vertrauensniveau von 15 %!

Die Bestimmung des charakteristischen Wertes über den Kleinstwert einer Stichprobe mit nur 3 Versuchen liefert somit eine viel zu unsichere Aussage und ist unzuverlässig!

Im Bauwesen wird in den gängigen Normen und Prüfleitlinien ein Vertrauensniveau von mindestens 90 % gefordert!

Nur bei einem großen Stichprobenumfang wird die Wahrscheinlichkeit größer, dass der Kleinstwert unter dem Quantilwert der Stichprobe liegt.

So wird ein Vertrauensniveau von 90 %, bei dem 90 % der Kleinstwerte unterhalb der geforderten 5 %-Quantilgrenze der Grundgesamtheit liegen, erst bei Stichproben mit $n = 44$ erreicht (Bild 6.12)!

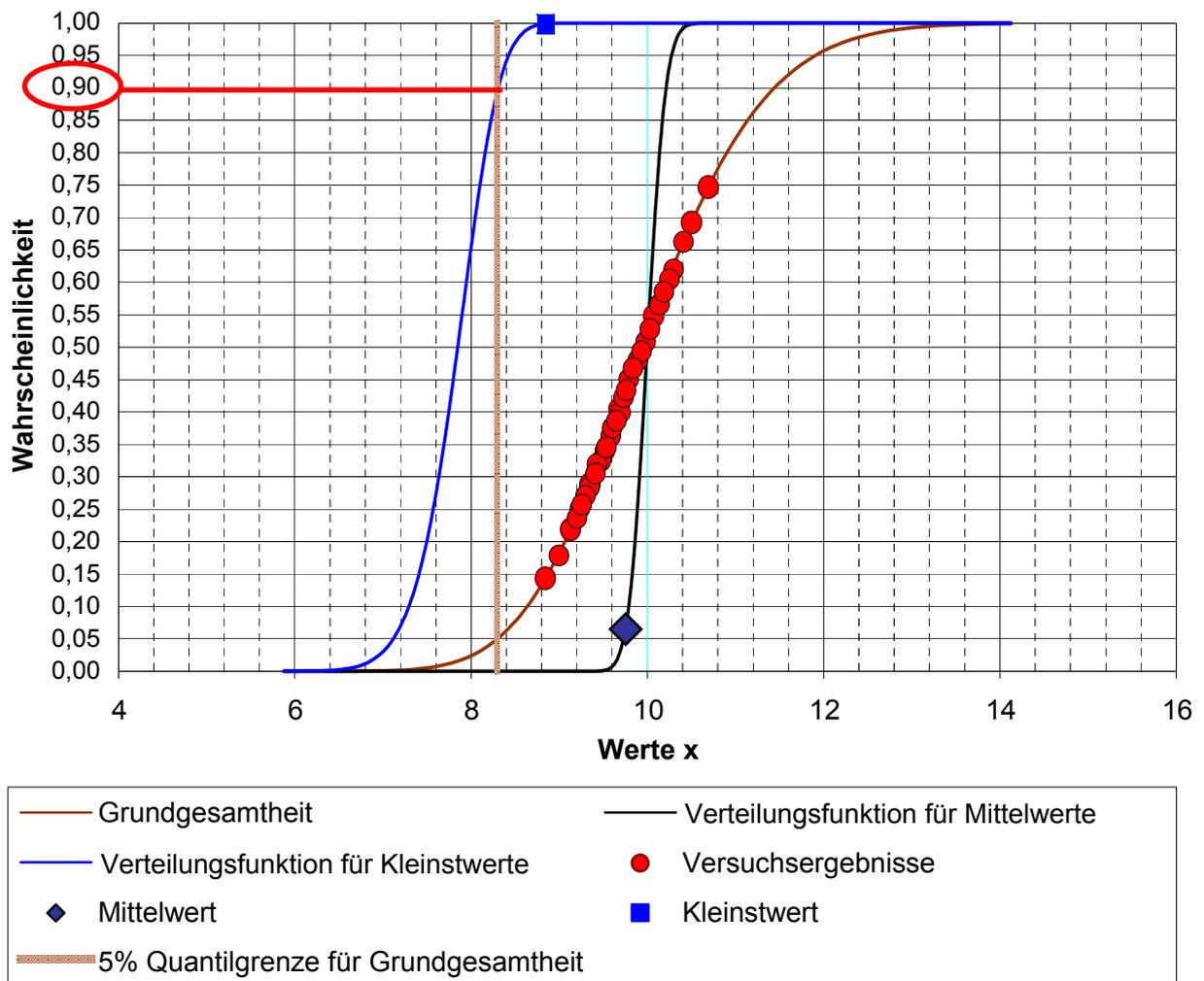


Bild 6.12 Verteilung einer Stichprobe von $n = 44$ auf der Grundgesamtheit mit Kleinst- und Mittelwertfunktion bei einem Variationskoeffizienten von $v = 0,20$

Diese große Anzahl an benötigten Versuchen wäre in der versuchsgestützten Bemessung mit einem sehr umfangreichen Prüfaufwand und daraus resultierend einem hohem Zeit- und Kostenaufwand verbunden. Es ist daher erforderlich, charakteristische Werte an kleinen Stichproben mit einer Vertrauensniveau von 90 % bestimmen zu können.

6.3.2 Bestimmung der charakteristischen Werte über den Quantilwert

In der versuchsgestützten Bemessung werden gemäß [11] die Bemessungswerte für Baustoffeigenschaften über die charakteristischen Werte bestimmt, welche durch einen Teilsicherheitsbeiwert zu dividieren sind. Der Teilsicherheitsbeiwert sollte dem entsprechenden Eurocode entnommen oder kann anhand der Zuverlässigkeitsmethoden gemäß [11] bestimmt werden (vgl. Abschnitt 6.4).

Bei der Bestimmung der charakteristischen Werte über den Quantilwert mit der Normalverteilung werden zunächst der Mittelwert m_x , die Standardabweichung s_x und der Variationskoeffizient v einer Stichprobe ermittelt, vgl. Abschnitt 6.2.1.

Der Quantilwert wird mit einem k-Wert berechnet, welcher auf der Annahme beruht, dass die zugrunde liegende Verteilung der Grundgesamtheit eine Normalverteilung ist, da es keine Vorinformationen über den Mittelwert gibt und der Variationskoeffizient bekannt ist oder nicht.

$$x_p = m_x - k \cdot s_x \quad \text{für } x_p < x_{0,5}$$

$$x_p = m_x + k \cdot s_x \quad \text{für } x_p > x_{0,5}$$

In der Tabelle 6.4 sind Zahlenwerte für k angeben. Der k-Wert wird bestimmt durch die Stichprobenanzahl n, dem Quantilwert p und dem Vertrauensniveau $1-\alpha$.

Tabelle 6.4 k-Werte mit (n ,p, $1-\alpha$) zur Quantilwertberechnung [Ode80]

1- α p n	0,75			0,90			0,95		
	1%	5%	10%	1%	5%	10%	1%	5%	10%
3	4,396	3,152	2,501	7,340	5,311	4,258	10,553	7,656	6,155
4	3,726	2,681	2,134	5,438	3,957	3,188	7,042	5,144	4,162
5	3,421	2,463	1,962	4,666	3,400	2,742	5,741	4,203	3,407
6	3,244	2,336	1,859	4,243	3,092	2,494	5,062	3,708	3,006
7	3,126	2,250	1,790	3,972	2,894	2,333	4,642	3,399	2,755
8	3,042	2,188	1,740	3,783	2,754	2,219	4,354	3,187	2,582
9	2,977	2,141	1,701	3,641	2,650	2,133	4,143	3,031	2,454
10	2,927	2,104	1,671	3,532	2,568	2,066	3,981	2,911	2,355
∞	2,326	1,645	1,282	2,326	1,645	1,282	2,326	1,645	1,282

Für übliche Baukonstruktionen wird für die Ermittlung des Bauteilwiderstandes das 5%-Quantil bei einem Vertrauensniveau von 90% ermittelt. Für untergeordnete Bauteile, bei deren Versagen keine Gefährdung von Menschen eintreten kann, wird ein Vertrauensniveau von 75% angenommen. Bei Sonderkonstruktionen mit besonders hohen Sicherheitsanforderungen, wie z.B. bei Kernkraftwerken, kann zum Teil sogar ein 99%iges Vertrauensniveau gefordert werden.

Zur Ermittlung der charakteristischen Tragfähigkeiten von Wärmedämm-Verbundsystemen sollte wie bei üblichen Baukonstruktionen ein 90%ige Vertrauensniveau mit $1 - \alpha = 0,90$ angenommen werden!

Analog zur Bestimmung der charakteristischen Werte mit der Normalverteilung werden die Quantilwerte für eine logarithmische Normalverteilung über die Logarithmen der Zufallsgrößen bestimmt.

6.4 BESTIMMUNG GEEIGNETER TEILSICHERHEITSBEIWERTE FÜR DIE TRAGFÄHIGKEIT VON DÜBELN FÜR WDVS

6.4.1 Allgemeines

Bei der Herleitung eines einheitlichen Sicherheitskonzeptes für Wärmedämm-Verbundsysteme ist es sinnvoll, folgende Parameter mit Hilfe der versuchsgestützten Bemessung und der Zuverlässigkeitstheorie zu berücksichtigen:

- die Streuungen der Versuchsergebnisse, in Anlehnung an [11],
- die Reduktion der Tragfähigkeiten durch Bewitterung (Alterungsverhalten) anhand tatsächlicher Versuchswerte und
- das Arbeitsvermögen des Materials; anhand des Charakters der Last-Verformungskurven soll das Arbeitsvermögen **bis** zum Erreichen des Maximalwertes im Vergleich mit dem Arbeitsvermögen **nach** dem Erreichen des Maximalwertes verglichen werden.

Diese Parameter können über die Bestimmung von Teilsicherheitsbeiwerten für die Materialeigenschaften berücksichtigt werden.

Mit dem Teilsicherheitsbeiwert γ_m und dem charakteristischen Wert der Tragfähigkeit R_k wird der Bemessungswert der Tragfähigkeit für Bauteile R_d hergeleitet:

$$R_d = R_k / \gamma_m \quad \dots \quad (6.4)$$

Der Teilsicherheitsbeiwert γ_m für die Materialeigenschaft eines Dämmstoffes kann wie folgt unter Berücksichtigung der o.g. Parameter bestimmt werden:

$$\gamma_m = \gamma_{m1} \cdot \gamma_1 \cdot \gamma_2 \cdot \gamma_3 \quad \dots \quad (6.5)$$

- mit
- γ_{m1} Teilsicherheitsbeiwert in Anlehnung an EC1
 - γ_1 Teilsicherheitsbeiwert infolge des Alterungsverhalten
 - γ_2 Teilsicherheitsbeiwert infolge des Arbeitsvermögens
 - γ_3 Montagesicherheitsbeiwert für das System

6.4.2 Teilsicherheitsbeiwert γ_{m1} auf Basis der versuchsgestützten Bemessung nach EC1

Ziel ist es, mit Hilfe der versuchsgestützten Bemessung und der Zuverlässigkeitstheorie Teilsicherheitsbeiwerte zu finden, um für gleichartige Bauteile (hier: WDVS) ein möglichst einheitliches Zuverlässigkeitsniveau zu garantieren. Für die Zuverlässigkeit kommen als Bewertungsmaßstab die Versagenswahrscheinlichkeit P_f bzw. der Zuverlässigkeitsindex β in Frage.

DIE VERSAGENSWAHRSCHEINLICHKEIT P_f

Bei einer bekannten Grundgesamtheit ($n \rightarrow \infty$) mit dem Mittelwert μ_x und der Standardabweichung σ_x , lässt sich die Grundgesamtheit als Verteilungsdichte $f(x)$ darstellen. Ist nun die Verteilung der äußeren Einwirkung E und die Verteilung des Tragwiderstandes eines Bauteils R bekannt, so lassen sich beide Verteilungen wie folgt in Zusammenhang bringen:

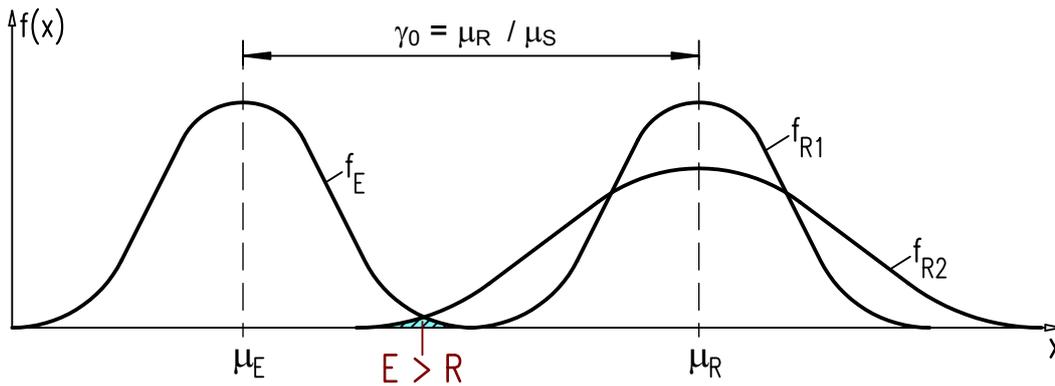


Bild 6.13 Der zentrale Sicherheitsbeiwert γ_0 [Roi78]

Der zentrale Sicherheitsbeiwert γ_0 wird über die Mittelwerte der Beanspruchung μ_E und des Widerstands des Bauteils μ_R bestimmt. Ein Versagen tritt ein, wenn R kleiner E wird. Den Überlappungsbereich der beiden Verteilungen (schraffierter Bereich) bezeichnet man auch als Versagenswahrscheinlichkeit. Die Versagenswahrscheinlichkeit wird, bei gleichem Abstand von γ_0 der Mittelwerte, von der Streuung (Standardabweichung) der Verteilungen beeinflusst. So hat in Bild 6.13 die Verteilung f_{R2} mit einer größeren Streuung auch einen größeren Überlappungsbereich als die Verteilung f_{R1} mit einer geringeren Streuung.

