

ZWISCHENBERICHT

THEMA: **Grundlagenarbeiten zur Erstellung allgemeingültiger Konstruktionsrichtlinien für mechanisch hochbelastbare Verbindungstechniken von Dämmprodukten an Befestigungselemente**
Praktische Prüfungen, Versuchsanordnungen, Versagensmechanismen

VERFASSER: DI Reinhard Hafellner

UMFANG: 43 Seiten

DATUM: 21. Dezember 2000

DATEI: 933_Projektbericht2_E00.doc

VERTEILER: hdz, TIG Frau Baumann

KURZFASSUNG

Die Befestigung von Dämmstoffen und an Dämmstoffen unter verschiedenen Rahmenbedingungen stellt ein wesentliches Kriterium für den Einsatz und die Benutzerfreundlichkeit desselben dar. Die gegenständliche Arbeit befaßt sich mit verschiedenen Möglichkeiten zur Auslegung von Befestigungselementen.

Aufbauend auf den im Zwischenbericht 1 vom 30. Mai 2000 dargestellten Untersuchungen zum Stand der Technik sowie der systematischen Einteilung des Arbeitsbereiches und der theoretischen Analyse verschiedener Ansätze wird in diesem Bericht ausführlich auf Ergebnisse aus praktischen Versuchen eingegangen. In der Wahl der Untersuchungen wird auf eine breite Anwendbarkeit der Ergebnisse geachtet. Die Ergebnisse werden kontinuierlich mit theoretischen Ansätzen und Ergebnissen aus Simulationen verglichen. Der gesamte Arbeitsbereich läßt sich im wesentlichen in drei Gruppen teilen.

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. 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 sollen die Ergebnisse verwendet werden um einfache Modelle für die Auslegung zu entwickeln. Weiters werden komplexere Geometrien von bestehenden Lösungen für Befestigungselemente getestet. Auf diese Weise wird die Übertragbarkeit der zuvor ermittelten Erkenntnisse untersucht. Den geometriebasierenden

Analysen liegt ein bedeutender Aufwand bei der Herstellung von Probekörpern und Prototypen zugrunde.

Der dritte Bereich befaßt sich mit den Anforderungen an Befestigungssysteme. Eigenlast, hygrothermische Belastungen, Windkräfte und Wärmebrücken werden besprochen. Für die Ermittlung des entstehenden Betondrucks bei Verwendung von Dämmstoff als verlorene Schalung wird ein Verfüllversuch mit Hilfe von Prototypen durchgeführt. Auf Basis der Erkenntnisse wird ein Modell für die Ausbildung des Druckes entwickelt.

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG	3
2	WERKSTOFFEIGENSCHAFTEN UND MECHANISCHES VERHALTEN VON DÄMMSTOFFEN	5
2.1	Eigenschaftswerte im Überblick – mechanische und wärmetechnische Kennwerte von Dämmstoffen.....	5
2.2	Erweiterte Untersuchungen der Eigenschaftswerte von EPS	7
2.3	Bruchmechanische Charakterisierung von Dämmstoffen	11
2.4	Untersuchungen der Mikrostruktur der Werkstoffe	16
3	DAS MECHANISCHE VERHALTEN AUF BASIS DER GEOMETRISCHEN EIGENSCHAFTEN	19
3.1	Untersuchung des mechanischen Verhaltens von Befestigungsmethoden anhand einfacher Geometrien	19
3.2	Untersuchung des mechanischen Verhaltens von bestehenden Lösungen und neuen Ansätzen mit komplexerer geometrischer Ausführung	27
4	ALLGEMEINE ANFORDERUNGEN AN BEFESTIGUNGSELEMENTE	31
4.1	Eigenlast	31
4.2	Hygrothermische Verformung	32
4.3	Windkräfte.....	32
4.4	bauseitiges Verfüllen von Hohlräumen durch Dämmstoffe	33
4.5	Wärmebrücken.....	34
4.6	Schalungsdruck und dessen Ausbildung.....	36
4.7	Verfüllversuch	41
5	ZUSAMMENFASSUNG	43
6	LITERATUR	43

Einleitung

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

Ein maßgeblicher Eingabeparameter für die Auslegung von Konstruktionen sind Materialdaten der 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.

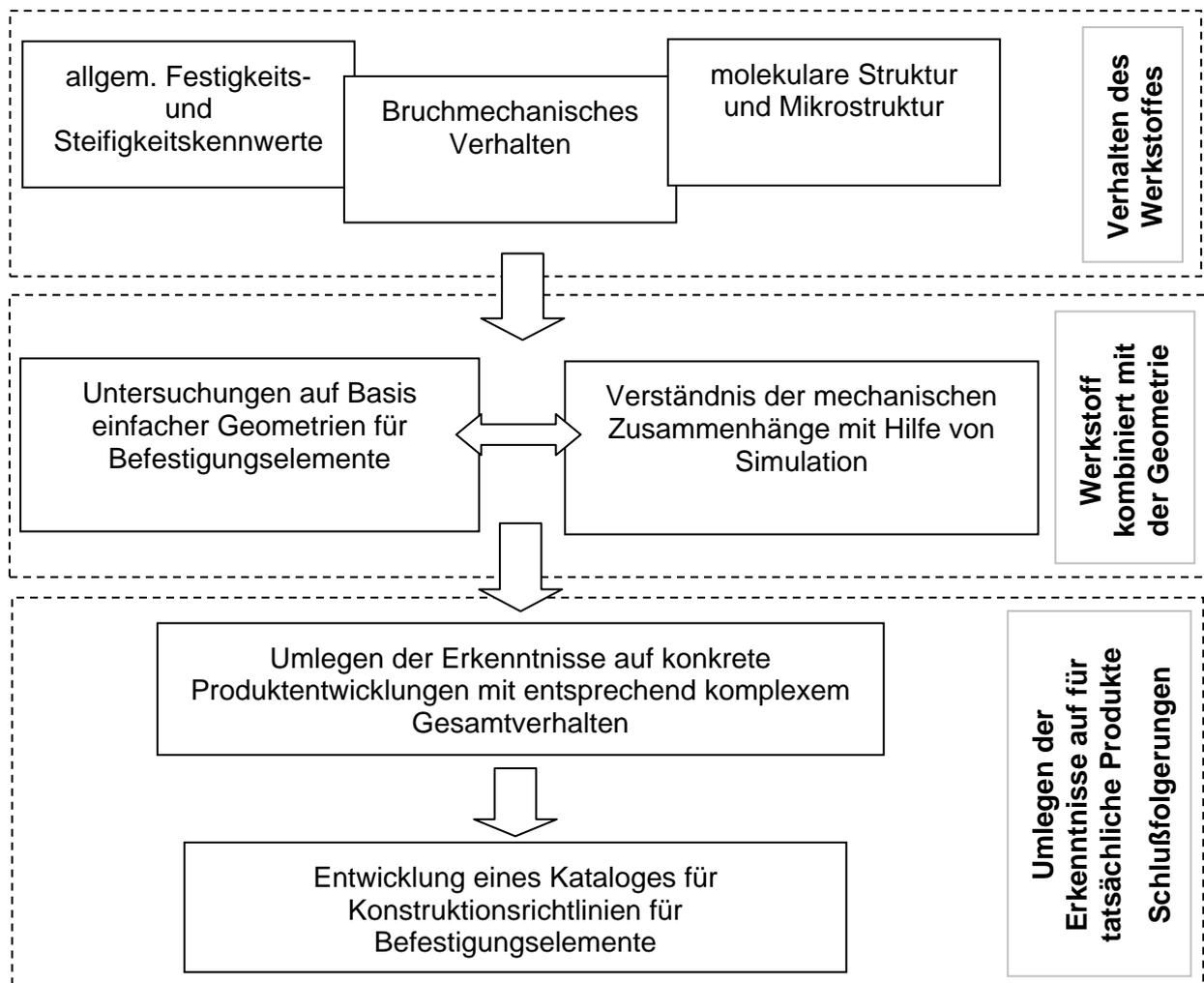


Abbildung 1: Konzept für die Vorgehensweise – praktischer Teil.

Ein zweiter wesentlicher Bestandteil bei der Durchführung von Konstruktionen ist die Geometrie des zu konstruierenden Teiles. Um das Verständnis für das Verhalten zu vereinfachen werden hier 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 Abbildung 2 bildhaft dargestellt.

In den weiterführenden Arbeiten im nächsten Halbjahr werden die Untersuchungen an Wandaufbauten ausgedehnt, um entsprechende Schlüsse ziehen zu können.

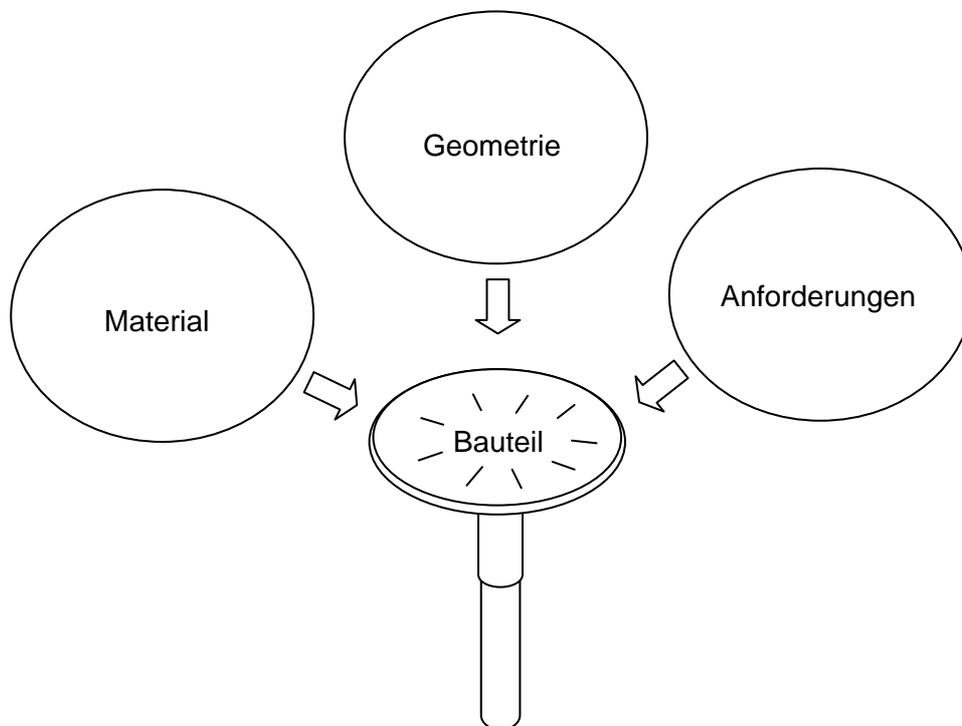


Abbildung 2: Grundlegende Zusammenhänge bei der Auslegung einer Konstruktion.

1 WERKSTOFFEIGENSCHAFTEN UND MECHANISCHES VERHALTEN VON DÄMMSTOFFEN

1.1 Eigenschaftswerte im Überblick – mechanische und wärmetechnische Kennwerte von Dämmstoffen

Bereits im ersten Zwischenbericht wurde ein kurzes Kapitel dem Bereich „Mechanische Eigenschaften von Dämmstoffen“ gewidmet. Durch weiterführende Literaturstudien und durch eigene Versuche konnten diese Tabellen erweitert bzw. verbessert werden. Eine abschließende Version wird im Endbericht dargestellt.

Die nachfolgenden Tabellen dienen als Nachschlagewerk und zur Ermittlung von Richtwerten bei der Auslegung von Befestigungselementen.

Tabelle 1: Mechanische Eigenschaften von Dämmstoffen mit ausgeprägter Eigensteifigkeit. (Entwurfsphase).

Dämmstoff	Dichte	Druckfestigkeiten			Zug-/Schер-/Biegefestigkeiten			E-Modul				Bruchmechanische Kennwerte				
		Druckfestigkeit Drucksp bei 10 % Stauchung	Zulässige Dauerdruckspannung Stauchung <2%, 20 Jahre bei Verkehrslasten		Zugfestigkeit	Scherfestigkeit	Biegefestigkeit	Kurzzeitzug-E-Modul	Kurzzeitdruck-E-Modul	Langzeitdruck-E-Modul	Langzeit-Bettungsmodul	Dynamische Elastizitätsmodule	Rißspitzenfestigkeit	KIC	GIC	
Schäume	Norm	DIN 53421	prEN 1606		DIN 53430	DIN 53427	DIN 53423	DIN 53430	DIN 53421		DIN 18134					
	kg/m ³	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	kPa	N/mm ² z	N/mm
EPS	15	0,06-0,11	0,025	k.A.	0,1-0,23	0,09-0,12	0,16-0,21	2,3-4,4	3,8-4,2	k.A.				33-37	0,7-0,8	
	20	0,11-0,16	0,04	k.A.	0,13-0,32	0,12-0,15	0,25-0,30	3,7-5,8	4,4-5,4	k.A.				35-41	0,75-0,95	
	25	0,14-0,20	0,05		0,2-0,41	0,15-0,19	0,32-0,40							45-49	0,85-1,1	0,55-0,9
	30	0,20-0,25	0,07	k.A.	0,2-0,52	0,19-0,22	0,42-0,50	6,5-8,6	7,4-9,0	k.A.				46-50	0,9-1,15	
	50							12-14	16-18							
XPS /HFCKW																
XPS /CO2																
	<30	0,2	0,06	0,09	0,35-0,6			6,0-10	15	3	0,167-0,042		110-120	2,3-2,6	0,35-0,45	
	30-45	0,3	0,1	0,13					20	5	0,300-0,075					
	35-45	0,5	0,18	0,23				32	30	9	0,417-0,104					
	>45	0,7	0,25	0,3				54	40	12,5						
PUR-Hartschaum	30-40															
PUR-B2	32	0,22			0,25	0,12	0,3					0,35				
	40	0,3			0,3	0,17	0,45									
	50	0,4			0,45	0,25	0,55									
	60	0,5			0,55	0,28	0,7									
	80	0,7			0,8	0,38	1									
	100	0,95			1	0,5	1,2									
	145	2			1,1	0,7	2,6									
PUR-B3	32	0,21			0,26	0,15	0,28									
	40	0,26			0,34	0,18	0,4									
	50	0,4			0,5	0,23	0,55									
	200	2,5			2	1,1	3,5									
	40*	0,3			0,45	0,23	0,35									
	50*	0,43			0,58	0,27	0,55									

Tabelle 2: Thermische Eigenschaften und dynamische Elastizitätsmoduli verschiedener Dämmstoffsysteme. (Entwurfsphase).

Dämmstoff	therm. Eigenschaften					
	Dichte	Dynamische Elastizitätsmodule	Wärmeleitfähigkeit /Meßwerte	Wärmeleitfähigkeit /Rechenwerte	thermischer Ausdehnungskoeff	spez. Wärme
Schäume	Norm					
	kg/m³	MPa	W/mK	J/kgK	1/K	kJ/(kgK)
EPS	15	1,2	0,036-0,038	0,04	5,00E-05 bis 7,00E-05	1,21
	20		0,033-0,036	0,04		
	25		0,032-0,034			
	30		0,031-0,033	0,035		
	50		0,030-0,032			
XPS /HFCKW				0,03		
XPS /CO2				0,035		
	<30				längs 8,00E-05 quer 6,00E-05	
	30-45					
	35-45					
	>45					
PUR-Hartschaum	30-40	0,35	0,025-0,035			
PUR-B2	32		0,0214	0,025		
	40		0,0218	0,025		
	50		0,0226	0,025		
	60		0,0226	0,025		
	80		0,0248	0,025		
	100		0,0258	0,025		
	145		0,0308	0,025		
PUR-B3	32		0,023	0,025		
	40		0,0233	0,025		
	50		0,0236	0,025		
	200		0,037	0,025		
	40*		0,0235	0,025		
	50*		0,0238	0,025		
EPS Walzenbehandelt		0,2				
Blähperlit	70-210		0,05			
Vermiculite-Schüttung		2,6				
Blähkork		6,5				
Korkschrött-Matten	80-200	1	0,045-0,05			
Faserdämmstoffe						
Glasfaser	-matten	0,15				
	-rollfilz	0,18	0,035-0,040			
	-platten	0,2				
Steinwolle	-matten	0,18				
	-rollfilz	0,23	0,035-0,040			
	-platten	0,2				
Kokosfaser	-matten	0,25	0,045			
	-rollfilz	0,35				
Torrfaser	-platten	2,1				
Textilfaser	-platten	1,9				
Holzwohle Leitbauplatte	60-570		0,09-0,15			
Holzfaserdämmplatten	270		0,045-0,06			
Zelluloseflockenmatten	35-80		0,045			
Sonstige						
Korkschröff-Schüttung	80-200	1,6	0,045-0,05			
Leichtbeton			1,4			
Holz Senkr.zur Faser			0,17			

1.2 Erweiterte Untersuchungen der Eigenschaftswerte von EPS

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.

Eingehend untersucht werden EPS-Partikelschäume mit einer Dichte von 15 kg/m³, 20 kg/m³, 25 kg/m³ bzw. 30 kg/m³ sowie ein kontinuierlicher PS-Hartschaum mit einer Dichte von 30 kg/m³.

Der einfachste Versuch zur Ermittlung von mechanischen Kennwerten stellt der Zugversuch dar. In Abbildung 3 werden Versuchsordnung sowie einige Ergebnisse zu den Zugversuchen dargestellt.

