

Konstruktionsrichtlinien für mechanisch hochbelastbare Verbindungstechniken von Dämmprodukten

Grundlagenstudie

Endbericht

Auftragnehmer:
Zentrum für angewandte Technologie, Montanuniversität Leoben

Autoren:
DI Reinhard Hafellner
DI Peter Reithofer
Zentrum für angewandte Technologie

In Zusammenarbeit mit:
DI Dr. Bernd A. Mlekusch
advanced polymer engineering -
Zentrum für angewandte Technologie

Leoben, September 2001

Ein Projektbericht im  **H A U S**
der Zukunft

Impulsprogramm Nachhaltig Wirtschaften

Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie

Vorwort

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines beauftragten Projekts aus der ersten Ausschreibung der Programmlinie *Haus der Zukunft* im Rahmen des Impulsprogramms *Nachhaltig Wirtschaften*, welches 1999 als mehrjähriges Forschungs- und Technologieprogramm vom Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie gestartet wurde.

Die Programmlinie *Haus der Zukunft* intendiert, konkrete Wege für innovatives Bauen zu entwickeln und einzuleiten. Aufbauend auf der solaren Niedrigenergiebauweise und dem Passivhaus-Konzept soll eine bessere Energieeffizienz, ein verstärkter Einsatz erneuerbarer Energieträger, nachwachsender und ökologischer Rohstoffe, sowie eine stärkere Berücksichtigung von Nutzungsaspekten bei vergleichbaren Kosten zu konventionellen Bauweisen erreicht werden. Damit werden für die Planung und Realisierung von Wohn- und Bürogebäuden richtungsweisende Schritte hinsichtlich ökoeffizientem Bauen und einer nachhaltigen Wirtschaftsweise in Österreich demonstriert.

Die Qualität der erarbeiteten Ergebnisse liegt dank des überdurchschnittlichen Engagements und der übergreifenden Kooperationen der Auftragnehmer, des aktiven Einsatzes des begleitenden Schirmmanagements durch die Österreichische Gesellschaft für Umwelt und Technik und der guten Kooperation mit dem Forschungsförderungsfonds der gewerblichen Wirtschaft bei der Projektabwicklung über unseren Erwartungen und führt bereits jetzt zu konkreten Umsetzungsstrategien von modellhaften Pilotprojekten.

Das Impulsprogramm *Nachhaltig Wirtschaften* verfolgt nicht nur den Anspruch, besonders innovative und richtungsweisende Projekte zu initiieren und zu finanzieren, sondern auch die Ergebnisse offensiv zu verbreiten. Daher werden sie auch in der Schriftenreihe "Nachhaltig Wirtschaften konkret" publiziert, aber auch elektronisch über das Internet unter der Webadresse www.hausderzukunft.at dem Interessierten öffentlich zugänglich gemacht.

DI Michael Paula
Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie

Projektteam:

Projektleiter
Reinhard Hafellner, Dipl.-Ing.
Zentrum für angewandte Technologie
Peter Tunner Straße 19
8700 Leoben
Tel.: 03842 47044 – 15
reinhard.hafellner@unileoben.ac.at

Mitarbeiter
Peter Reithofer, Dipl.-Ing.
Zentrum für angewandte Technologie
Tel.: 03842 47044 – 11
p.reithofer@unileoben.ac.at

Kooperationspartner
Bernd A. Mlekusch, Dipl.-Ing. Dr.
advanced polymer engineering – Zentrum für angewandte Technologie
Tel.: 03842 47044 16
mlekusch@unileoben.ac.at

beteiligtes Unternehmen
Wopfinger Baustoffindustrie GmbH
Wopfing 156
A-2754 Waldegg
Tel.: 02633 / 400 00
office@wopfinger.baumit.com

weiteres unterstützendes Unternehmen
Wienerberger Ziegelindustrie AG
Triester Straße 70
A-1810 Wien 10
Tel.: (+43) 01 605 03

Kontaktadresse:

Reinhard Hafellner, Dipl.-Ing.
Zentrum für angewandte Technologie
Peter Tunner Straße 19
8700 Leoben
Tel.: 03842 47044 – 15
Fax.: 03842 47044 – 78
reinhard.hafellner@unileoben.ac.at

Synopsis

Objective of this project is the exploration of mechanical connections fixing insulants. Concrete unconventional fixing techniques are the focus of the investigations. Among other things, an emphasis is set in the field of insulants, used as lost concrete casing.

ABSTRACT

The actual work deals with different possibilities concerning the design of fixing elements. The method of fixing insulants to walls on the one hand as well as the fixing technique of elements to insulants on the other hand represent an essential criterion for the question whether such jointings will be generally used and whether the usage is convenient.

The literature research gives a comprehensive view above the state of the art. It appears that the materials used for insulant are presently concentrated extensively on the systems rock-wool and polystyene-foams. Recent market research shows over 95% coverage for these two materials. However, the further development of alternative materials leaves all perspectives open. In order to fix insulants on the facade, different dowel systems are intensively used today. Moreover profile fixing systems are applied. Besides the mechanical fixing in the facade, insulants can also be stuck to it. A purely mechanical fixing occurs only in few exceptions. A series of unconventional fixing systems and -elements are to be found in patent literature and partly also in published specialist literature. These areas will be dealt with separately, since they show a great idea potential for new evolution and encourage the development of new ideas. In case insulants are used as lost casing, high demands are made by the fixing element on account of the high loads on firmness of the insulant and the construction of the strength introduction. Different commercially available systems are described in published literature. Different fixing systems between outside-casing and inside-casing find use.

The following conclusions can be drawn by systematic analysis of the shown possibilities: The fixing engineering to insulants always comes up with the same problems. Forces should be applied as gently as possible and free of stress peaks into the insulant, whereas the latter shows a small stiffness and strenght.

Experimental tables based on investigations of the state of the art as well as on systematical investigations are developed. Particularly experiments with simplified geometries and experiments with simplified frictional contact will be implemented. The results are continuously verified by theoretical models and results from simulations.

The field of the practical experiments essentially can be split up into three groups. The first group is used for the determination of the material properties. Specific values for the insulant are determined with methods of material research that are lateron used for design of the fixing elements and in theoretical approaches.

In the next step of research basic construction geometries are elaborated. These basic geometries are designed as simple as possible and are employed as fixing elements and tested to their behavior during mechanical load. This step should help to elaborate the essence of the fundamental behavior of the different fixing solutions. Together with the determined material properties, the results are used to develop simple models for design.

It follows from the experiments that the influence of the material properties on the departing strengths can be approximately predicted. Moreover, it can be shown, that the evolution of empirical models on the basis of material properties and geometry parameters is possible. For this the introduction of reduction factors due to occurring stress peaks is necessary.

In addition to the basic analysis of the simplified geometries more complex geometries taken from existing solutions for fixing elements are tested. This step gives the possibility to verify whether the results from the simplified geometries can be transmitted.

In the third investigation field real wall systems are analysed. The investigation concentrates on the applicability of connection elements of lost casings. Load occurs through the concrete pressure during filling. During filling the pressure of the concrete is measured by a suitable experimental assembly. As a result, the real load of the elements can be calculated. A mathematical model for calculating the pressure is developed. In further investigations acoustic behaviour of the walls is carried out. The influence of the fixing elements and the insulation thickness is analysed and in the next step it is opposed and compared to theoretical investigations.

During the carrying out of this investigation project, it was attempted to find as universal results. The abundance of the represented possibilities should inspire the designer and stimulate his creativity.

Synopsis

Ziel dieses Projektes ist die Erforschung mechanischer Zusammenhänge bei der Befestigung von Dämmstoffen. Konkrete unkonventionelle Befestigungstechniken stehen dabei im Vordergrund der Untersuchungen. Ein Schwerpunkt wird unter anderem im Bereich der Verwendung von Dämmstoffen als verlorene Schalung gesetzt.

KURZFASSUNG

Die gegenständliche Arbeit befasst sich mit verschiedenen Möglichkeiten zur Auslegung von Befestigungselementen. Die Befestigung von Dämmstoffen an Wänden einerseits, sowie die Befestigungsmöglichkeit von Elementen an Dämmstoffen andererseits stellt ein wesentliches Kriterium für den Einsatz und die Benutzerfreundlichkeit derselben dar.

Die durchgeführte Literaturrecherche gibt einen umfassenden Überblick über den Stand der Technik. Es zeigt sich, dass der Materialeinsatz für die Dämmstoffverwendung sich derzeit weitgehend auf die Systeme Mineralwolle und Polystyrol-Hartschaum beschränkt, welche gemeinsam Marktanteile über 95 % aufweisen. Die Weiterentwicklung von Alternativmaterialien lässt jedoch alle Perspektiven offen. Zur Dämmstoffbefestigung auf der Fassade besitzen heute verschiedene Tellerdübelssysteme ausgedehnte Verbreitung. Schienenbefestigungen finden ebenso Verwendung. Im allgemeinen werden die Dämmstoffe zusätzlich mit der Fassade verklebt. Nur in wenigen Ausnahmefällen findet eine rein mechanische Befestigung statt. Eine Reihe von unkonventionellen Befestigungssystemen und -elementen sind in der Patentliteratur und teilweise auch in der veröffentlichten Fachliteratur zu finden. Auf diese Bereiche wird gesondert eingegangen, da sie das Ideenpotential für neue Entwicklungen aufzeigen und die Findung neuer Ideen fördern. Bei Verwendung des Dämmstoffes als verlorene Schalung werden an die Festigkeit des Dämmstoffes und an die Konstruktion der Krafteinleitung durch das Befestigungselement aufgrund der hohen Belastungen erhöhte Anforderungen gestellt. Es werden verschiedene marktgängige Systeme in der veröffentlichten Literatur beschrieben. Unterschiedlich konzeptionierte Verbindungselemente zwischen Schalungsaußen- und -innenwand finden hier Verwendung.

Durch systematische Aufarbeitung der aufgezeigten Möglichkeiten lassen sich zusammenfassend nachfolgende Schlüsse ziehen: Die Befestigungstechnik an Dämmstoffe reduziert sich immer auf die selbe Problematik. Kräfte sollen möglichst sanft und spannungsspitzenfrei in den Dämmstoff, der eine geringe Steifigkeit und Festigkeit aufweist, eingeleitet werden. Die Gliederung in Kraftschluss, Formschluss und Stoffschluss stellt die wichtigste Möglichkeit zur Kategorisierung konstruktiver Ausführungsvarianten dar.

Aufbauend auf Untersuchungen zum Stand der Technik sowie der systematischen Einteilung des Arbeitsbereiches und der theoretischen Analyse verschiedener Ansätze werden Versuchspläne erstellt. Hier sind insbesondere Versuche mit vereinfachtem Formschluss als auch solche mit vereinfachtem Reibschluss anzuführen. Die Ergebnisse werden kontinuierlich mit theoretischen Ansätzen und Resultaten aus Simulationen verglichen.

Der Bereich der praktischen Versuche lässt sich im wesentlichen in drei Gruppen einteilen. Der erste Bereich dient der Ermittlung der Materialeigenschaften der zu untersuchenden Werkstoffe. Hier werden mit werkstoffwissenschaftlichen Methoden Kennwerte für den Dämmstoff ermittelt, welche später in theoretischen Ansätzen zur Auslegung der Befestigungselemente herangezogen werden.

Im nächsten Untersuchungsfeld werden die Grundgeometrien von Konstruktionen erarbeitet, die aus der systematischen Analyse resultieren. Es werden möglichst einfache Geometrien

als Befestigungselemente verwendet und auf ihr Verhalten bei mechanischer Belastung hin geprüft. Durch diesen Schritt soll das Verständnis des grundsätzlichen Verhaltens von Befestigungslösungen gefördert werden. Gemeinsam mit den ermittelten Materialeigenschaften werden die Ergebnisse verwendet um einfache Modelle für die Auslegung zu entwickeln.

Aus den Versuchen geht hervor, dass der Einfluss der Materialeigenschaften auf die Ausziehkräfte weitgehend durch die Kennwerte vorhergesagt werden kann. Weiters kann gezeigt werden, dass die Entwicklung empirischer Modelle auf Basis von Materialkennwerten und Geometrieparametern, als ein Ziel dieser Arbeit möglich ist. Die Einführung von Abminderungsfaktoren infolge von auftretenden Spannungsspitzen ist jedoch notwendig.

Zusätzlich zu den grundlegenden Analysen der vereinfachten Geometrien werden komplexere Geometrien von bestehenden Lösungen für Befestigungselemente getestet. Auf diese Weise wird die Übertragbarkeit der zuvor ermittelten Erkenntnisse untersucht.

Im dritten Untersuchungsfeld werden Wandaufbauten analysiert. Insbesondere betrifft dies die Untersuchung der Anwendbarkeit von Verbindungselementen für verlorene Schalungen. Die Belastung erfolgt durch den Betondruck bei geschosshoher Verfüllung. Beim Verfüllen wird der Druck des Betons durch einen geeigneten Versuchsaufbau mitgemessen. Dadurch kann die wirkliche Belastung der Elemente errechnet werden. Auf Basis der eigenen Erkenntnisse wird ein mathematisches Modell für die Ausbildung des Druckes entwickelt. Anhand der Wandaufbauten werden schalltechnische Untersuchungen durchgeführt. Der Einfluss der Verbindungselemente und der Schichtdicken wird analysiert und theoretischen Untersuchungen gegenübergestellt.

Bei der Durchführung dieses Forschungsprojektes wurde versucht möglichst allgemeingültige Erkenntnisse für mögliche Produkte zur Befestigung von Dämmstoffen zu finden. Die Fülle der dargestellten Möglichkeiten soll den Konstrukteur inspirieren und dessen kreatives Potential fördern.

ABSTRACT	I
Kurzfassung	III
Abkürzungen	VII
1 Einleitung	1
2 Stand der Technik und Systematik	3
2.1 Relevanz derzeitig und zukünftig eingesetzter Dämmstoffe	3
2.2 Mechanische Eigenschaften von Dämmmaterialien	5
2.3 Einsatzgebiete bestehender Befestigungselemente und deren Ausführung	6
2.4 Dämmstoffe als verlorene Schalung	10
2.5 Systematische Einteilung von Befestigungssystemen	12
2.6 Grundsätzliche Möglichkeiten zur Befestigung von Elementen an Dämmstoffe	13
3 Untersuchung des Verhaltens von Dämmstoffen	15
3.1 Zugversuch	15
3.1.1 Versuchsaufbau und -durchführung	15
3.1.2 Ergebnisse	17
3.1.3 FEM-Analyse	21
3.2 Biegeversuch	22
3.2.1 Versuchsaufbau und -durchführung	22
3.2.2 Ergebnisse	24
3.2.3 FEM-Analyse	27
3.3 Druckversuch zur Querkontraktionsmessung	27
3.4 Bruchmechanische Untersuchungen	28
3.4.1 Versuchsablauf und -durchführung	29
3.4.2 FEM-Analyse	38
3.5 Einfluss der Mikrostruktur auf dämmstoffspezifische Eigenschaften	40
3.5.1 Dichtemessungen von Hartschäumen	40
3.5.2 Wärmedämmung	40
3.5.3 Mikroskopischer Aufbau	42
4 Mechanisches Verhalten von Befestigungssystemen	53
4.1 Grundlegende Untersuchungen - Formschluss	53
4.1.1 Versuchsdurchführung und Vorversuche	54
4.1.2 Versuchsplan	57
4.1.3 Einfluss der Ausziehhöhe und der Auflagebedingungen	60
4.1.4 Einfluss durch Veränderungen des Formschlusselementes	62
4.1.5 Einfluss der Hartschaumtype	66
4.1.6 Mehrfacher Formschluss	69

4.1.7	Weiterführende Überlegungen	71
4.1.8	FEM-Analyse.....	74
4.2	Grundlegende Untersuchungen - Reibschluss	80
4.2.1	Einfacher Reibschlusszyklus	80
4.2.2	Kurzzeitiger Reibschluss.....	81
4.2.3	Langzeitiger Reibschluss	85
4.2.4	Weiterführende Überlegungen.....	87
4.3	Mechanisches Verhalten von typischen Befestigungssystemen	91
4.3.1	Versuchsaufbau	91
4.3.2	Formschlusskontrollierte Befestigungen.....	93
4.3.3	Reibschlusskontrollierte Befestigungen	99
5	Allgemeine Anforderungen an Befestigungen.....	102
5.1	Eigenlast.....	102
5.2	Hygrothermische Verformung	103
5.3	Windkräfte	104
5.4	Bauseitiges Verfüllen von Hohlräumen durch Dämmstoffe.....	104
5.5	Wärmebrücken	106
5.6	Schalungsdruck und dessen Ausbildung	108
5.6.1	Messung des Betondruckes in Wandaufbauten	110
5.6.2	Bilddokumentation der Verfüllversuche	113
5.6.3	Erstellung eines Modells für die Druckberechnung	115
5.7	Schallbelastung	118
5.7.1	Schallmessung und Bewertungsverfahren	118
5.7.2	Ergebnisse	120
5.7.3	FEM-Analyse.....	123
6	Zusammenfassung und Ausblick.....	125
7	Anhang	130
7.1	Tabellenwerke für mechanische und thermische Eigenschaften	130
7.2	Literaturverzeichnis	137
7.3	Abbildungsverzeichnis.....	142
7.4	Tabellenverzeichnis.....	150

ABKÜRZUNGEN

Kreisplatten

D_A	.....	Außendurchmesser
t	.....	Plattendicke
E	.....	angenommener E-Modul
ν	.....	angenommene Querkontraktionszahl
K	.....	Plattensteifigkeit

Probekörper

L	.....	Länge
B	.....	Breite
H	.....	Höhe
m	.....	Masse
ρ	.....	Dichte

Zugversuch

L_Z	.....	Länge
B_Z	.....	Breite
D_Z	.....	Dicke
$A_{Z,min}$	.....	minimaler Probenquerschnitt
L_W	.....	wirksame Einspannlänge
u	.....	Verschiebung in Zugachse
ΔL_Z	.....	Längenänderung
F_Z	.....	gemessene Kraft
$F_{Z,max}$	.....	maximal gemessene Kraft
σ_{ZB}	.....	Zugfestigkeit
ϵ_{ZB}	.....	Dehnung bei σ_{ZB}
ϵ_{ZR}	.....	Reißdehnung
E_Z	.....	ermittelter äquivalenter Modul

Biegeversuch

L_B	.....	Länge
B_B	.....	Breite
D_B	.....	Dicke
l_S	.....	Stützweite
F_B	.....	gemessene Biegekraft

$F_{B,max}$	.....	maximal gemessene Biegekraft
M	.....	Biegemoment
W	.....	Widerstandsmoment
w_B	.....	gemessener Weg
w_{B0}	.....	Nullpunktkorrektur für den Weg
σ_{BB}	.....	Biegefestigkeit
ϵ_{BB}	.....	Dehnung bei σ_{BB}
E_B	.....	ermittelter Biege-Modul

Linear elastische Bruchmechanik

D	.....	Länge
W	.....	Breite
B	.....	Dicke
S	.....	Stützweite
n	.....	Anzahl der Risse
a	.....	Rißlänge
$F_{ZR,max}$	.....	maximal gemessene Kraft
U	.....	Rißbildungsarbeit
ν	.....	angenommene Querkontraktionszahl
Y	.....	Spannungsintensitätskorrekturfaktor
Z	.....	Nachgiebigkeit
η	.....	elastischer Korrekturfaktor
K_{IC}	.....	kritische Spannungsintensitätsfaktor (Rißzähigkeit)
G_{IC}	.....	kritische Energiefreisetzungsrate

Formschluss

t	.....	Frästiefe
h	.....	Ausziehhöhe
w_{Fmax}	.....	Weg bei maximaler Ausziehkraft
F_{max}	.....	maximale Ausziehkraft
A_{Fmax}	.....	Arbeit bis zur maximalen Ausziehkraft
A_M	.....	Mantelfläche des darunterliegenden Zylinders
τ	.....	ermittelte Schubfestigkeit
S_F	.....	Spannungsüberhöhung

Reibschluss

t	.....	Zeit
h	.....	Ausziehhöhe
F_{max}	.....	maximale Ausziehkraft

A_{ges}	.....	eingeschlossene Fläche zwischen Kurve und Abszisse
F_{av}	.....	durchschnittliche Ausziehkraft
$\sigma_{D10\%}$	.....	Druckfestigkeit bei 10 % Stauchung
N	.....	Normalkraft
A_M	.....	Mantelfläche des darunterliegenden Zylinders
$\alpha_{Neigung}$	.....	Neigungswinkel für die Bestimmung von μ
μ	.....	ermittelter Reibbeiwert
F_{maxR}	.....	berechnete maximale Ausziehkraft

Informationen zu Mittelwertkurven

n	.....	Anzahl der berücksichtigten Versuche
n_{gew}	.....	Anzahl der berücksichtigten zu durchgeführten Versuche
σ_X	.....	durchschnittliche Standardabweichung der X-Werte
σ_Y	.....	durchschnittliche Standardabweichung der Y-Werte

Schalungsdruck

P	.....	Schalungsdruck
V	.....	Füllgeschwindigkeit
t_k	.....	Betonkerndicke
ρ	.....	Betondichte
h	.....	Füllhöhe
g	.....	Erdbeschleunigung
b	.....	Betonwanddicke
μ	.....	Reibkoeffizient
τ	.....	Schubspannung

Schalluntersuchungen

p	.....	vorhandener Schalldruck (Effektivwert)
p_0$	.....	20 \cdot 10^{-6}$ Pa Bezugsschalldruck (Effektivwert)
L_p	.....	Schalldruckpegel
L_1	.....	Schalldruckpegel im Senderraum
L_2	.....	Schalldruckpegel im Empfangsraum
D	.....	Schalldruckpegeldifferenz
R	.....	Schalldämmmaß
S	.....	Fläche des Trennbauteils
A	.....	äquivalente Schallabsorptionsfläche im Empfangsraum
T	.....	Nachhallzeit
V	.....	Raumvolumen

1 EINLEITUNG

Diese Arbeit verfolgt das Ziel Auslegungskriterien für Befestigungselemente von Dämmstoffen zu entwickeln. Bei der Vorgehensweise wird dabei das in Abb. 1-1 dargestellte Konzept verfolgt. Ausgehend von Ansätzen, die aus der Literatur bekannt sind, werden neue Ansätze gesucht, welche die Beschreibung des mechanischen Verhaltens von Befestigungselementen ermöglichen.