Um die gleiche Versagenswahrscheinlichkeit anzustreben, muss der Abstand der Mittelwerte bei zunehmender Streuung größer werden. Hierbei nimmt man nun anstelle der Mittelwerte μ_E und μ_R bestimmte Quantilwerte e_p und r_p als Bezugswerte (z.B. 95%-Quantil für Beanspruchungen und 5%-Quantil der Widerstände) (vgl. Bild 6.14).

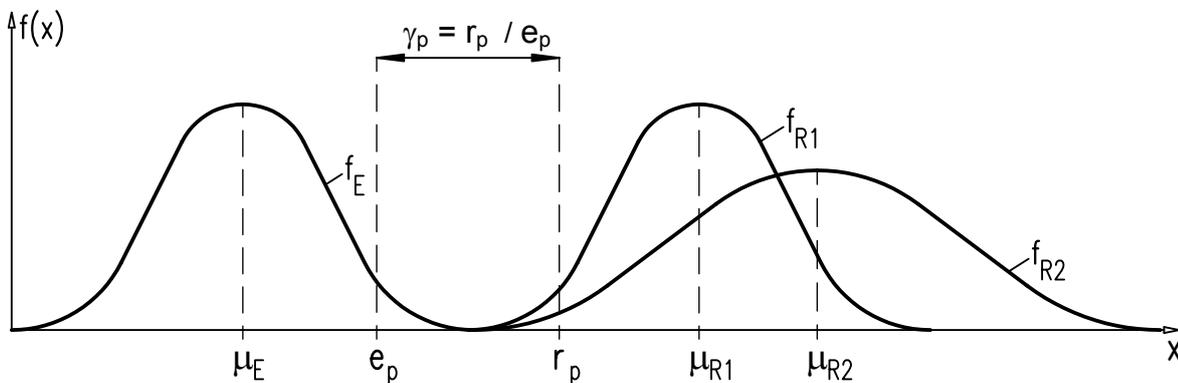


Bild 6.14 Der Nennsicherheitsbeiwert γ_p [Roi78]

Auch hier wird bei gleichem Abstand von γ_p der Quantilwerte die Versagenswahrscheinlichkeit von der Streuung beeinflusst und somit auch die Sicherheitsbeiwerte. Die genaue Kenntnis der Verteilungsfunktionen in den auslaufenden (überlappenden) Bereichen ist unbedingt notwendig, hier fehlen jedoch im Allgemeinen die Daten. Eine Bestimmung von Sicherheitsfaktoren über die Versagenswahrscheinlichkeit ist daher nicht geeignet. Im Folgenden wird daher der "Zuverlässigkeitsindex β " verwendet, mit dem die Zuverlässigkeit besser beschrieben werden kann.

DER ZUVERLÄSSIGKEITSINDEX β

Der Grenzzustand der Tragfähigkeit eines Bauteils wird beschrieben mit der Grenzzustandsfunktion g , mit R dem Widerstand und E der Beanspruchung:

$$g = R - E = 0$$

Ist R kleiner als E , dann ist der Grenzzustand der Tragfähigkeit überschritten und das Bauteil ist nicht mehr sicher.

Die Beanspruchung E und die Widerstände R sind voneinander unabhängige Größen mit den Verteilungsdichten $f_R(r)$ und $f_E(e)$, vgl. Bild 6.15.

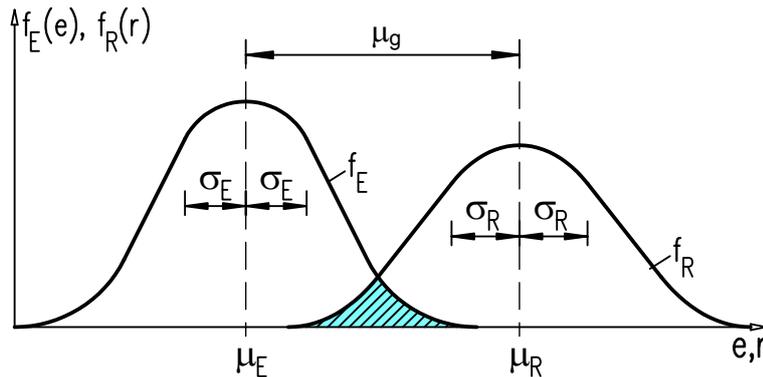


Bild 6.15 Verteilungsdichte von Beanspruchung E und Widerstand R [Roi78]

Aus den Verteilungsdichten der Beanspruchung E und der Widerstände R ergibt sich der Mittelwert für den Grenzzustand g :

$$\mu_g = \mu_R - \mu_E$$

und die Standardabweichung

$$\sigma_g = \sqrt{(\sigma_R^2 + \sigma_E^2)}$$

Somit verhält sich die Verteilungsdichte des Grenzzustands g wie in Bild 6.16 gezeigt.

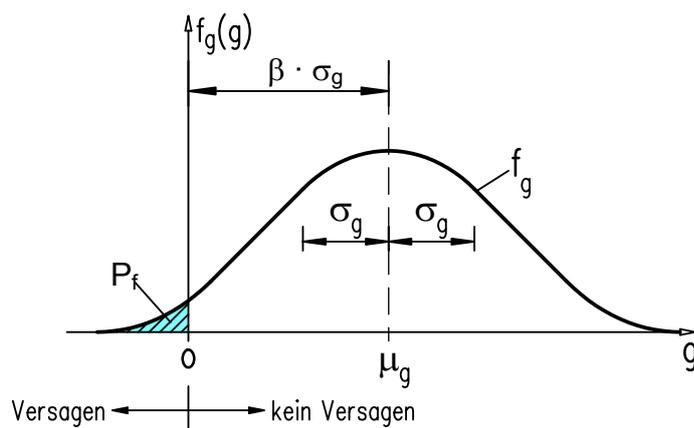


Bild 6.16 Verteilungsdichte von dem Grenzzustand g [Roi78]

Die Versagenswahrscheinlichkeit P_f ist die Fläche der Verteilungsdichte f_g im Bereich von $g \leq 0$:

$$P_f = \int_{-\infty}^0 f_g$$

Somit kann die Versagenswahrscheinlichkeit P_f als Quantilwert des Grenzzustandes angesehen werden.

Der Mittelwert des Grenzzustandes wird als β -fache Standardabweichung σ_g definiert:

$$\mu_g = \beta \cdot \sigma_g$$

β wird als Zuverlässigkeitsindex für den Grenzzustand bezeichnet. Mit wachsendem β steigt die Zuverlässigkeit.

$$\beta = \frac{\mu_g}{\sigma_g} = \frac{\mu_R - \mu_E}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_E^2}}$$

Die Problematik der mangelhaften Kenntnis über die „auslaufenden“ Bereiche der Verteilungsfunktion ist damit nicht beseitigt, aber mit Hilfe des Zuverlässigkeitsindex β kann bei der Bestimmung des Sicherheitsbeiwertes Folgendes berücksichtigt werden:

- bekannte Streuungen einer Materialeigenschaft,
- unterschiedliche Schadensfolgen und Schadensursachen (Sprödverhalten) [Bet97],
- Unterscheidung zwischen Gebrauchtauglichkeit und Tragfähigkeit.

Der Eurocode gibt Empfehlungen für Mindestwerte des Zuverlässigkeitsindex β in Verbindung mit Zuverlässigkeitsklassen RC 1 bis RC 3 und deren Schadensfolgeklassen CC 1 bis CC 3 an, für die Bezugszeit von 1 Jahr und 50 Jahren, vgl. Tabelle 6.5.

Tabelle 6.5 Empfehlungen für Mindestwerte des Zuverlässigkeitsindex β [11]

Zuverlässigkeitsklasse	Schadensfolgeklasse		Mindestwert für β	
			1 Jahr	50 Jahre
RC 3	CC 3	Hohe Folgen für Menschenleben oder sehr große wirtschaftliche, soziale oder umweltbeeinträchtigende Folgen	5,2	4,3
RC 2	CC 2	Mittlere Folgen für Menschenleben, beträchtliche wirtschaftliche, soziale oder umweltbeeinträchtigende Folgen	4,7	3,8
RC 1	CC 1	Niedrige Folgen für Menschenleben und kleine oder vernachlässigbare wirtschaftliche, soziale oder umweltbeeinträchtigende Folgen	4,2	3,3

Bei linearen Problemen (Zuverlässigkeitsmethode 1.Ordnung (Stufe II)) wird die Zuverlässigkeit der Versagenswahrscheinlichkeit P_f über den Zuverlässigkeitsindex β bestimmt, wobei ϕ die kumulative Verteilungsfunktion für die standardisierte Normalverteilung ist.

$$P_f = \phi(-\beta)$$

Folgender Zusammenhang besteht zwischen dem Zuverlässigkeitsindex β und der Versagenswahrscheinlichkeit P_f .

Tabelle 6.6 Beziehung zwischen β und P_f [11]

P_f	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}
β	1,28	2,32	3,09	3,72	4,27	4,75	5,20

Die Bestimmung der Sicherheitsbeiwerte für die Beanspruchung und den Widerstand erfolgen im Bauwesen auf der Basis des im Eurocode genannten Verfahrens der Teilsicherheitsbeiwerte, das prinzipiell in Bild 6.17 wiedergegeben ist (Zuverlässigkeitsmethode 1. Ordnung (Stufe II) FORM). Hierbei ist der Zuverlässigkeitsindex β entsprechend Tabelle 6.5 so zu wählen, dass mit bekannten Streuungen aus Versuchen die Teilsicherheitsbeiwerte bestimmt werden können [Blo03].

Die Bemessungswerte der Versagenswahrscheinlichkeiten für die Beanspruchungen E_d und die Widerstände R_d werden wie folgt festgelegt:

$$P(E > E_d) = \Phi(+\alpha_E \beta)$$

$$P(R \leq R_d) = \Phi(-\alpha_R \beta)$$

α_E und α_R sind Wichtungsfaktoren nach der Zuverlässigkeitsmethode 1. Ordnung (FORM) gemäß [11]. Die Wichtungsfaktoren dürfen mit $\alpha_E = -0,7$ und $\alpha_R = 0,8$ angenommen werden, wenn die Bedingung

$$0,16 < \sigma_E / \sigma_R < 7,6$$

eingehalten wird.

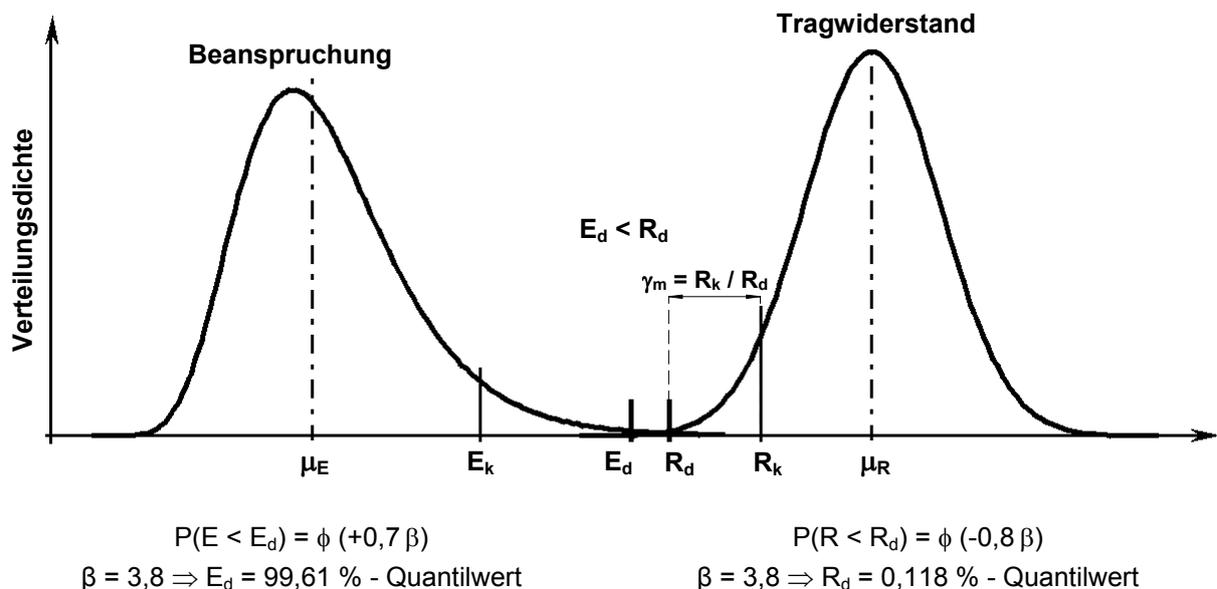


Bild 6.17 Zuverlässigkeitsverfahren gemäß Eurocode [Blo03]

Der Zuverlässigkeitsindex β kann in Abhängigkeit von der Schadentoleranz und damit der Schadensfolgeklasse gewählt werden, siehe Tabelle 6.5. Für die Beurteilung von Wärmedämm-Verbundsystemen wäre die Zuverlässigkeitsklasse RC 1 mit einem Zuverlässigkeitsindex von $\beta = 3,3$ für 1-2 geschossige Wohngebäude ausreichend. Für Gebäude ab 3 Geschossen ist die Zuverlässigkeitsklasse RC 2 mit dem Zuverlässigkeitsindex $\beta = 3,8$ zu empfehlen.

Der Bemessungswert der Beanspruchung entspricht bei einem Zuverlässigkeitsindex $\beta = 3,3$ dem 98,96 % - Quantil. Auch der Bemessungswert des Widerstandes ist vom Zuverlässigkeitsindex β abhängig. Das für $\beta = 3,3$ ausgerechnete Quantil des Bemessungswertes beträgt 0,415 %. Diese Werte sind unabhängig von der Form der Verteilung. Die Quantilwerte für einen Zuverlässigkeitsindex $\beta = 3,8$ sind in Bild 6.17 angegeben.