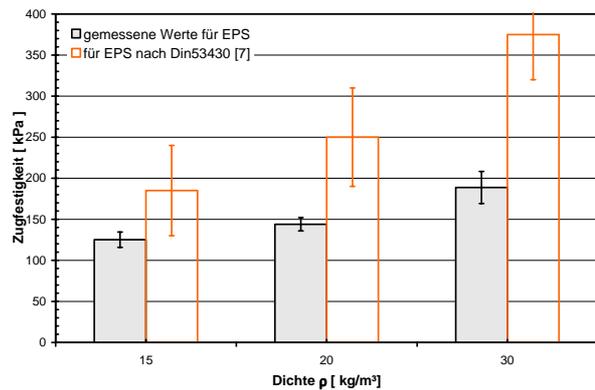
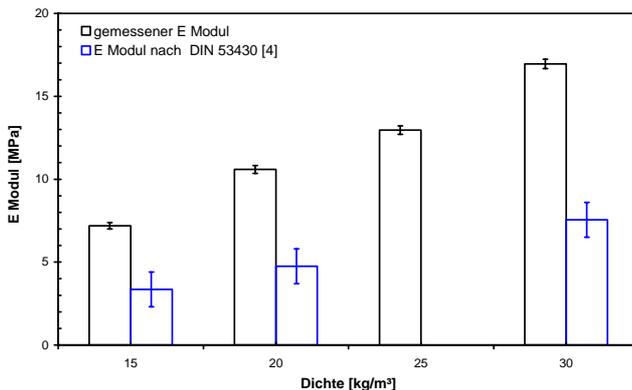
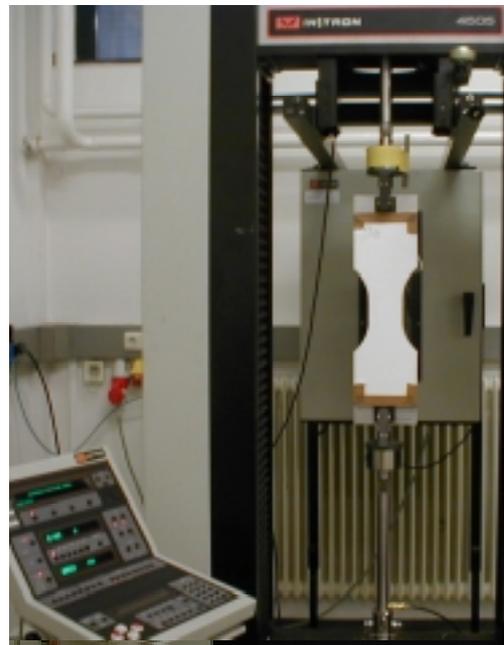
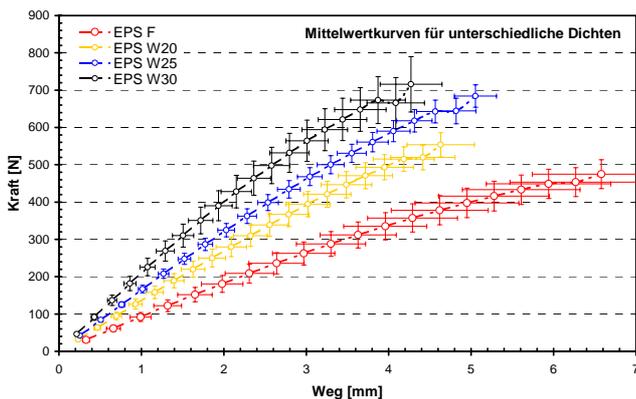


Abbildung 3: Ergebnisse aus den Zugversuchen für die Ermittlung von E-Moduli und Festigkeiten von EPS.

Es zeigen sich zum Teil sehr deutliche Abweichungen zu den Werten aus der Literatur. Die Zusammenhänge zwischen Dichte und Materialverhalten sind im wesentlichen schlüssig. Beim Abfall der Kennwerte für das EPS W25 ist davon auszugehen, daß es hier Chargenschwankungen bei der Materialherstellung gegeben hat.

Normiert man die erhaltenen Spannungs-Dehnungskurven auf der Spannungsskala bezüglich der Dichte, so reduzieren sich diese zu einer Masterkurve, die für die durchgeführten Messungen in Abbildung 4 dargestellt ist.

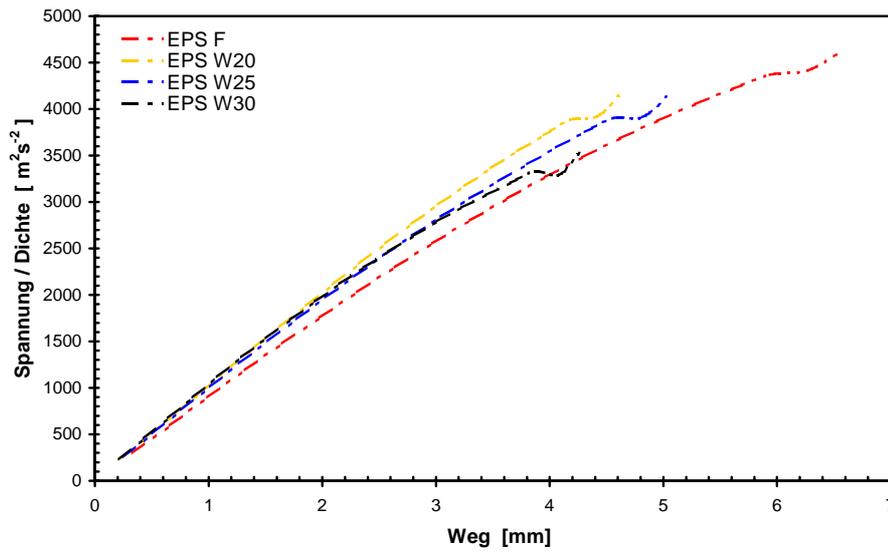


Abbildung 4: Darstellung der Spannungs-Dehnungskurven als Masterkurve durch Normierung der Spannungsskala.

Es zeigt sich, daß gefundene Zusammenhänge der Eigenschaftswerte mit der Dichte tendenziell übereinstimmen. Die Absolutwerte liegen bei den untersuchten Proben unter aber auch über den Literaturwerten. Produktionsbedingt können einerseits zwischen den Chargen Kennwertdifferenzen, aber auch innerhalb einer Charge durch die Entnahmeposition aus dem Schaumblock auftreten. Unterschiede im Versuchsaufbau können ebenfalls Abweichungen der Ergebnisse bewirkt werden. Eine weitere Einflußgröße stellt die Prüfgeschwindigkeit dar, welche den Beanspruchungsgeschwindigkeiten im wirklichen Einsatz eines Produktes angepaßt werden soll.

Der Vergleich zwischen EPS und XPS gleicher Dichte ist in Abbildung 5 dargestellt. Es zeigt sich, daß XPS eine deutlich höhere Zugfestigkeit und Reißdehnung aufweist. Dabei sind die Kennwerte für XPS fast dreimal so hoch wie jene für EPS. Gleichzeitig weisen die beiden Materialien einen E-Modul auf, der innerhalb der Streubreite als ident bezeichnet werden kann. 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 etwa den gleichen E-Modul auf. Für das Bruchgeschehen ist die kontinuierliche Struktur des XPS bzw. die partikelförmige und daher entsprechend fehlstellenbehaftete Struktur des EPS verantwortlich. EPS weist daher die niedrigere Reißdehnung und Zugfestigkeit als das homogenere XPS.

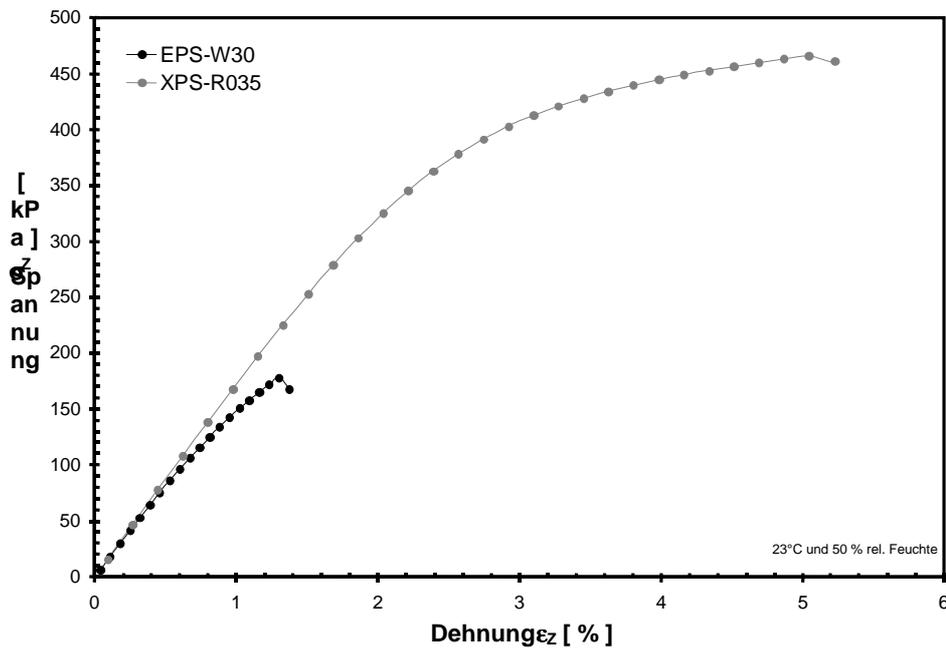


Abbildung 5: Vergleich der Spannungs-/Dehnungsverläufe des Zugversuchs für EPS und XPS gleicher Dichten.

Die in den nachfolgenden Kapiteln dargestellten Untersuchungen basieren auf den selben Produktionschargen. Theoretische Überlegungen und analytische Ansätze werden mit den ermittelten Kennwerten durchgeführt.

In Abbildung 6 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. 20 % erhöht sind.

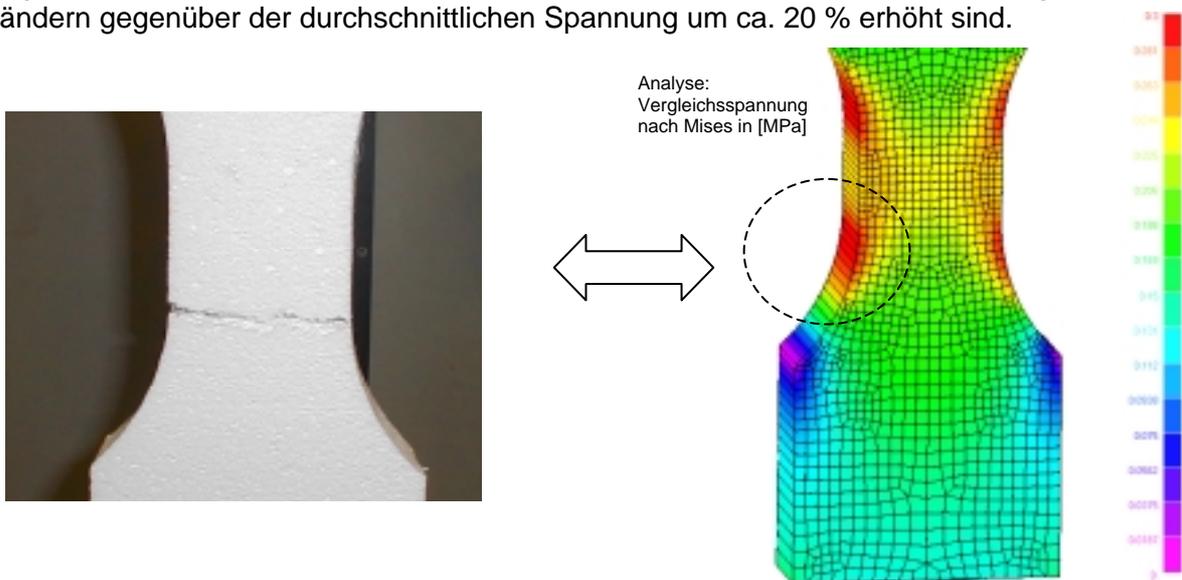


Abbildung 6: Gegenüberstellung der Ergebnisse aus dem Zugversuch mit Analysen mittels Methode der finiten Elemente.

Biegeversuche

Zusätzlich zu den Zugversuchen wurden Biegeversuche durchgeführt um weitere Vergleichswerte zu den Literaturkennwerten zu erhalten. Die Ergebnisse sind in Abbildung 7 zusammengefasst. In den Biegeversuchen wurden höhere Werte beim Vergleich zu den Zugversuchen erhalten. Dennoch liegen die Werte unter den Literaturangaben.

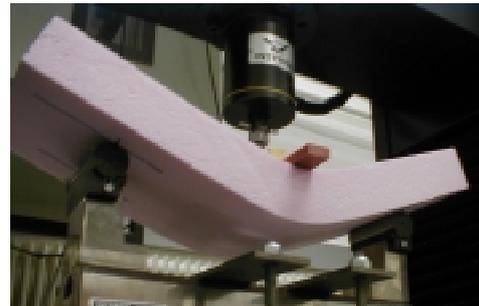
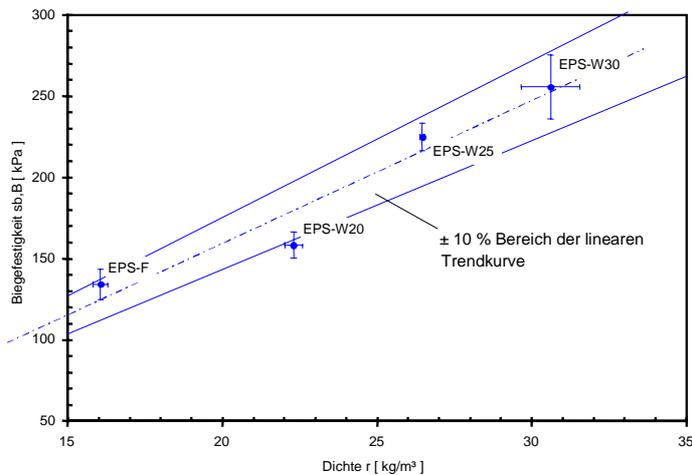
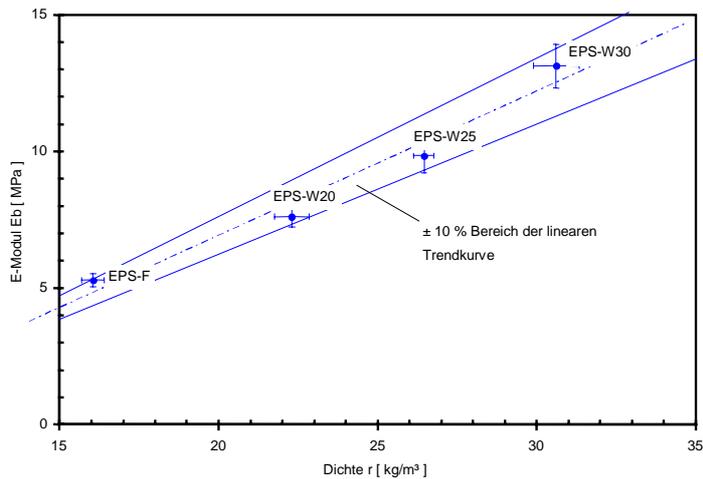


Abbildung 7: Zusammenfassung der Ergebnisse aus den Biegeversuchen.

1.3 Bruchmechanische Charakterisierung von Dämmstoffen

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 Lasteinleitung 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. Aufgrund der Struktur kann jedoch von einer sehr guten Eignung dieser Analyseform ausgegangen werden.

Durch die Einbringung unterschiedlich langer Risse in den Werkstoff wird vor dem Reiß ein Spannungsfeld erzeugt, dessen Verlauf im Nahbereich des Risses durch den analytischen Zusammenhang

$$\sigma_B = K / \sqrt{(\pi \cdot a)} \quad \text{Gleichung 1}$$

gegeben ist.

„a“ stellt in dieser Gleichung die Länge des Risses dar. K ist der Spannungsintensitätsfaktor, der beim Erreichen eines kritischen Wertes $K \rightarrow K_C$ aufgrund des entstehenden Spannungsfeldes zum Versagen des Bauteiles führt. Entsprechend der Belastungsrichtung an einem Reiß sind verschiedene Modi (I, II und III) definiert [1]. Der Modus I stellt eine einfache Reißöffnung mit symmetrischen Abheben der Reißufer dar. Entsprechend dem Modus wird der Spannungsintensitätsfaktor indiziert (K_{IC}).

Alle Untersuchungen innerhalb dieser Arbeit werden mit Modus I durchgeführt. Insgesamt werden für alle Hartschaumtypen jeweils fünf SENT (single edge notched tension – siehe Abbildung 9) Probekörper mit einem Sollwert des a/W Verhältnisses (Reißlänge im Verhältnis zur Gesamtabmessung des Probekörpers) 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 sowie CCT (center-cracked-tension; siehe Abbildung 9) Proben mit a/W von 0,5 geprüft.

Exemplarisch sind in Abbildung 8 aufgezeichnete Weg/Kraft Verläufe für SENT Probekörper der fünf unterschiedliche Hartschäume dargestellt. Es zeigt sich dabei ein erwartetes Bild. Für EPS-W20, EPS-W25 und EPS-W30 weisen die Verläufe eine ähnliche Charakteristik bezüglich ihres Verlaufes auf. Aufgrund der Dichteunterschiede ergeben sich jedoch unterschiedliche Kurvenmaxima. Bei EPS-F tritt das Kraftmaximum der Kurve erst bei einem deutlich höheren Wegwert auf, als bei den restlichen EPS Typen. XPS zeigt wiederum das gewohnt bessere mechanische Verhalten, welches sich deutlich in höheren Kraft und Weg Werten widerspiegelt. Von weiterem Interesse ist noch, daß bei XPS nach Erreichen des Kraftmaximums und dem damit verbunden raschen Reißwachstums dieser im letzten Drittel stoppt. Daher kommt es zu einem erneuten Kraftanstieg. Aufnahmen der Probekörper während der Beanspruchung und Ergebnisse für verschiedene a/W Verhältnisse sind in

Abbildung 9 beispielgebend für den Werkstoff EPS W30 dargestellt. Es zeigt sich ein Anstieg der Werte bei einer Verlängerung des Anrisses.

