

FAT 243

R

Aluminiumschaum für den
Automobileinsatz

C

Aluminiumschaum für den Automobileinsatz

IGF-Vorhaben 15690 N

Forschungsstellen:

Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten
Forschung e.V., Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und
angewandte Materialforschung IFAM

IWT Stiftung Institut für Werkstofftechnik

Projektleiter:

Joachim Baumeister

Dr. rer. nat. Hubert Bomas

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das IGF-Vorhaben 15690 N der Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Inhalt

1	Zusammenfassung	2
2	Darstellung der erzielten Ergebnisse	3
2.1	Einleitung	3
2.2	Kenntnisstand	3
2.3	Auswahl des Materialkonzepts	6
2.4	Versuchsplan	7
2.5	Auswertemethoden	10
2.6	Akustische Charakterisierung	11
2.7	Quasistatische Materialeigenschaften	16
2.7.1	Festigkeit der Deckbleche und des nicht aufgeschäumten Kerns	16
2.7.2	Druckfestigkeit des Aluminiumschaumkerns	19
2.7.3	Zugfestigkeit des Aluminiumschaumkerns	25
2.7.4	Zugfestigkeit des vorgeschädigten Aluminiumschaumsandwichs	31
2.7.5	Schubfestigkeit des Aluminiumschaumsandwichs	36
2.8	Zyklische Materialcharakterisierung	40
2.8.1	Prüfverfahren	40
2.8.2	Berechnung der örtlichen Normal- und Schubspannungen	41
2.8.3	Ergebnis der Ermüdungsversuche	45
2.9	Fertigungstechnische Grenzen	51
2.10	Kostenanalyse	56
3	Wissenschaftlich-technische Nutzung und Transfermaßnahmen	59
4	Veröffentlichungen zum Vorhaben	59
5	Förderhinweise	59
6	Unterschriften	60
7	Literaturverzeichnis	61

1 Zusammenfassung

Aluminiumschäume haben in den vergangenen Jahren ihre Eignung für vielfältige Anwendungen im Bereich des Leichtbaus gezeigt. Jedoch wird bislang das Potential dieses Werkstoffs nicht vollständig genutzt, da statistisch hinreichend abgesicherte mechanische Kennwerte fehlen. In dem vorliegenden Forschungsprojekt wird daher an einem Vertreter dieser Materialklasse die erforderliche Datenbasis in einem umfangreichen Testprogramm geschaffen, um das Einsatzpotential von Aluminiumschäumen zu steigern. Auf Basis einer Literaturrecherche wurde gemeinsam mit dem projektbegleitenden Ausschuss das walzplattierte Aluminiumschaumsandwich der Legierungskombination 6082/AlSi8Mg4/6082 als Untersuchungsobjekt ausgewählt. Anhand der erforderlichen Daten für Umform- und Crashsimulationen wurde ein Versuchsplan aufgestellt und die entsprechenden Versuche wurden durchgeführt. Hierbei ergaben sich die folgenden Erkenntnisse: Die Untersuchungen der akustischen Eigenschaften ergaben, dass ein Einsatz von Aluminiumschaumsandwichen im Automobil allein aus Gründen der Schalldämmung nicht sinnvoll erscheint. Erst im Bereich höherer Frequenzen ergab sich ein Vorteil des Sandwichs gegenüber einer ungeschäumten Platte. Mechanische Prüfungen der Sandwichdeckbleche ergaben, dass nach dem Aufschäumen die Zugfestigkeit mehr als doppelt so groß ist wie die Zugfestigkeit der Deckbleche im ungeschäumten Zustand. Dabei ist ihre Duktilität nur geringfügig niedriger. Im ungeschäumten Zustand liegt die Festigkeit des Kerns zwischen der Festigkeit des ungeschäumten und des geschäumten Deckbleches. Seine Bruchdehnung ist jedoch deutlich geringer. Die Streuung der ermittelten Kennwerte ist gering. Im geschäumten Zustand streut hingegen die Druckfestigkeit des Kerns stark. Dies konnte auf die streuende Kerndichte der Druckproben zurückgeführt werden. Mit steigender Kerndichte wurde eine Zunahme der Druckfestigkeit der Proben beobachtet. Bei der Ermittlung der Zugfestigkeit des Kerns wurde der gleiche Effekt beobachtet. Parallel hierzu weist der Kern ein anisotropes Verhalten unter Zugbelastung auf. Bei einer Belastung parallel zur Deckschichtebene wurde eine höhere Zugfestigkeit als bei einer Belastung senkrecht hierzu gemessen. Vorschädigungen durch Stauchungen, die noch vor dem Plateaubereich des Schaumes lagen, führten bereits zu einer deutlichen Entfestigung des Kerns. Auch bei Schubversuchen am Kern wurden starke Streuungen der Schubfestigkeit festgestellt, die mit der Kerndichte korreliert werden konnten. Insgesamt konnten die streuenden Kennwerte mit einer zweiparametrischen Weibullverteilung beschrieben werden. Das Gleiche gilt für die streuenden Dauerfestigkeiten der Deckbleche und des Kerns, die an 3-Punkt-Biegeproben ermittelt wurden.

Die ermittelten Grenzformänderungskurven zeigen, dass die Werte für das nicht geschäumte und das geschäumte Sandwich überraschend dicht beieinander liegen. Erwartungsgemäß weist dabei das geschäumte Material ein etwas schlechteres Umformvermögen auf. Bei erhöhter Temperatur (150 °C) konnte in beiden Zuständen das Umformverhalten verbessert werden. Flächenspezifisch liegen die Kosten des Aluminiumschaumsandwiches in der Größenordnung von Aluminiumblechen. Für das Aluminiumschaumsandwich ergeben sich jedoch aufgrund der noch nicht so etablierten AFS-Fertigung im Vergleich zur ausgereiften Al-Blech-Technologie höhere Kostenreduktionspotentiale.

Zusammenfassend konnten die auftretenden Streuungen der Aluminiumsandwichkennwerte mathematisch beschrieben und damit vorhersagbar gemacht werden. Dementsprechend wurde das Ziel des Vorhabens erreicht.

2 Darstellung der erzielten Ergebnisse

2.1 Einleitung

In unserem Verkehrs- und Transportwesen steigt die Nachfrage nach intelligenten Leichtbaukonzepten beständig. Die Ziele des intelligenten Leichtbaus, zu denen höhere Nutzlasten und verbesserte Umweltverträglichkeit ebenso zählen wie die Schaffung von Freiräumen für eine parallele Steigerung der passiven Sicherheit und des Komforts, stellen die Konstrukteure vor Aufgaben, die vielfach nur durch Einsatz neuartiger Werkstoffe lösbar sind.

Metallische Schäume, und speziell Aluminiumschäume, haben in den vergangenen Jahren auf Prototypen- und Vorentwicklungsniveau ihre prinzipielle Eignung für vielfältige Anwendungen in der Automobilindustrie nachgewiesen [u. a. 1, 2]. Erste Produkte sind am Markt erhältlich [u. a. 3, 4, 5], das tatsächliche Potenzial des Werkstoffs spiegeln sie jedoch noch in keiner Weise wider. Als Ursache dieser Diskrepanz zwischen Chancen und Umsetzung konnte ein Mangel an belastbaren Auslegungskriterien identifiziert werden: Konstrukteure und Abnehmer benötigen statistisch hinreichend abgesicherte mechanische Kennwerte für die wichtigsten Lastfälle und Belastungsarten. Hierzu zählen auch erweiterte Kenntnisse der jeweils zu Grunde zu legenden Versagensmechanismen. Nur mit diesen Informationen kann das Material auch in sicherheitsrelevanten Komponenten wirklich ausgenutzt werden. Der Vorhersagefehler von FEM-Rechnungen für Aluminiumschaum-Sandwichstrukturen liegt noch in der Größenordnung von 10 bis 15 % [6].

Das vorliegende Forschungsprojekt nimmt diese Forderung auf, indem es für einen anwendungsorientiert ausgewählten Vertreter der Materialklasse in einem umfangreichen Testprogramm die erforderliche Datenbasis schafft und zur Klärung von Versagensmechanismen beiträgt.

Die Projektstruktur ist wie folgt angelegt:

1. Auswahl eines Demonstratorbauteils
2. Zusammenstellung der Kenndaten von Materialkandidaten für die Realisierung des Demonstratorbauteils (Datenbasis)
3. Materialauswahl für die Realisierung des Demonstratorbauteils anhand der Datenbasis aus 2.
4. Ermittlung fehlender Kenndaten des in 3. ausgewählten Materials
5. Bau des Demonstrators

Von den im projektbegleitenden Ausschuss (PA) vertretenen OEMs (Volkswagen AG, Wilh. Karmann GmbH) waren verschiedene Bauteile (Schweller, Tunnel, Boden vorne, Reserveradmulde, Rahmenmontageplatte, Sitzquerträger etc.) als mögliche Demonstratorbauteile evaluiert worden. In der Sitzung des PA vom 10.02.2009 wurde beschlossen, als Demonstratorbauteil die Rahmenmontageplatte auszuwählen.

2.2 Kenntnisstand

In einer frühen Projektphase war zunächst der aktuelle Kenntnisstand über die verfügbaren Aluminiumschäume und deren Eigenschaften zu ermitteln. Auf der Grundlage dieser Datenbasis sollte dann das Material für die Realisierung des Demonstrators Rahmenmontageplatte ausgewählt werden. Die dabei in Frage kommenden Aluminiumschaumtypen konnten in 2 Kategorien eingeteilt werden:

Kategorie 1: Formteile

⇒ pulvermetallurgisch hergestellte Aluminiumschäume (FOAMINAL®)

- ⇒ APM-Schäume
- ⇒ Hohlkugelstrukturen
- ⇒ ALPORAS[®]-Schäume

Kategorie 2: Sandwichstrukturen

- ⇒ geklebte Sandwichplatten auf FOAMINAL[®]-Basis (Stahl- und Aluminium-Deckbleche)
- ⇒ geklebte Sandwichplatten auf APM-Basis (Stahl- und Aluminium-Deckbleche)
- ⇒ geklebte Sandwichplatten auf ALPORASTM-Basis (Stahl- und Aluminium-Deckbleche)
- ⇒ Aluminiumschaum-Sandwichstrukturen (AFS, walzplattiert)

Zu jedem dieser Schaumtypen wurden die verfügbaren Daten bei dem jeweiligen Hersteller abgefragt und zusätzlich Literatur- und Internet-Recherchen durchgeführt. Die erhobenen Daten betrafen nicht nur die mechanischen Eigenschaften (quasistatisch und dynamisch), sondern auch die verfügbaren Abmessungen und Geometrien, sowie physikalische und technologische Eigenschaften (Umformbarkeit, Fügeverfahren etc.). Eine Liste der abgefragten und erhobenen Daten ist in der Tabelle 1 wiedergegeben.