Über das ϕ - Quantil des Bemessungswertes kann nun der Bemessungswert R_d einer Stichprobe berechnet werden. Der Teilsicherheitsbeiwert einer Stichprobe, bei der $u = \ln x$ normalverteilt ist, errechnet sich durch Gleichung (6.4), auf Basis der logarithmischen Normalverteilung, somit zu:

$$\gamma_{m1} = \frac{R_k}{R_d} = \frac{e^{(m_u + k_{(n,1-\alpha,p)} \cdot s_u)}}{e^{(m_u + k_{(n,1-\alpha,\phi)} \cdot s_u)}}$$

- mit $m_u = \ln m_x - \frac{s_u^2}{2}$ logarithmisch normal verteilter Mittelwert
- $s_u = \sqrt{\ln(1 + v_x^2)}$ logarithmisch normal verteilte Standardabweichung
- $k_{(n,1-\alpha,p)}$ k-Wert für R_k , mit Stichprobenanzahl n , dem Vertrauensniveau $1-\alpha$ und dem Quantilwert p
- $k_{(n,1-\alpha,\phi)}$ k-Wert für R_d , mit Stichprobenanzahl n , dem Vertrauensniveau $1-\alpha$ und dem Quantilwert ϕ (-0,8 β)

In Bild 6.18 sind die so errechneten Sicherheitsbeiwerte in Abhängigkeit zum Variationskoeffizienten der untersuchten Dämmstoffe aus Abschnitt 4.3.2 mit einer Stichprobengröße von $n = 4$ angegeben. Hierbei wurde ein Zuverlässigkeitsindex $\beta = 3,3$ und ein Vertrauensniveau von 0,90 zugrunde gelegt.

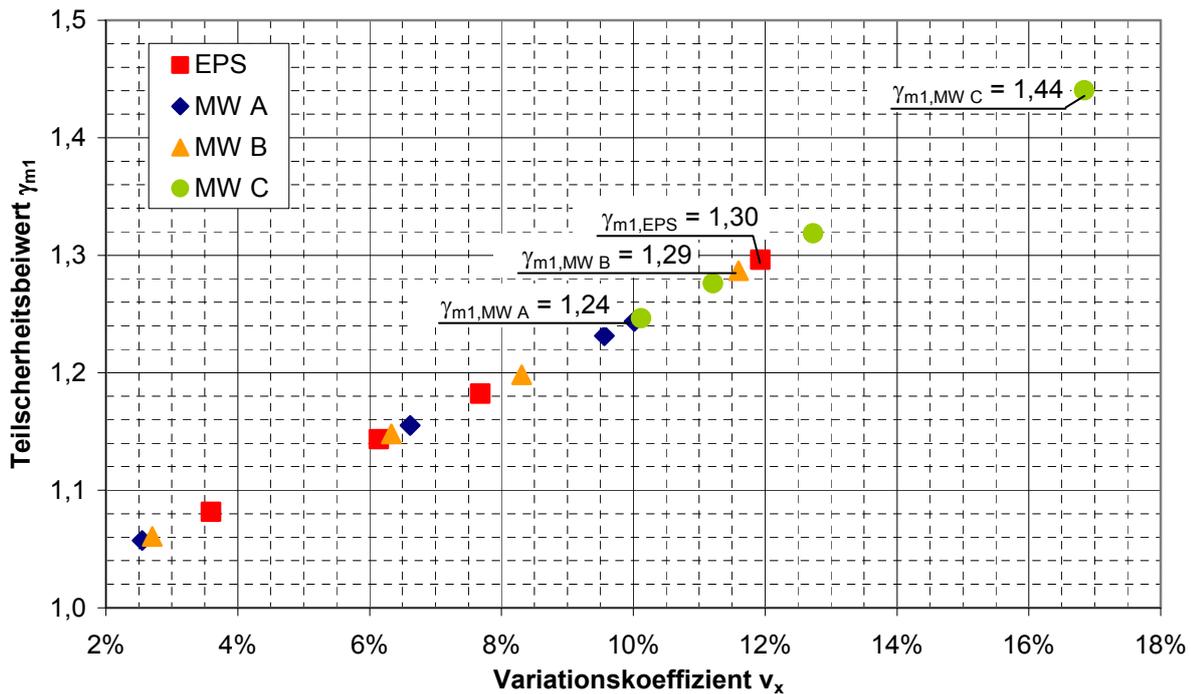


Bild 6.18 Materialteilsicherheitsbeiwerte für Stichproben mit $n = 4$ und dem Zuverlässigkeitsindex $\beta = 3,3$ mit logarithmischer Normalverteilung und ein Vertrauensniveau von 0,90 in Abhängigkeit vom Variationskoeffizienten der Dübeltragfähigkeit mit v_x

Der maximale Sicherheitsbeiwert für Mineralwolle-Dämmplatten von $\gamma_{m1,MW C} = 1,44$ ergibt sich aus der Stichprobe mit dem maximalen Variationskoeffizienten von 16,8 %. Für Polystyrol-Hartschaum-Dämmplatten wurde ein maximaler Variationskoeffizient von 11,9 % ermittelt, woraus sich ein Sicherheitsbeiwert von $\gamma_{m1,EPS} = 1,30$ ableiten lässt.

Die Auswertung über Stichproben mit $n=4$ ist aber kritisch zu betrachten, der Variationskoeffizient kann hier abweichend von der Grundgesamtheit deutlich höher oder niedriger ausfallen. Eine Stichprobe sollte $n = 5$ nicht unterschreiten.

Die Mittelwerte einer Stichprobe sind ab 5 Elementen recht stabil. Es ist jedoch zu empfehlen, bei Variationskoeffizienten einer Stichprobe kleiner 6 % und über 16 %, die Anzahl der Elemente zu erhöhen, zum Beispiel auf $n = 10$.

Bei Stichproben mit einem Variationskoeffizienten kleiner 6 % ist ein Rückschluss auf den Bemessungswert der Grundgesamtheit sehr unsicher und ungenau. Der Bemessungswert R_d nähert sich stark dem charakteristischen Wert R_k der Stichprobe an und muss nicht annähernd mit dem Bemessungswert R_d der Grundgesamtheit übereinstimmen. Kleine Stichproben mit einer großen Streuung und einem Variationskoeffizienten über 16 % führen hingegen zu unwirtschaftlichen Sicherheitsbeiwerten, sind jedoch zulässig.

Um eine bessere Aussage über den zu empfehlenden Sicherheitsbeiwert für die untersuchten Mineralwolle- und Polystyrol-Hartschaum-Dämmplatten machen zu können, wurden alle Einzelergebnisse der verschiedenen Stichproben aus einer Dämmplattencharge zusammen ausgewertet, um somit einen besseren Rückschluss auf die mögliche Grundgesamtheit des jeweiligen Materials zu erzielen. Aus diesen relativ großen Stichproben ($n = 16$) wurden folgende Materialsicherheitsbeiwert für die untersuchten Dämmstoffe (Tabelle 6.7) ermittelt:

Tabelle 6.7 Materialsicherheitsbeiwerte der untersuchten Dämmstoffe mit $n = 16$

	v_x	$\beta = 3,3$	$\beta = 3,8$
$\gamma_{m1,MW A}$	9 %	1,13	1,18
$\gamma_{m1,MW B}$	15 %	1,20	1,30
$\gamma_{m1,MW C}$	10 %	1,14	1,20
$\gamma_{m1,EPS}$	8 %	1,11	1,16

Beispielhaft ist im Folgenden die Berechnung des Materialsicherheitsbeiwertes $\gamma_{m1,MW A}$ für den Zuverlässigkeitsindex $\beta = 3,8$ gezeigt, mit einem Vertrauensniveau von 0,90:

Größe der Stichprobe:	$n = 16$	
Variationskoeffizient:	$v_x = 9 \%$	
Standardabweichung:	$s_x = 0,059 \text{ kN}$	$\rightarrow s_u = 0,093 \text{ kN (log. norm.)}$
Mittelwert:	$m_x = 0,638 \text{ kN}$	$\rightarrow m_u = -0,454 \text{ kN (log. norm.)}$
p - Quantil:	$p = 5 \%$	
k-Wert für R_k :	$k_{(n,1-\alpha,p)} = -2,299$	(aus [Ode80])
\Rightarrow charakteristischer Wert:	$R_k = 0,513 \text{ kN}$	(log. norm)
Zuverlässigkeitsindex:	$\beta = 3,8$	
ϕ - Quantil:	$\phi(\alpha * \beta) = (-0,8 * 3,8)$	$\rightarrow R_d = 0,118 \%$ - Quantilwert
k-Wert für R_d :	$k_{(n,1-\alpha,\phi)} = -4,099$	(generiert über [Ode80])
\Rightarrow Bemessungswert:	$R_d = 0,434 \text{ kN}$	(log. norm)

\Rightarrow Materialsicherheitsbeiwert: $\gamma_{m1,MW A} = 1,18$

Um die Bestimmung der Materialsicherheitsbeiwerte zu vereinfachen, sind diese in Bild 6.19 in Abhängigkeit zum Variationskoeffizienten von Stichproben mit 5 und 10 Elementen angegeben. Hierbei wurde eine logarithmische Normalverteilung angenommen. Die Materialsicherheitsbeiwerte können für den entsprechenden Zuverlässigkeitsindex, in Abhängigkeit zur Gebäudehöhe abgelesen werden, mit:

$\beta = 3,3$ für 1-2 geschossige Wohngebäude

$\beta = 3,8$ für Gebäude ab 3 Geschossen

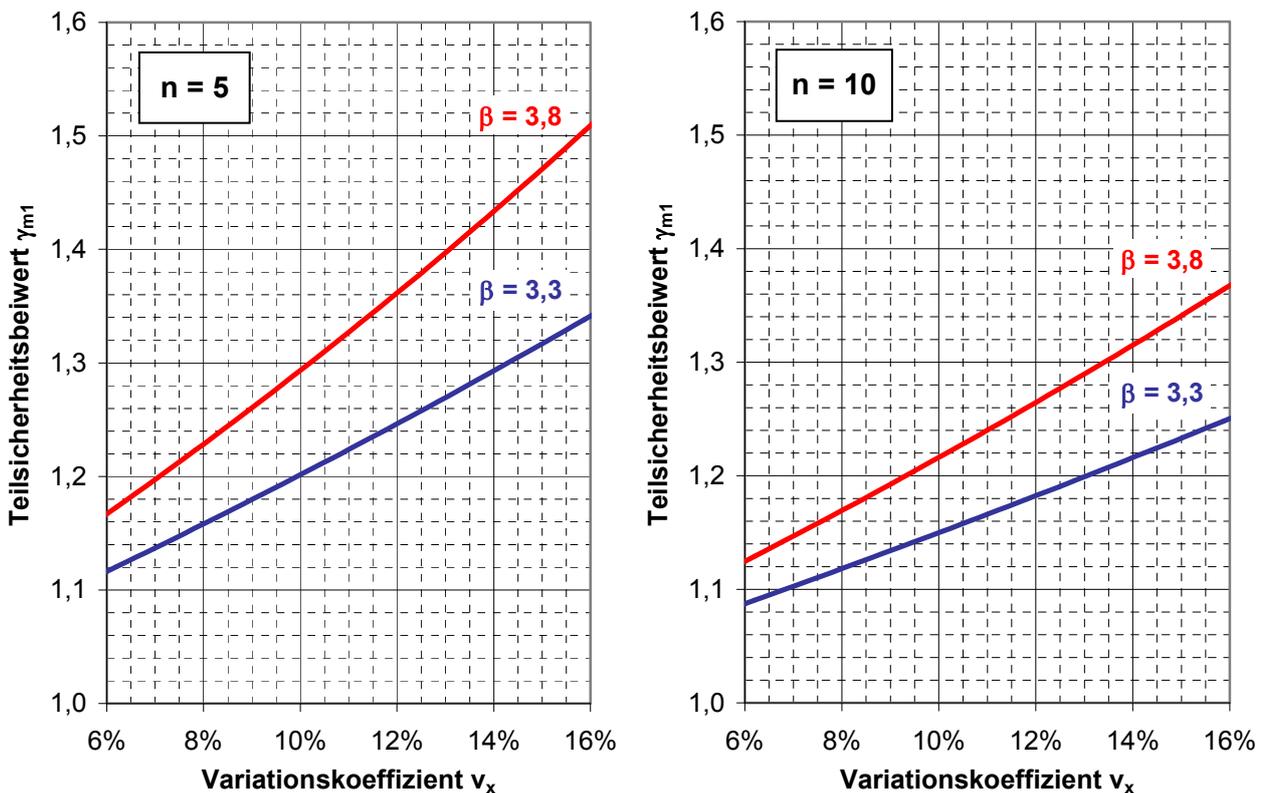


Bild 6.19 Zusammenhang zwischen dem Variationskoeffizienten und dem Materialsicherheitsbeiwert bei Stichproben mit $n = 5$ bzw. 10 , einem Vertrauensniveau von $0,90$ und dem Zuverlässigkeitsindex $\beta = 3,3 / 3,8$ für logarithmische Normalverteilungen

Bei einer Stichprobe mit $n = 5$, einem Variationskoeffizienten von 12% und einem Zuverlässigkeitsindex $\beta = 3,3$ erreicht man einen Materialsicherheitsbeiwert von $\gamma_{m1} = 1,25$.

6.4.3 Teilsicherheitsbeiwert γ_1 infolge des Alterungsverhaltens des Dämmstoffs

Bei der Ermittlung der Windsogtragfähigkeit im Durchziehversuch gemäß ETAG 004 [01], 5.1.4.3.1, vgl. Abschnitt 3.2.4, wird der festigkeitsmindernde Einfluss nach künstlicher Alterung bestimmt. Der so bestimmte Abminderungsfaktor wird auf die ermittelte Tragfähigkeit des Systemversuchs umgerechnet. Dieser Tragfähigkeitsverlust kann über den Teilsicherheitsbeiwert γ_1 wie folgt berücksichtigt werden.

Teilsicherheitsbeiwert γ_1 für die Berücksichtigung der Alterung eines Dämmstoffes:

$$\gamma_1 = 1 / a \quad \dots \quad (6.6)$$

mit a = Reduktionsfaktor für die Alterung aus Versuchen

Der Reduktionsfaktor a infolge Alterung wird anhand tatsächlicher Versuchswerte wie folgt bestimmt:

$$a = \bar{F}_{\text{Reihe 3}} / \bar{F}_{\text{trocken}} \quad \dots \quad (6.7)$$

mit $\bar{F}_{\text{Reihe 3}}$ = Mittelwert der Windsogtragfähigkeit nach Alterung gemäß ETAG 004, 5.2.4.1.2, Reihe 3, vgl. Abschnitt 3.2.3

\bar{F}_{trocken} = Mittelwert der Windsogtragfähigkeit ohne Alterungseinfluss

Es empfiehlt sich, eine Einteilung des Reduktionsfaktors a , infolge des Alterungsverhaltens der Dämmstoffe, in Klassen gemäß Tabelle 6.8. Der Reduktionsfaktor a aus (6.7) wird entsprechend der Klasse abgerundet.