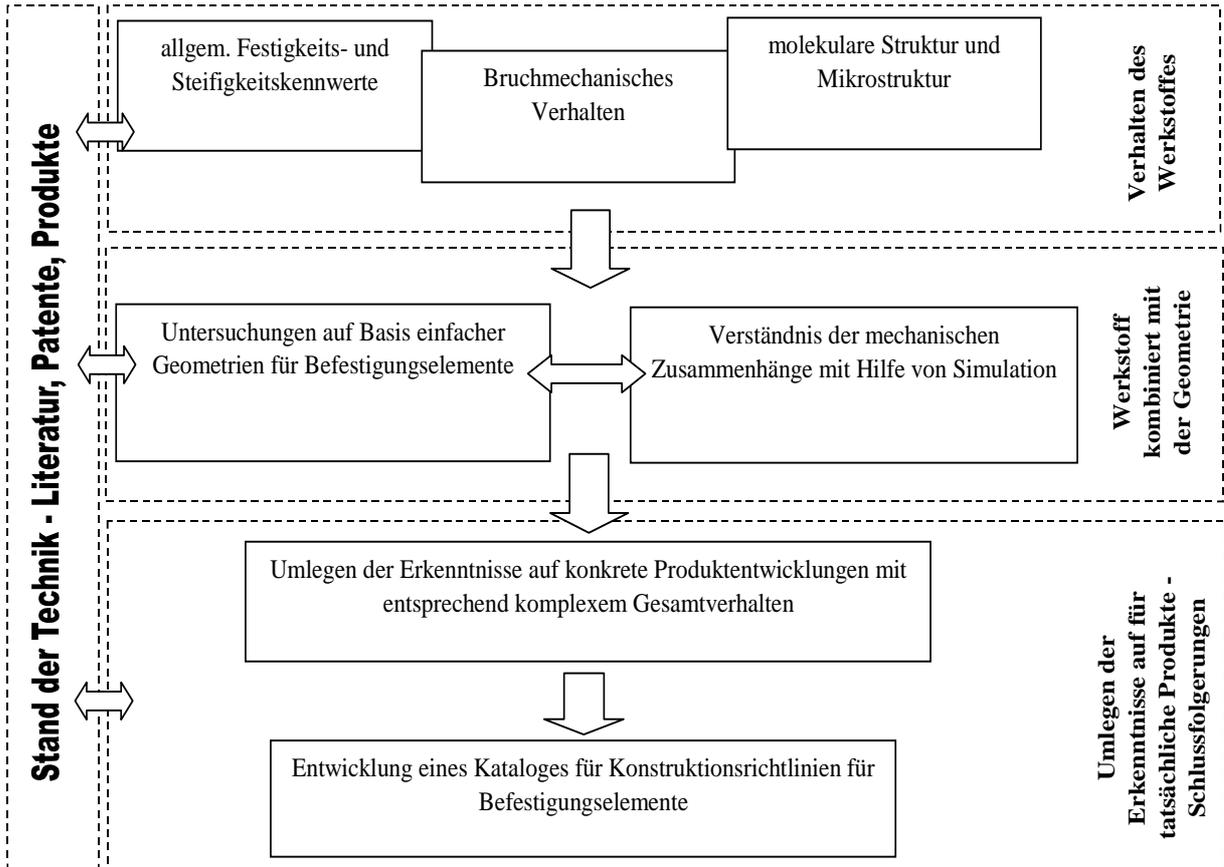


Abb. 1-1: Konzept für die Vorgehensweise – praktischer Teil.

Ein maßgeblicher Eingabeparameter für die Auslegung von Konstruktionen sind Materialdaten der einzelnen Bestandteile. Im Bereich der Dämmstoffe sind Materialdaten bezüglich der mechanischen Eigenschaften oft nur zum Teil bekannt. Weiters weisen diese oft sehr hohe Streuungen auf. Im ersten Schritt werden daher die Kennwerte der untersuchten Materialien ermittelt.

Ein zweiter wesentlicher Bestandteil der Entwicklung von Konstruktionen ist die Geometrie des zu konstruierenden Teiles. Um das Verständnis für das Verhalten zu vereinfachen, werden in dieser Arbeit einfache Grundgeometrien untersucht. Diese Analyse erfolgt einerseits durch Simulation mittels Methode der finiten Elemente, andererseits durch Belastungsversuche auf Prüfmaschinen. Als Ausgangspunkt für theoretische Überlegungen werden die im Punkt „Materialdaten“ ermittelten Kennwerte benutzt.

Die nächste, für die Konstruktion entscheidende Eingabegröße, stellt das Spektrum der Anforderungen dar. Für die mechanische Auslegung von Konstruktionen sind vor allem von außen wirkende Kräfte und Momente von Bedeutung. Es sind ebenso aus der Literatur und Normen eine Menge von Angaben bekannt. Da auch hier die Angaben über einen sehr großen Bereich schwanken werden im Rahmen dieser Arbeit einige klärende Versuche an Wandaufbauten durchgeführt. Weiters wird nach verbesserten theoretischen Ansätzen gesucht. Die besprochenen Zusammenhänge sind in Abb. 1-2 bildhaft dargestellt.

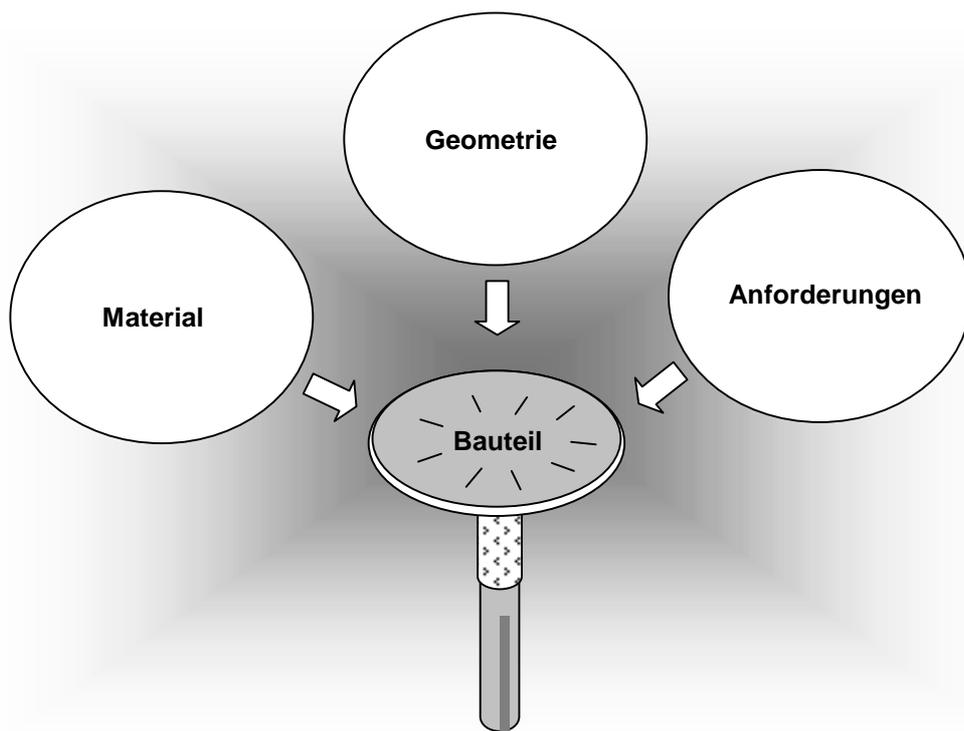


Abb. 1-2: Grundlegende Einflussgrößen bei der Auslegung einer Konstruktion.

2 STAND DER TECHNIK UND SYSTEMATIK

Der erste Schritt in diesem Projekt ist die Durchführung einer umfassenden Literaturrecherche. Diese dient dazu, in den für die Auslegung wichtigen Teilgebieten Grundlagenwissen zusammenzufassen und weitestgehend den Stand der Technik abzuklären. Dabei wird sowohl nach wirtschaftlich bzw. marktspezifischen relevanten Studien, sowie nach technischen relevanten Artikeln gesucht. Das Hauptaugenmerk wird dabei auf folgende Gebiete gelegt:

- Dämmstoffe von heute und Dämmstoffe der Zukunft,
- mechanische Eigenschaften von marktrelevanten Dämmstoffen,
- allgemeine Anforderungen an Befestigungssysteme,
- Befestigungssysteme für Dämmstoffe und deren Einsatzgebiete sowie
- Dämmstoffe als verlorene Schalung.

Die gefundenen Literaturstellen mit kurzen Erläuterungen sind im Anhang als eigenes Kapitel dargestellt. Auf die für die weitere Vorgehensweise notwendigen Erkenntnisse wird in den nachfolgenden Unterkapiteln genauer eingegangen.

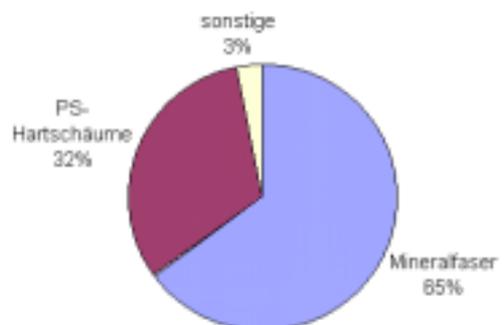
2.1 Relevanz derzeitig und zukünftig eingesetzter Dämmstoffe

In Hinsicht auf die Stoßrichtung dieser Untersuchung muss auf „zu befestigende“ Dämmstoffe, die heute im Einsatz sind, und vor allem die in Zukunft zur Anwendung kommen sollen, eingegangen werden. Eine Marktanalyse soll die Richtung für weitere allgemein gehaltene Untersuchungen vorgeben.

Betrachtet man den heutigen Zeitpunkt, so lässt sich aus verschiedenen Statistiken in Österreich und Westeuropa folgende Ist-Situation feststellen.

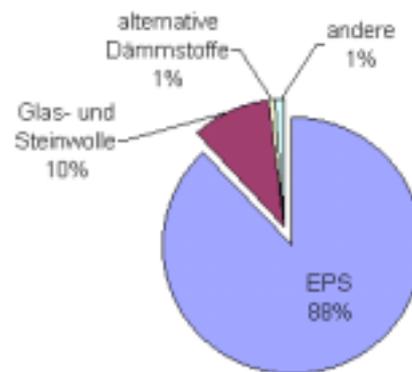
Gesamtdämmstoffeinsatz in Österreich und Deutschland [1.2, 1.5]:

Glaswolle	45 %
Steinwolle	20 %
EPS	25 %
XPS	7 %
sonstige	3 %



Wärmedämmverbundsysteme: [1.3]

EPS	88 %
Glas- und Steinwolle	10 %
alternative Dämmstoffe	1 %
andere	1 %



Der Gesamtdämmstoffeinsatz ist stark wachsend. In den letzten 10 Jahren erfolgte etwa eine Verdoppelung des Bedarfs [1.1].

Der Materialeinsatz in Westeuropa ist heute sehr stark durch die Mineralwollematerialien (etwas weniger als 2/3) und Polystyrol-Hartschäume (etwas weniger als 1/3) geprägt [1.2]. Im Bereich der Wärmedämmverbundsysteme (WDVS) besitzen Hartschäume (EPS) durch die notwendige Materialeigenschaftigkeit und -festigkeit eine Vormachtstellung (88 %) [1.3]. Alternative Dämmmaterialien erreichen aufgrund vieler, noch nicht überwundener technischer und wirtschaftlicher Mängel hinsichtlich Feuchteaufnahme, Brandschutz, Eigenfestigkeit und Preis relativ geringe Marktanteile von ca. 5 %. Langfristig ist diesem Bereich jedoch durchaus große Bedeutung zuzuschreiben. Auf Basis von natürlichen Polymeren und neuen Verfahrensentwicklungen werden heute erste Schritte gesetzt technische hochwertige, natürliche Schaum- und Faserdämmmaterialien herzustellen, die sich vom derzeitigen Stand der Technik deutlich abheben [2.13]. Die technische Weiterentwicklung auf Naturfasern und Zellulose basierender Systeme lässt alle Perspektiven offen.

Eine Reihe von Veröffentlichungen beschäftigt sich mit dem Thema „Gesundheitsgefährdung“ [z.B. 1.7, 1.8, 2.4]. Hier stehen die möglichen Emissionen von Inhaltsstoffen im Vordergrund, die zu einer Gefährdung von Umwelt und Gesundheit führen können. Es werden teils sehr unterschiedliche Strategien der Darstellung und Bewertung von Messergebnissen betrieben. Eine objektive Analyse und Bewertung ist in diesem Bereich derzeit nicht möglich. Marktgängige Systeme sind nach dem heutigen Stand der Technik hinsichtlich Gesundheitsgefährdung analysiert und zugelassen.

Einzelne Publikationen beschäftigen sich mit einer möglichen stofflichen bzw. energetischen Wiederverwertung von Dämmstoffen [z.B. 1.4]. Trends in diese Richtung sind in jedem Fall für die Befestigungstechnik von Relevanz. Besonders in bezug auf die Trennbarkeit der Materialien nach vollendeter Lebensdauer kann eine innovative Befestigungstechnik neue Wege eröffnen. Lebenswegbilanzen [z.B. 2.8] sind ebenso Bewertungskriterien die zukünftig noch weiter an Bedeutung gewinnen werden.

[1.9] und [1.10] befassen sich mit der Ausbildung besonders dicker Dämmungen. Die Dämmschichtdicken haben sich von Ihren Anfängen in den 60er Jahren mit Styropor-Dämmdicken von 2 cm bis 3 cm zu einer Flächengröße von 50 Mio m² pro Jahr und einer Dämmschichtdicke von durchschnittlich 8 cm

entwickelt. Heute werden Dämmschichtdicken von 12 cm über 20 cm empfohlen und sind Stand der Technik.

2.2 Mechanische Eigenschaften von Dämmmaterialien

In diesem Kapitel wird auf mechanische Eigenschaften von Dämmmaterialien eingegangen, wobei neben Dichte und Wärmeleitwerten in Hinsicht auf die Befestigungstechnik vor allem Steifigkeiten und Festigkeiten von Interesse sind.

Während Faserdämmstoffe sehr schwierig durch Modelle abzubildende mechanische Eigenschaften besitzen, können für Schäume im allgemeinen die Eigenschaften der homogenen Kontinuumsmechanik bzw. Elastizitätstheorie zugewiesen werden. Bedingt durch die Historie sind für Baustoffe vornehmlich Druckfestigkeitswerte bekannt. In der Befestigungstechnik sind jedoch Zugfestigkeiten für die Analysen ebenso notwendig.

- **Schäume und zusammenhängende Systeme mit ausreichender Eigenfestigkeit:**

Die benötigten Kennwerte für Analysen der Kraftübertragung bestehen aus den elastischen Kennwerten (E-Modul für die verschiedenen Raumrichtungen) bzw. den Querkontraktionszahlen. Insbesondere die Querkontraktionszahlen von Schäumen haben im allgemeinen sehr kleine Werte. In vielen Fällen kann von einem isotropen Verhalten ausgegangen werden, wodurch sich die elastischen Kennwerte auf zwei voneinander unabhängige Kennwerte reduzieren. Die Festigkeiten der Materialien werden durch Beanspruchung bis zur Versagensgrenze erhalten. Hier ist bei verschiedenen Materialien hinsichtlich der Versagensart zu unterscheiden, welche sehr komplexer Natur sein kann.

- **Faserdämmstoffe:**

Für Faserdämmstoffe stehen bedeutend weniger Kennwerte zur Analyse der mechanischen Kraftübertragung zu Verfügung. Dieser Bereich der Mechanik kann nur schwer durch mathematische Modelle abgebildet werden. Man beschränkt sich daher meist auf praktische Versuche. Die analysierten Kennwertangaben in der Literatur beschränken sich zum jetzigen Projektstand auf Wärmeleitzahlen und dynamische Elastizitätsmoduli zur Berechnung von Eigenfrequenzen.

Die Literaturstellen [2.1] bis [2.12] beschreiben das Materialverhalten verschiedener Dämmstoffe. Es wurde versucht ein umfassendes Tabellenwerk der Materialeigenschaften der Dämmstoffsysteme, die in der Literatur behandelt werden, hinsichtlich ihrer mechanischen und thermischen Eigenschaften zu erstellen. Diese Tabellen wurden im Laufe des Projektes mit größtmöglicher Sorgfalt mit Kennwerten aus den durchgeführten Versuchen ergänzt und erweitert. Im Anhang befindet sich das nach Eigenschaften gegliederte Tabellenwerk. Dieses Werk erhebt weder Anspruch auf Vollständigkeit noch gibt es eine Gewähr für die darin enthaltenen Kennwerte.

2.3 Einsatzgebiete bestehender Befestigungselemente und deren Ausführung

Nachfolgend wird ein Überblick über Literatur und Patentliteratur bezüglich Befestigungstechnik für Dämmstoffe gegeben. Neben Stand-der-Technik -Analysen wird in den Veröffentlichungen vielfach auf neue Methoden und Systeme zur Befestigung eingegangen. Vor allem Analysen hinsichtlich der Beanspruchung von Dämmsystemen durch Wind und Eigengewichte sind für diese Arbeit von großer Bedeutung.

Pätzold [3.1] beschreibt den Stand der Technik und teilt in die Bereiche Klebung, Verdübelung und Schienenbefestigung für Wärmedämmverbundsysteme. Ebenso wird kurz auf Vorschriften eingegangen.

Block [3.2] geht auf Bemessungskonzepte für die Dübelauslegung ein, wobei Zugkräfte durch Windsog, sowie Schubkräfte durch Eigengewichte hinsichtlich ihrer Wirkung analysiert werden. Im Anschluss wird auf verschiedene Dübelausführungsvarianten Bezug genommen. Hier werden vor allem neuartige Systeme näher diskutiert.

Schäfer [3.3] beschreibt ausführlich Möglichkeiten Wärmedämmverbundsysteme hinsichtlich Standsicherheit experimentell zu prüfen. Insbesondere werden die Lastfälle Eigengewicht, Schwinden, Temperaturschwankung, Windsog sowie Kombinationen der einzelnen Lastfälle betrachtet.

Michel [3.4] teilt über bauaufsichtlich zugelassene Befestigungssysteme mit. Er teilt dabei in die Kategorien geklebte, gedübelte und schienenbefestigte Systeme sowie Lamellensysteme. Die Vorschriften in den einzelnen Unterteilungen werden besprochen.

In [3.5] beschreibt Tiemann den Lastabtrag vom Eigengewicht der Fassade durch Dübelbefestigungen in den Dämmstoff. Weiters wird auf die Befestigungsmechanismen in der Wand - Reibschluss, Formschluss und Kraftschluss – eingegangen. Die geometrische Gestaltungsmöglichkeiten von Dübelschaft und Teller sind ebenso Thema seiner Ausführungen.

Semmler [3.6] geht auf Wärmebrückenbildung durch Befestigungselemente ein. Angesprochen wird, dass neben der Gefahr der Kondenswasserbildung und optischen Abzeichnungen durch temperaturbedingte Abtrocknungsunterschiede bei entsprechenden Dämmstoffdicken auch der zusätzliche Energieverlust nicht mehr untergeordnete Bedeutung besitzt. Laut durchgeführter Untersuchungen soll der Wärmeverlust infolge der Durchdringung der Dämmschicht durch den Dübel bis zu 50 % erreichen.

In [3.7] werden von Röttschke verschiedene Anwendungsfälle beschrieben, in welchen rein mechanische Befestigungssysteme ohne Hinterlüftung und ohne Verklebung zum Einsatz kamen. Die Gründe hierfür werden beschrieben.

Das von Holzinger patentierte [4.1] Stellfuchs-System basiert auf einer rein mechanischen Befestigung und soll vor allem bei der Dämmstoffmontage auf sehr unebenen Untergründen Vorteile bieten. Es handelt sich hier um eine Einschraublösung in den Dämmstoff. Durch das Schrauben kann zusätzlich zur Befestigung auch die Position bzw. der Abstand von der Wand reguliert werden [3.8]. Dieses System wird mittlerweile von Hilti vertrieben.

Der Autor von [3.9] beschreibt ein Befestigungssystem mit Hilfe von Aluminium - Profilschienen. Auf die einzelnen Arbeitsschritte für die Befestigung wird eingegangen.

In [3.10] erarbeitet Moegenburg verschiedene Systeme zur Befestigung von hinterlüfteten Fassaden. Er unterscheidet zwischen sichtbaren und verdeckten Befestigungsmitteln und geht auf unterschiedlichste Systeme, beginnend bei Schraubnägeln, Nieten, Plattenhaken bis hin zu Hinterschnittankern ein.

Unterteilt in die Gebiete vorgehängte und hinterlüftete Fassadenkonstruktionen, Wärmedämmverbundsysteme und zweischaliges Mauerwerk in Verblendbauweise beschreibt Reuter [3.11] den Stand der Technik zur Verankerung derartiger Aufbauten. Neben den Konstruktionsvarianten wird auf Prüftechnik und Bruchverhalten ausführlich eingegangen. Ebenso werden Zulassungsrichtlinien besprochen.

Die Projektgruppe „Rückseitige Befestigung von Fassadenplatten mit Dübeln“ befasst sich in [3.12] mit der bauaufsichtlichen Zulassung und unterscheidet dabei Plattenmaterialien Naturwerkstein, Keramik, Schicht und Faserpreßstoffe und Faserbeton für hinterlüftete Fassaden.

Kluge [3.13] beschreibt Hinterschnittanker zur Fassadenbefestigung, wobei er die selbe Einteilung trifft wie [3.12]. Ein Auszug aus dem Zulassungsverzeichnis dokumentiert Ausführungsarten verschiedener Dübel. Detailliert wird auch auf Konstruktion und Montage eingegangen.

Schuldt beschäftigt sich in [3.14] mit Befestigungstechniken für die Großtafelbauweise. Sie beschreibt Ausführungsvarianten und geht hinsichtlich der Trockenrohdichte auf die Druckfestigkeit des Untergrundes und die damit zusammenhängende Ausziehfestigkeit von Dübeln ein.

[3.15] gibt eine umfangreiche Übersicht über marktgängige Dämmstoffhalter für vorgehängte, hinterlüftete Fassaden.

Ramm [3.16] dokumentiert ein neuartiges Verbundsystem für dreischichtige Außenwandplatten. Für die Verbindung der Betonvorsatzschicht mit der Betontragschicht werden Elemente aus glasfaserverstärktem Kunststoff eingesetzt. Dadurch wird die zwischen den Betonschichten liegende Dämmschicht weitgehend nur durch Druck und Schub beansprucht. Verschiedene Versagensarten der Verbindung werden analysiert.

Patente

Eine große Anzahl von verschiedenen Patenten bewegt sich im Bereich Dämmstoffbefestigungstechnik. Die im folgenden angeführten Beispiele befassen sich vor allem mit unkonventionellen Varianten, um eine zusätzliche Basis für die Ideenfindung zu schaffen. Dies hier ist ein beispielhafter Auszug aus sehr vielen, in der Patentliteratur veröffentlichten Befestigungsvarianten.

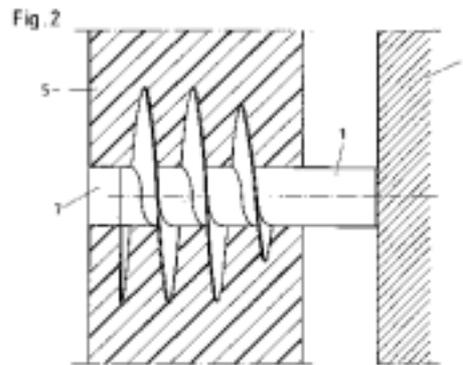


Abb. 2-1: Einschraublösung; Fig. 2 aus Pat. AT 404 271.

Die bereits oben angeführte Stellfuchs-System von Holzinger [4.1] dient der distanzierten Befestigung von Wärmedämmplatten an Wände und Decken. Ein schraubenförmiges umlaufendes Band am Schaft dient dem Halt als auch dem Einstellen der Position des Dämmstoffes (siehe Abb. 2-1). Hinsichtlich der Kraftübertragung ist vor allem die angeführte Schraubensteigung von 3,5 zu bemerken.

Das von Schugk [4.2] patentierte widerhakenförmige Element zur unsichtbaren Befestigung von Faserplatten und Faserplatten soll an die Wand geklebt oder gedübelt werden (siehe Abb. 2-2). Die Faserplatte wird auf den Aufsteckdorn aufgesteckt und wieder losgelassen. Hierbei verfangen sich die Widerhaken in der Faserstruktur und halten die Platte derart in der beabsichtigten Position. Der Halter ist völlig von der Faserplatte verborgen und bleibt verhüllt.