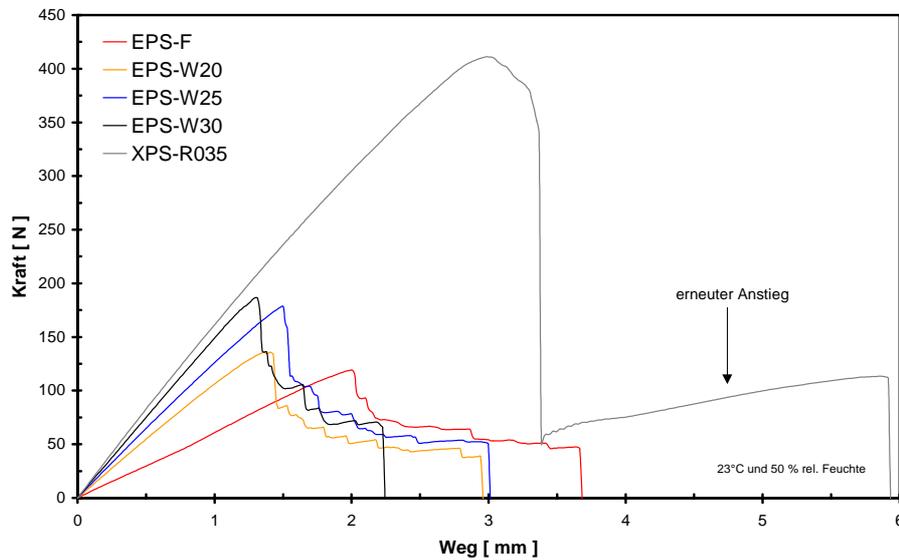


Abbildung 8: Exemplarische Kraft/Weg Verläufe für je einen Versuch der fünf Hartschaumtypen.

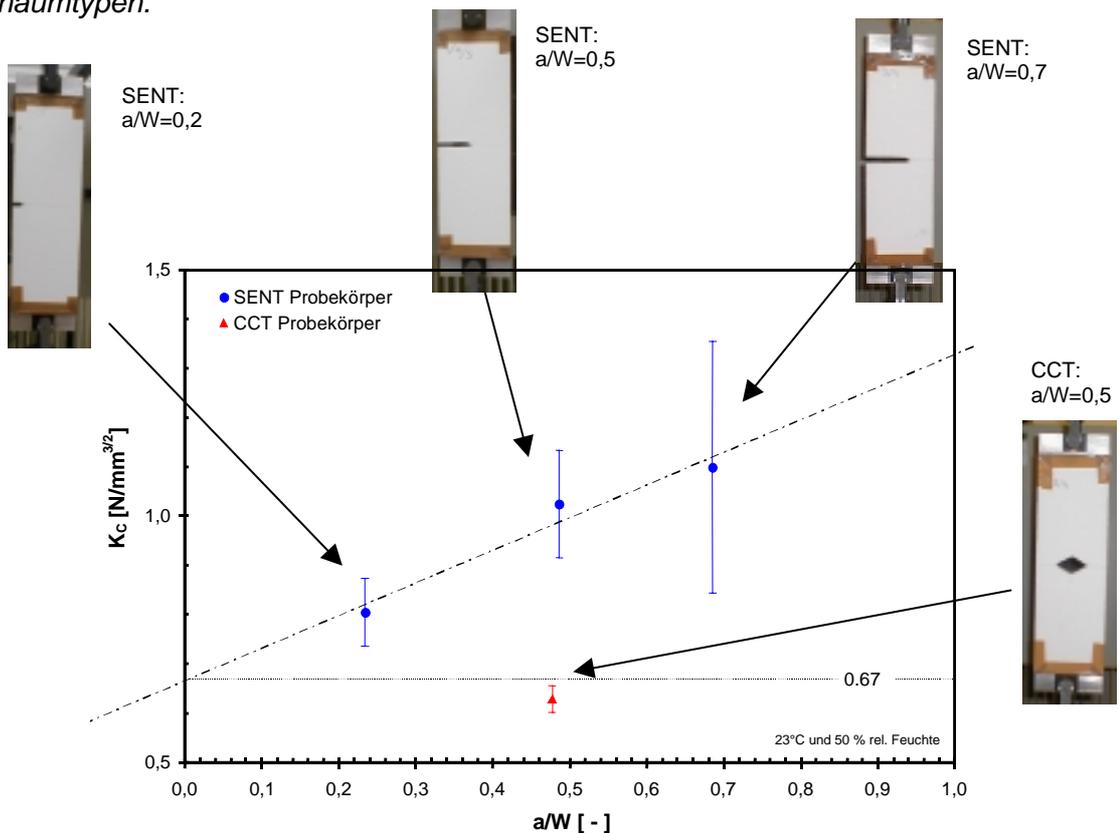
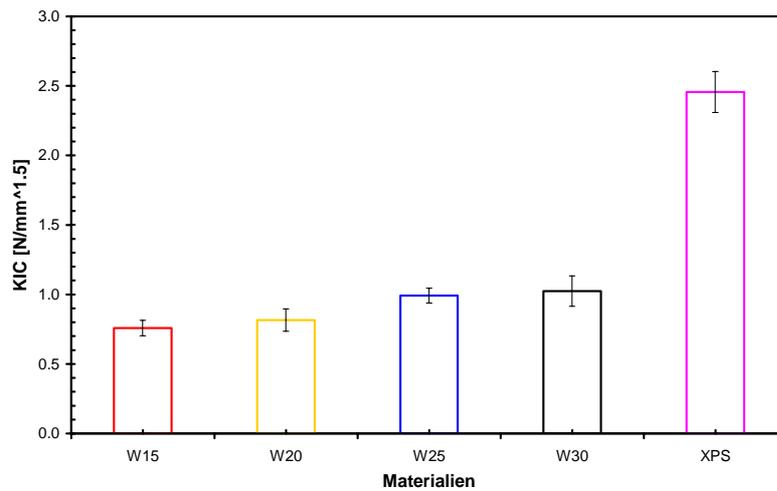


Abbildung 9: K_{IC} -Werte in Abhängigkeit von a/W -Verhältnis, sowie Bilder der bruchmechanischen Untersuchungen.



	n_{gew} []	a/W []	ρ [kg/m ³]	σ_{ZRB} [kPa]	K_{C} [N/mm ^{3/2}]	G_{C} [N/mm]
EPS-F	5/5	0.50	16.1 ± 0.4	35.2 ± 2.7	0.76 ± 0.06	0.084 ± 0.013
EPS-W20	4/5	0.49	21.2 ± 0.7	38.7 ± 3.8	0.82 ± 0.08	0.065 ± 0.014
EPS-W25	5/5	0.49	26.7 ± 0.7	47.0 ± 2.3	0.99 ± 0.05	0.081 ± 0.008
EPS-W30	2/5	0.49	31.0 ± 0.3	48.6 ± 3.2	1.02 ± 0.11	0.069 ± 0.001
XPS-R035	5/5	0.50	32.5 ± 0.1	113.4 ± 5.0	2.46 ± 0.15	0.419 ± 0.045

Abbildung 10: K_{IC} -Werte in Abhängigkeit von a/W -Verhältnis, sowie Bilder der bruchmechanischen Untersuchungen.

Abbildung 6 und Abbildung 11 zeigen weitere Zusammenhänge zwischen bruchmechanischen Kennwerten und der Dichte. Unter G_{IC} versteht man die kritische Energiefreisetzungsrate des Werkstoffes. σ_{ZRB} ist die auftretende Bruchspannung (Festigkeit) am Reißende.

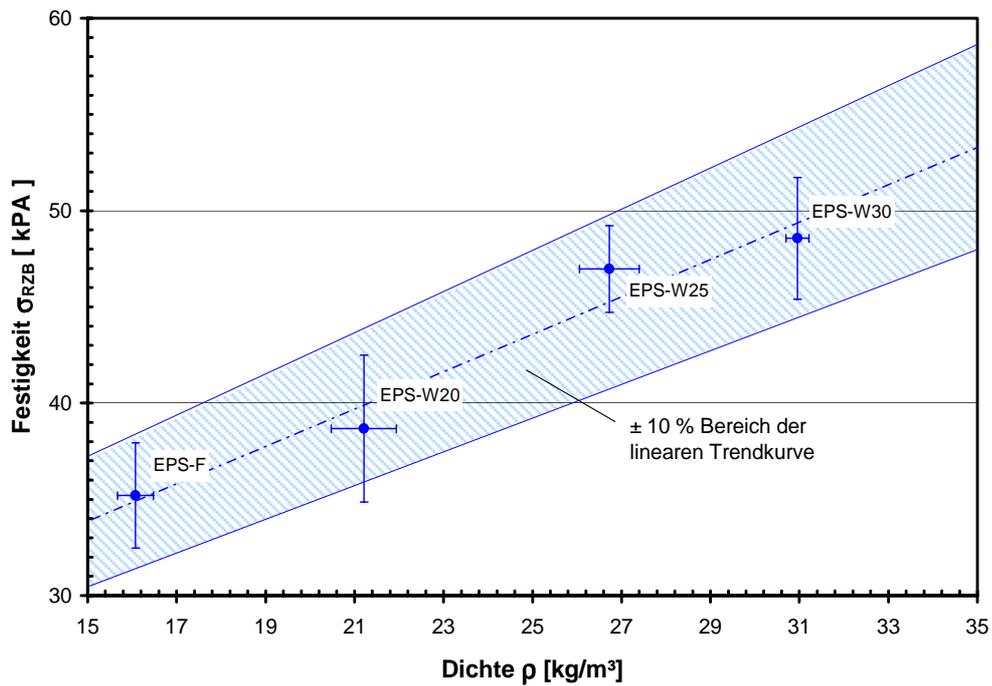


Abbildung 11: Zusammenhang zwischen Dichte und σ_{RZB} für EPS.

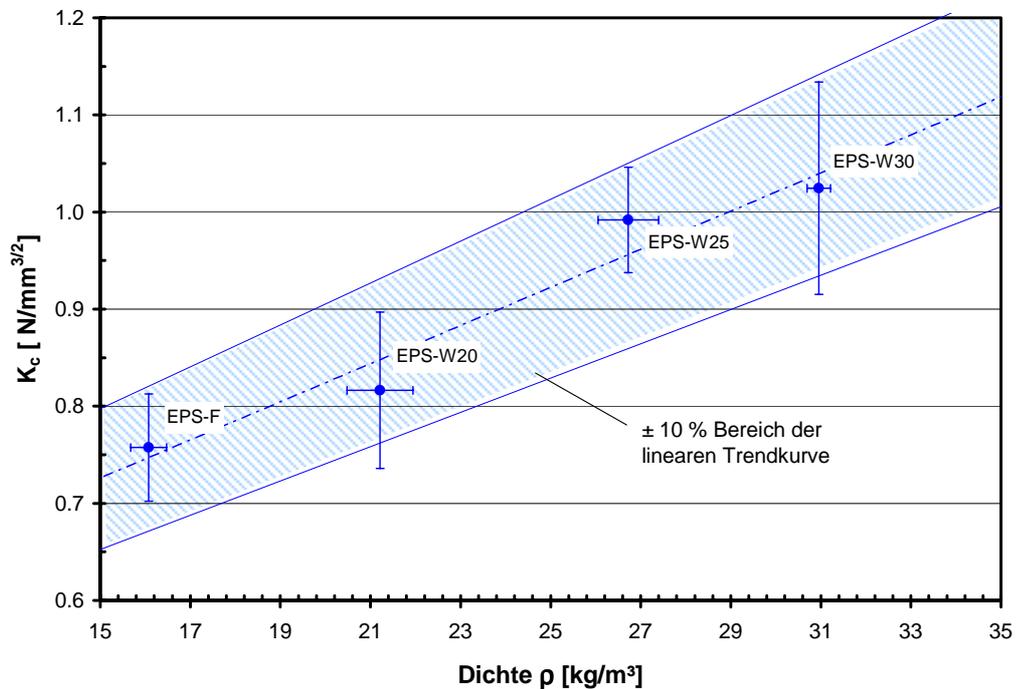
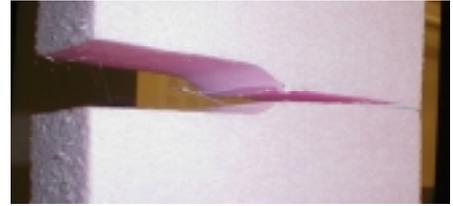
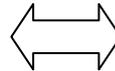
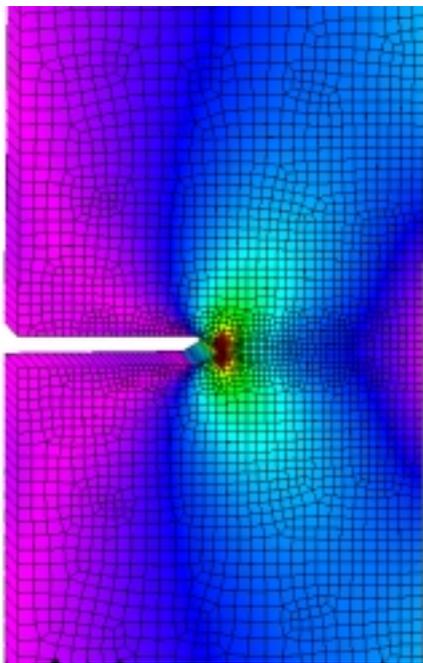
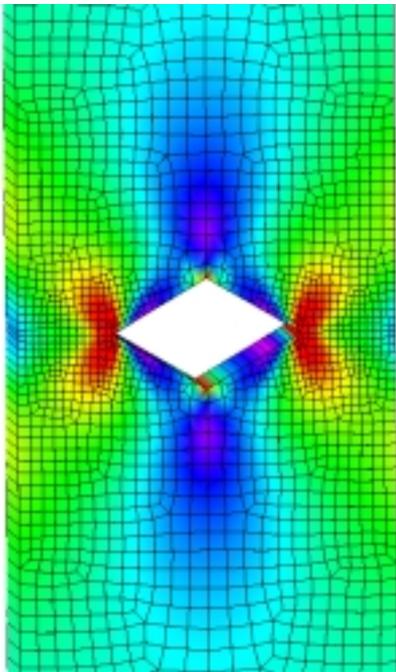


Abbildung 12: Zusammenhang zwischen Dichte und Reißzähigkeit K_{IC} für EPS.

SENT-Probekörper



CCT-Probekörper



Analysen:
Vergleichsspannung
nach Mises in [MPa]

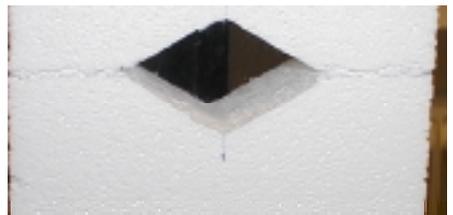


Abbildung 13: Gegenüberstellung der Ergebnisse aus den bruchmechanischen Untersuchungen mit Analysen mittels Methode der finiten Elemente.

1.4 Untersuchungen der Mikrostruktur der Werkstoffe

Ein Wissen über das Aussehen der Mikrostruktur an der Reißfront trägt allgemein zum Verständnis des Bruchgeschehens bei. Aus diesem Grund werden einerseits mit lichtmikroskopischen und andererseits mit rasterelektronenmikroskopischen Methoden Aufnahmen der Werkstoffstruktur gemacht. Einige dieser Bilder sind nachfolgend dargestellt. Abbildung 14 zeigt eine Gegenüberstellung der untersuchten EPS Typen. In Abbildung 15 und Abbildung 16 sind rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen von EPS-F und XPS in verschiedenfacher Vergrößerung gegenübergestellt.

Es können folgende wesentliche Schlüsse gezogen werden:

Ausschlaggebend für das Versagen von Partikelschäumen auf Basis von Polystyrol ist die Qualität der Verschweißung der Perlen untereinander als auch die Größe der Hohlräume zwischen den Partikeln, welche als Fehlstellen fungieren. Abbildung 14c zeigt das untersuchte EPS mit einer Dichte von 25 kg/m^3 . Die in der Aufnahme erkennbaren Partikelzwischenräume (Zwickelvolumen) führen zu den im vorigen Kapitel dargestellten geringer als erwarteten Festigkeitswerten im Vergleich zu den anderen Schäumen.

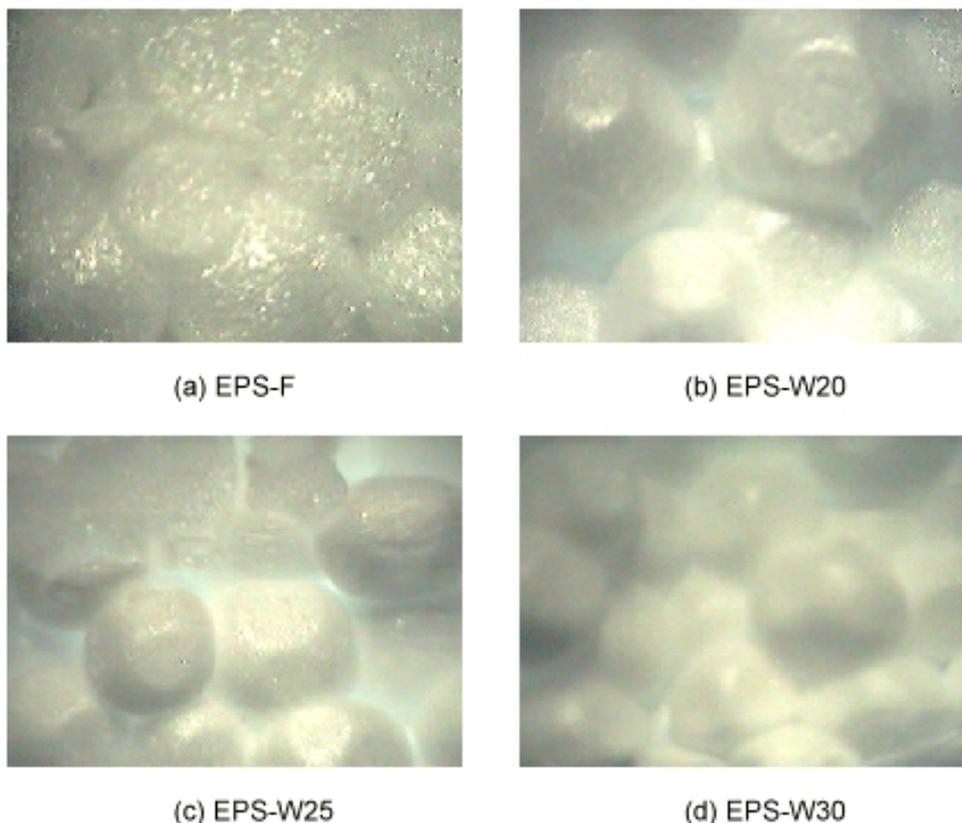


Abbildung 14: Lichtmikroskopische Aufnahmen der untersuchten EPS-Typen.