Tabelle 6.8 Klasseneinteilung des Reduktionsfaktors a infolge Alterung

Klasse	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tragfähigkeitsverlust	0 %	5 %	10 %	15 %	20 %	25 %	30 %	35 %	40 %	45 %
a	1,00	0,95	0,90	0,85	0,80	0,75	0,70	0,65	0,60	0,55

Die Klassen können in 0,05er Schritten nach unten ergänzt werden.

Somit ergibt sich z. B. für Mineralwolle-Dämmplatten mit einem Tragfähigkeitsverlust von 25 % folgender Teilsicherheitsbeiwert

$$\gamma_{1,\text{MW}} = 1 / 0,75 = 1,33$$

und für Polystrol-Hartschaum-Dämmplatten, welche nach Bewitterung keinen Tragfähigkeitsverlust aufweisen, ein Teilsicherheitsbeiwert von

$$\gamma_{1,\text{EPS}} = 1 / 1,00 = 1,0.$$

6.4.4 Teilsicherheitsbeiwert γ_2 infolge des Arbeitsvermögens des Dämmstoffs

Spröde Dämmstoffe weisen wesentlich geringer Reserven im Tragverhalten auf als duktile Dämmstoffe. Dieses Verhalten soll mit dem Teilsicherheitsbeiwert γ_2 berücksichtigt werden. Dämmstoffe mit duktiler Eigenschaft können positiver bewertet werden, da sie ihr Versagen „ankündigen“ und eine Lastumlagerung auf benachbarte Befestigungen möglich ist.

Anhand der Last-Verformungskurve, bei der Ermittlung der Windsogtragfähigkeit eines Dämmstoffs, soll das Arbeitsvermögen **vor** dem Erreichen des Maximalwertes mit dem Arbeitsvermögen **nach** dem Erreichen des Maximalwertes verglichen werden.

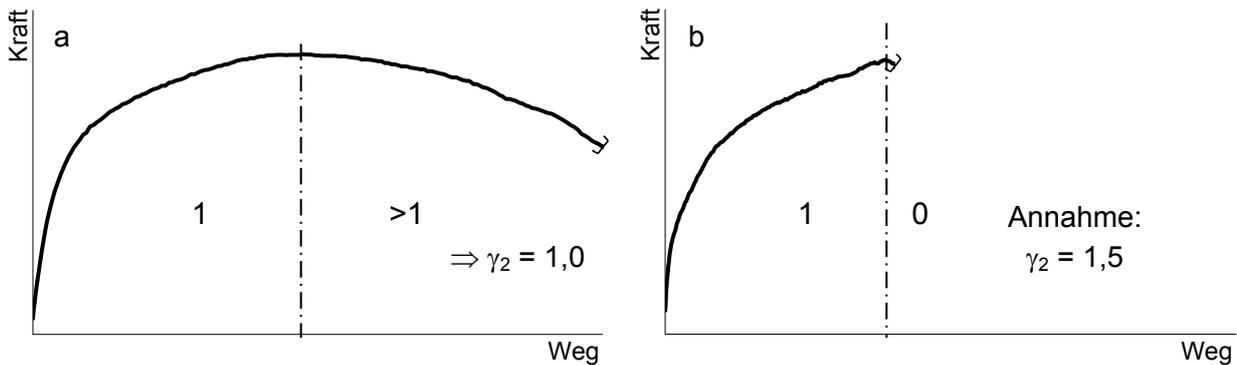


Bild 6.20 Ermittlung des Teilsicherheitsbeiwertes γ_2 anhand des Arbeitsvermögens des Dämmstoffs bei der Windsogtragfähigkeit

Ist das Arbeitsvermögen nach dem Erreichen des Maximalwertes gleich oder größer als das Arbeitsvermögen vor dem Erreichen des Maximalwertes, so wird der Teilsicherheitsbeiwert γ_2 mit 1,0 gewählt, vgl. Bild 6.20a. Sollte nach dem Erreichen des Maximalwertes das System direkt versagen und es ist kein Arbeitsvermögen mehr im System vorhanden, so wird γ_2 mit 1,5 angenommen, vgl. Bild 6.20b.

Zwischenwerte werden mit der folgenden Gleichung interpoliert:

$$\gamma_2 = 1,5 - 0,5 (A_n / A_v) \quad \dots \quad (6.8)$$

mit A_n = Arbeitsvermögen nach dem Erreichen des Maximalwertes
 A_v = Arbeitsvermögen vor dem Erreichen des Maximalwertes

Das Verhältnis des Arbeitsvermögens der Dämmstoffe, kann in Klassen gemäß Tabelle 6.9 angegeben werden, dabei wird (A_n / A_v) entsprechend der Klasse abgerundet.

Tabelle 6.9 Klasseneinteilung des Reduktionsfaktors a infolge Alterung

Klasse	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
A_n / A_v	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0,0

Vergleicht man die Last-Verformungskurven bei der Ermittlung der Windsogtragfähigkeit für Dübel in Mineralwolle- und Polystyrol-Hartschaum-Dämmplatten, so wird deutlich, dass bei den Mineralwolle-Dämmplatten nach dem Erreichen des Maximalwertes noch erhebliches Arbeitsvermögen im System vorhanden ist (Bild 6.21). Bei Polystyrol-Hartschaum-Dämmplatten versagt das System kurz nach dem Erreichen des Maximalwertes (Bild 6.22).

Somit ergibt sich für Mineralwolle-Dämmplatten gemäß Bild 6.21 folgender Teilsicherheitsbeiwert:

$$\gamma_{2,MW} = 1,5 - 0,5 \cdot 1,0 = 1,00$$

Und für Polystyrol-Hartschaum-Dämmplatten gemäß Bild 6.22 ein Teilsicherheitsbeiwert für das Arbeitsvermögen von:

$$\gamma_{2,EPS} = 1,5 - 0,5 \cdot 0,2 = 1,40$$

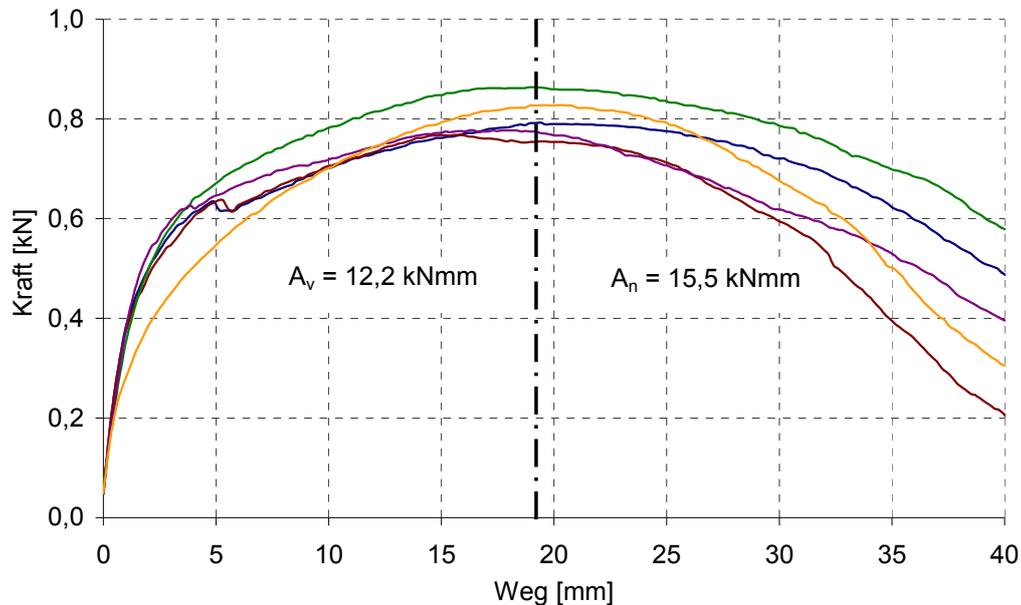


Bild 6.21 Last-Verformungskurven für Dübel in Mineralwolle-Dämmplatten

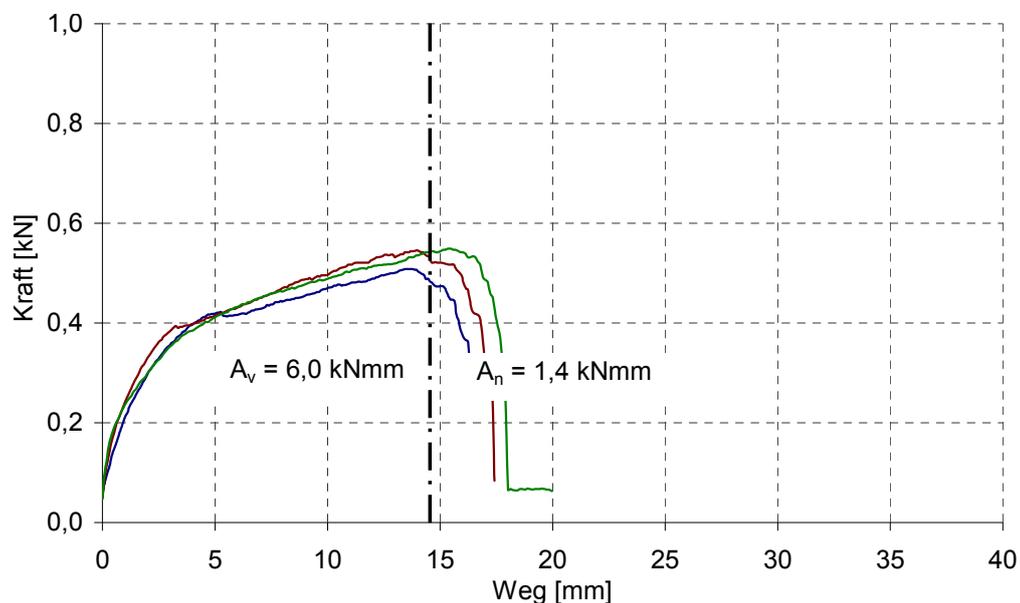


Bild 6.22 Last-Verformungskurven für Dübel in Polystyrol-Hartschaum-Dämmplatten

Das Umlagerungsverhalten bei Polystyrol-Hartschaum-Dämmplatten wurde in Abschnitt 4.5 experimentell und statistisch bewertet. Bei Mineralwolle-Dämmplatten konnte das Umlagerungsverhalten nicht nachgewiesen werden, da, wie in Abschnitt 4.4.2 beschrieben, ein versuchstechnisch bedingt vorzeitiges Versagen durch den Biegebruch der Dämmplatten im Schaumblockversuch aufgetreten ist.

6.4.5 Empfehlung zur Bestimmung des Teilsicherheitsbeiwertes γ_m für Dämmstoffe

Bezug nehmend auf Abschnitt 6.4.1 kann der Teilsicherheitsbeiwert γ_m für die Materialeigenschaft eines Dämmstoffes nun wie folgt bestimmt werden:

$$\gamma_m = \gamma_{m1} \cdot \gamma_1 \cdot \gamma_2 \cdot \gamma_3 \quad \dots \quad (6.5)$$

- mit γ_{m1} Teilsicherheitsbeiwert in Anlehnung an EC1, in Abhängigkeit zur Gebäudehöhe gemäß Bild 6.19
- γ_1 Teilsicherheitsbeiwert infolge des Alterungsverhaltens, Gl.(6.6)
- γ_2 Teilsicherheitsbeiwert infolge des Arbeitsvermögens, Gl.(6.8)
- γ_3 Montagesicherheitsbeiwert für das System (vgl. Abschnitt 7.2)

Es empfiehlt sich eine Einteilung der Teilsicherheitsbeiwerte γ_m in Materialsicherheitsklassen gemäß Tabelle 6.10. Der Teilsicherheitsbeiwert γ_m wird entsprechend der Materialsicherheitsklassen aufgerundet.

Tabelle 6.10 Materialsicherheitsklassen (MSK) des Teilsicherheitsbeiwertes γ_m der Materialeigenschaft von Dämmstoffen

MSK	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
γ_m	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80	1,85	1,90	1,95

Die Materialsicherheitsklassen können in 0,05er Schritten nach oben ergänzt werden. Eine Unterschreitung des Teilsicherheitsbeiwertes $\gamma_m = 1,50$ ist wegen der bislang vorliegenden Erfahrungen nicht empfehlenswert.

Für die zuvor untersuchten Dämmstoffe ergibt sich mit Gl.(6.5) und Tabelle 6.10 ein Teilsicherheitsbeiwert für 1 bis 2 geschossige Wohngebäude gemäß Tabelle 6.11 und für Gebäude ab 3 Geschossen gemäß Tabelle 6.12:

Tabelle 6.11 Teilsicherheitsbeiwerte der untersuchten Dämmstoffe für 1 bis 2 geschossige Wohngebäude

	γ_{m1}	γ_1	γ_2	MSK	γ_m
MW A	1,13	1,33	1,00	2	1,55
MW B	1,20	1,33	1,00	3	1,60
MW C	1,14	1,33	1,00	2	1,55
EPS	1,11	1,00	1,40	2	1,55

Tabelle 6.12 Teilsicherheitsbeiwerte der untersuchten Dämmstoffe für Gebäude ab 3 Geschossen

	γ_{m1}	γ_1	γ_2	MSK	γ_m
MW A	1,18	1,33	1,00	3	1,60
MW B	1,30	1,33	1,00	6	1,75
MW C	1,20	1,33	1,00	3	1,60
EPS	1,16	1,00	1,40	4	1,65

Bisher wurde für Mineralwolle-Dämmplatten ein globaler Sicherheitsbeiwert von $\gamma_{0,MW} = 3,0$ und für Polystyrol-Hartschaum-Dämmplatten von $\gamma_{0,EPS} = 2,25$ angenommen. Bei einem Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_f = 1,5$ für Windlasten ergeben sich bisher Materialteilsicherheitsbeiwerte von $\gamma_{m,MW} = 2,0$ für Mineralwolle-Dämmplatten und $\gamma_{m,EPS} = 1,5$ für Polystyrol-Hartschaum-Dämmplatten.

