

4 MECHANISCHES VERHALTEN VON BEFESTIGUNGSSYSTEMEN

Grundsätzlich können Befestigungstechniken mechanischer Art in die Bereiche Kraftschluss (Reibschluss, Reibung) und Formschluss eingeteilt werden. Als chemische Befestigungsvariante ist noch die Klebung (Stoffschluss) anzuführen. In der gegenständlichen Arbeit erfolgt eine Konzentration auf mechanische Befestigungssysteme. Diese Untersuchungen sollen über das Zusammenspiel des Dämmstoffes mit dem Befestigungselement Aufschlüsse geben. Um hier auch eine Vielzahl an grundlegenden Parametern variieren zu können, wird das Befestigungssystem im ersten Schritt in zwei Teile aufgeteilt, den Form- und Reibschluss. Erst nach grundlegenden Untersuchungen werden im Handel erhältliche bzw. in Entwicklung stehende Befestigungen, ohne jegliche Variation der Einflussgrößen getestet, um die zuvor ermittelten Erkenntnisse zu vergleichen und entsprechende Schlüsse zu ziehen. Die erhaltenen Ergebnisse der Versuche für Form- und Reibschluss werden in diesem Abschnitt dargestellt. Nachfolgende einfache Geometrien werden zur Untersuchung herangezogen.

4.1 Grundlegende Untersuchungen - Formschluss

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. Abb. 4-1 zeigt die Reduktion der möglichen Befestigungsvarianten zu einer einfachen charakteristischen tellerförmigen Formschlussgeometrie, anhand welcher die wesentlichen Parameter in dieser Arbeit variiert, und deren Einfluss geprüft wird.

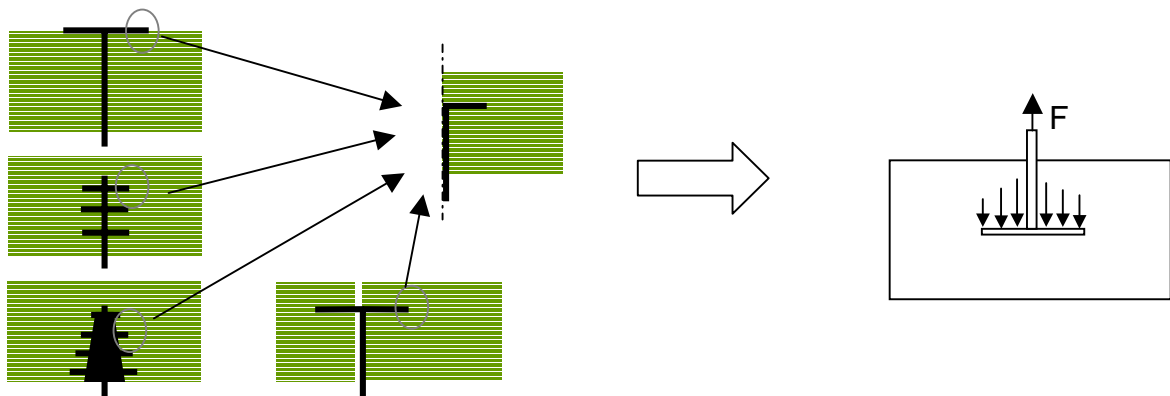


Abb. 4-1: Reduktion möglicher Befestigungssysteme auf eine einfach zu beschreibende charakteristische Geometrie sowie schematische Darstellung der Kräfteverhältnisse.

Um diese umfassende Parameterstudie durchzuführen, wird ein entsprechender Versuchsplan erstellt. Dabei werden für verschiedene Hartschaumdämmstoffe T-förmige Schlitze, wie in Abb. 4-2 dargestellt, mittig eingefräst. Neben der Variation des Dämmstoffes und des Materials des Befestigungselementes werden noch geometrischbedingte Einflüsse untersucht, wie:

- Frästiefe, Fräsdurchmesser und Ausziehhöhe,
- Anzahl der Hohlräume und unterschiedliche Anordnung dieser (siehe Abb. 4-3),
- Dicke und Größe der Kreisplatte als Formschlusselementes und
- Auflagerandbedingungen.

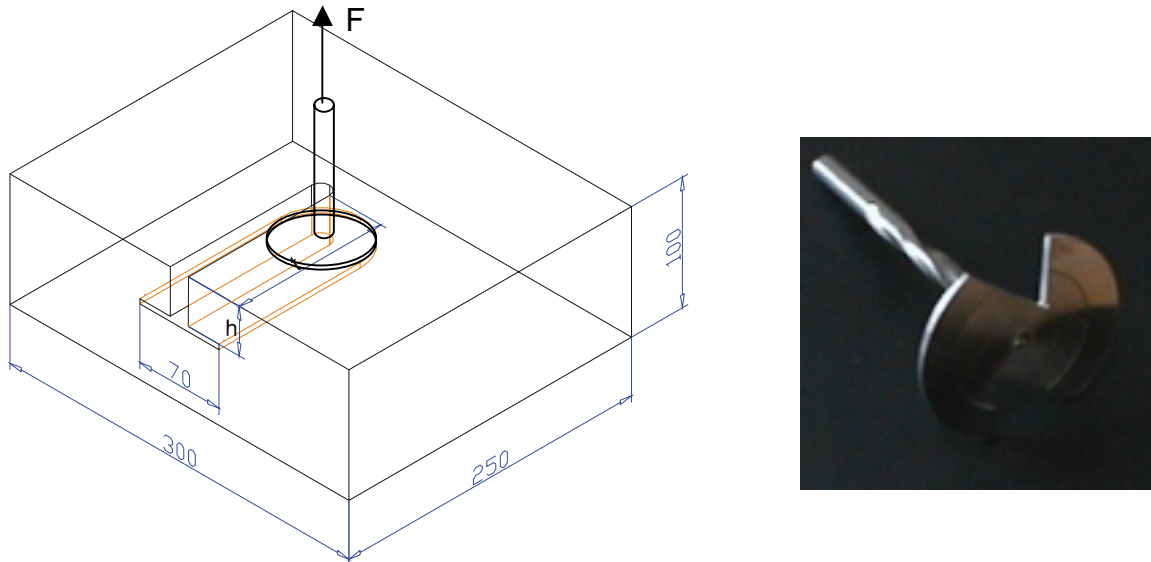


Abb. 4-2: Schematische Darstellung des Probekörpers für den Formschlussversuch, tellerförmiges Formschlusselement sowie dem notwendigen Fräskopf für die Herstellung.

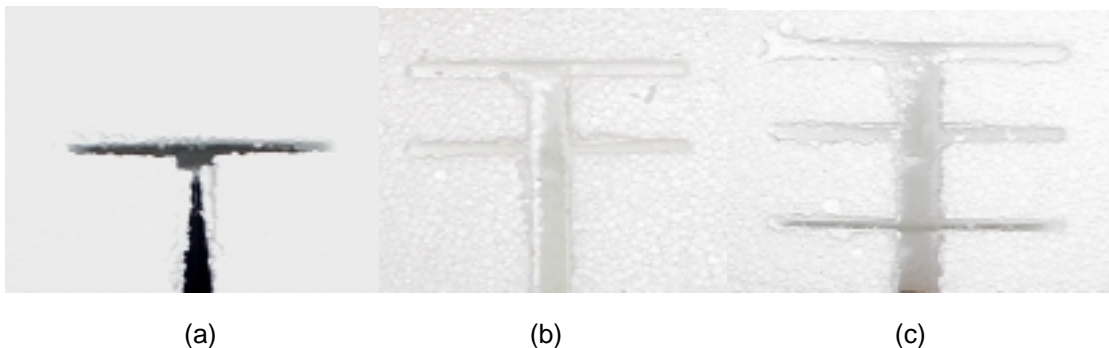


Abb. 4-3: Beispiele für Probekörper gedacht für einfachen (a), zweifachen (b) oder dreifachen (c) Formschluss.

4.1.1 Versuchsdurchführung und Vorversuche

Die Durchführung der Versuche erfolgte wiederum auf der Zug/Druck-Universalprüfmaschine vom Typ 4505 der Fa. INSTRON (High Wycomb, UK) bei Normklima (23°C und 50% rel. F.). Abbildung 4-3 zeigt den Versuchsaufbau. Der Dämmstoffprobekörper mit eingebrachtem Formschlusselement wird auf die Auflageflächen gelegt und danach so positioniert, dass die Gewindestange mit der Zugachse zusammenfällt. Eine an der Gewindestange montierte Flügelmutter wird zuletzt in der Einspannvorrichtung fixiert. Nach Erreichen des Kraftmaximums wird der Versuch bis zu einem Unterschreiten eines vorgegebenen Kraftwertes aufgezeichnet.



Abb. 4-4: Allgemeiner Versuchsaufbau für Ausziehversuch mit Formschlussgeometrie.

Erste Vorversuche mit EPS-W30 zeigen schon die für diese Versuche typischen Merkmale. Es bilden sich Bruchkegel mit einer Neigung von zirka 45° aus, besonders gut ist diese Rissbildung bei sehr geringen Frästiefen erkennbar, dargestellt in Abb. 4-5. Um die Bildung dieser Bruchkegel nicht durch die Auflageflächen zu behindern, ergibt sich eine Standardmaß für die Ausziehhöhe von 40 mm. Für die Festlegung der Ausziehggeschwindigkeit werden Versuche bei 1 mm/min, 10 mm/min und 100 mm/min für PP2-h40-t17-N und PP2-h40-t33-N in EPS-W30 durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4-1 dargestellt. Die Unterschiede in der Maximalkraft und dem dazugehörigen Wegwert liegen im Bereich der Abweichung der Kennwerte. In Abb. 4-6 werden die gemittelten Verläufe bis zum Kraftmaximum gezeigt. Dabei können auch keine signifikante Unterschiede aufgrund der Geschwindigkeit erkannt werden. Daher wird in Anlehnung an [2.19] für die Prüfgeschwindigkeit ein Wert von 10 mm/min festgesetzt. Laut [2.23] soll eine Geschwindigkeitsabhängigkeit bei Prüfungen mit Hartschäumen auf Basis von Polystyrol, aufgrund der PS-Matrix der Schäume gegeben sein. Daher stellt auch die Wahl dieser Prüfgeschwindigkeit zusätzlich ein sicheres Mittelmaß dar.

Tabelle 4-1: Ergebnisse der Vorversuche von PP2-h40-t17-N und PP2-h40-t33-N in EPS-W30 bei unterschiedlichen Ausziehggeschwindigkeiten.

v [mm/min]	t [mm]	n []	ρ [kg /m ³]	h [mm]	w _{Fmax} [mm]	F _{max} [N]	A _{Fmax} [Nmm]
1	17	2	31.4 ± 0.3	39.5 ± 0.7	5.4 ± 0.0	361 ± 10	1127 ± 124
10	17	2	31.3 ± 0.2	39.0 ± 0.0	4.8 ± 0.7	368 ± 9	1081 ± 258
100	17	1	31.0	39.0	4.5	359	929
1	33	1	30.0	38.0	5.6	455	1490
10	33	2	30.3 ± 0.3	38.5 ± 0.7	6.1 ± 1.2	482 ± 29	1668 ± 379
100	33	3	30.3 ± 0.4	38.7 ± 0.6	5.8 ± 0.8	495 ± 13	1546 ± 102



Abb. 4-5: Bruchverhalten der Hartschäume beim Formschlussversuch. Linke Abbildung zeigt typische Rissbildung erkennbar durch geringe Frästiefe, rechts ist der Bruchkegel einer geprüften Probe zu sehen.

Aus diesen Ergebnissen wird der Einfluss der Frästiefe auf die maximale Ausziehkraft deutlich. Wie schon erwähnt, soll der Einfluss für den Versuchsplan vernachlässigt werden können. Daher wird standardmäßig eine Frästiefe von 95 mm verwendet, was einer Position etwa im Zentrum der Hartschaumprobe gleich kommt. Ein Vergleich der einzelnen max. Ausziehkräfte für t gleich 17 mm, 35 mm und 95 mm ist in Abb. 4-7 dargestellt. Wie aus dieser Abbildung hervorgeht, steigt mit der Frästiefe die max. Ausziehkraft. Eine geringe Ungenauigkeit der Frästiefe bei 95 mm spielt eine nicht so große Rolle wie bei niedrigeren Frästiefen. Für den dazugehörigen Wegwert ergibt sich der gleiche Zusammenhang. Die dazupassenden Kennwerte für t gleich 95 mm sind in Tabelle 4-7 angeführt.

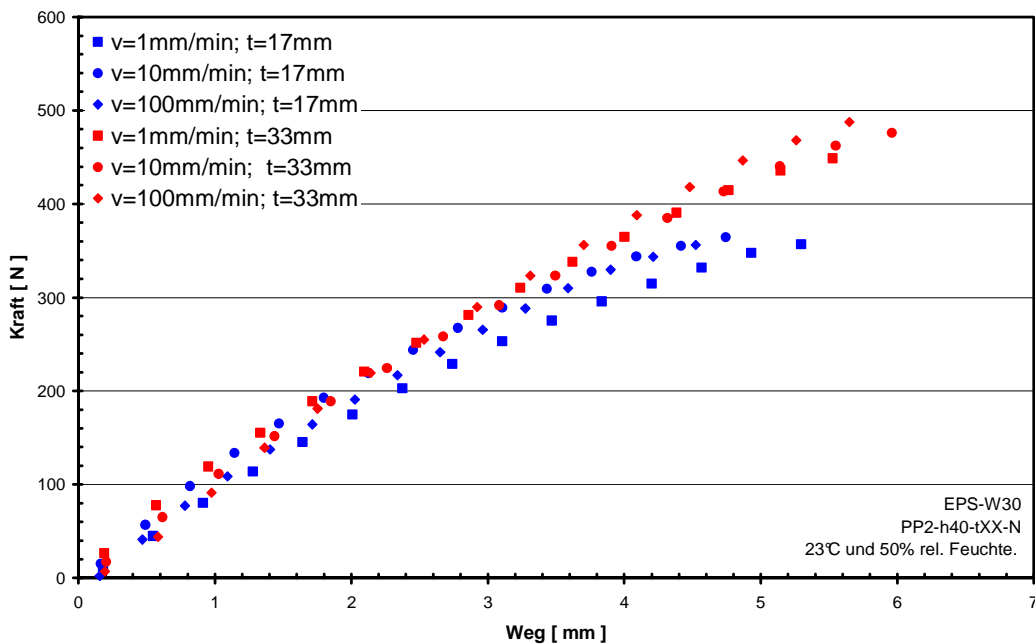


Abb. 4-6: Darstellung der Vorversuche für unterschiedliche Ausziehgeschwindigkeiten für zwei Frästiefen; Kurvenverlauf bis zum Höchstwert der Ausziehkraft.

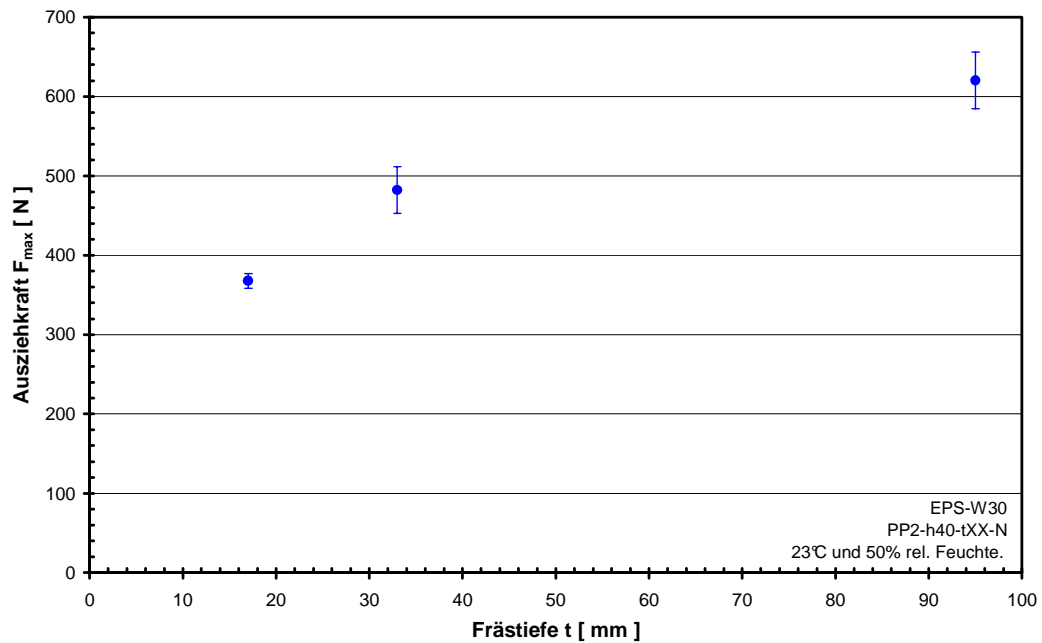


Abb. 4-7: Zusammenhang zwischen Frästiefe und maximal auftretender Ausziehkraft.

4.1.2 Versuchsplan

Aufgrund der Vielzahl an verschiedenen Variationen wird eine eigene Bezeichnungssystematik für die Formschlussversuche eingeführt. Für die im Versuchsplan vorgesehen Tests wird immer mit einer Geschwindigkeit von 10 mm/min und bei Normklima geprüft und der Versuchsablauf erfolgt einheitlich.

Für die Beschriftung der Formschlusseinheiten sind nun vier Beispiele angeführt:

- Beispiel 1: ST2-h40-t95-N,
- Beispiel 2: PP2-h20h40-t95-W,
- Beispiel 3: PP2D60*-h40-t95-N und
- Beispiel 4: PP2D100D70-h20h40-t95-N.

Dabei stehen die ersten zwei Buchstaben für das verwendete Material der Kreisplatte, die Ziffer danach stellt die Stärke der Platte in mm dar. So bedeutet ST2 eine 2 mm starke Kreisplatte aus Stahl. Weicht der Außendurchmesser der Kreisplatte vom Standard (70 mm) ab, so wird der Außendurchmesser zusätzlich am Ende des ersten Blocks in mm angegeben (siehe Beispiel 3: PP2D60* bedeutet 60 mm Außendurchmesser). Wird dabei noch ein *- Zeichen am Ende angehängt, so wird der Fräsdurchmesser mit 70 mm belassen. Die Ziffern nach h geben die Sollgröße der Ausziehhöhe in mm an (siehe Beispiel 1 h40).

Besteht das Formschlussystem aus mehreren Kreisplatten, so werden die einzelnen Ausziehhöhen nacheinander aufsteigend angegeben (siehe Beispiel 2 h20h40). Im Beispiel 4 werden zwei Kreisplat-

ten mit unterschiedlichem Durchmesser für mehrfachen Formschluss verwendet, wobei sich die Kreisplatte mit dem Durchmesser von 100 mm in einer Einbauhöhe von 20 mm befindet.

Die Ziffern nach t geben die Sollfrästiefe in mm an. Der letzte Buchstabe gibt über Auflager und Auflagerbedingungen Aufschluss. Dabei steht N für Normal, W für Zusatzwinkel und B für simulierten Betondruck. Der Versuchsaufbau der drei genannten Fälle geht aus Abb. 4-8 hervor.

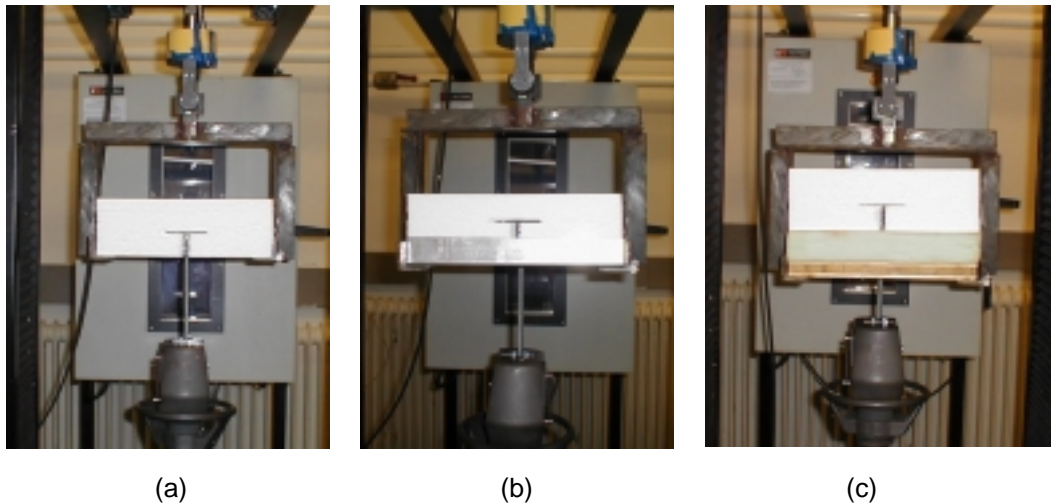


Abb. 4-8: Bilder der verschiedenen Auflager für den Formschluss: (a) Normal(N)-Auflager durch Eisengehänge, (b) Auflager mit zusätzliche Winkel W um Biegung zu verhindern und (c) Auflager mit zusätzlicher Holzplatte und Schaumstoff mit Öffnung in der Mitte für Gewindestange soll Betondruck B simulieren.

Um die Vielzahl der Variationen zu verdeutlichen, werden die einzelnen Parameterstudien in den nachfolgenden Tabellen 5-2 bis 5-6 dargestellt. Im speziellen werden Untersuchungen

- mit Kreisplatten aus Stahl bzw. Polypropylen für alle Dämmstofftypen (siehe Tabelle 4-2),
- in Abhängigkeit von der Plattensteifigkeit des Formschlusselementes für EPS-W30 (siehe Tabelle 4-3),
- mit verschiedenen Kreisplattenaußendurchmesser für EPS-W25 und EPS-W30 (siehe Tabelle 4-4),
- mit unterschiedlichen Ausziehhöhen und Auflagerbedingungen (siehe Tabelle 4-5) und
- mit mehrfachen Formschlusseinheiten (siehe Tabelle 4-6)

durchgeführt.

Tabelle 4-2: Darstellung des Versuchsplan - 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

Tabelle 4-3: Versuchsplan - Variation der Plattensteifigkeit.

	EPS-W30
PP1-h40-t95-N	X
PP2-h40-t95-N	X
PP3-h40-t95-N	X
PP5-h40-t95-N	X
ST2-h40-t95-N	X

Tabelle 4-4: Versuchsplan für die Variation der Kreisplattenaußendurchmesser D_A .

	EPS-W30		EPS-W25
PP2D50*-h40-t95-N	X	PP2-h40-t95-W	X
PP2D60*-h40-t95-N	X	PP2D40-h40-t95-W	X
PP2-h40-t95-N	X	PP2D100-h40-t95-W	X
		PP2D40-h70-t95-W	X
		PP2D100-h40-t95-W	X

Tabelle 4-5: Versuchsplan für die Ermittlung des Einflusses der Ausziehhöhe h und der Auflagerbedingungen.

	EPS-W30		EPS-W25
PP2-h20-t95-N	X	PP2-h20-t95-W	X
PP2-h40-t95-N	X	PP2-h40-t95-W	X
PP2-h40-t95-B	X	PP2-h40-t95-W	X
PP2-h50-t95-W	X	PP2-h40-t95-N	X
PP2-h60-t95-N	X		
PP2-h60-t95-W	X		

Tabelle 4-6: Versuchsplan für mehrfachen Formschluss.

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

	EPS-W25
PP2D70D40-h40h60-t95-W	X
PP2D100D70-h20h40-t95-W	X
PP2D100D70D40-h20h40h60-t95-W	X

Aus den aufgezeichneten Kraft/Weg-Verläufen werden die für Vergleiche benötigten Kennwerte ermittelt. Hauptsächlich von Interesse sind dabei das auftretende Kraftmaximum F_{max} , der dazugehörige Weg w_{Fmax} und die eingeschlossene Fläche A_{Fmax} zwischen Verlauf und Abszisse vom Ursprung bis

zum Kraftmaximum. Die Bestimmung der Dichte ρ der Hartschaumproben erfolgt wiederum zum Erkennen von Inhomogenitäten im Dämmstoff.

4.1.3 Einfluss der Ausziehhöhe und der Auflagebedingungen

Neben der Frästiefe gibt es noch weitere geometrische Einflussparameter, wie z.B. die Ausziehhöhe h . Auch die Auflagebedingungen spielen (siehe Abb. 4-8) eine Rolle. Daher werden sieben unterschiedliche Varianten (PP2-hXX-t95-X) in EPS-W30 und zusätzlich vier Varianten mit EPS-W25 geprüft. Die Ergebnisse für die dafür durchgeführten Versuche laut Versuchsplan sind in Tabelle 4-7 und Tabelle 4-8 dargestellt. Dabei stellt n_{gew} die Anzahl der Versuche pro Variante dar. Aus den gemessenen Kraft/Weg-Verläufen werden gemittelte Kurven erstellt, und diese werden in Abb. 4-9 gezeigt.

Tabelle 4-7: Ergebnisse der Versuche von PP2-hXX-t95-X in EPS-W30 zur Ermittlung des Einflusses der Ausziehhöhe h und der Auflagebedingungen.

Bez	n_{gew} []	ρ [kg /m ³]	h [mm]	w_{Fmax} [mm]	F_{max} [N]	A_{Fmax} [Nmm]
PP2-h20-t95-N	3/3	29.5 ± 0.2	18.7 ± 0.6	4.9 ± 0.8	314 ± 52	787 ± 208
PP2-h40-t95-N	2/4	29.8 ± 0.5	38.0 ± 0.0	7.9 ± 0.3	641 ± 7	2861 ± 31
PP2-h50-t95-N	1/1	30.6	50.0	10.2	785	4523
PP2-h60-t95-N	3/3	30.2 ± 0.4	60.0 ± 0.0	10.0 ± 0.9	788 ± 24	4397 ± 457
PP2-h40-t95-BE	3/4	30.9 ± 1.1	39.3 ± 0.6	42.9 ± 1.1	746 ± 43	16593 ± 478
PP2-h50-t95-W	1/2	30.7	50.0	12.9	960	7289
PP2-h60-t95-W	2/2	30.7 ± 0.2	58.0 ± 0.0	15.2 ± 1.9	1034 ± 8	9480 ± 1407

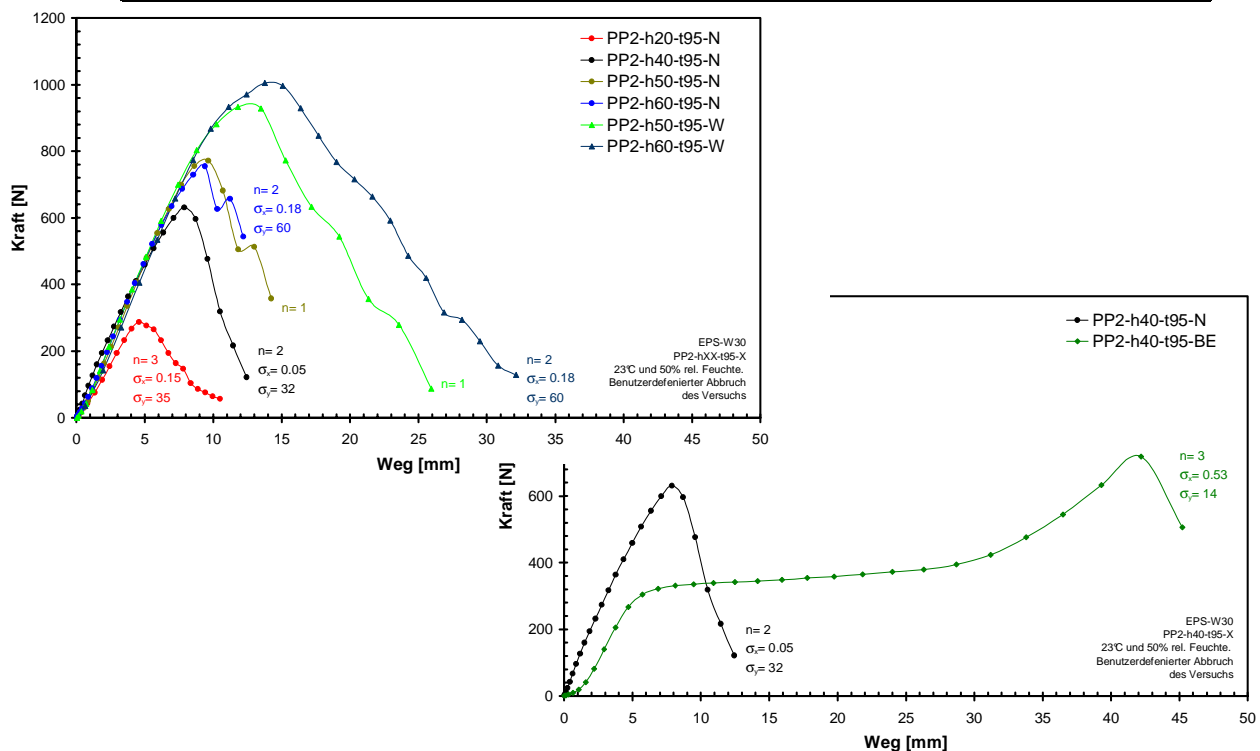


Abb. 4-9: Gemittelte Kurvenverläufe für PP2-hXX-t95-X in EPS-W30 um den Einfluss der Ausziehhöhe h und der Auflagerbedingungen zuzeigen.

Bei der Durchführung der oben genannten Versuche zeigen sich für PP2-h50-t95-N und PP2-h60-t95-N im Vergleich zu den anderen Unterschiede im Bruchverhalten. Bei diesen beiden Varianten bricht die Probe in zwei Hälften und bildet keinen Bruchkegel (siehe Abb. 4-5) wie bei den anderen Versuchen. Der Bruch erfolgt hier hauptsächlich als Folge von Biegung und daher sind in den Ergebnissen der beiden Varianten kaum Unterschiede zu erkennen. Ein Vergleich der max. Ausziehkraft über der Ausziehhöhe, siehe Abb. 4-11 (a), für die durchgeführten Varianten zeigt, dass bei zunehmender Ausziehhöhe der Einfluss der Biegung für die Versuche mit normalen Auflagebedingungen zunimmt. Die Untersuchungen mit zusätzlichen Winkeln ergeben klar höhere Ausziehkraft. Schließt man die beiden zuvor genannten Varianten für die Betrachtung aus, kann ein linearer Zusammenhang zwischen Ausziehhöhe und max. Ausziehkraft erkannt werden.

Um dies auch zu bestätigen werden EPS-W25 Probekörper mit Winkel für drei unterschiedliche Ausziehhöhen geprüft, Abb. 4-10 zeigt gemittelte Kraft/Weg-Verläufe der gemessenen Versuche. Zusätzlich sind noch Ergebnisse eines weiteren Versuchsaufbaus mit normalen Auflagerbedingungen bekannt. In Tabelle 4-8 sind die einzelnen Ergebnisse dargestellt. Wie Abb. 4-11 (b) hervorgeht, zeigt sich auch für EPS-W25 das erwartete Verhalten. Der eher große Abfall der maximalen Ausziehkraft für die normalen Auflagerbedingungen entsteht nicht nur wegen des Auflagers, sondern wird viel mehr durch die höhere Dichte hervorgerufen, die eine mechanische Materialminderung bewirkt, siehe Kapitel 4.1.

Tabelle 4-8: Ergebnisse der Versuche von PP2-hXX-t95-X in EPS-W25 zur Ermittlung des Einflusses der Ausziehhöhe h und der Auflagebedingungen.

Bezeichnung	n	ρ [kg /m ³]	h [mm]	w _{Fmax} [mm]	F _{max} [N]	A _{Fmax} [Nmm]
PP2-h20-t95-W	2/3	25.4 ± 0.2	20.0 ± 0.0	4.8 ± 0.5	296 ± 27	721 ± 126
PP2-h40-t95-W	2/3	24.5 ± 0.2	39.0 ± 0.0	11.7 ± 2.2	765 ± 40	5032 ± 1593
PP2-h60-t95-W	2/3	25.3 ± 0.2	60.0 ± 0.0	22.3 ± 0.1	1028 ± 14	16010 ± 94
PP2-h40-t95-N	2/4	26.3 ± 0.2	37.5 ± 0.7	6.5 ± 0.6	479 ± 20	1755 ± 325

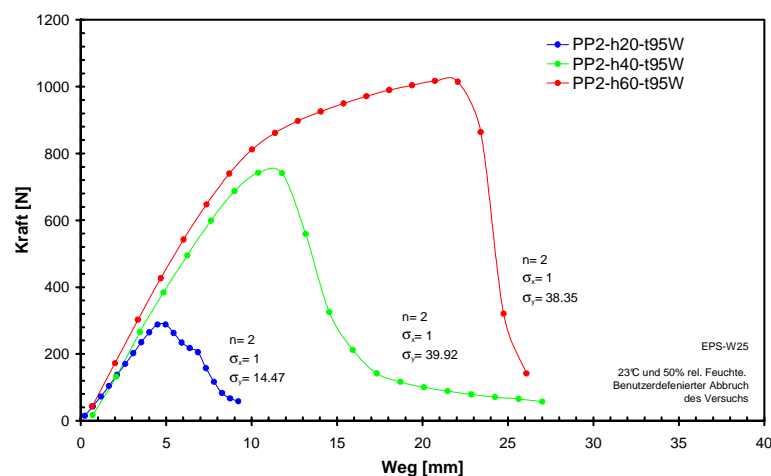


Abb. 4-10: Gemittelte Kraft/Weg-Verläufe für PP2-hXX-t95-W in EPS-W25.

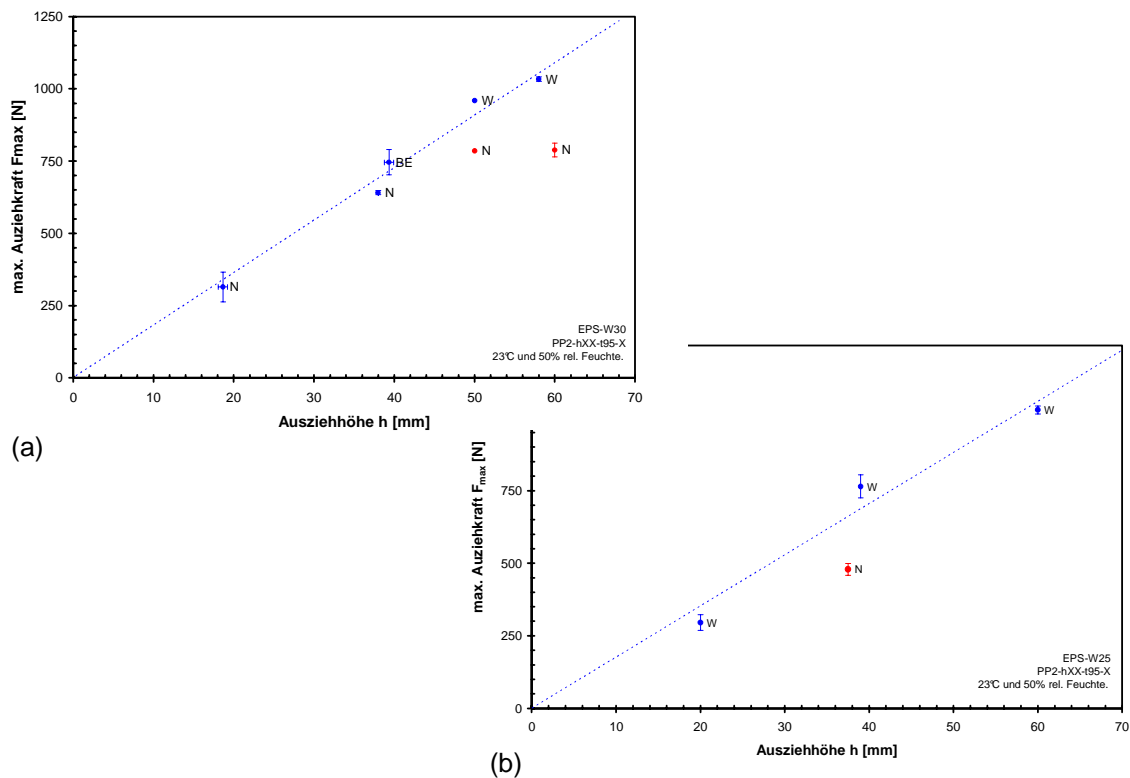


Abb. 4-11: Maximale Ausziehkraft für PP2-hXX-t95-X in (a) EPS-W30 bzw. (b) EPS-W25 über der Ausziehhöhe h .

4.1.4 Einfluss durch Veränderungen des Formschlusselementes

Mit einer sehr wichtigen Frage beschäftigt sich dieses Unterkapitel. Der Einfluss des Formschlusselementes auf etwaige Ergebnisse aus dem Ausziehversuch ist für den Konstrukteur von speziellem Interesse. Als erstes wird die Plattensteifigkeit für die Kreisplatte variiert. Im zweiten Schritt werden die Außendurchmesser der Kreisplatte bei gleichbleibendem Fräsdurchmesser verändert. Diese unterschiedlichen Varianten werden in EPS-W30 geprüft. Zuletzt wird der Einfluss der Fräsdurchmessers mit passenden Formschlusselementen überprüft.

Für die Durchführung der Formschlussversuche werden Platten unterschiedlicher Materialien und Stärken benötigt um Variationen mit verschiedene Plattensteifigkeiten K , die sich nach

$$K = \frac{E \cdot t^3}{12 \cdot (1 - \nu^2)} \tag{4.1}$$

ermitteln lassen [2.26], durchzuführen. Sortiert nach der Plattensteifigkeit, beinhaltet Tabelle 4-9 alle verwendeten Platten und alle zur Berechnung der Plattensteifigkeit notwendigen Kennwerte.

Tabelle 4-9: Plattenwerkstoffe für den Formschlussversuch mit den angenommenen Moduli E und Querkontraktionszahlen ν .

Material	Dicke t [mm]	angenommener Modul E [MPa]	ang. Querkontraktionszahl ν []	Plattensteifigkeit K [Nmm]
PP	1	1200	0.3	110
PP	2	1200	0.3	879
PP	3	1200	0.3	2967
PP	5	1200	0.3	13736
St37	2	210000	0.3	153846

In Tabelle 4-10 sind die Ergebnisse für die Untersuchungen mit unterschiedlichen Plattensteifigkeiten dargestellt. Aus den gemessenen Kraft/Weg Verläufen werden gemittelte Kurven erstellt, und diese werden in Abb. 4-12 (a) gezeigt. Aus den durchgeführten Versuchen geht hervor, dass sich mit zunehmender Plattensteifigkeit die maximale Ausziehkraft erhöht, sich der $w_{F_{\max}}$ Wert hingegen verringert und die Steigung im Bereich vor der Maximalkraft zunimmt. Vergleicht man nun die max. Ausziehkraft über der Plattensteifigkeit im logarithmischen Maßstab, so ist diese Zunahme noch deutlicher erkennbar, siehe Abb. 4-12 (b). Zwischen den ersten drei PP-Formschlusselementen unterschiedlicher Dicken ist ein sehr deutlicher Anstieg in der max. Ausziehkraft erkennbar. Dagegen zeigen sich nur geringe Änderungen in punkto Ausziehkraft im Bereich einer Steifigkeit von etwa 10 000 Nmm bis 100 000 Nmm, also zwischen PP3-h40-t95-N und ST2-h40-t95-N.

Tabelle 4-10: Ergebnisse der Versuche XXX-h40-t95-N in EPS-W30 für unterschiedliche Kreisplattensteifigkeiten.