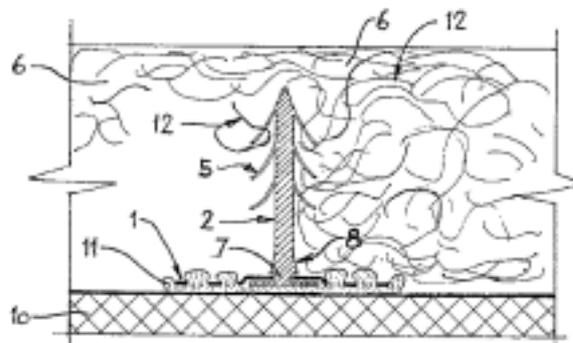


Abb. 2-2: Widerhakensystem für Faserplatten oder -matten; Pat. CH 657 652.

Wüthrich beschreibt in seinem Patent [4.3] die sogenannte Wabenrondelle (siehe Abb. 2-3). Diese ist ein Befestigungselement für die Montage von Gegenständen wie beispielsweise Rolladenführungschiene, Schilder, Hausnummern etc. an gedämmte Wände und dient dazu die Kräfte großflächig in den Dämmstoff einzuleiten. Die Firma Mage Gering GmbH vertreibt derzeit die Produkte von Wüthrich. Dazu gehören auch Montagezylinder und Montageplatte zur Einleitung höherer Kräfte beispielsweise für Jalousierückhalter, Kleiderhakenhalter, Schlosserunterlagen, Geländer und Vordächer.

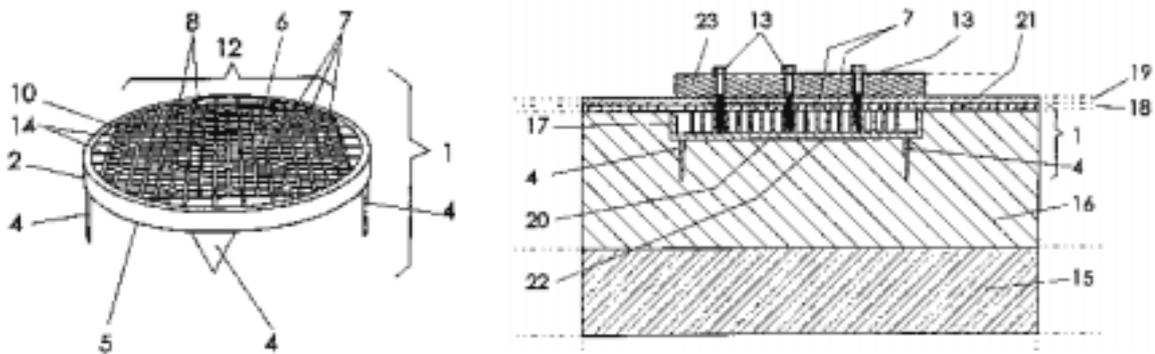


Abb. 2-3: Befestigungselement für Gegenstände an Wände; Pat. WO95/33899.

Johannes Van Loghem möchte mit seinem Patent [4.4] eine Verbindungstechnik für eine Holzschalenkonstruktion mit einer dazwischenliegenden Dämmschicht schützen (siehe Abb. 2-4). Hierbei legt er Wert darauf, dass kein metallischer Kontakt zwischen innerer und äußerer Schale herrscht.

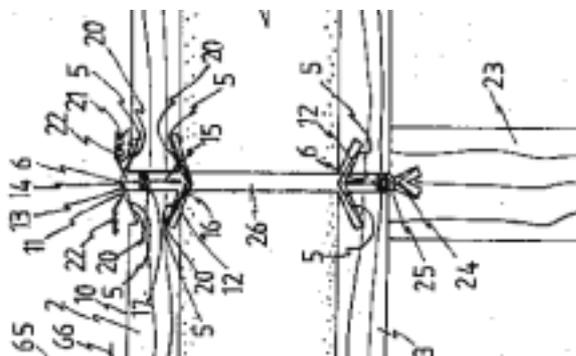


Abb. 2-4: Wärmebrückenfreie Befestigung zweier Holzschalen mit dazwischen liegendem Dämmelement; Pat. US4400925.

Brawn [4.5] beschreibt ebenfalls ein wärmebrückenfreies Befestigungselement, wobei er den Stoß zweier Dämmelemente verbindet. Er verwendet zur Verbindung u-förmige Metallschienen mit dazwischenliegenden isolierenden Materialien.

Suzor [4.6] erläutert ein Befestigungssystem für Dämmmaterialien, indem er unter und über dem Dämmstoff laufende Metallschienen zur Fixierung verwendet. Die unter dem Dämmstoff liegenden Befestigungsschienen sind an der Wand montiert. Durch den Dämmstoff laufende Stabelemente verbinden diese mit den obenliegenden Schienen.

Ein nicht für das Bauwesen gedachtes Befestigungselement für Dämmstoffe beschreibt Petzold in [4.7]. I-förmige Leisten dienen hier der Befestigung des Isoliermaterials in Schienenfahrzeugen.

Schock befasst sich in [4.9] mit dem wärmebrückenfreien Ausbilden von vorkragenden Wandteilen wie beispielsweise Balkonen oder Außenpodesten. Die zwischen diesen Wandteilen und dem Gebäude vorgesehene Isolation muss durch integrierte Druck- und Zügelemente abgestützt werden.

2.4 Dämmstoffe als verlorene Schalung

Höhere Ansprüche bezüglich der für die Befestigungstechnik wirkenden Kräfte werden im Falle des Einsatzes von Dämmstoffen als verlorene Schalung gestellt. Aufgrund der hohen Dichte von Frischbeton entstehen sehr hohe Drücke, die horizontal Kräfte auf die Schalung ausüben.

Das 1998 von Arora in GB veröffentlichte Werk [5.1] beschreibt ausführlich verschiedene Systeme des Einsatzes von EPS als verlorene Schalung mit ihren Vor- und Nachteilen. Rhodius, BECO, Agrisol und KEPS sind die Namen der Systeme, die im deutschen Sprachraum teilweise unter anderem Markennamen geführt werden.

In [5.2] und [5.3] beschreibt das British Board of Agreement zwei unterschiedliche Systeme, die sich vor allem in der Ausführung des Verbindungselementes von Schalungsinnen- und Schalungsaußenteil unterscheiden. In beiden umfassenden Veröffentlichungen wird auf alle Details und Eigenschaften eingegangen.

In [5.4] werden die Systeme Agrisol, Euromac 2, Isorast und Magu und ihre Differenzierung untereinander beschrieben. Auf Vor- und Nachteile sowie Abmessungen, Vielfältigkeit der Bausteinsortimente und die erreichbaren k-Werte wird Bezug genommen. Für das Kern-Haus-System wird in den Produktunterlagen [5.5] geworben. Hier erfolgt die Montage der Innen- und Außenteile der Schalung vorerst unabhängig voneinander. Im nächsten Schritt werden die Teile durch eine Stahlgitterleiter miteinander verbunden.

[5.6] wirbt für ein Schalungssystem indem die Materialien PVC, Polyethylen oder Polypropylen als verlorene Schalung zum Einsatz kommen. Diese Schalungsvariante ist für Spezialfälle gedacht, in welchen der Beton nicht mit aggressiven Medien in Kontakt kommen soll, oder andere Abdichtungseigenschaften erwünscht sind.

[5.7] beschreibt das Mantelbausystem Rastra. Hier wird mit Zement und Alt-EPS eine unbrennbare Wabenstruktur erzeugt und in die Form von ca. 2,2 m² großen Mantelbetonstandardelementen oder –randelementen gebracht. Diese Elemente können werksseitig zu vorgefertigten Wänden verklebt werden, die später auf der Baustelle mit Beton ausgegossen werden. Laut Hersteller können mit Wanddicken von 38 cm k-Werte von 0,33 W/m²K erreicht werden. Im Vergleich mit vergleichbaren Bauweisen sollen sich Kostenreduktionen bis zu 30 % erzielen lassen.

Von besonderem Interesse sind auch Informationen über die sich durch den Betondruck bildenden Kräfte in Schalungssystemen. Hier gibt es recht unterschiedliche Ansätze, wie die folgenden Beispiele zeigen.

[5.8] macht den horizontalen Fülldruck im wesentlichen abhängig von der Schüttgeschwindigkeit bzw. von der Füllgeschwindigkeit des Frischbetons auf die Schalung. Die ÖNORM B 3208 [5.9] wiederum basiert die Zulassung von Mantelsteinen hinsichtlich Betondruck auf einer zu erreichenden Bruchlast, welche sich aus der Kernschichtdicke des Betonkerns errechnet. [5.10] bezieht neben Füllhöhe und Steiggeschwindigkeit auch die Betonkonsistenz in die Berechnung ein. Alle Ansätze liegen jedoch unter dem physikalisch errechenbaren, hydrostatischen Druckpegel und sehen eine gewisse Obergrenze bei der Druckausbildung vor.

Mit [6.1] sei noch eine Literaturstelle angeführt, welche sich mit Schallschutz bzw. Schalllängsleitung beschäftigt.

2.5 Systematische Einteilung von Befestigungssystemen

Für die Befestigung von Wärmedämmstoffen an Fassaden, bzw. die Montage von Elementen an Wärmedämmstoffe liegt eine umfangreiche Zahl an Methoden zur Auswahl, die unterschiedlich viel Verbreitung am Markt gefunden haben. Abbildung 2-6 zeigt eine kleine Auswahl verschiedener markt-gängiger Varianten.

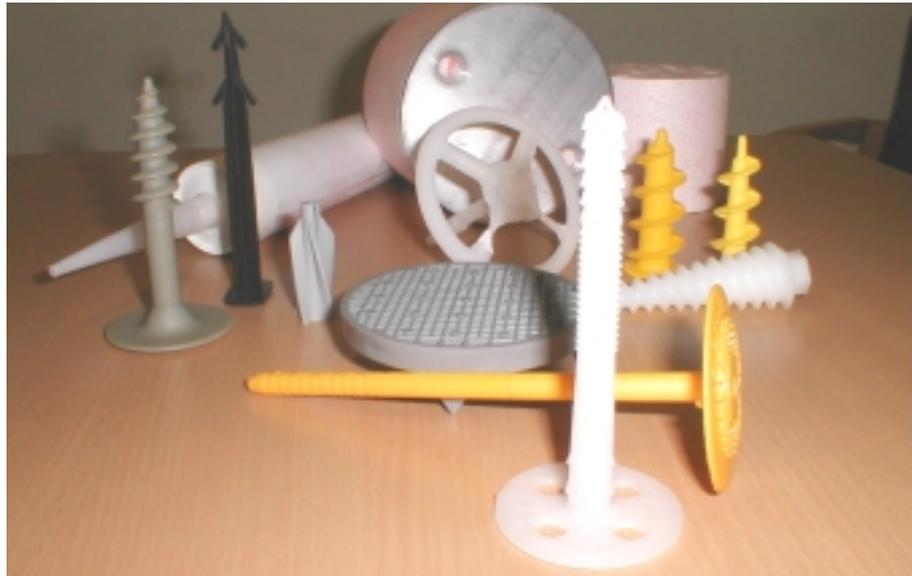


Abb. 2-5: Verschiedene am Markt eingesetzte Befestigungssysteme für Dämmstoffe.

Im wesentlichen handelt es sich immer um die selbe Problematik, der mehr oder weniger lokalen Krafteinleitung in den Dämmstoff, der geringe Steifigkeit und Festigkeit besitzt (Abb. 2-6). Die Wahl der Werkstoffe hinsichtlich ihrer Eigenschaften und der konstruktiven Ausformung des Verbindungselementes ist für die Krafteinleitung von großer Bedeutung.

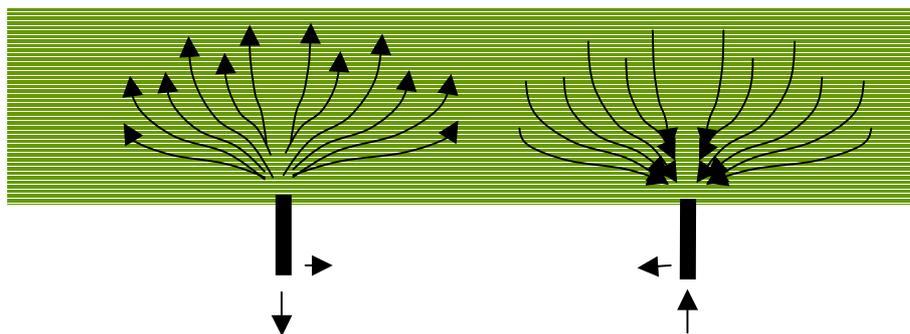


Abb. 2-6: Schematische Darstellung der Krafteinleitung in Dämmstoffsysteme.

Grundsätzlich gilt es die Kräfte möglichst sanft einzuleiten und keine Spannungsspitzen zu erzeugen. Die Materialpaarung Dämmstoff/Verbindungselement spielt daher neben der konstruktiven Ausformung eine große Rolle und muss hinsichtlich der Steifigkeiten sinnvoll gewählt werden. Abbildung 2-8 zeigt schematisch einige bestehende Ausführungsvarianten.

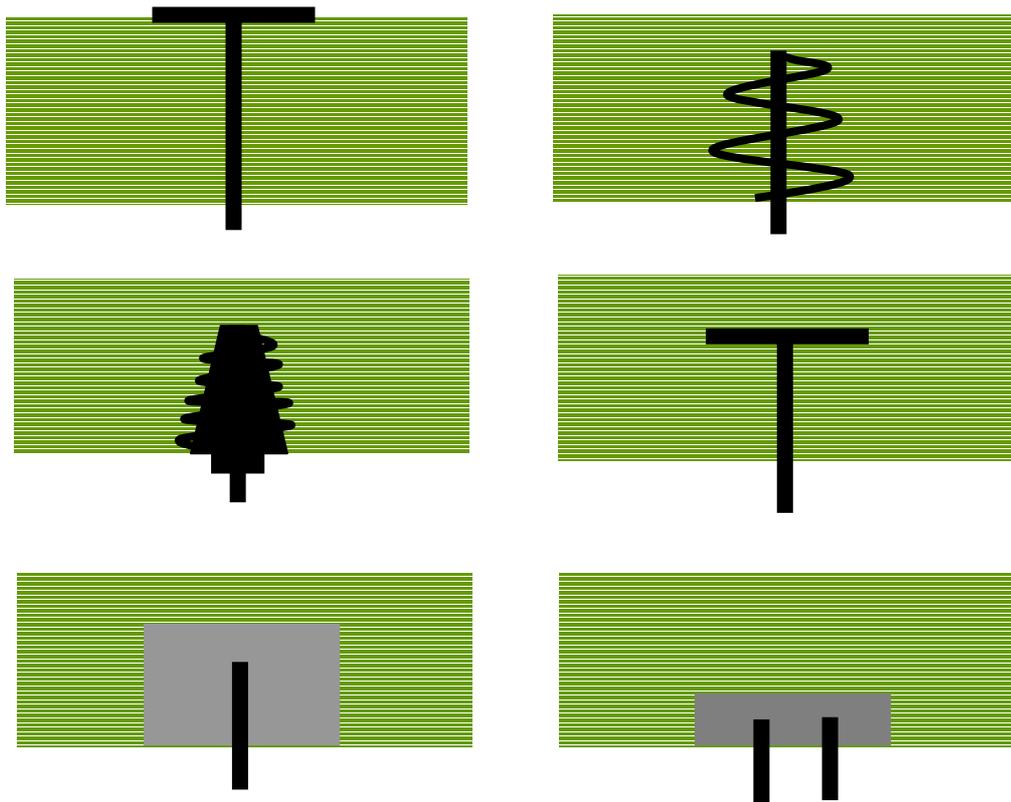


Abb. 2-7: Schematische Darstellung einiger bestehender Ausführungsvarianten für die mechanische Krafteinleitung in Dämmstoffsysteme.

2.6 Grundsätzliche Möglichkeiten zur Befestigung von Elementen an Dämmstoffen

Bei näherer Analyse lassen sich verschiedene Einteilungsmöglichkeiten treffen.

a.) Einteilung nach der stofflichen Verbindung

Bei selbsttragenden Dämmstoffen (Schäume; gut verflochtene Faserdämmstoffe; wärmedämmende, kompakte Stoffe – Materialien mit definierbaren elastischen Eigenschaften und Festigkeitseigenschaften) kann zwischen den folgenden Kraftübertragungsmechanismen unterschieden werden:

mechanisch:	Kraftschluss	Reibung
	Formschluss	Schrauben, Hinterschnittvarianten, Widerhacken, andere
chemisch:	Stoffschluss	Kleben

Dämmstoffe ohne definierbare Festigkeitseigenschaften (Partikel ohne Zusammenhalt, Verfüllmassen, u.a.m.) können unterteilt werden in

- Verfüllung in geeignete Hohlräume und
- Festigung mit abbindenden Mitteln.

b.) nach der Geometrie der Krafteinleitung

Die Krafteinleitung kann lokal oder großflächig erfolgen. Bei der Analyse der Extremfälle ergeben sich nun folgende Möglichkeiten:

punktförmige Krafteinleitung (z.B. Tellerdübel),

linienförmige Krafteinleitung (z.B. Befestigungsschienen) und

flächige Krafteinleitung (z.B. vollflächiges Kleben).

Abbildung 2-9 zeigt schematisch die getroffene Einteilungsvariante

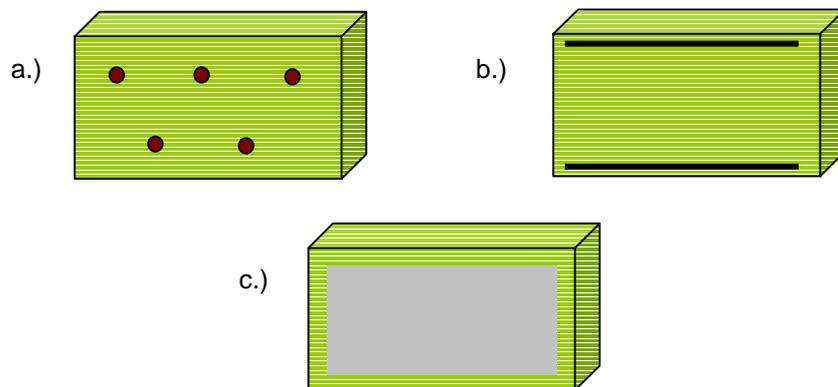


Abb. 2-8: Schematische Darstellung: a.) punktförmige; b.) linienförmige; c.) flächige Krafteinleitung

3 UNTERSUCHUNG DES VERHALTENS VON DÄMMSTOFFEN

Basis für die Beurteilung des von Befestigungssystemen stellen die mechanischen Kennwerte der Ausgangsstoffe, in unserem Falle insbesondere die des Dämmstoffes dar. Angaben aus der Literatur weisen meist relativ große Schwankungsbreiten auf. Aus diesem Grund werden jene Materialchargen, welche später zur Analyse der Befestigungselemente herangezogen werden, hinsichtlich Ihrer wirklich vorhandenen Steifigkeiten und Festigkeiten analysiert. Wie bereits schon im Kapitel Stand der Technik hingewiesen wird im Anhang ein Tabellenwerk darstellt, das eine umfassende Zusammenstellung der aus der Literatur bekannten sowie in dieser Arbeit ermittelten Kennwerte beinhaltet, die für die konstruktive Auslegung von Befestigungselementen notwendig sind.

3.1 Zugversuch

3.1.1 Versuchsaufbau und -durchführung

Die Charakterisierung der Hartschäume durch den Zugversuch wird von Herstellerseite nach EN1608 [2.19] oder DIN 54430 [2.20] durchgeführt. Die Versuchsdurchführung für die Untersuchungen innerhalb dieser Arbeit werden an die vorhandenen Prüfmittel angepasst. Andererseits wird die Durchführung mit denen der anderen Versuche abgestimmt, um Festigkeitswerte für vergleichbare Bedingungen zu erhalten. Dabei spielen gleiche Prüfgeschwindigkeit und Probengrößenordnungen eine Rolle. Abbildung 3-1 zeigt eine Skizze des Probekörpers.

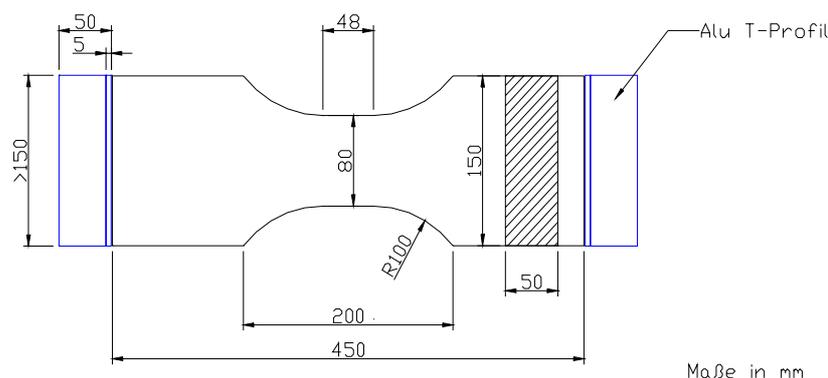


Abb. 3-1: Probekörper für den Zugversuch.

Die Probekörper werden mindestens 24 h in Normklima, 23°C und 50 % rel. Feuchte, gelagert. Die Versuche selbst werden auf einer Zug/Druck-Universalprüfmaschine vom Typ 4505 der Fa. INSTRON (High Wycomb, UK) wiederum im Normklima durchgeführt. Abbildung 3-2 zeigt den Versuchsaufbau.

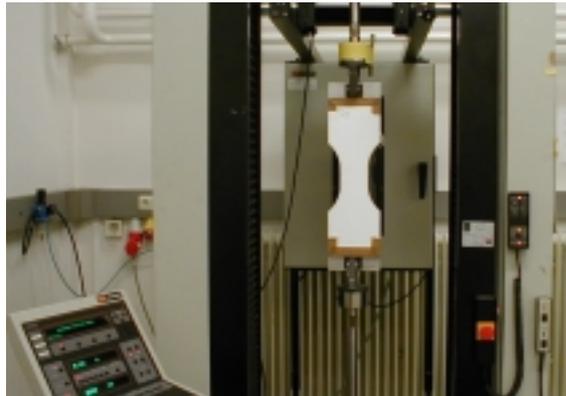


Abb. 3-2: Versuchsaufbau für den Zugversuch.

Bei einer konstanten Prüfgeschwindigkeit von 10 mm/min werden Kraft/Weg-Verläufe bis zum Bruch aufgezeichnet. Diese werden für weitere Auswertungen herangezogen. Die Wahl der Prüfgeschwindigkeit ergibt sich aufgrund der notwendigen Vergleichbarkeit der mechanischen mit den befestigungsspezifischen Untersuchungen. Die Festlegung der Prüfgeschwindigkeit wird im Formschlussversuch (siehe Abschnitt 3.5.1) durchgeführt.