Diese Sicherheitsbeiwerte wurden vom DIBt festgelegt [IfBt90] und nie statistisch nachgewiesen. Der globale Sicherheitsfaktor für Mineralwolle-Dämmplatten wurde auf 3,0 erhöht, da hier eine Tragfähigkeitsreduktion von ca. 25 % durch Alterung der Dämmplatten angenommen wurde.

Die hier ermittelten Teilsicherheitsbeiwerte liegen auf der sicheren Seite, da für den Teilsicherheitsbeiwert γ_{m1} in Anlehnung an EC1 ein Vertrauensniveau von 0,90 angenommen wurde, welches für die Standsicherheit von tragenden Bauteilen zugrunde gelegt wird, bei deren Versagen eine Gefährdung von Menschen eintreten kann. Wärmedämm-Verbundsysteme sind jedoch als untergeordnete Bauteile zu betrachten, bei deren Versagen keine erhebliche Gefährdung von Menschen besteht.

Es wird empfohlen, den Teilsicherheitsbeiwert γ_m für die Materialeigenschaften eines Dämmstoffes im Rahmen der Zulassungsuntersuchungen für den Dämmstoff festzulegen und in die jeweilige Zulassung zu schreiben. Somit wird eine einheitliche und für den jeweiligen Dämmstoff optimale Bewertung zugrunde gelegt.

In der Qualitätssicherung der Dämmstoffproduktion müssen Mindestwerte für die Dämmstoffeigenschaften eingehalten werden. Sollten bei einem Vergleich der Werte aus den Zulassungsuntersuchungen mit den geforderten Mindestwerten diese deutlich überschritten werden, müssen die für die Ermittlung der Teilsicherheitsbeiwerte zugrunde gelegten Bemessungswerte nicht auf die Mindestwerte reduziert werden, da hier nur die ermittelten Abminderungsfaktoren und die Streuungen der Stichproben von Bedeutung sind.

Im Rahmen der Qualitätssicherung sollten auch die Variationskoeffizienten überprüft werden. Der Variationskoeffizient darf nicht über dem in der Zulassungsprüfung ermittelten Wert liegen. Daher sollte der bei den Zulassungsprüfungen ermittelte Variationskoeffizient für die Bestimmung von γ_{m1} mit einem Vorhaltemaß von + 3 % angenommen werden.

6.5 EMPFEHLUNG ZUR BEMESSUNG VON DÜBELN FÜR WDVS BEI WINDSOGEINWIRKUNGEN

6.5.1 Bestimmung der mittleren Versagenslast $\bar{F}_{\text{Dübel}}$

Bei der Durchführung einer Prüfserie für den Windsogwiderstand eines WDVS wird die Last-Verformungskurve für jeden Versuch aufgezeichnet und die maximale Prüfkraft F_{max} notiert, vgl. Bild 6.23.

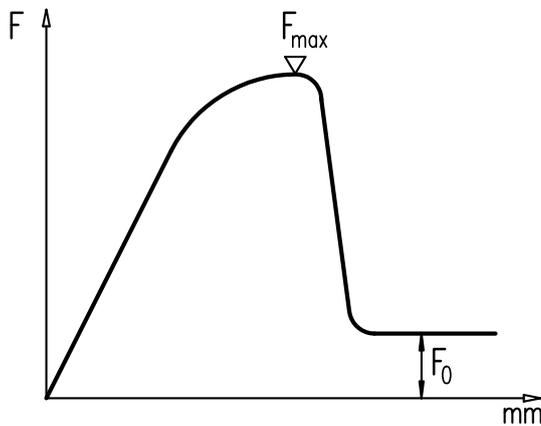


Bild 6.23 Beispiel einer Last-Verformungskurven

Am Ende jeder Prüfung sollte das Eigengewicht F_0 der Versuchseinrichtung sowie der abgezogene Teil einer Probe bestimmt werden. Dieses Eigengewicht muss von der maximalen Prüfkraft subtrahiert werden, um die eigentliche Versagenslast zu erhalten.

$$F_{\text{Test}} = F_{\text{max}} - F_0 \quad \text{Versagenslast}$$

mit F_{Max} maximale Zugkraft bis zum Versagen

F_0 Eigengewicht

Zur Bestimmung der mittleren Versagenslast wird nun das arithmetische Mittel einer Prüfserie wie folgt gebildet:

$$\bar{F}_{\text{Dübel}} = \frac{\sum F_{\text{Test}}}{n}$$

mit n Anzahl der Versuche einer Prüfserie

6.5.2 Bestimmung des Reduktionsfaktors α_{Fuge} für Fugendübelung

Sollen Dübel über den Dämmplattenfugen gesetzt werden, muss die Tragfähigkeit für die Dübel über den Dämmplattenfugen nachgewiesen werden, da sich hier eine Tragfähigkeitsreduktion ergeben kann, vgl. Abschnitt 4.

Der Reduktionsfaktor für die Fugendübelung wird über den Vergleich der mittleren Versagenslasten bei Verdübelungen in Dämmplattenfläche und Dämmplattenfuge bestimmt:

$$\alpha_{\text{Fuge}} = \frac{\bar{F}_{\text{Dübel,Fuge}}}{\bar{F}_{\text{Dübel}}}$$

Der Vergleich über die Mittelwerte ist zu empfehlen, da sich die Variationskoeffizienten der Prüfserien mit Verdübelung in Dämmplattenfläche und Dämmplattenfuge kaum unterscheiden.

Ein Vergleich über charakteristische Werte wäre erforderlich, wenn die Variationskoeffizienten beider Prüferien sehr unterschiedlich wären. Wenn der Variationskoeffizient der Prüferie mit Fugendübelung deutlich größer wäre als bei der Verdübelung in Dämmplattenfläche, dann müsste bei der Bestimmung des charakteristischen Wertes $F_{\text{Dübel},5\%}$ der Variationskoeffizient der Fugendübelung zugrunde gelegt werden. Andererseits könnte zusätzlich ein charakteristischer Wert für die Fugendübelung $F_{\text{Dübel},\text{Fuge},5\%}$ ermittelt werden, wobei dann der Reduktionsfaktor α_{Fuge} entfällt.

Es empfiehlt sich, eine Einteilung des Reduktionsfaktors α_{Fuge} , infolge der Fugendübelung, in Klassen (Tabelle 6.11). Der Reduktionsfaktor α_{Fuge} wird entsprechend der Klasse aufgerundet.

Tabelle 6.13 Klasseneinteilung des Reduktionsfaktors α_{Fuge} infolge Fugendübelung

Klasse	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tragfähigkeitsverlust	0 %	5 %	10 %	15 %	20 %	25 %	30 %	35 %	40 %	45 %
α_{Fuge}	1,00	0,95	0,90	0,85	0,80	0,75	0,70	0,65	0,60	0,55

Der Reduktionsfaktor α_{Fuge} könnte, wie der Teilsicherheitsbeiwert γ_m für die Materialeigenschaften eines Dämmstoffes, im Rahmen der Zulassungsuntersuchungen für den Dämmstoff festgelegt und in der jeweiligen Zulassung angegeben werden.

6.5.3 Bestimmung des charakteristischen Wertes $F_{\text{Dübel},5\%}$

Der charakteristische Wert $F_{\text{Dübel},5\%}$, für den Windsogwiderstand eines WDVS, wird über das 5%-Quantil der mittleren Versagenslast $\bar{F}_{\text{Dübel}}$ bestimmt, vgl. Abschnitt 6.3.2. Dabei soll ein Vertrauensniveau von 90 % gewählt werden. Die Auswertung sollte außerdem über die logarithmische Normalverteilung erfolgen, wie bereits in Abschnitt 6.3.3 beschrieben.

$$F_{\text{Dübel},5\%} = \bar{F}_{\text{Dübel},\log} \cdot (1 - k_s \cdot v)$$

mit $\bar{F}_{\text{Dübel},\log}$ logarithmische Normalverteilung von $\bar{F}_{\text{Dübel}}$

$k_s = 3,40$ bei $n = 5$ Versuchen

$k_s = 2,57$ bei $n = 10$ Versuchen

An dieser Stelle kann der Windsogwiderstand eines WDVS mit einem Dübel in Lastklassen eingeteilt werden. Hierzu wird der charakteristische Wert $F_{\text{Dübel},5\%}$ entsprechend der Lastklasse abgerundet, welche in der nachfolgenden Tabelle angegeben sind.

Tabelle 6.14 Lastklassen (LK) für den charakteristischen Wert des Windsogwiderstandes eines WDVS mit einem Dübel

LK	1	2	3	4	5	6	7	8
$F_{\text{Dübel},d}$	0,30 kN	0,40 kN	0,50 kN	0,60 kN	0,75 kN	0,90 kN	1,20 kN	1,50 kN

Die Lastklassen wurden in Anlehnung an ETAG 014 [02] gewählt, vergleiche auch Abschnitt 3.2.3.

Es wird empfohlen in den Dämmstoffzulassungen die jeweilige Lastklasse für den charakteristischen Wert des Windsogwiderstandes eines WDVS mit einem Dübel anzugeben.

Da im Rahmen der Zulassungsuntersuchungen die Werte der Dämmstoffeigenschaften über den geforderten Mindestwerten für die Qualitätssicherung liegen können, müssten die für die Bestimmung der Lastklasse des Windsogwiderstandes zugrunde gelegten Bemessungswerte auf den Mindestwert reduziert werden. Eine lineare Reduktion der Bemessungswerte auf den geforderten Mindestwert scheint sehr konservativ zu sein, vergleicht man die Abhängigkeit der Biegefestigkeit zur Systemtragfähigkeit im Lastfall Windsog (Diagramm 5.3 in Abschnitt 5.2). Eine Empfehlung für die Reduktion kann an dieser Stelle nicht gegeben werden, sondern wäre ggf. mit unterschiedlichen Festigkeiten eines Dämmstoffes zu überprüfen und fest zu legen.

6.5.4 Bestimmung des Bemessungswertes $F_{\text{Dübel,d}}$

Der Bemessungswert $F_{\text{Dübel,d}}$ für den Windsogwiderstand eines WDVS wird wie folgt bestimmt:

$$F_{\text{Dübel,d}} = \frac{F_{\text{Dübel,5\%}}}{\gamma_m}$$

mit $\gamma_m = \gamma_{m1} \cdot \gamma_1 \cdot \gamma_2 \cdot \gamma_3$ Teilsicherheitsbeiwert für die Materialeigenschaft

Die Ermittlung der Teilsicherheitsbeiwerte für die Materialeigenschaften von Dämmstoffen wird in Abschnitt 6.4 beschrieben.

Der Windsogwiderstand eines WDVS sollte an dieser Stelle mit der Tragfähigkeit des Dübels im Untergrund, gemäß ETAG 014 [02], verglichen werden. Die Tragfähigkeit des Dübels im Untergrund sollte immer höher sein, als der Windsogwiderstand des WDVS. Ansonsten muss wie im folgenden Abschnitt dargestellt der Nachweis mit der Tragfähigkeit des Dübels im Untergrund geführt werden.

6.5.5 Nachweis für den Grenzzustand der Tragfähigkeit für WDVS bei Windsog-einwirkungen und Festlegung der benötigten Dübel / m²

Der Nachweis für den Grenzzustand der Tragfähigkeit ist erfüllt, wenn folgende Bedingung eingehalten wird:

$$E_d \leq R_d$$

Über diese Grenzzustandsgleichung kann nun die benötigte Anzahl an Dübel / m² für eine Fassade mit einem gedübelten WDVS festgelegt werden.

Der Bemessungswert für die Windbeanspruchung E_d wird wie folgt bestimmt:

$$E_d = \gamma_f \cdot E_k$$

mit γ_f Teilsicherheitsbeiwert für die Windbeanspruchung

E_k charakteristischer Wert für die Windbeanspruchung

Der Teilsicherheitsbeiwert für die Windbeanspruchung wird mit $\gamma_f = 1,5$ angenommen. Der charakteristische Wert für die Windsogkräfte w_e wird gemäß DIN EN 1055 Teil 4 bestimmt. Hierbei ist zu beachten, dass die Windsogkräfte vom Fassadenbereich (A, B, C, D und E) und dem Gebäudeverhältnis h/d abhängig sind, sowie von den Windzonen (WZ 1, WZ 2, WZ 3 und WZ 4) für das Binnenland und die unterschiedlichen Küstenbereiche.

Auf die Herleitung der Windsogkräfte w_e wird hier nicht weiter eingegangen.

Der Bemessungswert des Windsogwiderstandes errechnet sich in Anlehnung an bisherige Regelungen über folgende Gleichung:

$$R_d = n_P \cdot F_{Dübel,d} + n_F \cdot F_{Dübel,d} \cdot \alpha_{Fuge}$$

bzw.

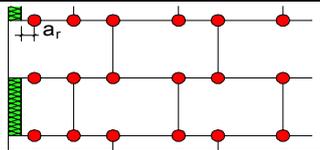
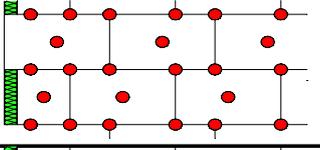
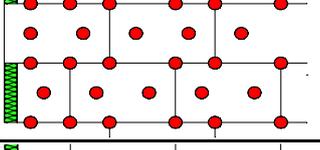
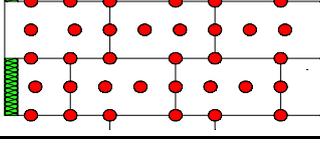
$$R_d = n_P \cdot F_{Dübel,d} + n_F \cdot F_{Dübel,Fuge,d}$$

mit n_P Anzahl der Dübel in der Dämmplattenfläche

n_F Anzahl der Dübel in der Dämmplattenfuge

Für die Verdübelung von Mineralwolle-Dämmplatten und Polystyrol-Hartschaum-Dämmplatten sind die in Tabelle 6.15 gezeigten Dübelschemata sinnvoll und üblich [Rie07]. Aus diesen Schemata lässt sich der Anteil der Dübel in Dämmplattenfläche und Dämmplattenfuge ablesen.