Bezeichnung	n_{gew} []	ρ [kg /m ³]	h [mm]	$w_{F_{\max}}$ [mm]	F_{\max} [N]	$A_{F_{\max}}$ [Nmm]
PP1-h40-t95-N	1/3	29.1	39.0	12.6	588	4514
PP2-h40-t95-N	2/4	29.8 ± 0.5	38.0 ± 0.0	7.9 ± 0.3	641 ± 7	2861 ± 31
PP3-h40-t95-N	3/3	29.4 ± 0.6	38.7 ± 0.6	7.8 ± 0.7	705 ± 17	3005 ± 369
PP5-h40-t95-N	2/3	29.8 ± 0.2	39.5 ± 0.7	5.0 ± 0.5	674 ± 19	1839 ± 364
ST2-h40-t95-N	3/4	30.1 ± 0.4	38.3 ± 0.6	6.3 ± 0.6	726 ± 27	2659 ± 344

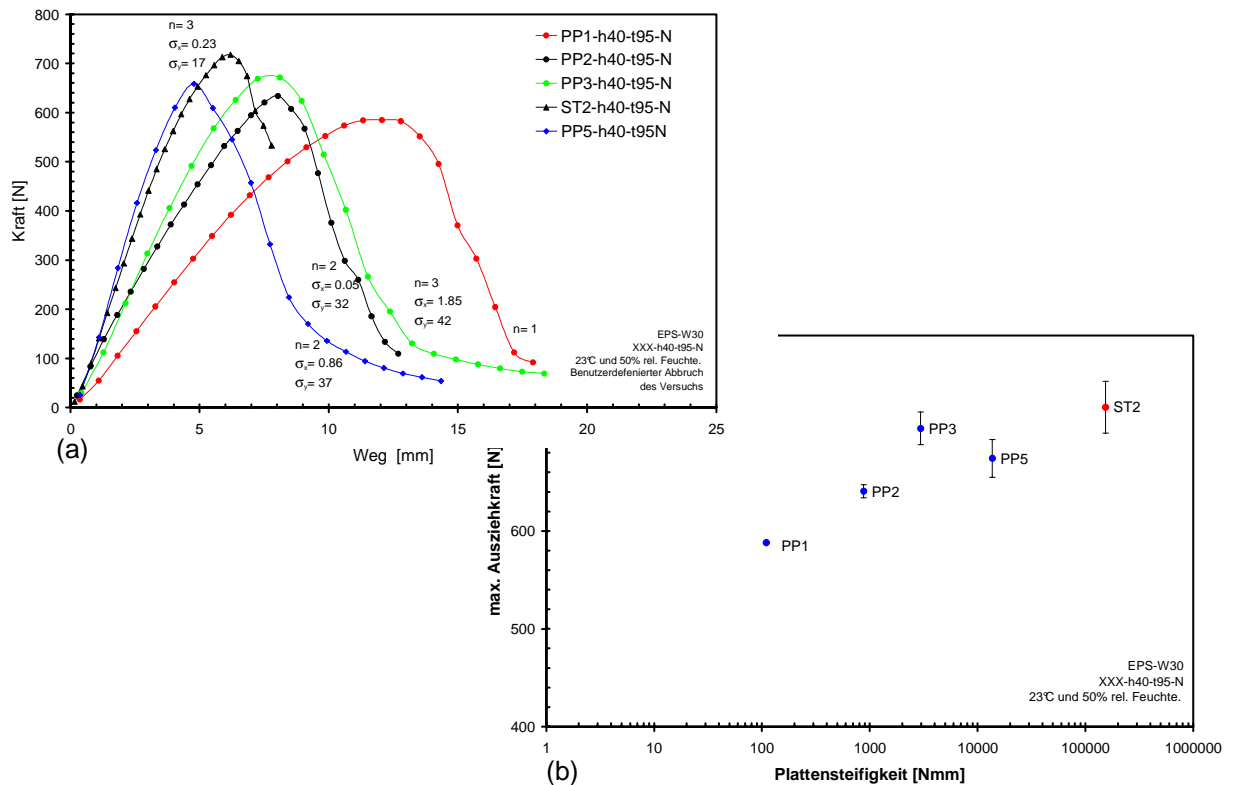


Abb. 4-12: Darstellung der (a) gemittelten Kraft/Weg-Verläufe und (b) maximale Ausziehkraft über der Plattensteifigkeit für XXX-h40-t95-N in EPS-W30.

Die bisherigen geometrischen Einflussgrößen befassen sich mit Veränderungen der Fräsung im Dämmstoff. Mit Hilfe von Variationen im Kreisplattendurchmesser wird nun das Befestigungselement genauer untersucht.

Im ersten Schritt wird bei gleichbleibenden Fräsdurchmesser von 70 mm der Außendurchmesser des Formschlusselementes neben dem Standardmaß von 70 mm noch mit den Durchmessern 50 mm und 60 mm geprüft. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4-11 dargestellt. Die gemittelten Kraft/Weg-Verläufe befinden sich in Abb. 4-13. Wie aus den ermittelten Kennwerten hervorgeht, steigt die max. Ausziehkraft mit zunehmenden Außendurchmesser, die Wegwerte bei diesem Höchstwert nehmen dagegen ab. Die Steigung vor dem Maximalwert der Verläufe vergrößert sich. Aufgrund der Verkleinerung des Plattendurchmessers verändert sich die Krafteinleitung im Dämmstoff und bewirkt eine Erhöhung der Spannung im Rissbildungsbereich.

Tabelle 4-11: Ergebnisse der Versuche PP2XXX-h40-t95-N in EPS-W30.

Bezeichnung	n _{gew} []	ρ [kg/m ³]	h [mm]	w _{Fmax} [mm]	F _{max} [N]	A _{Fmax} [Nmm]
PP2-h40-t95-N	2/4	29.8 ± 0.5	38.0 ± 0.0	7.9 ± 0.3	641 ± 7	2861 ± 31
PP2D60*-h40-t95-N	3/3	29.6 ± 0.5	37.7 ± 0.6	8.7 ± 0.1	615 ± 22	3146 ± 171
PP2D50*-h40-t95-N	2/3	29.7 ± 0.4	37.5 ± 0.7	9.8 ± 0.3	574 ± 10	3438 ± 172

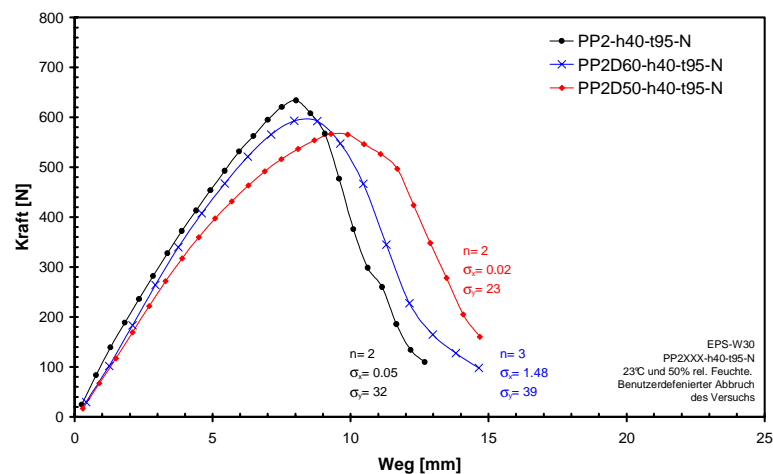


Abb. 4-13: Gemittelte Kurvenverläufe für PP2XX-h40-t95-N in EPS-W30 mit unterschiedlichen Außendurchmesser der Kreisplatten bei gleichbleibenden Fräsdurchmesser von 70 mm.

Im nächsten Schritt wird für EPS-W25 auch der Fräsdurchmesser in Kombination mit der Ausziehhöhe variiert. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4-12 dargestellt; in Abb. 4-14 werden die gemittelten Verläufe gezeigt. Wie aus den Ergebnissen hervorgeht handelt es sich nicht um geringe Änderungen im Verhalten wie bei den zuvor variierten Kreisplattendurchmessern, sondern die gemessenen Kraft/Weg-Verläufe weisen komplett unterschiedliche Charakteristika auf. Augenscheinlich jedoch ist, dass durch Veränderungen in der Geometrie ein optimaler Zustand für die Befestigung gefunden werden kann und nicht unbedingt der größte Durchmesser diesen Zustand darstellt. Auf die Wirkweise und weitere Effekte wird etwas später mit Hilfe der Methode der finiten Elemente eingegangen.

Tabelle 4-12: Ergebnisse der Versuche PP2XXX-h40-t95-N in EPS-W25.

Bezeichnung	n	ρ	$w_{F_{max}}$	F_{max}	$A_{F_{max}}$
	[]	[kg /m ³]	[mm]	[N]	[Nmm]
PP2D100-h28-t95-W	2/3	25.2 ± 0.9	9.5 ± 0.1	449 ± 2	1766 ± 16
PP2D40-h68-t95-W	3/3	25.1 ± 1.3	33.7 ± 7.2	657 ± 43	14391 ± 4122
PP2D100-h40-t95-W	1/3	24.9 ± 0.0	12.4 ± 0.0	412 ± 0	1634 ± 0
PP2D40-h40-t95-W	3/3	25.4 ± 0.7	14.4 ± 1.5	412 ± 31	3811 ± 825

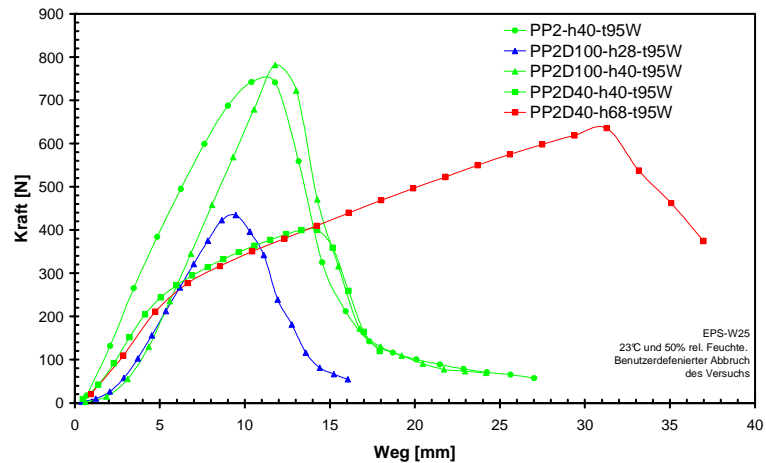


Abb. 4-14: Gemittelte Kurvenverläufe für PP2XX-h40-t95-N in EPS-W25.

4.1.5 Einfluss der Hartschaumtype

Um den Einfluss der Schaumzellstruktur und der Dichte auf das gesamte System zu erfassen, werden zuletzt für PP2-h40-t95-N und ST2-h40-t95-N noch Versuche mit unterschiedlichen Hartschaumtypen durchgeführt. Die Ergebnisse für PP2-h40-t95-N sind in Tabelle 4-13 zusammengestellt, die für ST2-h40-t95-N aus Tabelle 4-14. Die Mittelwertkurven sind in Abb. 4-15 (a), (b) und (c) dargestellt.

Tabelle 4-13: Ergebnisse für PP2-h40-t95-N in unterschiedlichen Hartschaumtypen.

Type	n_{gew} []	ρ [kg /m ³]	h [mm]	w_{Fmax} [mm]	F_{max} [N]	A_{Fmax} [Nmm]
EPS-F	4/4	16.1 ± 0.2	38.3 ± 0.5	7.7 ± 0.4	335 ± 7	1486 ± 168
EPS-W20	4/4	20.1 ± 1.6	37.3 ± 0.5	8.1 ± 1.5	399 ± 32	1911 ± 586
EPS-W25	2/4	26.3 ± 0.2	37.5 ± 0.7	6.5 ± 0.6	479 ± 20	1755 ± 325
EPS-W30	2/4	29.8 ± 0.5	38.0 ± 0.0	7.9 ± 0.3	641 ± 7	2861 ± 31
XPS-R035	4/4	32.1 ± 0.1	38.0 ± 0.0	12.5 ± 0.6	1247 ± 22	8971 ± 473

Tabelle 4-14: Ergebnisse für ST2-h40-t95-N in unterschiedlichen Hartschaumtypen.

Type	n_{gew} []	ρ [kg /m ³]	h [mm]	w_{Fmax} [mm]	F_{max} [N]	A_{Fmax} [Nmm]
EPS-F	4/4	16.3 ± 0.3	39.5 ± 0.6	5.7 ± 0.3	347 ± 14	1211 ± 109
EPS-W20	4/4	20.1 ± 0.4	37.5 ± 0.6	5.7 ± 0.7	428 ± 13	1502 ± 316
EPS-W25	2/4	26.4 ± 0.2	38.0 ± 0.0	4.9 ± 0.2	507 ± 4	1402 ± 76
EPS-W30	3/4	30.1 ± 0.4	38.3 ± 0.6	6.3 ± 0.6	726 ± 27	2659 ± 344
XPS-R035	4/4	32.2 ± 0.1	39.8 ± 0.5	9.1 ± 0.4	1496 ± 47	8040 ± 453

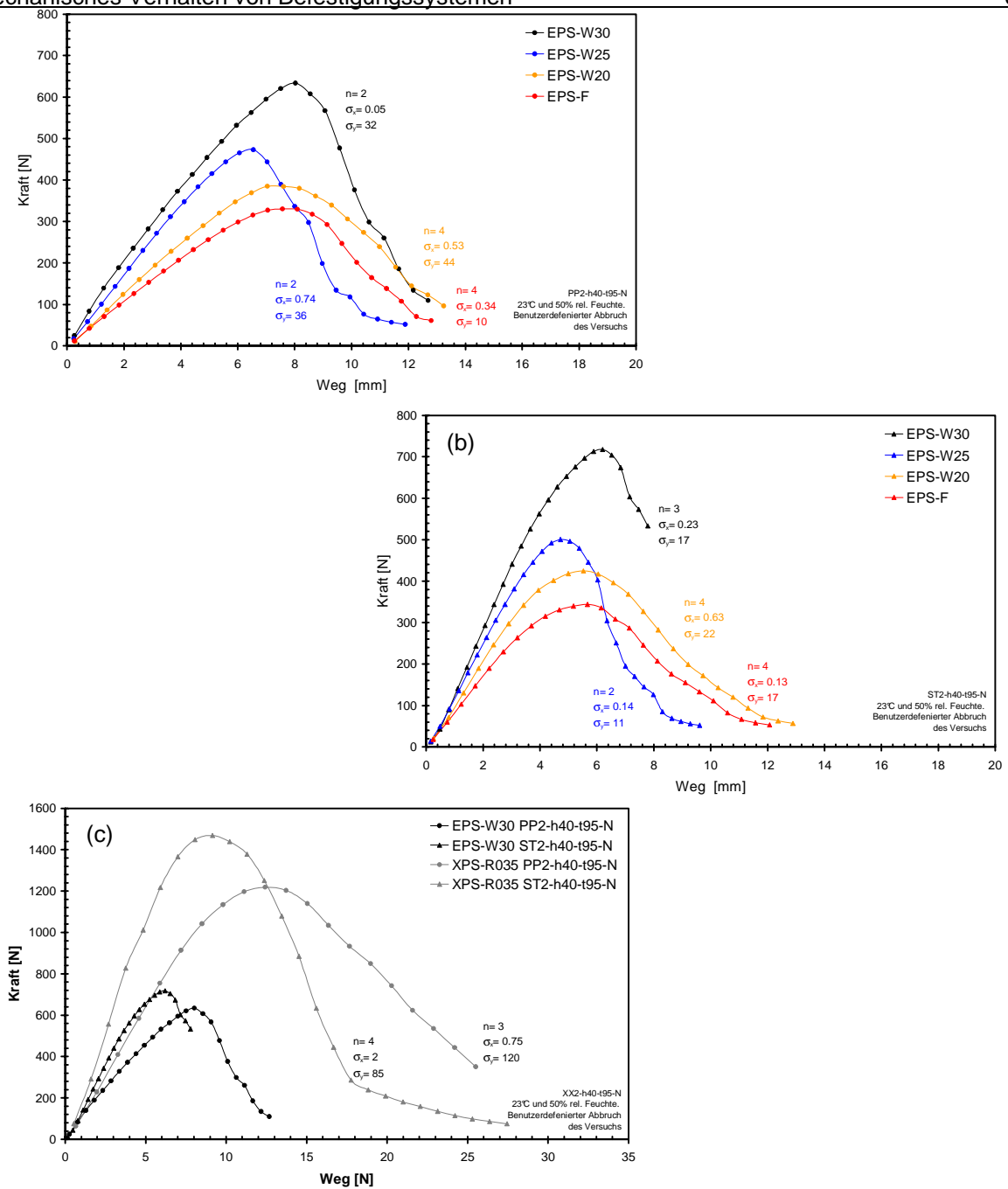


Abb. 4-15: Gemittelte Kurvenverläufe für PP2-h40-t95-N bzw. ST2-h40-t95-N in Hartschäumen unterschiedlicher Dichten.

Wie schon aus den dämmstoffspezifischen Untersuchungen hervorgeht, sind die daraus ermittelten Festigkeitskennwerte für XPS um ein vielfaches größer als von EPS-W30. Aus Abb. 4-15 (c) zeigt sich für XPS im Vergleich zu EPS-W30 wieder ein ähnlicher Zusammenhang. Aus den Kraft- und Wegwerten aus den zuvor angeführten Tabellen, ergibt sich ein Faktor von etwa 2 zwischen den beiden Typen für die mechanischen Kennwerte. Für weitere Vergleiche werden für die EPS Typen die erhaltenen Kennwerte mit der ermittelten Dichte verglichen. In Abb. 4-16 ist die max. Ausziehkraft über der Dichte für PP2-h40-t95-N und ST2-h40-t95-N dargestellt. Wie aus der Abbildung ersichtlich ist, steigt mit zunehmender Dichte die max. Ausziehkraft überproportional. Der Einfluss der Plattensteifigkeit auf die max. Ausziehkraft (Vergleich PP2 mit ST2 in Abb. 4-16) nimmt sukzessive mit der Dichte ab.

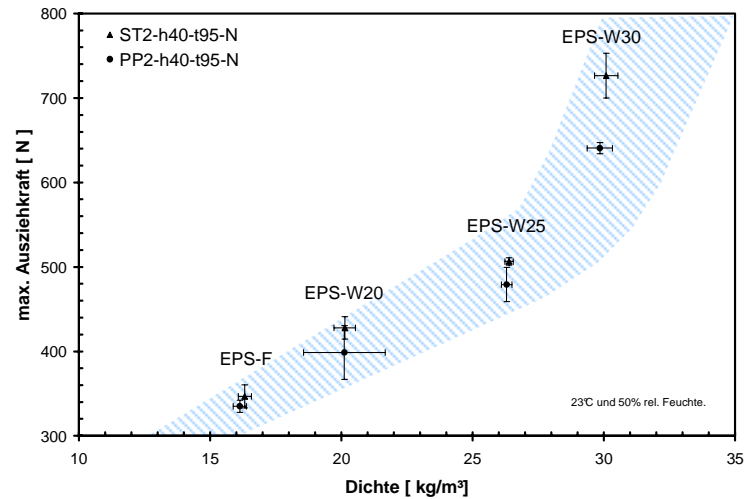


Abb. 4-16: Max. Ausziehkraft über der Dichte für PP2-h40-t95-N und ST2-h40-t95-N in unterschiedlichen EPS-Typen.

Mit Hilfe der Mittelwertkurven werden weitere Vergleiche angestellt. Eine Möglichkeit ist es, die Kraft pro Dichte über dem Weg darzustellen. Für PP2-h40-t95-N und ST2-h40-t95-N sind diese Darstellungsweisen in Abb. 4-17 gezeigt. Wie aus den Abbildungen hervorgeht, sind die Verläufe für alle vier Typen bis zu einem Kraft pro Dichtewert von etwa $15 \text{ m}^4/\text{s}^2$ ident. Bei Verwendung der PP-Kreisplatte zeigen die Hartschäume EPS-F, EPS-W20 und EPS-30 auch im restlichen Teil kaum erkennbare Unterschiede, bei der Stahlkreisplatte erreicht EPS-W30 hingegen einen etwas größeren Höchstwert.

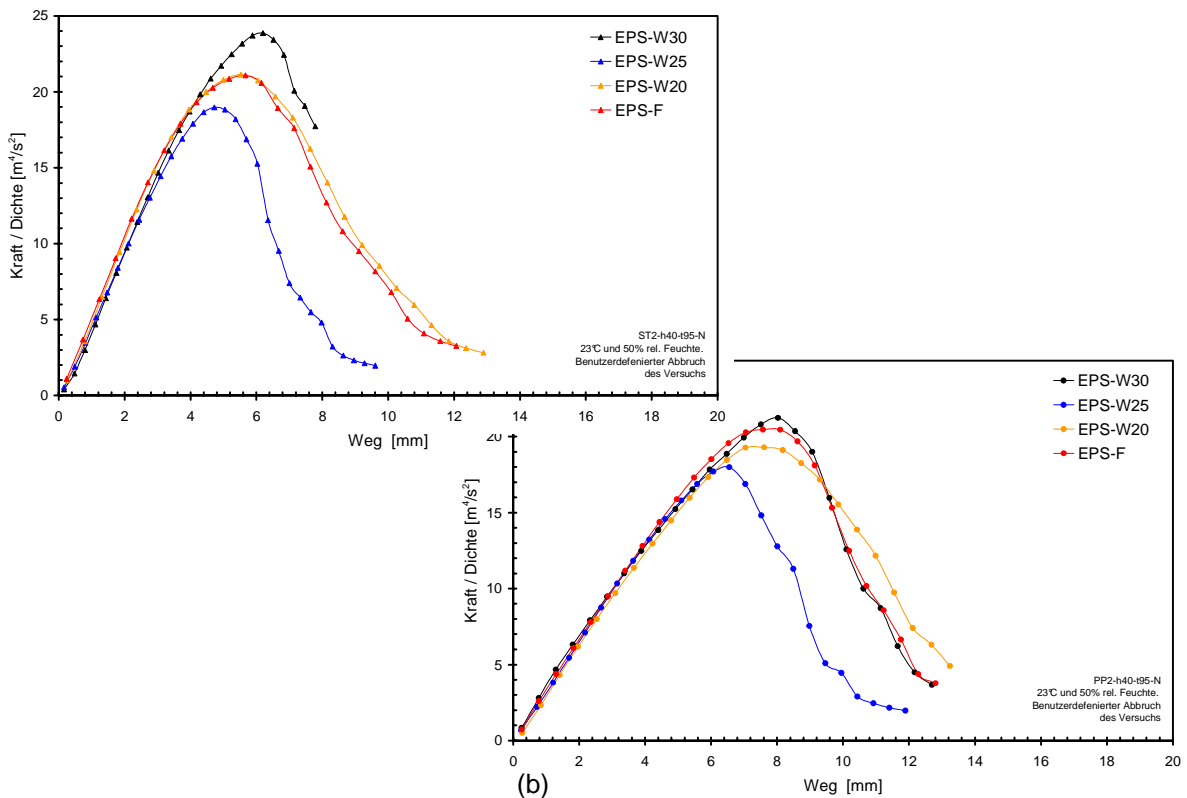


Abb. 4-17: Kraft pro Dichte über Weg der Mittelwertkurven für (a) ST2-h40-t95-N und (b) PP2-h40-t95-N in EPS unterschiedlicher Dichten.

Für EPS-W25, das in den dämmstoffspezifischen Untersuchungen sehr hohe Festigkeits- und Bruchdehnungswerte pro Dichte im Vergleich zu anderen aufweist, könnte der Unterschied in den Ergebnissen für den Formschluss auch durch produktionsbedingte Schwankungen hervorgerufen werden.

4.1.6 Mehrfacher Formschluss

Im letzten Schritt wird noch der mehrfache Formschluss untersucht. Es werden vier Varianten im Bereich der Ausziehhöhe von 40 mm in EPS-W30 geprüft. Die erhaltenen Ergebnisse sind in Tabelle 4-15 dargestellt. Wie aus der Streuung für die Kennwerte hervorgeht, liegen in den einzelnen gemessenen Kurven Unterschiede in punkto Kurvencharakteristik und Größe der Messwerte vor. Auf die Bildung von Mittelwertkurven wird daher verzichtet.

Tabelle 4-15: Ergebnisse des mehrfachen Formschluss in EPS-W30.

Bezeichnung	n_{gew} []	ρ [kg /m ³]	$W_{F_{\text{max}}}$ [mm]	F_{max} [N]	$A_{F_{\text{max}}}$ [Nmm]
PP2-h20h40-t95-N	2/3	32.4 ± 0.2	4.3 ± 0.6	346 ± 17	810 ± 163
PP2-h40h60-t95-N	3/3	31.4 ± 0.6	8.1 ± 3.4	622 ± 62	2811 ± 1112
PP2-h20h40h60-t95-N	3/3	30.4 ± 0.1	9.2 ± 2.8	547 ± 70	3426 ± 1145
PP2-h30h40h50-t95-N	3/3	30.5 ± 0.3	5.6 ± 0.2	549 ± 52	1547 ± 236

Die max. Ausziehkraft wird für Varianten des einfachen und mehrfachen Formschlusses in Abb. 4-18 gezeigt. Vergleicht man die Ergebnisse, so liefert der zweifache Formschluss fast die gleichen max. Ausziehkraft, wie ein einfacher Formschluss mit der untersten Kreisplatte des zweifachen. Die beiden dreifachen Formschlüsse schneiden etwas schlechter ab als PP2-h40h60-t95-N, wobei die Unterschiede noch im Bereich der Streuung liegen. Diese drei Formschlüsse weisen für die max. Ausziehkraft die selbe Größenordnung auf wie ein einfacher Formschluss mit einer Ausziehhöhe von 40 mm.

Der mehrfache Formschluss führt nicht zu höheren max. Ausziehkraften, sondern durch die zusätzlichen Kreisplatten kommt es zur Erniedrigung der Ausziehkraft. Vergleicht man eine einzelne Messkurve eines mehrfachen Formschlusses mit der Mittelwertkurve eines einfachen, so zeigt sich, dass nach Erreichen des Höchstwertes der Risswachstum bei dem mehrfachen Formschluss viel mehr Brucharbeit benötigt. Nach dem Maximalwert kann es außerdem zu einem nochmaligen Anstieg im Kraftwert kommen. Die Kraftwerte erreichen aber nicht mehr den Wert des Anfangsmaximums. Ein deutlicher Zusammenhang aufgrund der Plattenzusammenstellung kann nicht erkannt werden. Das Wesentliche aus den durchgeführten Versuchen ist sicherlich die Abnahme der Kraftwerte durch die zusätzlichen Platten.

Um die Richtigkeit der Aussagen zu überprüfen werden weitere Versuche durchgeführt. Dabei werden in EPS-W25 weitere Varianten getestet. Der Außendurchmesser der verwendeten Kreisplatten wird mit zunehmender Ausziehhöhe verringert. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4-16 und Abb. 4-19 in dargestellt.

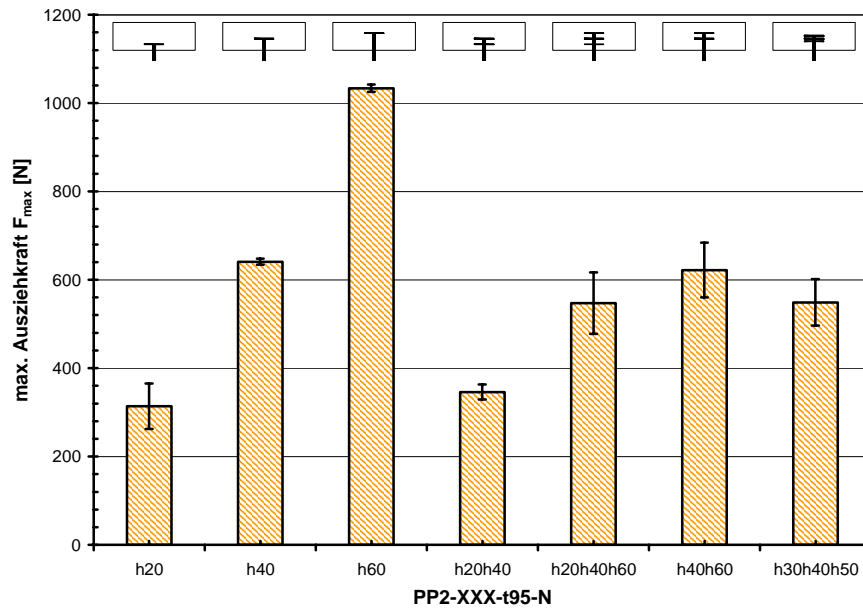


Abb. 4-18: Vergleich der max. Ausziehungskraft für verschiedene Varianten des einfachen und mehrfachen Formschlusses EPS-W30.

Tabelle 4-16: Ergebnisse des mehrfachen Formschluss in EPS-W25.

Bezeichnung	n	ρ	$w_{F_{max}}$	F_{max}	$A_{F_{max}}$
	[]	[kg /m ³]	[mm]	[N]	[Nmm]
PP2D100D70-h20h40-t95-W	2/3	0.7 ± 0.8	6.5 ± 0.7	462.3 ± 15.2	1634 ± 143
PP2D70D40-h40h60-t95-W	2/3	23.1 ± 0.1	14.7 ± 4.2	768.1 ± 38.6	6967 ± 3521
PP2D100D70D40-h20h40h60-t95-W	2/3	24.5 ± 0.5	7.1 ± 0.9	614.2 ± 34.9	2116 ± 642

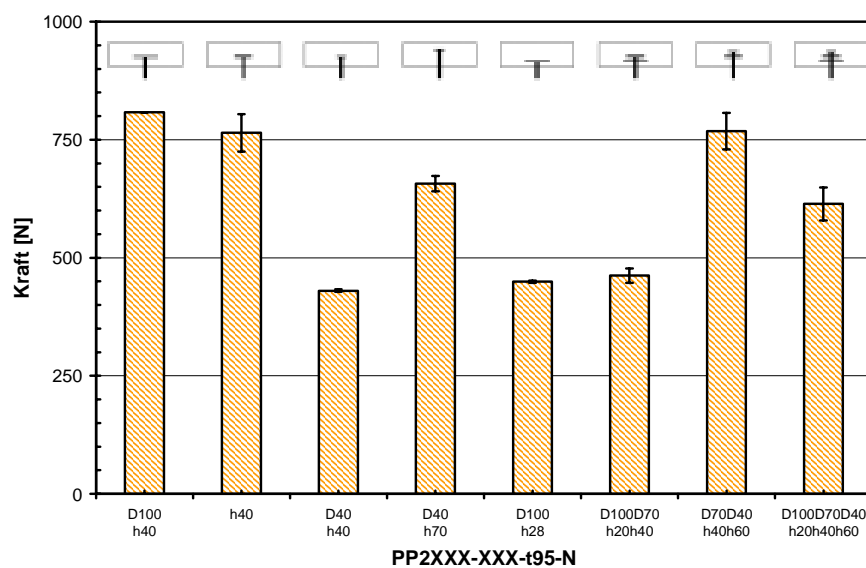


Abb. 4-19: Vergleich der max. Ausziehungskraft für verschiedene Varianten des einfachen und mehrfachen Formschlusses EPS-W25.

Auch die Ergebnisse für EPS-W25 spiegeln die zuvor erhaltenen Erkenntnisse wider. Beim mehrfachen Formschluss bewirken die zusätzlichen Platten eine Minderung der max. Ausziehkraft. Nach Vorliegen dieser Erkenntnis ist in Erwägung zu ziehen, das unterste Formschlusselement zur Auslegung solcher Geometrien heranzuziehen.

4.1.7 Weiterführende Überlegungen

Durch die Vielzahl an durchgeführten Varianten können Zusammenhänge zwischen Frästiefe, Ausziehhöhe, Plattensteifigkeit, Dämmstoffdicke und Hartschaumzellstruktur erkannt werden. Wie schon erwähnt, zeigt sich ein für den Versuch typisches Bruchgeschehen. Dabei entstehen Bruchkegel mit einer Neigung von etwa 45°. Diese Tatsache lässt natürlich vermuten, dass im lokalen Bereich ein Versagen zufolge von Schub auftritt.

Mit Hilfe der max. Ausziehkraft F_{\max} und der Mantelfläche A_M des unter Kreisplatte eingeschlossenen Zylinders lässt sich als erste Abschätzung die Schubfestigkeit nach

$$\tau = \frac{F_{\max}}{A_M} \quad (4-2)$$

berechnen. Um den Einfluss der Dichte zu vernachlässigen, wird eine Spannungsüberhöhung S_F bestimmt. Dieser Faktor stellt das Verhältnis zwischen den aus der Literatur bekannten Schubfestigkeiten, siehe Tabelle 7-2, zu den berechneten Festigkeiten dar. Die Spannungsüberhöhung für verschiedene Variationen wird in Abb. 4-21 gezeigt. Der mehrfache Formschluss wird nicht näher betrachtet.

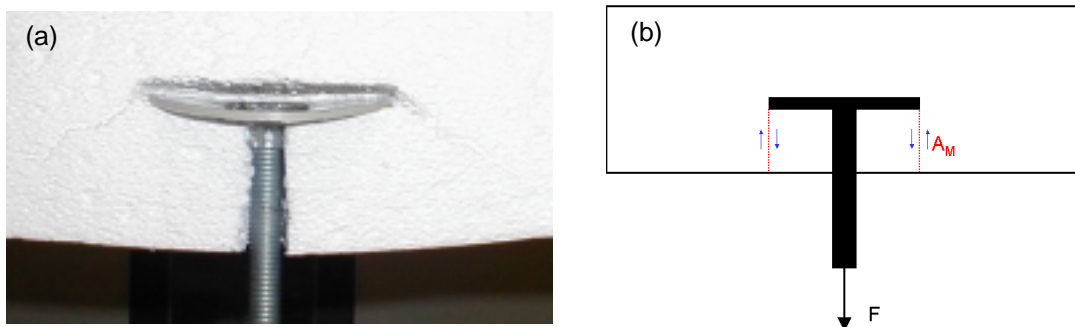


Abb. 4-20: (a) Detailaufnahme eines einfachen Formschlusssystem während eines Versuches und (b) Skizze des Formschlusses und der für die Berechnung der Schubfestigkeit benötigten Mantelfläche A_M .

In Abb. 4-21 (a) wird der Einfluss des Formschlusselementes dargestellt. Aufgrund der Plattensteifigkeit und des Kreisplattendurchmessers sind nur geringe Unterschiede in den S_F -Werten erkennbar. Für die unterschiedlichen Hartschaumtypen weichen die S_F -Werte stärker voneinander ab, siehe Abb. 4-21 (c). Dabei zeigt EPS-W25 einen größeren Unterschied zu den anderen Werten, was jedoch durch produktionsbedingte Schwankungen hervorgerufen werden kann.

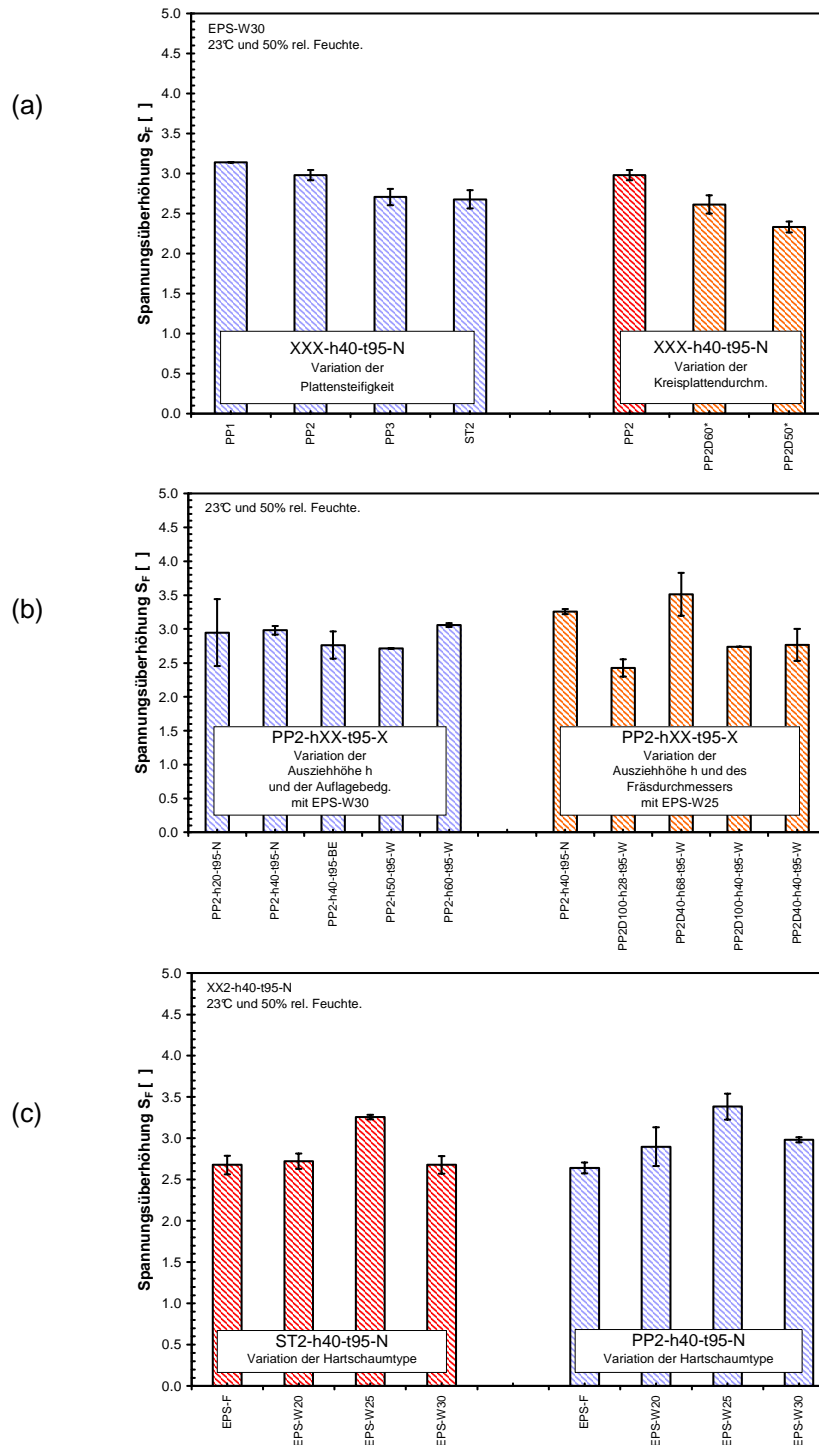


Abb. 4-21: Spannungsüberhöhung S_F für Variationen in der Kreisplatte, der Ausziehhöhe, der Auflagebedingungen und der Hartschaumtypen.

Der Einfluss der Auflagebedingungen geht aus Abb. 4-21 (b) hervor. Die Unterschiede bewegen sich im Bereich der Standardabweichung und in derselben Größenordnung wie bei verschiedenen Plattensteifigkeiten. Durch Änderung der Geometrie, sprich Ausziehhöhe und Fräsdurchmesser, treten die größten Abweichungen in den S_F -Werten auf, trotz teilweiser konstantgehaltener Mantelfläche, siehe Abb. 4-21 (b). Trotz der unterschiedlichsten Randbedingungen (Dämmstoff; Auflagebedingungen etc.) bewegen sich die Werte für S_F in einem Bereich von 2.5 bis 3.5.

Wie die zuvor dargestellten Ergebnisse zeigen, können mit Hilfe der Annahme eines Schubversagens bei der Auslegung erste Abschätzungen getroffen werden. Um jedoch genauere Vorhersagen über das mechanische Ausziehverhalten zu gewinnen, werden im ersten Schritt die Ansätze nach [2.26] betrachtet.