Wie schon erwähnt, werden für jeden einzelnen Stab Kraft/Weg-Verläufe ermittelt. Die relevanten Abmessungen, wie Gesamtlänge L_Z , Breite B_Z und Dicke D_Z der Probekörper werden auf 1 mm genau bestimmt. Für die Ermittlung der Spannung σ_Z wird die Zugkraft F_Z auf den minimalen Probenquerschnitt $A_{Z,min}$ bezogen. So lässt sich die Zugfestigkeit σ_{ZB} wie folgt berechnen:

$$\sigma_{ZB} = \frac{F_{Z,max}}{A_{Z,min}}. \quad (3.1)$$

Um die Längsdehnung ϵ_z zu ermitteln, benötigt man die quasi-wirksame Einspannlänge als Bezug zum Weg des Querhauptes oder muss während des Versuches die Verformung durch einen Extensio- meter bestimmen. Aufgrund der geometrisch bedingten Querschnittsänderungen im Schulterstab, trägt jeder Querschnitt einen anderen Beitrag zur Längsdehnung bei. Mit der quasi-wirksamen Einspannlänge L_w ist die Länge eines Streifens mit dem Querschnitt $A_{Z,min}$ gemeint, der bei gleicher Belastung die gleiche Gesamtdeformation wie der Schulterstab aufweist. Für die Herleitung von L_w gilt, neben

$$F_{Z(x)} = \text{const}; D_{Z(x)} = \text{const}; E_{Z(x)} = \text{const};$$

$$\frac{F_Z}{D_Z \cdot E_Z} = \text{const} = C_Z \quad (3.2)$$

auch

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \epsilon_z = \frac{\sigma_z}{E_z} = \frac{F_z}{A_{Z(x)} \cdot E_z} = \frac{C_z}{B_{Z(x)}}. \quad (3.3)$$

Daraus ergibt sich durch Integrieren die Längenänderung

$$u = \Delta L_z = 2 \cdot C_z \cdot \int_0^{\frac{L_z}{2}} \frac{1}{B_{Z(x)}} dx \quad (3.4)$$

des Schulterstabes. Für einen Streifen mit den konstanten Querschnitt $A_{Z,\min}$ und der Länge L_w , der bei gleicher Kraft die gleiche Verformung aufweist, gilt

$$\frac{\Delta L_w}{L_w} = \frac{C_z}{B_{Z,\min}} \quad (3.5)$$

Aus (3.4) und (3.5) ergibt sich schließlich die quasi wirksame Einspannlänge

$$\Delta L_w = \Delta L_z$$

$$L_w = 2 \cdot B_{Z,\min} \cdot \int_0^{\frac{L_z}{2}} \frac{1}{B_{Z(x)}} dx \quad (3.6)$$

Werden nun die vorgegeben Dimensionen des Schulterstabs, siehe Abb. 3-1, für die Berechnung herangezogen, dann ergibt sich für L_w ein Wert von 306 mm. Daraus lassen sich nun Spannungs/Dehnungs-Verläufe ermitteln, Dehnungen (ϵ_{ZB} und ϵ_{ZR}) an signifikanten Stellen des Verlauf bestimmen und der äquivalente Modul E_z berechnen.

Der äquivalente Modul wird zwischen den Dehnungsschranken von 0.05 % und 0.25 % des Spannungs/Dehnungs-Verlaufes durch lineare Regression bestimmt. Die Abweichung zwischen der Bestimmung mit Hilfe der linearen Regression im Vergleich zur Bestimmung mittels Sekantenmethode liegt im Bereich von etwa 0.1 %. Um die Berechnungsweise mit der quasi-wirksamen Einspannlänge zu verifizieren, wird ein Versuch für EPS-W30 mit einem Längsdehnungsaufnehmer der Fa. Instron durchgeführt. Dabei ergibt sich eine Abweichung von zirka 10% im Vergleich zu dem Durchschnitt des äquivalenten Modul E_z der Versuchsserie. Aufgrund der Befestigung des Aufnehmers kam es dabei zu einem gezielten und verfrühten Bruch, warum auch bei der weiteren Versuchsdurchführung auf die Längsdehnungsaufnehmer verzichtet wird. Nicht nur Zugfestigkeit und äquivalente Modul, werden für jede Type gemittelt, sondern auch gemittelte Verläufe der einzelnen Typen gebildet.

3.1.2 Ergebnisse

Aus den Kraft/Weg-Verläufen der Zugversuche werden der äquivalente Modul E_z , die Reißdehnung ϵ_{ZR} (entspricht ϵ_{ZB} für die aufgenommenen Kurven) und die Zugfestigkeit σ_{ZB} ermittelt. Die erhaltenen Ergebnisse sind in Tabelle 3-1 dargestellt.

Tabelle 3-1: Ergebnisse aus den Zugversuch für die unterschiedlichen Hartschaumtypen. Dabei gibt n_{gew} die Anzahl der zur Mittelwertbildung verwendeten Probekörper im Verhältnis zu den insgesamt geprüften an.

	n_{gew} []	ρ [kg/m ³]	E_Z [MPa]	σ_{ZB} [kPa]	ϵ_{ZR} [%]
EPS-F	4 / 5	16.0 ± 0.2	7.3 ± 0.1	125 ± 9	2.2 ± 0.2
EPS-W20	3 / 5	20.4 ± 0.3	10.7 ± 0.2	144 ± 8	1.5 ± 0.1
EPS-W25	5 / 5	26.1 ± 0.1	13.0 ± 0.3	178 ± 8	1.7 ± 0.1
EPS-W30	2 / 5	32.0 ± 0.9	16.9 ± 0.3	189 ± 20	1.4 ± 0.1
XPS-R035	3 / 3	32.3 ± 0.2	17.5 ± 0.3	476 ± 6	5.3 ± 0.1

Vergleicht man nun für die vier EPS-Typen die Spannungs/Dehnungs-Verläufe aus dem Zugversuch, so lassen sich einige Zusammenhänge erkennen. Wie aus Abb. 3-3 hervorgeht, erreichen die Kurven mit höher werdender Dichte eine größere Maximalspannung. Auch die Steigung der Kurven nimmt mit höher werdender Dichte zu. Diese Tatsachen spiegeln sich in Zugfestigkeit und äquivalenten Modul wider. Die Reißdehnung für EPS-F ist etwa eineinhalbmals größer als für die anderen EPS-Typen. Diese weisen untereinander kaum Unterschiede in punkto Reißdehnung auf.

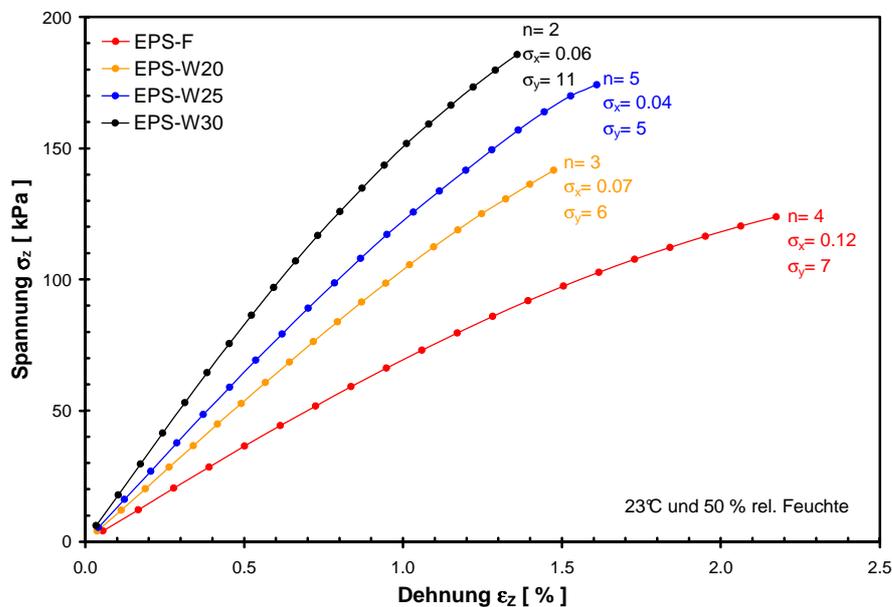


Abb. 3-3: Darstellung der Spannungs/Dehnungs-Verläufe des Zugversuchs für EPS unterschiedlicher Dichte.

Der Vergleich zwischen EPS und XPS gleicher Dichte ist in Abb. 3-4 dargestellt. Dabei zeigt sich, daß XPS eine deutlich höhere Zugfestigkeit und Reißdehnung aufweist. Die Kennwerte für XPS sind fast

dreimal so hoch wie für EPS. Hingegen für den äquivalenten Modul bewegen sich die Unterschiede zwischen den beiden im Bereich der Streuung. Eine mögliche Erklärung liegt im Aufbau der beiden Typen. Für kleinere Verformungen spielt die Polystyrolmatrix des Schaums eine Rolle, daher weisen beide aufgrund der gleichen Anteile an Polystyrol (d.h. nahezu gleiche Dichte) einen ähnlichen äquivalenten Modul auf. Das Bruchgeschehen und die damit verbundenen Festigkeitswerte werden von der Zellstruktur und der Verschweißung der Schaumzellen (Kugel oder Polyeder) geprägt. EPS weist auf Grund der Struktur sicherlich mehr Fehlstellen auf. Es ist daher anzunehmen, dass deshalb eine geringere Reißdehnung und Zugfestigkeit als bei dem homogeneren XPS auftritt.

Um den Einfluss der Dichte auf den äquivalenten Modul und die Zugfestigkeit zu zeigen, sind in Abb. 3-5 die beiden Eigenschaften über der Dichte dargestellt. Dabei zeigt sich der erwartete lineare Zusammenhang zwischen der Dichte und den Kennwerten.

Weiters von Interesse ist der Vergleich der erhaltenen Ergebnisse aus dem Zugversuch mit bekannten Kennwerten aus der Literatur. In Abb. 3-6 ist eine Gegenüberstellung für den Zug-Modul und die Zugfestigkeit dargestellt. Hier sind klare Unterschiede zu erkennen. Laut [2.15] sind klar höhere Zugfestigkeiten jedoch geringere Moduli zu erwarten. Die Unterschiede in der Festigkeit können in unterschiedlichem Prüfablauf und -aufbau liegen, sind jedoch für verschiedene Dichten tendenziell gleich. Die Bestimmungsweise der Moduli nach DIN 53430 [2.20] geht nicht hervor, so dass die geringeren Werte vermutlich aufgrund anderer Auswertungsbereiche hervorgerufen werden. Diese Tatsachen bestätigen jedoch, dass es sinnvoll ist, Zugversuche mit vergleichbaren Prüfbedingungen durchzuführen. Damit stehen für die restlichen Versuche in dieser Arbeit vergleichbare Kennwerte zur Verfügung.

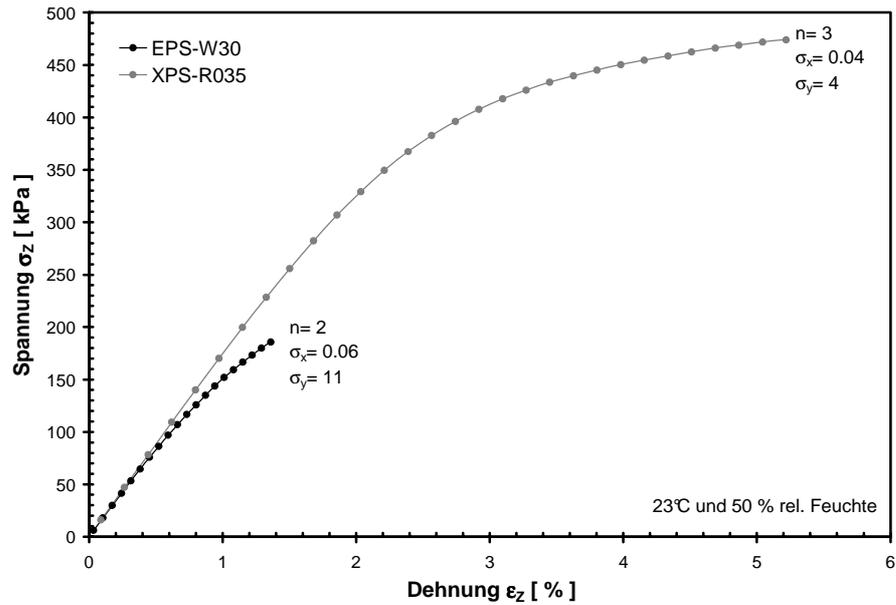


Abb. 3-4: Vergleich der Spannungs/Dehnungs-Verläufe des Zugversuchs für EPS und XPS gleicher Dichte.

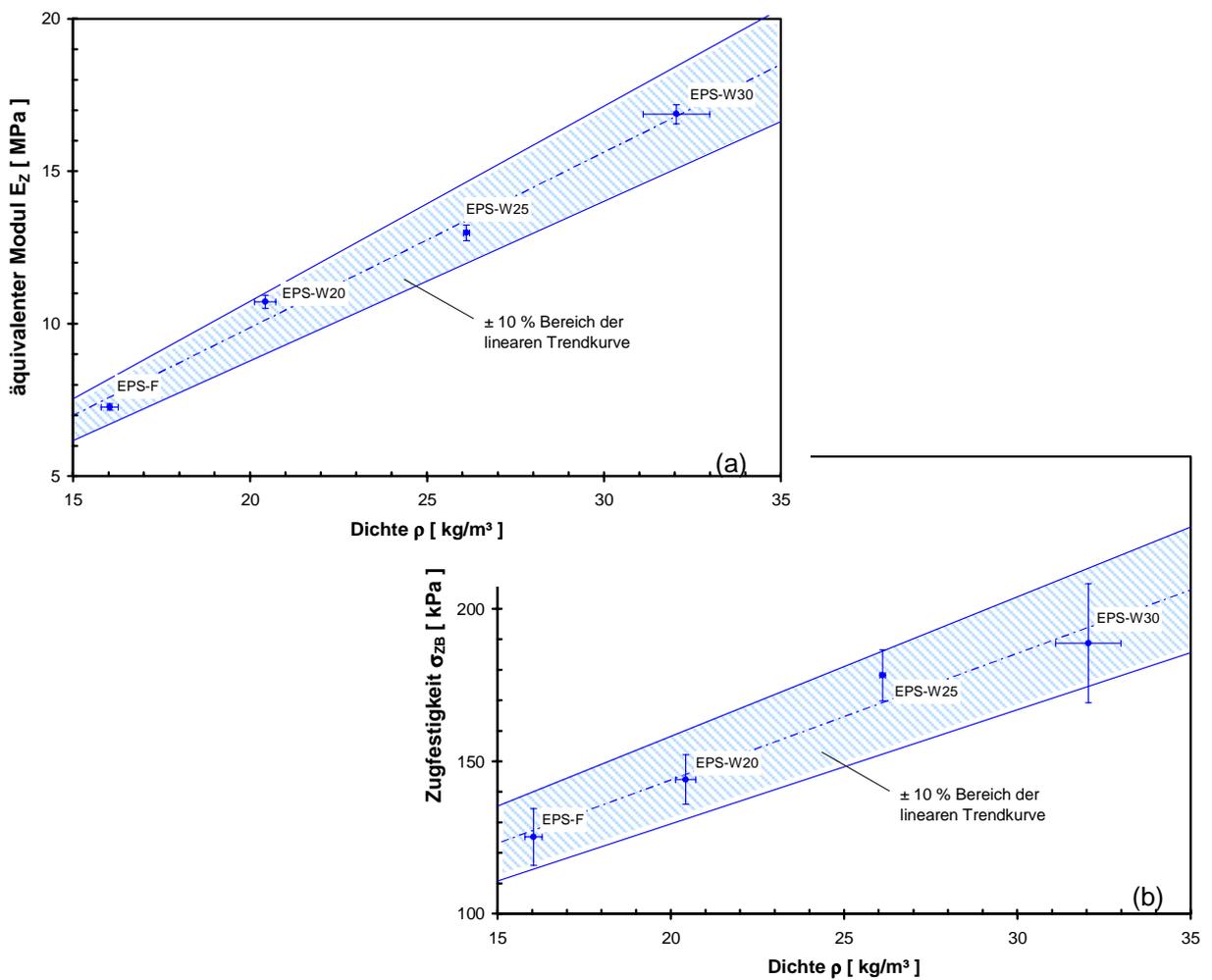


Abb. 3-5: Zusammenhang zwischen (a) Dichte und äquivalenten Modul von EPS bzw. (b) zwischen Dichte und Zugfestigkeit von EPS.

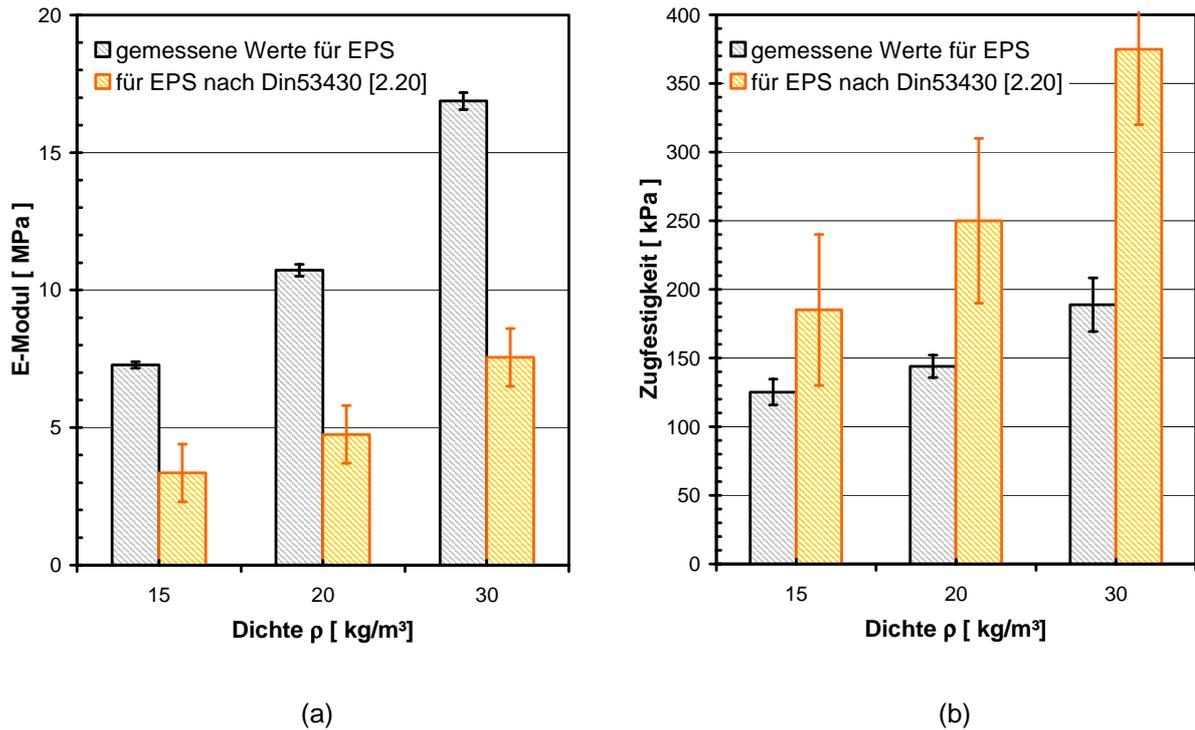


Abb. 3-6: Vergleich von gemessenen Kennwerten für EPS mit Kennwerten aus der Literatur [2.15] für unterschiedliche Dichten, (a) zeigt Zug-Modul und (b) die Zugfestigkeit aus der Zugprüfung.

3.1.3 FEM-Analyse

Um die erhaltenen Materialkennwerte zu verifizieren, werden analoge FEM-Berechnungen durchgeführt. In Abb. 3-7 werden die Ergebnisse des Zugversuches qualitativ mit einer Simulation verglichen. Man erkennt bereits hier, dass die zum Bruch führenden Spannungen an den Rändern gegenüber der durchschnittlichen Spannung um ca. 30 % erhöht sind. Die gemessene Zugfestigkeit liegt dabei im Bereich dieser durchschnittlichen Werte. Des Weiteren zeigt sich, dass die aus der Simulation erhaltene Gesamtverformung mit den gemessenen Werten übereinstimmt.

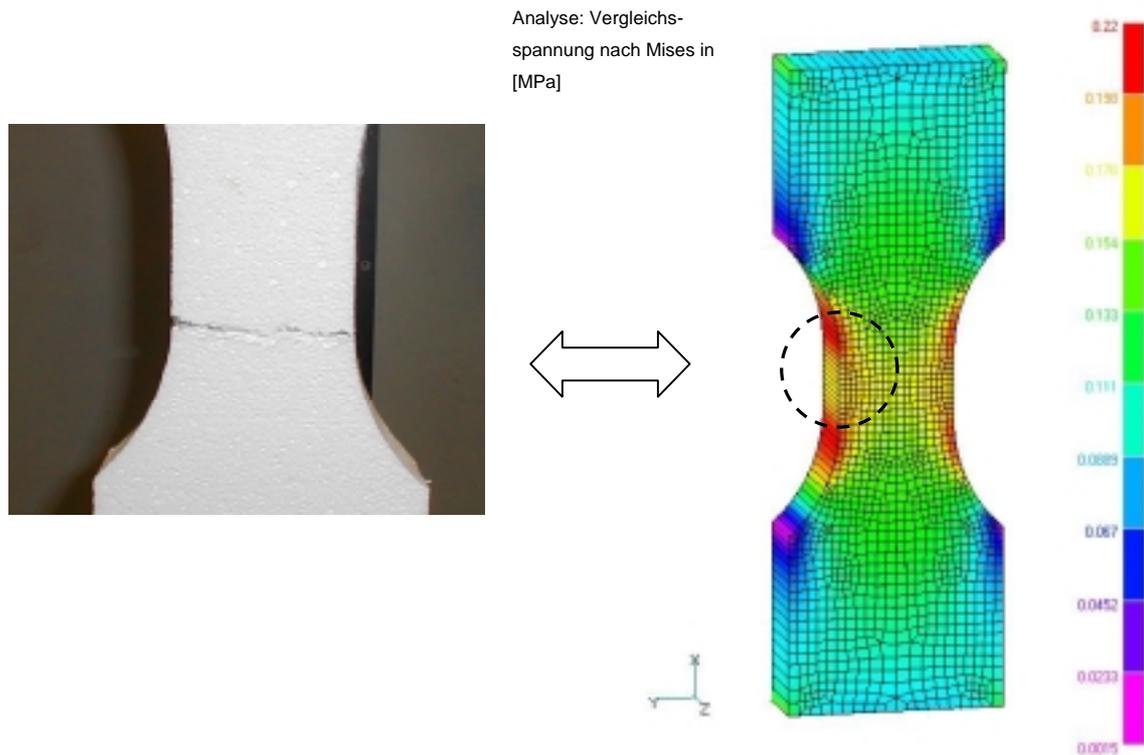


Abb. 3-7: Gegenüberstellung der Ergebnisse aus dem Zugversuch mit Analysen mittels Methode der finiten Elemente.

3.2 Biegeversuch

Zusätzlich zu den Zugversuchen wurden Biegeversuche durchgeführt um weitere Vergleichswerte zu den Literaturkennwerten zu erhalten. Außerdem steht mit dem Biegeversuch eine sehr schnell durchführbare Methode zur Verfügung.

3.2.1 Versuchsaufbau und -durchführung

Eine weitere Charakterisierung von Hartschaumstoffen kann mit Hilfe des Biegeversuchs durchgeführt werden, z.B. nach DIN53423 [2.21]. Für die Durchführung im Rahmen dieser Arbeit wird der Versuchsaufbau leicht modifiziert bzw. an die gegebenen Prüfmittel und Probekörper angepasst.