Tabelle 6.15 Dübelschemata sowie tatsächlich vorhandene Dübelmenge

Schema	Dübelanordnung	betrachtete Stelle DIN 1055-4	tatsächliche Dübelmenge 1)	davon in Platten- flächen	bzw. davon in T-Fugen
[Dübel/m ²]			[Dübel/m ²]		
4		Fläche	4	0	4
		Rand	4,5	0	4,5
6		Fläche	6	2	4
		Rand	6,5	2	4,5
8		Fläche	8	4	4
		Rand	8,5	4	4,5
10		Fläche	10	4	6
		Rand	10,3	4	6,3

¹⁾ Die Angabe für den Randbereich gelten für eine Randzonenbreite $R = 2$ m, dieser Randbereich entspricht dem Fassadenbereich A der DIN EN 1055 Teil 4 [09].

Zu beachten ist, dass mit einer Erhöhung der Dübelanzahl kein linearer Tragfähigkeitsanstieg zu erwarten ist. Dies hat auch schon die statistische Betrachtung der Einfach- und Mehrfachbefestigung in Abschnitt 4.5 gezeigt.

Setzt man voraus, dass sich die Bruchkegel nicht überlagern und die Haftzugfestigkeiten im WDV-System größer sind als die Querkzugfestigkeit σ_{mt} des Dämmstoffes, dann stellen sich folgende theoretische Zusammenhänge zwischen aufnehmbarer Kraft und der Dübelanzahl im System ein (Bild 6.24).

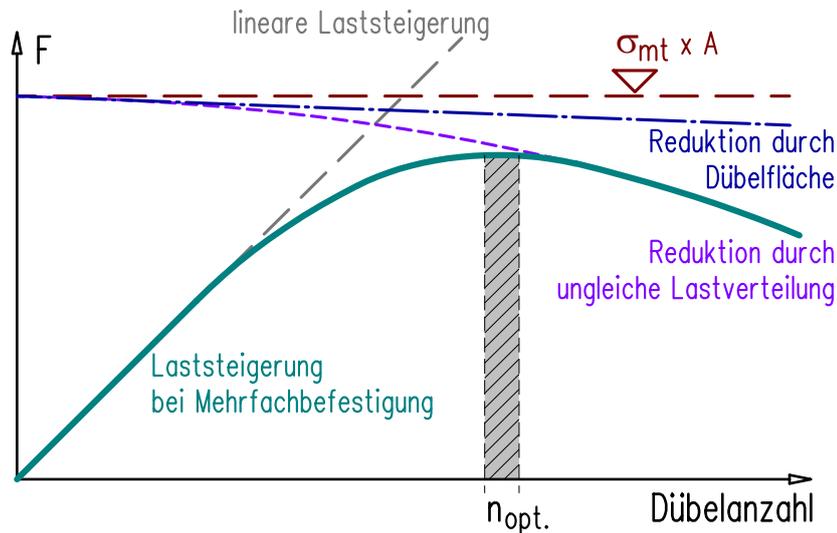


Bild 6.24 Beispiel einer Last-Verformungskurven

Dabei bildet die Querkzugfestigkeit σ_{mt} des Dämmstoffes die obere Tragfähigkeitsgrenze, welche durch die nicht tragende Oberfläche der Dübelteller reduziert wird. Eine weitere Tragfähigkeitsreduktion stellt sich durch eine ungleiche Lastverteilung ein, da das Versagen an der Oberfläche nicht gleichzeitig eintritt, sondern durch ein sukzessives Versagen im Dämmstoff (Reißverschlusseffekt). Man erkennt, dass es einen Bereich mit einer optimalen Dübelanzahl gibt.

Dies ist bisher nur ein theoretisches Gedankenmodell und müsste für jedes WDVS mit unterschiedlichen Dämmstoffen ermittelt werden.

Mit dem hier gezeigten Bemessungsverfahren für gedübelte Wärmedämm-Verbundsysteme in Anlehnung an EC 1 [11] ist es nun möglich, die jeweiligen Materialeigenschaften eines Dämmstoffes differenziert in die Auswertung mit einfließen zu lassen, wie die Streuung der Versuchsergebnisse, das Arbeitsvermögen und das Alterungsverhalten des Materials.

Es wird empfohlen die so ermittelten Teilsicherheitsbeiwerte, Reduktionsfaktoren und Lastklassen in die jeweilige Dämmstoffzulassung zu schreiben, um so eine einheitliche Bemessungsgrundlage für alle Anwender zu bieten.

Dieses Bemessungsverfahren kann auch auf rein verklebte oder mit Schienen befestigte Wärmedämm-Verbundsysteme in abgewandelter Form übertragen werden. Somit ist eine kompatible Beurteilung zur ETAG 014 [02] und dem TR 26 [04] möglich.

7 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

7.1 ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Regelungen gemäß der Leitlinie ETAG 004 [01], in Bezug auf die Prüfung des Tragverhaltens von Dübeln für Wärmedämm-Verbundsysteme bei Windsogeinwirkung und unter Berücksichtigung der Dämmstoffeigenschaften, kritisch betrachtet und vor allem das bisher angewandte Sicherheitskonzept, auf der Grundlage der heute gültigen Normen und Regelwerken unter Berücksichtigung probabilistischer Methoden, überarbeitet. Dabei wurden drei wesentliche Widersprüche in der Beurteilung der Tragfähigkeit eines WDVS im Lastfall Windsog erkannt.

1. Paradoxon – Qualitätssicherung über Querkzugfestigkeit

Die Qualitätssicherung der Dämmplatten wurde bisher über die Prüfung der Querkzugfestigkeit eingehalten. 1995 zeigte sich eine deutliche Korrelation zwischen der Querkzugfestigkeit der Dämmstoffe und der Systemtragfähigkeit im Lastfall Windsog, welche heute nicht mehr erkennbar ist.

Paradox erscheint hier vor allem, dass bei achtfacher Querkzugfestigkeit der Polystyrol-Hartschaum-Dämmplatten im Vergleich zu den Mineralwolle-Dämmplatten die Tragfähigkeiten je Dübel ca. 30 % geringer sind. Die Querkzugfestigkeit kann daher nicht primär für die Systemtragfähigkeit im Lastfall Windsog maßgebend sein!

Somit stellte sich die Frage, welche mechanischen und geometrischen Materialeigenschaften der Dämmplatten Auswirkungen auf das Tragverhalten der Dübel im System haben und in welchem Maße die Systemtragfähigkeit durch den Dübel bzw. den Dübelteller bestimmt wird.

EINFLUSS DER TELLERSTEIFIGKEIT

Bei dem Vergleich der Tragfähigkeiten im Lastfall Windsog verschieden steifer Dübelteller war das Versagen immer durch das Nachgeben des Dämmstoffs gekennzeichnet und nicht durch die unterschiedlichen Steifigkeiten der Dübelteller, wenn diese mindestens 0,3 kN/mm betragen. Ob diese Steifigkeit ein absoluter Grenzwert ist, kann derzeit noch nicht gesagt werden.

Es fiel auf, dass bei Versuchen zur Bestimmung der Tragfähigkeit im Lastfall Windsog mit Mineralwolle die Abweichungen vom Mittelwert bei ca. $\pm 25\%$ liegen können, während bei Polystyrol-Hartschaum-Dämmplatten die Streuungen deutlich geringer sind. Die Systemtragfähigkeit scheint hier von der Gleichmäßigkeit der mechanischen Eigenschaften der Mineralwolle abhängig zu sein. Somit war fraglich, welche Materialeigenschaft der Dämmplatten maßgebend für das Versagen im Lastfall Windsog (Dübeldurchzug) ist und ob die maßgebende Materialeigenschaft für das Versagen bei allen Dämmstoffen die gleiche ist oder ob bei verschiedenen Dämmstoffarten unterschiedliche Materialeigenschaften maßgebend sind.

Ziel war es, eine aussagekräftige Prüfung der maßgebenden Materialeigenschaft für alle Dämmstoffarten zu haben, um eine gleichmäßige Bewertung vornehmen zu können und eine fundierte Empfehlung an die Qualitätssicherung zu geben!

AUSWIRKUNG DER MATERIALEIGENSCHAFTEN DER DÄMMSTOFFE AUF DAS VERSAGEN

Neben der Rohdichte und der Querkzugfestigkeit wurde als weitere Materialeigenschaft die Biegefestigkeit verschiedenartiger Dämmplatten geprüft. Die Prüfung dieser Materialeigenschaft wird derzeit gemäß ETAG 004 [01] nicht geprüft.

Die Rohdichte der Dämmplatten wurde in Abhängigkeit zur Tragfähigkeit im Lastfall Windsog gebracht, dabei konnte man zunächst annehmen, dass die beiden Parameter voneinander abhängig sind. Eine eindeutige Korrelation mit verschiedensten Dämmstoffarten konnte jedoch nicht gefunden werden. Außerdem kann die Rohdichte aufgrund der unterschiedlichen Strukturen (Faserorientierung) der Dämmplatten nicht allein ein maßgebender Faktor für die Tragfähigkeit der Dämmplatten sein, sie ist lediglich ein Indikator.

Die Ergebnisse der Querkzugfestigkeit der Dämmplatten verschiedener Dämmstoffarten wurden mit der Tragfähigkeit im Lastfall Windsog gegenüber gestellt. Hier konnte kein eindeutiger Zusammenhang zwischen beiden Parametern erkannt werden. Die Qualitätskontrolle der Dämmstoffe kann somit nicht über die Querkzugfestigkeit der Dämmplatten erfolgen!

Die gemittelte Biegefestigkeit, über die Dämmplatten Längs- und Querrichtung, der Dämmplatten und die Tragfähigkeit im Lastfall Windsog zeigen einen deutlichen Zusammenhang. Die Tragfähigkeit im Lastfall Windsog steigt eindeutig mit Zunahme der Biegefestigkeit der Dämmplatten.

Die Biegefestigkeit der Dämmplatten scheint einen maßgebenden Einfluss auf das Tragverhalten der Dübel im System zu haben. Dies wurde nicht nur experimentell ermittelt sondern auch durch numerische Simulationen bestätigt. Bei der numerischen Simulation des Biegeversuchs zeigt sich ein annähernd vergleichbarer Spannungsverlauf in der Dämmplatte wie bei dem Versuch zur Ermittlung der Tragfähigkeit einer verdübelten Dämmplatte im Lastfall Windsog.

Eine Qualitätskontrolle bei der Herstellung der Dämmstoffe über die Bestimmung der Biegefestigkeit in Platten Längs- und Querrichtung kann mit dem Biegeversuch einfach und schnell durchgeführt werden und liefert wesentlich zuverlässigere Aussagen über die mögliche Tragfähigkeit eines Dübels in einer Dämmplatte als über die Querkzugfestigkeit.

2. Paradoxon - Versuche abhängig von der Schnittrichtung der Mineralwolle-Dämmplatten

Bei der Prüfung der Biegefestigkeit von Mineralwolle-Dämmplatten ließ sich ein erheblicher Festigkeits- und Steifigkeitsunterschied in Platten Längs- und Querrichtung erkennen. Die Festigkeit in Plattenlängsrichtung betrug nur ca. 25 % der Festigkeit in Querrichtung!

Bei einem Vergleich der Festigkeitsunterschiede mit dem Versagensbild im Schaumblockversuch wurde deutlich, dass im Schaumblockversuch mit Mineralwolle-Dämmplatten überwiegend die schwache Richtung geprüft wird, die dann zum Biegeversagen führen kann. Der Dübelabstand in Platten-Längsrichtung ist hier größer als in Platten-Querrichtung und bewirkt somit eine stärkere Biegebeanspruchung der Dämmplatte in Längsrichtung.

Paradox erscheint, dass man bei einer um 90° gedrehten Schnittrichtung der Mineralwolle-Dämmplatten im Schaumblockversuch andere Ergebnisse erhalten wird, da dann die schwache Richtung über die kürzere Spannweite und die starke Richtung über die längere Seite geprüft wird, obwohl sonst nichts am System geändert wird!

Somit stellte sich die Frage, ob der Schaumblockversuch geeignet ist, das Tragverhalten eines WDVS wirklichkeitsnah zu beschreiben. Die Verdübelung entspricht nicht einem praxisnahen Dübelbild und der Lastabtrag wird in einer Richtung erzwungen. Außerdem heben sich beim Schaumblockversuch die Ränder ab, während an der Fassade diese Dämmplattenränder durch die kontinuierlich vorhandene Putzschicht gehalten und somit Unstetigkeiten verhindert werden.

Ziel war es, ein praxisnahes Prüfverfahren zu entwickeln, bei dem reale Dübelanordnungen berücksichtigt werden, der Lastabtrag in alle Plattenrichtung ermöglicht wird, eine Analogie zur tatsächlichen Verformungsfigur hergestellt wird und bei dem sämtliche Versagensarten auftreten können.

NEUE TESTMETHODE ZUR BESTIMMUNG DER TRAGFÄHIGKEIT IM LASTFALL WINDSOG

Zunächst musste dafür gesorgt werden, dass die Ränder der Dämmplatte horizontal gehalten werden und eine horizontale Tangente haben. Dies erreicht man durch eine Einspannung der Dämmplattenränder.

Mögliche Versagensarten wie Durchstanzen, Querkzugversagen und Haftzugversagen ("Fellabriss") können nur erzielt werden, wenn die simulierte Windsogkraft über die Putzfläche oder Dämmstoffoberfläche eingeleitet wird und die Randeinspannung der Dämmplatten ein Versagen auf Haftzug oder Querkzug nicht verhindert.

In Anlehnung an den Schaumblockversuch wurde eine Testmethode entwickelt, die als 'modifizierter Schaumblockversuch' bezeichnet wird. Hierbei werden die Zugkräfte über einen auf die Putzfläche aufgeklebten Schaumblock verformungsgeregelt eingeleitet. Da Versuche mit Putzschicht, durch das Auftragen und Aushärten des Putzes, relativ aufwendig sind, wurde zusätzlich ein vereinfachter Versuchsaufbau in Anlehnung an den Durchziehversuch entwickelt, der 'modifizierte Durchziehversuch'.

Der 'modifizierte Schaumblockversuch' und der 'modifizierte Durchziehversuch' bieten praxisnahe Prüfverfahren, welche auf alle Dübelanordnungen übertragen werden können, eine Analogie zur Verformungsfigur aufweisen und in den alle Versagensarten eines gedübelten WDV-Systems auftreten können. Der Lastabtrag erfolgt entsprechend der Biege- und Schubsteifigkeiten der Dämmplatten und nicht mehr durch eine im realen WDVS nicht vorhandene und durch die Dübelung erzwungene Richtung mit geringer Biegefestigkeit.