Verfügbarkeit des Materials / Lieferant	Mechanische Eigenschaften (dynamisch)
Materialvariante	Druckfestigkeit einachsig (Kernlage)
Decklagenlegierung	Druckfestigkeit hydrostatisch (Kernlage)
Decklagendicke [mm]	Zugfestigkeit (Kernlage)
Kernlagenlegierung	<i>Zugfestigkeit (Decklage)</i>
Kernlagendicke Halbzeug [mm]	<i>Streck-/0,2%-Dehngrenze (Decklage)</i>
Kernlagendicke Sandwich [mm]	Scherfestigkeit (Kernlage)
Expansionsgrad	Punktlast
Kernlagendichte kg/dm ³	Linienlast
Gewicht	Mechanische Eigenschaften (zyklisch)
Flächengewicht [kg/m ²]	Zug/Druck
verfügbare Geometrien	Biegung
ebene Platten	Scherung/Torsion
21/2 D	Fertigungstechnische Eigenschaften:
3D	Umformbarkeit Halbzeug
max. Abmessungen ebene Platten	Kalt-Umformbarkeit Sandwichverbund geschäumt
Akustische und Schwingungseigenschaften	Warm-Umformbarkeit Sandwichverbund geschäumt
Verlustfaktor (bei Frequenz [kHz])	Kalibrierung/Verdichtbarkeit der Kernlage [%]
Schallabsorptionskoeffizient (bei Frequenz [kHz])	Kompatibilität mit etablierten Fertigungsprozessen
Thermische Eigenschaften	KTL
Wärmeleitfähigkeit (Sandwich: in Dickenrichtung)	Pulverlackierung
Kosten (Basis: ebene Platten, geschäumt)	Fügetechnologie
ebene Platten, geschäumt	Schweißen WIG/ MIG/ Laser
Mechanische Eigenschaften (quasistatisch)	Aufschweißbolzen
Druckfestigkeit einachsig (Kernlage)	Stanznieten
Druckfestigkeit hydrostatisch (Kernlage)	Blindnietmutter/- Schrauben
Zugfestigkeit (Kernlage)	Qualitätssicherung
E-Modul (Kernlage)	Verfahren
Poisson-Zahl (Kernlage)	Maintenance/Reparatur
<i>Zugfestigkeit (Decklage)</i>	Brandverhalten
<i>Streck-/0,2%-Dehngrenze (Decklage)</i>	Klassifizierung A (0,15,30,60)
<i>E-Modul (Decklage)</i>	Klassifizierung B (0,15,30,60)
<i>Poisson-Zahl (Decklage)</i>	Klassifizierung C
Scherfestigkeit (Kernlage)	Rezyklierbarkeit
Punktlast	Oberflächenqualität
Linienlast	

Tabelle 1: Liste der abgefragten und erhobenen Daten

Die so gewonnenen Daten wurden in einer Excel-Datei zusammengestellt und allen Mitgliedern des PA zur Verfügung gestellt. Ein Screenshot dieser Datei ist in Abbildung 1 wiedergegeben.

Materialvariante:	FOAMINAL \diamond AISi7	Aluminiumschaum-Sandwich EN-AV 3103/AISI7	Aluminiumschaum-Sandwich EN-AV 3103/AISI7	Aluminiumschaum-Sandwich EN-AV 3103/AISI7
Untervariante (Dicke Decklage/Kernlage-Dichte Kernlage)			1/9-0,30	1/10-0,37
Kriterien				
Verfügbarkeit des Materials / Lieferant		?	?	lieferbar (Alulight)
Materialvariante				lieferbar
Decklagenlegierung	-	EN-AV 3103	EN-AV 3103	EN-AV 3103
Decklagendicke (mm)	-	1	1	1
Kernlagenlegierung	-	AISI 7	AISI 7	AISI 7
Kernlagendicke Halbzeug (mm)	-	-	1,39	1,61
Kernlagendicke Sandwich (mm)	-	9	10	10
Expansionsgrad	3,34 bis 6,68 [IFAM]	-	7,22	6,21
Kernlagendichte kg/dm ³	0,4 bis 0,8 [IFAM]	0,30	0,37	0,43
Gewicht				
Flächengewicht (kg/m ²)	-	8,8	9,17	9,76
verfügbare Geometrien				
ebene Platten	JA	JA	JA	JA
2W2 D	JA	=>	=>	nachgewiesen.
3D	JA	=>	=>	nachgewiesen.
max. Abmessungen ebene Platten	8-30x610x1220 [Alulight]	-	1200x2500 [Alulight]	-
Akustische und Schwingungseigenschaften				Versuche sporadisch
Verlustfaktor (bei Frequenz [kHz])	0,0025 (0,6 g/cm ³ , AISI12) [IFAM]	-	-	-
Schallabsorptionskoeffizient (bei Frequenz [kHz])	-	-	-	-
Thermische Eigenschaften				
Wärmeleitfähigkeit (Sandwich: in Dickenrichtung)	1,1 W/mK (0,55 g/cm ³), 7,8 W/mK (0,63 g/cm ³) [IFAM]	12 W/mK [IFAM]	-	-
Kosten (Basis: ebene Platten, geschäumt)				
ebene Platten, geschäumt	< 15 €/kg	-	12-25 €/kg	12-25 €/kg
Mechanische Eigenschaften (quasistatisch)				
Druckfestigkeit einachsig (Kernlage)	4 bis 14,5 Mpa [Ava08]	8 Mpa [IFAM]	-	-
Druckfestigkeit hydrostatisch (Kernlage)	2,6 bis 9,4 Mpa [Ava08]	-	-	-
Zugfestigkeit (Kernlage)	2,4 bis 8,8 Mpa [Ava08]	4 Mpa [IFAM]	-	-
E-Modul (Kernlage)	1921 bis 3164 Mpa [Ava08]	-	-	-
Poisson-Zahl (Kernlage)	ca. 0,3 [IFAM]	-	-	-
Zugfestigkeit (Decklage)	-	-	-	-
Streck- $A_{1,25}$ -Dehngrenze (Decklage)	-	-	-	-

Abbildung 1: Screenshot der Excel-Datei mit den Materialkennndaten

2.3 Auswahl des Materialkonzepts

Nach Zusammenstellung der in Abschnitt 2.2 beschriebenen Datenbasis wurden vom PA die Vor- und Nachteile der verschiedenen Aluminiumschaum-Varianten zur Realisierung der Rahmenmontageplatte abgewogen. Für die Schaumtypen der Kategorie 1 (siehe Abschnitt 2.2) wurden Probleme hinsichtlich der Festigkeit und Fügeverfahren erwartet. Die Herstellung des Demonstrators aus ALPORAS-Material könnte zudem nur erfolgen, indem das Bauteil aus einem größeren Schaumblock herausgearbeitet wird. Dies wäre zu aufwändig, zudem würde die angeschnittene Porosität die Ansammlung von Schmutz und die Korrosion begünstigen. Eine relativ glatte Bauteiloberfläche wäre wünschenswert, was durch die Sandwichlösungen erfüllt wird. Bei geklebten Sandwichen wurden Schwierigkeiten vor allem in der ökonomischen Herstellung von 3D-geformten Bauteilen wie der Rahmenmontageplatte gesehen, weshalb diese Materialvarianten verworfen wurden. Bei AFS-Sandwichen mit Decklagen aus 6000er-Legierungen bereiteten speziell die kupferhaltigen Kernlagenlegierungen Probleme bei der Kalibrierung und Randverdichtung, auch das Korrosionsverhalten ist aufgrund des Kupfergehalts unvorteilhaft. Hier boten sich deshalb Aluminiumschaumsandwiche (AFS) mit den Legierungskombinationen AlMn1/AISI7/AlMn1 und 6082/AlSi8Mg4/6082, jeweils in der Schichtdickenkombination 1/10/1 mm an.

Für die Demonstratorauswahl waren aus Sicht der Automobilhersteller die wichtigsten Eigenschaften und Auswahlkriterien:

Steifigkeit

Schalldämmung

Wärmedämmung

Gewichtsreduzierung

Crashfunktion

Kosten

Werkzeugaufwand

Prüfaufwand

In der Sitzung des PA vom 10.02.2009 wurde beschlossen, als Material für den Demonstrator das walzplattierte Aluminiumschaumsandwich (AFS) in der Legierungskombination AlMn1/AlSi7/AlMn1 und in der Schichtdickenkombination 1/10/1 mm auszuwählen. Parallel sollte auch die Legierungskombination 6082/AlSi8Mg4/6082 untersucht werden.

Nach der Erstellung des Versuchsplans (siehe Abschnitt 2.4) konnte der Bedarf an geschäumten und ungeschäumten Sandwichmaterialien ermittelt werden. Für den Bau des Demonstrators durch die Wilhelm Karmann GmbH wurden 4 m² eingeplant, weshalb sich für die Legierungskombination AlMn1/AlSi7/AlMn1 (geschäumt) ein Bedarf von über 10 m² ergab. Eine Übersicht der bestellten Versuchsmaterialien ist in Tabelle 2 dargestellt.

Material	Zustand	Menge
AlMn1/AlSi7/AlMn1	geschäumt	10,2 m ²
AlMn1/AlSi7/AlMn1	ungeschäumt	3,4 m ²
6082/AlSi8Mg4/6082	geschäumt	6,6 m ²
6082/AlSi8Mg4/6082	ungeschäumt	4,5 m ²

Tabelle 2: bestellte Versuchsmaterialien

Am 18.06.2009 wurde das Versuchsmaterial gemäß Tabelle 2 durch die Forschungsstelle IFAM bei Fa. Alulight AFS bestellt. Am 10.07.2009 bestätigte Fa. Alulight AFS die Bestellung.

Am 12.08.2009 lieferte Fa. Alulight AFS das bestellte Material der Legierungskombination 6082/AlSi8Mg4/6082 als Teillieferung an die Forschungsstelle IFAM. Das Material wurde gemäß Versuchsplanung an die Forschungsstellen weitergeleitet.

Am 08.09.2009 informierte der Insolvenzverwalter die Forschungsstelle IFAM über die Insolvenz der Fa. Alulight AFS. Damit war eine Lieferung des übrigen Versuchsmaterials nicht mehr möglich. Da Fa. Alulight AFS der einzige Anbieter der Sandwichmaterialien war, wurde somit auch der Bau des Demonstrators unmöglich. In der Sitzung des PA am 08.12.2009 wurde beschlossen, stattdessen umfangreiche zusätzliche Messungen zur Charakterisierung des Materials in die Versuchsplanung aufzunehmen. So sollten an dem noch vorhandenen Versuchsmaterial zunächst akustische Untersuchungen durchgeführt werden (siehe Abschnitt 2.6). Danach wurde das Material für zusätzliche Versuche zur Ermittlung mechanischer Kennwerte verwendet (siehe Abschnitt 2.7 und 2.8).