Die Absenkung einer Kreisplatte für den statischen Fall kann mit folgender Differentialgleichung

$$\Delta\Delta w = \frac{p}{K} \quad (4-3)$$

hergeleitet werden. Ihre allgemeine Lösung ist

$$w = c_1 + c_2 \cdot r^2 + c_3 \cdot \ln \frac{r}{a} + c_4 \cdot r^2 \cdot \ln \frac{r}{a} + w_1, \quad (4-4)$$

wobei c_1 bis c_4 beliebige Konstanten darstellen, $2a$ bezeichnet den Kreisplattendurchmesser und w_1 stellt das folgende Partikularintegral

$$w_1 = \frac{1}{K} \int \frac{dr}{r} \int r dr \int \frac{dr}{r} \int p \cdot r dr \quad (4-5)$$

dar. Dabei sind die Randbedingungen einerseits die vorliegenden Einspannbedingungen und die wirkenden Kräfte. Der vorliegende Versuchsaufbau kann wie in ein Abb. 4-22 dargestelltes System betrachtet werden. Dabei stellt q_w die aufgrund der Ausziehkraft wirkende Flächenlast dar. Aufgrund der Einbettung des Formschlusselementes im Dämmstoff wirkt ein Einbettungsgegendruck q_D . Da jedoch beide nicht nur von den Materialeigenschaften sondern auch von der wirkenden Last und der damit einhergehenden Absenkung abhängen, lässt sich die Differentialgleichung nur numerisch durch Iteration bis zum Gleichgewicht zwischen Absenkung, Kraft und Einbettung bestimmen.

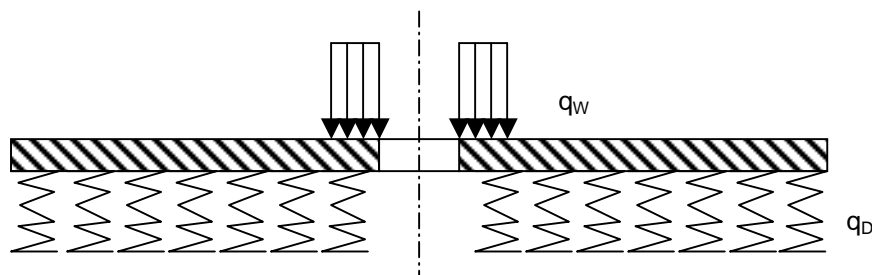


Abb. 4-22: Vereinfachtes Berechnungsmodell für den Formschluss.

Diese Überlegungen zeigen jedoch auf, dass q_D von der Materialkombination Befestigungselement zu verwendeten Dämmstoff abhängt. Im nächsten Schritt wird nun versucht mit Hilfe der Methode der finiten Elemente den Versuchsaufbau für PP2-h40-t95N in EPS-W30 zu simulieren.

4.1.8 FEM-Analyse

Der Formschlussversuch wird anhand des Beispiel PP2-h40-t95N in EPS-W30 mit Hilfe einer FEM-Analyse nachgestellt. Aus den Materialuntersuchungen und der Literatur sind die Eigenschaften des Dämmstoffes bekannt. Im ersten Schritt wird für die Modellierung ein linear elastisches Verhalten für den Dämmstoff und das Befestigungselement vorausgesetzt. Dabei wird für EPS-W30 der Biegemodul als Materialsteifigkeit herangezogen.

Der Versuch selbst wird einerseits als axisymmetrisches Modell andererseits als 3D-Halbmodell abgebildet, siehe Abb. 4-23. Die Berechnung erfolgt als Kontaktsimulation. Die in Kapitel 4.2 ermittelten Reibbeiwerte werden für die Simulation als Reibkoeffizienten verwendet. Um Simulation mit Messung zu vergleichen werden die erhalten Kraft/Weg-Kurven gegenübergestellt, siehe Abb. 4-24. Wie in dieser Abbildung erkennbar ist, zeigen die Modelle eine unterschiedlich steifes Verhalten. Der Schlitzes beim Formschlussversuch bewirkt eine Herabsenkung der Steifigkeit des Gesamtsystems. Die leichte Nichtlinearität der Messkurve wird nicht durch die Geometrie hervorgerufen. Im nächsten Schritt werden die maximal auftretenden Normalspannungen betrachtet, siehe Abb. 4-25.

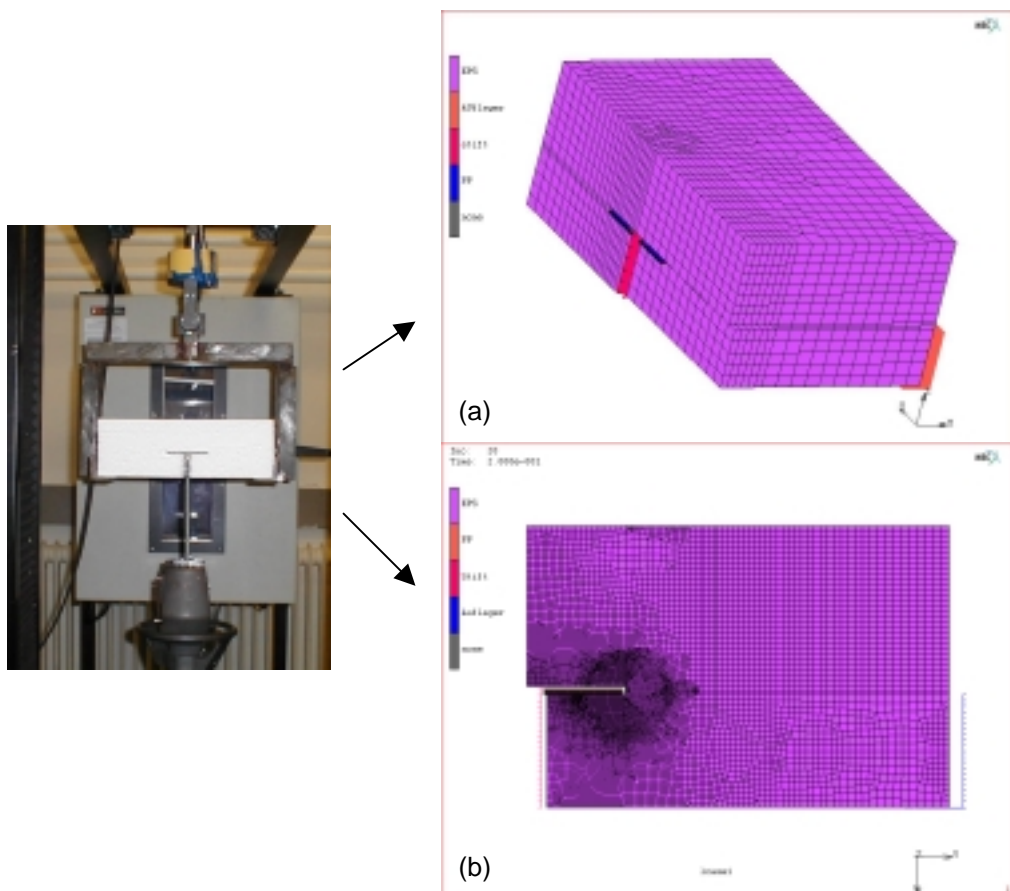


Abb. 4-23: Modellierung des Formschlussversuchs durch (a) 3D-Halbmodell und (b) axisymmetrisches Modell.

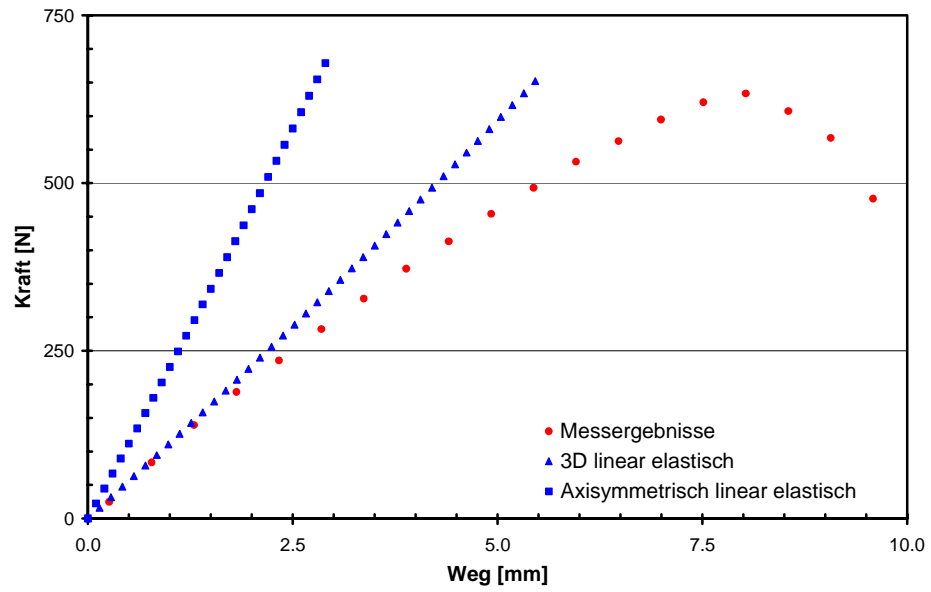


Abb. 4-24: Vergleich zwischen Messung und Simulation mit linear elastisch angenommenen Dämmstoffverhalten.

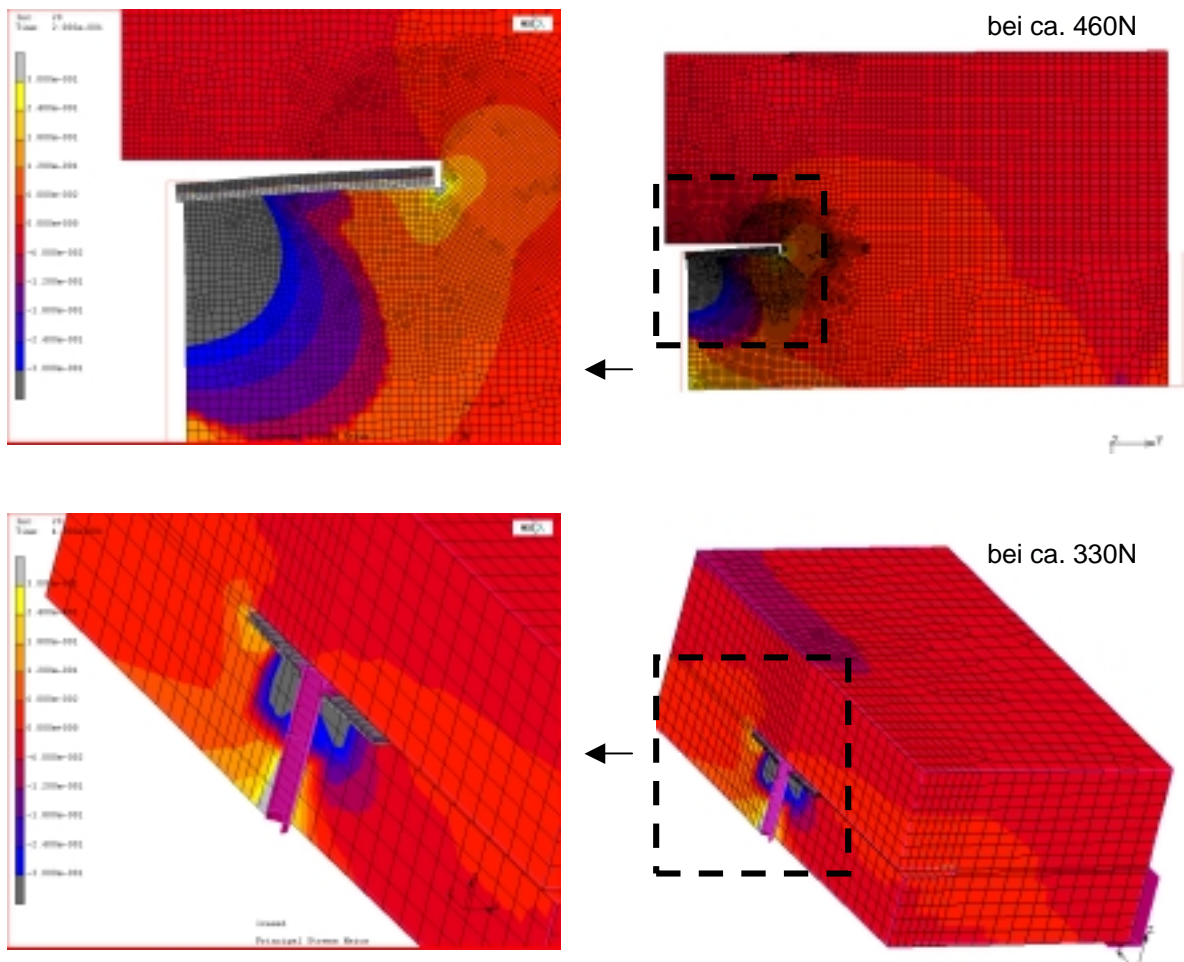


Abb. 4-25: Maximale Normalspannung für axisymmetrisches und 3D-halb Modell.

Wie aus den Abbildungen hervorgeht, werden bereits vor dem deutlichen Erreichen der maximalen Ausziehungskraft der Messung für das Material kritische Normalspannungen erreicht. Die Zugfestigkeit für EPS-W30, die aus den materialspezifischen Untersuchungen gewonnen wurde, liegt bei etwa 200 kPa. Außerdem können Druckbereiche unterhalb der Kreisplatte erkannt werden, deren Spannungswerte nicht mehr im linear elastischen Bereich liegen, siehe Abb. 4-41 in Kapitel 4.2.

Vom weiteren Interesse ist im Bereich der Rissbildung die Richtung der auftretenden Hauptnormalspannungen. In Abb. 4-26 ist eine Gegenüberstellung der Rissbildung mit Ergebnissen des axisymmetrischen Modells dargestellt. Wie die Abbildung zeigt, dürften diese Spannungen für die Rissbildung hauptsächlich verantwortlich sein.

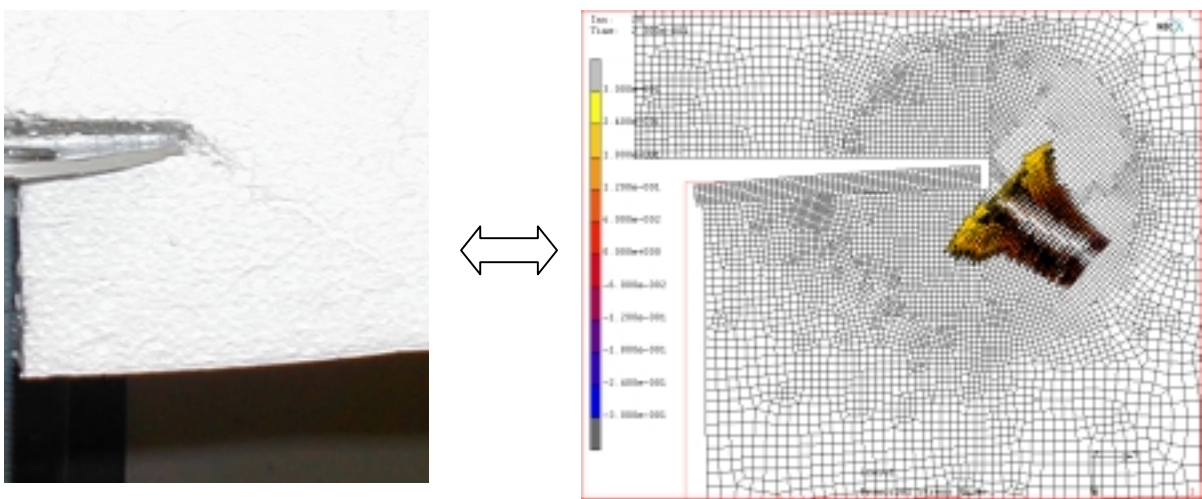


Abb. 4-26: Gegenüberstellung zwischen Rissbildung beim Versuch mit den an dieser Stelle wirkenden Hauptnormalspannungen.

Für einachsige Belastungsrichtung und dem damit angenommen einachsigen Spannungsfeld kann das Materialverhalten von EPS-W30 wie in Abb. 4-27 (a) beschrieben werden. Um das mehrachsige Spannungsfeld zu berücksichtigen wird mit Hilfe einer Vergleichsspannung nach Mises

$$2\sigma_y^2 = (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \quad (4-6)$$

eine Fließgrenze bestimmt. Dabei stellen σ_1 bis σ_3 die jeweiligen Hauptnormalspannungen dar. Da sich mit diesem Modell nicht zwischen Druck und Zug unterscheiden lässt, wird für den linear elastischen Bereich der Biege-Modul als Mittel zwischen Zug- und Druckeigenschaften angenommen. Nach Erreichen der Fließgrenze werden aus der Literatur bekannte Spannungs/Dehnungs-Werte für die Beschreibung der Materialsteifigkeit verwendet, siehe Abb. 4-27 (b). Mit Hilfe dieses Material Verhaltens werden das axisymmetrische und das 3D-half Modell erneut untersucht.

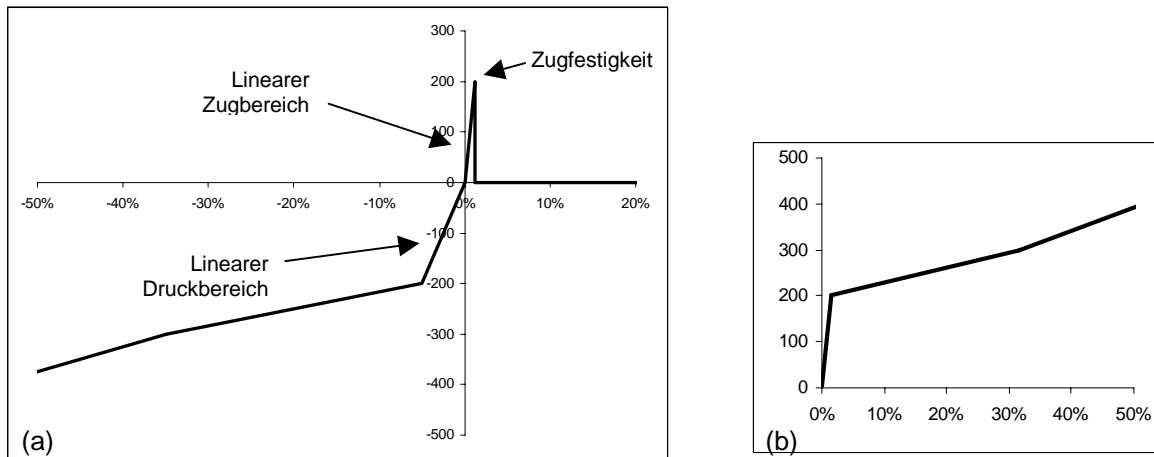


Abb. 4-27: Zeigt (a) idealisiertes Materialverhalten bei einachsiger Belastung und (b) elastisch-plastisches Modell der erneuten FEM-Berechnung.

In Abb. 4-28 ist der Vergleich zwischen gemittelten Kraft/Weg-Verlauf der Messung und elastisch-plastische Simulationsergebnissen gegenübergestellt. Wie aus dem Diagramm hervorgeht, stimmen die Simulation mit dem 3D-half Modell und die Messergebnisse recht gut überein. Das axisymmetrische Berechnungsmodell zeigt wieder das steifere Verhalten. Ein erstes klares Überschreiten der Hauptnormalspannung gegenüber der Zugfestigkeit erfolgt für das axisymmetrische Modell schon bei etwa 425 N. Bei dem 3D Modell hingegen ergeben sich erst zu einem späteren Zeitpunkt kritische Normalspannungen, siehe Abb. 4-29. Mit Hilfe des 3D-half Modells kann der gemittelten Kraft/Weg-Verlauf des Versuchs relativ gut simuliert werden. Für den berechneten Kraftwert beim theoretischen Versagen aufgrund der maximal auftretenden Hauptnormalspannungen ergibt sich eine Abweichung vom Messwert der max. Ausziehkraft der Versuchsserie von 10 %.

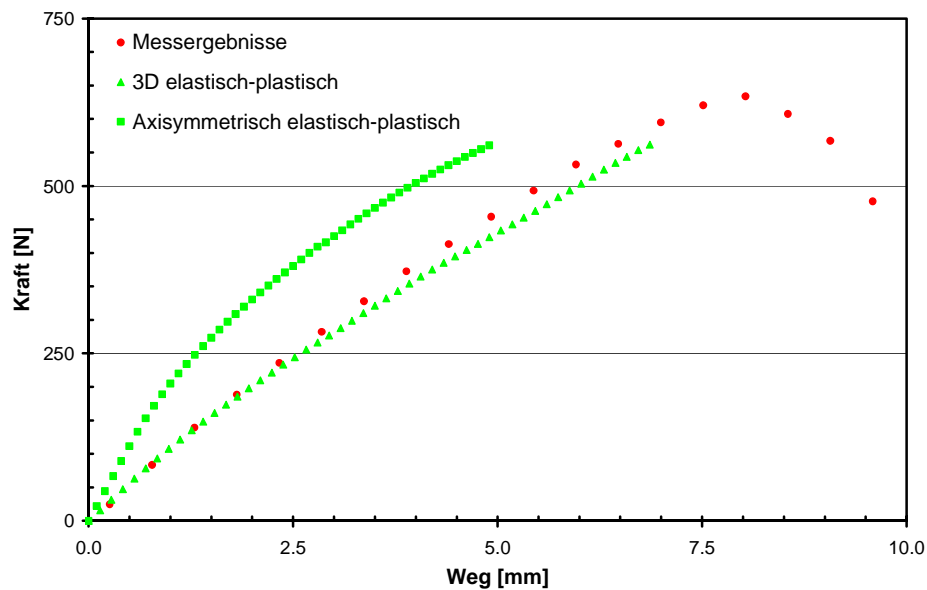


Abb. 4-28: Vergleich zwischen Messung und Simulation mit elastisch-plastisch angenommenen Dämmstoffverhalten.

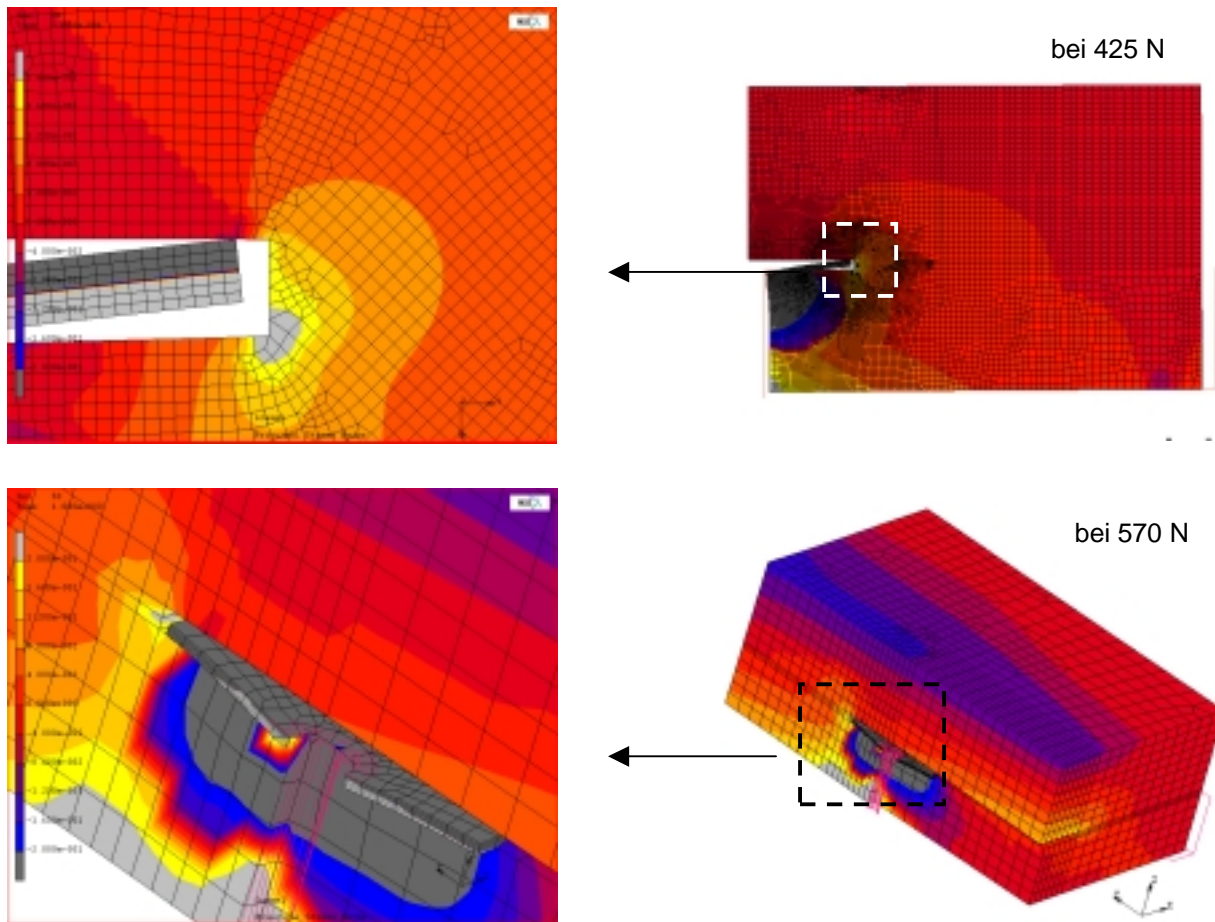


Abb. 4-29: Maximale Normalspannung für axisymmetrisches und 3D-halb Modell bei elastisch-plastischen Materialverhalten.

Um das unterschiedliche Versagen bei verschiedenen Plattensteifigkeiten zu erklären, werden weitere axisymmetrische Simulationen durchgeführt. Dabei kann das gemessene Verhalten, siehe Abb. 4-12, nicht wiedergegeben werden. Laut Simulation bewirken steifere Formschlusselemente geringere Verformungen. Aufgrund der vorliegenden Spannungsspitzen erreichen diese keine höheren Ausziehkräfte, was aus den Messungen nicht hervorgeht. Für das Verständnis werden trotzdem die verschiedenen Materialkombinationen für EPS-W30 und Kreisplatten unterschiedlicher Steifigkeiten gegenübergestellt (siehe Abb. 4-30 - maximale Hauptnormalspannung bei einer bestimmten Verformung). Dabei kann das unterschiedliche Einbettungsverhalten erkannt werden. Vergleicht man die Einbettung, so sind Platten niedriger Steifigkeit mit Kreisplatten kleineren Durchmessers vergleichbar, siehe Abb. 4-13 und Tabelle 4-11. Aus diesem Blickwinkel lassen sich die erhaltenen Ergebnisse für die unterschiedlichen Plattensteifigkeiten erklären.

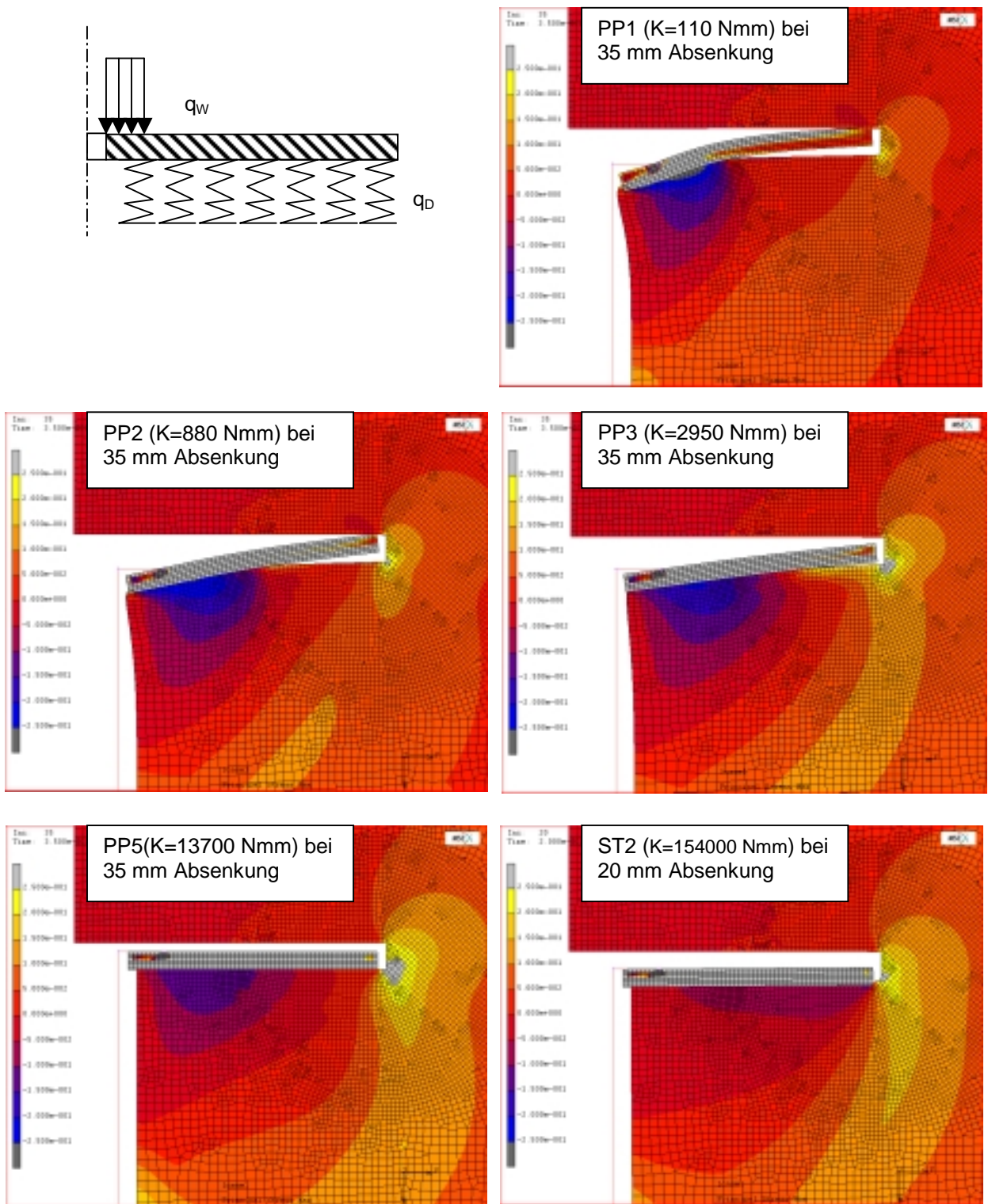


Abb. 4-30: Ergebnisse für unterschiedliche Kreisplattensteifigkeiten.

4.2 Grundlegende Untersuchungen - Reibschluss

Ebenso wie beim Formschluss wird auch bei der Grundsatzbetrachtung des Reibschlusses eine einfache, charakteristische Geometrie zur Abbildung der Zusammenhänge verwendet. Es wird ein zylindrischer Stift benutzt, 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 Kräftepiel ist in Abb. 4-31 schematisch dargestellt.

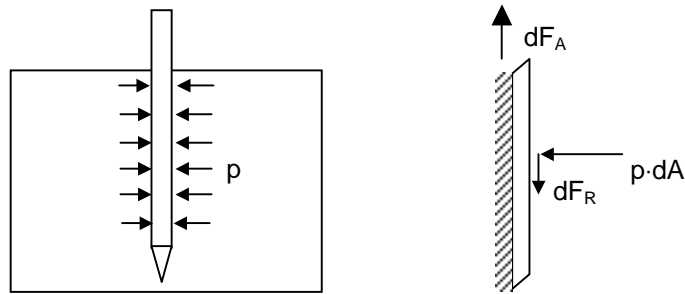


Abb. 4-31: Darstellung der Kräfte an einem im Dämmstoff eingebrachten Stift.

Der Reibschluss spaltet sich in drei Unterteile auf

- den einfachen Reibschlusszyklus,
- kurzzeitige Untersuchungen für den Reibschluss und
- langzeitige Untersuchungen für den Reibschluss.

Da insbesondere im Bereich des Reibschlusses auch zeitabhängige Zusammenhänge zu erwarten sind, werden Untersuchungen im Bereich von einigen Wochen durchgeführt.

4.2.1 Einfacher Reibschlusszyklus

Der einfache Reibschlusszyklus dient dazu, um den Stift definiert einzubringen. Dabei sollen nicht nur Vorgänge beim Ausziehen sondern auch beim Einbringen aufgezeichnet werden und daraus Erkenntnisse gewonnen werden. Die Durchführung erfolgt auf der Zug/Druck-Universalprüfmaschine vom Typ 4505 der Fa. INSTRON (High Wycomb, UK) bei Normklima (23°C und 50% rel. F.). Abbildung 4-32 zeigt den Versuchsaufbau.

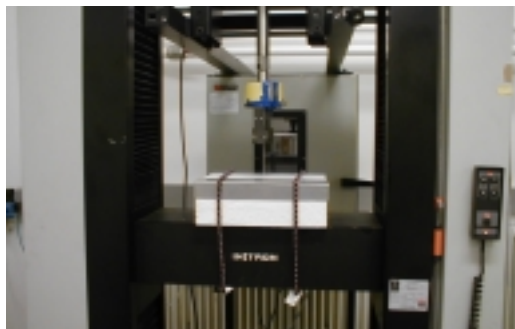


Abb. 4-32: Versuchsaufbau für die Reibschlussstudie.

Der Quader wird am Querhaupt mittels Bänder fixiert, der Stift in der pneumatischen Einspannung in Richtung der Zug/Druckachse eingeklemmt, mittels Querhauptbewegungen in Kontakt mit dem Quader gebracht und das vorgegebene Prüfprogramm gestartet. Zuerst wird der Stift mit einer Geschwindigkeit von 10 mm/min in den Hartschaum 70 mm hinein gedrückt, 1 min verweilt und schließlich mit derselben Geschwindigkeit wieder herausgezogen. Während des ganzen Ablaufes werden Kraft/Weg-Verläufe aufgezeichnet. In Abb. 4-33 sind diese Kurven für drei Versuche dargestellt. Dabei zeigte Versuch 2 den erwarteten Kurvenverlauf, ein Anstieg der Kraft bis zum Ende der Einbringungsphase und dann ein konstanter Abfall der Kraft beim Ausziehen. Wie die restlichen beiden Versuche jedoch zeigen, stellt der zweite Versuch einen Idealfall dar. Aufgrund der Prüfanordnung ist es für diese nicht möglich, die Einbringung materialschonend durchzuführen.

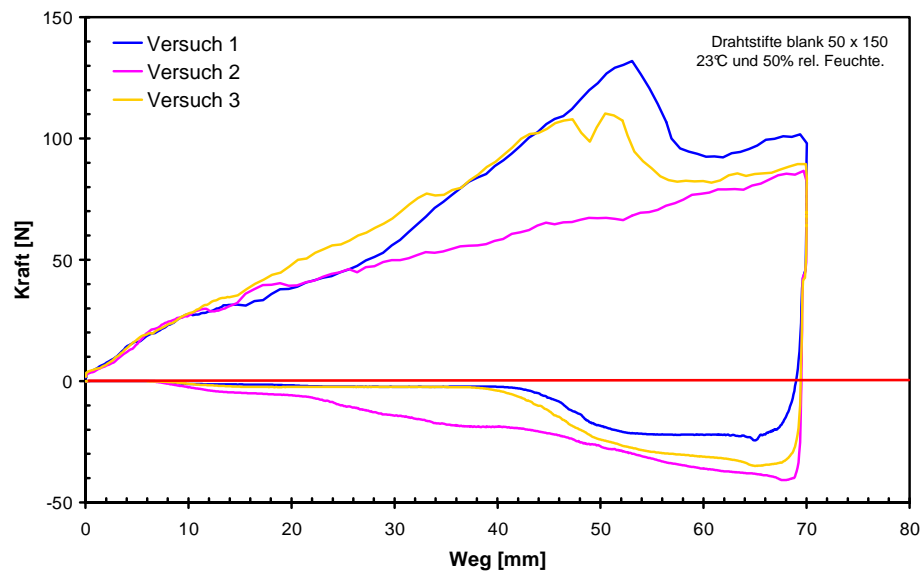


Abb. 4-33: Kraft/Weg Verläufe für drei einfache Reibschlusszyklen.

Wegen der großen Unterschiede in der Einbringung wird auf weitere Versuchsvarianten verzichtet. Trotzdem liefert dieser Versuchsaufbau für weitere Versuche wichtige Erkenntnisse. So muss einerseits darauf geachtet werden, dass eine materialschonende Einbringung erfolgt. Andererseits muss auch beim Ausziehen des Stiftes verhindert werden, dass während des Versuchs lokale Maxima im Kraft/Weg-Verlauf auftreten. Es ist sonst nicht möglich, reproduzierbare Messkurven zu ermitteln.

4.2.2 Kurzzeitiger Reibschluss

Der Versuch wird auf derselben Prüfmaschine wie bei dem einfachen Reibschlusszyklus durchgeführt. Beim Eindrücken des Stiftes per Hand wirkt die Kraftaufbringung zu langsam, so dass sich die Reproduzierbarkeit der Versuche durch die Einbringung um etliches verschlechtert. Daher wird der Stift 70 mm tief mit Hilfe eines Hammers in den Hartschaumquader eingebracht. Der Stift wird dabei lose gehalten und nicht gerade gedrückt. Auf Grund der Abweichung des Stiftes vom Lot, wird der Probekörper auf einen in der Neigung verstellbaren am Querhaupt befestigten Auflagetisch gelegt. Mit Hilfe

dieses Auflagetischs kann der Stift in Richtung der Zugachse ausgerichtet werden. Durch die feine Auflösung der Kraftmessdose lässt sich die eingestellte Neigung relativ gut überprüfen. Schließlich wird der Quader mit Bändern befestigt und der Stift in der pneumatischen Einspannung geklemmt. Abbildung 4-34 zeigt den Versuchsaufbau. Mit einer Geschwindigkeit von 10 mm/min wird der Stift aus dem Hartschaumquader bei Normklima zur Gänze herausgezogen und dabei werden Kraft/Weg-Verläufe aufgezeichnet.

Mit Hilfe dieser Untersuchungsart werden für die verschiedenen Hartschaumtypen in Kombination mit drei unterschiedlichen Stiften Kraft/Weg-Verläufe für den Ausziehvorgang gemessen. Neben zwei Drahtstiften mit unterschiedlichen Durchmessern (4.2 mm und 5 mm) wird noch ein Kunststoffstift (4.9 mm stark) geprüft. Daraus werden die für Vergleiche wichtig erscheinenden Kenngrößen ermittelt, wie die max. Ausziehungskraft F_{\max} und die eingeschlossene Fläche A_{ges} zwischen Verlauf und Abszisse. Die Einbringung des Stiftes und der Versuchsaufbau werden aufgrund der Ergebnisse des einfachen Reibschlusszyklus modifiziert, um die Reproduzierbarkeit zu erhöhen. Vor allem für die max. Ausziehungskraft kann des veränderten Prüfaufbaus die Streuung gesenkt werden. Trotzdem sind Streuungen in den Kraftwerten von 10 % bis 20 % möglich.

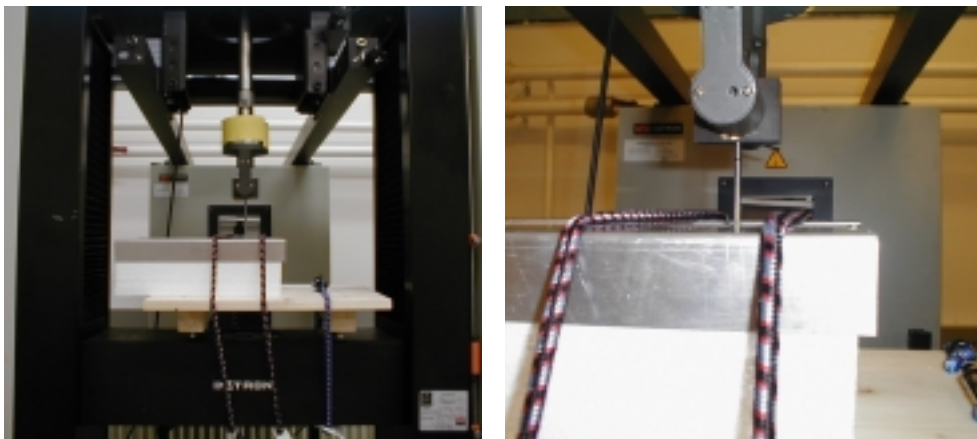


Abb. 4-34: Versuchsaufbau für den Reibschlussversuch, links Überblick über den Aufbau mit Auflagetisch und Befestigung des Hartschaumquaders am Querhaupt, rechts Detailaufnahme des eingespannten Stiftes während des Versuchs.