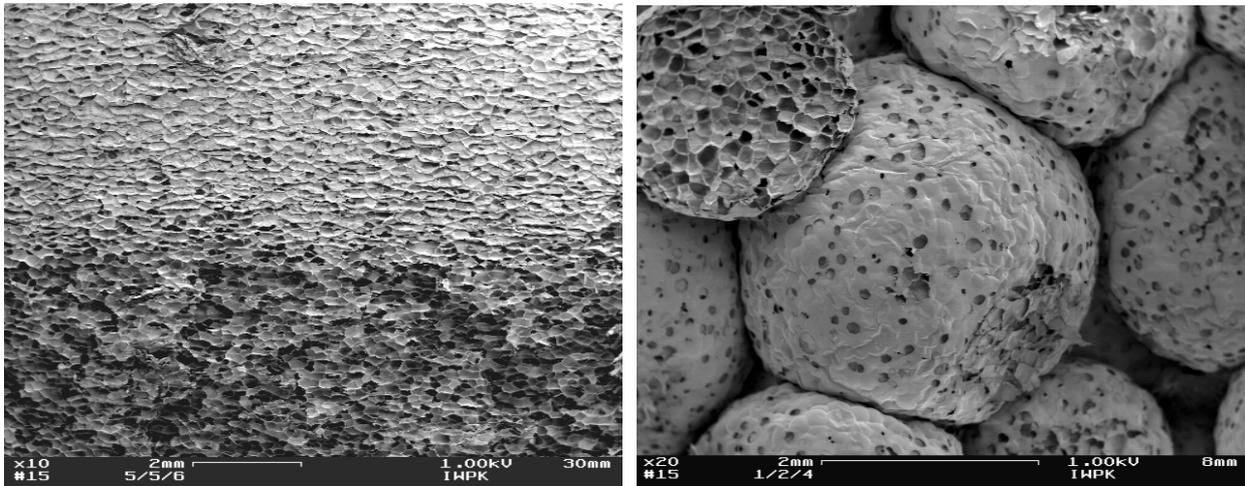


Abbildung 15: Gegenüberstellung rasterelektronenmikroskopischer Aufnahmen von XPS (10-fach) und EPS-F (20-fach).

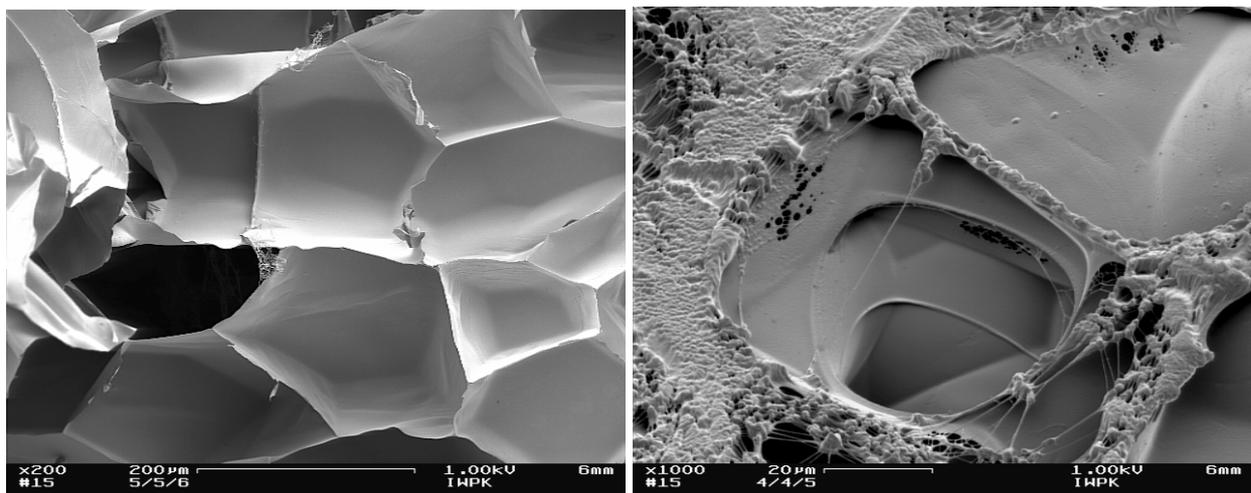


Abbildung 16: Zellstruktur in 200-facher Vergrößerung und Heißdraht-Schnittfläche in 1000-facher Vergrößerung.

Abbildung 15 zeigt die Struktur eines kontinuierlichen Polystyrolschaums (XPS) und jene eines Partikelschaums (EPS-F). Durch die nicht vorhandenen Partikelzwischenräume von XPS werden die deutlich höheren Festigkeiten dieses Werkstoffes begründet. Aus der Abbildung von EPS-F wird ersichtlich, daß durch die extreme Expansion während der Schäumphase bereits ein Kollabieren einiger Zellen auftritt, und dadurch Öffnungen auf der Partikeloberfläche entstehen.

Bei 200-facher Vergrößerung des expandierten Polystyrols (Abbildung 16) zeigt sich die regelmäßige geschlossenzellige und dünnwandige Struktur dieses Werkstoffes, durch welche die hohen Wärmedämmeigenschaften begründet sind. Bei 1000-facher Vergrößerung einer Heißdrahtschnittfläche kann man erkennen, daß durch das Aufschmelzen dickwandigere Bereiche entstehen.

Es wird nun auf die Mikrostruktur weiterer Dämmstoffe eingegangen, welche bezüglich ihrer mechanischen Eigenschaften nicht gesondert analysiert wurden. Nachfolgende Bilder von einem Zelloosedämmstoff, einem Mineralfaserdämmstoff und einem PUR(Polyurethan-)Dämmstoff. Der Zusammenhalt von Werkstoffen, die als Füllstoffe in Hohlräumen zur Dämmung Verwendung finden, wie (z.B. Zelloosedämmstoff, Blähperlite) ist nur durch ein Verkrallen der Bestandteile desselben gegeben. Werkstoffe, deren Bestandteile größere Längen-Durchmesser-Verhältnisse aufweisen, wie (z.B. Hanf und Flachfasern, Glas- und Steinwolle) bilden bereits bessere Netzwerkstrukturen und dadurch eine größere Eigenfestigkeit. Abbildung 19 zeigt einen offenzelligen Polyurethan-Weichschaum. Die zusammenhängende Gitterstruktur bewirkt ein sehr flexibles mechanisches Verhalten. Innerhalb der Struktur ist ein einfacher Wärmeaustausch durch Konvektion möglich. Es ergeben sich daher geringere Wärmedämmeigenschaften.

Abbildung 17: Zelloosedämmstoff.

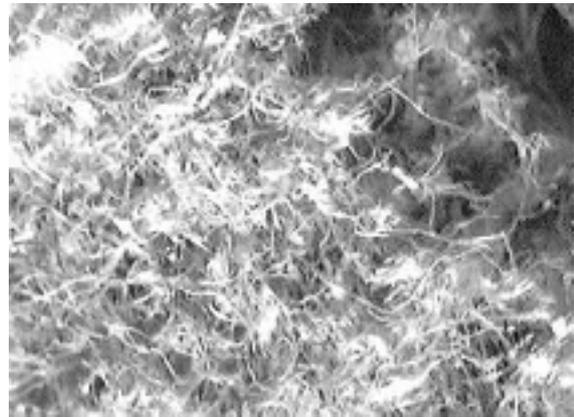
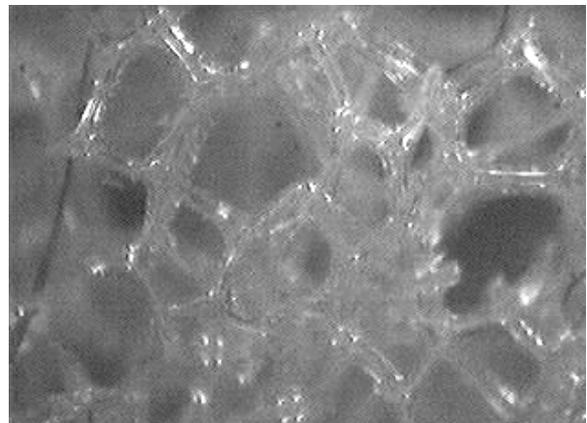


Abbildung 18: Glaswolle.

Abbildung 19: PUR –Weichschaum- offenzellig.



2 DAS MECHANISCHE VERHALTEN AUF BASIS DER GEOMETRISCHEN EIGENSCHAFTEN

2.1 Analyse des mechanischen Verhaltens anhand einfacher Geometrien

Grundsätzlich können Befestigungstechniken mechanischer Art in die Bereiche Kraftschluß (Reibschluß, Reibung) und Formschluß eingeteilt werden. Als chemische Befestigungsvariante ist vollständigshalber noch die Klebung (Stoffschluß) anzuführen. In der gegenständlichen Arbeit erfolgt eine Konzentration auf mechanische Befestigungssysteme. Aus diesen Gründen werden nachfolgende einfache Geometrien zur Untersuchung herangezogen.

Als Geometrie für den Reibschlußversuch wird ein runder Stift verwendet, der in den Dämmstoff spitz eingebracht wird. Der Dämmstoff wird seitlich verdrängt. Durch den Gegendruck, welcher vom Schaum erzeugt wird, und durch den Reibbeiwert zwischen Stift und Dämmstoff, bildet sich eine der Ausziehungskraft entgegenwirkende Reibkraft. Dieses Kräftespiel ist in Abbildung 20 schematisch dargestellt.

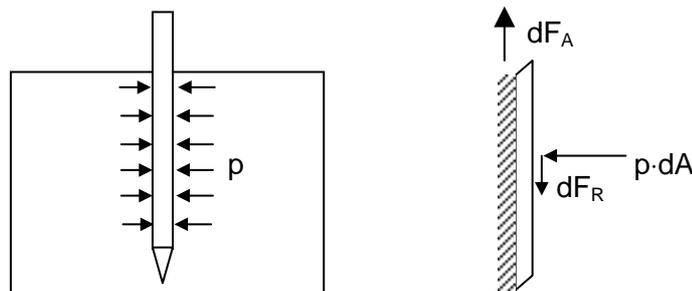


Abbildung 20: Darstellung der Kräfte an einem im Dämmstoff eingebrachten Stift.

Als Geometrie für den Formschluß wird ein tellerförmiger Probekörper in den Dämmstoff eingebracht. Diese Geometrie resultiert aus der Überlegung die wesentlichen, versagensentscheidenden Elemente der gängigen und die möglichen formschlüssigen Befestigungsvarianten durch eine einfache Geometrie abzubilden. Auf diese Weise erzielt man möglichst allgemeingültig interpretierbare Ergebnisse. Diese Überlegungen werden bereits im Zwischenbericht 1 beschrieben.

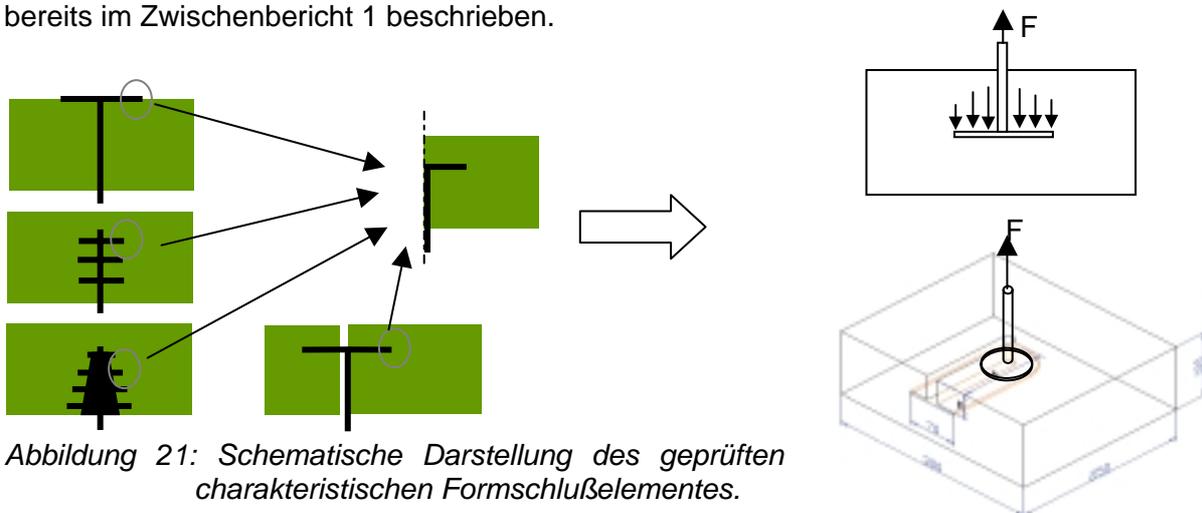


Abbildung 21: Schematische Darstellung des geprüften charakteristischen Formschlußelementes.

Ergebnisse aus den Reibschlußversuchen

Für den Reibschluß werden zwei Stiftvarianten aus Stahl mit unterschiedlichem Durchmesser und eine Stiftvariante aus Kunststoff (Polyamid, erosionsraue Oberfläche) verwendet.

Im Reibschluß werden drei Untersuchungsgruppen durchgeführt:

- die Hysterese;
- kurzzeitige Untersuchungen für den Reibschluß;
- langzeitige Untersuchungen für den Reibschluß.

Da im Bereich des Reibschlusses auch zeitabhängige Zusammenhänge zu erwarten sind, werden Untersuchungen über einige Wochen durchgeführt. Hier werden die Probekörper nicht sofort, sondern nach einer bestimmten Zeit ausgezogen. Für EPS-F werden nach 5 h, 170 h und 500 h die unterschiedlichen Stifte ausgezogen, für EPS-W30 nur die Stahlstifte nach 5 h, wobei für jede Stiftart ein eigener Hartschaumquader verwendet wird.

Für jeden einzelnen Versuch werden Kraft/Weg Verläufe aufgezeichnet und zur Auswertung herangezogen. Hierbei sind Mittelwerte von maximal auftretenden Kräften, von Kräften zu bestimmten Wegpunkten und von Flächen zwischen Kurvenverlauf und Wegachse von Interesse.

Abbildung 22 zeigt Kurvenverlauf und Bild der durchgeführten Hysteresisversuche.

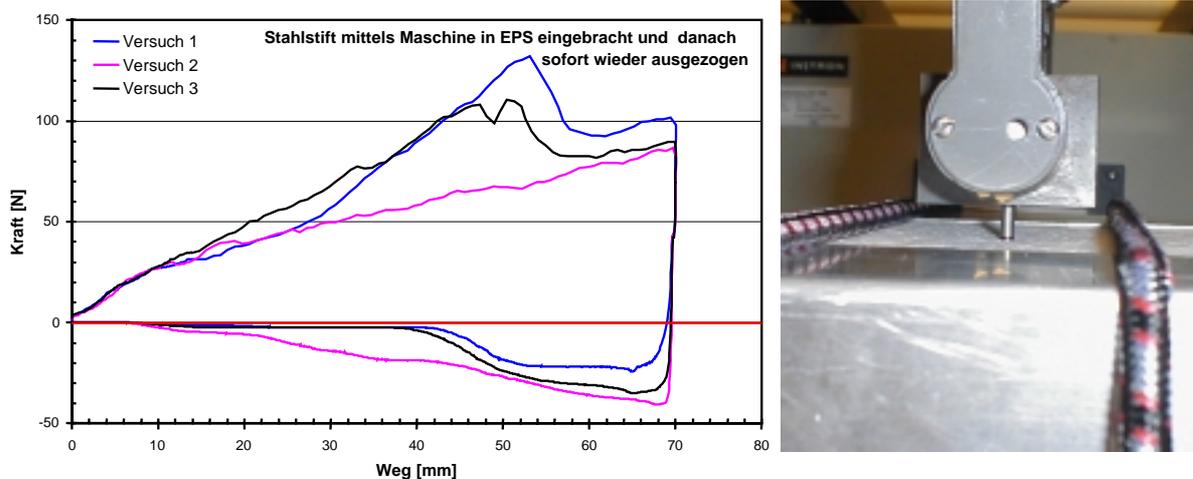


Abbildung 22: Kraft-Wegkurven der durchgeführten Hysteresisversuche.

In Abbildung 23 wird ein Überblick zu den durchgeführten Ausziehversuchen gegeben. Es werden die Ergebnisse für unterschiedliche Dämmaterialien, unterschiedliche Stiftmaterialien und –durchmesser dargestellt.

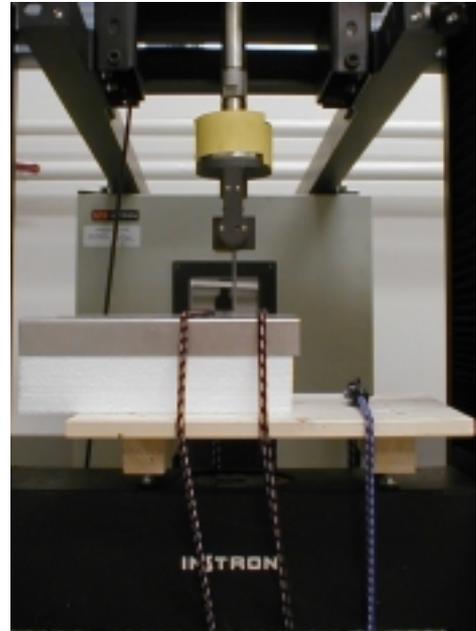
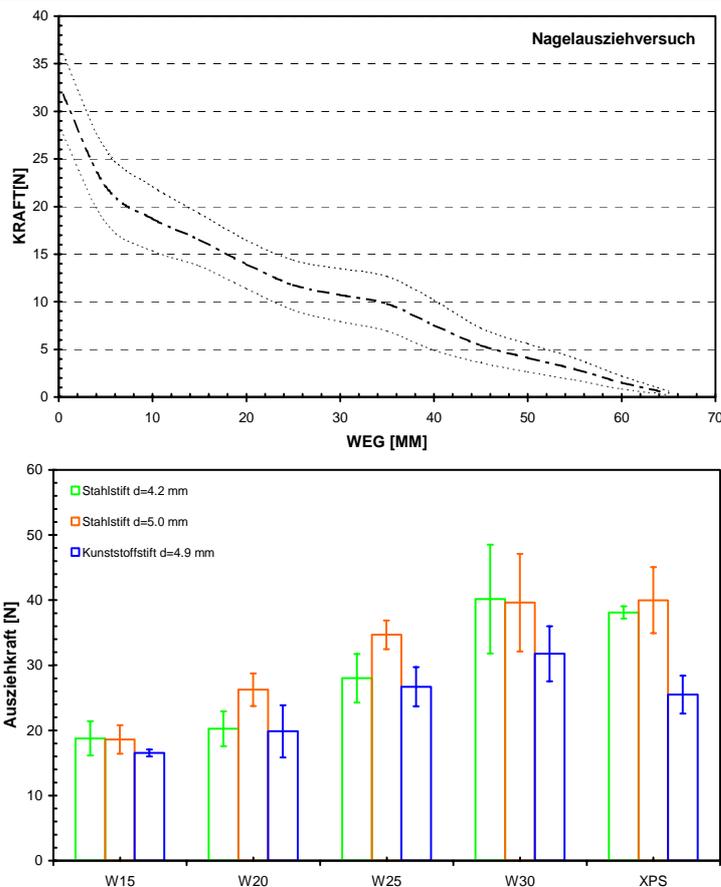


Abbildung 23: Ausziehversuche und entsprechendes Streuband, Ergebnisse für verschiedene Dämm- und Stiftmaterialien sowie –Durchmesser, Bild bei Durchführung der Versuche.