2.4 Versuchsplan

In Zusammenarbeit mit dem PA wurde eine Liste der Kenndaten, welche für numerische Simulationsrechnungen erforderlich sind, erstellt. Diese Daten umfassen:

Daten für Umformsimulation:

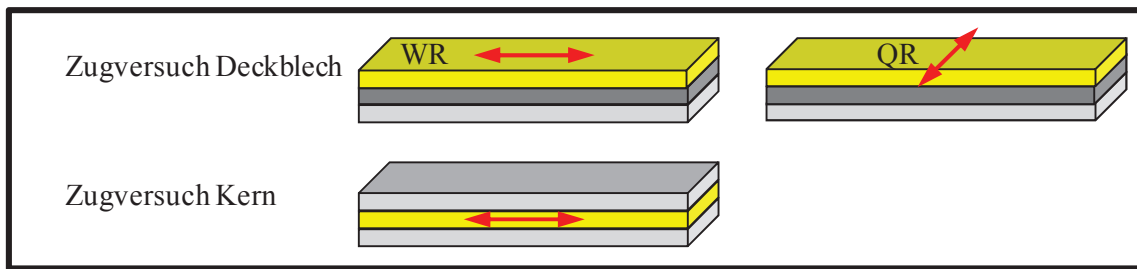
- E-Modul der Decklagen vor dem Schäumen
- E-Modul der Decklagen nach dem Schäumen
- E-Modul der Kernlagen vor dem Schäumen
- E-Modul der Kernlagen nach dem Schäumen
- Fließkurve der Decklagen im Zugversuch vor dem Schäumen
- Fließkurve der Decklagen im Zugversuch nach dem Schäumen
- Fließkurve der Kernlagen im Zugversuch vor dem Schäumen
- Fließkurve der Kernlagen im Zugversuch nach dem Schäumen
- Grenzformänderungsdiagramm des Verbunds vor dem Schäumen
- Grenzformänderungsdiagramm des Verbunds nach dem Schäumen

Daten für Crashsimulation:

- Daten wie oben (Umformsimulation), zusätzlich:
- Fließkurve der Kernlage im Druckversuch
- Schubfestigkeit der Kernlage

Auf Basis der so erstellten Liste wurde der nachfolgend beschriebene Versuchsplan erstellt: Um die fertigungstechnischen Grenzen aufzuzeigen, wurden Grenzformänderungskurven des Aluminiumschaumsandwiches vor und nach dem Aufschäumen aufgenommen. Die Versuche wurden sowohl bei Raumtemperatur als auch bei erhöhter Temperatur durchgeführt. Die weiteren, für die Umform- und Crashsimulation benötigten Kenndaten wurden anhand von einachsigen quasistatischen Versuchen ermittelt. Diese wurden sowohl vor als auch nach dem Aufschäumen des Kernmaterials bestimmt. Die einzelnen Versuche sind in Abbildung 2 dargestellt.

Ungeschäumtes Material



Aufgeschäumtes Material

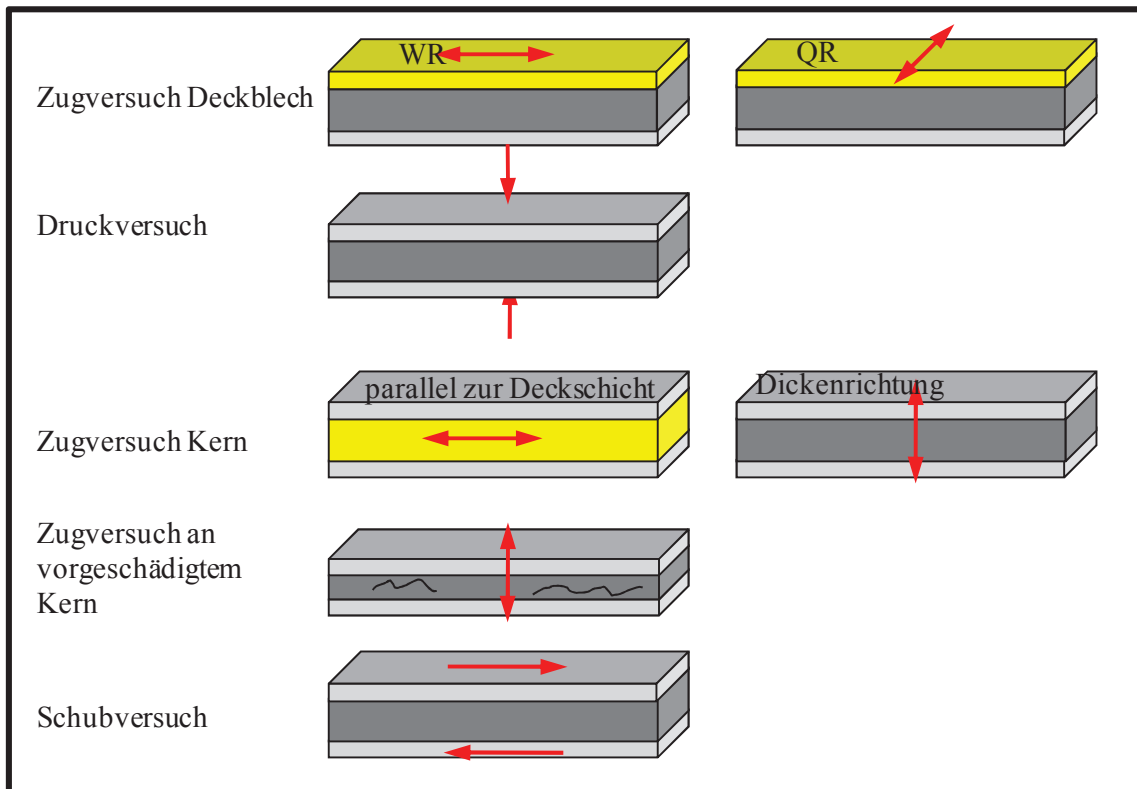


Abbildung 2: Quasistatische Prüfung der Aluminiumschaumsandwiche vor und nach dem Schäumen
(Bei den gelb markierten Proben wurde nicht das gesamte Sandwich, sondern nur der jeweilige markierte Bereich geprüft.)

Aus dem nicht aufgeschäumten Aluminiumsandwich wurden Zugproben längs und quer zur Walzrichtung aus dem Deckblech entnommen. Außerdem wurden Zugproben, die aus dem Kernmaterial gefertigt wurden, geprüft. Die Deckbleche aus dem aufgeschäumten Sandwich wurden ebenfalls einer Zugprüfung in Walzrichtung als auch senkrecht hierzu unterzogen. Für die Charakterisierung des geschäumten Kerns wurden unterschiedliche Prüfverfahren angewandt. Am Kernmaterial inklusive der Deckbleche wurden Druckversuche in Dickenrichtung des Sandwichs durchgeführt. Des Weiteren wurde das Verhalten des Kerns bei einer Zugbelastung untersucht. Hierzu wurde der Kern sowohl parallel als auch senkrecht zur Deckschichtebene, d. h. in Dickenrichtung des Sandwichs auf Zug belastet. Der Einfluss einer Vorschädigung des Sandwichkerns auf die Zugeigenschaften wurde senkrecht zur Deckschichtebene untersucht. Neben den zuvor genannten Belastungsarten Zug und Druck wurde das Kernverhalten bei einer Schubbelastung untersucht.

Zusätzlich zu Daten, die für die Umform- und Crashsimulation benötigt werden, wurde an 3-Punkt-Biegeproben das Verhalten des Sandwichs bei zyklischer Beanspruchung ermittelt sowie die akustischen Eigenschaften des Sandwichs untersucht.

2.5 Auswertemethoden

Für die Auswertung der Untersuchungsergebnisse wurden teilweise Methoden angewandt, die speziell für einen bestimmten Probentyp oder eine bestimmte Prüfvariante geeignet sind. Auf diese wird in dem jeweiligen Unterkapitel eingegangen. Hingegen wird auf diejenigen Auswertemethoden, die bei mehreren Prüfverfahren Anwendung gefunden haben, im Folgenden eingegangen.

Um die Streuung einer Festigkeitskenngröße W mathematisch beschreiben zu können, wird eine 2-parametrische Weibullverteilung (Gleichung 1) an die experimentell ermittelten Werte angepasst. Mit dieser wird für eine Beanspruchung σ der Probe die Wahrscheinlichkeit P bestimmt, dass diese deren Festigkeit überschreitet. Der Wert W_{50} steht für den Median der Festigkeitskenngröße und der Parameter m ist ein Maß für deren Streuung.

$$P(\sigma) = 1 - 2 \left(\frac{\sigma}{W_{50}} \right)^m \quad (\text{Gleichung 1})$$

Um die Anpassung durchführen zu können, muss den n experimentell ermittelten Festigkeitskennwerten eine Wahrscheinlichkeit P_i zugeordnet werden. Hierzu werden die Messwerte der Größe nach geordnet und beginnend mit dem kleinsten von $i = 1$ bis zum größte Wert $i = n$ durchnummeriert. Mit der Schätzfunktion in Gleichung 2 wird jedem Messwert die folgende Wahrscheinlichkeit zugeordnet:

$$P_i = \frac{i}{n+1} \quad (\text{Gleichung 2})$$

An die experimentell ermittelten Bruchwahrscheinlichkeiten erfolgte die Anpassung der Weibullverteilung durch Fehlerquadratminimierung.

Bei zellularen Werkstoffen ist die Abhängigkeit der Schaumkennwerte W von deren Dichte bekannt [7]. Von McCoullough et al. [7] werden Kennwerte, wie beispielsweise die lineare Anfangssteigung oder die Dehngrenze, in Abhängigkeit von der relativen Dichte $\rho_{\text{rel.}}$ mit der nachfolgenden 2-parametrischen Formel beschrieben:

$$W = C \cdot \rho_{\text{rel.}}^n \quad (\text{Gleichung 3})$$

Die relative Dichte $\rho_{\text{rel.}}$ berechnet sich nach Gleichung 4 aus der Dichte der Probe ρ_{Probe} bezogen auf die Dichte $\rho_{\text{Grundwerkstoff}}$ des porenfreien Grundwerkstoffs.

$$\rho_{\text{rel.}} = \frac{\rho_{\text{Probe}}}{\rho_{\text{Grundwerkstoff}}} \quad (\text{Gleichung 4})$$

Mit den Parametern C und n kann die Dichteabhängigkeit der Kenngröße W beschrieben werden. Durch Fehlerquadratminimierung wurden diese an die experimentellen Ergebnisse angepasst.