In Tabelle 4-17, Tabelle 4-18 und Tabelle 4-19 sind die Ergebnisse für die durchgeführten Varianten dargestellt. Die angeführte durchschnittliche Ausziehungskraft F_{av} ergibt sich aus der Fläche A_{ges} , die auf die Einbringlänge von 70 mm bezogen wird. Die gemittelten Verläufe werden in Abb. 4-35, Abb. 4-36 und Abb. 4-37 gezeigt.

Tabelle 4-17: Ergebnisse für kurzzeitigen Reibschluss mit Drahtstift blank 42 x 140.

Type	Stift	n_{gew} []	ρ [kg/m ³]	F_{\max} [N]	F_{av} [N]
EPS-F	ST4.2	5/5	16.0	18.8 ± 2.6	6.5 ± 1.0
EPS-W20	ST4.2	4/5	20.0	20.3 ± 2.7	7.2 ± 0.7
EPS-W25	ST4.2	2/4	26.7	27.1 ± 0.5	8.7 ± 0.7
EPS-W30	ST4.2	4/5	30.1	40.1 ± 9.6	12.6 ± 3.2
XPS-R035	ST4.2	4/4	32.3	38.1 ± 0.9	14.5 ± 1.0

Tabelle 4-18: Ergebnisse für kurzzeitigen Reibschluss mit Drahtstift blank 50 x 150.

Type	Stift	n_{gew} []	ρ [kg /m ³]	F_{max} [N]	F_{av} [N]
EPS-F	ST5	4/4	16.5	18.6 ± 2.2	6.2 ± 0.6
EPS-W20	ST5	4/4	19.8	26.3 ± 2.5	8.5 ± 1.1
EPS-W25	ST5	4/4	27.9	34.7 ± 2.2	11.0 ± 1.2
EPS-W30	ST5	4/4	30.5	39.6 ± 7.5	12.2 ± 1.9
XPS-R035	ST5	4/4	32.5	40.0 ± 5.1	16.6 ± 2.3

Tabelle 4-19: Ergebnisse für kurzzeitigen Reibschluss mit Kunststoffstift 49 x 145.

Type	Stift	n_{gew} []	ρ [kg /m ³]	F_{max} [N]	F_{av} [N]
EPS-F	KT4.9	3/5	16.1	16.5 ± 0.5	5.9 ± 0.3
EPS-W20	KT4.9	4/4	19.8	19.9 ± 4.0	6.3 ± 1.6
EPS-W25	KT4.9	3/4	26.0	26.7 ± 3.0	9.7 ± 0.8
EPS-W30	KT4.9	5/5	33.0	31.8 ± 4.2	9.9 ± 1.8
XPS-R035	KT4.9	4/4	32.5	25.5 ± 2.9	8.6 ± 0.8

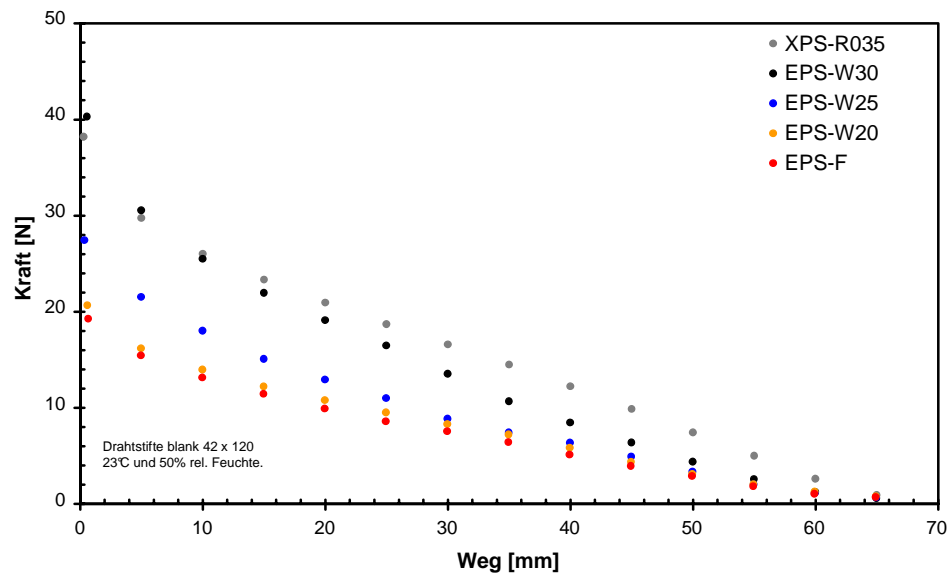


Abb. 4-35: Gemittelte Kurvenverläufe für den kurzzeitigen Reibschlussversuch mit Drahtstift blank 42 x 120.

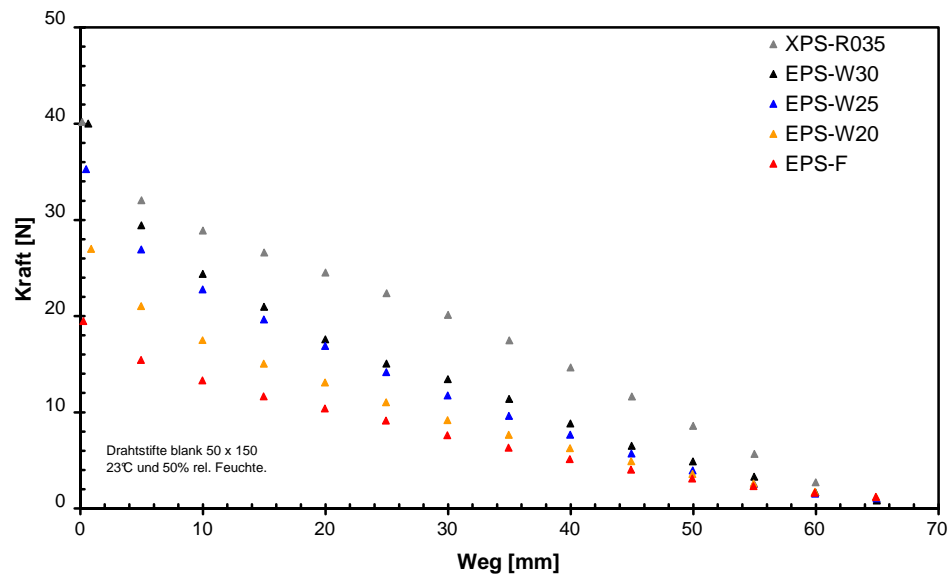


Abb. 4-36: Gemittelte Kurvenverläufe für den kurzzeitigen Reibschlussversuch mit Drahtstift blank 50 x 150.

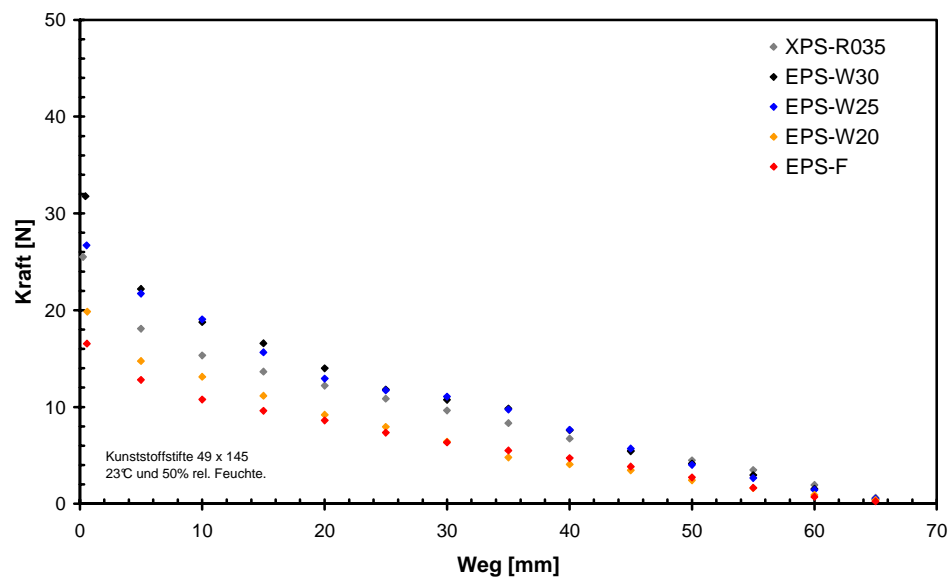


Abb. 4-37: Gemittelte Kurvenverläufe für den kurzzeitigen Reibschlussversuch mit Kunststoffstift 50 x 145.

Vergleicht man für die Drahtstifte die maximale und durchschnittliche Ausziehungskraft über der Dichte der Hartschäume, so kann ein klarer Zusammenhang erkannt werden, siehe Abb. 4-38. Mit zunehmender Dichte erhöhen sich die Ausziehungskräfte, dabei spielt die unterschiedliche Zellstruktur von EPS-F, den restlichen EPS-Typen und XPS anscheinend keine Rolle. Der unterschiedliche Durchmesser der beiden Drahtstifte zeigt kaum Auswirkungen auf die ermittelten Kennwerte. Der Unterschied zwischen den beiden Durchmessern dürfte zu gering sein. Im Vergleich zu den beiden Drahtstiften ergeben sich

für den Kunststoffstift niedrigere Ausziehkräfte, siehe Abb. 4-39. Wieder zeigt sich ein Zusammenhang zwischen Dichte und den ermittelten Kennwerten.

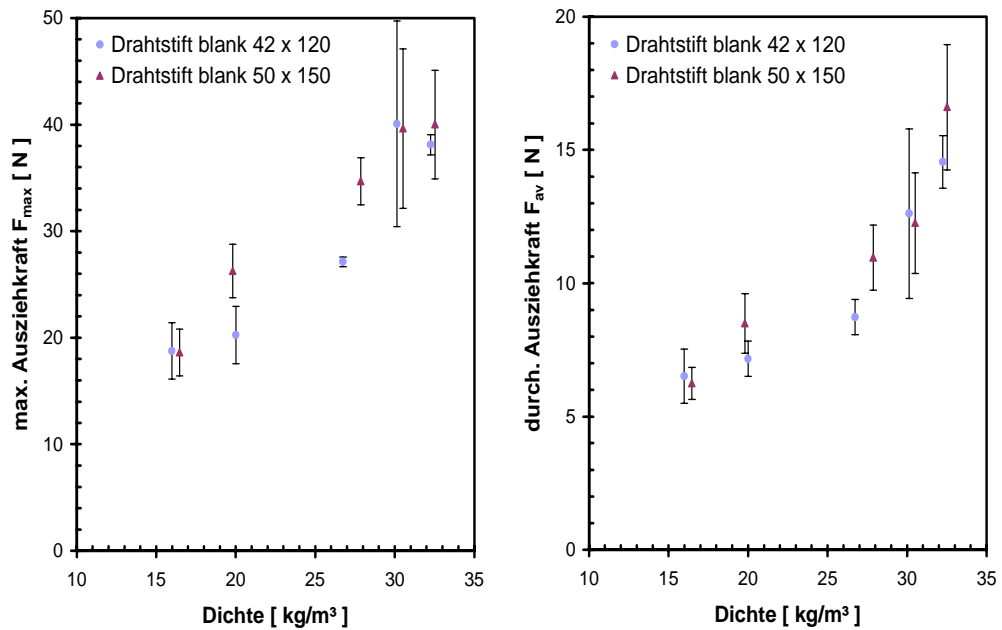


Abb. 4-38: Vergleich der Ausziehkraft des Reibschlussversuches für Drahtstifte mit Dichte der geprüften Hartschäume: Links die maximale und rechts die durchschnittliche Ausziehkraft.

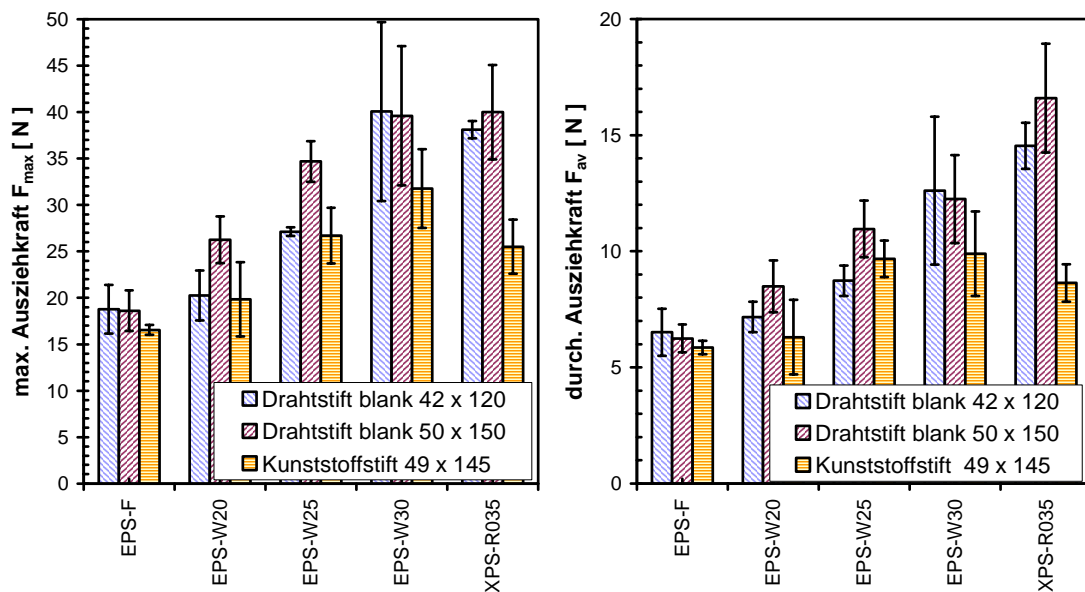


Abb. 4-39: Vergleiche in der maximalen und durchschnittlichen Ausziehkraft für die durchgeführten Varianten des kurzzeitigen Reibschlusses.

4.2.3 Langzeitiger Reibschluss

Der Versuchsaufbau und die Durchführung entspricht dem kurzzeitigen Reibschlussversuch. Der Unterschied liegt darin, dass nach der Einbringung der insgesamt vier gleichen Stifte pro Probekörper

nicht sofort, sondern nach einer bestimmten Zeit ausgezogen wird. Für EPS-F werden die unterschiedlichen Stifte nach 5 h, 170 h und 500 h (siehe Tabelle 3-3) ausgezogen, für EPS-W30 nur die Stahlstifte nach 5 h, wobei für jede Stiftart ein eigener Hartschaumquader verwendet wird. Es werden wieder Kraft/Weg-Verläufe aufgezeichnet.

In Tabelle 4-20, Tabelle 4-21 und Tabelle 4-22 sind die Ergebnisse für EPS-F dargestellt. Die durchschnittliche und maximale Ausziehungskraft wird in Abb. 4-40 gezeigt. Wie sich für alle drei Stifte zeigt, ergibt sich schon nach 5 h ein Abfall in den Ausziehungskräften F_{\max} und F_{av} von etwa 50 %. Nach 170 h und 500 h treten keine Änderungen in den Ausziehungskräften auf. Die Unterschiede der Kennwerte liegen im Bereich der Streuung. Auch bei EPS-W30 zeigt sich dasselbe Bild, die Kraftwerte nehmen auch hier nach 5 h um etwa 50 % ab, siehe Tabelle 4-23.

Tabelle 4-20: Ergebnisse für langzeitigen Reibschluss mit Drahtstift blank 42 x 120 in EPS-F.

Stift	t [h]	n_{gew} []	ρ [kg/m ³]	F_{\max} [N]	F_{av} [N]
ST4.2	0	5/5	17.0	18.8 ± 2.6	6.5 ± 1.0
ST4.2	5.0	4/4	17.0	7.5 ± 1.9	2.7 ± 0.5
ST4.2	170	4/4	16.6	7.5 ± 0.6	2.2 ± 0.3
ST4.2	500	4/4	16.1	8.4 ± 2.2	2.6 ± 0.6

Tabelle 4-21: Ergebnisse für langzeitigen Reibschluss mit Drahtstift blank 50 x 150 in EPS-F.

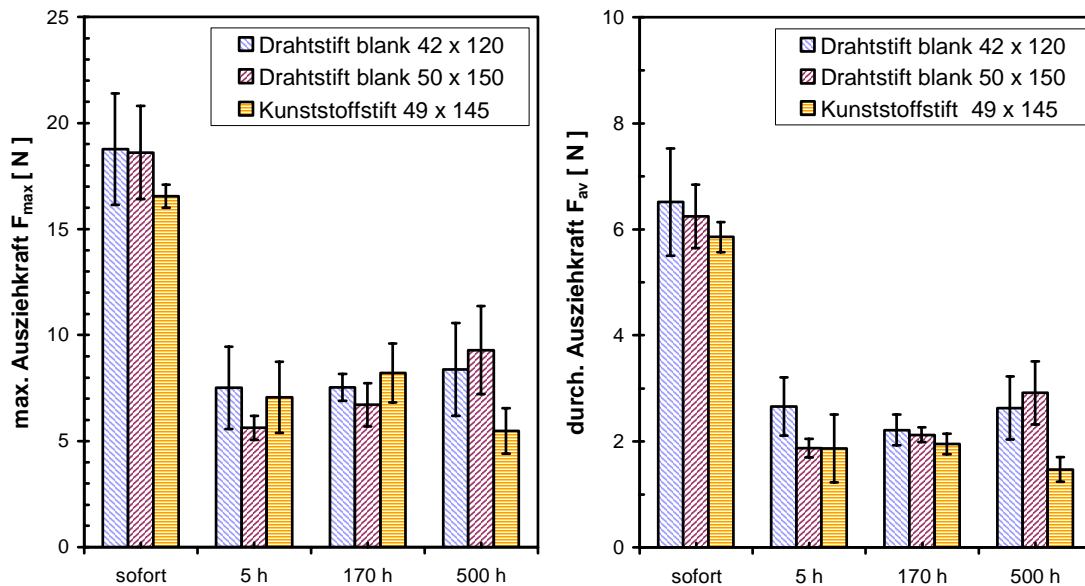
Stift	t [h]	n_{gew} []	ρ [kg/m ³]	F_{\max} [N]	F_{av} [N]
ST5	0	4/4	16.5	18.6 ± 2.2	6.2 ± 0.6
ST5	4.3	4/4	16.0	5.6 ± 0.6	1.9 ± 0.2
ST5	170	4/4	16.7	6.7 ± 1.0	2.1 ± 0.1
ST5	500	3/4	16.2	9.3 ± 2.1	2.9 ± 0.6

Tabelle 4-22: Ergebnisse für langzeitigen Reibschluss mit Kunststoffstift 49 x 145 in EPS-F.

Stift	t [h]	n_{gew} []	ρ [kg/m ³]	F_{\max} [N]	F_{av} [N]
KT4.9	0	3/5	16.1	16.5 ± 0.5	5.9 ± 0.3
KT4.9	5.0	2/3	16.4	7.1 ± 1.7	1.9 ± 0.6
KT4.9	170	4/4	16.3	8.2 ± 1.4	1.9 ± 0.2
KT4.9	500	4/4	16.5	5.5 ± 1.1	1.5 ± 0.2

Tabelle 4-23: Ergebnisse für langzeitigen Reibschluss mit Drahtstift blank in EPS-W30.

Stift	t [h]	n _{gew} []	ρ [kg /m ³]	F _{max} [N]	F _{av} [N]
ST4.2	0	4/4	30.1	40.1 ± 9.6	12.6 ± 3.2
ST4.2	5.0	4/4	30.5	39.6 ± 7.5	12.2 ± 1.9
ST5	0	4/4	33.0	18.9 ± 4.7	6.2 ± 0.6
ST5	5.1	3/4	30.4	19.0 ± 3.5	7.2 ± 1.7

**Abb. 4-40:** Vergleiche in der maximalen und durchschnittlichen Ausziehungskraft für die durchgeführten Varianten des langzeitigen Reibschlusses in EPS-F.

4.2.4 Weiterführende Überlegungen

Aus den vielen durchgeführten Versuchen können Zusammenhänge aufgrund der unterschiedlichen Stifte erkannt werden. Des weiteren zeigt sich bereits nach einem Verbleib des Stiftes im Hartschaum von 5 h ein deutlicher Abfall für die maximalen und durchschnittlichen Ausziehungskräfte. Die Tatsache, dass die Ausziehungskräfte von EPS und XPS gleicher Dichte sich kaum unterscheiden, ist auf den ersten Blick nicht verständlich. Zu denken gibt das vor allem, weil XPS deutlich höhere Druckfestigkeiten aufweist als EPS. Daher werden die wirkenden Spannungen und Kräfte genauer betrachtet.

Bei der Einbringung des Stiftes entsteht eine Verdrängung des Hartschaums. Auf die gesamte Mantelfläche des Stiftes wirkt eine durch diese Verformung hervorgerufene Druckspannung. Diese ist aber mit einfachen Methoden nicht bestimmbar. Daher wird in erster Abschätzung die Verformung rund um den Stift zwischen 5 % und 20 % angenommen. Die Druckspannungs/Verformungsverläufe, z.B. für EPS in Abb. 4-41, zeigen, dass zwischen 5 % und 20 % Stauchung kaum Veränderungen auftreten. In diesem Bereich liegen die Unterschiede in der Größenordnung der Streuung von einzelnen Kurven-

punkten. Daher werden für die Druckspannung die Kennwerte aus der Literatur (siehe Tabelle 7-3) bei 10 % Stauchung für weitere Berechnungen herangezogen.

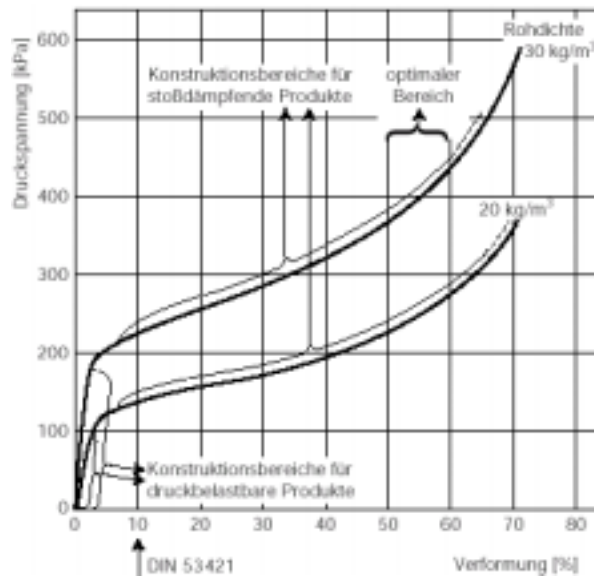


Abb. 4-41: Druckspannungs/Verformungsverhalten von EPS [2.27].

Wird die Druckspannung über dieser Mantelfläche A_M aufsummiert, erhält man eine resultierende Normalkraft N . Multipliziert man diese Normalkraft mit einem Reibbeiwert μ , so erhält man die rechnerische Ausziehkraft F_{maxR} schließlich aus

$$F_{maxR} = \sigma_{D10\%} \cdot A_M \cdot \mu. \tag{4.7}$$

Um F_{max} mit F_{maxR} vergleichen zu können, werden die Reibbeiwerte für die einzelnen Materialkombinationen ermittelt. Die Probenschnittflächen, die mit der Kreissäge und nicht dem Heißdraht hergestellt werden, zeigen Oberflächen, die dem Versuch näher kommen. Mit Hilfe des Neigungswinkels wird schließlich dann der Reibbeiwert bestimmt. Die Versuchsergebnisse sind in Tabelle 4-24 dargestellt.

Tabelle 4-24: Reibbeiwerte für die einzelnen Materialkombinationen des Reibschlusses.

Type	Stift	α_{Neigung} [°]	μ []
EPS-W30	ST5	13	0.231
EPS-W30	KT4.9	9	0.158
XPS-R035	ST5	7	0.123
XPS-R035	KT4.9	5	0.087

Mit Hilfe der Druckspannung bei 10 % Stauchung $\sigma_{D10\%}$ aus Tabelle 7-3 im Anhang werden die Kennwerte für F_{maxR} bestimmt. Überblicksweise ist in Abb. 4-42 ein Vergleich zwischen F_{max} und F_{maxR} dargestellt. Für die beiden Kennwerte liegen die Unterschiede im Bereich der Streuung. Nicht nur die

gemessenen Kennwerte von F_{max} weisen Streuungen von 10 % bis 20 % auf, sondern auch die Kennwerte für die Druckspannung, wie aus Tabelle 7-3 hervorgeht.

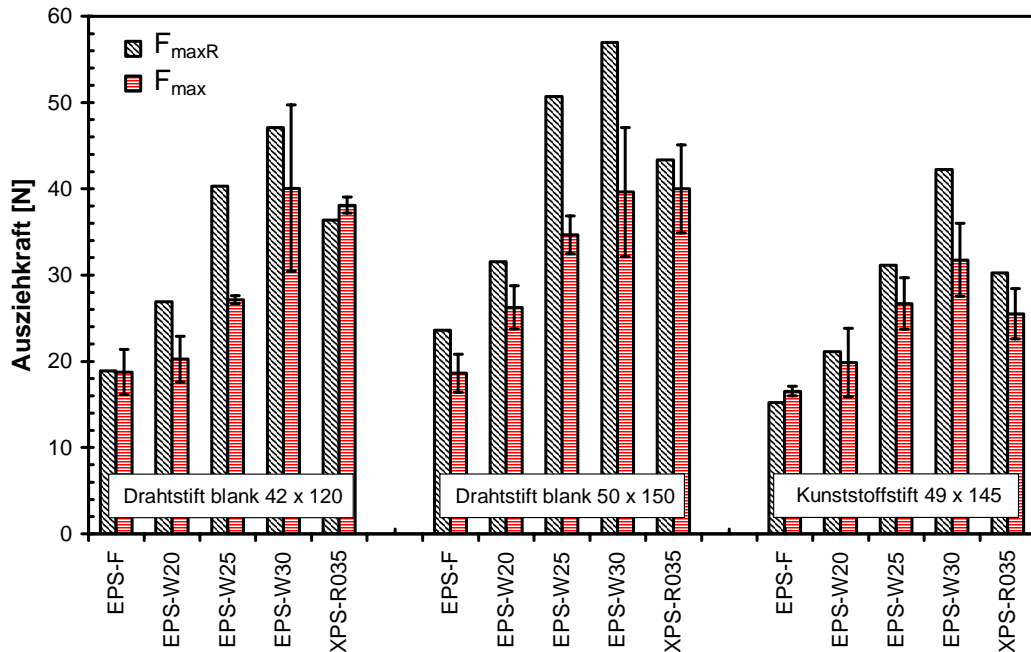


Abb. 4-42: Vergleich zwischen F_{max} und F_{maxR}

Wie aus den Rechenergebnissen und den zuvor angestellten Überlegungen hervorgeht, stehen die Ergebnisse der Ausziehkraft für EPS und XPS nicht im Widerspruch. XPS weist zwar eine deutlich höhere Druckspannung bei 10% Stauchung auf, jedoch auch einen kleineren Reibbeiwert als EPS. Die homogenere Zellstruktur dürfte für beide Eigenschaften verantwortlich sein. Für die Auslegung von Reibschlussbefestigungen stellt F_{maxR} ein gutes Mittel für die Vorhersage der Kräfte dar.

Um die erhaltenen Erkenntnisse zu verifizieren werden noch Versuche mit unterschiedlichen Ausziehhöhen für EPS-F in Kombination mit den Drahtstift blank 50 x 150 durchgeführt. Dabei wird der Stift nach 5 h ausgezogen. Für die Berechnung der Ausziehkraft F_{maxR} wird eine Abnahme der Druckspannung von 50 % angenommen. Tabelle 4-25 beinhaltet die Messergebnisse und den berechneten Kraftwert. In Abb. 4-43 sind die Messwerte mit den berechneten Kennwerten gegenübergestellt.

Tabelle 4-25: Ergebnisse für langzeitigen Reibschluss mit Drahtstift blank 50 x 150 in EPS-F.

Stift	t [h]	n_{gew} []	ρ [kg/m ³]	h [mm]	F_R [N]	F_{max} [N]	F_{av} [N]
ST5	5.0	5/5	17.0	40	6.9	7.5 ± 0.4	2.3 ± 0.7
ST5	5.0	4/4	17.0	55	9.5	11.3 ± 1.5	3.5 ± 0.7
ST5	5.0	4/4	16.6	70	11.2		
ST5	5.0	4/4	16.1	80	12.3	13.7 ± 2.0	4.5 ± 0.3

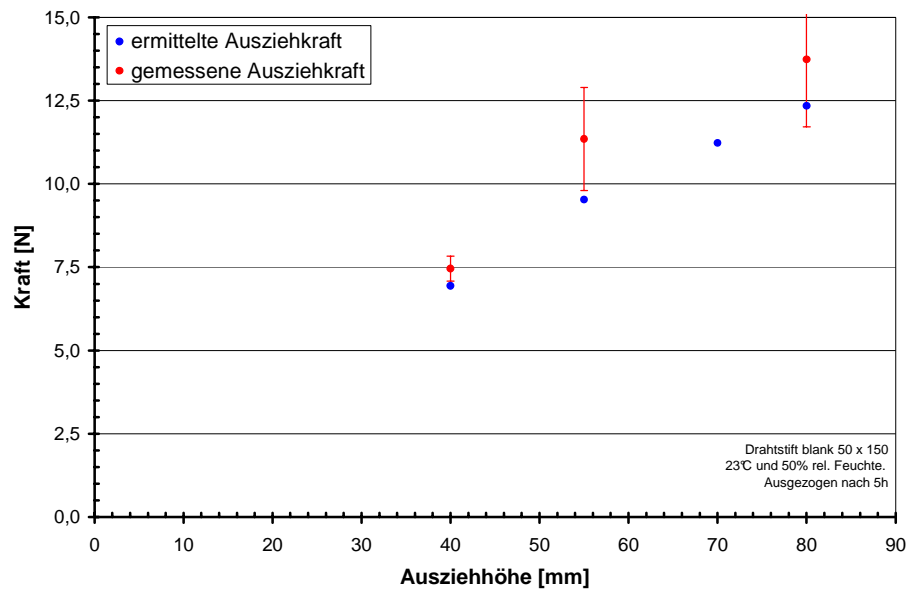


Abb. 4-43: Vergleich zwischen berechneter und gemessener Ausziehkraft für EPS-W30 in Kombination mit Drahtstift blank 50 x 150.

Wie Abb. 4-43 aus hervorgeht, lassen sich mit den gefunden Mitteln die Befestigungskraft recht gut vorhersagen. Für den Reibschluss liegt die Problematik hauptsächlich geeignete Sicherheitsbeiwerte zu definieren, um einerseits die Streuung der Messwerte und andererseits den zeitbedingten Abfall der Ausziehkraft zu berücksichtigen. Dabei dürfte das Relaxierverhalten des Dämmstoffes den wichtigsten Part bei der Festlegung der Sicherheitsfaktoren spielen.

4.3 Mechanisches Verhalten von typischen Befestigungssystemen

Nach der detaillierten Untersuchung des Form- und Reibschlusses, werden unterschiedlichste bestehende bzw. in der Entwicklung stehenden Befestigungssysteme geprüft. Diese lassen sich in Form- und Reibschluss nahestehende Verbindungen unterteilen. Die neugewonnen Erkenntnisse sollen schließlich mit den zuvor ermittelten Grundlagen für Form- und Reibschluss verglichen werden. Abschließend wird in diesem Unterkapitel anhand einer Befestigung ein Vergleich zwischen Simulation und Realität durchgeführt.

4.3.1 Versuchsaufbau

Insgesamt werden 6 formschluss- und 2 reibschlussnahestehende Verbindungen geprüft. Der Versuchsaufbau ähnelt dem des Formschlusses, siehe Kapitel 4.1, und wird je nach Befestigung gering modifiziert. Die Veränderungen betreffen nur die Fixierung der Befestigungseinheit an der Ausziehvorrichtung. Die Prüfgeschwindigkeit beträgt ebenfalls 10 mm/min und die Versuchsdurchführung erfolgt bei Normklima.

Die verwendeten Befestigungen sind in den Abb. 4-44 bis Abb. 4-48 dargestellt. Insgesamt werden fünf Schrauben als Befestigung geprüft, die ersten drei (siehe Abb. 4-44) sind im Handel erhältlich und werden in EPS-F eingebracht. Die vierte Schraube (siehe Abb. 4-45 links) ist ein Entwicklungsprototyp und wird in EPS-W30 montiert.

Die fünfte schraubenähnliche Befestigungsvorrichtung ist Abb. 4-46 (a) dargestellt. Dieser sogenannte Stellfuchs stand zum Prüfzeitpunkt kurz vor der Markteinführung und wird in EPS-F und EPS-W25 auf zwei unterschiedliche Arten (siehe Abb. 4-46 (b)) geprüft. Für die Einbringung der Befestigung in den Dämmstoff wird im Zentrum des Prüfkörpers eine Bohrung hergestellt. Die Bohrung dient einerseits als Führung für eine senkrechte Montage und andererseits als Erleichterung bei der Montage.

Für die Prüfung des Tellerdübels (siehe Abb. 4-45 rechts) wird im Zentrum des Quaders eine passende Öffnung gebohrt, und dann von der anderen Seite an die Einspannvorrichtung fixiert. Die Prüfung erfolgt mit dem Dämmstoff EPS-F.

Zwei Befestigungen (siehe Abb. 4-47 und Abb. 4-48), die dem Reibschluss zuzuordnen sind, werden in verschiedenen Dämmstoffen durch einfaches Eindrücken im Zentrum eingebracht. Ihre Fixierung in der Einspannung erfolgte unterschiedlich und geht aus den dazugehörigen Abbildungen hervor.

Bis auf einige wenige Ausnahmen werden für alle Prüfanordnungen mindestens 3 Versuche durchgeführt. Aus den aufgezeichneten Kraft/Weg-Verläufen für jeden Versuch werden die maximal auftretende Ausziehkräfte und die Flächen bis zum Maximum zwischen Verlauf und Weg-Achse ermittelt. Des Weiteren werden wieder gemittelte Verläufe für die Befestigungen bestimmt.

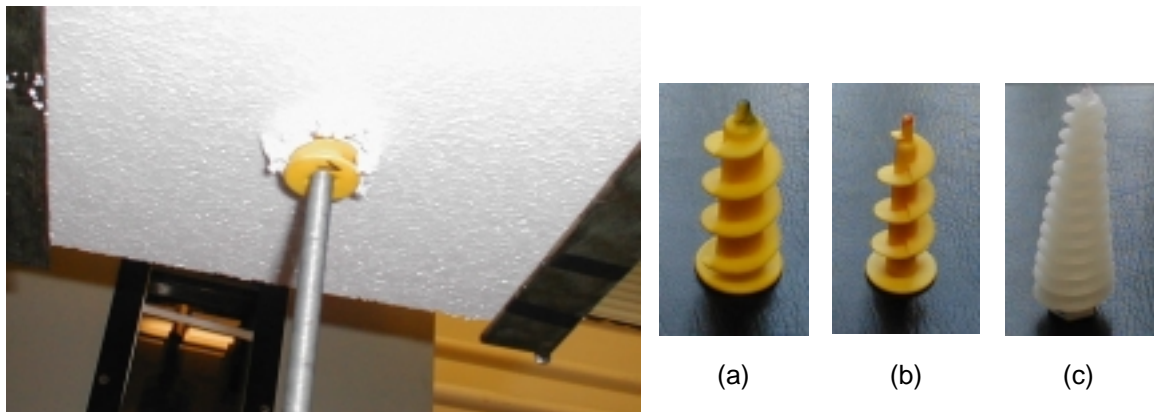


Abb. 4-44: Linkes Photo zeigt den Ausziehversuch für handelsübliche Hartschaumschrauben. Rechts sind die Schrauben 1(a), 2(b) und 3(c) abgebildet. Diese wurden in EPS-F eingebracht und dann geprüft.



Abb. 4-45: Zeigt zwei weitere Befestigungseinheiten, links Schraube 4, rechts einen Tellerdübel vor der Prüfung.

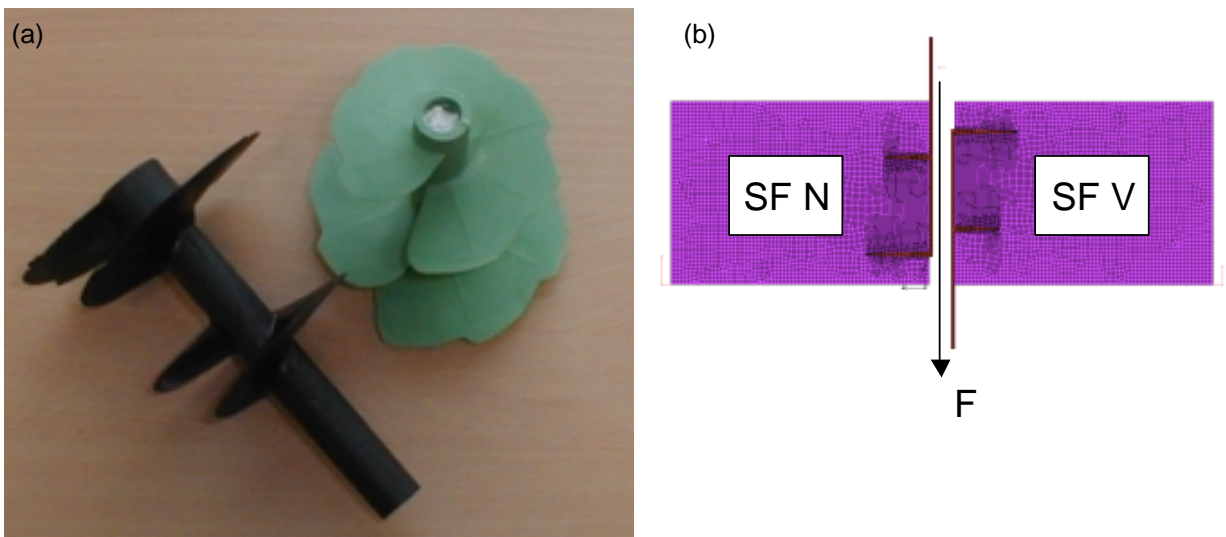


Abb. 4-46: Zeigt (a) Stellfuchs aus verschiedenen Ansichten und (b) die zwei verwendeten Einbauvarianten.

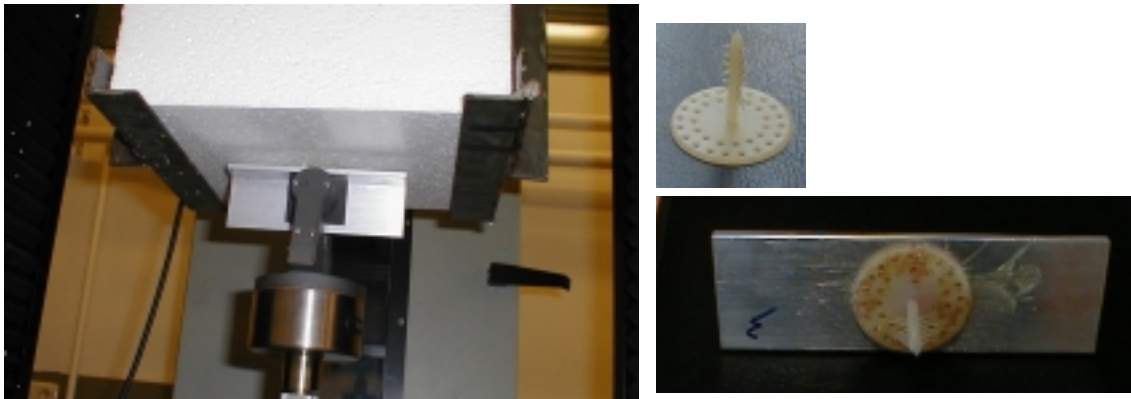


Abb. 4-47: Links schematischer Aufbau für eine Befestigungseinheit mit Widerhaken, rechts ist die Befestigung im uneingebauten Zustand zu sehen, sie wird auf einen Winkel aufgeklebt, um sie ausziehen zu können.