Es zeigt sich, daß sich bei Anstieg der Dämmstoffdichte eine Erhöhung der Ausziehkraft einstellt. Bei Vergrößerung des Durchmessers erhöht sich tendenziell die Ausziehkraft proportional zur Oberfläche. Der geringere Reibbeiwert zwischen Polyamid und EPS führt zu einer geringeren Ausziehkraft beim Vergleich mit dem Stahlstift.

Versuche und Ergebnisse aus den Formschlußanalysen

Für die Durchführung der Formschlußversuche werden verschiedene Plattenmaterialien verwendet. Aus diesen werden runde, scheibenförmige Probekörper hergestellt. Eine Variation der Plattensteifigkeiten K erfolgt durch unterschiedlicher Materialien und Stärken. Die Plattensteifigkeit errechnet sich nach

$$K = \frac{E \cdot t^3}{12 \cdot (1 - \nu^2)}, \quad \text{Gleichung 2}$$

wobei t die Plattendicke, E den E-Modul und ν die Querkontraktionszahl ausdrückt. Tabelle 3 zeigt eine Übersicht über die verwendeten Materialien und Geometrien.

Tabelle 3: Plattenwerkstoffe für den Formschlußversuch mit den angenommenen E-Moduli und Querkontraktionszahlen.

Material	Dicke [mm]	angenommener Modul [MPa]	ang. Querkontraktionszahl []	Plattensteifigkeit [Nmm]
PP	1	1200	0.3	110
PP	2	1200	0.3	880
PP	3	1200	0.3	3 000
St37	2	210000	0.3	154 000

Neben der Plattengeometrie werden weiters Position im Dämmstoff und Plattendurchmesser variiert.

Um die Vielzahl der Variationen zu verdeutlichen, werden die einzelnen Parameterstudien in den nachfolgenden Tabellen 4a-e dargestellt. Im speziellen werden Untersuchungen mit Ringplatten aus Stahl bzw. Polypropylen für alle Dämmstofftypen, in Abhängigkeit der Plattensteifigkeit der Formschlußeinheit für EPS-W30, mit unterschiedlichen Ringplattenaußendurchmesser für EPS-W30, mit unterschiedlichen Ausziehhöhen und Auflagerbedingungen und mit Mehrfachenplatten durchgeführt.

Tabellen 4a-e: Versuchsplan der durchgeführten Formschlußversuche.

a.) Darstellung des Versuchsplans - Variation der Hartschaumtypen

	EPS-F	EPS-W20	EPS-W25	EPS-W30	XPS-R035
ST2-h40-t95-N	X	X	X	X	X
PP2-h40-t95-N	X	X	X	X	X

b.) Versuchsplan - Variation der Plattensteifigkeit

	EPS-W30
PP1-h40-t95-N	X
PP2-h40-t95-N	X
PP3-h40-t95-N	X
ST2-h40-t95-N	X

c.) Versuchsplan für die Variation der Kreisplattenaußendurchmesser D_{AR}

	EPS-W30
PP2D50 h40-t95-N	X
PP2D60 h40-t95-N	X
PP2-h40-t95-N	X

d.) Versuchsplan für die Ermittlung des Einflusses der Ausziehhöhe h und der Auflagerbedingungen

	EPS-W30
PP2-h20-t95-N	X
PP2-h40-t95-N	X
PP2-h40-t95-B	X
PP2-h50-t95-W	X
PP2-h60-t95-N	X
PP2-h60-t95-W	X

e.) Versuchsplan für mehrfachen Formschluß

	EPS-W30
PP2-h20h40-t95-N	X
PP2-h40h60-t95-W	X
PP2-h20h40h60-t95-N	X
PP2-h30h40h50-t95-N	X

Aufgrund der Vielzahl an unterschiedlichen Arten des Formschlußversuches werden für jeden Aufbau im Durchschnitt nur drei bis vier Versuche durchgeführt.

Zusätzlich zur Variation der Materialien und Geometrien werden die Randbedingungen bei der Belastung variiert.

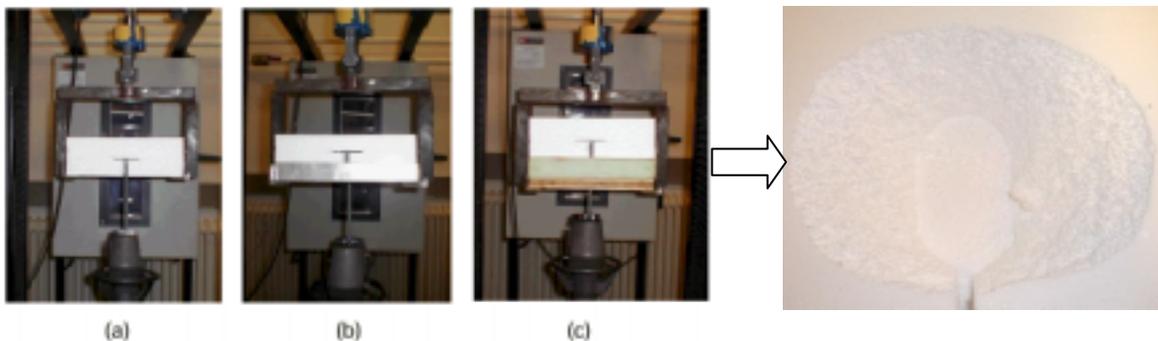
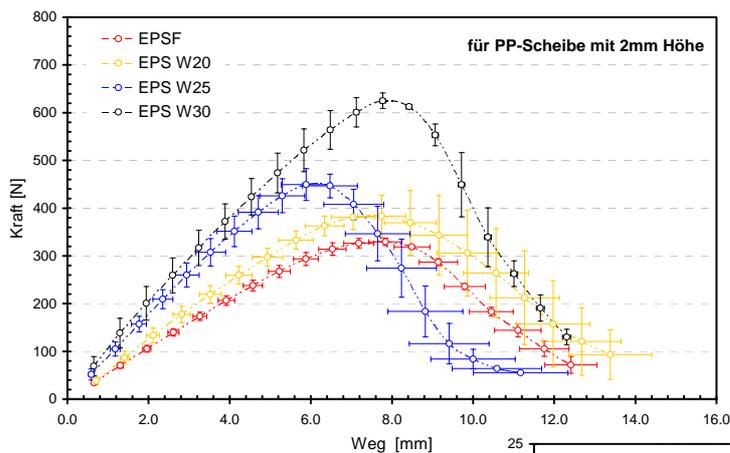


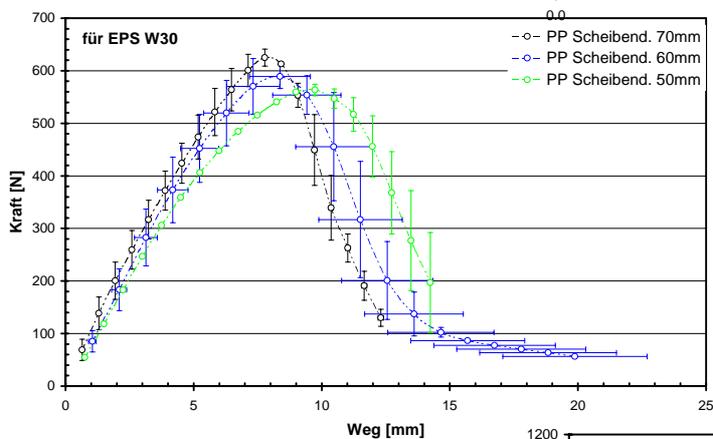
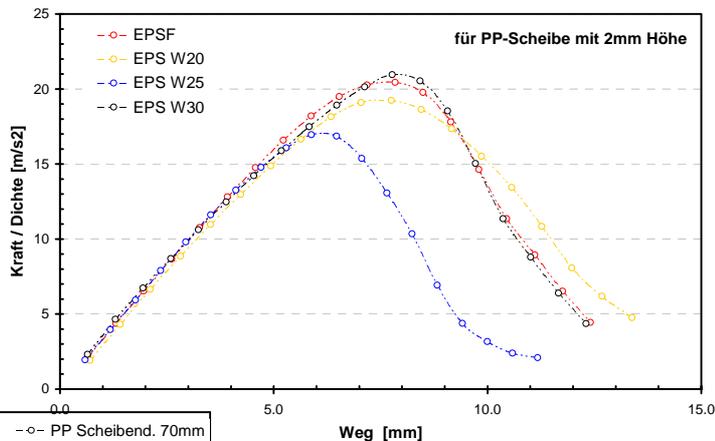
Abbildung 24: Variation der Randbedingungen bei der Belastung – a.) zweifachlinienförmiges Gegenlager ((N)ormal) – b.) vierfachlinienförmiges Gegenlager ((W)inkel) – c.) flächiges Gegenlager ((B)etondruck); exemplarischer Ausbruchkegel von oben.

Abbildung 25 und Abbildung 26 zeigen die ermittelten Ergebnisse in Diagrammform. In Form von Mittelwertkurven und normierten Kraft-Weg-Kurven sind verschiedene Abhängigkeiten dargestellt.



Variation der EPS-Dichte für
2 mm PP-Platte
-
Kraft-Weg-Kurven.

Variation der EPS-Dichte für
2 mm PP-Platte
-
Kraft-Weg-Kurven – mit Dichte
normierte Kraft-Skala.



Variation des
Scheibendurchmessers
-
Kraft-Weg-Kurven

Variation der Ausziehhöhe und
der Randbedingungen
2-fach, 4-fach, und flächiges
Gegenlager (Schaum)
-
Kraft-Weg-Kurven

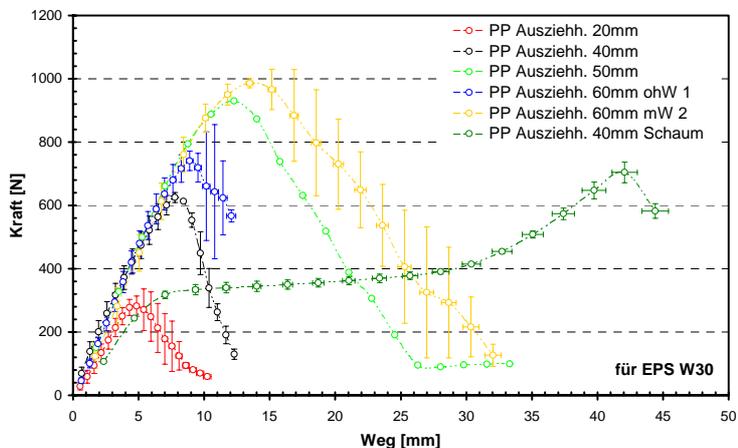
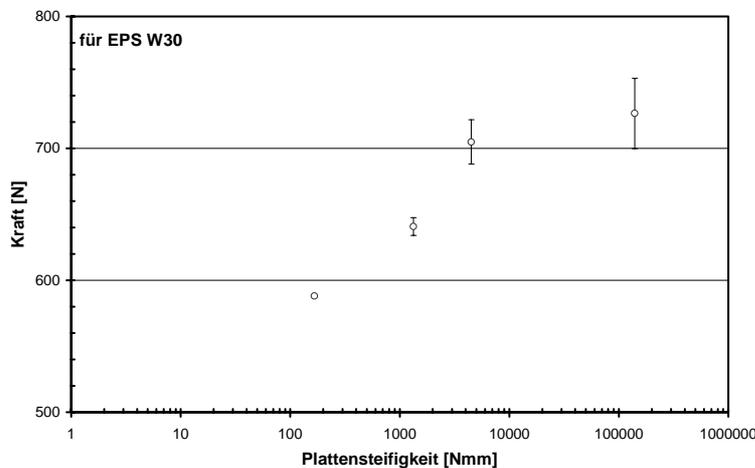
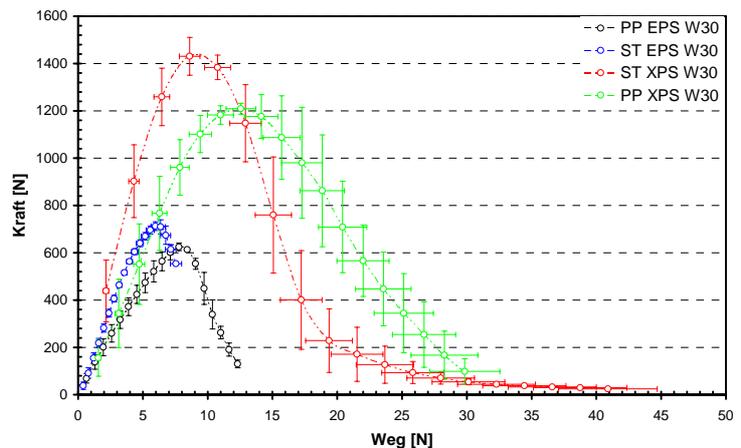


Abbildung 25: Ergebnisüberblick 1.

Variation der Plattensteifigkeit
für EPS-W30
–
Kraft-Weg-Kurven.



Variation der Plattensteifigkeit
für EPS-W30
–
Maximalwerte über der
Ausziehkraft.

Abbildung 26: Ergebnisüberblick 2.

Eine detaillierte Interpretation der Ergebnisse erfolgt im Endbericht. Abbildung 27 stellt den praktischen Ausziehversuch der Analyse mittels Methode der finiten Elemente gegenüber. Es zeigt sich, daß die Ergebnisse des Versuches nur durch richtiges verwenden der entsprechenden Randbedingungen in der Simulation wiedergespiegelt werden können. Auf nähere Details und direkt umsetzbare Aussagen wird nach eingehender Auswertungen im Endbericht eingegangen.

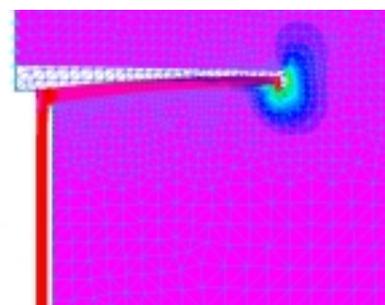
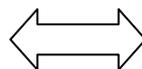


Abbildung 27: Gegenüberstellung von Simulation und realen Versuch.

Abbildung 28 zeigt Bilder und Ergebnisse bei Verwendung mehrerer Platten für den Formschluß. Diese Versuche sollen beispielsweise das Ausziehverhalten von schraubenförmigen Befestigungselementen widerspiegeln. Es zeigt sich, daß das Erhöhen der Eindringtiefe in den Dämmstoff deutlich größere Vorteile bringt als eine Vergrößerung der Anzahl der Platten.

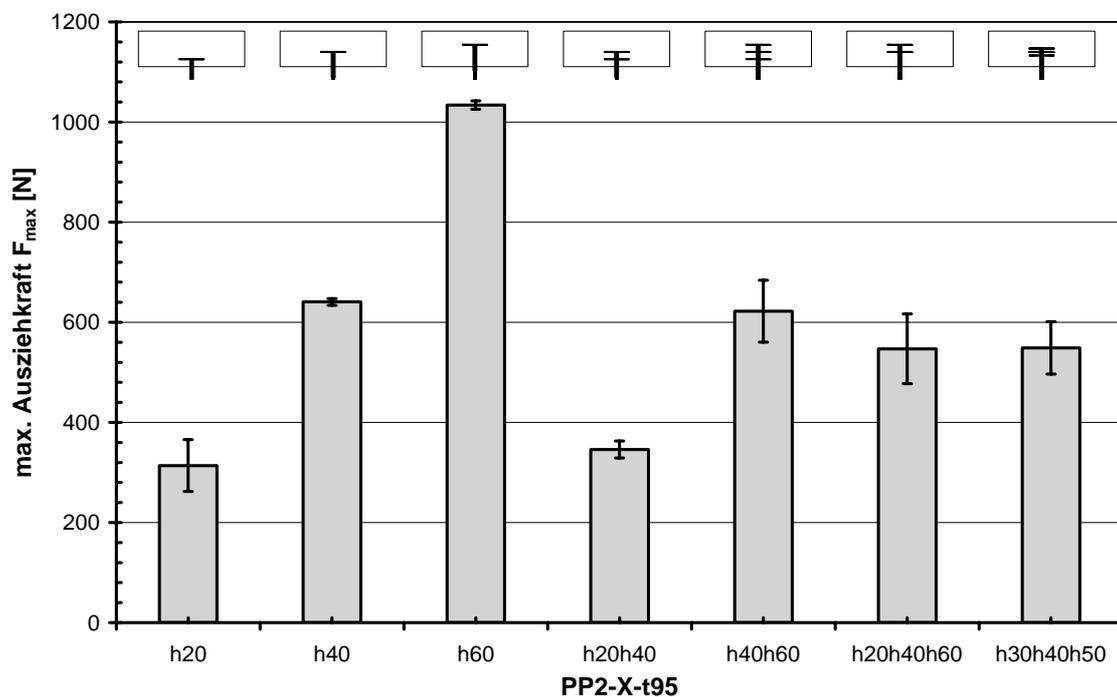


Abbildung 28: Versuche mit 2-fach und 3-fach eingebrachter Platte, entsprechende Ausbruchkegel nach erfolgter Prüfung sowie Ergebnisseübersicht.