Um diese Anpassung durchführen zu können, wurde von allen Proben die Dichte des Kerns bestimmt. Hierzu wurden die Proben gewogen und deren Volumen wurde auf Basis ihrer Abmessungen bestimmt. Teilweise mussten die Masse und das Volumen der Deckbleche für die Berechnung der Kernmasse berücksichtigt werden. Hierfür wurden eine Deckblechdicke von 1,12 mm, die an einem Querschliff des Sandwichs ermittelt wurde, und eine Dichte des Deckblechs von $2,7 \text{ g/cm}^3$ verwendet.

2.6 Akustische Charakterisierung

Auf Anregung der Firma Volkswagen AG sollte die akustische Charakterisierung durch Fa. Carcoustics TechConsult GmbH, Leverkusen, erfolgen. Nach Absprache mit Fa. Carcoustics sollte ein direkter Vergleich einer geschäumten und einer ungeschäumten Sandwichplatte durchgeführt werden. Hierzu wurde das verbliebene Rest-Material auf die für die akustischen Messungen erforderlichen Abmessung zugeschnitten:

geschäumte Platte: Abmessung 980 x 920 x 12, Flächengewicht 10,5 kg/m²

ungeschäumte Platte: Abmessung 980 x 920 x 4,1, Flächengewicht 11,2 kg/m²

Die Platten wurden am 05.03.2010 an Fa. Carcoustics geliefert.

Die Ergebnisse der akustischen Messungen werden im Folgenden kurz dargestellt.

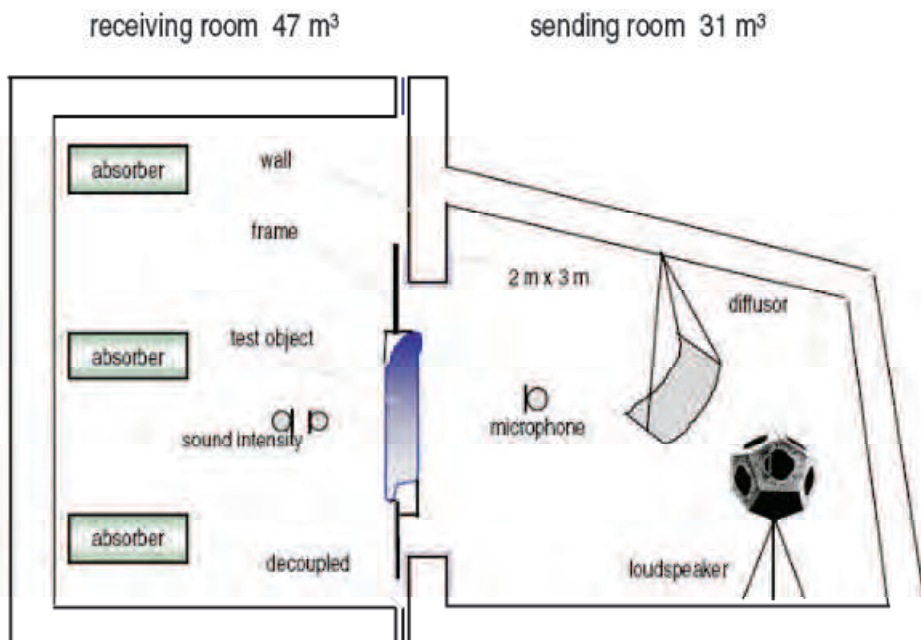


Abbildung 3: Fensterprüfstand zur Ermittlung der Schalldämmung (transmission loss, TL)

In Abbildung 3 ist die Versuchsanordnung des Fensterprüfstands zur Ermittlung der Schalldämmung (transmission loss, TL) wiedergegeben. Im Senderraum (sending room, in Abbildung 3 rechts) werden mittels eines Lautsprechers Luftschallwellen verschiedener Frequenzen erzeugt. Der Senderraum ist vom Empfangsraum (receiving room, in Abbildung 3 links) durch eine Wand getrennt. In dieser Wand befindet sich eine fensterförmige Öffnung, die durch die zu prüfende Platte verschlossen wird, siehe Abbildung 4. Im Empfangsraum wird in der Nähe der Fensteröffnung der Schalldruckpegel des durch das Fenster transmittierten Luftschalls mit einem Mikrofon gemessen.

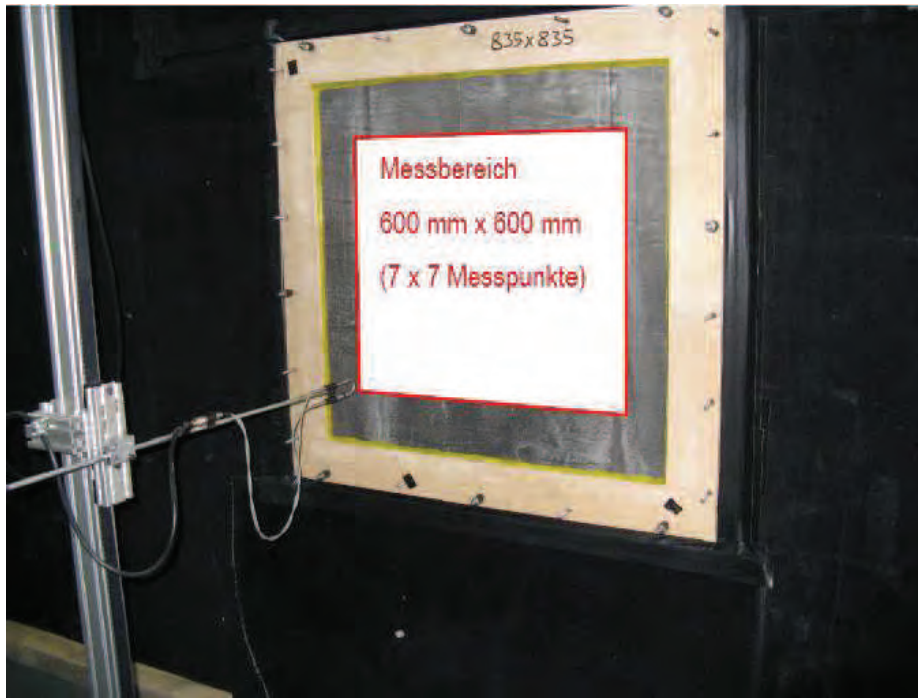


Abbildung 4: Einbausituation der zu prüfenden Platte im Fensterprüfstand

Das Ergebnis dieser Messungen ist in Abbildung 5 dargestellt.

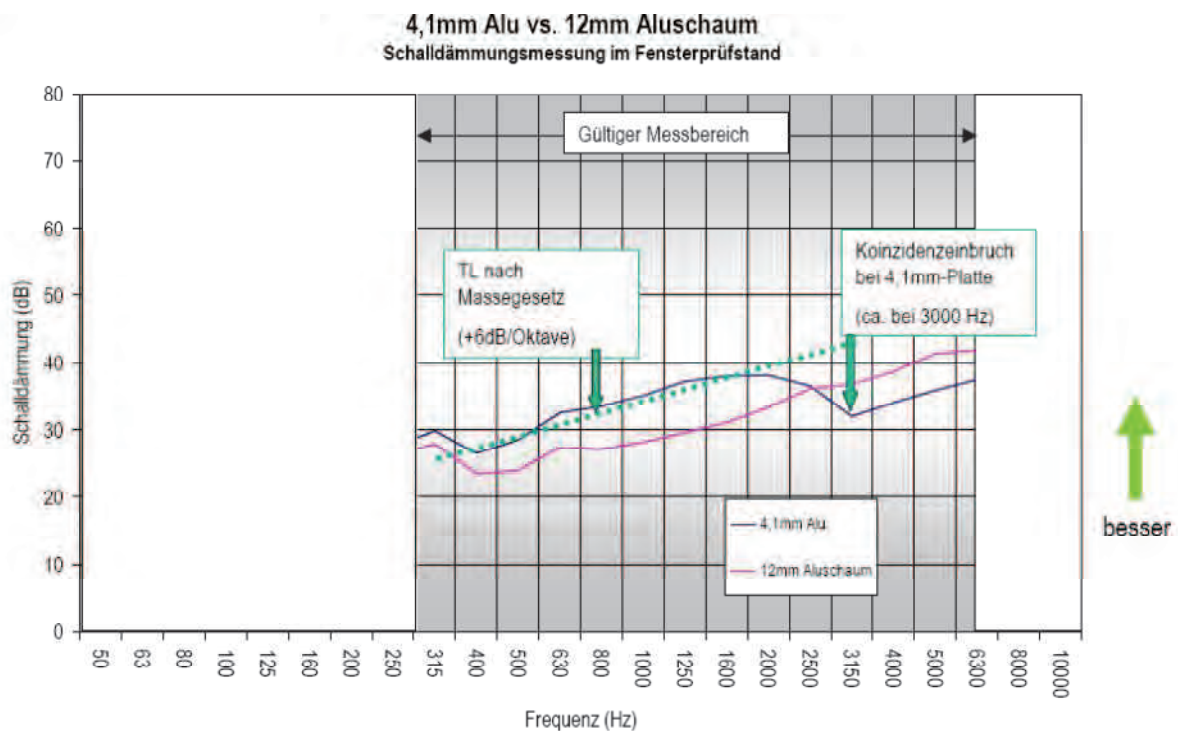


Abbildung 5: Ergebnisse der Schalldämmungsmessungen

Überraschend ist zunächst das Resultat, dass bei der Messung im Fensterprüfstand die geschäumte Platte eine schlechtere Schalldämmung aufweist als die ungeschäumte Platte. Erst bei Frequenzen oberhalb ca. 3000 Hz wird die Dämmwirkung der geschäumten Platte besser. Die Erklärung dieses Effekts ist anhand der vorliegenden Daten nicht möglich. Es wäre zu erwarten gewesen, dass die Schallwellen aller Frequenzen beim Durchlaufen der Sandwichplatte die Lamellen und Stege der

Schaumstruktur in Schwingung versetzen und dadurch Energie dissipiert wird. Von Fa. Carcoustics wurde die Vermutung geäußert, dass die Sandwichplatte einfach zu steif für diese Messanordnung sein könnte.

Der Abstrahlgrad und der Verlustfaktor der beiden Prüfplatten wurden in einem anderen Messverfahren bestimmt. Hier wurde die so genannte „power-input-Methode“ eingesetzt, siehe Abbildung 6.