Abb. 4-48: Zeigt einen Nagelteller, der einen mehrfachen Reibschluss darstellt. Links ist der schematische Aufbau, rechts eine Detailaufnahme kurz vor Ende des Versuches erkennbar.

4.3.2 Formschlusskontrollierte Befestigungen

Sechs dem Formschluss nahestehende Befestigungseinheiten werden geprüft und ausgewertet. Bei den geprüften Schrauben werden genauso wie beim Formschluss, die Schubfestigkeit und die Spannungsüberhöhung bestimmt. Die Berechnung der Mantelfläche erfolgt mit Hilfe eines durchschnittlichen Außendurchmessers D_a und der Einbautiefe h der Schraube.

Als erstes werden die drei im Handel erhältlichen Schrauben für sich genauer betrachtet. Die ermittelten Kennwerte aus den Kraft/Weg-Kurven sind in Tabelle 4-26 dargestellt. In Abb. 4-49 befinden sich die dazugehörigen gemittelten Verläufe. Wie aus den Kennwerten und der Abbildung hervorgeht, bewirken die kleineren Durchmesser der Schraube 2 im Vergleich zu Schraube 1 niedrigere Ausziehkräften. Diese stehen aber in Relation mit der veränderten Geometrie, wie auch die berechnete Spannungsüberhöhung wiedergibt.

Die höheren Ausziehkräfte der Schraube 3 können durch die größere Wirkhöhe begründet werden. Alle drei Schrauben weisen eine Spannungsüberhöhung von circa 2 auf. Auffallend ist jedoch die unterschiedliche Kurvencharakteristik der Schraube 3 im Vergleich zu den beiden anderen Kurven. Einen ähnlichen Verlauf zeigen einzelne Messkurven der Mehrfachformschlüsse PP2-h20h40h60-t95-N und PP2-h30h40h50-t95-N, siehe 4.1.6. In diesen unterschiedlichen Verläufen spiegelt sich die Schraubensteigung bzw. der Abstand der Platten beim reinem Mehrfachenformschluss wider. Somit leistet eine Schraube mit einer kleineren Steigung nach Erreichen der Maximalkraft weniger Arbeit als eine mit größerer Steigung.

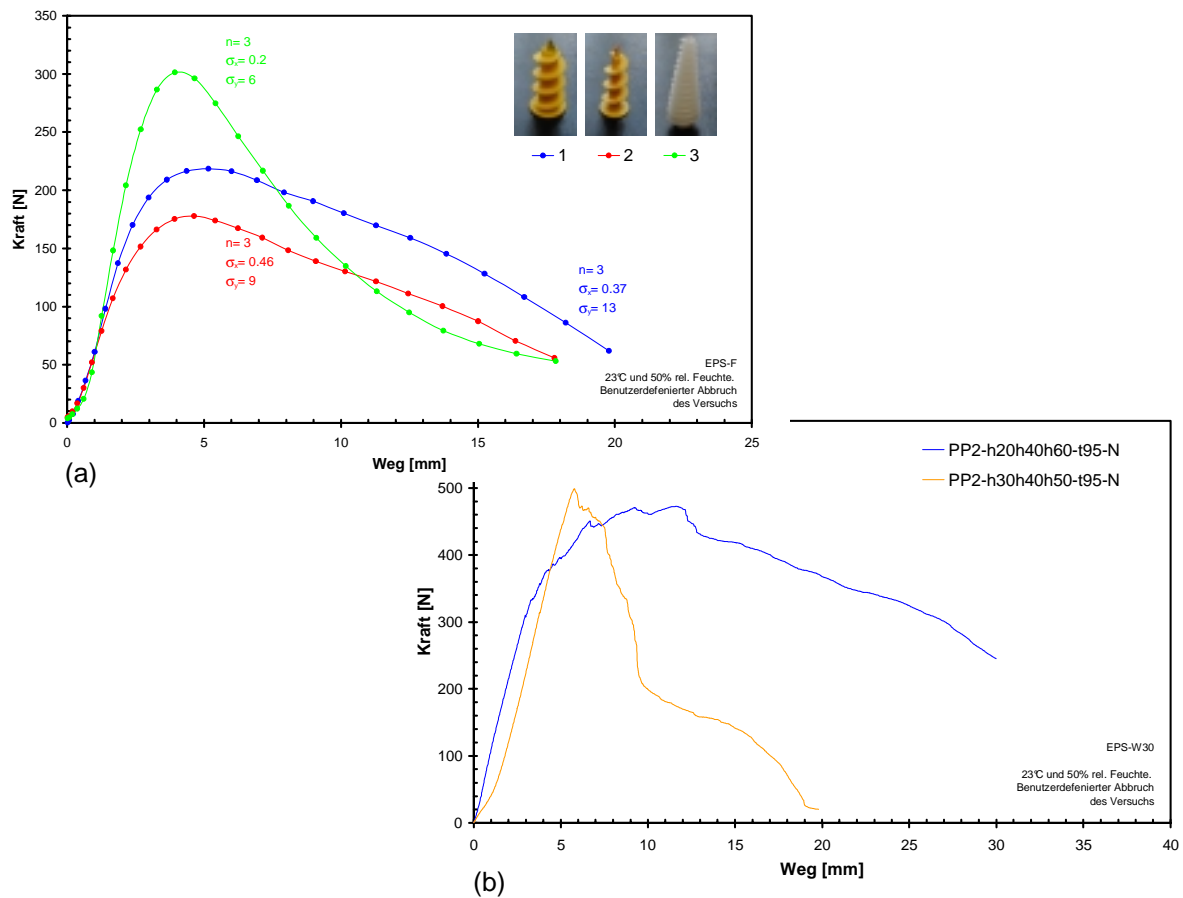


Abb. 4-49: Vergleich zwischen (a) Gemittelte Kraft/Weg-Verläufe von Schraube 1, 2 und 3 geprüft in EPS-F und (b) rechts Einzelmessungen der Mehrfachformschlüsse in EPS-W30.

Für Schraube 4, den Prototypen, wird nur ein Versuch durchgeführt. Aufgrund der nicht reproduzierbaren Einbringung wird auf weitere Versuche verzichtet. Die Ergebnisse befinden sich ebenfalls in Tabelle 4-26; der gemessene Kraft/Weg-Verlauf ist in Abb. 4-50 (a) dargestellt. Die errechnete Spannungsüberhöhung für diese Schraube liegt im Bereich der Werte für den einfachen Formschlussversuch. Hier stimmen die Ergebnisse der idealisierten Geometrie mit der echten Befestigungseinheit besser überein als bei den anderen Schrauben.

Tabelle 4-26: Ergebnisse der echten Befestigungen – formschluss-kontrollierte Teile.

Bezeichnung	Schraube 1	Schraube 2	Schraube 3	Schraube 4	Tellerdübel
Type	ESP-F	EPS-F	ESP-F	EPS-W30	ESP-F
n_{gew} []	3/3	3/3	3/3	1/3	3/3
ρ [kg/m ³]	16.5 ± 0.4	16.0 ± 0.2	16.3 ± 0.2	32.6	16.3 ± 0.3
D_a [mm]	24	22	19	72	63
h [mm]	59	82	59	63	100
$W_{F_{\text{max}}}$ [mm]	20.6 ± 0.7	18.6 ± 0.4	18.5 ± 0.9	53.6	104.1 ± 1.4
F_{max} [N]	223 ± 2	303 ± 8	179 ± 7	1172	438 ± 6
$A_{F_{\text{max}}}$ [Nmm]	731 ± 153	699 ± 34	522 ± 24	4278	14539 ± 365
A_M [mm ²]	4448	5539	3429	14250	19792
τ [kPa]	50.1 ± 0.5	54.7 ± 1.4	52.1 ± 2.0	82.2	
S_F []	2.2 ± 0.1	1.9 ± 0.1	2.1 ± 0.1	3.1	

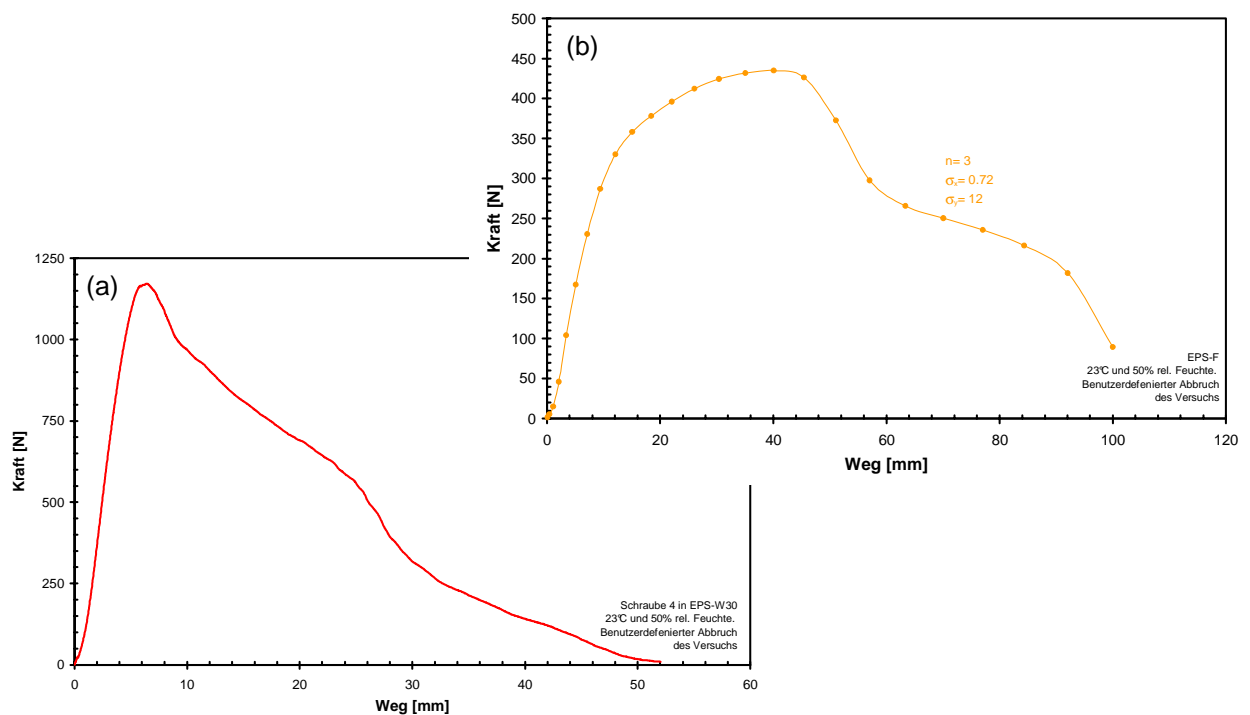


Abb. 4-50: Zeigt (a) Einzelne Kraft/Wegkurve für Schraube 4 in EPS-W30 und (b) gemittelter Kraft/Weg-Verlauf für den Tellerdübel in EPS-F.

Für den Tellerdübel sind die Ergebnisse ebenfalls in Tabelle 4-26 dargestellt. Die gemittelten Kraft/Weg-Verläufe befinden sich in Abb. 4-50 (b). Auf die Berechnung einer Schubfestigkeit wird aufgrund der durchgeführten Versuche verzichtet, da sich bei den geprüften Tellerdübeln zeigt, dass zuerst ein Versagen des Dübels eintritt, siehe Abb. 4-51. Erst dann erfolgt das Ausziehen des Dübels

aufgrund der durch das Versagen veränderten Geometrie des Dübels. Daher sind auch jegliche Vergleiche mit den idealisierten Befestigungen nicht zweckmäßig.



Abb. 4-51: Verformter Tellerdübel nach durchgeführtem Versuch.

Die Ergebnisse mit unterschiedlichen Versuchsvarianten für den Stellfuchs sind in Tabelle 4-27 dargestellt. In Abb. 4-52 werden die dazugehörigen gemittelten Verläufe dargestellt. Für EPS-W25 wurde auch ein Formschlussversuch PP2-h60-t95-W durchgeführt, siehe Abb. 5-11 (b) und Tabelle 4-8. Die ermittelte max. Ausziehkraft für diesen Aufbau beträgt 1025 N. Zu den erhalten max. Ausziehkraften für den Stellfuchs in EPS-W25 ergeben sich Unterschiede im Bereich der Standardabweichung der Messungen. Stellt man die 1025 N mit einer Ausziehhöhe von 60 mm in Relation der geometrischen Randbedingungen des verkehrt geprüften Stellfuchses, so stimmen die Ausziehkraften des Stellfuchses und des Formschlusses überein. Dies spiegelt sich auch in den Spannungsüberhöhungsfaktoren wider. Dieser bewegt sich im Bereich des Formschlusses, also zwischen 2.6 und 3.2 .

Die klar kleineren S_F -Werte der ersten drei Schrauben können aufgrund der deutlich unterschiedlichen Geometrie hervorgerufen werden. Vor allem höhere auf die Geometrie relativ bezogene Vorspannkraft könnten eine Verbesserung bewirken.

Tabelle 4-27: Ergebnisse des Stellfuchses – formschluss-kontrollierte Teile.

Bezeichnung	Stellfuchs	Stellfuchs	Stellfuchs verk.	Stellfuchs verk.
Type	ESP-F	EPS-W25	ESP-F	EPS-W25
n_{gew} []	3/3	3/3	3/3	2/3
ρ [kg/m ³]	16.1 ± 0.5	26.0 ± 0.3	16.1 ± 0.4	24.9 ± 0.1
D_a [mm]	68	68	68	68
h [mm]	65	65	93	93
$w_{F_{\text{max}}}$ [mm]	7.6 ± 0.4	9.1 ± 2.3	15.1 ± 3.5	18.5 ± 2.2
F_{max} [N]	517 ± 18	858 ± 90	794 ± 17	1397 ± 198
$A_{F_{\text{max}}}$ [Nmm]	2283 ± 154	4482 ± 1680	6263 ± 1998	14849 ± 3439
A_M [mm ²]	13886	13886	19867	19867
τ [kPa]	37.2 ± 1.3	61.8 ± 6.5	40.0 ± 0.8	70.3 ± 10.0
S_F []	2.8 ± 0.2	3.1 ± 0.3	2.6 ± 0.1	2.6 ± 0.4

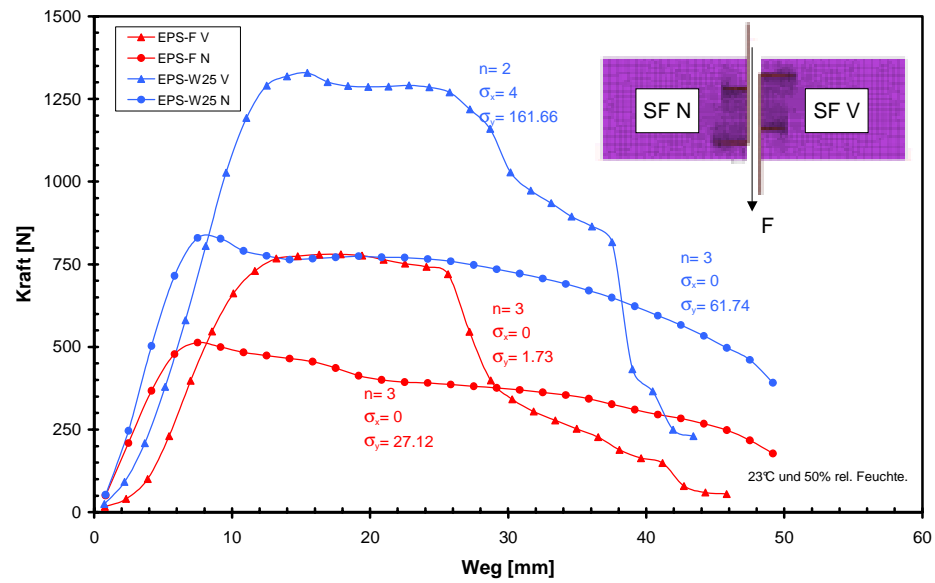


Abb. 4-52: Gemittelte Kraft/Weg-Verläufe der verschiedenen Stellfuchskombinationen

Für beide Versuchsvarianten des Stellfuchses in EPS-W25 wird das Verhalten der beteiligten Komponenten mit Hilfe der Methode der finiten Elemente untersucht. In Abb. 4-53 wird die Idealisierung nochmals dargestellt. Wie daraus hervorgeht, wird ein axisymmetrisches Modell zur Beschreibung des Versuchs verwendet. Es wird dabei versucht das Schraubengewinde durch einen repräsentativen Schnitt zu beschreiben. Die Materialmodellierung des Dämmstoffes erfolgt elastisch-plastisch, um Druckbereiche besser beschreiben zu können.

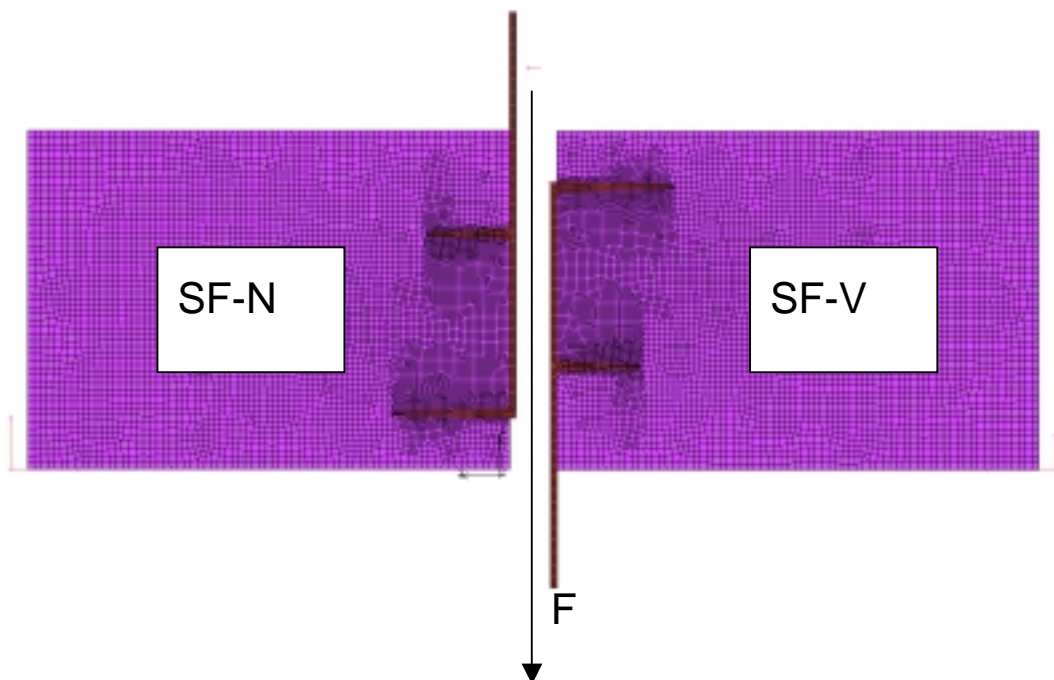


Abb. 4-53: Idealisierung der zwei Stellfuchsvarianten

In Abb. 4-55 (a) ist die maximal auftretende Hauptnormalspannung für Stellfuchs bei 740 N dargestellt. Dabei zeigt beim unteren Gewinde schon deutliches Versagen des Dämmstoffes, wohingegen im Bereich des oberen kleinere Gewindegangs erst der Beginn des Bruchs durch die maximal auftre-

tenden Hauptnormalspannungen sichtbar wird. Ein ähnliches Bild ergibt sich für den verkehrt geprüften Stellfuchs, siehe Abb. 4-55 (b). Hier treten bei einer Kraft von 1370 N kritische Hauptnormalspannungen auf. Als kritisch werden Zugspannungen größer als 180 kPa erachtet, siehe Tabelle 7-2.

Ein Vergleich zwischen einzelner Messkurven der Versuchsserie für den Stellfuchs und der erhaltenen Kraft/Weg-Kurve aus der Simulation ist in Abb. 4-54 dargestellt. Die aus der Simulation erhaltene Verlauf zeigt ab 200 N ein parallel verschobenes ähnliches Verhalten bis zum Ende der max. Ausziehkraft. Am Beginn der gemessenen Kraft/Weg-Kurven beginnt ein allmähliches Verfestigen, das mit Hilfe der Berechnung nicht berücksichtigt werden kann. Dabei dürfte es sich um ein Verformen aufgrund zerstörter Teilbereiche durch das Einschrauben der Befestigung handeln.

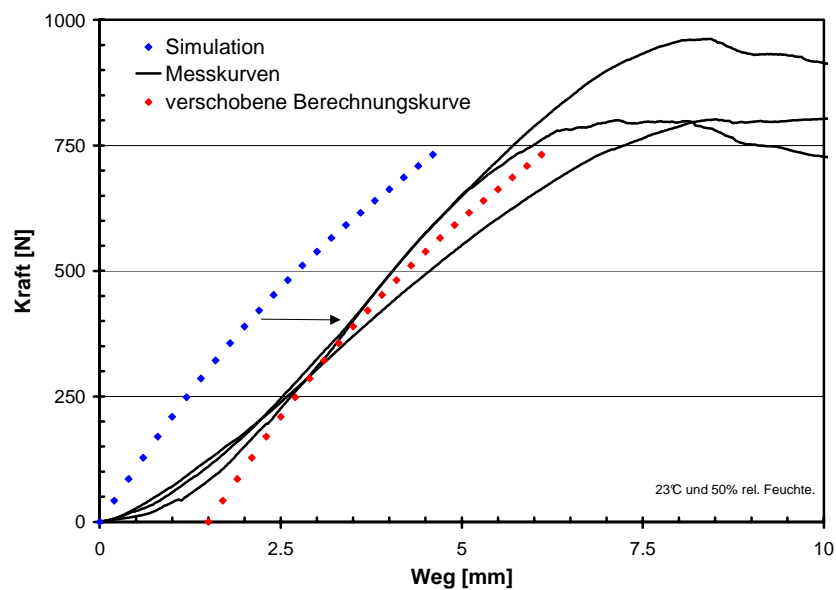


Abb. 4-54: Vergleich zwischen Kraft/Weg-Kurven aus der Berechnung und einzelner Messkurven für den Stellfuchs.

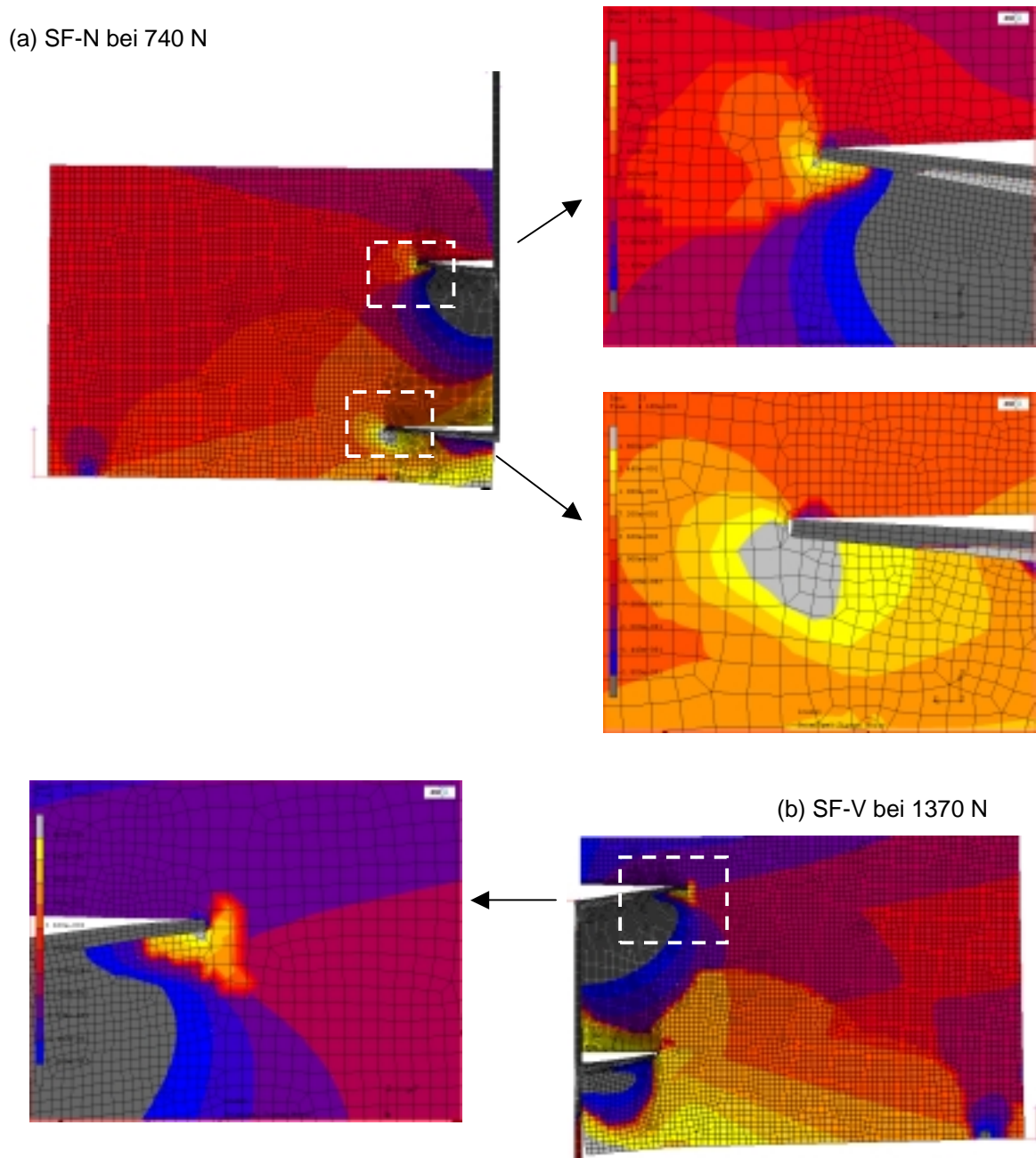


Abb. 4-55: Maximale Hauptnormalspannung für (a) Stellfuchs Variante SF-N bei 740 N und (a) Stellfuchs Variante SF-V bei 1370 N.

4.3.3 Reibschlusskontrollierte Befestigungen

Die Ergebnisse für den idealisierten Reibschluss zeigen klare Zusammenhänge und die Vorhersage mit Hilfe der Berechnung von $F_{\max R}$ stellt eine adäquate Methode dar. Um so mehr sind die Ergebnisse für die beiden dem Reibschluss nahestehenden Befestigungseinheiten von Interesse. Der Nagelteller der sich aus mehreren Stiften zusammensetzt, lässt sich klar dem Reibschluss zuordnen. Bei den Widerhaken hingegen, verschwimmt die Grenze zwischen Reibschluss und Formschluss. Der maßge-

bende Anteil der Verbindungsfestigkeit in diesen Untersuchungen dürfte jedoch aufgrund des Reibschlusses hervorgerufen werden.

Die ermittelten Kennwerte sind in Tabelle 4-28 dargestellt. In Abb. 4-56 befinden sich die gemittelten Verläufe für die beiden reibschlusskontrollierten Befestigungseinheiten. Dabei zeigt sich, ein viel größerer $w_{F_{max}}$ Wert als beim idealisierten Reibschluss. Vor allem bei der Widerhakenbefestigung kann dadurch deren Wirkung erkannt werden. Vergleicht man die berechneten F_{maxR} Werte mit den gemessenen F_{max} Werten, so ergibt sich für den Nagelteller der gewohnte relative Unterschied. Bei der Widerhakenbefestigung hingegen zeigt sich ein 2 bis 3mal niedriger rechnerischer Wert für die maximale Ausziehungskraft ohne Widerhaken als sich beim Versuch ergeben. Hier werden positive Auswirkungen die zusätzlichen Widerhaken am Stift widergespiegelt. Wie schon erwähnt, wären Ergebnisse für Stifte mit höheren Reibbeiwerten von Interesse, um auch Vergleiche anzustellen, welches Potential an Vergrößerung in der Ausziehungskraft dadurch erreicht werden könnte. Dies sollte für weitere Studien berücksichtigt werden.

In Abb. 4-57 wird noch auf die Verwendung der Widerhaken mit unterschiedlichen Dämmmaterialien eingegangen. Die Gegenüberstellung verdeutlicht nochmals das klar bessere Abschneiden von EPS-W25. Dabei dürfte die Kombination zwischen Dämmmaterialstruktur und Einbettungsdruck für den Widerhaken als Befestigung ideal sein.

Tabelle 4-28: Ergebnisse der echten Befestigungen – reibschlusskontrollierte Teile

Bezeichnung	Nagelteller	Befest. m. Widerhaken			
		ESP-F	EPS-W25	XPS-R035	Steinwolle
Type	ESP-F	ESP-F	EPS-W25	XPS-R035	Steinwolle
n_{gew} []	3/3	3/3	3/3	3/3	2/3
ρ [kg/m ³]	16.3 ± 0.4	16.2 ± 0.1	25.2 ± 1.6	32.0 ± 0.2	17.0 ± 0.0
D_a [mm]	3.2	4.4	4.4	4.4	4.4
h [mm]	20	40	40	40	40
$w_{F_{max}}$ [mm]	1.6 ± 0.6	8.1 ± 3.1	8.1 ± 0.9	10.5 ± 1.2	11.0 ± 0.7
F_{max} [N]	45 ± 3	24 ± 2	36 ± 3	34 ± 1	26 ± 0
A_M [mm ²]	3016	553	553	553	553
μ []	0.23	0.16	0.16		
F_{maxR} [N]	63.9	7.9	15.3		

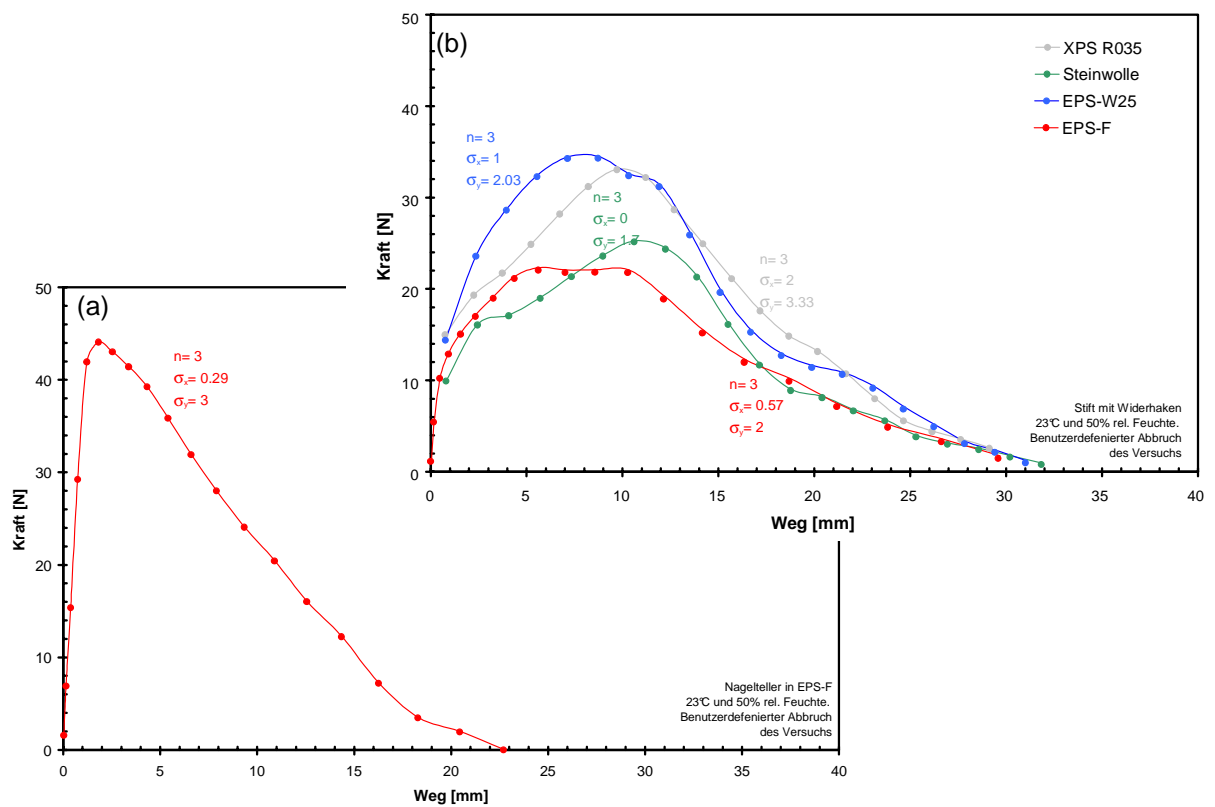


Abb. 4-56: Gemittelte Kraft/Weg-Verläufe für die Befestigungseinheit mit (a) den Nagelteller geprüft in EPS-F und (b) den Widerhaken geprüft in verschiedenen Dämmstoffen.

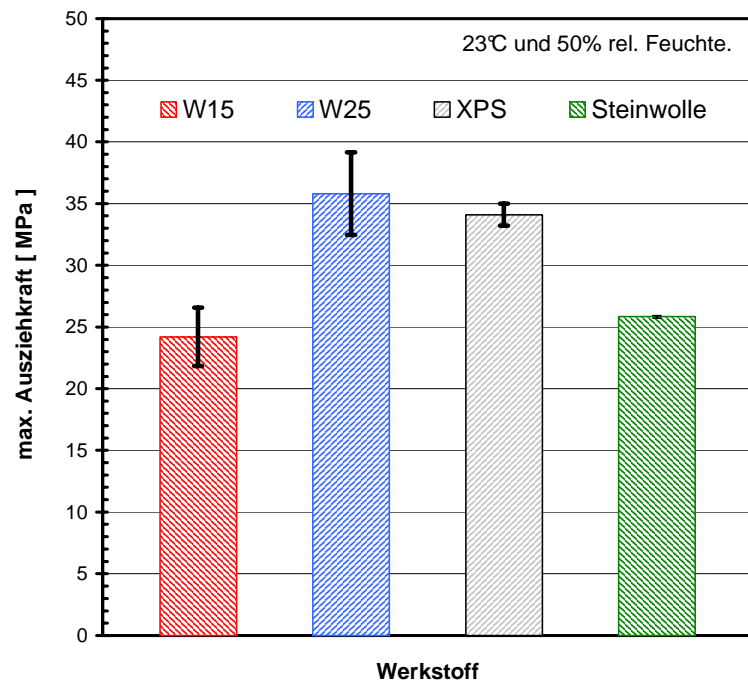


Abb. 4-57: Vergleich der max. Ausziehungskraft für den Widerhaken in Abhängigkeit des verwendeten Dämmstoffes.

5 ALLGEMEINE ANFORDERUNGEN AN BEFESTIGUNGEN

Das Anforderungsprofil sollte als verbindliche Grundlage für alle an einer Entwicklung beteiligten Personen und Arbeitsgruppen gelten. Ziel ist die vollständige Klärung und Fixierung der auf das zu entwickelnde Bauteil einwirkenden, äußeren Faktoren, welche sowohl technischer als auch wirtschaftlicher Natur sein können. Aus Sicht des Konstrukteurs kann es zweckmäßig sein Anforderungen allgemein in funktionale, mechanische, thermische, chemische und wirtschaftliche Anforderungen zu kategorisieren. In dieser Zusammenstellung wird insbesondere auf die mechanischen und thermischen Anforderungen von Befestigungselementen für Dämmstoffe Bezug genommen. Für eine konkrete Produktentwicklung dienen die dargestellten Beispiele der Information und müssen auf die entsprechenden Gegebenheiten hin ergänzt werden.

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.

5.1 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 [3.17].

Abbildung 2-5 zeigt schematisch die nach [3.17] 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 werden durch den Dübel jedoch die Putzschichten stärker an die tragende Wand gepresst. Die Zugsteifigkeit des Dübels wird wirksam.

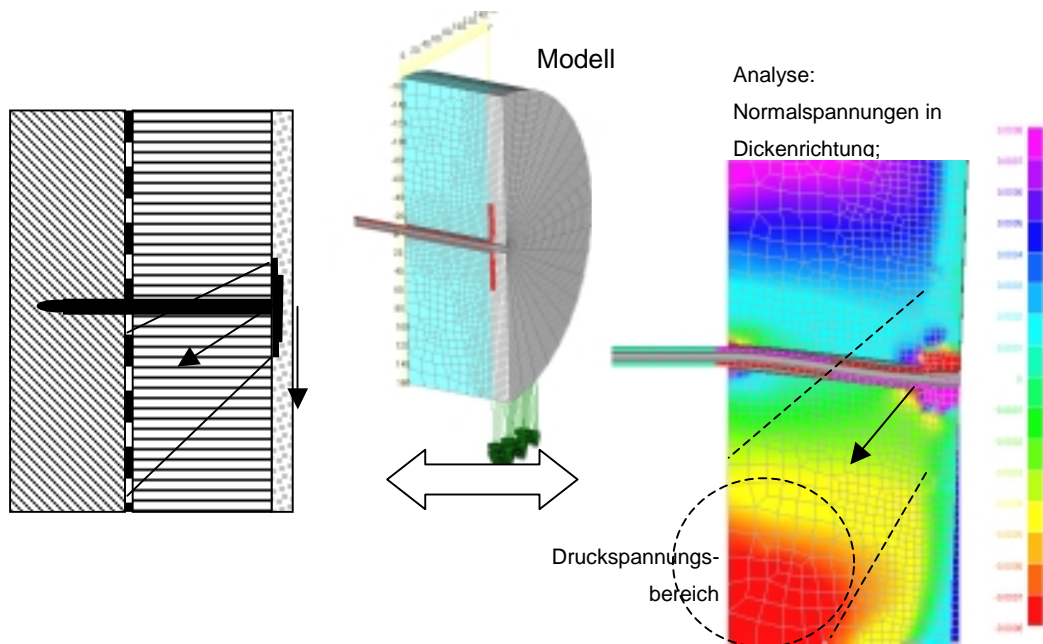


Abb. 5-1: Schematische Darstellung: Kräftespiel bei Lastfall Eigengewicht oder hygrothermische Einwirkungen bzw. Lastfallkombination - „Konsoltragwirkung“ nach [3.17] und Gegenüberstellung der Simulation.

5.2 Hygrothermische Verformung

Unter dem Begriff „hygrothermische Einwirkungen“ sind die Lastfälle Schwinden/Quellen und Maßänderung infolge Temperaturänderung zusammengefasst. Laut [3.17] sind diese insbesondere an den Rändern von großer Bedeutung, da in diesem Bereich die Spannungen eingeleitet werden, siehe Abb. 5-2. Analoge Phänomene sind im mechanischen Prinzip der Klebung bekannt.

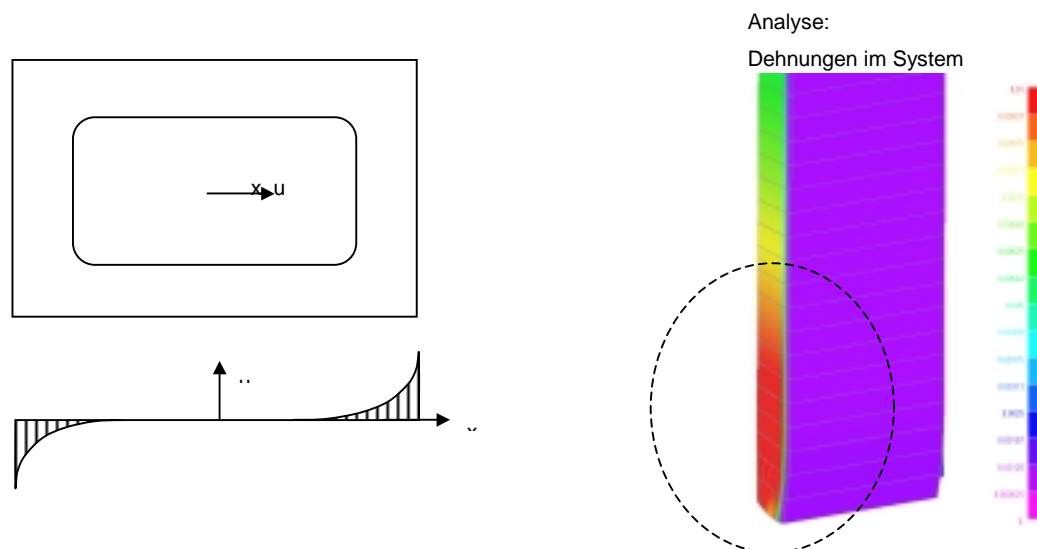


Abb. 5-2: Analyse eines Wärmedämmverbund-Fassadenfeldes – durch hygrothermische Verformungen werden Belastungen von den Rändern her eingeleitet.