Außerdem ist es in diesem Test vergleichsweise einfach möglich, die Tragfähigkeit eines Dübels in einer T-Fuge zu bestimmen.

FUGENDÜBELUNG

Betrachtet man die Prüfung der Fugendübelung im Durchziehversuch gemäß ETAG 004 [01], so erkennt man, dass sich die Dämmplattenstöße aufweiten. Die sehr kleinen Dämmplattenteile werden dadurch unter dem Dübelteller weg gezogen oder bei sehr steifen Platten von der Lasteinleitungsplatte abgeschält. Um diesen Effekt zu verhindern, werden bei der Versuchsdurchführung die Dämmplattenteile umschnürt. Schon allein um den Dübel in die T-Fuge setzen zu können, müssen die Dämmplattenteile während des Setzvorgangs zusammengehalten werden, da sie beim Einziehen des Dübels auseinander gedrückt werden.

Vergleicht man die Ergebnisse im Durchziehversuch mit einer Verdübelung in der Plattenfläche und in der T-Fuge, so erkennt man einen deutlichen Tragfähigkeitsverlust von durchschnittlich 30 % bei Fugendübelung, mit überdurchschnittlich starken Streuungen der Versuchsergebnisse. Die Prüfung der Fugendübelung im Durchziehversuch scheint erhebliche Tragfähigkeitsverluste zu bewirken.

Im 'modifizierten Durchziehversuch' ist ein deutlich geringerer Tragfähigkeitsunterschied zwischen der Verdübelung in der Plattenfläche und der Verdübelung in der T-Fuge zu erkennen. Bei der Prüfung in der Dämmplattenfuge im 'modifizierten Durchziehversuch' wird deutlich, dass sich hier die Dämmplattenteile nicht unter dem Dübel wegziehen können. Außerdem ist zu erkennen, dass die Aufweitung der Dämmplattenfuge nur unter dem Dübel eintritt, an der Randeinspannung sind die Stöße weiterhin zusammengehalten.

MEHRFACHBEFESTIGUNG

Die Prüfergebnisse von Vier-Punkt Befestigungen (Schaublockversuch) sind mit den Ergebnissen der Prüfung an Ein-Punkt Befestigungen nicht direkt vergleichbar, da bei einer symmetrischen Vier-Punkt Befestigung immer der schwächste Befestigungspunkt das Versagen des Systems hervorruft. Versagt ein Dübel, so wird auch der diagonal gegenüberliegende Dübel aus Gleichgewichtsgründen entlastet und die beiden verbleibenden Dübel müssen die gesamte Last aufnehmen. Das führt zum sofortigen Gesamtversagen. Gemäß ETAG 004 [01] wird die Versagenslast aus dem Schaublockversuch durch die Anzahl der Dübel dividiert. Damit erhält man aber nicht den Mittelwert der Tragfähigkeit dieser Befestigung, sondern der Kleinstwert von 4 Dübeln wird als Mittelwert für 4 Dübel interpretiert. Dies liefert einen Wert mit einer hohen Sicherheit, führt aber zu unwirtschaftlichen Bemessungen.

Eine zuverlässige und realistische statistische Bewertung aus 3 Schaublockversuchen ist so nicht möglich. Für die Ermittlung des Windsogwiderstandes eines WDVS im Sinne einer sicheren und wirtschaftlichen Bemessung ist es daher empfehlenswert, die charakteristischen Werte über die Einzelbefestigung nach bekannten statistischen Regeln zu bestimmen.

3. Paradoxon – bei Erhöhung des Stichprobenumfangs kleinere charakteristische Werte

Gemäß der europäischen Prüfleitlinie ETAG 004 [01] werden Mindestwerte für die Beurteilung von Prüfungen angegeben, die nicht unterschritten werden dürfen. Wird bei einer Stichprobe der geforderte Mindestwert mit dem Kleinstwert der Stichprobe erreicht, so wird dieser Kleinstwert als charakteristischer Widerstand verwendet.

Bei den Versuchsergebnissen mit Mineralwolle-Dämmplatten treten sehr starke Streuungen mit einem Variationskoeffizienten von bis zu 30 % auf. Diese Streuungen zeigten sich auch bei Prüfungen innerhalb einer Dämmplatte. Es ist daher fraglich, ob die Auswertung einer Stichprobe von 3 bis 5 Elementen nicht eher ein zufälliges Ergebnis liefert, das mit großen Unsicherheiten behaftet ist, denn sie hängt auch davon ab, aus welchem Bereich der Dämmplatten die Probekörper für die Untersuchung entnommen wurden.

Die Wahrscheinlichkeit wird größer, einen noch kleineren Wert zu finden, wenn man die Anzahl der Elemente der Stichprobe erhöht!

Wendet man bekannte statistische Regeln an, so steigt der charakteristische Wert, wenn man die Anzahl der Versuche erhöht. Daher kann die Auswertung auf der Basis von Kleinstwerten nur ein unbefriedigendes Ergebnis liefern und stellt keinen charakteristischen Widerstand im eigentlichen Sinne dar. Die Ungenauigkeit der Auswertung über Kleinstwerte wurde anhand einer theoretischen Stichprobenverteilung mit jeweils 3 Elementen im Vergleich zur Grundgesamtheit gezeigt. Dabei lagen nur 15 % der Kleinstwertfunktion unterhalb der 5 % - Quantilgrenze der Grundgesamtheit. Dies entspricht einem Vertrauensniveau von 15 % und nicht einem in bekannten Regelwerken geforderten Vertrauensniveau von mindestens 90%.

Somit zeigt sich deutlich, dass es erforderlich ist, ein Sicherheitskonzept auf probabilistischer Grundlage zu entwickeln, mit dem der Widerstand eines WDVS bei Windsogwirkung in Anlehnung an bestehende Regelwerke beschrieben wird. Außerdem ist eine Kompatibilität zu der Beurteilung der Dübeltragfähigkeiten gemäß ETAG 014 [02] und dem TR 26 [04] wünschenswert.

SICHERHEITSKONZEPT

Der Teilsicherheitsbeiwert γ_m für die Materialeigenschaft eines Dämmstoffes wird unter Berücksichtigung der Streuungen der Versuchsergebnisse, in Anlehnung an den Eurocode [11], die Reduktion der Tragfähigkeiten durch Bewitterung (Alterungsverhalten) und das Arbeitsvermögen (Duktilität) des Materials bestimmt.

Es wird empfohlen, den Teilsicherheitsbeiwert γ_m in Abhängigkeit von den Materialeigenschaften eines Dämmstoffes im Rahmen der Zulassungsuntersuchungen für den Dämmstoff festzulegen und in die jeweilige Zulassung aufzunehmen. Somit wird eine einheitliche und für den jeweiligen Dämmstoff, mit seinen spezifischen Eigenschaften, objektive Bewertung zugrunde gelegt.

Der charakteristische Wert $F_{\text{Dübel},5\%}$ für den Windsogwiderstand eines WDVS, wird über das 5 % - Quantil der mittleren Versagenslast bestimmt, dabei soll ein Vertrauensniveau von 90 % gewählt werden.

Der Bemessungswert $F_{\text{Dübel},d}$ für den Windsogwiderstand eines WDVS wird mit dem charakteristischen Wert $F_{\text{Dübel},5\%}$ und dem für den jeweiligen Dämmstoff ermittelten Teilsicherheitsbeiwert γ_m bestimmt.

Der Windsogwiderstand eines WDVS sollte an dieser Stelle mit der Tragfähigkeit des Dübels im Untergrund, gemäß ETAG 014 [02] und der Dübeltellertragfähigkeit, gemäß TR 26 [04], verglichen werden. Eine Kompatibilität der Nachweiskonzepte für Wärmedämm-Verbundsysteme mit der Beurteilung der Dübel gemäß ETAG 014 und dem TR 26 ist somit gegeben.

7.2 AUSBLICK

TEILSICHERHEITSBEIWERT INFOLGE DER MONTAGESICHERHEIT DER SYSTEME

Neben der Berücksichtigung der Streuungen der Versuchsergebnisse, die Reduktion der Tragfähigkeiten durch Bewitterung (Alterungsverhalten) und das Arbeitsvermögen (Duktilität) des Materials, sollte ggf. auch die Montagesicherheit der gedübelten Wärmedämm-Verbundsysteme in einem Teilsicherheitsbeiwert berücksichtigt werden.

Der Teilsicherheitsbeiwert für die Montagesicherheit könnte in Anlehnung an ETAG 001, Teil C wie folgt angegeben werden:

$\gamma_3 = 1,0$ für Systeme mit hoher Montagesicherheit

$\gamma_3 = 1,2$ für Systeme mit normaler Montagesicherheit

$\gamma_3 = 1,4$ für Systeme mit niedriger, aber akzeptabler Montagesicherheit

Zur Überprüfung der Montagesicherheit müsste ein Versuch bestimmt werden, der eine definierte Reduktion der Tragfähigkeit im Lastfall Windsog bei „falsch“ gesetzten Dübeln liefert, z.B. infolge einer Vorschädigung der Dämmplatte durch zu tief gesetzte Dübel. Ein Vergleich mit Referenzversuchen führt dann zu einer Beurteilung der Montagesicherheit.

HYGROTHERMISCHE EINWIRKUNGEN

Bei dem hier entwickelten Sicherheitskonzept wurden nur Windsogbelastungen betrachtet, da diese die maßgebenden Lasten für ein Versagen im Wärmedämm-Verbundsystem sind. Belastungen aus Eigengewicht und hygrothermischen Einwirkungen parallel zur Dämmebene werden, wie in Abschnitt 3.1.1 beschrieben, über die Konsoltragwirkung aufgenommen. Nach bisherigen Erfahrungen haben diese Lasten keinen Einfluss auf das Versagen und wurden nicht berücksichtigt. Ein möglicher Einfluss der Lasten parallel zur Dämmebene auf die Tragfähigkeit des Systems könnte in den Sicherheitsbeiwerten zusätzlich Berücksichtigung finden.

VERKLEBUNG ZUM UNTERGRUND

Bei der Bestimmung der Tragfähigkeit eines WDVS im Lastfall Windsog wurde bisher immer die Verklebung zum Untergrund außer Acht gelassen und nur bei der Betrachtung der Eigenlasten als Schubverzahnung mit angesetzt. In Wirklichkeit hat man hier einen haftschlüssigen Verbund, der auch Lasten aus Windsog aufnehmen kann. Außerdem entsteht durch die Verklebung und die Putzschicht eine Art Sandwich-Element, wodurch die Dämmplatten versteift werden und noch weniger Verformungen auftreten.

Es wäre zu prüfen, in wie weit sich die Verklebung zum Untergrund auf die Systemtragfähigkeit bei Windsogeinwirkung auswirkt und ob dadurch die Bemessung der benötigten Dübelmengen für WDVS angepasst werden müsste.

DRUCKAUSGLEICH BEI WINDSOG EINWIRKUNG

Bisher unberücksichtigt bei der Beurteilung des Lastfalls Windsog für Wärmedämm-Verbundsysteme wurden bekannte Gasgesetze, welche den Druckausgleich an einem WDVS unter Windsogeinwirkung beschreiben können.

Befindet sich in einem abgeschlossenen, gasgefüllten Hohlraum eine bestimmte Anzahl von Molekülen (n) und ist die Temperatur (T) des Gases konstant, dann sind n , R (allgemeine Gaskonstante) und T konstante Größen, mit denen folgende Gleichung beschrieben werden kann:

$$n \cdot R \cdot T = p \cdot V = \text{const.} \quad \dots \quad (7.1)$$

Unter den o.a. Bedingungen kann $p \cdot V$ (Druck mal Volumen) auch als Maß für die Gasmenge (die Zahl der Moleküle) verstanden werden. Diese quantitative Beziehung zwischen Druck und Volumen ist bekannt als das Gesetz von Boyle-Mariotte:

$$p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2 \quad \dots \quad (7.2)$$

Mit der Verringerung des Volumens erhöht sich der Druck, bei einer Volumenvergrößerung fällt der Druck. p_1 und V_1 geben in der Gleichung (7.2) den Druck und das Volumen für einen Ausgangszustand und p_2 und V_2 den Druck und das Volumen nach der Zustandsänderung an [Ehm07].

Wendet man dieses Gesetz auf den Lastfall Windsog für Wärmedämm-Verbundsysteme an, so würde bei Windsog der Außendruck reduziert. Dadurch verformt sich das System und das Volumen hinter dem Dämmstoff wird größer. Da Wärmedämm-Verbundsysteme offenporig und nicht gasdicht sind, findet im Lastfall Windsog relativ schnell ein Druckausgleich statt. Dies hat zur Folge, dass bei hohem Windsog geringere Verformungen des WDVS auftreten als bisher angenommen werden. Wobei die Verformung des Systems auch davon abhängig ist, wie gasdurchlässig das System ist. Dichte Systeme werden sich stärker verformen, da hier der Druckausgleich nicht erfolgen kann.

Die Windbelastung einer äußeren, winddurchlässigen Fläche ergibt sich also immer als Druckdifferenz zwischen außen- und innenseitigen Drücken. [Ger05]

Eine fundierte Untersuchung der Winddurchlässigkeit und damit des Druckausgleichsverhaltens von Wärmedämm-Verbundsystemen bei Windsogeinwirkung wird empfohlen.

Zu beachten ist hierbei auch, dass die wenigen bekannten Windschäden an Fassaden mit Wärmedämm-Verbundsystemen nicht durch Wind verursacht, sondern nur durch Wind ausgelöst wurden! Die Ursache liegt hier vielmehr bei der handwerklichen Ausführung!

7.3 FAZIT

Der bisherige Nachweis zur Standsicherheit von Dübeln für Wärmedämm-Verbundsysteme unter Windsogeinwirkung, beruht auf sehr konservativen Annahmen und führt teilweise zu unwirtschaftlichen Dübelmengen.

Aufgrund der hier entwickelten Prüfverfahren und der statistisch begründeten Auswertung können gedübelte Wärmedämm-Verbundsysteme wirtschaftlicher und zugleich sicherer bemessen werden.