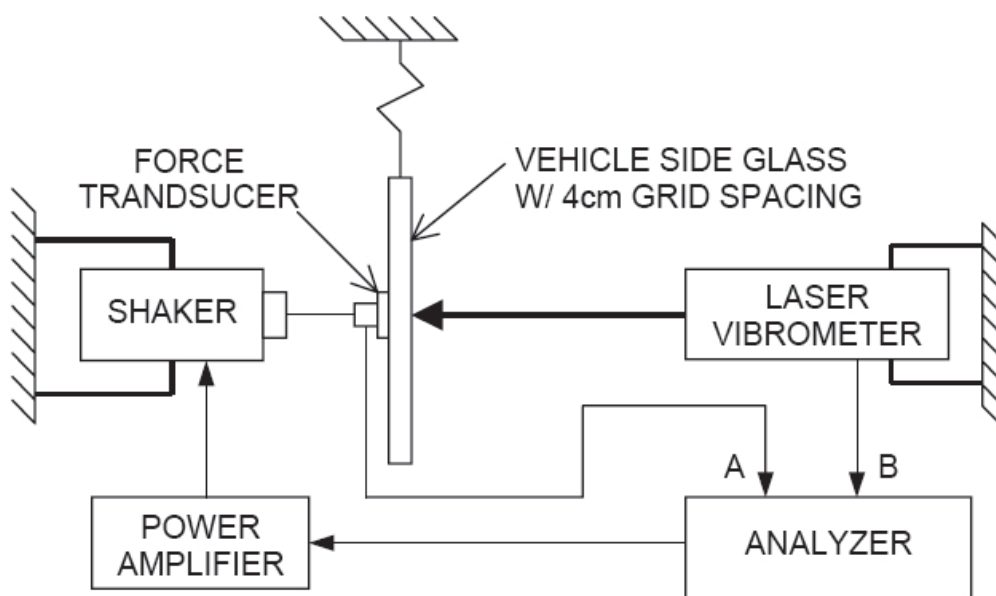


Abbildung 6: Ermittlung des Abstrahlgrads und des Verlustfaktors nach der „power-input-Methode“ [8]

Bei dieser Methode wird die zu prüfende Platte elastisch aufgehängt und mittels eines elektrodynamischen Schwingungserregers (Shakers) in eine stationäre Schwingung versetzt. Mit einem Laser-Vibrometer wird die Oberflächenschnelle an 90 bis 100 Messstellen an der Plattenoberfläche gemessen. Aus der eingebrachten Leistung und der Oberflächenschnelle können der Abstrahlgrad und der Verlustfaktor der Prüfplatte berechnet werden. Dabei gibt der Abstrahlgrad an, wie gut eine schwingende Platte ihre Körperschallwellen an die Luft abgeben kann. Der Verlustfaktor ist ein Maß für die Dämpfung der schwingenden Platte aufgrund der abgestrahlten Schalleistung.

Der reale Versuchsaufbau ist in Abbildung 7 wiedergegeben.

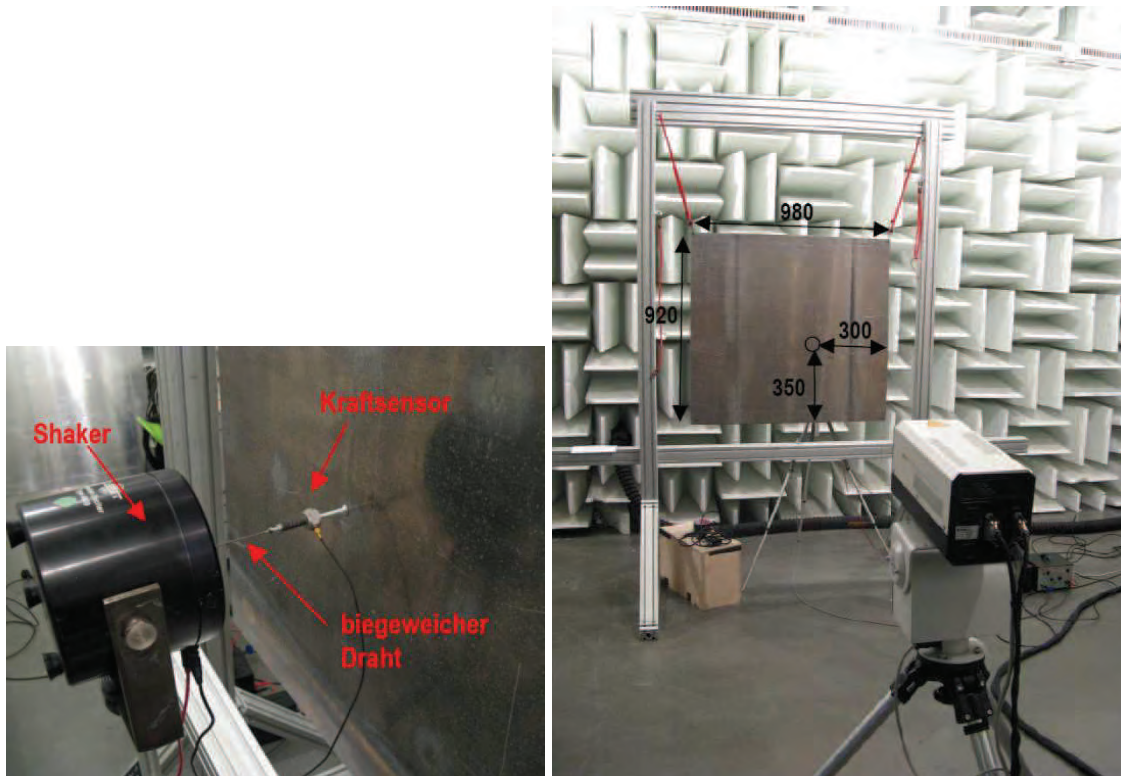


Abbildung 7: Ermittlung des Abstrahlgrads und des Verlustfaktors nach der „power-input-Methode“
 Bildquelle: Fa. Carcoustics

Das Ergebnis der Messungen zum Abstrahlgrad und zum Verlustfaktor ist in den Abbildung 8 und Abbildung 9 dargestellt.

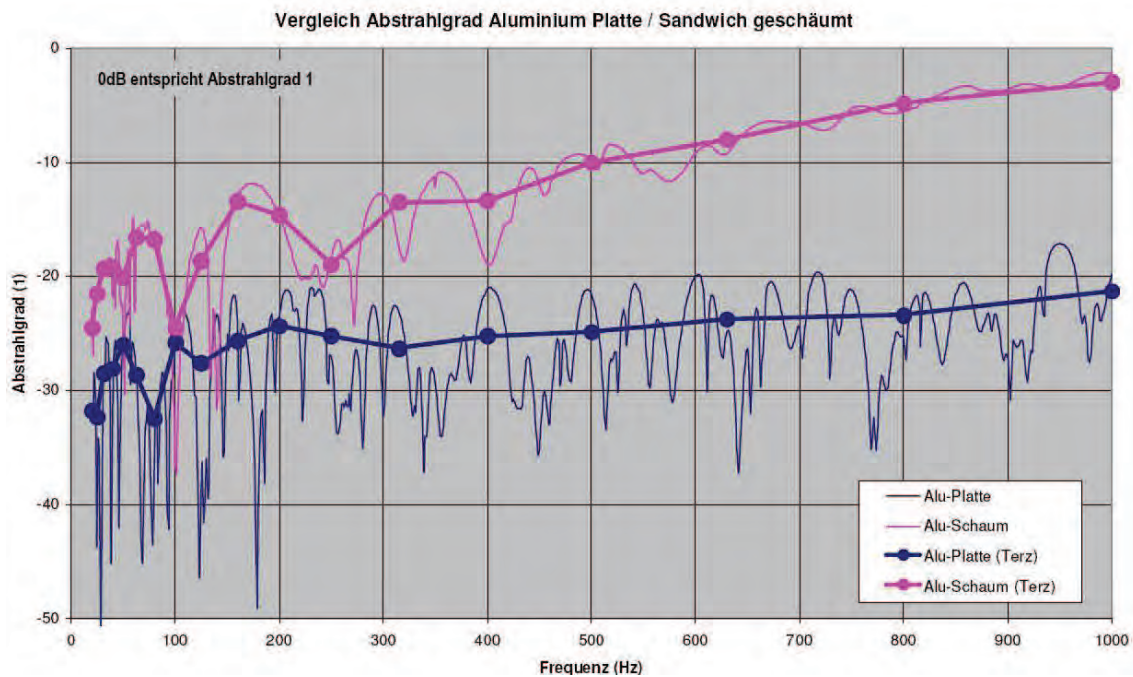


Abbildung 8: Vergleich des Abstrahlgrads der ungeschäumten und der geschäumten Sandwichplatte
 Bildquelle: Fa. Carcoustics

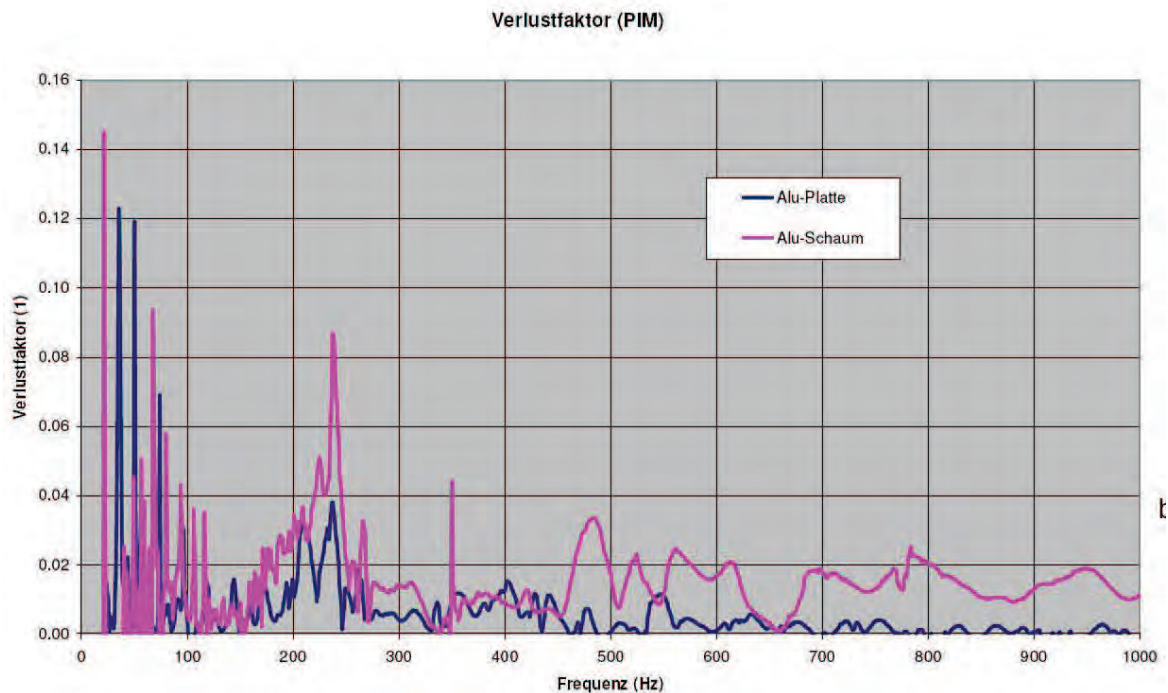


Abbildung 9: Vergleich des Verlustfaktors der ungeschäumten und der geschäumten Sandwichplatte
Bildquelle: Fa. Carcoustics

Es ist zu erkennen, dass in beiden Fällen die Kurve der geschäumten Platte oberhalb der Kurve der ungeschäumten Platte verläuft.