5.3 Windkräfte

Die Randbereiche von Gebäuden sind erheblichen Windsoglasten unterworfen, siehe Abb. 5-3. Diese sind in DIN 1055 beschrieben [3.18]. Bei Messungen wurden als Zugtragfähigkeit von 0,3 kN bis 0,5 kN pro Dübel gemessen [3.17]. In Untersuchungen an größeren Flächen wurde festgestellt, dass die Zugtragfähigkeit des Systems durch die Verwendung von höherfesten Dämmstoffplattenmaterialien gesteigert werden kann.

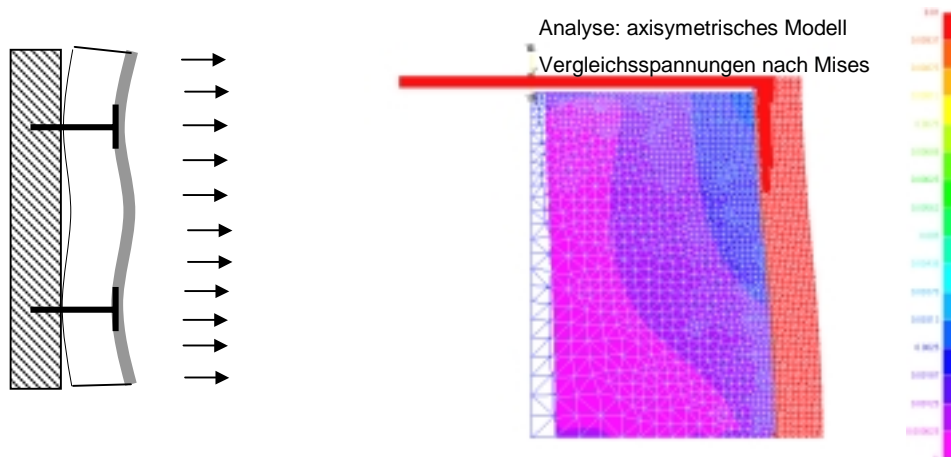


Abb. 5-3: Belastung eines Wärmedämmverbundsystems ohne Klebung durch Windsog.

5.4 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 Verbindungselemente für zwei Schalen, welche bauseitig mit Dämmstoff verfüllt werden, finden derzeit teure I-Träger aus Holzfasermaterial Verwendung, siehe Abb. 5-4.

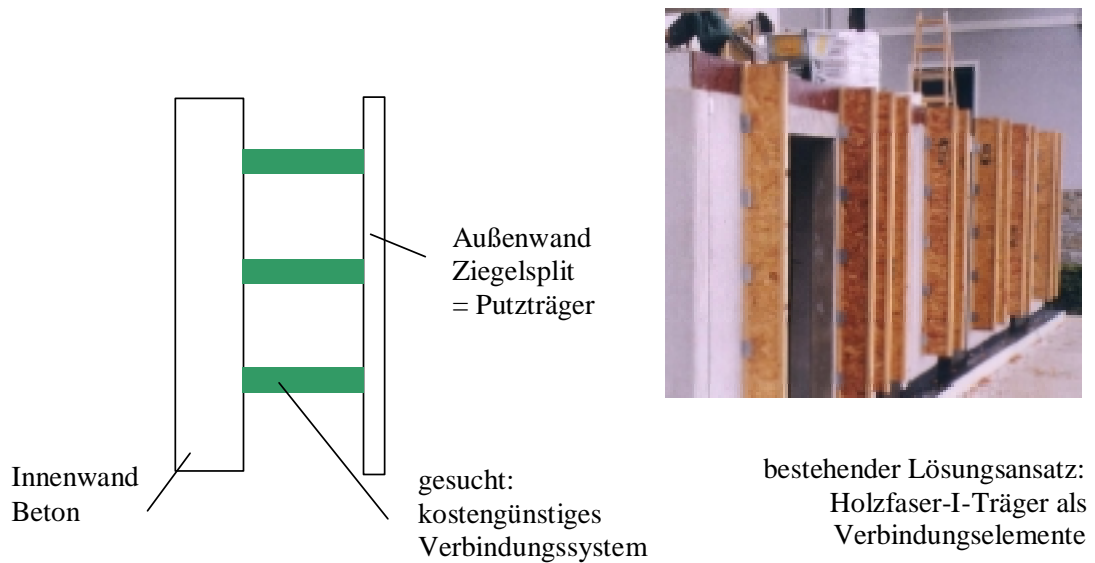


Abb. 5-4: Konzept für den Aufbau eines Wandsystems mit Passivhausstandard.

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.

In Abb. 5-5 und Abb. 5-6 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.

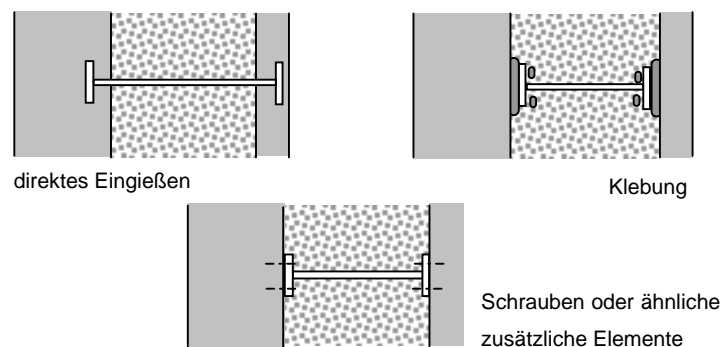


Abb. 5-5: Grundsätzliche Befestigungsvarianten der Verbindungselemente.

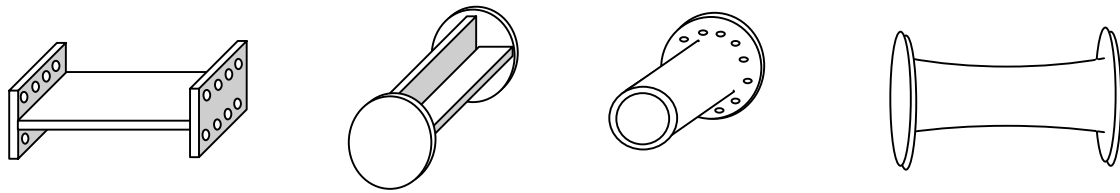


Abb. 5-6: Einige mögliche Ausführungsvarianten mit grundsätzlich unterschiedlichem mechanischen Verhalten.

5.5 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 Abb. 5-7) herangezogen. Hier werden winkelig gebogene Baustahlgitter in Beton eingegossen.

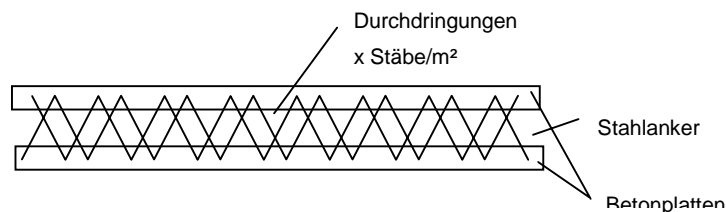


Abb. 5-7: Bekannte Technologie zur Herstellung von Schalungen.

Die nachfolgenden Ergebnisse können analog für Dübel mit Stahlstiften und ähnliche wärmebrückenbildende Konstruktionen übertragen werden. Abb. 5-8 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. [3.20]).

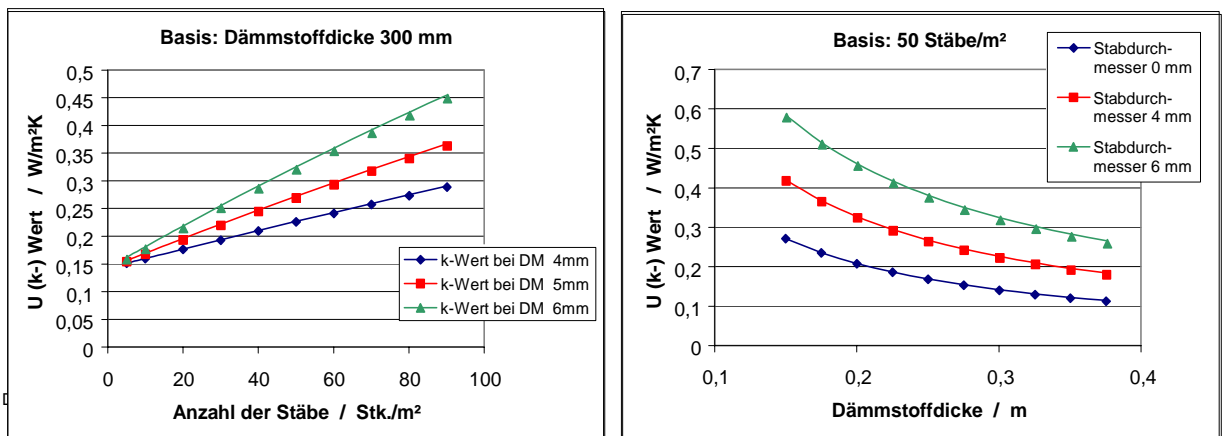


Abb. 5-8: Wärmedurchgangskoeffizient in Abhängigkeit der Anzahl der durchdringenden Stäbe, deren Durchmesser (DM) sowie der Dämmstoffdicke.

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 Abb. 5-9 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.).

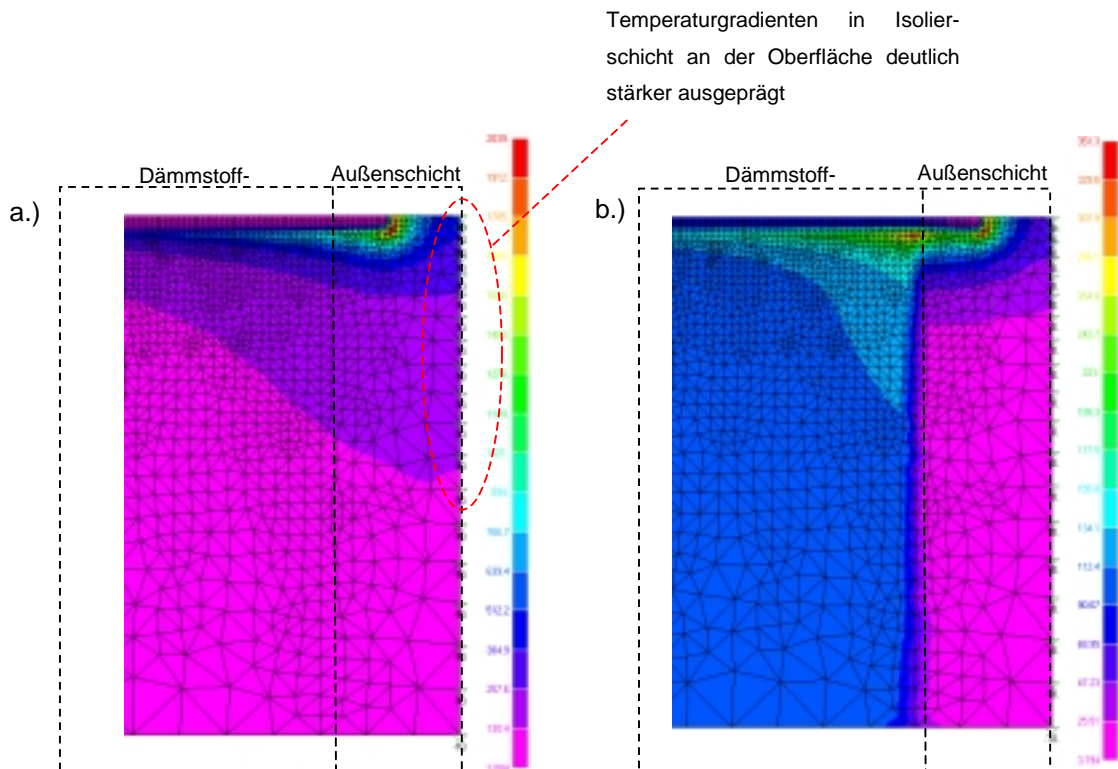


Abb. 5-9: Temperaturgradienten [°C/mm] durch eine stabförmige Wärmebrücke; a.) Isolierschicht an der Oberfläche, b.) Wärmeleitende Schicht an der Oberfläche.

5.6 Schalungsdruck und dessen Ausbildung

Ausführlicher als auf die Anforderungen, die in den letzten Kapiteln beschrieben werden, wird auf den Bereich „Schalungsdruckbelastung des Dämmstoffes“ eingegangen. Diese Belastung ist bedeutend höher als alle bisher besprochenen und stellt eine besondere Herausforderung für die Bauteilauslegung dar. Es gibt Produkte auf dem Markt, bei welchem der Dämmstoff als tragendes Element in Schalungen zum Einsatz kommt. Auf die diesbezügliche Literatur wird im entsprechenden Kapitel der Literaturrecherche verwiesen. Die Konstruktion muss zusätzlich zur Funktion der Kraftübertragung oft noch zahlreiche Funktionen für die Handhabung übernehmen. Für die Attraktivität des Gesamtsystems ist die optimale Vereinigung dieser Funktionen von großer Bedeutung.

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.

Der Schalungsdruck ist nach [3.21] 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:

$$P \text{ [Pa]} = 3 \times V^{0,25} \text{ (bis } V = 4 \text{ m/h)} \quad \text{bzw.} \quad P \text{ [Pa]} = 3,6 \times V^{0,25} \text{ (bei } V > 4 \text{ m/h)}, \quad (5.1)$$

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

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

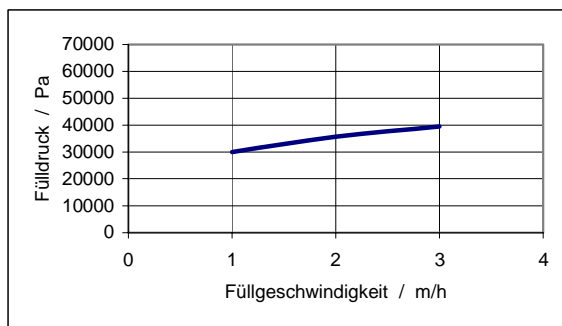
$$P \text{ [kN/m}^2\text{]} = 90 \times t_k, \text{ wobei } t_k \text{ die Betonkerndicke in [m] darstellt.} \quad (5.2)$$

Der hydrostatische Druck beträgt

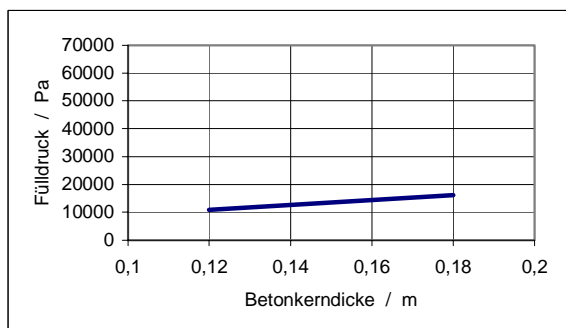
$$P = \rho \times g \times h. \quad (5.3)$$

Eine Gegenüberstellung der Ergebnisse ist in Abb. 5-10 ersichtlich.

Quelle: Hütte, Bautechnik Band II



Quelle: ÖN B3208



Physik: hydrostat. Druck

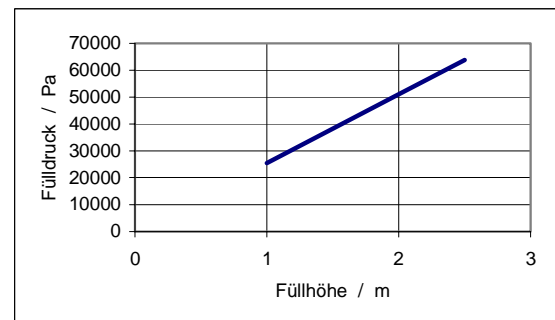


Abb. 5-10: Gegenüberstellung der Druckausbildung verschiedener Ansätze aus der Literatur.

Auf den wesentlichen Faktor der Betonkonsistenz bei der Ausbildung des Schalldruckes weisen die Literaturstellen [5.11], [5.12] und [5.13] hin. Betrachtet man die physikalischen Zusammenhänge im Beton, ohne den Zeiteinfluss zu berücksichtigen, so lässt sich Beton weitgehend durch das Model einer Bingham-Substanz beschreiben. Es muss eine bestimmte Schubspannung überschritten werden um den Flüssigbeton zum Fließen zu bringen. Diese Zusammenhänge sind in Abb. 5-11 schematisch dargestellt.

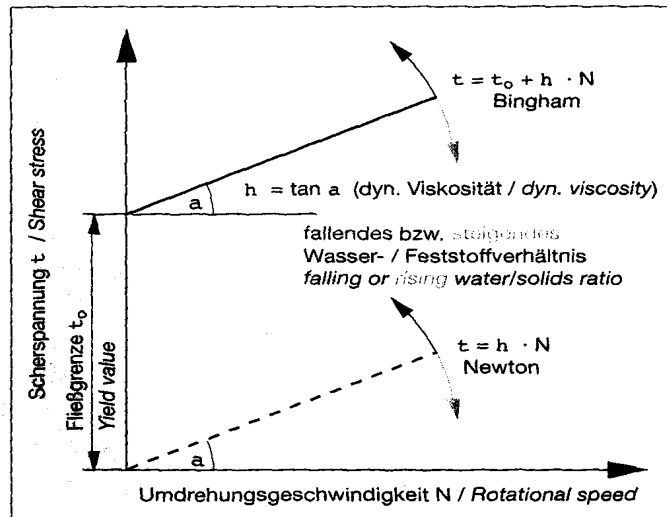


Abb. 5-11: Rheologisches Verhalten von Mehlkorn/Wassersuspensionen ohne Fließmittel (=Bingham-Körper) und mit Fließmittel (=Newton-Flüssigkeit) [5.11].

Betrachtet man die zeitabhängigen Eigenschaften des Betons so kann dieser durch ein thixotropes Verhalten beschrieben werden. Die Bestandteile des Betons sind polar. Durch Zeiteinfluss lagern sich die Pole der einzelnen Partikel entsprechend aneinander und bilden eine Ordnungsstruktur. Für die Wiederverflüssigung der entstandenen Agglomerationen wird eine bestimmte Mindestschubspannung benötigt. Dies ist mitunter durch das thixotrope Verhalten begründet. Durch den Einsatz von bestimmten Zuschlagsstoffen verringert sich die Fließgrenze und das viskose Verhalten nähert sich immer stärker einer newtonschen Substanz.

Beim sogenannten Self Compacting Concrete (SCC) wird die Fließgrenze durch besondere Zuschlagsstoffe sehr gering und die Drücke können dem hydrostatischen Druck sehr nahe kommen. In [5.12] werden hier Schalungsdrücke von 1,2 bar bei 5 m Füllhöhe angegeben. Im Beitrag [5.13] werden Versuche bis zu 12 m Füllhöhe beschrieben. Hier wird von 66 % bis 70 % des hydrostatischen Fülldruckes gesprochen. Eine weitere Beschreibung eines Versuches beschreibt die Druckausbildung bei sehr hoher Steiggeschwindigkeit. Eine 6 m hohe Wand wurde in 8 min gefüllt. Dabei wurden in einer Tiefe von 4 m der volle und in 6 m Tiefe 90 % des hydrostatischen Druckes gemessen. Die Dichte des Frischbetons liegt bei SCC offenbar niedriger als bei Normalbeton und variiert zwischen 23,5 kN/m³ und 24 kN/m³.

5.6.1 Messung des Betondruckes in Wandaufbauten

Um die unterschiedlichen Angaben aus den Literaturstellen, insbesondere bei der Verwendung von Normalbeton bei verschiedenen Konsistenzen aufzuklären werden im Rahmen dieses Projekts Verfüllversuche durchgeführt. Diese erfolgen in zwei Versuchsreihen wo Messungen des Betondruckes unter verschiedenen Rahmenbedingungen durchgeführt werden. Abb. 5-12 zeigt den verwendeten Messaufbau für die Messung des Druckes bzw. eine Abbildung eines der Manometer im Einsatz.

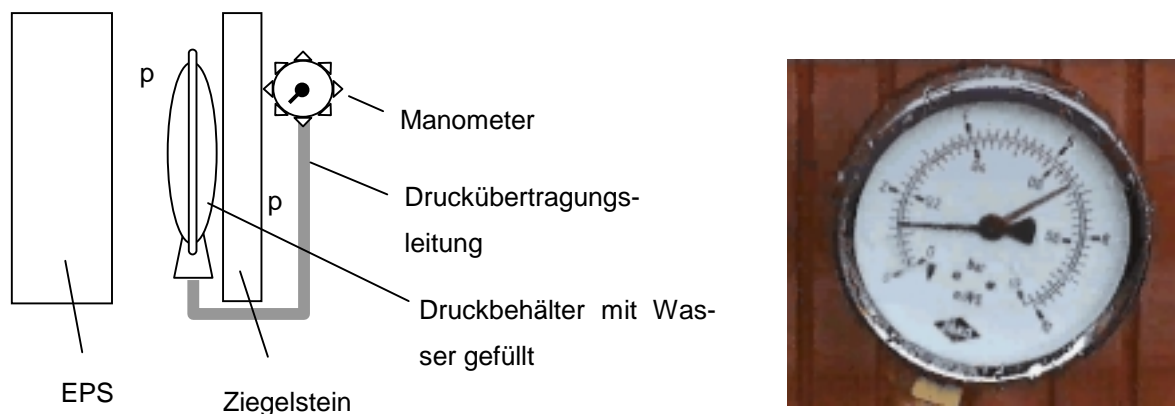


Abb. 5-12: Versuchsaufbau und Messapparatur; Messbereich des verwendeten Manometers 1 bar.

Variiert wird insbesondere die Zusammensetzung des Betons. Die Temperatur bei Verfüllung von Versuchsreihe A beträgt ca. 7°C (Durchführung im Spätherbst), jene von Versuchsreihe B ca. 27°C (Sommer). Die Verfüllgeschwindigkeit ist bei allen Versuchen sehr hoch und beträgt ca. 2,5 m in 2 min. Verfüllt wird ein System mit dem Prinzip der verlorenen Schalung. Eine der beiden Schalungshälften besteht aus einem Ziegelwerkstoff, die zweite aus dem Dämmstoff EPS.

Bei der Durchführung wird der Betondruck auf Basis folgender weiterer Randbedingungen gemessen (Tabelle 5-1):

Tabelle 5-1: Detaillierte Beschreibung der einzelnen Versuchswände.

	Versuchsreihe A		Versuchsreihe B		
	1	2	1	2	3
Höhe [m]	1,75	2,05	2,25	2,5	2,5
Breite [m]	3	670	1,00	1,00	1,00
Höhe Beton [m]	1,7	ca. 2	2,13	ca. 2,4	ca. 2,4
Ziegel					
Bezeichnung	Poroth. HLZ 10 Plan	Sonder-Schwalbens.	Poroth. HLZ 10 Plan	Poroth. HLZ 10 Plan	Plex. HLZ Plan
Länge [mm]	500	670	500	500	500
Breite [mm]	150	150	94,5	94,5	96,5
Höhe [mm]	250	170	250	250	250
Dämmstoff					
Bezeichnung	EPS 30	EPS 30	EPS 25	EPS 25	EPS 30
Länge [mm]	1000	670	1000	1000	1000
Breite [mm]	150	150	150	150	150
Höhe [mm]	250	170	250	250	250
Beton					
Bezeichnung	B20/B225 K4	B20/B225 K4	B20/B225 K5	B30/B300 K5	SCC K5
G/K	16	16	16	16	16
W/Z			0,7	0,55	0,4
Sorte. Nr.	415314	415314	415315	602315	17316
Betonkerndicke	150	140	150	150	150

Ergebnisse Versuchswand A1 und A2

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

Versuchswand B1 und B2

Das angebrachte Druckmessgerät zeigt beim Verfüllen mit Beton einen maximalen Wert von ca. 0,20 bar. Nach dem Füllen wird mit einer Rüttelmaschine versucht, den Beton zu verdichten. Bei maximaler Rütteltiefe bzw. bei Rüttelzeiten von ca. 2 s ergibt sich am Druckmessgerät ein max. Druck von etwa 0,39 bar, der nur kurzzeitig auftritt und sich dann wieder verringert.

Versuchswand B3

Die beiden angebrachten Druckmessgeräte zeigen beim Verfüllen einen max. Wert von etwa 0,4 bar der weitgehend linear ansteigt. Bei beinahe vollständiger Füllung der Wand hält einer Schalungsplatte für die seitliche Abstützung nicht mehr stand. Der gesamte SCC-Beton fließt durch eine kleine Öffnung aus.

Die Ergebnisse spiegeln das Bingham-Verhalten bzw. die Thixotropie des Materials wider. Die verschiedenen in der Literatur gefundenen Modelle enthalten diese physikalischen Phänomene nicht. Die gefundenen Werte dienen als Anhaltspunkte der Druckausbildung unter den gegebenen Bedingungen. Abb. 5-13 und Abb. 5-14 zeigen eine Bilderzusammenstellung der durchgeführten Verfüllversuche.

5.6.2 Bilderdokumentation der Verfüllversuche

Versuchsreihe A



Abb. 5-13: Bilderzusammenstellung – Versuchsreihe A.

Versuchsreihe B



Abb. 5-14: Bilderzusammenstellung – Versuchsreihe B.

5.6.3 Erstellung eines Modells für die Druckberechnung

Die beobachtete Druckausbildung ist durch die Ansätze aus der Literatur nicht abzubilden. Daher wird ein Modell entwickelt, welches nachfolgend vorgestellt wird. Durch die Integration physikalischer Modelle können tatsächliche Effekte abgebildet werden.

In Abb. 5-15 wird ein Volumenelement des Betons mit den darauf wirkenden Kräften dargestellt.

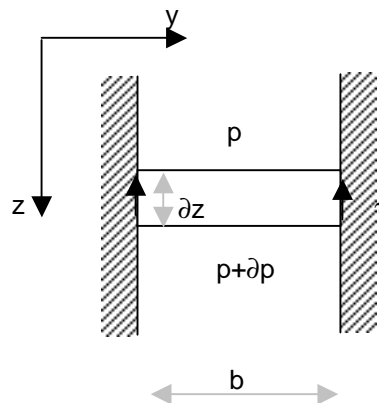


Abb. 5-15: Schematische Darstellung der mechanischen Zusammenhänge bei der Druckausbildung.

Ansetzen des Kräftegleichgewichtes

$$p \cdot b \cdot l = (p + \Delta p) \cdot b \cdot l + b \cdot l \cdot \rho \cdot g \cdot \Delta z - 2 \cdot \tau \cdot l \cdot \Delta z \quad \text{wobei} \quad \tau = \mu \cdot p \quad (5.4)$$

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

$$z = \int \left(\frac{1}{\rho \cdot g} - \frac{b}{2\mu p} \right) \cdot dp \quad (5.5)$$

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

$$z = \frac{p}{\rho \cdot g} - \frac{b}{2\mu} \cdot \ln p + \frac{b}{2\mu} \quad (5.6)$$

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. Abb.

5-16 zeigt den sich ausbildenden Druck in Abhängigkeit der Füllhöhe für verschiedene Größenordnungen des inneren Reibkoeffizienten, welcher sich hier als Reibwinkel darstellt ($\rho = \text{ARCTAN}(\mu)$).

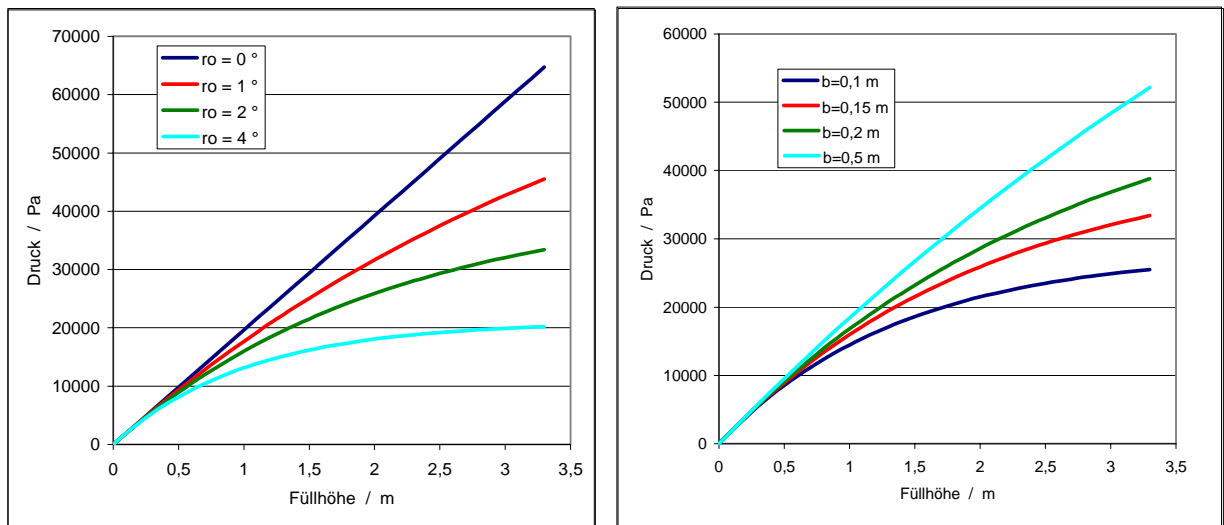


Abb. 5-16: Zusammenhang zwischen Fülldruck und Füllhöhe beim Einsatz bei Variation Betonkonsistenz und Betonkerndicke.

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 Abb. 5-17 dargestellte Diagramm stellt den Zusammenhang zwischen dem Betondruck und der Füllhöhe dar, wenn an der Oberfläche ein Rüttler mit verschiedenen Leistungseinstellung eingebracht wird.

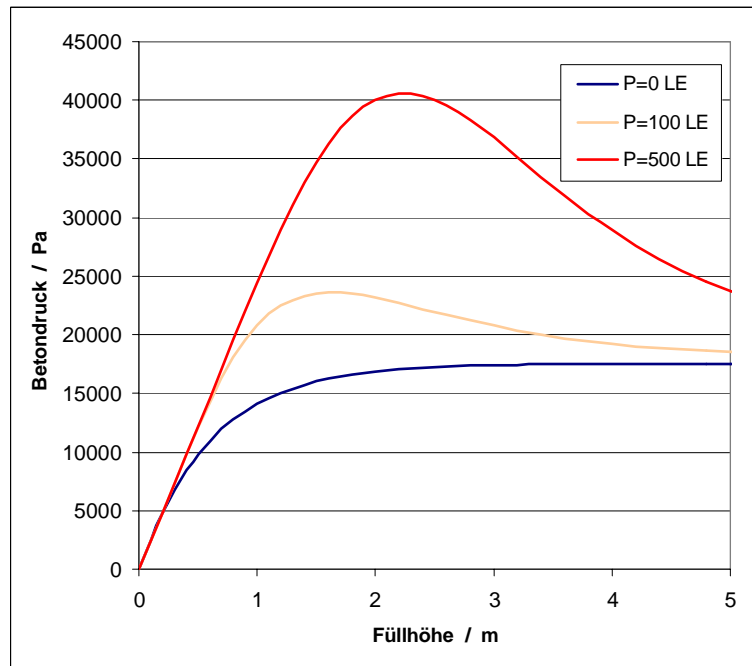


Abb. 5-17: Zusammenhang zwischen Fülldruck und Füllhöhe beim Einsatz von Rüttelgeräten verschiedener Leistung (Modellbildung).

5.7 Schallbelastung

Diese Arbeit befasst sich mit den verschiedenen Möglichkeiten zur Auslegung von Befestigungen für Dämmstoffe. Dabei werden die mechanischen Eigenschaften der Dämmstoffe als Grundlage für die Befestigungstechnik eingehend untersucht. Die wärmetechnischen Eigenschaften der Dämmstoffe als ihr Hauptmerkmal sind aufgrund ihrer Anwendung bekannt. In der heutigen Zeit ist, aufgrund des wachsenden Verkehrsaufkommens und der damit steigenden Lärmbelastung, der Schallschutz von großer Bedeutung. Während statische und wärmeleitungstechnische Gegebenheiten leicht vorzeitig abschätzbar sind, bedarf es bei der Analyse der schallschutztechnischen Anforderungen zusätzlicher Produktprüfungen. Bei der Verwendung von Wandaufbauten, die durch ein bestimmtes Steifigkeitsverhalten in Schwingung versetzt werden können, ist die schallschutztechnische Untersuchung besonders wichtig. Dies ist insbesondere bei Verwendung von Dämmstoffen in Kombination mit schwingungsfähigen Massen (z.B. Putzschicht) aber auch bei Ziegelbausteinen mit dünnwandigen Stegen der Fall. In diesem Unterkapitel wird auf Schallschutz aber vor allem auf die schalltechnischen Messung von Wandaufbauten eingegangen.

„Schall selbst ist eine durch Druckunterschiede, je nach Medium und Energie fortpflanzende Wellenbewegung. Diese Drückstöße versetzen je nach Intensität und Frequenz auch unser Trommelfell in Schwingung.“ [6.2]

Um die Größe des Schalls als Zahlenwert auszudrücken wird der Schalldruckpegel L_p

$$L_p = 20 \cdot \log \frac{p}{p_0} \quad [dB] \quad (5-7)$$

verwendet. Die Skala des Schalldruckpegels erstreckt sich dabei von der Hörschwelle ($L_p=0$ dB) bis zu Schmerzgrenze von 120 dB. Dabei ist das Empfinden des Gehörs frequenzabhängig, sodass bei tieferen Frequenz der gleiche Schalldruckpegel als leiser empfunden wird. Um diesem Empfinden Rechnung zu tragen, werden für bestimmte Frequenzbereiche Bewertungskurven festgelegt. Diese Bewertungskurven sind je nach Anforderung, ob bauakustischer Bereich (A-Bewertung) oder Flugplatzbereich (D-Bewertung), zu verwenden. Tiefere Frequenzen erfahren dabei prinzipiell eine Abminderung in der Beurteilung. [6.2]

5.7.1 Schallmessung und Bewertungsverfahren

Die Schallmessung der Versuchswände erfolgt gemäß ÖNORM EN 20140-3. Der Versuchsaufbau besteht aus zwei schallisolierten Räumen mit einer verbindenden Öffnung für die Versuchswand, siehe Abb. 5-18 (b). Aus dem Senderraum werden definierte Schallpegel in einem Frequenzband geschickt und im Empfangsraum aufgezeichnet. Die Differenz zwischen Sende- und Empfangsschallpe-

gel wird als Schalldruckpegeldifferenz D bezeichnet. Die Berechnung des Schalldämmmaßes R erfolgt nach

$$D = L_{\text{Sender}} - L_{\text{Empfänger}} = R - 10 \cdot \log \frac{S}{A} [\text{dB}], \quad (5-8)$$

wobei S die Fläche des Trennbauteils, also der Versuchswand ist und A die äquivalente Schallabsorptionsfläche des Empfangsraums darstellt. Die Berechnung von A erfolgt nach

$$A = 0.163 \cdot \frac{V}{T} \quad (5-9)$$

mit der Nachhallzeit T und dem Raumvolumen V .

Um nun vergleichbare Einzahlangaben als Gütemaß für die Versuchswand zu erhalten, wird die Bewertung gemäß ÖNORM EN ISO 717-1 verwendet. Als Grundlage dient eine frequenzabhängige Bezugskurve, die das frequenzbedingte Empfinden des Gehörs repräsentiert. Um die Messung zu bewerten, wird die Bezugskurve zur Messkurve so verschoben, dass die Summe der ungünstigen Abweichungen ein Maximum darstellt, siehe Abb. 5-18 (a).

Bei der Messung in Terzbändern darf diese Summe maximal 32 dB betragen. Als ungünstiger Fall wird ein Unterschreiten der Messkurve in Bezug zur verschobenen Bewertungskurve festgesetzt, siehe Abb. 5-18 (a). Der Einzelvergleichskennwert R_w schließlich ist das Schalldämmmaß der verschobenen Bezugskurve bei 500 Hz. Das früher verwendete mittlere Schalldämmmaß R_m , der Mittelwert des Schalldämmmaßes über dem Frequenzmessbereich, hat den Nachteil, dass die Empfindlichkeit des Gehörs nicht berücksichtigt wird, da schlechte Dämmeigenschaften durch gute kompensiert werden.

In dieser Arbeit werden die für die Verfüllversuche verwendeten Wandaufbauten für die Untersuchung herangezogen.

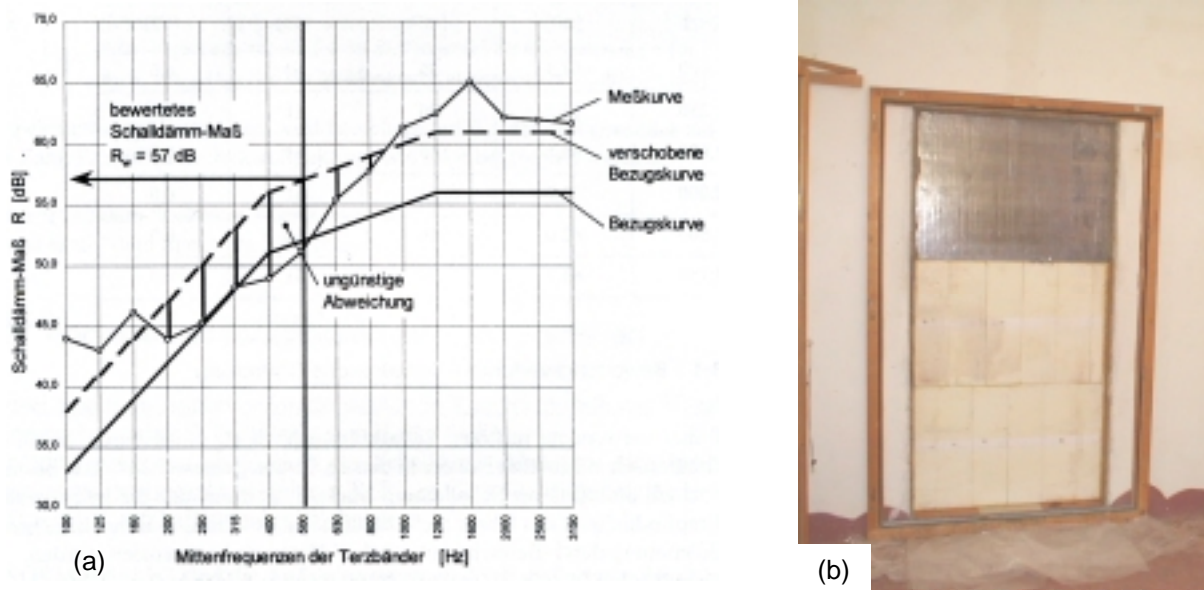


Abb. 5-18: Zeigt links (a) Bewertungsverfahren gemäß ÖNORM EN ISO 717-1 [6.2] und rechts (b) eine eingebaute Versuchswand.