Weiteres Einsparungspotential ist durch die Klärung der angesprochenen noch offenen Fragen zu erwarten.

8 QUELLEN

8.1 NORMEN UND REGELWERKE

- [01] EOTA ETAG 004 Leitlinie für die europäische technische Zulassung für Aussenseitige Wärmedämm-Verbundsysteme mit Putzschicht, März 2000
- [02] EOTA ETAG 014 Leitlinie für die europäische technische Zulassung von Kunststoffdübel zur Befestigung von Aussenseitige Wärmedämm-Verbundsysteme mit Putzschicht, November 2001
- [03] EOTA TR 025 Determination of point thermal transmittance of plastic anchors for the anchorage of external thermal insulation composite systems (ETICS), Juni 2007
- [04] EOTA TR 026 Evaluation of plate stiffness from plastic anchors for fixing of external thermal insulation composite systems with rendering (ETICS), Juni 2007
- [05] Teil II der Liste der Technischen Baubestimmungen – Anwendungsregelungen für Bauprodukte und Bausätze nach europäischen technischen Zulassungen und harmonisierten Normen nach der Bauproduktenrichtlinie, September 2006
- [06] DIN EN ISO 354: 2003-12: Akustik - Messung der Schallabsorption in Hallräumen
- [07] DIN EN 826: 1996-05: Wärmedämmstoffe für das Bauwesen. Bestimmung des Verhaltens bei Druckbeanspruchung.
- [08] DIN 1055-1: 2002-06: Einwirkungen auf Tragwerke. Teil 1: Wichten und Flächenlasten von Baustoffen, Bauteilen und Lagerstoffen
- [09] DIN 1055-4: 2005-03: Einwirkungen auf Tragwerke. Teil 4: Windlasten
- [10] DIN EN 1607: 1997-01: Wärmedämmstoffe für das Bauwesen. Bestimmung der Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene.
- [11] DIN EN 1990: 2002-10: Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung
- [12] DIN 4102-1: 1998-03: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen. Teil 1: Baustoffe; Begriffe, Anforderungen und Prüfungen
- [13] DIN 4108-2: 2003-06: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden. Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz
- [14] DIN 4108-3: 2001-07: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden. Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz, Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung
- [15] DIN 4108-4: 2004-07: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden. Teil 4: Wärme- und feuchteschutztechnische Bemessungswerte
- [16] DIN 4109: 1989-11: Schallschutz im Hochbau. Anforderungen und Nachweise
- [17] DIN EN 12089: 1997-08: Wärmedämmstoffe für das Bauwesen. Bestimmung des Verhaltens bei Biegebeanspruchung.
- [18] DIN EN 12090: 1997-08: Wärmedämmstoffe für das Bauwesen. Bestimmung des Verhaltens bei Scherbeanspruchung.

- [19] DIN EN 13162: 2001-10: Wärmedämmstoffe für Gebäude. Werkmäßig hergestellte Produkte aus Mineralwolle (MW). Spezifikation
- [20] DIN EN 13163: 2001-10: Wärmedämmstoffe für Gebäude. Werkmäßig hergestellte Produkte aus expandiertem Polystyrol (EPS). Spezifikation
- [21] DIN EN 13164: 2001-10: Wärmedämmstoffe für Gebäude. Werkmäßig hergestellte Produkte aus estrudiertem Polystyrolschaum (XPS). Spezifikation
- [22] DIN EN 13165: 2005-02: Wärmedämmstoffe für Gebäude. Werkmäßig hergestellte Produkte aus Polyurethan-Hartschaum (PUR). Spezifikation
- [23] DIN EN 13166: 2001-10: Wärmedämmstoffe für Gebäude. Werkmäßig hergestellte Produkte aus Phenolharzschaum (PF). Spezifikation
- [24] DIN EN 13167: 2001-10: Wärmedämmstoffe für Gebäude. Werkmäßig hergestellte Produkte aus Schaumglas (CG). Spezifikation
- [25] DIN EN 13168: 2001-10: Wärmedämmstoffe für Gebäude. Werkmäßig hergestellte Produkte aus Holzwolle (WW). Spezifikation
- [26] DIN EN 13169: 2001-10: Wärmedämmstoffe für Gebäude. Werkmäßig hergestellte Produkte aus Blähperlit (EPB). Spezifikation
- [27] DIN EN 13170: 2001-10: Wärmedämmstoffe für Gebäude. Werkmäßig hergestellte Produkte aus expandiertem Kork (ICB). Spezifikation
- [28] DIN EN 13171: 2001-10: Wärmedämmstoffe für Gebäude. Werkmäßig hergestellte Produkte aus Holzfasern (WF). Spezifikation
- [29] DIN EN 13501-1: 2002-06: Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten. Teil 1: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten
- [30] DIN EN 13495: 2003-02: Wärmedämmstoffe für das Bauwesen. Bestimmung der Abreißfestigkeit von außenseitigen Wärmedämm-Verbundsystemen (WDVS) (Schaumblock-Verfahren)
- [31] DIN V 18559: 1988-12: Wärmedämm-Verbundsysteme. Begriffe, Allgemeine Angaben
- [32] DIN 55303-5: 1987-02: Statistische Auswertung von Daten. Bestimmung eines statistischen Anteilsbereichs

8.2 LITERATUR

- [Bet97] Beton-Kalender 1997 Teil II, Taschenbuch für Beton-, Stahlbeton- und Spannbetonbau sowie verwandten Fächer. Ernst & Sohn Verlag, Berlin 1997
- [Blo03] Block, K.; Dreier, F.: Das Ermüdungsverhalten von Dübelbefestigungen. Herausgeber: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 541. Beuth Verlag GmbH, Berlin 2003
- [Blo94] Block, K.: Neuartige Befestigungen für Wärmedämm-Verbundsysteme; abgedruckt in Konkressdokumentation des 2. Internationalen Kongress zur Bauwerkserhaltung 1994 anlässlich der BAUTECH BERLIN. Forum Bauwerkserhaltung e.V. FBE, Berlin 1994
- [Bon04] Bonk, M.; Anders, F.: Schäden durch mangelhaften Wärmeschutz. Fachbuchreihe Schadenfreies Bauen, Band 32. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 2004
- [Brü07] Brüning, M.: Plastizitätstheorie. Universität Dortmund, Lehrstuhl für Baumechanik-Statik, Dortmund 2007
- [Cam95] Cammerer, W. F.: Wärme- und Kälteschutz im Bauwesen und in der Industrie. Springer Verlag, Berlin Heidelberg 1995
- [Czi98] Cziesilski, E; Fechner : Wärmedämm-Verbundsysteme – Untersuchung zur Gebrauchsfähigkeit gerissener Putzsysteme. Abschlussbericht im Rahmen des Forschungsschwerpunktes Bauphysik der Außenwände. IRB-Verlag, Stuttgart 1998
- [Czi07] Cziesielski, E; Vogdt; F. U.: Schäden an Wärmedämm-Verbundsystemen. Fachbuchreihe Schadenfreies Bauen, Band 20; 2. überarbeitete und erweiterte Auflage; Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 2007
- [DIBt05] Bauregelliste A, Bauregelliste B und Liste C – Ausgabe 2005/1. DIBt Mitteilung 36, Sonderheft 31, Ausgabe Januar 2005
- [Ehm07] Ehm, O. F.: Der neue Ehm. Tauchen noch sicherer: Tauchmedizin für Freizeittaucher, Berufstaucher und Ärzte. Müller Rüschnik, 2007
- [Fis01] Fischer, L.: Das neue Sicherheitskonzept im Bauwesen. Ein Leitfaden für Bauingenieure, Architekten und Studenten, Bautechnik Spezial, Ernst & Sohn, Berlin 2001
- [Ger97] Gerken, D.: Wärmedämmverbundsysteme (WDVS) im Wohnungsbau - Bestandsanalyse zur längerfristigen Lebensdauer und Kostendämpfung. Fachbuchreihe Bauforschung für die Praxis, Band 32. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 1997
- [Ger05] Gerhardt, H. J.: Windschäden. Fachbuchreihe Schadenfreies Bauen, Band 37. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 2005
- [Gib88] Gibson, L. J.; Ashby, M. F.: Cellular Solids, Structure and Properties. Pergamon Press, Oxford 1988
- [Gro07] Gross, D.; Hauger, W.; Wriggers, P.: Technische Mechanik; Band 4: Hydromechanik, Elemente der Höheren Mechanik, Numerische Methoden. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2007
- [Haf01] Hafellner, R.; Reithofer, P.: Konstruktionsrichtlinien für mechanisch hochbelastbare Verbindungstechniken von Dämmprodukten. Zentrum für angewandte Technologie. Grundlasgenstudie der Montanuniversität Leoben im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie; Leoben 2001

- [IfBt90] Mitteilung des IfBt, Heft 4 4/1990; ebenfalls abgedruckt in Bauphysik 12 (1990), Heft 4, Seite 123-125
- [Kos96] Kosz, M; Madreiter, T.; Schönback, W.: Wärmedämmung: Rentabilität, Beschäftigungseffekte, Klimaschutz. Springer-Verlag, Wien 1996
- [Kra07] Kraatz, A.: Anwendung der Invariantentheorie zur Berechnung des dreidimensionalen Versagens- und Kriechverhaltens von geschlossenzelligen Schaumstoffen unter Einbeziehung der Mikrostruktur. Dissertation an der Mathematischen-Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg; Halle (Saale) 2007
- [Lin96] Lindner, U.: Energieeinsparen mit Wärmedämmverbundsystemen. Expert-Verlag, Renningen-Malmsheim 1996
- [Lün00] Lünser, H.: Dämmstoffe im Hochbau. Informationen für Bauherren, Architekten und Ingenieure. Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg. Broschüre, Stuttgart 2000
- [Möt00] Mötzel, H; Zelger, T.: Ökologie der Dämmstoffe. Grundlagen der Wärmedämmung. Lebenszyklusanalyse von Wärmedämmstoffen. Optimal Dämmstandards. IBO - Österreichisches Institut für Baubiologie und -ökologie. Springer-Verlag, Wien 2000
- [Nab86] NABau: Grundlagen zur Beurteilung von Baustoffen, Bauteilen und Bauarten im Prüfzeichen- und Zulassungsverfahren, Manuskript 1986
- [Neu09] Neumann, H.-H.: Praxis-Handbuch Wärmedämm-Verbundsysteme. Baustoffkunde, Verarbeitung, Schäden, Sanierung. Rudolf Müller, Köln 2009
- [Obe93] Oberhaus, H.: Zur Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit mineralischer Wärmedämm-Verbundsysteme. Dissertation aus dem Fachgebiet Betonbau der Fakultät Bauwesen der Universität Dortmund; Dortmund 1993
- [Ode80] Odeh, E.; Owen, D. B.: Tables for normal tolerance limits, sampling plans, and screening. Marcel Dekker, New York and Basel 1980
- [Rai27] Raisch, E.: Die in der Wärmeschutztechnik erzielten Fortschritte und ihre wirtschaftliche Auswirkung. Feuerungstechn. 15 (1927) 325-327.
- [Rec67] Reckling, K.-A.: Plastizitätstheorie und ihre Anwendung auf Festigkeitsprobleme. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg 1967
- [Rey02] Reyer, E.; Schild, K; Völkner, S.: Kompendium der Dämmstoffe. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 3. Auflage 2002
- [Rey03] Reyer, E.; Schild, K; Völkner, S.: Wärmedämmstoffe und -systeme. In: Bauphysikkalender 2003. Ernst & Sohn, Berlin 2003
- [Rie07] Riedel, W.; Oberhaus, H.; Frössel, F.; Haegele, W.: Wärmedämm-Verbundsysteme. Von der Thermohaut bis zur transparenten Wärmedämmung. Baulin Verlag, Waldshut-Tiengen, 2007. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 2007
- [Roi78] Roik, K.: Vorlesung über Stahlbau – Grundlagen. Wilhelm Ernst & Sohn Verlag, Berlin, München, Düsseldorf 1978
- [Schi03] Schild, K und Weyers, M.: Handbuch Fassadendämmsysteme, Grundlagen - Produkte - Details. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 2003

- [Zha98] Zhang, J.: Constitutive Modeling of Polymeric Foam Material Subjected to Dynamic Crash Loading. International Journal of Impact Engineering, Bde. Vol. 21, No. 5. Elsevier Science, 1998

LEBENS LAUF

PERSÖNLICHE DATEN

Name	Melanie Krause
Geburtsdatum	17.12.1976
Geburtsort	Dortmund
Staatsangehörigkeit	deutsch

SCHULBILDUNG

1983 - 1987	Jungferntal-Grundschule in Dortmund
1987 - 1996	Bert-Brecht-Gymnasium in Dortmund
	Abschluss: Abitur

STUDIUM

1996 - 2002	Studium des Bauingenieurwesens, Fachrichtung Konstruktiver Ingenieurbau an der Fakultät Bauwesen, Universität Dortmund
Diplomarbeit:	“Messung und Berechnung von Verformungen an elastisch gebetteten Scheiben mit Öffnungen“
Abschluss Februar 2002	Diplom-Ingenieur

BERUFSTÄTIGKEIT

März 2002 - Dezember 2003	Freiberufliche Mitarbeit bei Herrn Dr.-Ing. Heribert Oberhaus Sachverständiger für Schäden an Fassaden
Seit November 2002	Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl Betonbau der Fakultät Bauwesen der Technischen Universität Dortmund, Forschungsschwerpunkt Wärmedämm-Verbundsysteme

In der Schriftenreihe Betonbau sind bisher erschienen:

- Heft 1 Andreas Arnold
 „Zum Einfluss der Zwangsschnittgrößen aus Temperatur bei Tragwerken aus
 Konstruktionsbeton mit und ohne Vorspannung“ (2008)
 ISBN 978-3-921823-43-9
- Heft 2 Gudrun Djouahra
 „Verhalten von Stahlbetonbauteilen unter einer kombinierten Beanspruchung aus
 Last und zentrischem Zwang“ (2009)
 ISBN 978-3-921823-46-0
- Heft 3 Melanie Krause
 „Ein neues Konzept zum Nachweis der Standsicherheit von Dübelbefestigungen in
 Wärmedämm-Verbundsystemen (WDVS)“ (2010)
 ISBN 978-3-921823-49-1