Damit ist der Abstrahlgrad der geschäumten Platte höher als der der ungeschäumten Platte. Dies ist auf die wesentlich höhere Steifigkeit der geschäumten Platte zurückzuführen. Beim Verlustfaktor weist die geschäumte Platte die erwarteten günstigeren Eigenschaften auf, insbesondere bei Frequenzen oberhalb 450 Hz.

Die abgestrahlte Leistung ist näherungsweise proportional zum Abstrahlgrad und umgekehrt proportional zum Verlustfaktor. Der bei höheren Frequenzen höhere Verlustfaktor bedeutet demnach eine Reduzierung des Körperschallpegels um ca. 6 dB.

Zusammenfassend ist also festzuhalten, dass ein Einsatz von Aluminiumschaumsandwichen im Automobil allein aus akustischen Gründen nicht sinnvoll erscheint. Wird das Material jedoch aus anderen Gründen (Steifigkeit etc.) eingesetzt, so kann der im Bereich höherer Frequenzen erhöhte Verlustfaktor und TL zusätzliche akustische Vorteile bieten.

Nach Durchführung der Messungen wurden die Platten am 23.04.2010 von Fa. Carcoustics zurück erhalten. Für die Ermittlung der Werkstoffkennwerte gemäß dem modifizierten Versuchsplan wurde die geschäumte Platte am 27.04.2010 ans IWT übergeben.

2.7 Quasistatische Materialeigenschaften

2.7.1 Festigkeit der Deckbleche und des nicht aufgeschäumten Kerns

Die quasistatischen mechanischen Eigenschaften der Deckbleche wurden vor und nach dem Aufschäumen des Kerns geprüft. Hierzu wurden Zugprüfungen sowohl in Walzrichtung als auch senkrecht dazu an den Deckblechen durchgeführt. Außerdem wurden Zugversuche an dem Kernmaterial im nicht aufgeschäumten Zustand durchgeführt. Bei allen Materialvarianten erfolgte die Probenentnahme durch Fräsen. In Abbildung 10 sind die Geometrie und die Abmessungen der Proben, die gemäß der Norm DIN EN 10002 [9] festgelegt wurden, dargestellt. Die Zugprüfung wurde an einer elektromechanischen Zugprüfmaschine der Firma Zwick/Roell (Typ Z020) durchgeführt. Für die Ermittlung des Elastizitätsmoduls erfolgte die Belastung kraftgeregelt mit einer Geschwindigkeit von 2 MPa/s. Anschließend wurde die Probe lagegeregelt mit einer Dehngeschwindigkeit von $0,0025 \text{ s}^{-1}$ bis zum Bruch belastet. Von jeder Variante wurden jeweils 10 Proben getestet. Bei der Einrichtung der Prüfmaschine wurde eine Zugprobe, die aus dem geschäumten Sandwich in Längsrichtung entnommen wurde, beschädigt, sodass bei dieser Charge nur 9 Proben ausgewertet wurden.

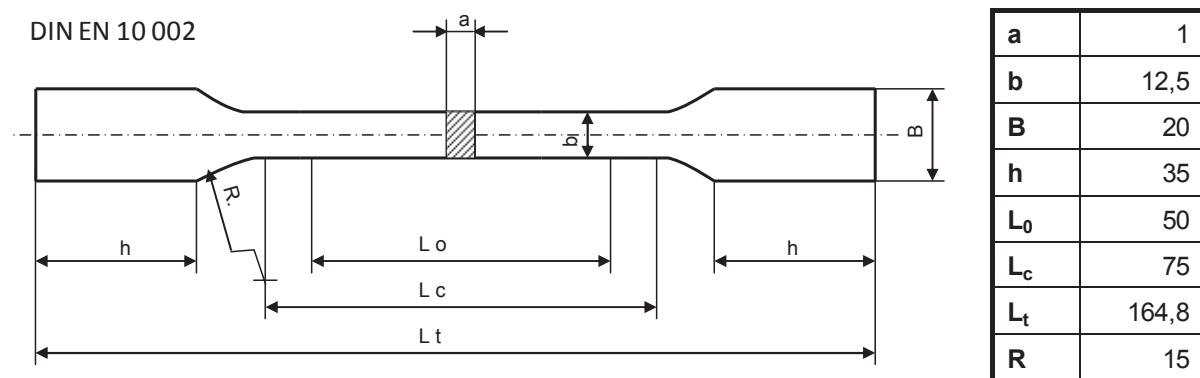


Abbildung 10: Geometrie und Abmessungen der Deckblechzugproben

Abbildung 11 zeigt exemplarisch eine Spannungs-Dehnungskurve von jeder Prüfvariante. Parallel hierzu sind in Tabelle 3 die ermittelten Kennwerte der fünf Chargen dargestellt. Die Deckbleche zeigen sowohl vor als auch nach dem Aufschäumen ein nahezu isotropes Verhalten. Vor dem Aufschäumen des Kerns liegt die 0,2%-Dehngrenze des Deckblechs in beiden Prüfrichtungen bei 50 MPa und die Zugfestigkeit liegt bei knapp 120 MPa. Leichte Unterschiede treten bei der Duktilität zwischen den beiden Prüfrichtungen auf. In Querrichtung wird eine geringfügig höhere Bruch- und Gleichmaßdehnung als in Längsrichtung ermittelt.

Ähnliches wurde auch für die Deckbleche festgestellt, die aus dem geschäumten Sandwich entnommen wurden. Die 0,2%-Dehngrenze und die Zugfestigkeit sind mit knapp 120 MPa bzw. 232 MPa für beide Prüfrichtungen nahezu identisch. Jedoch werden auch hier nach dem Aufschäumen in Querrichtung eine geringfügig höhere Bruch- und Gleichmaßdehnung ermittelt. Die Brucheinschnürung liegt bei allen vier Varianten bei etwa 30 %. Die Festigkeit des nicht aufgeschäumten Kerns liegt mit 136 MPa zwischen den Festigkeiten der Deckbleche. Die Duktilität des Kerns ist hingegen deutlich geringer als bei den Deckblechen, wie die geringe Bruchdehnung A und die geringe Brucheinschnürung Z zeigen.

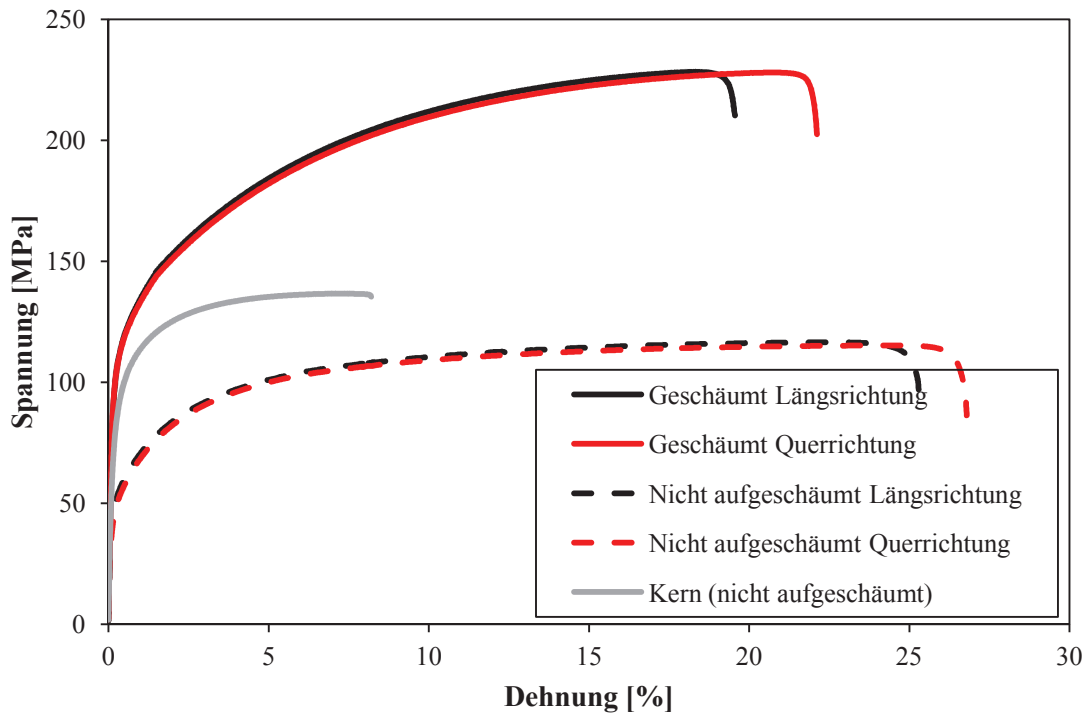


Abbildung 11: Spannungs-Dehnungs-Kurven der untersuchten Varianten

Die Elastizitätsmoduln der Deckblechproben, die aus dem aufgeschäumten Sandwich entnommen wurden, liegen in beiden Prüfrichtungen bei 70 GPa. Vor dem Aufschäumen wurde hingegen in beiden Prüfrichtungen ein Elastizitätsmodul von knapp 62 GPa ermittelt. Wie Abbildung 11 zeigt, ist der elastische Bereich dieser Proben relativ kurz. Dementsprechend ist der ermittelte Elastizitätsmodul mit einem relativ großen Fehler behaftet. Es kann nicht vollständig ausgeschlossen werden, dass die Proben in dem Ermittlungsbereich bereits anfangen plastisch zu fließen. Der Elastizitätsmodul des Kerns liegt auf dem Niveau der Elastizitätsmoduln der Deckblechproben aus dem aufgeschäumten Sandwich.

Variante	E-Modul [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_g [%]	A [%]	Z [%]
unaufgeschäumt Längsrichtung	61378 ± 10405	52 ± 1	118 ± 2	$21,6 \pm 1,3$	$24,1 \pm 1,8$	$30,4 \pm 2,8$
unaufgeschäumt Querrichtung	61758 ± 7402	49 ± 1	115 ± 2	$23,2 \pm 1,4$	$25,8 \pm 1,5$	$28,2 \pm 4,8$
aufgeschäumt Längsrichtung	69677 ± 4571	117 ± 5	232 ± 5	$18,9 \pm 1,5$	$20,1 \pm 1,9$	$32,2 \pm 11,2$
aufgeschäumt Querrichtung	70058 ± 2446	116 ± 6	232 ± 6	$20,3 \pm 0,5$	$21,7 \pm 0,7$	$31,6 \pm 6,8$
Kern (nicht aufgeschäumt)	69423 ± 2722	90 ± 1	136 ± 1	$7,1 \pm 0,3$	$7,8 \pm 0,5$	$7,1 \pm 1,5$

Tabelle 3: Zugversuchskennwerte der Deckbleche und des nicht aufgeschäumten Kerns

Der Unterschied zwischen den Deckblecheigenschaften vor und nach dem Aufschäumen wird in Abbildung 12 verdeutlicht. Hier sind die Zugfestigkeiten R_m der Proben den dazugehörigen plastischen Dehnungen A_g gegenübergestellt. Das Deckblech des aufgeschäumten Sandwichs erreicht nahezu die doppelte Zugfestigkeit des Deckblechs aus dem nicht aufgeschäumten Sandwich. Die Gleichmaßdehnung des Deckblechs aus dem nicht aufgeschäumten Sandwich ist hingegen nur 3 %

größer als nach dem Aufschäumprozess. Durch diesen wird dementsprechend eine deutliche Steigerung der Festigkeit erreicht bei einer nur geringen Abnahme der Zähigkeit. Wie bereits erwähnt, liegt die Festigkeit des Kerns zwischen den Festigkeiten der Deckbleche, jedoch ist seine Duktilität deutlich geringer.