5.7.2 Ergebnisse

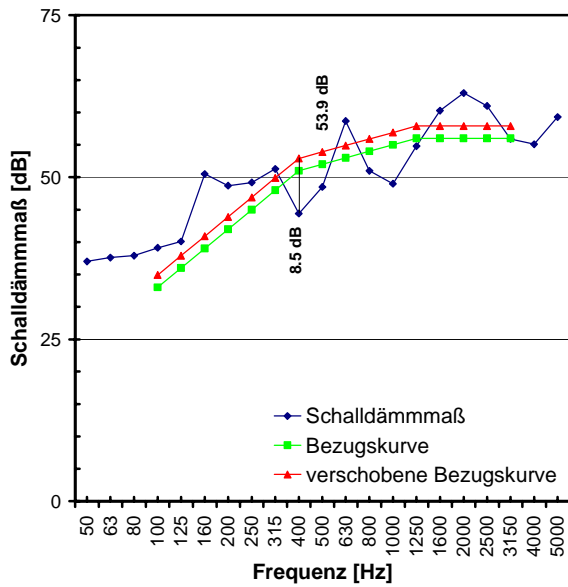
Untersucht werden vier Varianten, siehe Tabelle 5-2, wobei immer die EPS-Seite der Versuchswand dem Sender zugewandt ist. Es werden je zwei verputzte und unverputzte Wandaufbauten untersucht. Für die verputzten Wände wird nach einer Trockenzeit von einem Tag geprüft. Erste Ergebnisse, siehe Tabelle 5-3, zu dieser Thematik zeigen, dass die erreichbaren Schallschutzwerte der verwendeten Wandaufbauten bei 52 dB bis 54 dB liegen. Die detaillierten Messergebnisse der einzelnen Wandaufbauten befinden sich in den nachfolgenden Darstellungen von Abb. 5-19 bis Abb. 5-22.

Tabelle 5-2: Schalltechnisch untersuchte Wandaufbauten.

	Putzschicht	Wandschichten			Putzschicht
		1	2	3	
Variante1		15 cm EPS	14 cm Beton	7 cm Sonderziegel	
Variante2	Klebspachtel	15 cm EPS	14 cm Beton	7 cm Sonderziegel	MPI 25
Variante3		15 cm EPS	15 cm Beton	10 cm Ziegel	
Variante4	Klebspachtel	15 cm EPS	15 cm Beton	10 cm Ziegel	MPI 25

Tabelle 5-3: Überblick über die Ergebnisse der schalltechnisch untersuchten Wandaufbauten.

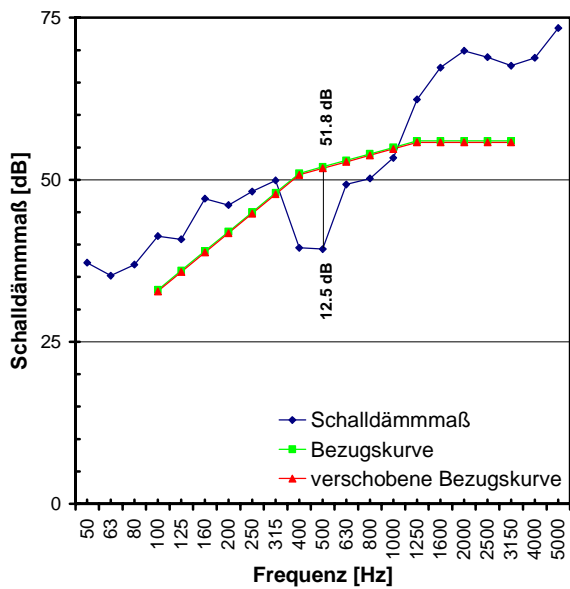
Variante	R_w [dB]	max. ung. Abw.	
		f [Hz]	R_w [dB]
1	53.9	400	8.5
2	51.8	500	12.5
3	54.7	1250	9.1
4	54.0	800	9.9



Messergebnis Variante 1					
f [dB]	D [dB]	T [s]	R [dB]	v. Bk. [dB]	Abw. [dB]
50	40.6	2.57	37.0		1.9
63	43.5	1.51	37.6		
80	43.9	1.49	37.9		
100	44.3	1.77	39.1	34.9	0.0
125	46.4	1.40	40.1	37.9	0.0
160	56.5	1.47	50.5	40.9	0.0
200	56.1	1.07	48.7	43.9	0.0
250	55.8	1.30	49.2	46.9	0.0
315	57.8	1.33	51.3	49.9	0.0
400	50.5	1.44	44.4	52.9	8.5
500	54.5	1.47	48.5	53.9	5.5
630	64.3	1.64	58.7	54.9	0.0
800	56.4	1.69	51.0	55.9	5.0
1000	54.2	1.80	49.0	56.9	7.9
1250	60.1	1.76	54.8	57.9	3.1
1600	65.5	1.79	60.3	57.9	0.0
2000	68.2	1.78	63.0	57.9	0.0
2500	66.4	1.69	61.0	57.9	0.0
3150	51.7	1.54	55.9	57.9	2.0
4000	61.1	1.47	55.1		
5000	62.2	3.01	59.3		

32.0

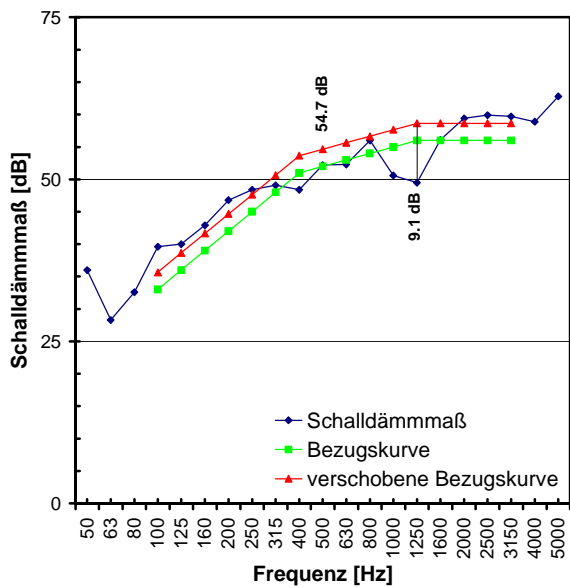
Abb. 5-19: Detaillierte Messergebnisse Wandaufbauvariante 1.



Messergebnis Variante 2					
f [dB]	D [dB]	T [s]	R [dB]	v. Bk. [dB]	Abw. [dB]
50	41.0	2.48	37.2		
63	40.4	1.77	35.2		
80	42.7	1.55	36.9		
100	46.3	1.86	41.3	32.8	0.0
125	46.8	1.50	40.8	35.8	0.0
160	52.6	1.68	47.1	38.8	0.0
200	53.0	1.20	46.1	41.8	0.0
250	54.6	1.37	48.2	44.8	0.0
315	56.1	1.42	49.9	47.8	0.0
400	45.8	1.39	39.5	50.8	11.2
500	45.0	1.59	39.3	51.8	12.5
630	54.9	1.62	49.3	52.8	3.5
800	55.7	1.68	50.2	53.8	3.5
1000	58.7	1.75	53.4	54.8	1.3
1250	67.5	1.83	62.4	55.8	0.0
1600	72.5	1.80	67.3	55.8	0.0
2000	75.2	1.75	69.9	55.8	0.0
2500	74.3	1.69	68.9	55.8	0.0
3150	73.4	1.54	67.6	55.8	0.0
4000	74.8	1.48	68.8		
5000	76.8	2.68	73.4		

32.0

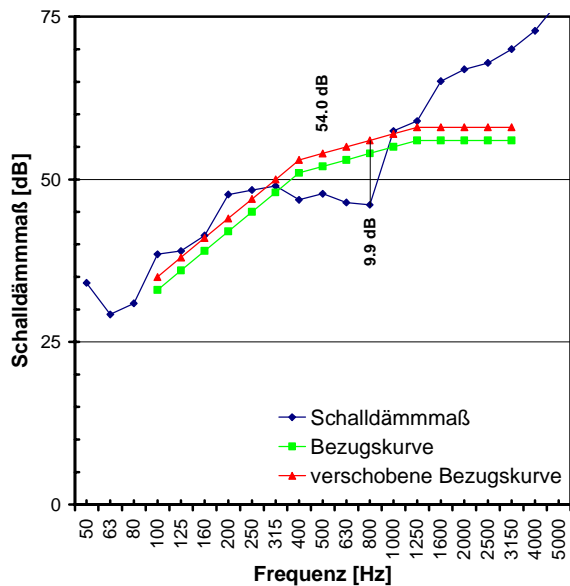
Abb. 5-20: Detaillierte Messergebnisse Wandaufbauvariante 2.



Messergebnis Variante 3					
f [dB]	D [dB]	T [s]	R [dB]	v. Bk. [dB]	Abw. [dB]
50	42.4	1.76	36.0		
63	35.0	1.65	28.3		
80	40.3	1.29	32.6		
100	45.9	1.80	39.6	35.7	0.0
125	47.2	1.44	40.0	38.7	0.0
160	49.9	1.52	42.9	41.7	0.0
200	54.5	1.29	46.8	44.7	0.0
250	55.9	1.35	48.4	47.7	0.0
315	56.5	1.39	49.1	50.7	1.6
400	54.9	1.70	48.4	53.7	5.3
500	58.6	1.76	52.2	54.7	2.4
630	58.7	1.75	52.3	55.7	3.4
800	62.2	1.85	56.0	56.7	0.6
1000	57.0	1.77	50.6	57.7	7.0
1250	56.0	1.73	49.5	58.7	9.1
1600	62.6	1.73	56.1	58.7	2.5
2000	65.7	1.80	59.4	58.7	0.0
2500	66.4	1.72	59.9	58.7	0.0
3150	66.5	1.59	59.7	58.7	0.0
4000	66.0	1.50	58.9		
5000	67.6	2.52	62.8		

31.8

Abb. 5-21: Detaillierte Messergebnisse Wandaufbauvariante 3.



Messergebnis Variante 4					
f [dB]	D [dB]	T [s]	R [dB]	v. Bk. [dB]	Abw. [dB]
50	40.2	1.87	34.1		
63	36.4	1.47	29.2		
80	38.6	1.31	30.9		
100	44.5	1.91	38.5	35.0	0.0
125	45.6	1.66	39.0	38.0	0.0
160	47.2	1.99	41.4	41.0	0.0
200	55.0	1.42	47.7	44.0	0.0
250	55.1	1.62	48.4	47.0	0.0
315	56.1	1.48	49.0	50.0	1.1
400	53.4	1.70	46.9	53.0	6.2
500	53.7	1.96	47.8	54.0	6.2
630	52.4	1.94	46.4	55.0	8.6
800	52.3	1.83	46.1	56.0	9.9
1000	63.8	1.77	57.4	57.0	0.0
1250	65.5	1.70	59.0	58.0	0.0
1600	71.5	1.75	65.1	58.0	0.0
2000	73.2	1.80	66.9	58.0	0.0
2500	74.4	1.71	67.9	58.0	0.0
3150	76.9	1.56	70.0	58.0	0.0
4000	79.9	1.50	72.8		
5000	81.7	2.79	77.3		

32.0

Abb. 5-22: Detaillierte Messergebnisse Wandaufbauvariante 4.

5.7.3 FEM-Analyse

Wie die zuvor angeführten Ergebnisse zeigen, ergeben sich für die unterschiedlichen Wandaufbauten nicht nur unterschiedliche Schalldämmmaße, sondern auch unterschiedlich große max. ungünstige Abweichungen bei verschiedenen Frequenzen. Mit Hilfe einer Analyse bezüglich der Eigenfrequenzen der Wandaufbauten wird versucht den Ursprung dieses Verhalten zu ergründen. Dabei werden die Varianten 3 und 4 genauer untersucht. Die Idealisierung erfolgt mit Hilfe eines 2D-Modells, wobei an den seitlichen Modellenden die Verschiebung in Längsrichtung verhindert wird, siehe Abb. 5-23.

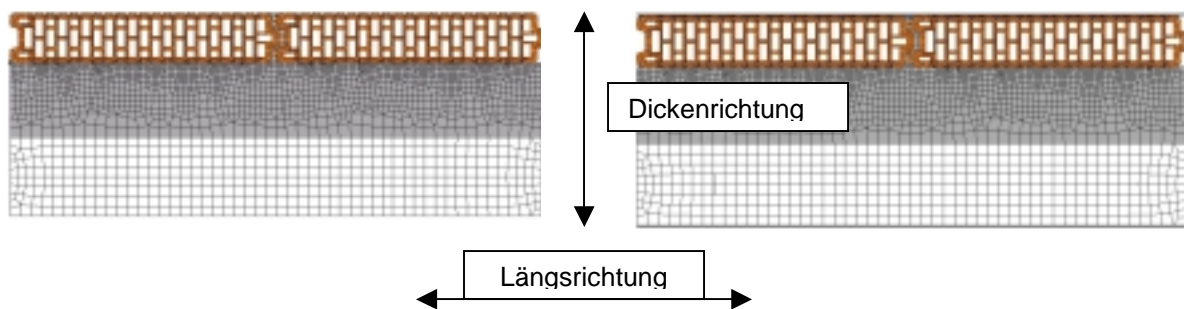


Abb. 5-23: Modellierung der Eigenfrequenzsimulation.

Innerhalb des Messbereichs konnten sehr viele Eigenwerte gefunden werden. Fast alle bewirken eine hauptsächliche Ausbreitung in Längsrichtung, siehe Abb. 5-25 (a). Für beide Varianten kann jedoch eine Eigenfrequenz im Bereich der maximalen ungünstigen Abweichung gefunden werden, dargestellt in Abb. 5-25 (b) und (c), die ein Schwingen in Dickenrichtung erzeugt. Diese Eigenfrequenzen dürften für den deutlichen Abfall im Schalldämmmaß verantwortlich sein. Resonanzen die sich im Bereich des Ziegels befinden liegen bei sehr hohen Frequenzen und beeinträchtigen das Schallschutzverhalten in diesem Versuch nicht, siehe Abb. 5-24.

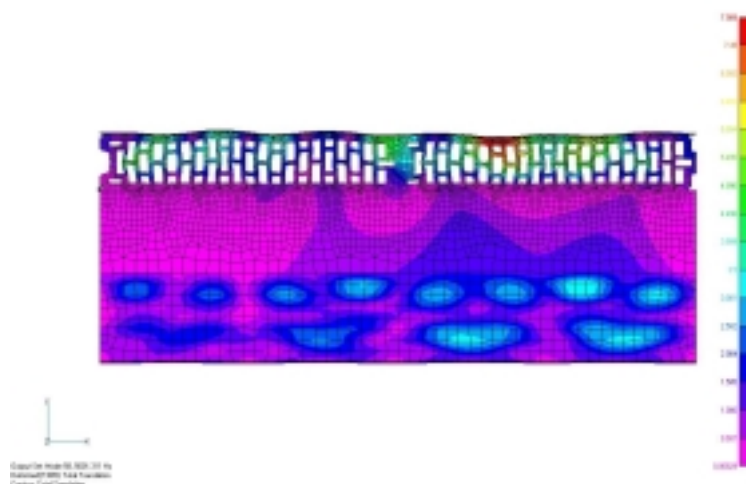


Abb. 5-24: Gesamtverschiebung bei einer Eigenfrequenz von 5000 Hz, dabei hauptsächlich Schwingen des Ziegels.

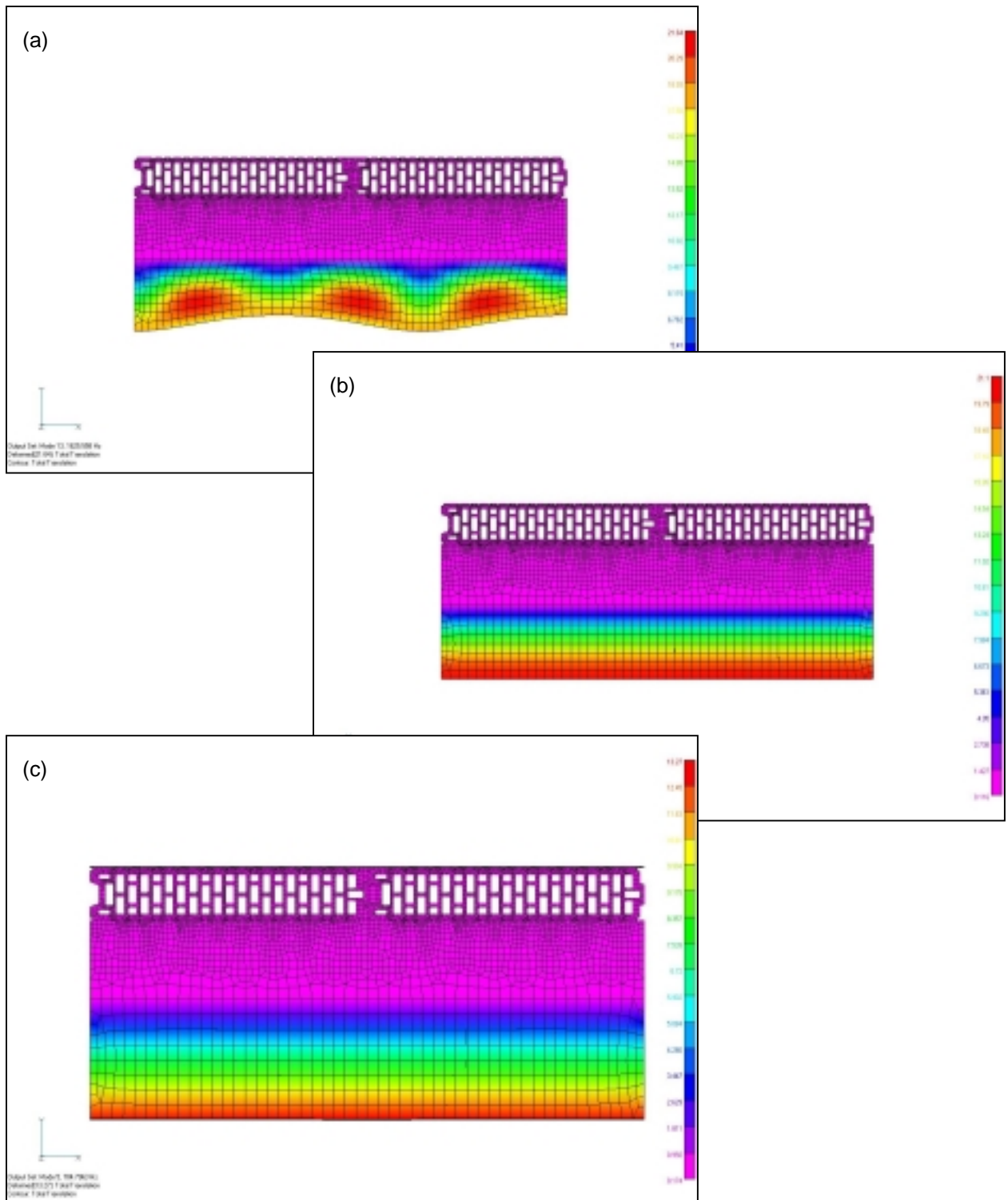


Abb. 5-25: Gesamtverschiebung bei Eigenfrequenzuntersuchung; (a) Längsschwingen bei z.B. 1630 Hz für Wandvariante 3; (b) Eigenfrequenz bei 1370 Hz für Wandvariante 3 und (c) Eigenfrequenz bei 790 Hz für Wandvariante 4.

6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

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

Nach der Durchführung einer Literaturrecherche werden übliche, aber auch unkonventionelle Einbindungsmöglichkeiten des Verbindungselementes in den Dämmstoff systematisch aufgearbeitet. Im nächsten Schritt werden wesentliche Elemente der Verbindung anhand von Versuchsaufbauten auf ihre Belastungsfähigkeit hin getestet, wobei wesentliche Parameter wie Schlussart, Material, Abmessungen und Belastungsgeschwindigkeiten variiert werden. Simultan zur praktischen Prüfung werden durch Simulation mit Hilfe der Methode der finiten Elemente die mechanischen Zusammenhänge bei der Belastung sowie beim Bruch analysiert. Als Eingabeparameter für die Simulationen dienen Kennwerte, welche an den verwendeten Materialien selbst durch Prüfung ermittelt werden. Im letzten Projektabschnitt werden Versuchswandaufbauten in Form eines Systems mit verloraener Schalung hergestellt. Die Prüfung der Wandaufbauten erfolgt durch Belastung aufgrund des Betondruckes bei Verfüllung, durch schalltechnische Untersuchungen anhand der Wandaufbauten sowie durch statische Analysen.

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 ausge dehnte 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 (Abb. 6-1). Die konstruktive Ausführung lässt eine Fülle an Möglichkeiten zu, welche in Kategorien eingeteilt werden können. Die Gliederung in Kraftschluss, Formschluss und Stoffschluss stellt die wichtigste Möglichkeit zur Kategorisierung konstruktiver Ausführungsvarianten dar.

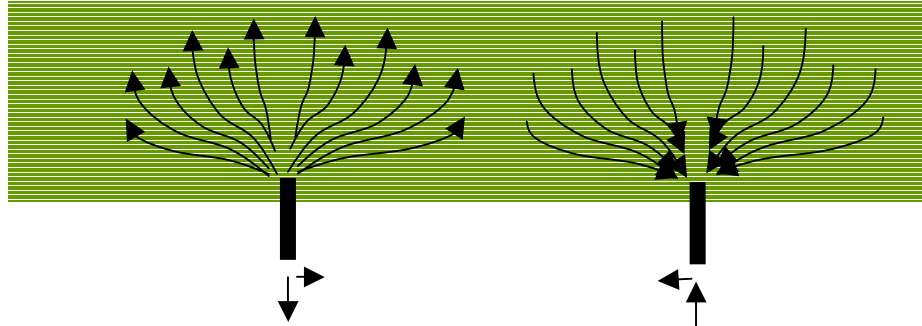


Abb. 6-1: Schematische Darstellung der Krafteinleitung in Dämmstoffsysteme.

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. In der Wahl der Untersuchungen wird auf eine breite Anwendbarkeit der Ergebnisse geachtet. Die Ergebnisse werden kontinuierlich mit theoretischen Ansätzen und Resultaten aus Simulationen verglichen.

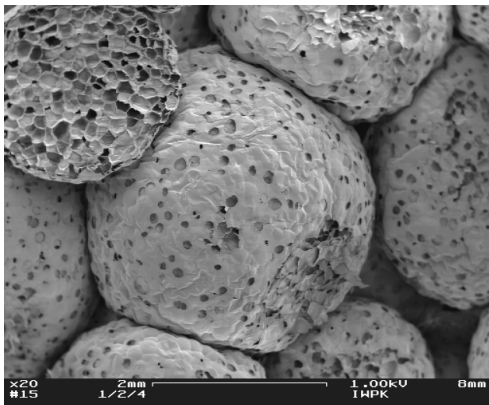


Abb. 6-2: Mikrostruktur eines Hartschaumdämmstoffes auf Basis von Polystyrol.

Der Bereich der praktischen Versuche 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. Untersuchungen der Mikrostruktur der Dämmstoffe dienen dem Verständnis der bruchmechanischen Eigenschaften. Es zeigt sich, dass die Fehlstellenstruktur und größere Partikelzwischenräume im Material deutliche Einflüsse auf die Festigkeit des Werkstoffes, jedoch sehr geringe Auswirkungen auf die Steifigkeit bewirken (siehe Beispiel Abb. 6-2).

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. In Abbildung 3 ist die Reduktion von verschiedenen Formschlussanwendungen auf die verwendete einfache Geometrie für Versuch und Simulation dargestellt. Gemeinsam mit den ermittelten Materialeigenschaften werden die Ergebnisse verwendet um einfache Modelle für die Auslegung zu entwickeln. Die Versuche zeigen, daß der Einfluß von Geometrieparametern das Niveau der Ausziehkräfte stark verändert. Das Erhöhen der Eindringtiefe in den Dämmstoff zeigt eine deutlich Vergrößerung der Ausziehkräfte, während eine höhere Anzahl an Platten, die als Formschluss wirken, keine Verbesserungen bringt. Diese Ergebnisse sind in Abb. 6-4 dargestellt.

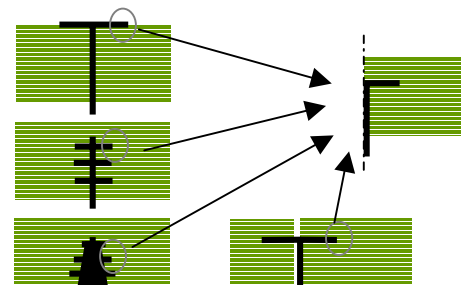


Abb. 6-3: Reduktion auf eine vereinfachte Geometrie am Beispiel des Formschlussverhaltens.

Das Auftreten von Bruchkegeln mit einer Neigung von 45° lässt ein Versagen zufolge Schub vermuten. Tatsächlich kann ein klarer Zusammenhang durch Berücksichtigung der Mantelfläche des unter der Kreisplatte eingeschlossenen Zylinders, der maximalen Ausziehkraft und der Schubfestigkeit des Materials gezeigt werden.

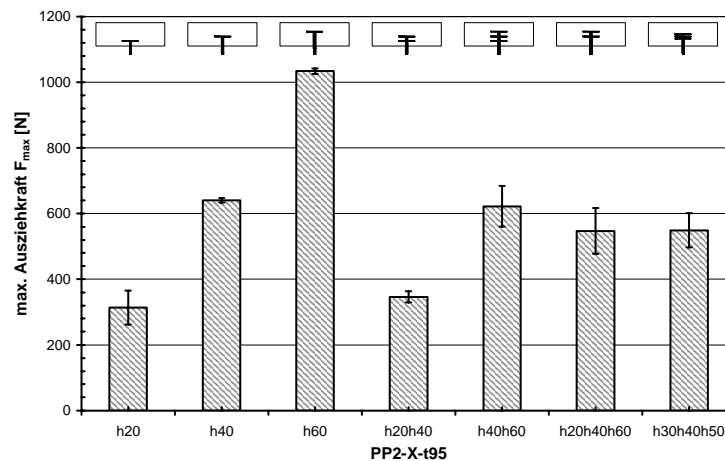


Abb. 6-4: Versuche mit 2-fach und 3-fach eingebrachter Platte, entsprechende Ausbruchkegel nach erfolgter Prüfung sowie Ergebnisübersicht.

Mit Hilfe der Simulation mittels der Methode der finiten Elemente ist es möglich Kraftflüsse und Spannungen für komplexe Geometrien und Materialmodelle zu analysieren. Ein einfaches Modell für den Formschluss, auf das viele Verbindungsvarianten reduziert werden können, wird dargestellt. Es zeigt sich Optimierungspotential durch Variation verschiedener durch die Konstruktion gewählter Parameter. Das gewählte Beispiel anhand des Formschlusselementes soll auf die Möglichkeiten dieses Ana-

lyseverfahrens aufmerksam machen. Die Gegenüberstellung von Simulation und Versuch ist in Abb. 6-5 dargestellt.

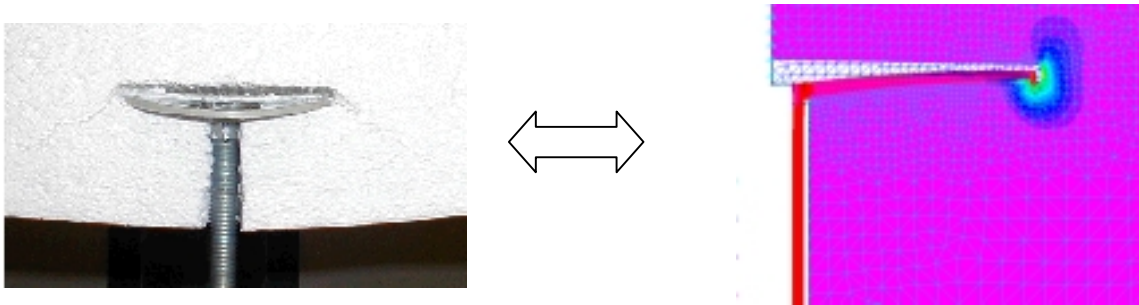


Abb. 6-5: Gegenüberstellung von Simulation und realem Versuch.

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. Die Ermittlung der Abminderungsfaktoren ist sowohl durch Versuche als auch durch die Simulation möglich.

Im Reibschlussversuch ergibt sich der Zusammenhang zwischen Druckfestigkeit und Reibbeiwert. Beim Einbringen von zylinderförmigen Stiften in den polymeren Schaum entsteht ein Halt durch die Druckkraft auf den Zylinder in Kombination mit den Reibbeiwerten der Materialien. Für die Versuche werden die Stiftmaterialien als auch die Dämmmaterialien und die Verweilzeiten im Dämmstoff variiert. Die Druckspannungen im Dämmstoff bauen sich aufgrund von Relaxationseffekten sehr schnell ab und können daher nur sehr kurz genutzt werden. Bei der Auslegung von Befestigungselementen für polymere Hartschäume ist daher eine zusätzliche Nutzung des Formschlusses immer anzustreben, da Reibeffekte nur kurzfristig wirksam bleiben. Eine widerhakenförmige Ausführung wird als Beispiel angeführt. Abbildung 6-6 zeigt die Darstellung von Messkurven und eine Abbildung des Versuchsaufbaus.

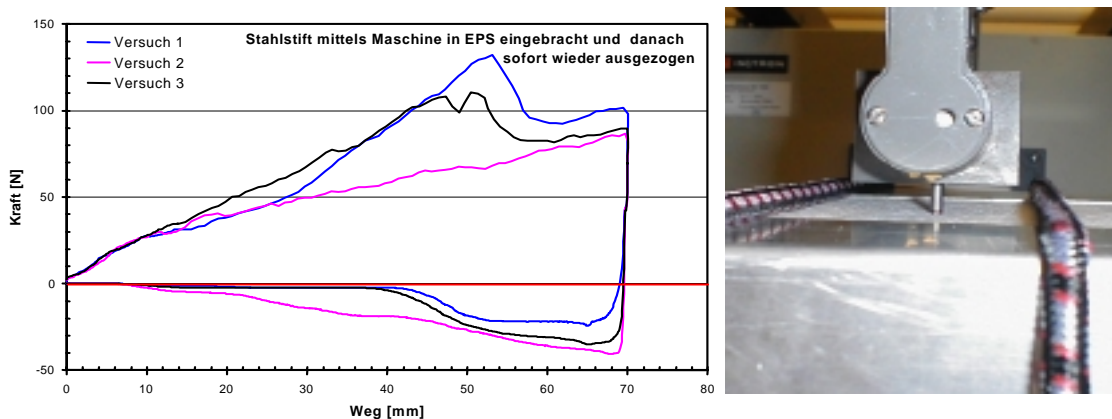


Abb. 6-6: Kraft-Wegkurven der durchgeführten Reibschlussversuche.

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

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. Bei Schraubverbindungen können nur zum Teil Erkenntnisse übertragen werden.

Unabhängig von den Bereichen der Konstruktion werden in einem gesonderten Kapitel die Anforderungen an Befestigungssysteme besprochen. Eigenlast, hygrothermische Belastungen, Windkräfte und Wärmebrücken sind hier die wesentlichen Themen. Um bestimmte Anforderungen bezüglich Betondruck und Schallschutz abzuklären werden Wandaufbauten untersucht. Für die Ermittlung des entstehenden Betondruckes bei Verwendung von Dämmstoff als verlorene Schalung wird im Verfüllversuch der Fülldruck gemessen. Die Belastung erfolgt durch eine geschosshohe Verfüllung. In den Ergebnissen zeigen sich massive Abweichungen von Angaben aus der Literatur. 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 werden analysiert und theoretischen Untersuchungen gegenübergestellt.

Bei der Durchführung dieses Forschungsprojektes wurde versucht möglichst allgemeingültige Erkenntnisse für mögliche Produkte zur Befestigung von Dämmstoffen zu finden. Bei der Auslegung einer neuen Befestigungsvariante soll auf die Ergebnisse und grundsätzlichen Zusammenhänge aufgebaut werden. Weitere Untersuchungen müssen auf das konkrete neue Produkt abgestimmt werden. In diesem Bericht wurde insbesondere auf die Fülle der Möglichkeiten zur Auslegung eines neuen Produktes hingewiesen. Die Fülle der dargestellten Varianten sollen den Konstrukteur inspirieren und dessen kreatives Potential fördern.

Dieses Forschungsprojekt wurde finanziert vom Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie.

7 ANHANG

7.1 Tabellenwerke für mechanische und thermische Eigenschaften

Das folgende Tabellenwerk erhebt weder Anspruch auf Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wurde mit größtmöglicher Sorgfalt erstellt.

Tabelle 7-1: Übersicht über verschiedene Moduli

Material	Dichte kg/m ³	Kurzzeitzug-E-Modul		Kurzzeitzug-E-Modul (aus Versuchen)		Kurzzeitdruck-E-Modul		Langzeitdruck-E-Modul		Langzeit-Bettungsmodul		Dynamische Elastizitätsmodule		G-Modul		Biegemodul (aus Versuchen)	
		DIN 53430 MPa	MPa	DIN 53421 MPa	MPa	DIN 18134 MPa	MPa	DIN 53427 MPa	MPa	DIN 53427 MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
SCHÄUME																	
EPS	15	2,3-4,4	7,3±0,1	1,6-4,2	k.A.										2,4-4,3	5,9±0,2	
	20	3,7-5,8	10,7±0,2	3,7-5,8	k.A.										4,4-6,2	7,7±0,3	
	25		13,0±0,3									1,2					
	30	6,5-8,6	16,9±0,3	7,4-9,8	k.A.										8,3-10,1	13,3±0,7	
	50	12-14		16-18													
XPS-R035	35		17,5±0,3													15,1±0,2	
XPS / CO2	<30	6,0-10		15	3	0,167-0,042											
	30-45			20	5	0,300-0,075											
	35-45	32		30	9	0,417-0,104											
PUR-Hartschaum	>45	54		40	12,5												
	30-40											0,35					
EPS Weizenbehandelt												0,2					
Vermiculite-Schüttung												2,6					
Blähkork												6,5					
Korkschröft-Matten	80-200											1					

Tabelle 7-2: Zug-, Scher- und Biegefestigkeiten

Zug-/Scher-/Biegefestigkeiten										
Material	Dichte		Zugfestigkeit		Zugfestigkeit (aus Versuchen)		Scherfestigkeit		Biegefestigkeit	
	Norm	DIN 53430	MPa		MPa	%	DIN 53427	MPa	DIN 53423	MPa
	kg/m ³									MPa
										Biegefestigkeit (aus Versuchen)
										%
SCHÄUME										
EPS	15	0.1-0.24	0.125±0.009	2.2±0.2	0.09-0.12	0.12-0.25	0.133±0.004	4.4±0.5		
	20	0.13-0.32	0.144±0.008	1.5±0.1	0.12-0.15	0.20-0.33	0.158±0.001	2.4±0.2		
	25	0.2-0.41	0.178±0.008	1.7±0.1	0.15-0.19	0.32-0.40	0.225±0.007	2.9±0.2		
	30	0.2-0.52	0.189±0.02	1.4±0.1	0.19-0.22	0.37-0.50	0.256±0.005	2.2±0.1		
	35		0.476±0.006	5.3±0.1			0.530±0.009	21.5±1.9		
XPS-R035	<30	0.35-0.6								
PUR-B2	32	0.25			0.12	0.3				
	40	0.3			0.17	0.45				
	50	0.45			0.25	0.55				
	60	0.55			0.28	0.7				
	80	0.8			0.38	1				
	100	1			0.5	1.2				
PUR-B3	145	1.1			0.7	2.6				
	32	0.26			0.15	0.28				
	40	0.34			0.18	0.4				
	50	0.5			0.23	0.55				
	200	2			1.1	3.5				

Tabelle 7-3: Druckfestigkeiten

Druckfestigkeiten				
Material	Dichte	Druckfestigkeit Drucksp bei 10 % Stauchung	Zulässige Dauerdruckspannung Stauchung <2%, 20 Jahre	bei Verkehrslasten
	Norm kg/m ³	DIN 53421 MPa	prEN 1606 MPa	MPa
	SCHÄUME			
EPS	15	0.06-0.10	0.025	k.A.
	20	0.11-0.14	0.04	k.A.
	25	0.14-0.20	0.05	
	30	0.20-0.24	0.07	k.A.
XPS / CO2	28-35	0.25-0.5		
	<30	0.2	0.06	0.09
	30-45	0.3	0.1	0.13
	35-45	0.5	0.18	0.23
	>45	0.7	0.25	0.3
PUR-B2	32	0.22		
	40	0.3		
	50	0.4		
	60	0.5		
	80	0.7		
	100	0.95		
	145	2		
PUR-B3	32	0.21		
	40	0.26		
	50	0.4		
	200	2.5		

Tabelle 7-4: Bruchmechanische Kennwerte

Bruchmechanische Kennwerte				
Material	Dichte	Rißspitzenfestigkeit	K_{Ic} (aus Versuchen)	G_{Ic} (aus Versuchen)
	Norm kg/m ³	MPa	N/mm ^{3/2}	J/m ²
SCHÄUME				
EPS	15	0.033-0.037	0.76 ± 0.06	85 ± 13
	20	0.035-0.041	0.82 ± 0.08	66 ± 15
	25	0.045-0.049	0.99 ± 0.05	82 ± 8
	30	0.046-0.050	1.02 ± 0.11	70 ± 1
XPS-R035	35		2.46 ± 0.15	427 ± 45
XPS / CO2	<30	0.110-0.120		

Tabelle 7-5: Dynamische Kennwerte

Material	Dichte	dyn. E-Modul	c	η
	kg/m ³	MPa	m/s	-
BAUSTOFFE				
Stahlbeton				
Magerbeton	2000	15000	2700	
Leichtbeton	800 - 1400	1500 - 3000	1200 - 1700	0.015
Porenbeton, Gasbeton	600 - 700	1400 - 2000	1400 - 1700	0.01
Zementestrich	2200	30000	3700	
Gipsestrich	1200	20000	4000 - 4100	0.06
Gipsplatten	1000 - 1200	3500 - 7000	1900 - 2600	0.004
Gipskartonplatten	1000	3200	1800	0.03
Ziegelmauerwerk	1700 - 1800	6000 - 14000	1900 - 2800	0.04
Sand, mitteldicht	1400	60 - 150	210 - 330	
Kies	1600	300 - 450	430 - 530	
Glas	2500	(6-8)·10 ⁴	4900 - 5700	0.001
Holzspanplatten	600 - 1000	2000 - 5000	1750 - 2750	0.03
Sperrholz	600 - 800	5000 - 12000	1800 - 3900	0.02
Eichenholz	700	200 - 1000	1500 - 3500	0.01
Fichtenholz	480	100 - 500	1450 - 3200	0.01
Hartfaserplatten	1000	3000 - 4500	1700 - 2100	0.015
DÄMMSTOFFE				
Weichfaserplatten	200 - 300	10 - 16		
Holzwohle-Leichtbauplatten	600 - 700	100 - 200	1500 - 1900	0.08
Mineralfaserfilz	60 - 80	0.13 - 0.16		
Mineralfaserplatten	80 - 130	0.15 - 0.2 (max. 0.4)		
Koksfasermatten	k.A.	0.25		
Koksfaserrollfilz	k.A.	0.35		
Torrfaserplatten	k.A.	2.1		
Textilfaserplatten	k.A.	1.9		
Korkschröff-Schüttung	80 - 200	1.6		
Naturkork	230 - 280	15 - 25		
Schaumglas	130 - 160	1300 - 1600		
Polystyrolschaum	9 - 12	0.6 - 0.12		
	12 - 15	01.02.2002		
	15 - 20	2 - 4		
	20 - 25	4 - 8		
	25 - 30	8 - 30		

Material	Dichte	dyn. E-Modul	c	η
	kg/m ³	MPa	m/s	-
Polystyrolschaum gewalzt oder stark gestaucht		0.6 - 0.8		
Luft 20°	1.2	0.14	343	
Luft zwischen Fasern	1.2	0.10 - 0.12		
KUNSTSTOFFE				
Acrylgas	1200	5600	2200	0.2 - 0.6
Polypropylen	1100	3000	1700	0.1
Polyester	1200	4500	1950	0.14
Polyvinylchlorid hart	1300	2700	1450	0.04
Gummi hart	1100	2300	1450	
Gummi Sh A 65	1200	15	120	0.12
Gummi Sh A 55	1200	10	90	0.08
Gummi Sh A 40	1000	5	70	0.04
Naturkautschuk	1000	5	70	0.04
METALLE				
Aluminium	2700	74000	5200	$7 \cdot 10^{-5}$
Blei	11400	18000	1300	0.02
Kupfer	8900	125000	3700	0.001
Messing	8500	69000	3400	$5 \cdot 10^{-4}$
Stahl	7800	206000	5100	$1 \cdot 10^{-4}$
Gußeisen	7500	170000	170000	4750
SONSTIGE				
Luft 20° C	1.2	0.14	343	
Luft zwischen Fasern	1.2	0.10 - 0.12		
Wasser 20° C	1000		1484	
Argon 20° C	1.6		319	
Xenon 20° C	5.68		170	

Tabelle 7-6: Thermische Eigenschaften

therm. Eigenschaften						
Material	Dichte	Wärmeleitfähigkeit /Meßwerte	Wärmeleitfähigkeit /Rechenwerte	Wärmeleitfähigkeit /Literatur	thermischer Ausdehnungs- koeffizient	spez. Wärme
	Norm kg/m ³	W/mK	J/kgK	W/mK	1/K	kJ/(kgK)
SCHÄUME						
EPS	15	0.036-0.038	0.04	0.0366-0.0382		
	20	0.033-0.036	0.04	0.034-0.0356	5.00E-05	1.21
	25	0.032-0.034		0.0318-0.0333	bis	
	30	0.031-0.033	0.035	0.0307-0.0324	7.00E-05	
	50	0.030-0.032				
XPS / HFCKW	28 - 35	0.027	0.03	0.027		
XPS / CO2	28-35		0.035	0.032-0.036		
	<30				längs	
	30-45				8.00E-05	
	35-45				quer	
	>45				6.00E-05	
PUR-Hartschaum	30-40	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			
PUR-B3	145	0.0308	0.025			
	32	0.023	0.025			
	40	0.0233	0.025			
	50	0.0236	0.025			
	200	0.037	0.025			
Bläperlit	70-210	0.05				
Korkschröf-Matten	80-200	0.045-0.05				
FASERDÄMMSTOFFE						
Glasfaserrollfilz		0.035-0.040				
Steinwollerollfilz		0.035-0.040				
Kokosfasermatten		0.045				
Holzwolle Leitbauplatte	60-570	0.09-0.15				
Holzfaserdämmplatten	270	0.045-0.06				
Zelluloseflockenmatten	35-80	0.045				
SONSTIGE						
Korkschröf-Schüttung	80-200	0.045-0.05				
Leichtbeton		1.4				
Holz Senkr.zur Faser		0.17				

7.2 Literaturverzeichnis

[1] Dämmstoffe – Märkte und Trends

- [1.1] Hasemann, W.; Weltring, R.: Kunststoffe im Bauwesen – Innovation trotz Rezession. Bauwesen, Jahrg. 89 (1999) 2.
- [1.2] Eicke-Hennig, W.: Neue Dämmstoffe – (k)eine Alternative? Elektrowärme international; Heft A4 Dez. 1997.
- [1.3] Setzler, W.: 1957-1997 40 Jahre Praxiserfahrung mit Wärmedämm-Verbundsystemen. Bauphysik 20 (1998), Heft 1.
- [1.4] Seemann, A. u.a.: Energetische Verwertung oder thermische Behandlung zur Beseitigung. EP 3/97.
- [1.5] Autor unbek.; verschiedene Quellen: Dämmstoff in Hülle und Fülle, www.bau-online.at (Feb. 2000).
- [1.6] Verpackungszentrum Graz: Projekt Alginsulat Schaumstoff.
- [1.7] Fischer, M.: Gesundheitliche Bewertung künstlicher Mineralfasern und ihrer Alternativen. Deutsches Umweltbundesamt, Institut für Wasser-, Boden- und Lufthygiene.
- [1.8] Dettling, F.: Neue Erkenntnisse im Hinblick auf emissionsarme Produkte und Alternativen. Bundesamt Berlin.
- [1.9] Doppler, C. W.: Wie dick dämmen wir morgen? Baugewerbe 9/99.
- [1.10] Sepp, P.; Knackstedt, J.: Keine Angst vor dicken Dämmungen. Das Dachdecker Handwerk, 115 (11), 1994 20-28.