2.2 Untersuchung des mechanischen Verhaltens von bestehenden Lösungen und neuen Ansätzen mit komplexer geometrischer Ausführung

Es folgt nun eine Aufstellung verschiedener Untersuchungen anhand von Befestigungsvarianten, welche am Markt eingeführt sind, und Befestigungsvarianten, welche sich noch in einem Entwicklungsstadium vor der Markteinführung befinden. Hier wird nur auf die Darstellung der Ergebnisse eingegangen. Theoretische Modellansätze werden im nächsten Zwischenbericht nach eingehenderen Untersuchungen folgen.

In Abbildung 29 sind Versuche anhand von herkömmlichen Tellerdübeln dargestellt. Als Dämmstoff wird eine 10 cm starke Dämmplatte von Typ EPS-F verwendet. Die geringe Biegesteifigkeit des geprüften Dübeltellers führt zu einem Zusammenknicken. Der gesamte Dübel wird durch ein entstehendes Loch im Dämmstoff gezogen. Trotzdem kann eine Ausreißkraft zwischen 400 N und 600 N erreicht werden.



Abbildung 29: Herkömmlicher Tellerdübel und Bruchverhalten beim Auszug aus einer 10 cm starken EPS-F-Platte.

Abbildung 30 zeigt die verschiedenen schraubenförmigen Befestigungselemente und deren Kraft-Weg-Verlauf unter Belastung. In Abbildung 31 werden die Ergebnisse einer Simulation eines Zugversuches mit einem Prototyp dem realen Versuch gegenübergestellt.

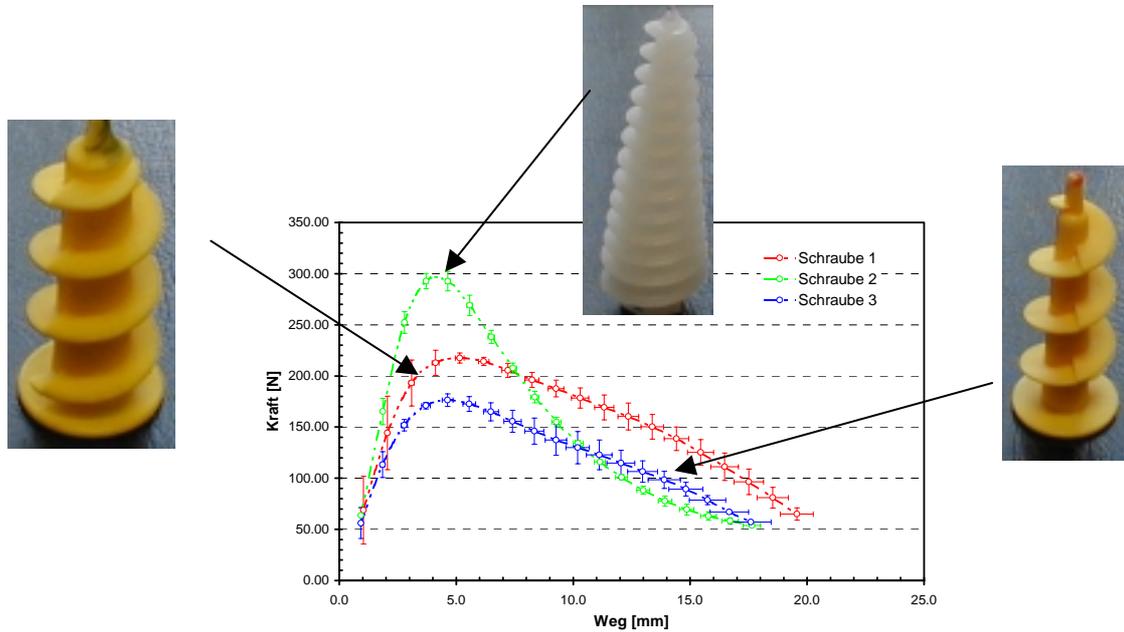


Abbildung 30: Ausziehverhalten verschiedener schraubenförmiger Verbindungselementes.

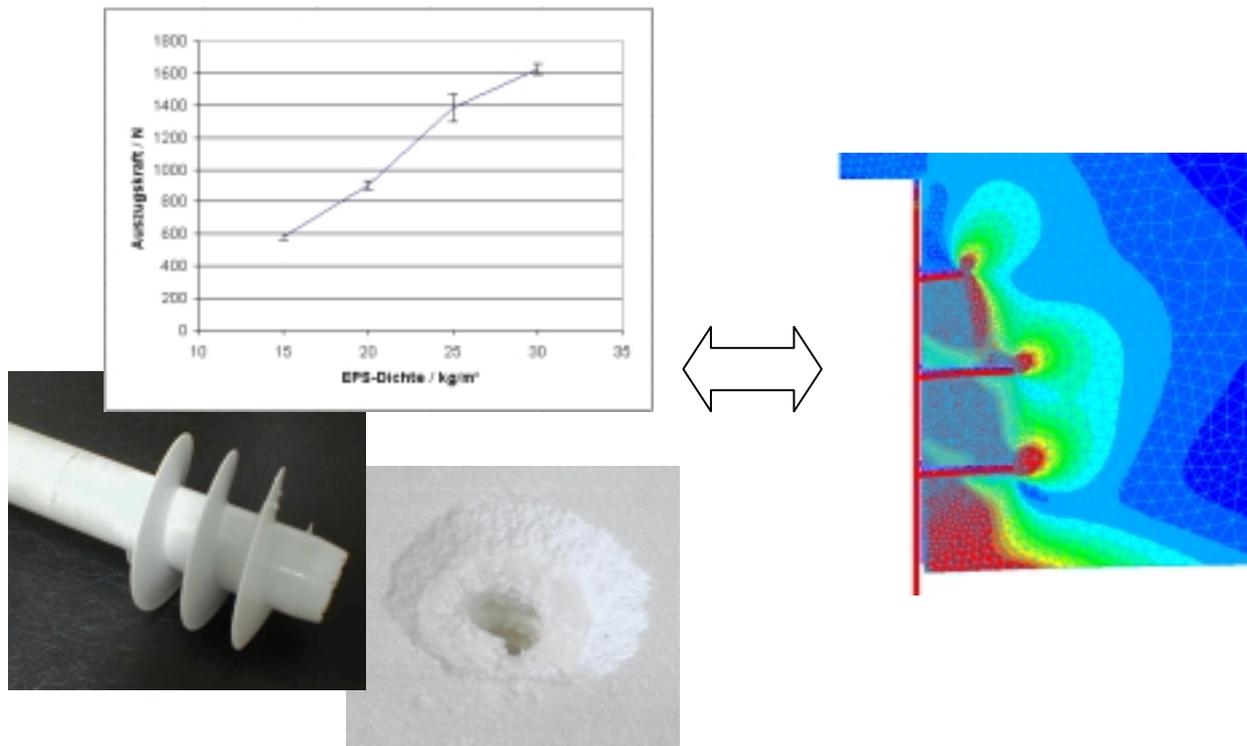


Abbildung 31: Gegenüberstellung Zugversuch-Simulation eines Prototypes (Innendurchmesser $d_i = 30$ mm $d_a = 75$ mm).

Abbildung 32 zeigt das Ausziehverhalten eines Befestigungselementes mit widerhakenförmiger Ausführung. Dieses Befestigungselement entstammt dem Schweizer Patent des Herrn Schugk (siehe Literaturliste Zwischenbericht 1) und ist derzeit nicht am Markt eingeführt. Es dient der Befestigung von Faserdämmstoffen und wird unter dem Dämmstoff durch Verklebung oder durch eine mechanische Befestigungsvariante an die Wand montiert.

Dieses Befestigungselement wird hier vorerst am Dämmstoff EPS getestet, um vergleichende Aussagen zu den Analysen der einfachen Geometrien treffen zu können.

Weitere Versuche mit Faserdämmstoffen werden folgen.

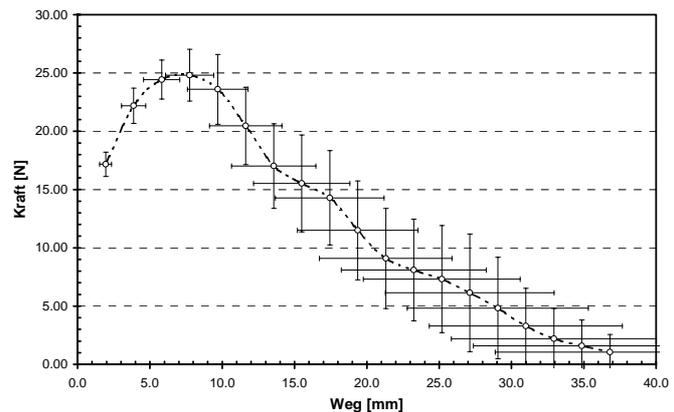


Abbildung 32: Ausziehverhalten eines stiftförmigen Befestigungselementes mit widerhakenartigen Aufsetzen.

In Abbildung 33 ist der Versuchsaufbau für einen Prototypen einer neuen Variante für ein Verbindungselemente dargestellt. Es handelt sich hier um eine Konstruktion, die es zuläßt den Dämmstoff nach Ablauf der Lebenszeit eines Gebäudes wieder von diesem zu trennen. Als Befestigung dienen stiftförmige Elemente auf einer Tellerplatte. Diese stiftförmigen Elemente sollen optimiert werden, um eine maximale Ausziehungskraft zu erhalten. Wiederum können hier Parallelen zur einfachen reibschlüssigen Geometrien gezogen werden.

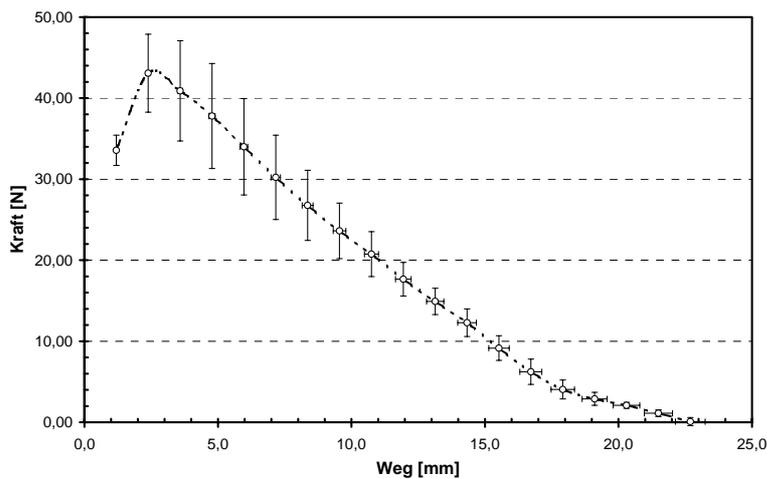


Abbildung 33: Nagelplatte – mehrfacher Reibschluß.

3 ALLGEMEINE ANFORDERUNGEN AN BEFESTIGUNGSELEMENTE

Die Auslegung einer Konstruktion, in unserem Fall jene zur Positionierung eines Dämmstoffes in einem Wandaufbau, ist essentiell von den auf das System von außen wirkenden Kräften abhängig. Grundsätzlich sind hier zwei Varianten zu unterscheiden. In Wärmedämmverbundsystemen wird der Dämmstoff selbst zum Lastabtrag herangezogen. In anderen Fällen dient der Dämmstoff als reiner Füllstoff und wird nicht mechanisch belastet. Der Lastabtrag erfolgt dann beispielsweise über einen tragenden Rahmen der Außen- und Innenschale fest miteinander verbindet. Die wesentlichen und möglichen auf das System wirkenden Kräfte werden nachfolgend diskutiert.

3.1 Eigenlast

Bei konventionellen Tellerdübeln kann davon ausgegangen werden, daß der Lastabtrag in WDVS rein durch den Schubmodul des Dämmstoffes erfolgt, und der durch den Dübel wirkende Anteil vernachlässigbar klein ist [2].

Abbildung 34 zeigt schematisch die nach [2] entstehende Konsoltragwirkung beim Lastabtrag durch das Eigengewicht oder hygrothermische Verformungen in Gegenüberstellung mit einer Simulation für diesen Lastfall. Die wie Kragträger fungierenden Dübelschäfte sind in Ihrer Steifigkeit dem Dämmstoff untergeordnet und tragen zur Gesamtsteifigkeit nur minimal bei. Bei Verformung des Systems wird durch den Dübel jedoch die Putzschicht stärker an die tragende Wand gepreßt. Die Zugsteifigkeit des Dübels wird wirksam.

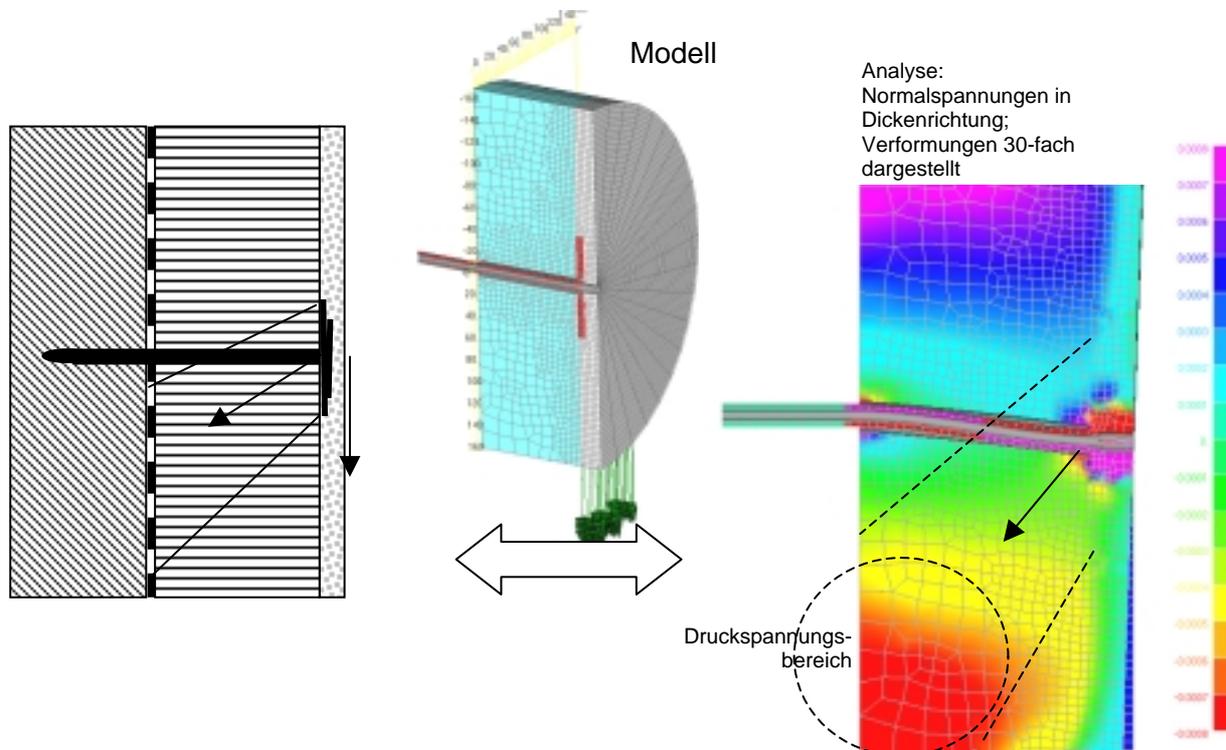


Abbildung 34: Schematische Darstellung: Kräftespiel bei Lastfall Eigengewicht oder hygrothermische Einwirkungen bzw. Lastfallkombination - „Konsoltragwirkung“ nach [2] und Gegenüberstellung der Simulation.

3.2 Hygrothermische Verformung

Unter dem Begriff „hygrothermische Einwirkungen“ sind die Lastfälle Schwinden/Quellen und Maßänderung infolge Temperaturänderung zusammengefaßt.

Laut [Schäfer] sind diese insbesondere an den Rändern von großer Bedeutung, da in diesem Bereich die Spannungen eingeleitet werden. Analoge Phänomene sind im mechanischen Prinzip der Klebung bekannt

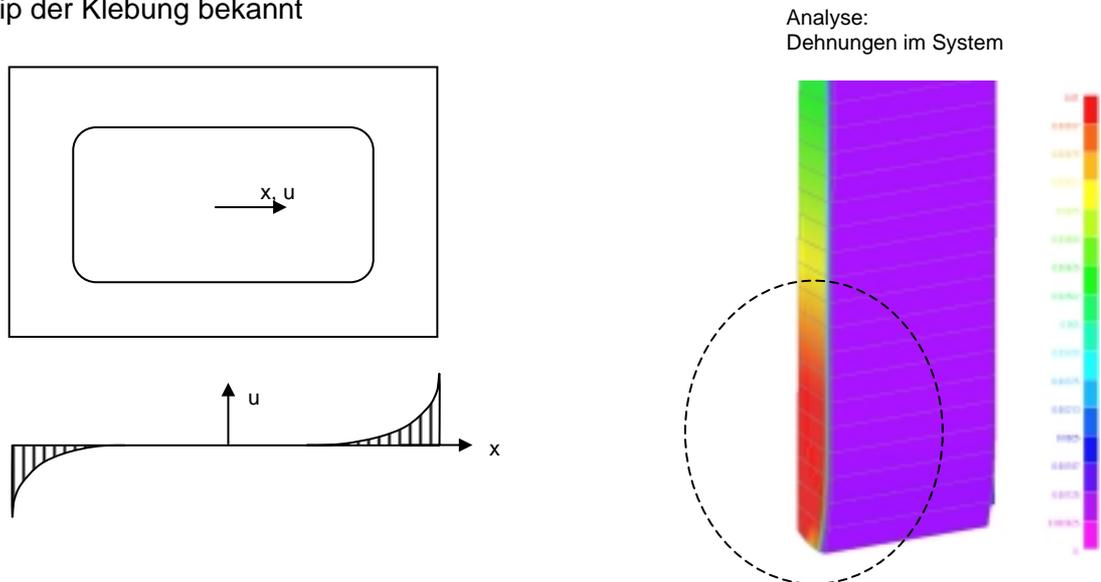


Abbildung 35: Analyse eines Wärmedämmverbund-Fasadenfeldes – durch hygrothermische Verformungen werden Belastungen von den Rändern her eingeleitet.