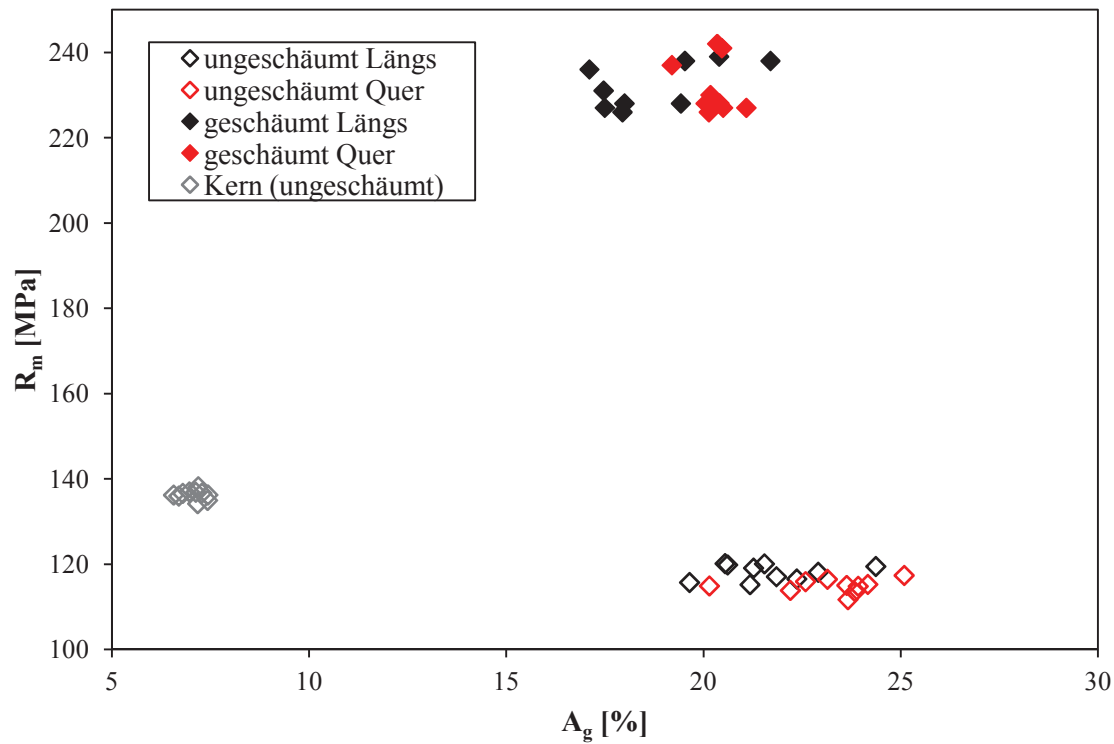


Abbildung 12: Zugfestigkeit und Gleichmaßdehnung der untersuchten Deckblechproben

Um eine quantitative Beschreibung der Zugversuchskurven zu ermöglichen wird an die fünf Prüfvarianten die in Gleichung 5 dargestellte Ramberg-Osgood-Funktion angepasst.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{K}\right)^n \quad (\text{Gleichung 5})$$

Diese beschreibt die Dehnung ε in Abhängigkeit von der Spannung σ mit den Parametern n und K sowie dem Elastizitätsmodul E . Für den Elastizitätsmodul wurde der jeweilige Mittelwert aus Tabelle 3 eingesetzt. Die Parameter n und K wurden durch Fehlerquadratminimierung an die experimentellen Spannungs-Dehnungskurven angepasst. Die Ramberg-Osgood-Kurve ist eine stetig zunehmende Funktion, sodass sie nur bis zur Zugfestigkeit R_m der Kurven angefügt wurde. Für die fünf Varianten sind in Tabelle 4 die ermittelten Parameter sowie die Dehnung $\varepsilon(R_m)$, bis zu der die Anpassung gültig ist, gegenübergestellt. Die dazugehörigen Spannungs-Dehnungskurven sind in Abbildung 13 dargestellt. Die Spannungs-Dehnungs-Kurven der Längs- und Querproben aus dem aufgeschäumten Sandwich zeigen einen nahezu identischen Verlauf. Das Gleiche gilt für die beiden Kurven des nicht aufgeschäumten Sandwichs. Dementsprechend sind die Längs- und Querparameter vor bzw. nach dem Aufschäumen nahezu identisch. Aufgrund des unterschiedlichen mechanischen Verhaltens des Kerns werden für ihn abweichende Parameter ermittelt.

Variante	K [MPa]	n	$\epsilon(R_m)$ [%]
unaufgeschäumt Längsrichtung	151	7,3	21,8
unaufgeschäumt Querrichtung	145	7,5	23,4
aufgeschäumt Längsrichtung	312	6,0	19,2
aufgeschäumt Querrichtung	309	5,9	20,6
Kern ungeschäumt	183	10,0	7,3

Tabelle 4: Parameter der Ramberg-Osgood-Funktion

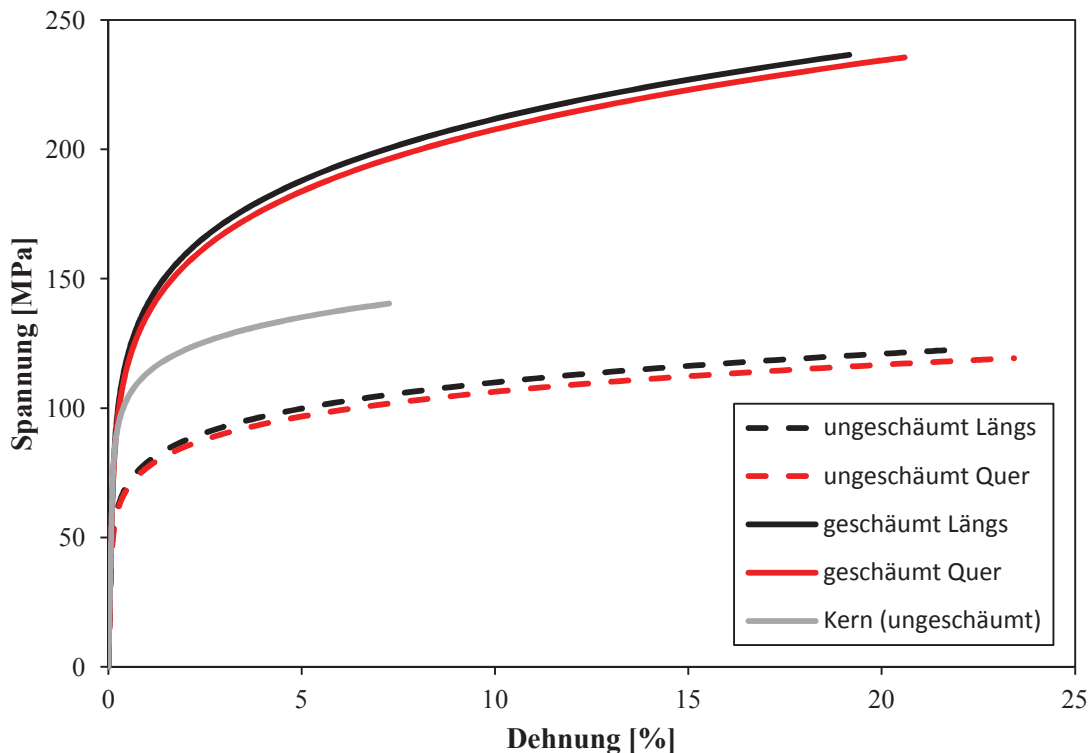


Abbildung 13: Ramberg-Osgood-Kurven der Deckbleche und des ungeschäumten Kerns

2.7.2 Druckfestigkeit des Aluminiumschaumkerns

In Anlehnung an die Norm DIN 53 291 [10] wurden quadratischen Druckproben mit einer Kantenlänge von 50 mm (Abbildung 14) gefertigt. Die Prüfung erfolgte in Anlehnung an die Norm DIN 50134 [11] an einer servohydraulischen Prüfmaschine der Firma Schenck (Typ PSA). Für die Versuchsdurchführung und Datenerfassung wurden Druckplatten mit zwei Halterungen für induktive Wegaufnehmer konstruiert. Die Wegaufnehmer wurden einander gegenüberliegend angebracht, um jeweils den Abstand der Druckplatten zueinander zu messen. Für die Erstellung der Spannungs-Stauchungs-Diagramme wurde der Mittelwert aus den zwei gemessenen Abstandsänderungen verwendet. Die Stauchung der Druckproben erfolgte weggeregelt mit einer Geschwindigkeit von 0,2 mm/min.

Wie in DIN 50134 [11] dargestellt (Abbildung 15) wird am Anfang der Prüfung die Steigung der quasi-elastischen Geraden bestimmt. Sie charakterisiert die strukturabhängige Steifigkeit m des Kerns. Die Steigung m wird mit einer Sekante, die durch die Umkehrpunkte einer Spannungs-Dehnungs-Hystereseschleife führt bestimmt. Diese ergibt sich aus dem Entlasten bei der Druckspannung R_{70} und

dem darauf folgenden Belasten bei der Spannung R_{20} . Die beiden Spannungswerte sind abhängig von der Plateauspannung R_{plt} der Proben und betragen 70 % (R_{70}) bzw. 20 % (R_{20}) davon. Die Plateauspannung wird abhängig von der Spannungs-Stauchungs-Kurve auf zwei unterschiedliche Arten ermittelt. Bei einem Spannungs-Stauchungs-Diagramm mit einem Plateaubereich (Abbildung 15 links) berechnet sich die Plateauspannung aus dem arithmetischen Mittelwert der Spannungen im Stauchungsbereich von 20 bis 40 %. Ein Plateaubereich liegt vor, wenn die Differenz ΔR zwischen der größten Spannung R_{max} und der kleinsten Spannung R_{min} in diesem Stauchungsbereich kleiner als ein Viertel der berechneten Plateauspannung R_{plt} ist. Andernfalls liegt ein Spannungs-Stauchungs-Diagramm mit kontinuierlichem Spannungsanstieg vor (Abbildung 15 rechts). In diesem Fall ergibt sich die Plateauspannung aus dem Mittelwert der maximalen Spannung R_{max} und der minimalen Spannung R_{min} in dem Stauchungsbereich von 20 bis 40 %.