Die Probekörper, einfache Quader mit den Abmessungen 400x150x50 mm werden zuerst mindestens 24 h in Normklima, 23°C und 50% rel. Feuchte, gelagert und schließlich mit einer Zug/Druck-Universalprüfmaschine vom Typ 4505 der Fa. INSTRON (High Wycomb, UK) wiederum im Normklima geprüft. In Abb. 3-8 ist der Versuchsaufbau dargestellt. Bei einer konstanten Prüfgeschwindigkeit von 10 mm/min werden Kraft/Weg-Verläufe bis zum Bruch aufgezeichnet.



Abb. 3-8: Versuchsaufbau für den Biegeversuch

Die relevanten Abmessungen, wie Länge L_B , Breite B_B und Dicke D_B der Probekörper werden auf 1 mm genau bestimmt. Die Ermittlung der Spannung σ_B erfolgt in Anlehnung an DIN53423 [2.21] und ergibt sich aus

$$\sigma_B = \frac{M}{W} . \quad (3.7)$$

Das Biegemoment M lässt sich nach

$$M = \frac{F_B \cdot l_s}{4} \quad (3.8)$$

berechnen, die dafür benötigte Stützweite l_s zwischen den beiden Auflagepunkten der Probe beträgt für den Versuchsaufbau 320 mm. F_B ist die gemessene Biegekraft. Das Widerstandsmoment W für rechteckige Querschnitte ergibt sich aus

$$W = \frac{B_B \cdot H_B^2}{6} . \quad (3.9)$$

Die Biegefestigkeit σ_{BB} wird mit Hilfe des Höchstwert $F_{B,max}$ der gemessenen Kraftwerte bestimmt. Für die Berechnung der Dehnungswerte und weiteren Auswertungen müssen die gemessenen Wegwerte w_B bezüglich ihres Nullpunktes korrigiert werden. Dafür werden Kraft/Wege-Paare bei 10 %, 20 % und 30 % von $F_{B,max}$ zur Bestimmung einer quadratischen Funktion herangezogen, und mit Hilfe dieser Funktion wird eine Nullstelle w_{B0} berechnet. Die Dehnung ϵ_B ergibt sich daher wie folgt

$$\epsilon_B = \frac{6 \cdot (w_B - w_{B0}) \cdot D_B}{l_s^2} . \quad (3.10)$$

So lassen sich nun Spannungs/Dehnungs-Verläufe ermitteln, Dehnungen (z.B. ϵ_{BB}) an signifikanten Stellen des Verlaufs bestimmen und der Biege-Modul E_B berechnen. Der Biege-Modul wird zwischen den Dehnungsschranken von 0.05 % und 0.25 % des Spannungs/Dehnungs-Verlaufes durch lineare Regression bestimmt.

3.2.2 Ergebnisse

Aus den gemessenen Kraft/Weg-Verläufen werden der Biege-Modul E_B , die Zugfestigkeit σ_{ZB} und die dazugehörige Dehnung ϵ_{BB} ermittelt. Die erhaltenen Ergebnisse sind in Tabelle 3-2 dargestellt.

Tabelle 3-2: Ergebnisse aus den Biegeversuch für die unterschiedlichen Hartschaumtypen und Kork. Dabei gibt n_{gew} die Anzahl der zur Mittelwertbildung verwendeten Probekörper im Verhältnis zu den insgesamt geprüften an.

	n_{gew} []	ρ [kg /m ³]	E_B [MPa]	σ_{BB} [kPa]	ϵ_{BB} [%]
EPS-F	5 / 6	16.2 ± 0.4	5.3 ± 0.2	133 ± 4	4.4 ± 0.5
EPS-W20	5 / 6	22.3 ± 0.5	7.7 ± 0.3	158 ± 10	2.4 ± 0.2
EPS-W25	5 / 5	26.5 ± 0.3	9.9 ± 0.5	225 ± 7	2.9 ± 0.2
EPS-W30	4 / 5	30.6 ± 0.7	13.3 ± 0.7	256 ± 5	2.2 ± 0.1
XPS-R035	4 / 7	32.1 ± 0.1	15.1 ± 0.2	530 ± 9	21.5 ± 1.9
KORK	3 / 3	102.7 ± 1.8	2.4 ± 0.0	79 ± 4	4.8 ± 1.0

Die Spannungs/Dehnungs-Verläufe für EPS unterschiedlicher Dichte sind in Abb. 3-9 dargestellt. Der Vergleich zwischen EPS, XPS gleicher Dichte und Kork wird in Abb. 3-10 gezeigt. Aus den beiden Abbildungen geht ein ähnliches Bild wie beim Zugversuch hervor. Mit zunehmender Dichte steigt der Biege-Modul und die Biegefestigkeit für EPS. Bei EPS-F ist eine klar höhere Bruchdehnung im Vergleich zu den restlichen EPS-Typen feststellbar, EPS-W25 zeigt diesbezüglich etwas höhere Werte als EPS-W20 und EPS-W30.

Für den Biege-Modul zeigen sich im Vergleich zwischen XPS und EPS gleicher Dichte kaum Unterschiede, wobei XPS eine leicht höheren Modul aufweist. Eine deutlich höhere Biegefestigkeit und höhere Bruchdehnung als EPS weist XPS auf. Dabei ist der Kennwert für die Festigkeit mehr als zweimal so hoch wie bei EPS, hingegen für die Bruchdehnung fast 10mal so hoch. Wie beim Zugversuch dürfte für die Festigkeit die unterschiedliche Zellstruktur eine entscheidende Rolle spielen. Kork weist bei gleichen Bruchdehnungswerten wie EPS-F deutlich niedrigere Steifigkeits- und Festigkeitswerte auf.

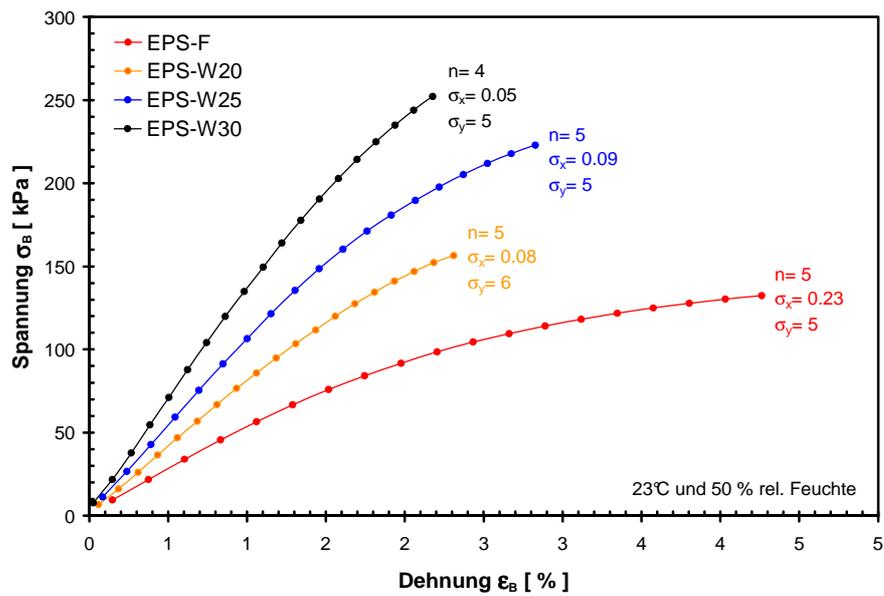


Abb. 3-9: Darstellung der Spannungs/Dehnungs-Verläufe des Biegeversuchs für EPS unterschiedlicher Dichte.

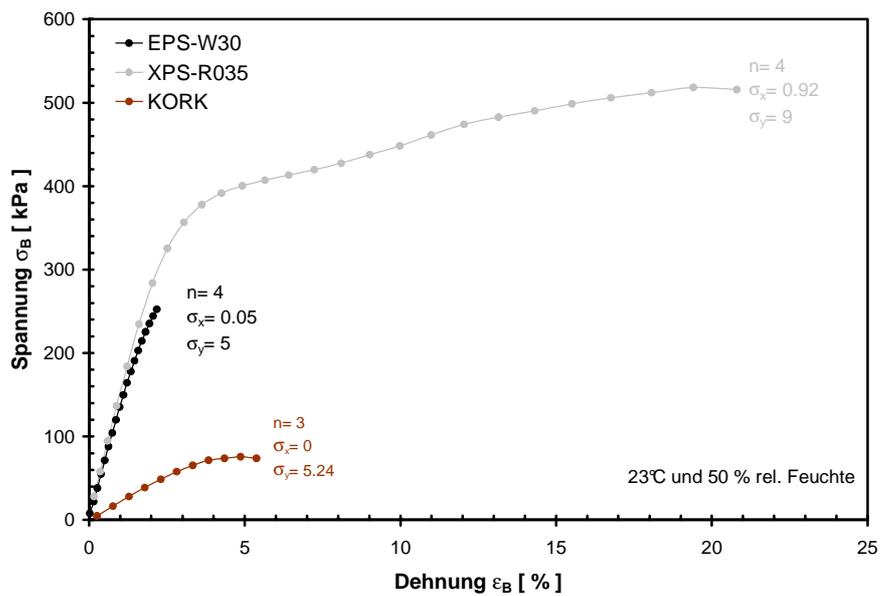
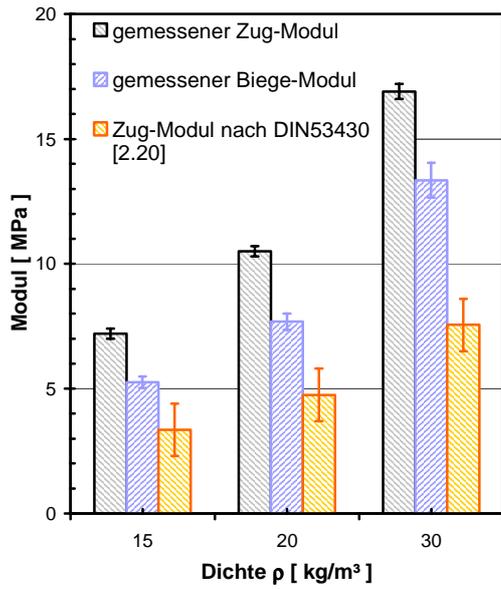
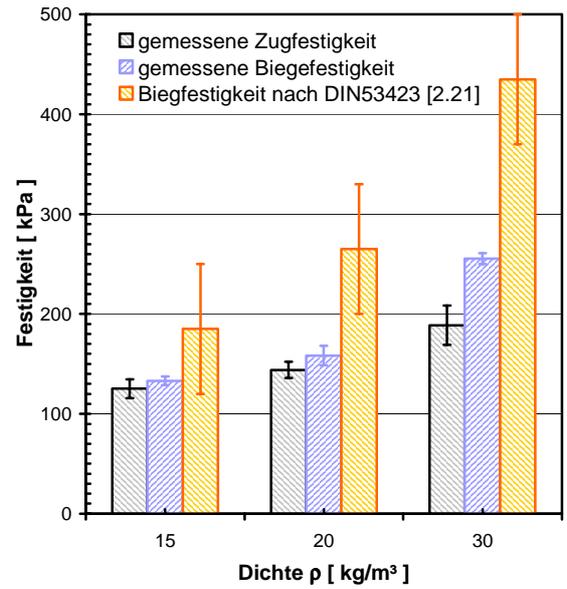


Abb. 3-10: Vergleich der Spannungs/Dehnungs-Verläufe des Biegeversuchs für EPS, XPS gleicher Dichte und Kork.

Wie in Abb. 3-11 (a) dargestellt, sind die ermittelten Biegefestigkeiten für EPS unterschiedlicher Dichte klar niedriger als die bekannten Kennwerte aus der Literatur. Vergleicht man die gemessenen Moduli aus Biege- und Zugversuch, siehe Abb. 3-11 (b), so sind die erhaltenen Kennwerte aus dem Zugversuch etwas höher. Die Biege-Moduli liegen somit zwischen den gemessenen und aus der Literatur bekannten Kennwerte für den E-Modul aus dem Zugversuch.



(a)



(b)

Abb. 3-11: Vergleiche für EPS unterschiedlicher Dichten: (a) zeigt einen Vergleich zwischen verschiedenen Moduli aus Biege- und Zugversuch und (b) zeigt unterschiedliche Festigkeiten im Vergleich.

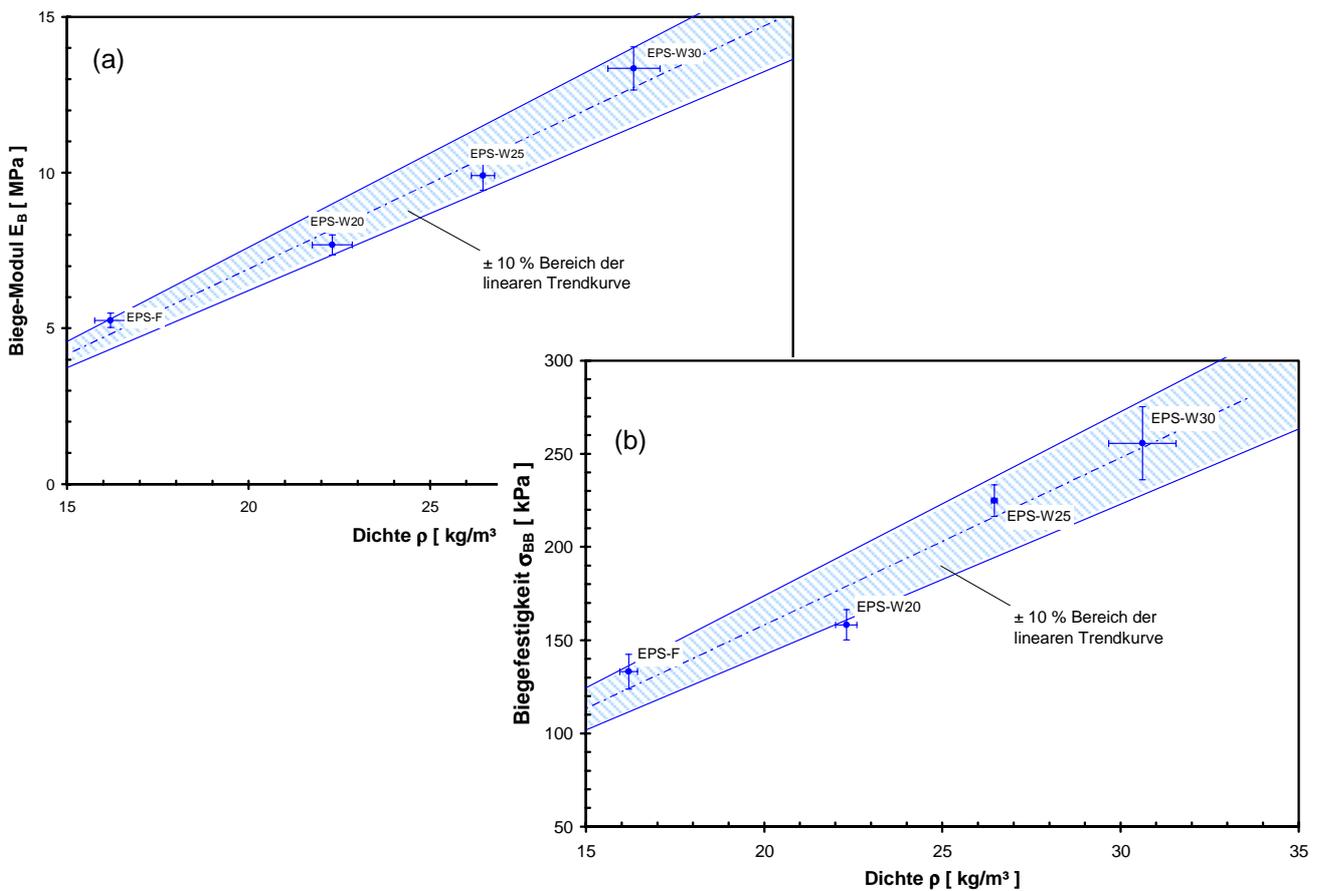


Abb. 3-12: Zusammenhang (a) zwischen Dichte und Biege-Modul von EPS bzw. (a) zwischen Dichte und Biegefestigkeit von EPS

Um den Einfluss der Dichte auf den Biege-Modul und die Biegefestigkeit zu zeigen, sind in Abb. 3-12 die beiden Eigenschaften für EPS über der Dichte dargestellt. Wieder kann eine lineare Trendkurve über die Kennwerte gelegt werden.

Die gewonnen Kennwerte aus dem Biegeversuch bestätigen die gemessenen Werte aus dem Zugversuch. Des weiteren zeigen sich für die unterschiedlichen Typen die selben Tendenzen und auch der lineare Zusammenhang zwischen der Dichte und mechanischen Größen kann gezeigt werden.

3.2.3 FEM-Analyse

Eine analoge FEM-Analyse wird mit den aus den Versuchen erhalten Biege-Moduli durchgeführt. In Abb. 3-13 (a) werden Kraft/Weg-Kurven aus der Messung mit den Ergebnissen aus der Berechnung verglichen. Wie aus dem Diagramm hervorgeht, lässt sich der Versuch sehr gut reproduzieren. Im nächsten Schritt wird die gemessene Bruchspannung mit der Hauptnormalspannung an der Probenunterseite verglichen, siehe Abb. 3-13 (b). Aus den Spannungswerten geht hervor, dass die Zugnormalspannungen an der Unterseite der Probe das Bruchgeschehen einleiten.

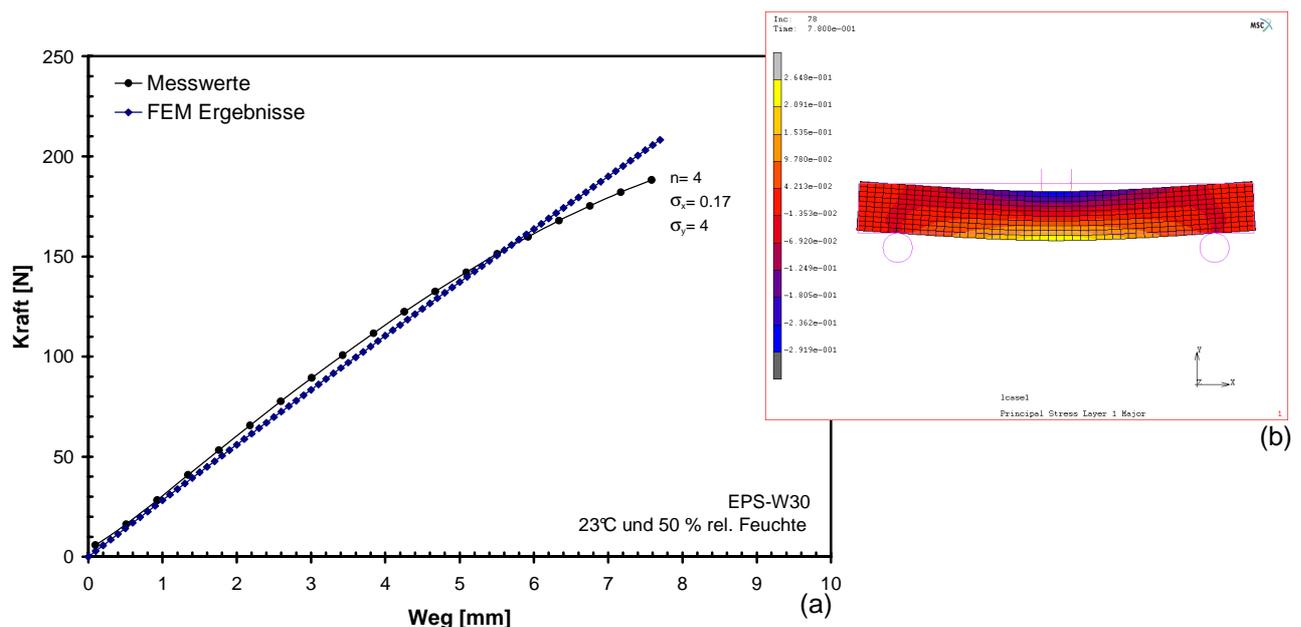


Abb. 3-13: Vergleich zwischen Messung und Berechnung für den Biegeversuch.

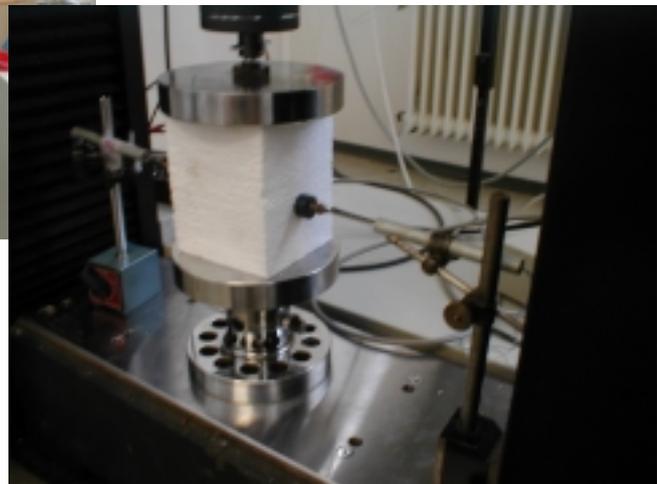
3.3 Druckversuch zur Querkontraktionsmessung

Zur Ermittlung der Querkontraktion werden Druckversuche an verschiedenen Hartschaumtypen durchgeführt. Kennwerte aus der Literatur konnten nicht gefunden werden, sodass die Querkontraktion für die Berechnungen angenommen werden musste. Dabei gehen die Meinungen über die Größe der Querkontraktion sehr weit auseinander.

Die Messung erfolgt während eines Druckversuches. Dabei werden Quader mit den Abmessungen 100 x 100 x 150 mm verwendet. Geplant sind Messungen für EPS-F, EPS-W25, EPS-W30 und XPS-R035. Abbildung 3-14 (a) zeigt den verwendeten Versuchsaufbau. In Abb. 3-14 (b) sind die angebrachten Aufnehmer für die Querdehnung dargestellt.



(a)



(b)

Abb. 3-14: (a) Links ist ein Überblick über den Versuchsaufbau dargestellt, (b) rechts sind die verwendeten Querdehnungsaufnehmer dargestellt.

Im ersten Schritt wird ein Vorversuch durchgeführt. Dabei wird der Probekörper ca. 15% gestaucht die Kraft/Weg-Kurven und die dazugehörige Längenänderung in Querrichtung an zwei Stellen gemessen. Wie sich schon der erste Versuch zeigt, kann mit dem vorhandenen Aufbau die Querkontraktion nicht genau bestimmt werden. Die max. auftretende Querverschiebung liegt im Bereich von 0.25 mm. Daher werden keine weiteren Versuche mehr durchgeführt. Aufgrund der geringen Verschiebung kann davon ausgegangen werden, dass eine Querkontraktion für Hartschaumdämmstoffe geringer als 0.05 vorliegt. Für weitere Simulationen wird daher dieser Wert als Querkontraktion verwendet.

3.4 Bruchmechanische Untersuchungen

Als Bruch bezeichnet man die zum Verlust der Tragfähigkeit eines Werkstoffes führende Werkstofftrennung in makroskopischen Bereichen.

Durch die Werkstoffpaarung eines meist sehr weichen Dämmstoffes (geringer Modul und geringe Festigkeit) mit einem um Größenordnungen steiferen Befestigungselement werden durch die Lastein-

leitung in den meisten Fällen Spannungsspitzen erzeugt. Wird eine Konstruktion überlastet, so erfolgt ausgehend von diesen Spannungsspitzen das Versagen.