3.3 Windkräfte

Die Randbereiche von Gebäuden sind erheblichen Windsoglasten unterworfen. Diese sind in DIN 1055 beschrieben [3]. Bei Messungen wurden als Zugtragfähigkeit von 0,3 kN bis 0,5 kN pro Dübel gemessen [2]. In Untersuchungen an größeren Flächen wurde festgestellt, daß die Zugtragfähigkeit des Systems durch die Verwendung von höherfesten Dämmstoffplattenmaterialien gesteigert werden kann.

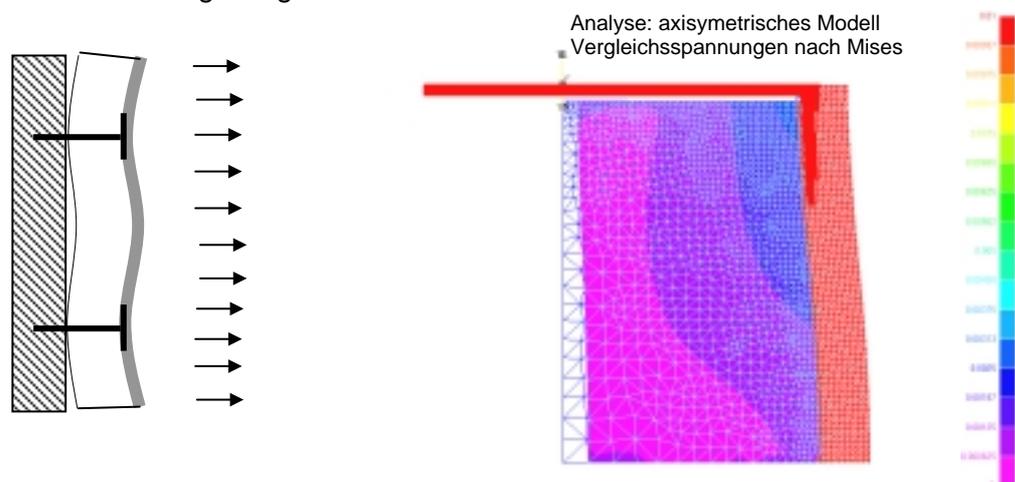
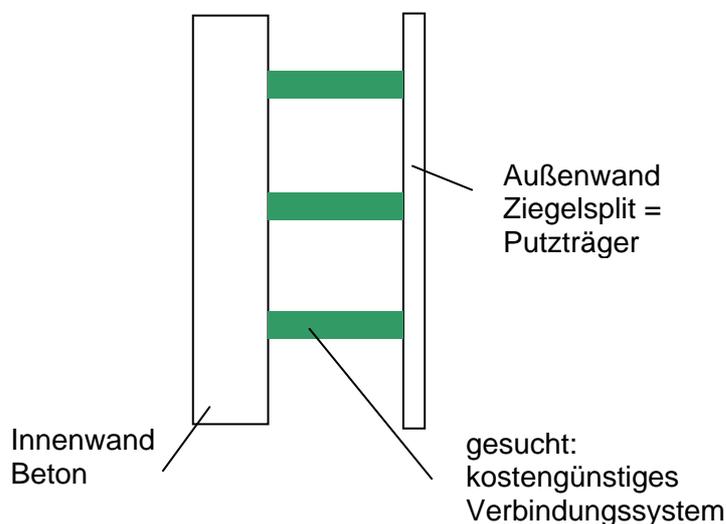


Abbildung 36: Belastung eines Wärmedämmverbundsystems ohne Klebung durch Windsog.

3.4 Bauseitiges Verfüllen von Hohlräumen durch Dämmstoffe

Im Gegensatz zu Wärmedämmverbundsystemen werden bei Dämmstoffen, welche in Hohlräume eingebracht werden, die oben genannten Lasten von der restlichen Struktur übernommen. Oft sind solche Systeme zweischalig aufgebaut. Die Verbindung der beiden Schalen erfolgt meist durch massive Träger aus Holz.

In Zusammenarbeit mit der Firma Buhl, Gars/Kamp, wurden Grundlagenuntersuchungen für die Machbarkeit zum Einsatz von Verbindungselementen aus Kunststoff durchgeführt. Diese sollen den Vorteil der Kostengünstigkeit bei gleichzeitiger Verhinderung von Wärmebrücken verbinden. Buhl testet derzeit in einem Versuchsobjekt ein neues Wandsystem mit Passivhausstandard. Als Verbindungselement für zwei Schalen, welche bauseitig mit Dämmstoff verfüllt werden, finden derzeit teure I-Träger aus Holzfasermaterial Verwendung.



bestehender Lösungsansatz:
Holzfaser-I-Träger als
verbindungselemente

Abbildung 37: Konzept für den Aufbau eines Wandsystems mit Passivhausstandard.

Die wesentlichen Anforderungen für die Auslegung der Verbindungsteile sind:

- mechanische Belastung durch Kräfte (Windlasten, Eigengewicht, ..);
- Bedarf an Verbindungselementen (Stk/m², mittelfristiger Bedarf an m²);
- Kosten pro m² (Material + Arbeit);
- Vorgehensweise beim Ein- bzw. Aufbringen der Elemente / Verbindungstechnik;
- weitere mechanische, chemische, funktionale und wirtschaftliche Anforderungen.

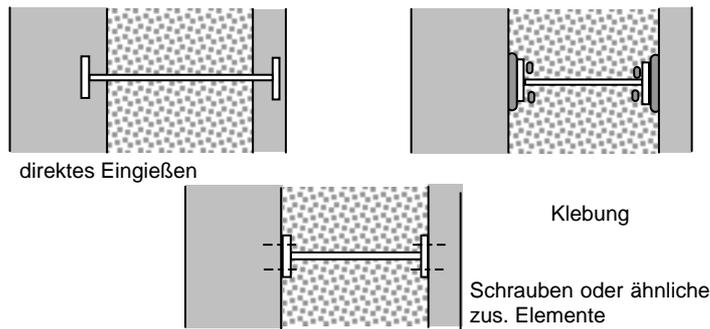


Abbildung 38: Grundsätzliche Befestigungsvarianten der Verbindungselemente.

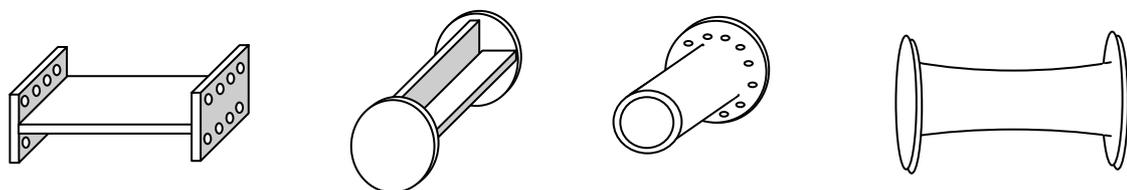


Abbildung 39: Einige mögliche Ausführungsvarianten mit grundsätzlich unterschiedlichem mechanischen Verhalten.

In Abbildung 38 und Abbildung 39 sind verschiedene Ausführungsmöglichkeiten dargestellt. Sie können entsprechend in Gruppen eingeteilt werden. Für eine Konstruktion sind die erwünschten mechanischen Eigenschaften bei Montage und im Betrieb zu definieren. Auf Basis dieser Anforderungen muß die Konstruktion ausgelegt werden.

3.5 Wärmebrücken

Wärmebrücken sind Positionen im Wandaufbau, an welchen Materialien mit hohen Wärmeleiteigenschaften Schichten mit hohen Wärmedämmeigenschaften durchdringen. Von den nachteiligen Auswirkungen von Wärmebrücken, wie z.B. Tauwasserausfall, Schimmelpilzbefall, Korrosion oder Bauwertminderung wird nachfolgend insbesondere der erhöhte Wärmeverlust betrachtet.

Anhand des Beispiels der Firma Buhl wird nun der Einfluß von Wärmebrücken auf den Wärmedurchgangskoeffizienten des gesamten Wandaufbaus untersucht. Als Alternative zum Einsatz eines Kunststoffelementes als Verbindungselement wird eine im Schalungsbau bekannte Technologie (siehe Abbildung 40) herangezogen. Hier werden winkelig gebogene Baustahlgitter in Beton eingegossen.

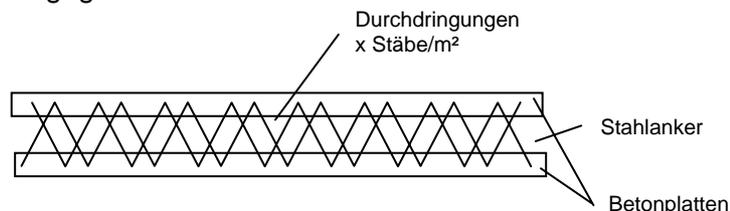


Abbildung 40: Bekannte Technologie zur Herstellung von Schalungen.

Die nachfolgenden Ergebnisse können analog für Dübel mit Stahlstiften und ähnliche wärmebrückenbildende Konstruktionen übertragen werden. Abbildung 41 zeigt die Abhängigkeit des Wärmedurchgangskoeffizienten von der Anzahl der durchdringenden Stahlstäbe, deren Durchmesser sowie der verwendeten Dämmstoffdicke. Ähnliche Rechnungen finden sich in der Literatur (z.B. [6]).

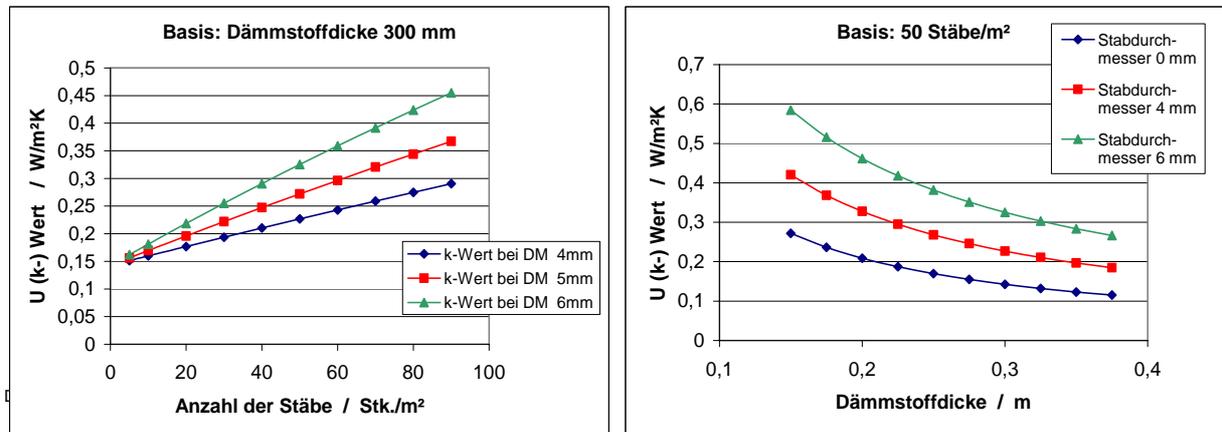


Abbildung 41: Wärmedurchgangskoeffizient in Abhängigkeit der Anzahl der durchdringenden Stäbe, deren Durchmesser (DM) sowie der Dämmstoffdicke.

Von weiterem Interesse ist die Differenz zwischen der Oberflächentemperatur der Wärmebrücke zu anderen Positionen der Fassade. Durch auftretende Temperaturgradienten entstehen die oben angeführten Feuchtigkeitsdifferenzen und deren Folgen. Die Gradienten im Wandaufbau sind in Abbildung 42 für zwei verschiedene Varianten dargestellt. In Variante a.) wird im Gegensatz zu Variante b.) an der Außenfläche ein sehr leitfähiges Material verwendet. Dementsprechend geringer sind die Temperaturdifferenzen an der Oberfläche im Fall a.).

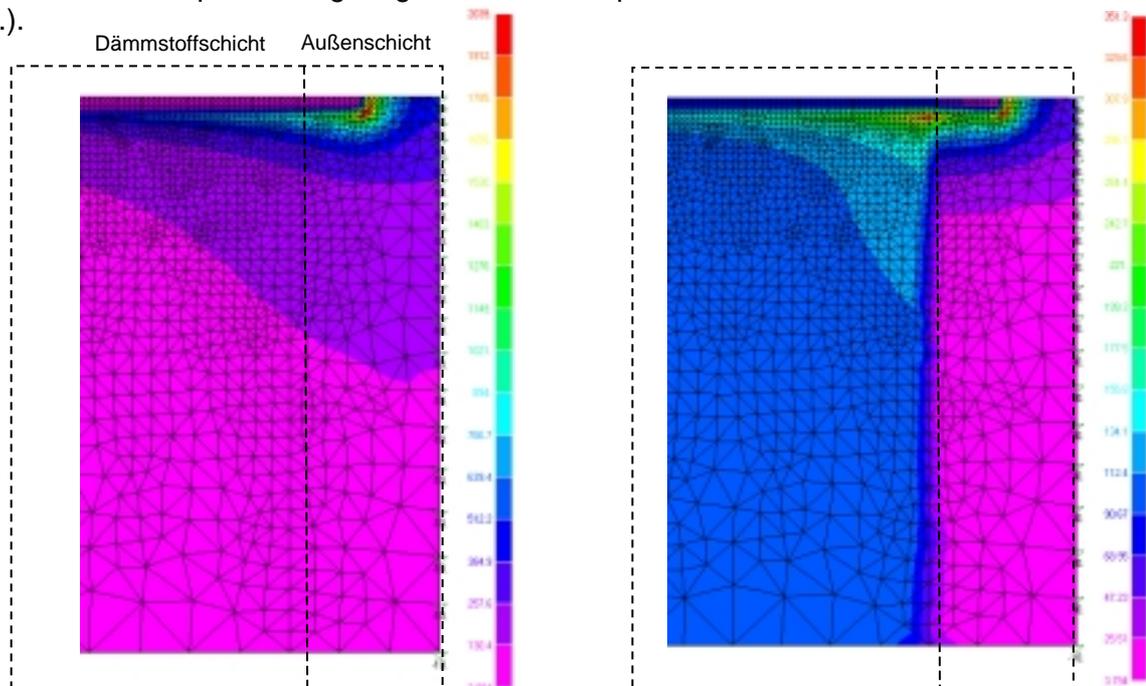


Abbildung 42: Temperaturgradienten [$^{\circ}C/mm$] durch eine stabförmige Wärmebrücke.

3.6 Schalungsdruck und dessen Ausbildung

Ausführlicher als auf die Anforderungen der letzten Kapiteln wird auf den Bereich Schalungsdruck eingegangen. Die Anforderung diesen durch den Dämmstoff aufzunehmen stellt eine besondere Herausforderung dar. Es gibt Produkte auf dem Markt, bei welchem der Dämmstoff als tragendes Element in Schalungen zum Einsatz kommt. Auf die diesbezügliche Literatur wird in Zwischenbericht 1 verwiesen. Für die Attraktivität des Gesamtsystems ist mitunter die Verbindungstechnik verantwortlich.

Es gibt in der Literatur eine Reihe von Ansätzen um den Druck auf Schalungssysteme zu ermitteln. Verfolgt man diese Ansätze, so erkennt man, daß die Ergebnisse bis zu einem Faktor 4 bis 8 zueinander variieren. Führt man Messungen (siehe Kapitel 3.7) durch, so zeigt sich, daß die Meßergebnisse nicht mit den theoretisch gefundenen Annahmen übereinstimmen.

Der Schalungsdruck ist nach [7] im allgemeinen abhängig von:

- Betoniergeschwindigkeit,
- Betonkonsistenz,
- Größe der Zuschlagsstoffe,
- Frischbetontemperatur,
- Außentemperatur während des Betonierens,
- Rauigkeit und Dichtheit der Schalung,
- Schalungsquerschnitt (Betonkerndicke),
- Verdichtung z. B. infolge des Rüttelns,
- Arbeitsvorgang auf der Baustelle,
- verwendete Zementart,
- Gesamthöhe des Frischbetons und
- Betonzusatzmittel.

Das American Concrete Institute sowie das Department of Main Roads hat nach Untersuchungen durch Regressionen folgende Formeln abgeleitet:

$$P \text{ [Pa]} = 3 \times V^{0,25} \text{ (bis } V=4\text{m/h)} \quad \text{bzw.} \quad P \text{ [Pa]} = 3.6 \times V^{0,25} \text{ (bei } V>4\text{m/h)},$$

Gleichung 3

wobei V in [m/h] die Füllgeschwindigkeit darstellt.

Laut Ö-Norm hängt der maximale Schalungsdruck von Schalungssteinen nur von der Betonkerndicke ab:

$$P \text{ [kN/m}^2\text{]} = 90 \times t_k, \text{ wobei } t_k \text{ die Betonkerndicke in [m] darstellt.}$$

Gleichung 4

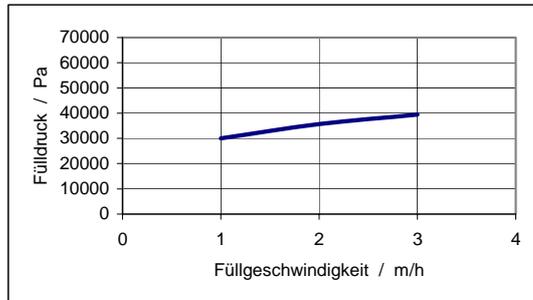
Der hydrostatische Druck beträgt

$$P = \rho \times g \times h$$

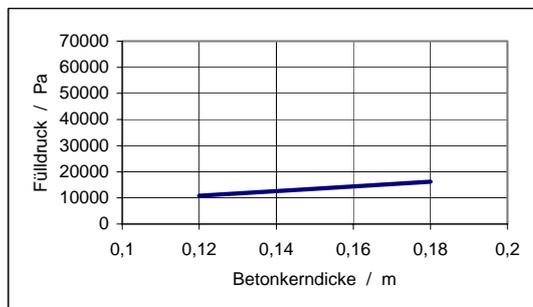
Gleichung 5

Eine Gegenüberstellung der Ergebnisse ist in folgenden Diagrammen ersichtlich:

Quelle: Hütte, Bautechnik Band II



Quelle: ÖN B3208



Physik: hydrostat. Druck

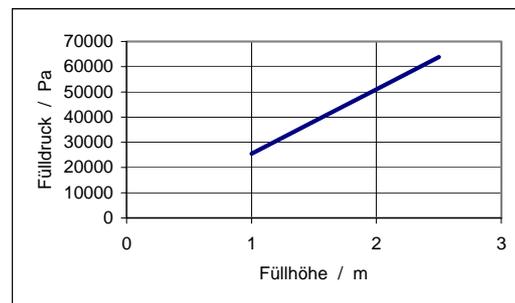


Abbildung 43: Gegenüberstellung der Druckausbildung verschiedener Ansätze aus der Literatur.