[2] Dämmstoffe und ihre Eigenschaften

- [2.1] Gausepohl, H.; Gellert, R.: Polystyrol. Kunststoff Handbuch 4; S.563-715; Hanser 1996.
- [2.2] Phillipp, W.: Schäumbares Polystyrol. Kunststoffe 88 (1998) 10, Hanser-Verlag, München.
- [2.3] Teun van Dorp: Eigenschaftsprofil und Anwendungsübersicht EPS.VDI, München, 1993.
- [2.4] Ruckdeschel, B.; Boy, E.: Expandierte und extrudierte Hartschaumstoffe aus Polystyrol; Herstellung – Eigenschaften – Anwendungen. Konferenz-Einzelbericht, Würzburg, 1997.
- [2.5] Doppler, C. W.: Niedrigenergiehäuser unter Verwendung des Dämmstoffes Styropor. Das Bauzentrum 9/96.

- [2.6] Koetzing, P.: EPS/PPE- Partikelschaum – Einstellbare Schaumdichte schafft konstruktiven Spielraum. Kunststoffe 85 (1995) 12.
- [2.7] Arora, K. A.: Compressive Behavior of Microcellular Polystyrene Foams Processed in Supercritical Carbon Dioxide. Polymer engineering and science, Dec. 1998.
- [2.8] Krabbes, J. Lebenswegbilanz von EPS-Dämmstoffen. Isoliertechnik 3 95.
- [2.9] Naji B.: Impact-echo response in ferrocement-polystyrene beaded concrete laminates
- [2.10] Anonym: Innovationspotential der Polyurethane. Kunststoffe 87 (1997) 9.
- [2.11] Demharter, A.: Konstruktionsdämmstoffe aus Polyurethan-Hartschaum. Konferenz-Einzelbericht, München 1996.
- [2.12] Anonym: Extruded foam waste eyed as building material, Modern Plastics international, Oct. 1990.
- [2.13] Schmidt, H.U.: Dämmplatten aus pentangetriebenen PIR-Hartschäumen. Kunststoffe Jahrg. 89 (1999) 2.
- [2.14] Gausepol, Herman Dr.; Gellert, Roland Dr.; et. at.: Polystyrol-Kunststoff Handbuch 4, Hanser Verlag, S.621 - Tabelle 15.2
- [2.15] Gausepol, Herman Dr.; Gellert, Roland Dr.; et. at.: Polystyrol-Kunststoff Handbuch 4, Hanser Verlag, S.628 - Tabelle 15.5
- [2.16] Gausepol, Herman Dr.; Gellert, Roland Dr.; et. at.: Polystyrol-Kunststoff Handbuch 4, Hanser Verlag, S.636 - Tabelle 15.8
- [2.17] BASF PLASTIC: STYROPOR - Technische Informationen, Ludwigshafen, CD-Rom Edition 1998, S. 97 Abbildung 2
- [2.18] Bartsch, Hans-Jochen: Taschenbuch mathematischer Formeln, 14. Auflage, Fachbuchverlag Leipzig, 1991, S.539
- [2.19] ÖNORM EN 1608: Wärmedämmstoffe für das Bauwesen - Bestimmung der Zugfestigkeit in Plattenebene, 1.Februar 1997
- [2.20] DIN 53430: Prüfung von harten Schaumstoffen – Zugversuch, September 1975
- [2.21] DIN 53423: Prüfung von harten Schaumstoffen – Biegeversuch, November 1975
- [2.22] DIN 53420: Prüfung von harten Schaumstoffen – Druckversuch, Juni 1984
- [2.23] Gausepol, Herman Dr.; Gellert, Roland Dr.; et. at.: Polystyrol-Kunststoff Handbuch 4, Hanser Verlag, S.625 - 629

- [2.24] Blumenauer, Horst; Pusch, Gerhard: Technische Bruchmechanik, 1. Auflage , Springer Verlag, Leipzig 1982, S.95-103.
- [2.25] Towers O.L.: Tests for fracture toughness and fatigue assessment: a compilation of stress intensity, compliance, and elastic η factors, The Welding Institute, Abington Hall, Abington, Cambridge CB1 6AL , 1985
- [2.26] Parkus, Heinz: Mechanik der festen Körper, 2. Auflage, Springer-Verlag Wien NewYork, 1981, S. 256 ff (XIV,16)
- [2.27] BASF PLASTIC: STYROPOR - Technische Informationen, Ludwigshafen, CD-Rom Edition 1998, S. 90 Abbildung 2
- [3] Befestigungstechnik - Literatur
- [3.1] Pätzold, H.: Befestigungstechnik. Der Stuckateur 4/90.
- [3.2] Block, K.: Neuartige Befestigungen für Wärmedämm-Verbundsysteme.
- [3.3] Schäfer, H. G.: Zum Standsicherheitsnachweis von Wärmedämmverbundsystemen mit Klebung und Verdübelung. Bauphysik 12(1990), H. 4.
- [3.4] Michel, Wilhelmn: Wärmedämm-Verbundsysteme standsicher befestigen. Bauhandwerk, 18(9), (1996) 60-61.
- [3.5] Tiemann, J.; Vedder, J.: Sicherer Rueckhalt. Stuck Putz Trockenbau, 12, (1997) 16-21.
- [3.6] Semmler, M.: Für den Dübel kommt´s dicker. Bautenschutz Bausanierung, 22(1), (1999) 36-37.
- [3.7] Röttschke, H.: Zum Einsatz kam mechanisch befestigtes Wärmedämmverbundsystem. Modernisierungs-Magazin 9/98.
- [3.8] Autor unbek.: Die Revolution bei der Dämmplattenmontage. Österreichische Bauzeitung, Nr. 46, (1998)21.
- [3.9] Autor unbek.: Dämmung auf problematischen Untergründen. Zentralblatt für Industriebau, 32(2), (1986) 107-108.
- [3.10] Moegenburg, G.: Befestigungsmittel zwischen Bekleidung und Unterkonstruktion. Fassadentechnik 5/97.
- [3.11] Reuter, M., München: Verankerung von Fassadenkonstruktionen. Aktueller Stand und Entwicklung. Das Bauzentrum, 47(4), (1999) 80-86.

- [3.12] Projektgruppe „Rückseitige Befestigung von Fassadenplatten mit Dübeln“: SVA Verankerungen und Befestigungen. Mitteilungen - Deutsches Institut für Bautechnik, 29(3), (1998) 69-70.
- [3.13] Kluge, U.: Hinterschnittdübel für Fassadenplatten. Fassadentechnik 6/98.
- [3.14] Schuldt, C.; Schadwinkel, H.: Verankerung von Fassadensystemen. Befestigungsmöglichkeiten wärmedämmender Fassadenbekleidungen an Außenwandelementen der Grosstaffelbauweise. Bausanierung, 4(4), (1993) 350-352.
- [3.15] Autor unbek.: Dämmstoffhalter. Stand: Februar 1998. Fassadentechnik, 4(2), (1998) 48-50
- [3.16] Ramm, W.: Neuartiges Verbundsystem für dreischichtige Außenwandplatten aus Stahlbeton.
- [3.17] Schäfer, H. G.: Wirkungsweise der Dübel in Wärmedämm-Verbundsystemen. das bauzentrum, 4/96.
- [3.18] DIN 1055-4 (8/86) Lastannahmen für Bauten; Verkehrslasten, Windlasten bei nicht schwingungsanfälligen Bauwerken.
- [3.19] Cziesielski, E.: Neue Erkenntnisse zu Windlast-Einwirkungen auf Hinterlüfete Außenwandbekleidungen. IBK-Baufachtagung, Nov. 1995.
- [3.20] Achtziger, J.: Neue Erkenntnisse über den Wärmebrückeneinfluß von Wärmedämmstoffhaltern und Verankerungen. IBK-Baufachtagung, Nov. 1995.
- [3.21] Achtziger, J.: Neue Erkenntnisse über den Wärmebrückeneinfluß von Wärmedämmstoffhaltern und Verankerungen. IBK-Baufachtagung, Nov. 1995.
- [3.22] Hütte Bautechnik. Band III, Taschenbücher der Technik; 29. Auflage.
- [3.23] Doka Bemessungshilfen. Doka Industrie-GmbH; 06/97.
- [4] Befestigungstechnik - Patente
- [4.1] Holzinger, A.; Einrichtung zur Befestigung von Wärmedämmplatten an Wänden, Decken u. dgl. Patent AT 404 271, 1996.
- [4.2] Schugk, W.: Halter zur unsichtbaren Befestigung von Fasermatten oder Faserplatten, Pat. CH 657 652 A5, 1996.
- [4.3] Wüthrich, H.; Montagevorrichtung für die Befestigung leichter Bauteile, Pat. WO95/33899.
- [4.4] Van Loghem, J.: Building constructions, Patent US4400925; 1983.
- [4.5] Brawn, M.: A jointing system, Patent EP0286417; 1988.

- [4.6] Suzor, Y.: Fixing insulation on building surface, Patent GB2321261, 1996.
- [4.7] Petzold, R.: Insulation fixing device for railway wagon box. Patent DE19533532, 1997.
- [4.8] Schock, E.: Building element for thermal insulation of buildings, Patent EP0117897, 1984.

[5] Verlorene Schalung

- [5.1] Arora, S.: Energy-efficient in-situ concrete housing using EPS permanent formwork, Garston (UK) BRE.1998, Report no. 347, ISBN: 1-86081-231-7, Imperial College.
- [5.2] British Board of Agreement: Keps insulating permanent formwork. Watford, 1992.
- [5.3] British Board of Agreement: Epsicon expanded polystyrene permanent formwork. Watford 1986.
- [5.4] Autor unbek.: Prinzip Lego. Bau Beratung Architektur - bba, 1-2/1999.
- [5.5] Produktunterlagen: System Kern-Haus, Kern-Bauträger GmbH, Ransbach-Baumbach.
- [5.6] Autor unbek.: Perfekter Betonschutz als verlorene Schalung. Kunststoffe im Bau 1983, Heft 2.
- [5.7] Giersig, F.: Mantelbausystem aus expandiertem Polystyrol. Betonwerk und Fertigteil-technik, 60(2), (1994) 106-108,110.
- [5.8] Becker, H.: Bautechnik Band III, Baumaschinen, Schalung, Rüstung. Hütte Taschenbücher der Technik, 29. Aufl., Springer-Verlag, 1977.
- [5.9] ÖNORM B 3208: Mantelsteine, Anforderungen und Prüfungen. Ausgabe 1999-06-01.
- [5.10] Produktunterlagen: Doka Bemessungshilfen. 06/97 NK/ö.
- [5.11] Grube, H.; Rickert, J.: Selbstverdichtender Beton – ein weiterer Entwicklungsschritt des 5-Stoff-Systems. Beton 4/99.
- [5.12] Autor unbek.: Komplizierte Formen mit selbstverdichteten Beton. Schalung aktuell 2/99.
- [5.13] Pürrer, E.: SCC – die Chance für neue Qualität von Sichtbeton? Schalung aktuell 4/99.

[6] Schallschutz

- [6.1] Kurz, R.: Außenbauteile in Massiv- und Skelettbauweise, Schallschutz, Längsleitung und Schutz gegen Außenlärm. Winnenden, BmK 6/94 Baukonstruktion, Bauphysik.

[6.2] Gamerith, H.: Schallschutz-Akustik, Institut für Hoch- und Industriebau, TU-Graz

7.3 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1-1: Konzept für die Vorgehensweise – praktischer Teil.....	1
Abb. 1-2: Grundlegende Einflussgrößen bei der Auslegung einer Konstruktion.	2
Abb. 2-1: Einschraublösung; Fig. 2 aus Pat. AT 404 271.....	8
Abb. 2-2: Widerhakensystem für Faserplatten oder -matten; Pat. CH 657 652.	8
Abb. 2-3: Befestigungselement für Gegenstände an Wände; Pat. WO95/33899.	9
Abb. 2-4: Wärmebrückenfreie Befestigung zweier Holzschalen mit dazwischen liegendem Dämmelement; Pat. US4400925.....	9
Abb. 2-5: Verschiedene am Markt eingesetzte Befestigungssysteme für Dämmstoffe.....	12
Abb. 2-6: Schematische Darstellung der Krafteinleitung in Dämmstoffsysteme.	12
Abb. 2-7: Schematische Darstellung einiger bestehender Ausführungsvarianten für die mechanische Krafteinleitung in Dämmstoffsysteme.	13
Abb. 2-8: Schematische Darstellung: a.) punktförmige; b.) linienförmige; c.) flächige Krafteinleitung.....	14
Abb. 3-1: Probekörper für den Zugversuch.	15
Abb. 3-2: Versuchsaufbau für den Zugversuch.	16
Abb. 3-3: Darstellung der Spannungs/Dehnungs-Verläufe des Zugversuchs für EPS unterschiedlicher Dichte.	18
Abb. 3-4: Vergleich der Spannungs/Dehnungs-Verläufe des Zugversuchs für EPS und XPS gleicher Dichte.....	20
Abb. 3-5: Zusammenhang zwischen (a) Dichte und äquivalenten Modul von EPS bzw. (b) zwischen Dichte und Zugfestigkeit von EPS.....	20
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.	21

Abb. 3-7: Gegenüberstellung der Ergebnisse aus dem Zugversuch mit Analysen mittels Methode der finiten Elemente.	22
Abb. 3-8: Versuchsaufbau für den Biegeversuch	23
Abb. 3-9: Darstellung der Spannungs/Dehnungs-Verläufe des Biegeversuchs für EPS unterschiedlicher Dichte.	25
Abb. 3-10: Vergleich der Spannungs/Dehnungs-Verläufe des Biegeversuchs für EPS, XPS gleicher Dichte und Kork.	25
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.	26
Abb. 3-12: Zusammenhang (a) zwischen Dichte und Biege-Modul von EPS bzw. (a) zwischen Dichte und Biegefestigkeit von EPS.....	26
Abb. 3-13: Vergleich zwischen Messung und Berechnung für den Biegeversuch.	27
Abb. 3-14: (a) Links ist ein Überblick über den Versuchsaufbau dargestellt, (b) rechts sind die verwendeten Querdehnungsaufnehmer dargestellt.	28
Abb. 3-15: Darstellung des SENT (a); des CCT (b) und des SENB3 (c) Probekörpers.....	29
Abb. 3-16: Versuchsaufbau für Risszähigkeitsuntersuchung	30
Abb. 3-17: Darstellung eines Kraft-Weg Verlaufes mit der Rissbildungsarbeit U.....	32
Abb. 3-18: Exemplarische Kraft/Weg Verläufe für je einen Versuch der fünf Hartschaumtypen.	33
Abb. 3-19: Aufnahmen einer XPS SENT Probe beim kurzzeitigen Stoppen des Risswachstums und den damit verbunden erneuten Kraftanstieg.	33
Abb. 3-20: Zusammenhang zwischen Dichte und Risszähigkeit K_{IC} für EPS.....	35
Abb. 3-21: Zusammenhang zwischen a/W und K_{IC} für SENT Probenkörper aus EPS-W30. Zum Vergleich wird das Ergebnis für einen CCT Probekörper aus dem gleichen Hartschaum dargestellt.	36
Abb. 3-22: Bruchverhalten für zwei SENB3 Proben mit unterschiedlicher Rissgeometrie.....	37
Abb. 3-23: Darstellung von F_{max} über der Risslänge für unterschiedliche Rissformen bzw. – längen.....	38

Abb. 3-24: Gegenüberstellung der Ergebnisse mit den Analysen mittels der Methode der finiten Elemente für SENT-Probekörper.	38
Abb. 3-25: Gegenüberstellung der Ergebnisse mit den Analysen mittels der Methode der finiten Elemente für CCT-Probekörper.....	39
Abb. 3-26: Gegenüberstellung der Ergebnisse mit den Analysen mittels der Methode der finiten Elemente für SENB3-Probekörper.	39
Abb. 3-27: Darstellung der Wärmeleitfähigkeit für EPS in Abhängigkeit von der Rohdichte [2.17].....	41
Abb. 3-28: Aufnahmen der Bruchflächen für Probekörper aus den bruchmechanischen Untersuchungen mittels Lichtmikroskop; ca. 10-fache Vergrößerung.	44
Abb. 3-29: Überblick über den mittels REM untersuchten Probekörper für EPS-F.	45
Abb. 3-30: Überblick über den mittels REM untersuchten Probekörper für EPS-W20.....	46
Abb. 3-31: Überblick über den mittels REM untersuchten Probekörper für EPS-W25.....	47
Abb. 3-32: Überblick über den mittels REM untersuchten Probekörper für EPS-W30.....	48
Abb. 3-33: Überblick über den mittels REM untersuchten Probekörper für XPS-R035.	49
Abb. 3-34: Überblick über den mittels REM untersuchten Probekörper für Kork.	50
Abb. 3-35: Überblick über den mittels REM untersuchten Probekörper für Steinwolle.	51
Abb. 3-36: Überblick über den mittels REM untersuchten Probekörper für Beton K4.....	52
Abb. 4-1: Reduktion möglicher Befestigungssysteme auf eine einfach zu beschreibende charakteristische Geometrie sowie schematische Darstellung der Kräfteverhältnisse.....	53
Abb. 4-2: Schematische Darstellung des Probekörpers für den Formschlussversuch, tellerförmiges Formschlusselement sowie dem notwendigen Fräskopf für die Herstellung.	54
Abb. 4-3: Beispiele für Probekörper gedacht für einfachen (a), zweifachen (b) oder dreifachen (c) Formschluss.....	54
Abb. 4-4: Allgemeiner Versuchsaufbau für Ausziehversuch mit Formschlussgeometrie.	55

Abb. 4-5: Bruchverhalten der Hartschäume beim Formschlussversuch. Linke Abbildung zeigt typische Rissbildung erkennbar durch geringe Frästiefe, rechts ist der Bruchkegel einer geprüften Probe zu sehen.	56
Abb. 4-6: Darstellung der Vorversuche für unterschiedliche Ausziehgeschwindigkeiten für zwei Frästiefen; Kurvenverlauf bis zum Höchstwert der Ausziehkraft.	56
Abb. 4-7: Zusammenhang zwischen Frästiefe und maximal auftretender Ausziehkraft.	57
Abb. 4-8: Bilder der verschiedenen Auflager für den Formschluss: (a) Normal(N)-Auflager durch Eisengehänge, (b) Auflager mit zusätzliche Winkel W um Biegung zu verhindern und (c) Auflager mit zusätzlicher Holzplatte und Schaumstoff mit Öffnung in der Mitte für Gewindestange soll Betondruck B simulieren.	58
Abb. 4-9: Gemittelte Kurvenverläufe für PP2-hXX-t95-X in EPS-W30 um den Einfluss der Ausziehhöhe h und der Auflagerbedingungen zuzeigen.	60
Abb. 4-10: Gemittelte Kraft/Weg-Verläufe für PP2-hXX-t95-W in EPS-W25.	61
Abb. 4-11: Maximale Ausziehkraft für PP2-hXX-t95-X in (a) EPS-W30 bzw. (b) EPS-W25 über der Ausziehhöhe h.	62
Abb. 4-12: Darstellung der (a) gemittelten Kraft/Weg-Verläufe und (b)maximale Ausziehkraft über der Plattensteifigkeit für XXX-h40-t95-N in EPS-W30.	64
Abb. 4-13: Gemittelte Kurvenverläufe für PP2XX-h40-t95-N in EPS-W30 mit unterschiedlichen Außendurchmesser der Kreisplatten bei gleichbleibenden Fräsdurchmesser von 70 mm.	65
Abb. 4-14: Gemittelte Kurvenverläufe für PP2XX-h40-t95-N in EPS-W25.	66
Abb. 4-15: Gemittelte Kurvenverläufe für PP2-h40-t95-N bzw. ST2-h40-t95-N in Hartschäumen unterschiedlicher Dichten.	67
Abb. 4-16: Max. Ausziehkraft über der Dichte für PP2-h40-t95-N und ST2-h40-t95-N in unterschiedlichen EPS-Typen.	68
Abb. 4-17: Kraft pro Dichte über Weg der Mittelwertkurven für (a) ST2-h40-t95-N und (b)PP2-h40-t95-N in EPS unterschiedlicher Dichten.	68
Abb. 4-18: Vergleich der max. Ausziehkraft für verschiedene Varianten des einfachen und mehrfachen Formschlusses EPS-W30.	70

Abb. 4-19: Vergleich der max. Ausziehkraft für verschiedene Varianten des einfachen und mehrfachen Formschlusses EPS-W25.	70
Abb. 4-20: (a) Detailaufnahme eines einfachen Formschlusssystem während eines Versuches und (b) Skizze des Formschlusses und der für die Berechnung der Schubfestigkeit benötigten Mantelfläche A_M	71
Abb. 4-21: Spannungsüberhöhung S_F für Variationen in der Kreisplatte, der Ausziehhöhe, der Auflagebedingungen und der Hartschaumtypen.....	72
Abb. 4-22: Vereinfachtes Berechnungsmodell für den Formschluss.....	73
Abb. 4-23: Modellierung des Formschlussversuchs durch (a) 3D-Halbmodell und (b) axisymmetrisches Modell.	74
Abb. 4-24: Vergleich zwischen Messung und Simulation mit linear elastisch angenommenen Dämmstoffverhalten.	75
Abb. 4-25: Maximale Normalspannung für axisymmetrisches und 3D-halb Modell.	75
Abb. 4-26: Gegenüberstellung zwischen Rissbildung beim Versuch mit den an dieser Stelle wirkenden Hauptnormalspannungen.	76
Abb. 4-27: Zeigt (a) idealisiertes Materialverhalten bei einachsiger Belastung und (b) elastisch-plastisches Modell der erneuten FEM-Berechnung.....	77
Abb. 4-28: Vergleich zwischen Messung und Simulation mit elastisch-plastisch angenommenen Dämmstoffverhalten.	77
Abb. 4-29: Maximale Normalspannung für axisymmetrisches und 3D-halb Modell bei elastisch-plastischen Materialverhalten.	78
Abb. 4-30: Ergebnisse für unterschiedliche Kreisplattensteifigkeiten.....	79
Abb. 4-31: Darstellung der Kräfte an einem im Dämmstoff eingebrachten Stift.....	80
Abb. 4-32: Versuchsaufbau für die Reibschluss hysterese.	80
Abb. 4-33: Kraft/Weg Verläufe für drei einfache Reibschlusszyklen.	81
Abb. 4-34: Versuchsaufbau für den Reibschlussversuch, links Überblick über den Aufbau mit Auflagetisch und Befestigung des Hartschaumquaders am Querhaupt, rechts Detailaufnahme des eingespannten Stiftes während des Versuchs.....	82

Abb. 4-35: Gemittelte Kurvenverläufe für den kurzzeitigen Reibschlussversuch mit Drahtstift blank 42 x 120.	83
Abb. 4-36: Gemittelte Kurvenverläufe für den kurzzeitigen Reibschlussversuch mit Drahtstift blank 50 x 150.	84
Abb. 4-37: Gemittelte Kurvenverläufe für den kurzzeitigen Reibschlussversuch mit Kunststoffstift 50 x 145.	84
Abb. 4-38: Vergleich der Ausziehkraft des Reibschlussversuches für Drahtstifte mit Dichte der geprüften Hartschäume: Links die maximale und rechts die durchschnittliche Ausziehkraft.	85
Abb. 4-39: Vergleiche in der maximalen und durchschnittlichen Ausziehkraft für die durchgeführten Varianten des kurzzeitigen Reibschlusses.	85
Abb. 4-40: Vergleiche in der maximalen und durchschnittlichen Ausziehkraft für die durchgeführten Varianten des langzeitigen Reibschlusses in EPS-F.	87
Abb. 4-41: Druckspannungs/Verformungsverhalten von EPS [2.27].	88
Abb. 4-42: Vergleich zwischen F_{max} und F_{maxR}	89
Abb. 4-43: Vergleich zwischen berechneter und gemessener Ausziehkraft für EPS-W30 in Kombination mit Drahtstift blank 50 x 150.	90
Abb. 4-44: Linkes Photo zeigt den Ausziehversuch für handelsübliche Hartschaumschrauben. Rechts sind die Schrauben 1(a), 2(b) und 3(c) abgebildet. Diese wurden in EPS-F eingebracht und dann geprüft.	92
Abb. 4-45: Zeigt zwei weitere Befestigungseinheiten, links Schraube 4, rechts einen Tellerdübel vor der Prüfung.	92
Abb. 4-46: Zeigt (a) Stellfuchs aus verschiedenen Ansichten und (b) die zwei verwendeten Einbauvarianten.	92
Abb. 4-47: Links schematischer Aufbau für eine Befestigungseinheit mit Widerhaken, rechts ist die Befestigung im uneingebauten Zustand zu sehen, sie wird auf einen Winkel aufgeklebt, um sie ausziehen zu können.	93
Abb. 4-48: Zeigt einen Nagelteller, der einen mehrfachen Reibschluss darstellt. Links ist der schematische Aufbau, recht eine Detailaufnahme kurz vor Ende des Versuches erkennbar.	93

Abb. 4-49: Vergleich zwischen (a) Gemittelte Kraft/Weg-Verläufe von Schraube 1, 2 und 3 geprüft in EPS-F und (b) rechts Einzelmessungen der Mehrfachformschlüsse in EPS-W30.	94
Abb. 4-50: Zeigt (a) Einzelne Kraft/Wegkurve für Schraube 4 in EPS-W30 und (b) gemittelter Kraft/Weg-Verlauf für den Tellerdübel in EPS-F.	95
Abb. 4-51: Verformter Tellerdübel nach durchgeführtem Versuch.	96
Abb. 4-52: Gemittelte Kraft/Weg-Verläufe der verschiedenen Stellfuchskombinationen	97
Abb. 4-53: Idealisierung der zwei Stellfuchsvarianten	97
Abb. 4-54: Vergleich zwischen Kraft/Weg-Kurven aus der Berechnung und einzelner Messkurven für den Stellfuchs.	98
Abb. 4-55: Maximale Hauptnormalspannung für (a) Stellfuchs Variante SF-N bei 740 N und (a) Stellfuchs Variante SF-V bei 1370 N.	99
Abb. 4-56: Gemittelte Kraft/Weg-Verläufe für die Befestigungseinheit mit (a) den Nagelteller geprüft in EPS-F und (b) den Widerhaken geprüft in verschiedenen Dämmstoffen.	101
Abb. 4-57: Vergleich der max. Ausziehkraft für den Widerhaken in Abhängigkeit des verwendeten Dämmstoffes.	101
Abb. 5-1: Schematische Darstellung: Kräftespiel bei Lastfall Eigengewicht oder hygrothermische Einwirkungen bzw. Lastfallkombination - „Konsoltragwirkung“ nach [3.17] und Gegenüberstellung der Simulation.	103
Abb. 5-2: Analyse eines Wärmedämmverbund-Fassadenfeldes – durch hygrothermische Verformungen werden Belastungen von den Rändern her eingeleitet.	103
Abb. 5-3: Belastung eines Wärmedämmverbundsystems ohne Klebung durch Windsog.	104
Abb. 5-4: Konzept für den Aufbau eines Wandsystems mit Passivhausstandard.	105
Abb. 5-5: Grundsätzliche Befestigungsvarianten der Verbindungselemente.	105
Abb. 5-6: Einige mögliche Ausführungsvarianten mit grundsätzlich unterschiedlichem mechanischen Verhalten.	106
Abb. 5-7: Bekannte Technologie zur Herstellung von Schalungen.	106

Abb. 5-8: Wärmedurchgangskoeffizient in Abhängigkeit der Anzahl der durchdringenden Stäbe, deren Durchmesser (DM) sowie der Dämmstoffdicke.	107
Abb. 5-9: Temperaturgradienten [°C/mm] durch eine stabförmige Wärmebrücke; a.) Isolierschicht an der Oberfläche, b.) Wärmeleitende Schicht an der Oberfläche.	107
Abb. 5-10: Gegenüberstellung der Druckausbildung verschiedener Ansätze aus der Literatur.....	109
Abb. 5-11: Rheologisches Verhalten von Mehlkorn/Wassersuspensionen ohne Fließmittel (=Bingham-Körper) und mit Fließmittel (=Newton-Flüssigkeit) [5.11].	110
Abb. 5-12: Versuchsaufbau und Messapparatur; Messbereich des verwendeten Manometers 1 bar.	111
Abb. 5-13: Bilderzusammenstellung – Versuchsreihe A.....	113
Abb. 5-14: Bilderzusammenstellung – Versuchsreihe B.....	114
Abb. 5-15: Schematische Darstellung der mechanischen Zusammenhänge bei der Druckausbildung.....	116
Abb. 5-16: Zusammenhang zwischen Fülldruck und Füllhöhe beim Einsatz bei Variation Betonkonsistenz und Betonkerndicke.	116
Abb. 5-17: Zusammenhang zwischen Fülldruck und Füllhöhe beim Einsatz von Rüttelgeräten verschiedener Leistung (Modellbildung).	117
Abb. 5-18: Zeigt links (a) Bewertungsverfahren gemäß ÖNORM EN ISO 717-1 [6.2] und rechts (b) eine eingebaute Versuchswand.....	120
Abb. 5-19: Detaillierte Messergebnisse Wandaufbauvariante 1.....	121
Abb. 5-20: Detaillierte Messergebnisse Wandaufbauvariante 2.....	121
Abb. 5-21: Detaillierte Messergebnisse Wandaufbauvariante 3.....	122
Abb. 5-22: Detaillierte Messergebnisse Wandaufbauvariante 4.....	122
Abb. 5-23: Modellierung der Eigenfrequenzsimulation.....	123
Abb. 5-24: Gesamtverschiebung bei einer Eigenfrequenz von 5000 Hz, dabei hauptsächlich Schwingen des Ziegels.	123

Abb. 5-25: Gesamtverschiebung bei Eigenfrequenzuntersuchung; (a) Längsschwingen bei z.B. 1630 Hz für Wandvariante 3; (b) Eigenfrequenz bei 1370 Hz für Wandvariante 3 und (c) Eigenfrequenz bei 790 Hz für Wandvariante 4.	124
Abb. 6-1: Schematische Darstellung der Krafteinleitung in Dämmstoffsysteme.	126
Abb. 6-2: Mikrostruktur eines Hartschaumdämmstoffes auf Basis von Polystyrol.	126
Abb. 6-3: Reduktion auf eine vereinfachte Geometrie am Beispiel des Formschlussverhaltens.	127
Abb. 6-4: Versuche mit 2-fach und 3-fach eingebrachter Platte, entsprechende Ausbruchkegel nach erfolgter Prüfung sowie Ergebnisübersicht.....	127
Abb. 6-5: Gegenüberstellung von Simulation und realem Versuch.....	128
Abb. 6-6: Kraft-Wegkurven der durchgeführten Reibschlussversuche.....	128

7.4 Tabellenverzeichnis

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.....	18
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.	24
Tabelle 3-3: Ergebnisse der bruchmechanischen Untersuchungen bei Verwendung von SENT Probekörpern für unterschiedliche Hartschäume.....	35
Tabelle 3-4: Ergebnisse für $G_{\text{IC,rech}}$ 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.	35
Tabelle 3-5: Ergebnisse der bruchmechanischen Auswertung für EPS-W30 für unterschiedliche Probekörperformen (SENT, SENB3 und CCT).....	36
Tabelle 3-6: Ergebnisse für $G_{\text{IC,rech}}$ 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	37

Tabelle 4-1: Ergebnisse der Vorversuche von PP2-h40-t17-N und PP2-h40-t33-N in EPS-W30 bei unterschiedlichen Ausziehgeschwindigkeiten.	55
Tabelle 4-2: Darstellung des Versuchsplan - Variation der Hartschaumtypen.	58
Tabelle 4-3: Versuchsplan - Variation der Plattensteifigkeit.	59
Tabelle 4-4: Versuchsplan für die Variation der Kreisplattenaußendurchmesser D_A	59
Tabelle 4-5: Versuchsplan für die Ermittlung des Einflusses der Ausziehhöhe h und der Auflagerbedingungen.	59
Tabelle 4-6: Versuchsplan für mehrfachen Formschluss.	59
Tabelle 4-7: Ergebnisse der Versuche von PP2-hXX-t95-X in EPS-W30 zur Ermittlung des Einflusses der Ausziehhöhe h und der Auflagebedingungen.	60
Tabelle 4-8: Ergebnisse der Versuche von PP2-hXX-t95-X in EPS-W25 zur Ermittlung des Einflusses der Ausziehhöhe h und der Auflagebedingungen.	61
Tabelle 4-9: Plattenwerkstoffe für den Formschlussversuch mit den angenommenen Moduli E und Querkontraktionszahlen ν	63
Tabelle 4-10: Ergebnisse der Versuche XXX-h40-t95-N in EPS-W30 für unterschiedliche Kreisplattensteifigkeiten.	63
Tabelle 4-11: Ergebnisse der Versuche PP2XXX-h40-t95-N in EPS-W30.	64
Tabelle 4-12: Ergebnisse der Versuche PP2XXX-h40-t95-N in EPS-W25.	65
Tabelle 4-13: Ergebnisse für PP2-h40-t95-N in unterschiedlichen Hartschaumtypen.	66
Tabelle 4-14: Ergebnisse für ST2-h40-t95-N in unterschiedlichen Hartschaumtypen.	66
Tabelle 4-15: Ergebnisse des mehrfachen Formschluss in EPS-W30.	69
Tabelle 4-16: Ergebnisse des mehrfachen Formschluss in EPS-W25.	70
Tabelle 4-17: Ergebnisse für kurzzeitigen Reibschluss mit Drahtstift blank 42 x 140.	82
Tabelle 4-18: Ergebnisse für kurzzeitigen Reibschluss mit Drahtstift blank 50 x 150.	83
Tabelle 4-19: Ergebnisse für kurzzeitigen Reibschluss mit Kunststoffstift 49 x 145.	83
Tabelle 4-20: Ergebnisse für langzeitigen Reibschluss mit Drahtstift blank 42 x 120 in EPS-F.	86

Tabelle 4-21: Ergebnisse für langzeitigen Reibschluss mit Drahtstift blank 50 x 150 in EPS-F.	86
Tabelle 4-22: Ergebnisse für langzeitigen Reibschluss mit Kunststoffstift 49 x 145 in EPS-F.	86
Tabelle 4-23: Ergebnisse für langzeitigen Reibschluss mit Drahtstift blank in EPS-W30.	87
Tabelle 4-24: Reibbeiwerte für die einzelnen Materialkombinationen des Reibschlusses.	88
Tabelle 4-25: Ergebnisse für langzeitigen Reibschluss mit Drahtstift blank 50 x 150 in EPS-F.	89
Tabelle 4-26: Ergebnisse der echten Befestigungen – formschluss-kontrollierte Teile.	95
Tabelle 4-27: Ergebnisse des Stellfuchses – formschluss-kontrollierte Teile.	96
Tabelle 4-28: Ergebnisse der echten Befestigungen – reibschlusskontrollierte Teile.	100
Tabelle 5-1: Detaillierte Beschreibung der einzelnen Versuchswände.	111
Tabelle 5-2: Schalltechnisch untersuchte Wandaufbauten.	120
Tabelle 5-3: Überblick über die Ergebnisse der schalltechnisch untersuchten Wandaufbauten.	120
Tabelle 7-1: Übersicht über verschiedene Moduli.	130
Tabelle 7-2: Zug-, Scher- und Biegefestigkeiten.	131
Tabelle 7-3: Druckfestigkeiten.	132
Tabelle 7-4: Bruchmechanische Kennwerte.	133
Tabelle 7-5: Dynamische Kennwerte.	134
Tabelle 7-6: Thermische Eigenschaften.	136