Bruchmechanische Ansätze gehen im allgemeinen von einem fehlerbehafteten, nicht idealen Werkstoff aus. Gemessen werden bruchmechanische Kennwerte durch Belastung von Probekörpern mit definiert eingebrachten Anrissen. Die über die Festigkeit des Werkstoffes hinausgehende bruchmechanische Charakterisierung wird in dieser Arbeit herangezogen, um das Versagen des Werkstoffes ausgehend von den erzeugten Spannungsspitzen zu analysieren.

Für die gegebene Werkstoffgruppe ist die Durchführung dieser Methodik grundsätzlich neu. Für die Charakterisierung der Dämmstoffe durch Bruchmechanik können in der Literatur keine Hinweise gefunden werden. Aufgrund der Struktur kann jedoch von einer sehr guten Eignung dieser Analyseform ausgegangen werden. Neue Erkenntnisse sind nicht nur für Aufschlüsse über das Verhalten der einzelnen Typen zueinander, sondern auch für Vergleiche zu anderen Werkstoffen von Bedeutung.

3.4.1 Versuchsablauf und -durchführung

Im ersten Schritt werden Proben durch Belastung in Zugrichtung untersucht. Dabei werden auch unterschiedliche Hartschaumtypen verwendet, und die Risslänge und Rissart variiert. Im zweiten Schritt wird das Bruchverhalten, hervorgerufen durch eine Dreipunktsbiegung, für unterschiedliche Risslängen und Rissarten für EPS-W30 untersucht. Abbildung 3-15 zeigt die verwendeten Probekörper und ihre Belastungsrichtung. Vor jeder Prüfung eines Probekörpers wird mittels einer scharfen Messerklinge ein 2 mm bis 3 mm tiefer Anriss eingebracht. Dabei wird vor allem auf die Gleichmäßigkeit des Anrisses geachtet. Die Durchführung erfolgt analog zu dem Zugversuch bzw. Biegeversuch. Die zwei Versuchsaufbauten gehen aus Abb. 3-16 hervor.

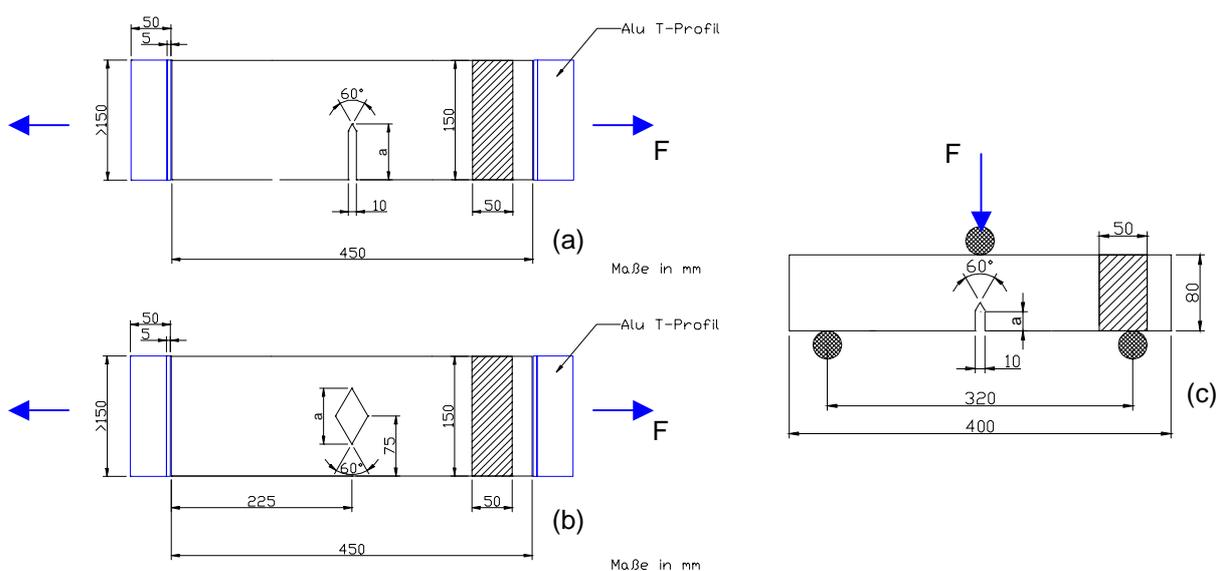


Abb. 3-15: Darstellung des SENT (a); des CCT (b) und des SENB3 (c) Probekörpers.



Abb. 3-16: Versuchsaufbau für Risszähigkeitsuntersuchung.

Es werden neben dem Spannungsintensitätsfaktor K_I und die Energiefreisetzungsrate G_I ermittelt. Die für die Berechnungen relevanten Probendimensionen, wie Breite W , Dicke B , Länge D und die Risslänge a werden auf 1 mm genau bestimmt. Für die Untersuchung der SENB3-Proben beträgt die Stützweite S zwischen den beiden Auflagern 320 mm. Die Versuchsdurchführung selbst erfolgt wiederum bei Normklima (23°C 50% rel. Feuchte).

Der kritische Spannungsintensitätsfaktor, auch Risszähigkeit genannt, der schließlich zur Rissbildung führt, ergibt sich nach

$$K_{IC} = \frac{F_{ZR,max}}{B \cdot W^{1/2}} \cdot Y(a, W). \quad (3.11)$$

Für die Berechnung gibt es nach [2.24] drei Typen von Kraft/Weg-Verläufen, die zur Auswahl der Kraft herangezogen werden können. Die gemessenen Verläufe entsprechen einem nahezu linear-elastischem Verhalten (Typ 3), so dass für die Ermittlungen innerhalb dieser Arbeit immer die maximale Kraft für die Berechnung verwendet wird.

Der Geometriekorrekturfaktor Y (Spannungsintensitätskorrekturfaktor) hängt nicht nur von der Risslänge und der Probenbreite ab, sondern auch von der Probenart. So werden für diese Berechnungen

für den CCT, den SENT und den SENB3 Probekörper nach [2.25] folgende Wide-Range Approximationen verwendet:

$$Y_{CCT} = \sqrt{\frac{\pi \cdot a}{W} \sec \frac{\pi \cdot a}{W}} \cdot \left[1 - 0.025 \cdot \left(\frac{2a}{W} \right)^2 + 0.06 \cdot \left(\frac{2a}{W} \right)^4 \right] \quad (3.12)$$

$$Y_{SENT} = \frac{\sqrt{2 \tan \frac{\pi \cdot a}{2W}}}{\cos \frac{\pi \cdot a}{2W}} \cdot \left[0.752 + 2.02 \left(\frac{a}{W} \right) + 0.37 \left(1 - \sin \frac{\pi \cdot a}{2W} \right) \right] \quad (3.13)$$

$$Y_{SENB3} = \frac{3 \cdot \frac{S}{W} \sqrt{\frac{a}{W}}}{2 \left(1 + 2 \frac{a}{W} \right) \left(1 - \frac{a}{W} \right)^{\frac{3}{2}}} \cdot \left[1.99 - \frac{a}{W} \left(1 - \frac{a}{W} \right) \left\{ 2.15 - 3.93 \frac{a}{W} + 2.7 \left(\frac{a}{W} \right)^2 \right\} \right] \quad (3.14)$$

Diese werden auch für die Ermittlung der kritischen Energiefreisetzungsrate G_{IC} benötigt. So wie Y einen Korrekturfaktor für die Spannungsintensität darstellt, so wird die elastische Nachgiebigkeit Z als Korrektur für die Gesamtverschiebung benötigt. Wiederum ergibt sich für unterschiedliche Probenarten andere Wide-Range Approximationen für Z [2.25].

$$Z_{CCT} = \frac{D}{W \cdot (1-\nu^2)} + 2 \cdot \left(\frac{2a}{W} \right) \cdot \left[-1.071 + 0.250 \cdot \left(\frac{2a}{W} \right) - 0.357 \cdot \left(\frac{2a}{W} \right)^2 + 0.121 \cdot \left(\frac{2a}{W} \right)^3 - 0.047 \cdot \left(\frac{2a}{W} \right)^4 + 0.008 \cdot \left(\frac{2a}{W} \right)^5 - \frac{1.071}{\left(\frac{2a}{W} \right)} \cdot \ln \left(1 - \frac{2a}{W} \right) \right] \quad (3.15)$$

$$Z_{SENT} = \frac{D}{W \cdot (1-\nu^2)} + \frac{4 \cdot \left(\frac{a}{W} \right)^2}{\left(1 - \frac{a}{W} \right)^2} \cdot \left[0.99 - \frac{a}{W} \cdot \left(1 - \frac{a}{W} \right) \cdot \left\{ 1.3 - 1.2 \cdot \frac{a}{W} + 0.7 \cdot \left(\frac{a}{W} \right)^2 \right\} \right] \quad (3.16)$$

$$Z_{SENB3} = \frac{S}{W^3 \cdot (1-\nu^2)} \left[0.185 + 0.4 \left(\frac{W}{S} \right)^2 (1+\nu) \right] + 1.5 \left(\frac{S}{W} \right)^2 \left[\frac{\frac{a}{W}}{1 - \frac{a}{W}} \right]^2 \cdot \left[5.58 - 19.57 \left(\frac{a}{W} \right) + 36.82 \left(\frac{a}{W} \right)^2 - 34.94 \left(\frac{a}{W} \right)^3 + 13.12 \left(\frac{a}{W} \right)^4 \right] \quad (3.17)$$

Für die Berechnung von Z ist eine Querkontraktionszahl ν notwendig, sie wird für den elastischen Bereich mit 0.05 angenommen. Aus Y und Z lässt sich nun der elastische Korrekturfaktor η

$$\eta = 2 \cdot \left(1 - \frac{n \cdot a}{W} \right) \cdot \frac{Y^2}{Z} \quad (3.18)$$

bestimmen, wobei n für die Anzahl der Kerben steht [2.25].

Der elastische η Faktor, die Rissbildungsarbeit U (siehe Abb. 3-17) und die Probendimensionen a , W und B werden benötigt um die kritische Energiefreisetzungsrate G_{IC}

$$G_{IC} = \frac{\eta \cdot U}{B \cdot (W - n \cdot a)} \quad (3.19)$$

zu berechnen. Für SENB3 Proben wird dabei ein korrigierte Rissbildungsarbeit verwendet. Der Dämmstoff erfährt durch die aufgebrachte Last eine Verformung an den Einspannstellen. Mit Hilfe eines Eindruckversuches wird eine passende Kraft/Wegkurve ermittelt. Mit den dazugehörigen F_{max} -Werten aus den bruchmechanischen Untersuchungen kann dann diese Verformungsenergie und schließlich die korrigierte Rissbildungsenergie bestimmt werden.

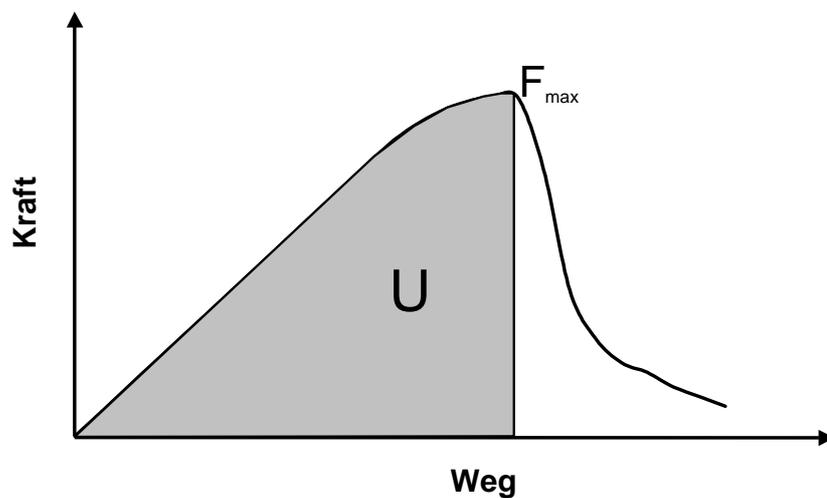


Abb. 3-17: Darstellung eines Kraft-Weg Verlaufes mit der Rissbildungsarbeit U .

Insgesamt werden für fünf Hartschaumtypen jeweils fünf SENT Probekörper mit einem Sollwert des a/W -Verhältnisses (Risslänge zu Probenbreite) von 0.5 geprüft und ausgewertet. Für EPS-W30 werden noch zusätzlich jeweils fünf SENT Proben mit a/W von 0.2 und 0.7, SENB3 mit a/W von 0.2, 0.5 und 0.7 und CCT Proben mit a/W von 0.5 geprüft. Um das Verhalten Rissgeometrie zu erfassen, werden noch jeweils 5 SENB3 Proben für ein a/W Verhältnis von 0.5 ohne mit Rasierklinge eingebrachten Riss und Proben mit rechteckiger Kerbenform geprüft.

Exemplarisch sind in Abb. 3-18 aufgezeichnete Weg/Kraft Verläufe für SENT Probekörper der fünf unterschiedlichen Hartschäumen dargestellt. Es zeigt sich dabei das erwartete Bild. Für EPS-W20, EPS-W25 und EPS-W30 weisen die Verläufe eine ähnliche Charakteristik auf, aufgrund der Dichteunterschiede jedoch unterschiedliche Kurvenmaxima. Bei EPS-F tritt das Kraftmaximum der Kurve erst bei einem höheren Wegwert auf als bei den restlichen EPS Typen. XPS zeigt wiederum das gewohnt bessere mechanische Verhalten, was sich deutlich in höheren Kraft und Weg Werten widerspiegelt. Von weiteren Interesse ist noch, dass bei XPS nach Erreichen des Kraftmaximums und den damit verbunden raschen Risswachstums im letzten Drittel stoppt. Daher kommt es zu einem erneuten

Kraftanstieg. Aufnahmen von einem XPS Probekörper zu diesem Zeitpunkt sind in Abb. 3-19 dargestellt.

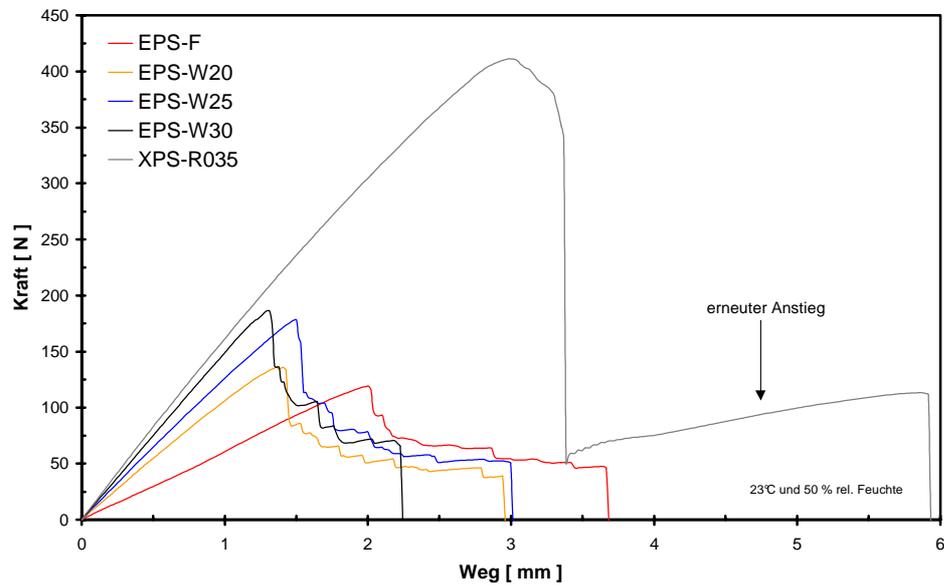


Abb. 3-18: Exemplarische Kraft/Weg Verläufe für je einen Versuch der fünf Hartschaumtypen.

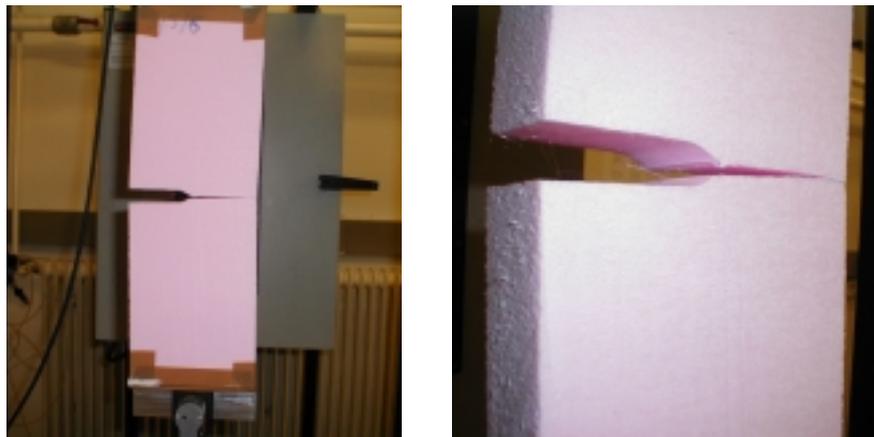


Abb. 3-19: Aufnahmen einer XPS SENT Probe beim kurzzeitigen Stoppen des Risswachstums und den damit verbundenen erneuten Kraftanstieg.

Ein Überblick über die aus den Verläufen erhaltenen Kennwerte für die fünf Hartschaumtypen befindet sich in Tabelle 3-3. Wird für EPS die Risszähigkeit K_{IC} mit der Dichte verglichen, so erkennt man mit ansteigender Dichte eine Zunahme dieser Kennwerte, siehe und Abb. 3-20. Im Vergleich zwischen EPS und XPS gleicher Dichte ergibt sich für diese Kennwerte ein 2.5 mal so hohes Ergebnis, ähnlich wie beim Zugversuch.

Tabelle 3-3: Ergebnisse der bruchmechanischen Untersuchungen bei Verwendung von SENT Probekörpern für unterschiedliche Hartschäume.

	n_{gew} []	a/W []	ρ [kg/m ³]	K_{IC} [N/mm ^{3/2}]	G_{IC} [J/m ²]
EPS-F	5/5	0.50	16.1 ± 0.4	0.76 ± 0.06	84 ± 13
EPS-W20	4/5	0.49	21.2 ± 0.7	0.82 ± 0.08	65 ± 14
EPS-W25	5/5	0.49	26.7 ± 0.7	0.99 ± 0.05	81 ± 8
EPS-W30	2/5	0.49	31.0 ± 0.3	1.02 ± 0.11	69 ± 1
XPS-R035	5/5	0.50	32.5 ± 0.1	2.46 ± 0.15	419 ± 45

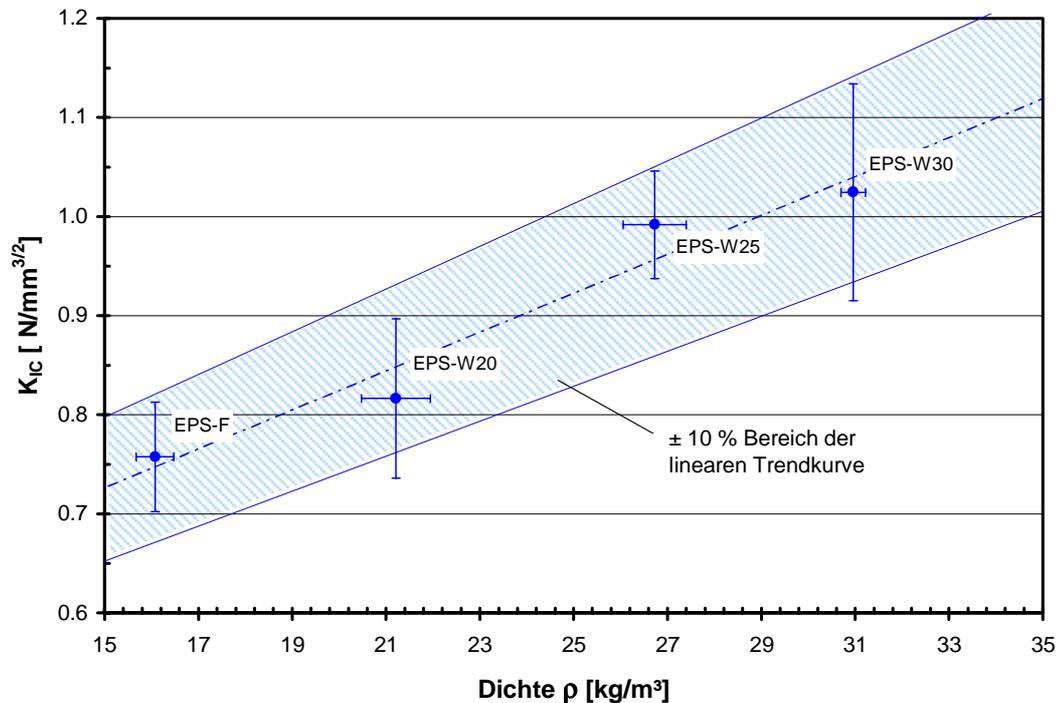


Abb. 3-20: Zusammenhang zwischen Dichte und Risszähigkeit K_{IC} für EPS.

Leichte Unterschiede ergeben sich in der kritischen Energiefreisetzungsrate G_{IC} für die verschiedenen Hartschaumtypen aus EPS, für XPS zeigt sich wieder der deutlich höhere Wert. In Anlehnung an [2.25] ergibt sich der Zusammenhang zwischen K_{IC} , G_{IC} und E_z nach

$$G_{IC} = \frac{K_{IC}^2 \cdot (1 - \nu^2)}{E} \tag{3.20}$$

Aus den bekannten K_{IC} und E_z Werten kann zum Vergleich mit G_{IC} eine berechnete Energiefreisetzungsrate $G_{IC, \text{rech}}$ nach (3.20) bestimmt werden. Für ν wird ein Wert von 0.05 angenommen. In Tabelle

3-4 werden die Ergebnisse für $G_{IC,rech}$ gezeigt. Werden nun die berechneten $G_{IC,rech}$ mit G_{IC} verglichen, sind die Unterschiede nicht viel größer als die Standardabweichung der G_{IC} Kennwerte. Dies wiederum verifiziert die durchgeführten Versuche und die daraus erhaltenen Kennwerte, vor allem jedoch bestätigt es die Richtigkeit der Größe des äquivalenten Moduls E_Z .

Tabelle 3-4: Ergebnisse für $G_{IC,rech}$ für alle fünf Hartschaumtypen ermittelt aus K_{IC} und E_Z mit $\nu=0.05$ im Vergleich zu G_{IC} , das aus den bruchmechanischen Versuchen bestimmt wird.

	K_{IC} [N/mm ^{3/2}]	E_Z [MPa]	$G_{IC,rech}$ [J/m ²]	G_{IC} [J/m ²]
EPS-F	0.76	7.2	79	84 ± 13
EPS-W20	0.82	10.5	63	65 ± 14
EPS-W25	0.99	12.9	76	81 ± 8
EPS-W30	1.02	16.9	62	69 ± 1
XPS-R035	2.46	17.7	340	419 ± 45

Wie schon erwähnt, werden für EPS-W30 unterschiedliche Probengeometrien (SENT, SENB3 und CCT) geprüft. Ein Überblick der Ergebnisse zeigt Tabelle 3-5. In Abb. 3-21 ist der Zusammenhang des a/W Verhältnisses zur Risszähigkeit K_{IC} für SENT, SENB3 und CCT Probenformen dargestellt. Die Ergebnisse für die CCT Probekörper sind mit Vorsicht zu betrachten, da für alle vier geprüften Proben eine Abweichung der Dichte vom Soll von mindestens 10% auftritt. Da dies alle vier Proben betrifft, ist die übliche Ausschließung der Ergebnisse nicht möglich. Jedoch bedeutet dies, dass der erhaltene Mittelwert die unterste Grenze für diesen Fall darstellt. Aufgrund der Erfahrungen mit den nicht berücksichtigten Proben könnte durchwegs eine Verbesserung von bis zu 10% erwartet werden. Leider steht jedoch keine einzige Messkurve zur Verfügung, um dies auch zu bestätigen.