In den im Rahmen dieses Projektes durchgeführten Verfüllversuchen wird der Betondruck auf Basis folgender Randbedingungen gemessen.

- Betonkerndicke von 15 cm;
- Höhe der Schalungswand 2,5 m;
- Schalungsmaterialien: EPS W30 unbehandelt, Ziegel stark befeuchtet;
- Betonkonsistenz K4;
- Verfüllgeschwindigkeit 2,5 m in 2 min;
- Betontemperatur 10 °C und
- Außentemperatur 7 °C.

Abbildung 44 zeigt den verwendeten Meßaufbau bzw. deren Anordnung und eine Abbildung des Manometers im Einsatz.

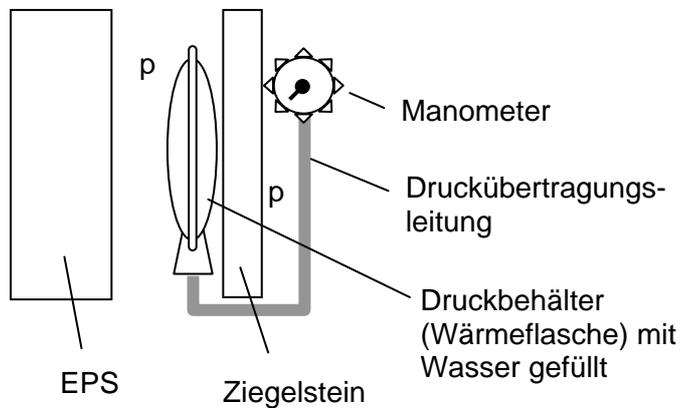


Abbildung 44: Versuchsaufbau und Meßapparatur; Meßbereich des verwendeten Manometers 1 bar.

Die Messung wird an zwei Positionen mit unterschiedlicher Füllhöhe durchgeführt. Als Ergebnis der Messung wird der Druckverlauf während der Füllung aufgezeichnet. Es ist ein weitgehend linearer Anstieg des Druckes bis auf 0,24 bar innerhalb der Füllung der ersten 1,2 m erkennbar. Bei weiterer Füllung kann keine weitere Druckerhöhung festgestellt werden. Durch ein Klopfen an der Schalung nimmt der Druck weiter im 5 % Prozentbereich zu.

Um diesen, durch Ansätze aus der Literatur nicht nachvollziehbaren Verlauf in einer Theorie zu erfassen wird ein Modell entwickelt, welches nachfolgend vorgestellt wird.

Erstellung eines realistischen Modells für die Druckberechnung unter den gegebenen Bedingungen des Versuchsaufbaues

In Abbildung 45 wird ein Volumenelement des Betons mit den darauf wirkenden Kräften dargestellt.

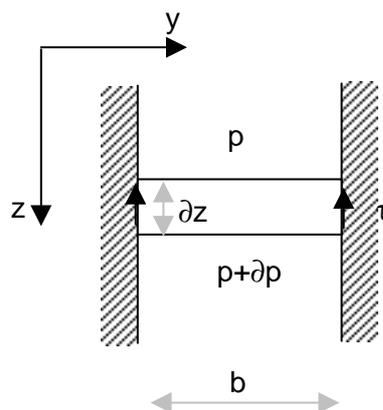


Abbildung 45: Schematische Darstellung der mechanischen Zusammenhänge bei der Druckausbildung.

Herleitung des Modells:

Ansetzen des Kräftegleichgewichtes

$$p \cdot b \cdot l = (\rho - \partial \rho) \cdot b \cdot l + b \cdot l \cdot \rho \cdot g \cdot \partial z - 2 \cdot \tau \cdot l \cdot \partial z \quad \text{wobei} \quad \tau = \mu \cdot p$$

Gleichung 6

für $\mu = \text{const.}$ und $l \gg b$ ergibt sich nach mehrmaligem Umformen

$$z = \left(\frac{1}{\rho \cdot g} - \frac{b}{2\mu} \right) \cdot dp$$

Gleichung 7

und somit wenn $p(z=0) = 0$

$$z = \frac{p}{\rho \cdot g} - \frac{b}{2\mu} \cdot \ln p + \frac{b}{2\mu}$$

Gleichung 8

Aus diesem Zusammenhang läßt sich p errechnen. μ ist der innere Reibkoeffizient des Materials und spiegelt die Konsistenz wider. Der innere Reibkoeffizient steht in einer starken Abhängigkeit von der Schergeschwindigkeit mit der das Material beansprucht wird, und von der Beanspruchungszeit. Abbildung 46 zeigt den sich ausbildenden Druck in Abhängigkeit der Füllhöhe für verschiedene Größenordnungen des inneren Reibkoeffizienten, welcher sich hier als Reibwinkel darstellt ($\rho = \text{ARCTAN}(\mu)$).

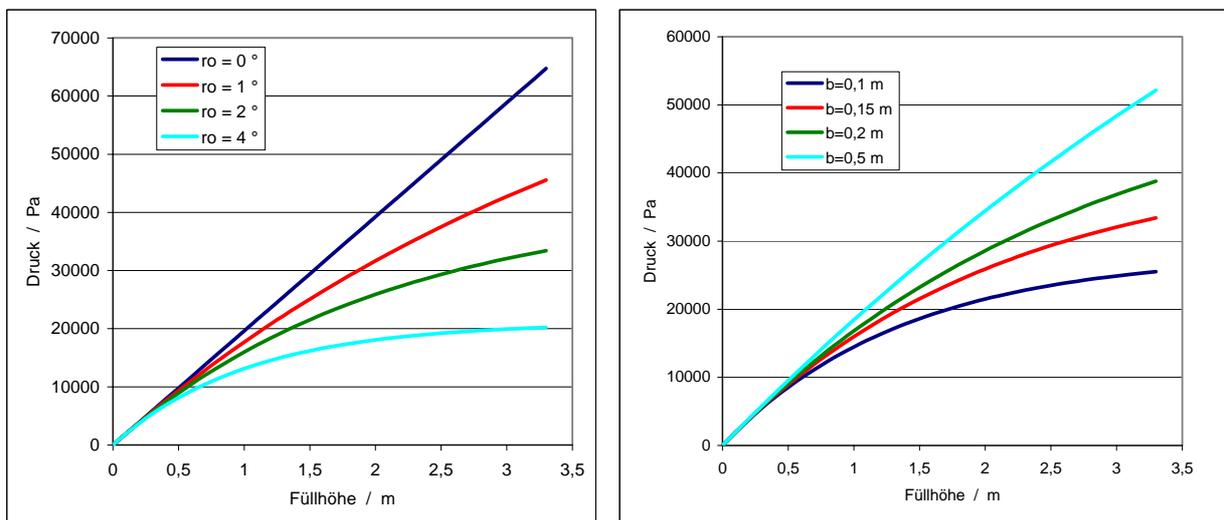


Abbildung 46: Zusammenhang zwischen Fülldruck und Füllhöhe beim Einsatz bei Variation Betonkonsistenz und Betonkerndicke.

Das Material wird durch eine höhere Verfüllgeschwindigkeit und durch den Einsatz von Rüttelmaschinen dünnflüssiger. Beton ist eine thixotrope Flüssigkeit. Dies bedeutet, daß das in Ruhe befindliche Material in eine Ordnungsstruktur übergeht. Durch Bewegung wird diese Struktur zerstört.

Wenn für $\mu = f(p)$ gilt (Abhängigkeit von Zeit, Ort, Temperatur, ..), gibt es nach den meisten Ansätzen nur mehr numerische Lösungen. Im folgenden Beispiel wird von einer Abhängigkeit des inneren Reibkoeffizienten von der durch einen Rüttler erzeugten Energie angesetzt. Die durch den Rüttler erzeugte Energie wird lokal an der Oberfläche des flüssigen Betons eingebracht. Nach der Natur einer sich in einem Medium ausbreitenden Welle nimmt die Energie mit dem Quadrat der Entfernung ab. Entsprechend herrscht in der Nähe des Rüttlers eine geringere Viskosität vor.

Das in Abbildung 47 dargestellte Diagramm stellt den Zusammenhang zwischen dem Betondruck und der Füllhöhe dar, wenn an der Oberfläche ein Rüttler mit verschiedenen Leistungseinstellung eingebracht wird.

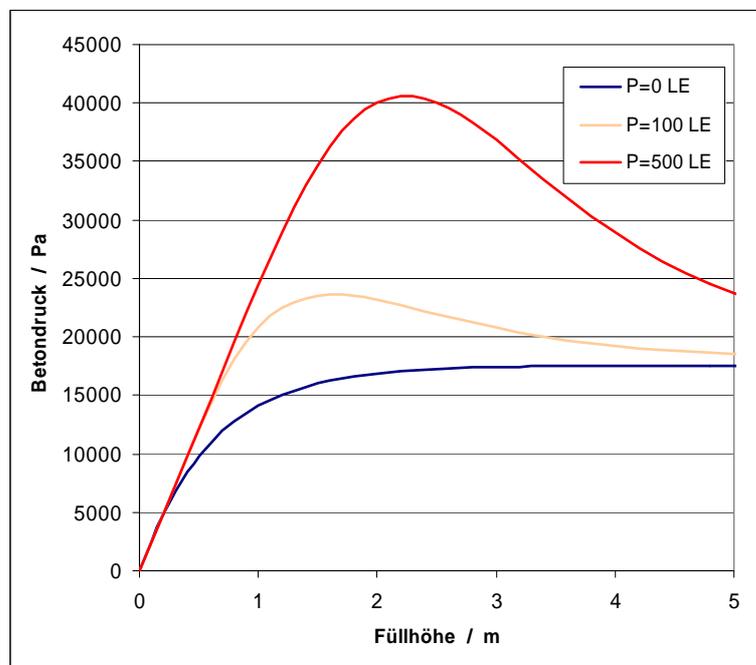


Abbildung 47: Zusammenhang zwischen Fülldruck und Füllhöhe beim Einsatz von Rüttelgeräten verschiedener Leistung.

3.7 Verfüllversuch

Die nachfolgende Zusammenstellung von Abbildungen dient der Dokumentation der durchgeführten Verfüllversuche. Aus den Verfüllversuchen resultieren die in Kapitel 3.6 dargestellten Ergebnisse. Als Wandaufbau dient eine Ziegelschalung (Innenelement) und eine 15 cm starke EPS-Schalung (Außenelement). Es werden 3 verschiedene Verbindungselementvarianten als Prototypen eingesetzt.

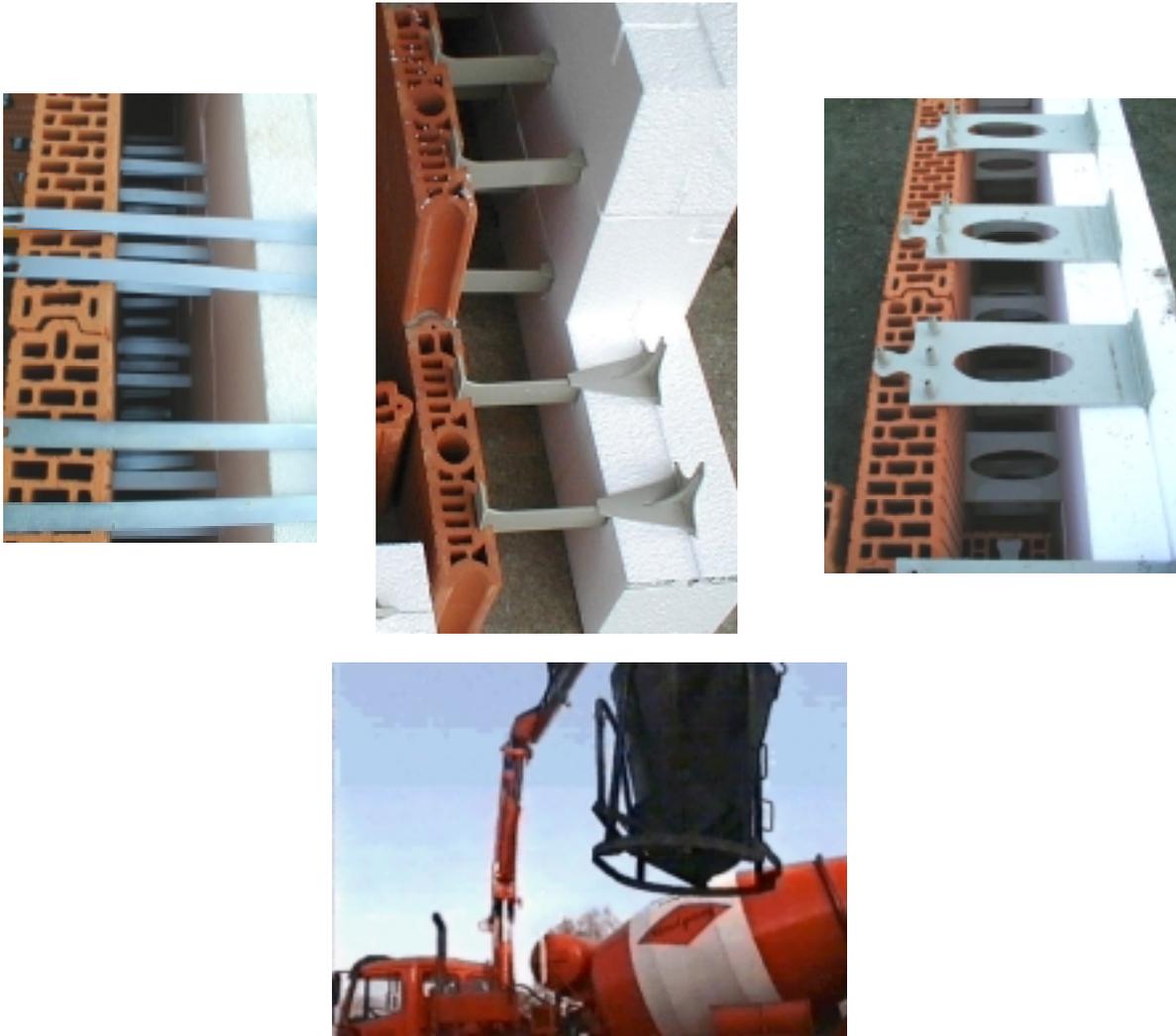


Abbildung 48: Drei verschiedene Wandaufbauten, die nachfolgend verfüllt werden.



Abbildung 49: Bilderzusammenstellung während der Verfüllung und Gruppenbild nach den Verfüllversuchen.

4 ZUSAMMENFASSUNG

Es wurde ein Gesamtüberblick über die Arbeitsgebiete im praktischen Teil des Projektes gegeben.

Mittels werkstoffwissenschaftlicher Charakterisierung der Dämmstoffe (Steifigkeit, Zugfestigkeit, Reißzähigkeit etc.) und geometrisch vereinfachter Idealisierung (Reibschluß und Formschluß) bestehender Befestigungsmechanismen wird ein besseres Verständnis für das Verhalten von Dämmstoffen unter Belastung vermittelt.

Durch einen Vergleich mit Belastungsversuchen bestehender Befestigungslösungen wird die Übertragbarkeit der Ergebnisse überprüft. Simulationen mit Hilfe der Methode der finiten Elemente zeigen kritische spannungsführende Zonen in einer Konstruktion auf. Durch die Analyse des Verformungsverhaltens wird das Erfassen des Verhaltens gefördert.

Die Kenntnis der Anforderungen an die Konstruktion ist von hoher Bedeutung für die Auslegung derselben. Auf die Anforderungen für Befestigungssysteme in Bezug auf Eigenlasten, hygrothermische Verformungen, Windsog, Wärmebrücken und Betondruck in verlogenen Schalungen wird eingegangen.

In den nächsten Monaten werden weitere Untersuchungen anhand von Wandaufbauten durchgeführt. Die Erkenntnisse sollen auf weitere theoretische Modelle und Ansätze übertragen werden.

5 LITERATUR

- [1] Blumenauer, H.; Plusch, G.: Technische Bruchmechanik. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie Leipzig; 1. Auflage 1981.
- [2] Schäfer, H. G.: Wirkungsweise der Dübel in Wärmedämm-Verbundsystemen. das bauzentrum, 4/96.
- [3] DIN 1055-4 (8/86) Lastannahmen für Bauten; Verkehrslasten, Windlasten bei nicht schwingungsanfälligen Bauwerken.
- [4] Cziesielski, E.: Neue Erkenntnisse zu Windlast-Einwirkungen auf Hinterlüfete Außenwandbekleidungen. IBK-Baufachtagung, Nov. 1995.
- [5] Achtziger, J.: Neue Erkenntnisse über den Wärmebrückeneinfluß von Wärmedämmstoffhaltern und Verankerungen. IBK-Baufachtagung, Nov. 1995.
- [6] Achtziger, J.: Neue Erkenntnisse über den Wärmebrückeneinfluß von Wärmedämmstoffhaltern und Verankerungen. IBK-Baufachtagung, Nov. 1995.
- [7] Hütte Bautechnik. Band III, Taschenbücher der Technik; 29. Auflage.
- [8] Doka Bemessungshilfen. Doka Industrie-GmbH; 06/97.
- [9] ÖNORM B3208 (6/99) Mantelsteine Anforderungen und Prüfungen.