Aus Sicht der Bruchmechanik sollte unter Berücksichtigung eines linearen homogenen Werkstoffs geometrieunabhängige Werkstoffkenngrößen ermitteln lassen. Wie sich jedoch aber aus den Ergebnissen zeigt, haben SENB3 Proben eine höhere Risszähigkeit und Energiefreisetzungsrate als restlichen Probentypen. Für Vergleiche mit Werkstoffen sollte daher eine Mittelwert herangezogen werden. Um die Ergebnisse zu verifizieren werden wieder der berechnete $G_{IC,rech}$ mit G_{IC} -Wert verglichen. Für SENT und CCT wird der für EPS-W30 ermittelte Zugmodul verwendet, für SENB3 der Biege-Modul. In Tabelle 3-6 sind diese Kennwerte dargestellt. Wie sich daraus ablesen lässt, stimmen Rechenwert mit Messwert gut überein.

Tabelle 3-5: Ergebnisse der bruchmechanischen Auswertung für EPS-W30 für unterschiedliche Probekörperformen (SENT, SENB3 und CCT).

	n_{gew} []	a/W []	ρ [kg/m ³]	K_{IC} [N/mm ^{3/2}]	G_{IC} [J/m ²]
SENT	2/5	0.23	31.9 ± 1.4	0.80 ± 0.07	46 ± 9
SENT	2/5	0.49	31.0 ± 0.3	1.02 ± 0.11	69 ± 1
SENT	2/5	0.69	31.3 ± 0.6	1.10 ± 0.26	61 ± 26
CCT	4/4 ⁽¹⁾	0.48	33.0 ± 0.4	0.63 ± 0.03	27 ± 1
SENB3	5/5	0.21	30.4 ± 0.4	1.29 ± 0.03	124 ± 7
SENB3	5/5	0.50	30.7 ± 0.6	1.39 ± 0.08	153 ± 28
SENB3	5/5	0.72	30.7 ± 0.5	1.00 ± 0.04	95 ± 11

(1) alle vier Proben weichen im Sollwert für die Dichte ab, daher werden alle 4 berücksichtigt.

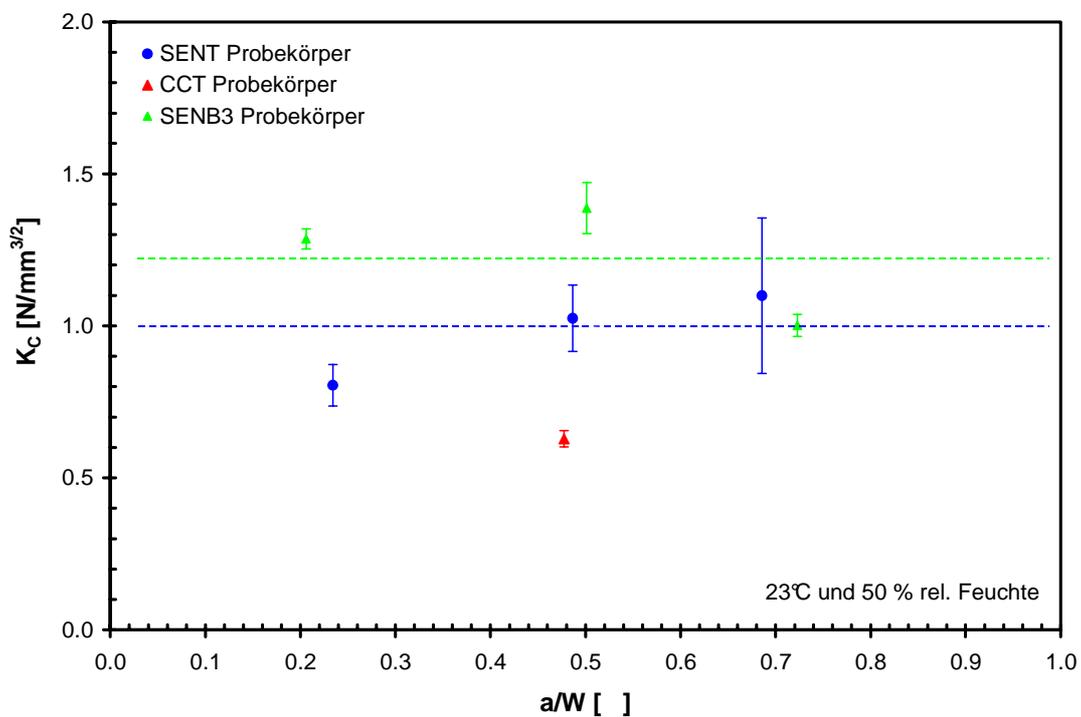


Abb. 3-21: Zusammenhang zwischen a/W und K_{IC} für SENT Probekörper aus EPS-W30. Zum Vergleich wird das Ergebnis für einen CCT Probekörper aus dem gleichen Hartschaum dargestellt.

Tabelle 3-6: Ergebnisse für $G_{IC,rech}$ für unterschiedliche Probenformen aus EPS-W30 ermittelt aus K_{IC} und E mit $\nu=0.05$ im Vergleich zu G_{IC} , das aus den bruchmechanischen Versuchen bestimmt wird

	K_{IC} [N/mm ^{3/2}]	E [MPa]	$G_{IC,rech}$ [J/m ²]	G_{IC} [J/m ²]
SENT	0.80	16.9	38	46 ± 9
SENT	1.02	16.9	62	69 ± 1
SENT	1.10	16.9	71	61 ± 26
CCT	0.63	16.9	23	27 ± 1
SENB3	1.29	13.3	124	124 ± 7
SENB3	1.39	13.3	144	153 ± 28
SENB3	1.00	13.3	75	95 ± 11

Für EPS-W30 werden jeweils 5 SENB3 Proben für ein a/W Verhältnis von 0.5 ohne mit Rasierklinge eingebrachten Riss und Proben mit rechteckiger Kerbenform geprüft. Sie dienen als Vergleich zum SENB3 Proben mit Rasierklingen eingebrachten Riss. Diese Versuche werden vor allem in Hinblick auf die Erfassung von Einflüssen der Hohlraumgeometrie auf das Bruchverhalten beim Formschlussversuch (siehe Kapitel 5.1) durchgeführt. In Abb. 3-23 ist F_{max} über der Risslänge a dargestellt.

Wie sich zeigt sind die Unterschiede für verschiedene Rissformen im Bereich der Messabweichung. Aufgrund der Sprödigkeit des Materials spielt die Risslänge die dominanter Rolle. Trotzdem lässt sich sagen, dass die Rissform einen mehr oder weniger großen Anteil am Bruchgeschehen hat. Aufgrund der unterschiedlichen Rissform tritt an lokal unterschiedlichen Stellen Versagen auf, siehe Abb. 3-22. Diesem Einfluss kann bei der Auslegung der Bauteile mit Hilfe der Methode der finiten Elemente Rechnung getragen werden.

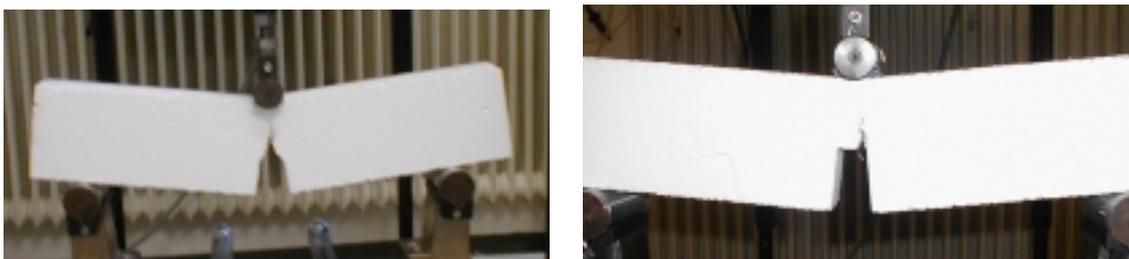


Abb. 3-22: Bruchverhalten für zwei SENB3 Proben mit unterschiedlicher Rissgeometrie.

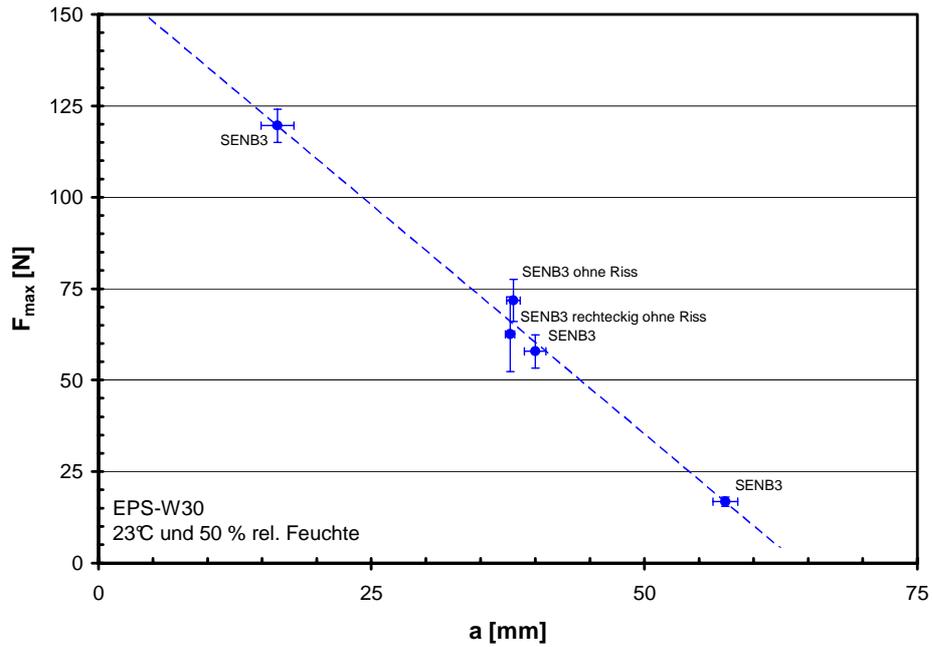


Abb. 3-23: Darstellung von F_{max} über der Risslänge für unterschiedliche Rissformen bzw. -längen.

3.4.2 FEM-Analyse

Für alle drei Probenarten werden analoge FEM-Analysen durchgeführt. Abbildung 3-24 und 3-25 zeigen eine Gegenüberstellung zwischen Berechnung und Rissbildung beim Versuch für SENT und CCT Probekörper. Dabei kann ein für bruchmechanische Untersuchungen typische Spannungsfeld an der Risspitze erkannt werden. Im Vergleich zu den aus Biege- und Zugversuch ermittelten Festigkeiten weist die maximal auftretende Hauptnormalspannung eine zweimal so hohen Wert auf. Der lokale Durchschnittswert an der Risspitze bewegt sich jedoch im Bereich dieser Festigkeiten.

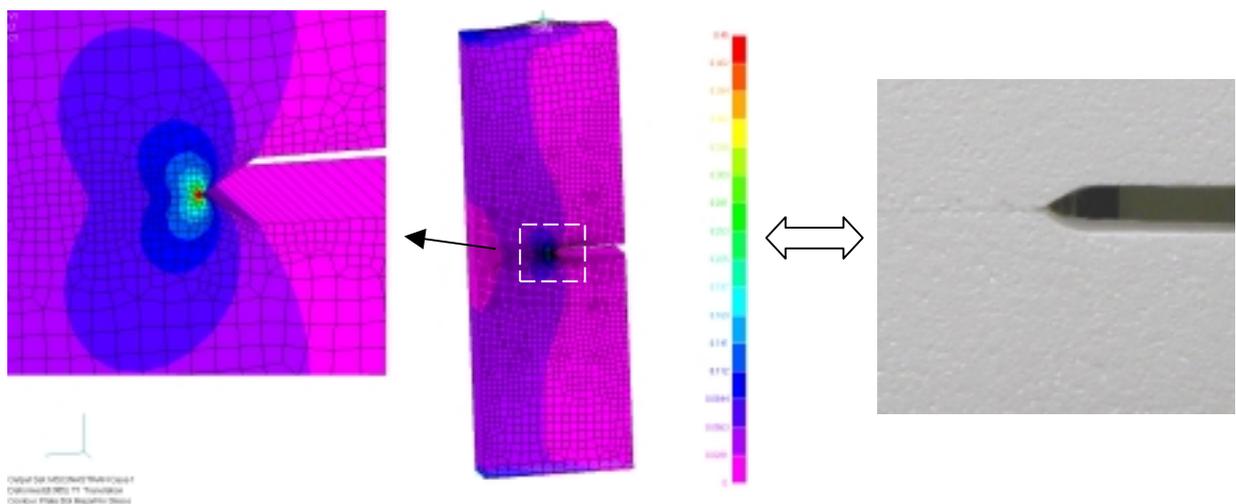


Abb. 3-24: Gegenüberstellung der Ergebnisse mit den Analysen mittels der Methode der finiten Elemente für SENT-Probekörper.

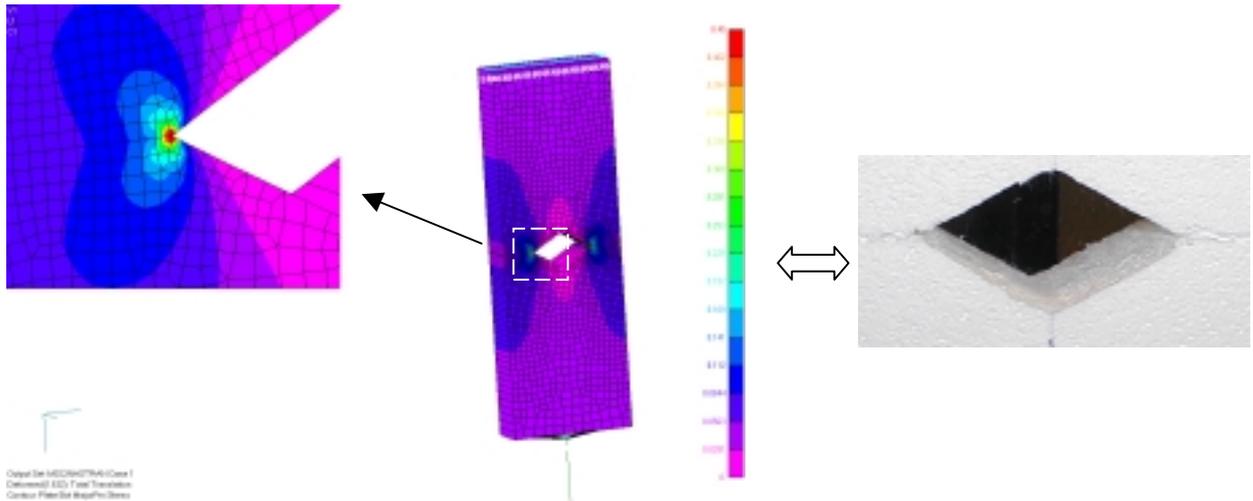


Abb. 3-25: Gegenüberstellung der Ergebnisse mit den Analysen mittels der Methode der finiten Elemente für CCT-Probekörper.

Für den SENB3 Probekörper werden ein gemessener Kraft-Wegverlauf mit den aus der Berechnung ermittelten Verlauf in Abb. 3-26 gegenübergestellt. Wie aus der Abbildung hervorgeht stimmen die Ergebnisse aus Analyse und Versuch recht gut überein.

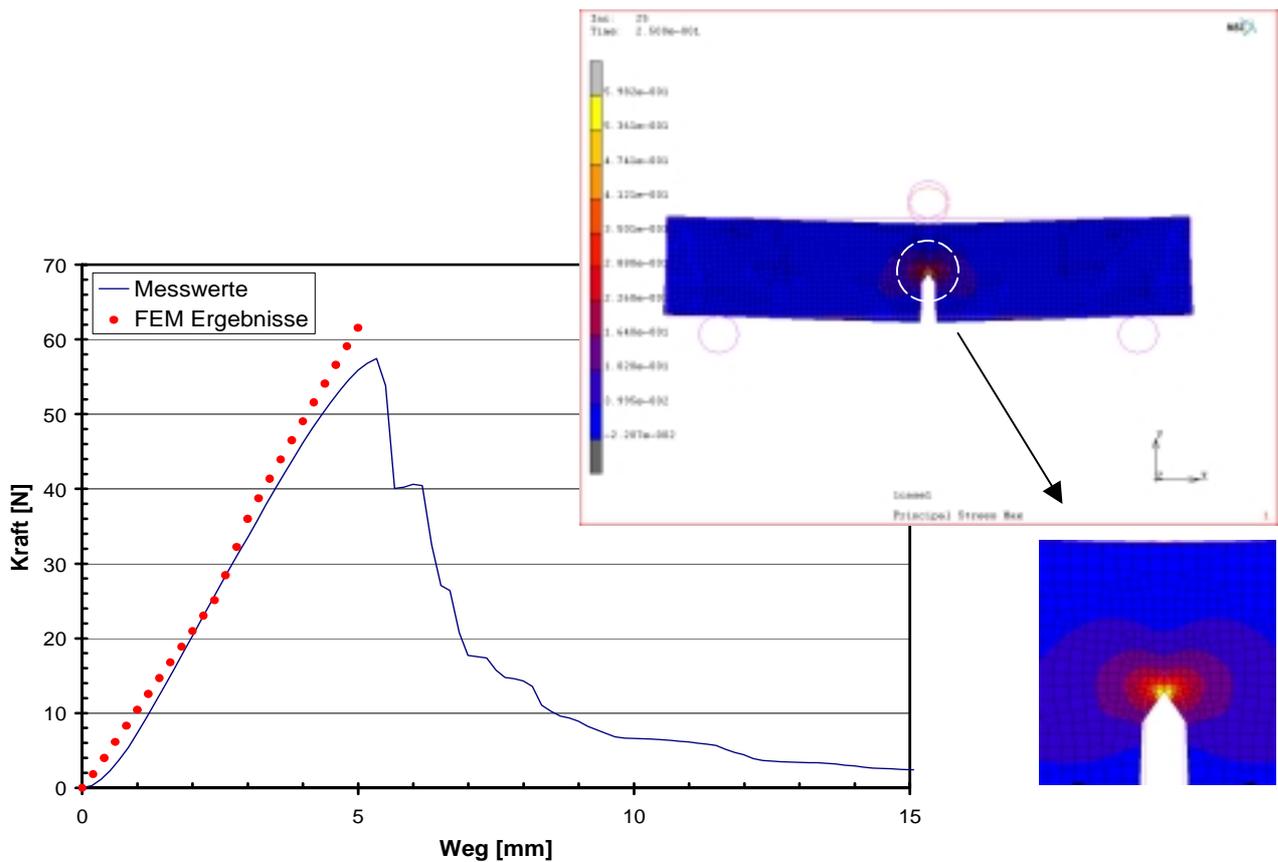


Abb. 3-26: Gegenüberstellung der Ergebnisse mit den Analysen mittels der Methode der finiten Elemente für SENB3-Probekörper.

3.5 Einfluss der Mikrostruktur auf dämmstoffspezifische Eigenschaften

Wie das vorherige Kapitel zeigt, ergeben sich unterschiedlichste mechanische Eigenschaften für die einzelnen Materialien. Im ersten Schritt wird auf die Dichtemessung von Hartschäumen eingegangen, da diese Unterschiede im Strukturaufbau quantitativ sichtbar macht. Darüber hinaus sind auch wärmetechnisch relevante Kennwerte von der Mikrostruktur abhängig. Zuletzt wird die Mikrostruktur der Dämmstoffe selbst mit Hilfe von Lichtmikroskop und Rasterelektronenmikroskop (REM) untersucht.

3.5.1 Dichtemessungen von Hartschäumen

Für alle durchgeführten Versuche wird die Dichte der Hartschaumdämmstoffproben überprüft. Bei allen Messungen konnte die vom Hersteller angegebene Mindestdichte bestätigt werden. Der Großteil der gemessenen Dichten lag dabei klar über diesem Mindestwert. Auffallend jedoch ist, dass bei allen Bunden immer wieder an den selben Positionen (nahe dem Zentrum eines Bundes) größere Inhomogenitäten auftraten. Dabei konnte eine Abweichung von etwa 10% von den Mindestwerten des Herstellers festgestellt werden.

Für die Versuchsserien selbst stellt diese Dichteschwankungen kein Problem dar, da für jede Probe die Dichte ermittelt wird und somit für weitere Schlussfolgerungen zur Verfügung steht. Wie sich aber zeigt, ergibt eine signifikante Dichtezunahme der EPS Proben einen deutlichen Abfall in den mechanischen Eigenschaften. Der Grund dafür könnte im Schäumprozess liegen. Wenn hier nicht genügend Wärmeenergie zum Ausschäumen vorliegt, wird lokal die Dichte erhöht. Des Weiteren bewirkt das geringere Aufblähen eine schlechtere Verschweißung der einzelnen Perlen mit sich und führt schließlich zu einem Abfall der mechanischen Eigenschaften.

Als erste Konsequenz werden Proben mit auffallenden Dichten in der Auswertung nicht berücksichtigt, um die Reproduzierbarkeit zu erhöhen. Somit lassen sich Zusammenhänge bezüglich anderer Einflussgrößen besser bestimmen. In zweiter Konsequenz muss für die Auslegung ein Sicherheitsfaktor berücksichtigt werden, um diesem real auftretenden Dichtephänomen Rechnung zu tragen.

3.5.2 Wärmedämmung

Für den Dämmstoff ist natürlich die Wärmeleitung λ als maßgebende Kenngröße von Interesse. In Tabelle 3-1 werden typische Werte für die Wärmeleitfähigkeit von EPS unterschiedlicher Dichten und von XPS angegeben.

Material	Dichte [kg/m ³]	λ (10°C/50 mm) DIN 52612 Teil 1 [mW/(m×K)]
EPS	15	36.6 bis 38.2
	20	34.0 bis 35.6
	25	31.8 bis 33.3
	30	30.7 bis 32.4
XPS (Luft)	28 bis 35	32 bis 36
XPS (HFCKW)	28 bis 35	27

Tabelle 3-1: Wärmeleitfähigkeit für EPS unterschiedlicher Dichten (nach [2.14]) und für XPS (nach [2.16]).

Aus Tabelle 3-1 ergibt sich, dass die Wärmeleitfähigkeit von EPS von der Dichte abhängt. In Abb. 3-27 ist dieser Sachverhalt nochmals dargestellt. Die Gesamtwärmeleitfähigkeit setzt sich aus

$$\lambda = \lambda_{\text{Festkörper}} + \lambda_{\text{Gas}} + \lambda_{\text{Strahlung}} + \lambda_{\text{Konvektion}} \tag{3.21}$$

zusammen. Da bei sehr kleinen Rohdichten von EPS die Strahlungsdurchlässigkeit stark ansteigt, erhöht sich auch für geringe Dichten die gesamte Wärmeleitfähigkeit deutlich. Der Grund dafür liegt der Strahlungsdurchlässigkeit der dünneren Zellwände in der Mikrostruktur. Für Rohdichten im Bereich von 15 kg/m³ bis 20 kg/m³ ergibt sich eine eher schlechte Wärmedämmung, bei etwa 30 kg/m³ bis 50 kg/m³ stellt sich aus wärmetechnischer Sicht ein Optimum für die Isolierung ein. Es sei noch erwähnt, dass auch Temperatur und Feuchte einen Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit haben [2.15].

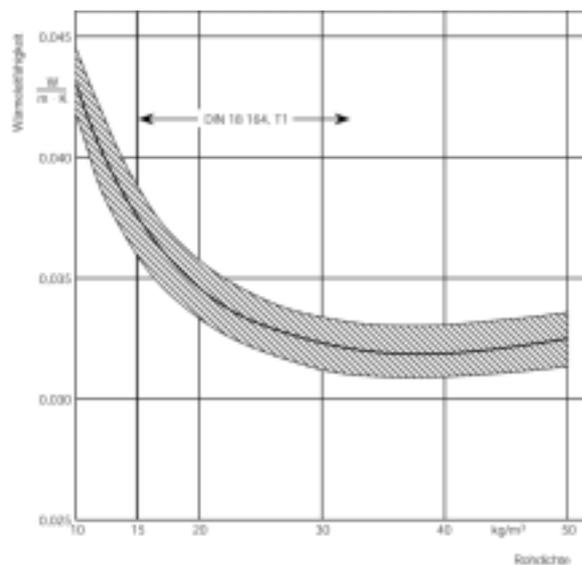


Abb. 3-27: Darstellung der Wärmeleitfähigkeit für EPS in Abhängigkeit von der Rohdichte [2.17].

3.5.3 Mikroskopischer Aufbau

Die Untersuchung der Struktur erfolgt für EPS-F, EPS-W20, EPS-W25, EPS-W30, XPS-R035, Kork, Steinwolle und Beton. Für die fünf Hartschäume wird je eine Risszähigkeitsprobe herangezogen. Die Probenentnahme erfolgt im Bereich zwischen Ende Heißdrahtschnitt bis Beginn Bruchfläche, und enthält dabei den Schnitt mit der Messerklinge. Die restlichen Werkstoffe werden aus beliebigen Probekörpern entnommen.

Im ersten Schritt werden für die Hartschäume Aufnahmen mit dem Lichtmikroskop erstellt, siehe Abb. 3-28. Eine genauere Untersuchung der Struktur aller verwendeten Materialien erfolgt mit Hilfe des Rasterelektronenmikroskops (REM). Für alle zuvor genannten Proben werden mittels REM Aufnahmen mit 7- bis 8-facher, 20-facher, 50-facher und 200-facher Vergrößerung erstellt, für BETON noch zusätzlich Aufnahmen mit 1000-facher und 3000-facher Vergrößerung gemacht.

In Abb. 3-28 sind die Lichtmikroskopaufnahmen der Bruchflächen der Hartschäume dargestellt. Daraus geht hervor, dass sich die Hartschaumproben in drei Klassen unterteilen lassen. EPS-F weist dabei eine andere Oberflächenbeschaffenheit und eine kompaktere Zellstruktur auf. Diese kompaktere Erscheinungsbild ergibt sich aufgrund der geringeren Zwischenhohlräume. Bei den restlichen EPS-Typen ist das Anwachsen der Perlen, zum Erreichen der geringeren Dichten, erkennbar. Die Perlenform verändert sich dabei mit abnehmender Dichte von kugel- zu polyederförmigen Perlen. Die Zellstruktur von XPS kann mit dem verwendeten Lichtmikroskop nicht erfasst werden.

Die Abbildungen 4-3 bis 4-7 zeigen die REM-Bilder der Hartschäume. Aus der 8-fachen Vergrößerungen der Risszähigkeitsproben gehen drei Bereiche in der Nähe der Risseinbringung hervor. Im oberen Teil ist das Ende des Heißdrahtschnittes aus der Probenfertigung erkennbar, im mittleren Teil ist der Schnitt mit der Messerklinge (sprich die Rissinitiation) ersichtlich und im unteren Teil kann der Beginn der Bruchfläche erkannt werden. Mit Hilfe einer 20fachen Vergrößerung können die Perlen der EPS Typen näher betrachtet werden. Mit abnehmender Dichte kann eine Verringerung des Zwickelvolumen vermerkt werden. Damit geht eine kompakteres Erscheinungsbild aufgrund der stärkeren Verschweißung der Partikel weniger dichter Proben einher. Um die Zellstruktur zu sehen werden bei EPS die durchschnittenen Perlen betrachtet, bei XPS die Bruchfläche. Mit 50-facher und 200-facher Vergrößerung werden an diesen Stellen Aufnahmen gefertigt. Daraus ist erkennbar das XPS die größten Zellen aufweist. Die Unterschiede für EPS sind nicht deutlich erkennbar.

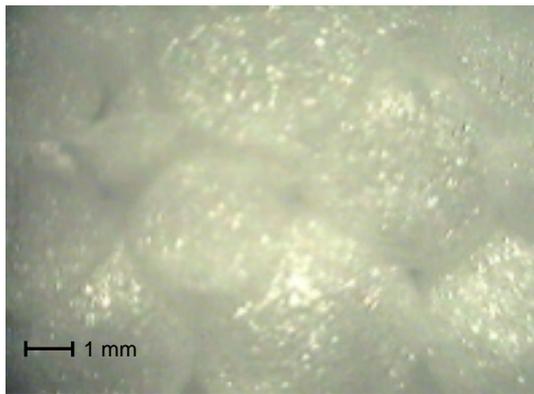
Aus den mechanischen Eigenschaften geht das klar bessere Verhalten von XPS zu den restlichen EPS Typen hervor. Die Eigenschaften von EPS-W20, EPS-W25 und EPS-W30 sind von der unterschiedlichen Dichte geprägt, weisen jedoch in ihrer Charakteristik ähnliches Verhalten auf. Bei EPS-F ist im Vergleich mit den anderen EPS Typen eine größere Reißdehnung bzw. Bruchdehnung erkennbar. In den bruchmechanischen Untersuchungen äußert sich dies mit einem größeren Weg bei Erreichen der maximal Kraft.

Diese Zusammenhänge können mit Hilfe der Mikroskopaufnahmen gedeutet werden. Das etwas bessere Dehnvermögen der EPS-F Type kann mit dem im Vergleich zu den anderen EPS-Typen kompaktesten Erscheinungsbild erklärt werden. Das klar bessere mechanische Verhalten von XPS im Vergleich zu EPS gleicher Dichte ergibt sich aus der Struktur. XPS weist zwar größere Zellen auf als EPS, für das Bruchverhalten bei EPS ist jedoch die Verschweißung der Perlen entscheidend. Dabei fungieren die vorhandenen Zwickel bei EPS als Fehlstellen. Bei XPS sind die Schaumzellstrukturen selbst als Fehlstellen anzusehen, haben jedoch bedeutend geringe Abmessungen.

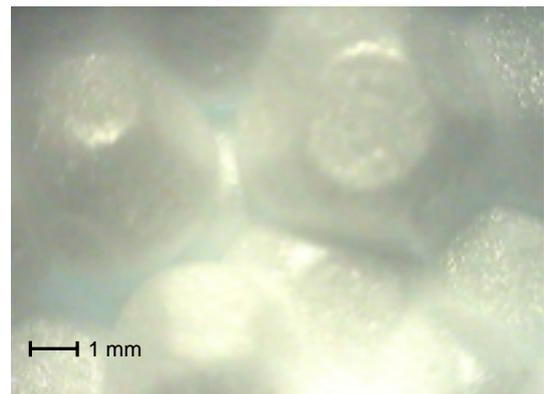
Abbildung 4-8 zeigt die Korkprobe. Dabei zeigen sich klar größere Partikel und Zwickel als bei EPS. Bei einer 200-fachen Vergrößerung können die einzelnen Zellen der Oberflächen sichtbar gemacht werden. Dabei ist eine Vorzugsorientierung bzw. Streckung dieser zu erkennen. Im Vergleich zu den untersuchten Hartschäumen weist Kork die kleinsten Zellen auf. Für das mechanische Verhalten dürften wiederum die Verschweißung der Partikel verantwortlich sein. Wie aus den Messungen und den Bildern hervorgeht, zeigt sich für Kork aufgrund der Struktur ein schlechtes materialspezifisches mechanisches Verhalten.

In den Abbildungen 4-9 bzw. 4-10 sind REM-Aufnahmen für Steinwolle bzw. Beton dargestellt. Für den Faserdämmstoff sind vor allem die Bilder mit höherer Auflösung von Interesse. Die Faserlänge bewegt sich dabei im Zehntelmillimeter-Bereich. Des Weiteren sind kugelförmige Gebilde erkennbar, die als zusätzliche Faserverankerungspunkte dienen dürften. Weiters sind lokale Vorzugsrichtungen erkennbar. Bei Beton sind einerseits die Sprünge aufgrund der Probenentnahme und andererseits die eingeschlossenen Mineralien erkennbar.

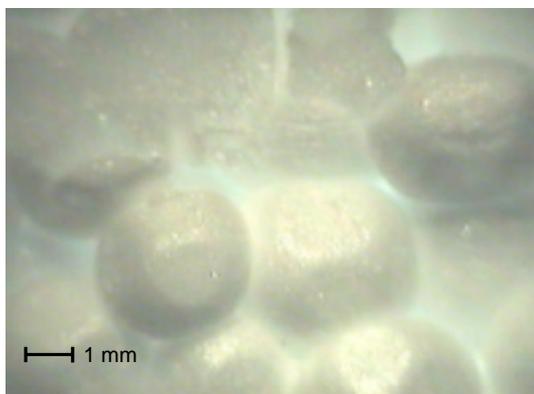
Mit Hilfe der Mikrostrukturuntersuchungen können mechanische Unterschiede zwischen den einzelnen Dämmstoffen gedeutet werden. Dies ist vor allem für das Verständnis für das materialspezifische Verhalten der einzelnen Dämmstoffe für die Befestigungstechnik von Bedeutung.



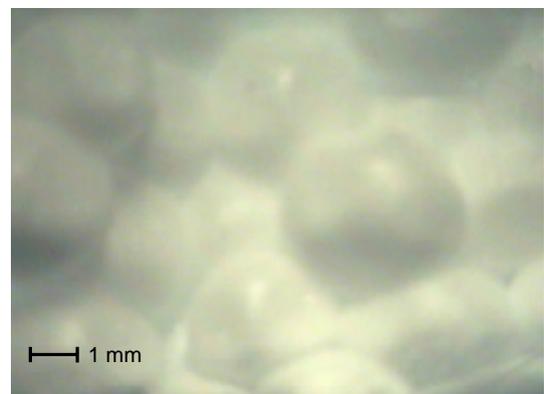
(a) EPS-F



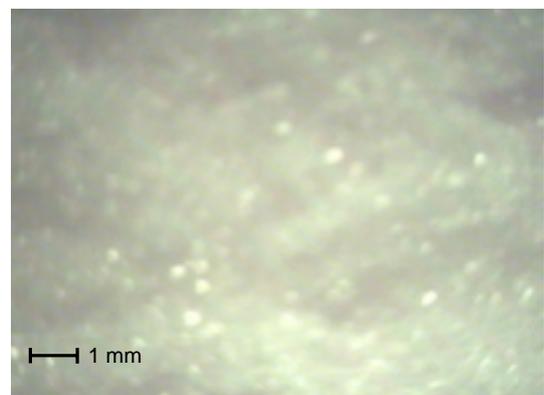
(b) EPS-W20



(c) EPS-W25



(d) EPS-W30



(e) XPS-R035

Abb. 3-28: Aufnahmen der Bruchflächen für Probekörper aus den bruchmechanischen Untersuchungen mittels Lichtmikroskop; ca. 10-fache Vergrößerung.

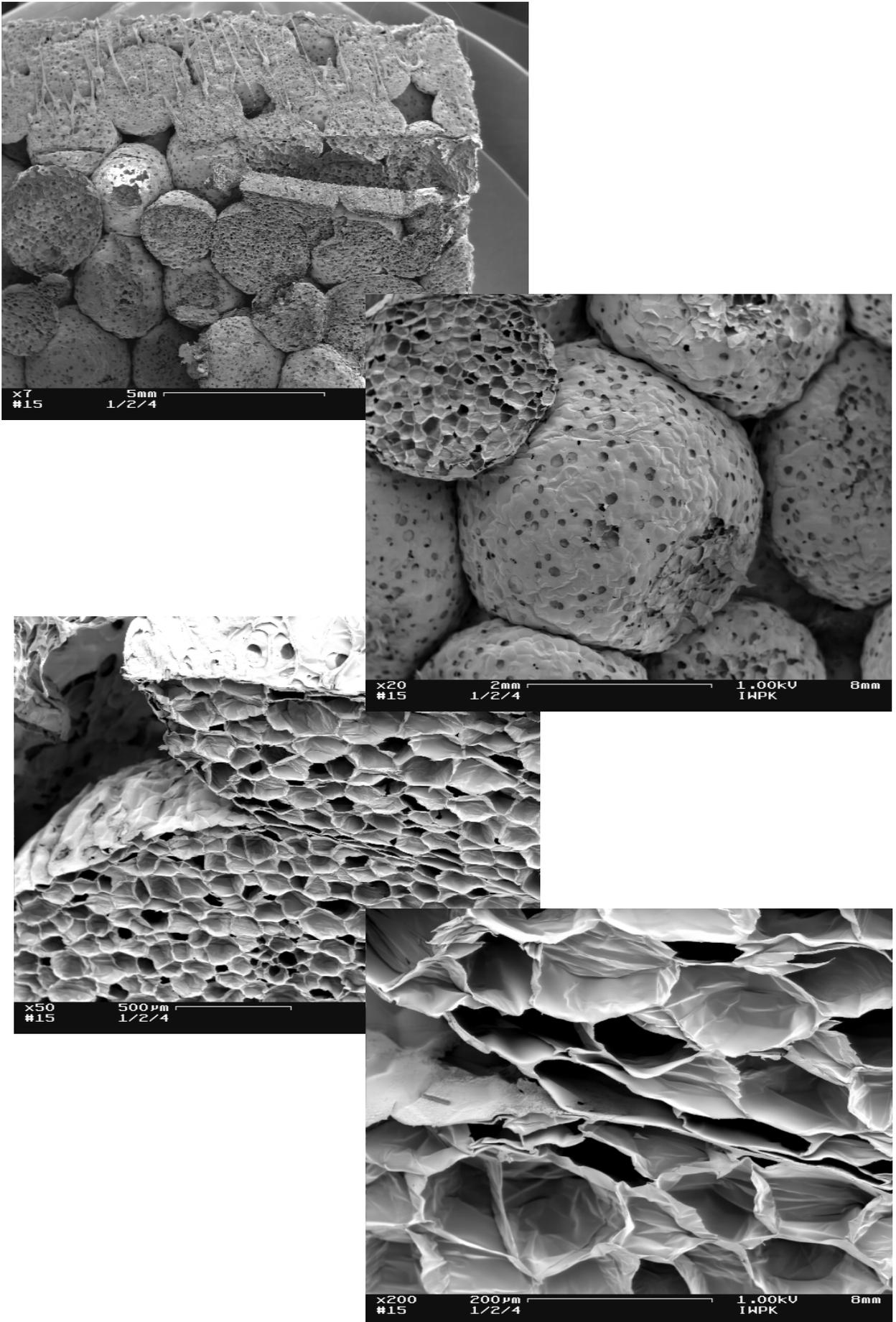


Abb. 3-29: Überblick über den mittels REM untersuchten Probekörper für EPS-F.

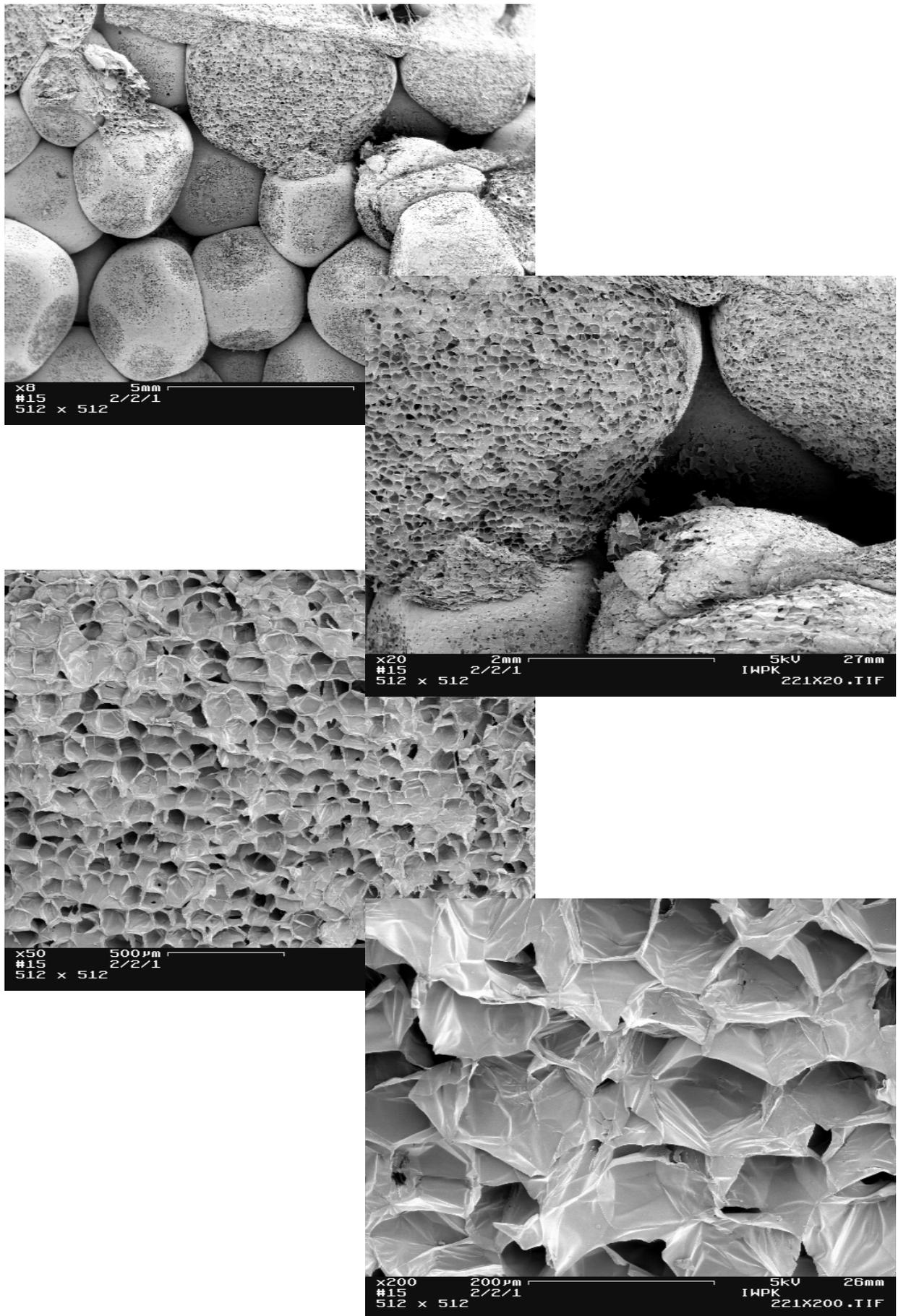


Abb. 3-30: Überblick über den mittels REM untersuchten Probekörper für EPS-W20.

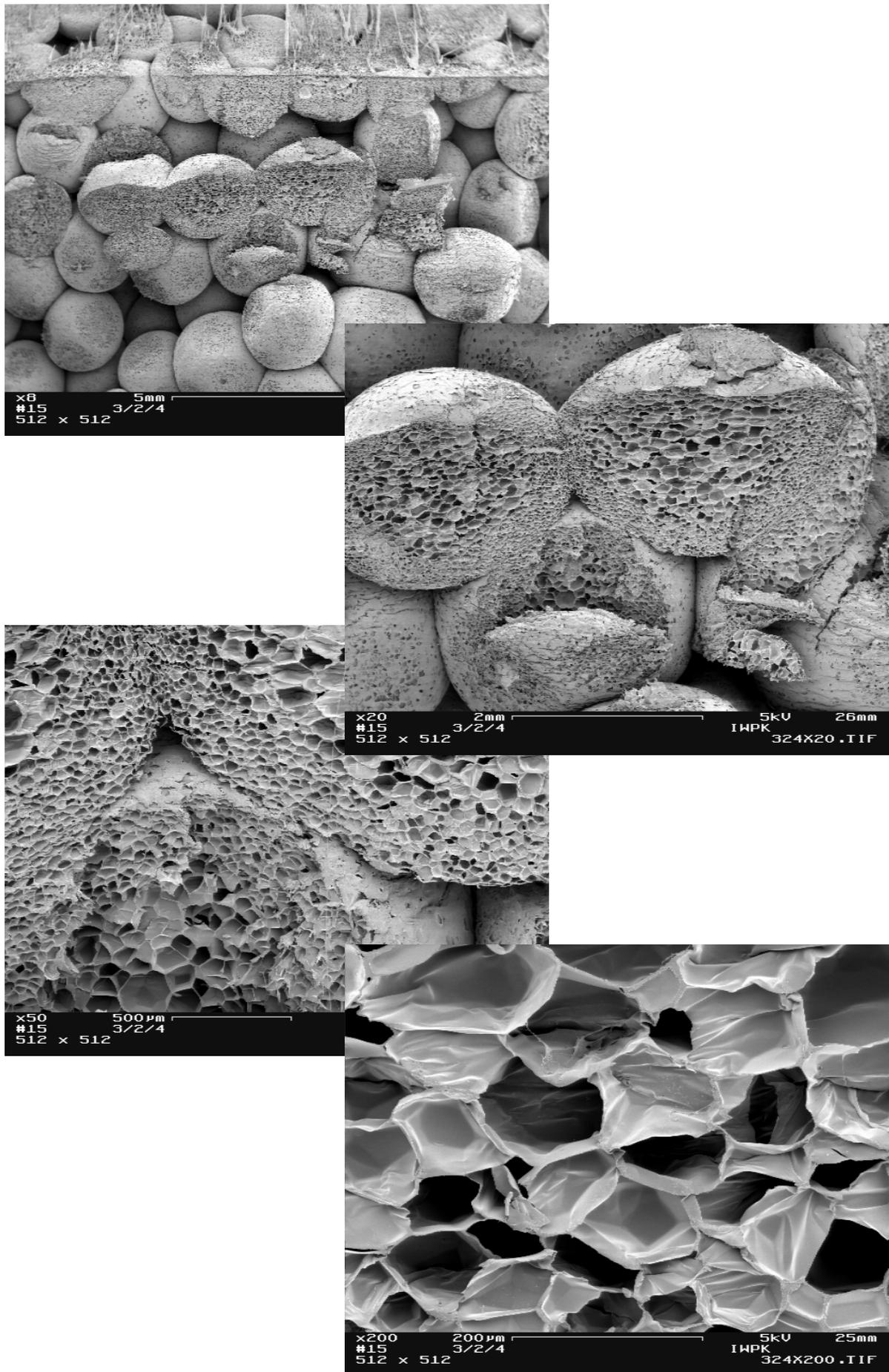


Abb. 3-31: Überblick über den mittels REM untersuchten Probekörper für EPS-W25.