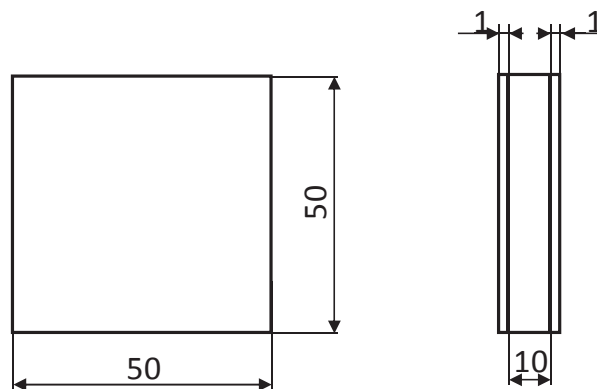


Abbildung 14: Abmessungen der Aluminiumschaumsandwichproben für die Druckversuche

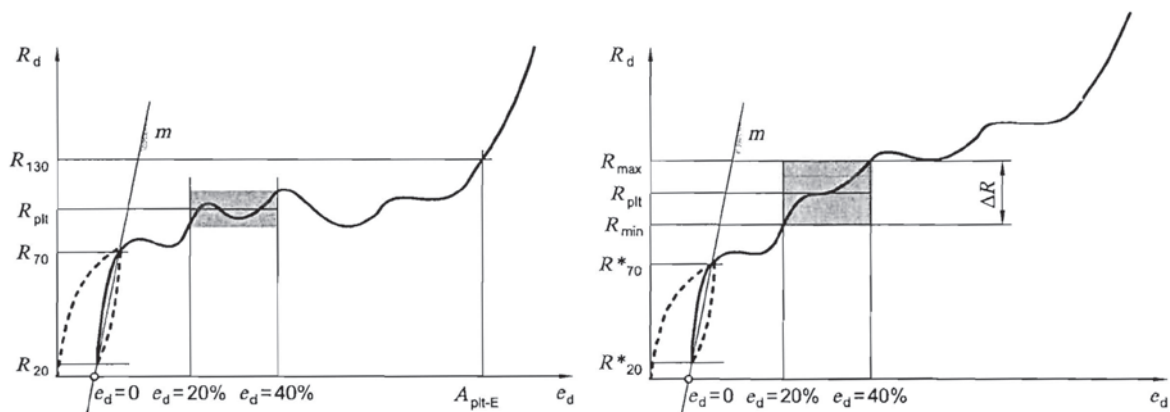


Abbildung 15: Spannungs-Stauchungs-Diagramme; links) mit Plateaubereich; rechts) mit kontinuierlichem Spannungsanstieg [11]

Der Punkt im Spannungs-Stauchungs-Diagramm R_{plt-E} , der bei 130 % der Plateauspannung liegt und als Plateau-Ende bezeichnet wird, kennzeichnet im Allgemeinen den Beginn des Verdichtungsgebietes. Die dazugehörige Gesamtstauchung wird Stauchung bei Plateau-Ende A_{plt-E} genannt. Diese wird nach Norm DIN 50134 [11] für die Diagramme mit Plateau bestimmt.

Für die Charakterisierung des Aluminiumschaumkerns unter Druckbelastung wurden zwei Serien mit jeweils 10 Proben geprüft. Bei der ersten Serie wurde, anders als in der Norm DIN 50134 [11] beschrieben, auf das Entlasten zu Beginn des Versuchs verzichtet, während bei der zweiten Serie die Prüfung der Norm entsprechend durchgeführt wurde.

In Abbildung 16 sind zwei Spannungs-Stauchungskurven-Kurven der ersten Serie exemplarisch dargestellt. Die Kurven zeigen einen ähnlichen Verlauf, jedoch liegt eine Kurve mit kontinuierlichem Spannungsanstieg (rote Kurve) und eine mit einem Plateaubereich (blaue Kurve) vor.

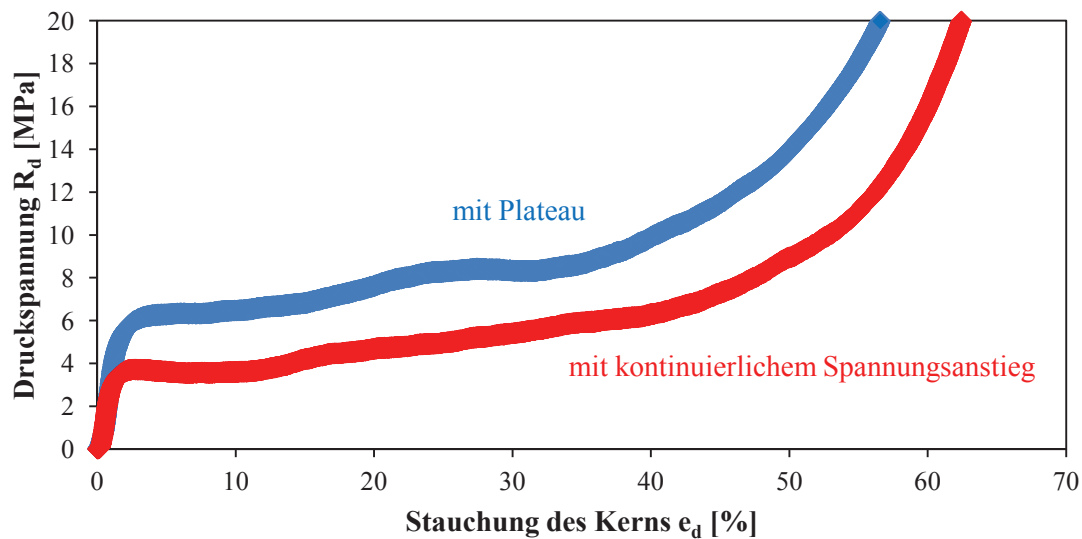


Abbildung 16: Spannungs-Stauchungskurven der ersten Serie mit kontinuierlichem Spannungsanstieg und mit einem Plateaubereich

Um auch bei der ersten Serie den quasi linearen Anstieg bestimmen zu können, wurde eine Gerade an die experimentellen Daten angepasst. Das Spannungsintervall, in dem die Steigung m bestimmt wurde, wurde für jede Probe individuell festgelegt. Für die Bestimmung der Spannungen R_{20} und R_{70} , die für die Prüfung der zweiten Serie benötigt wurden, ist die mittlere Plateauspannung der ersten Serie als Berechnungsgrundlage verwendet worden. In Abbildung 17 sind die Ergebnisse der Prüfung beider Serien gegenübergestellt und in Tabelle 5 sind die ermittelten Kennwerte zusammengefasst.

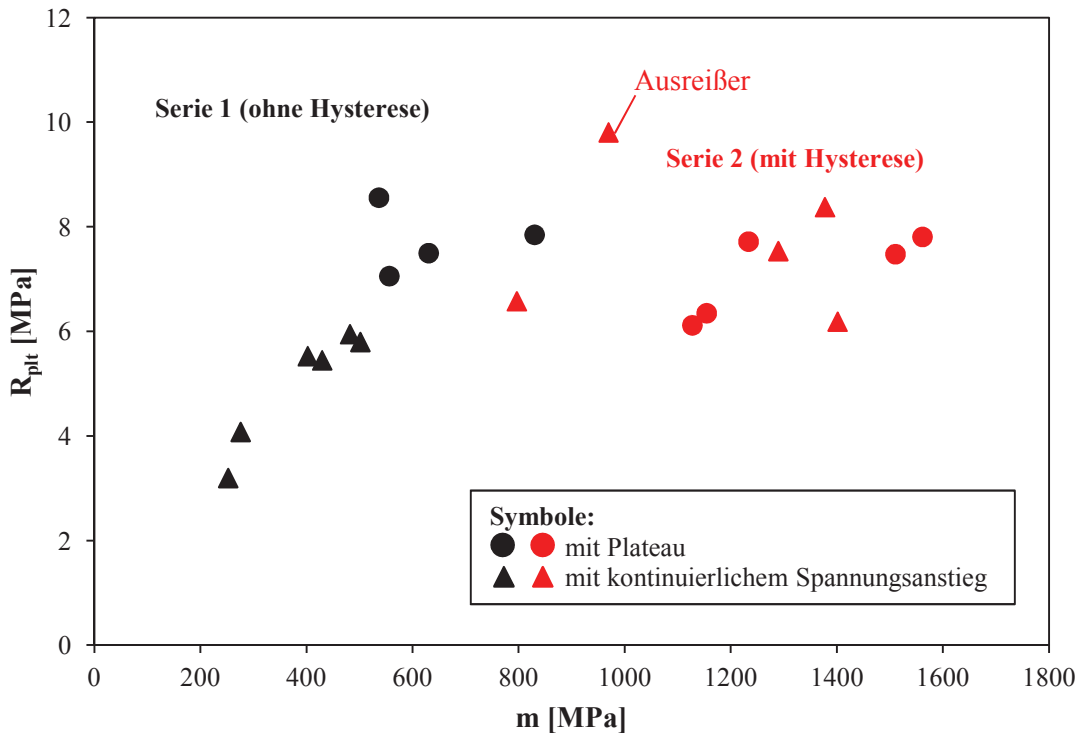


Abbildung 17: Plateauspannung und Steigung m der beiden Druckversuchsserien

Die Auswertung beider Serien zeigt, dass die Anfangssteigung m und die Plateauspannung R_{pt} stark streuen. Bei der zweiten Serie liegt ein Ausreißer vor. Bei dieser Probe begann der Verdichtungsbereich früher als bei allen anderen Proben, sodass für diese Probe eine deutlich höhere Plateauspannung ermittelt wurde. Bei der Prüfung der Proben ohne Hysterese ist zu erkennen, dass mit einer Zunahme der Anfangssteigung auch die Plateauspannung R_{pt} zunimmt. Dies wird auch bei der zweiten Serie beobachtet, jedoch nicht so stark ausgeprägt. Obwohl alle Proben aus der gleichen Charge stammen, wurden bei der zweiten Serie im Mittel höhere Plateauspannungen als bei der ersten Serie gemessen. Parallel hierzu wurde bei der zweiten Prüfvariante eine deutlich größere Steigung der quasi-elastischen Geraden ermittelt, was u. a. auf die unterschiedlichen Prüfmethode zurückzuführen ist. Die Stauchung bei Plateau-Ende wurde nur für die Kurven mit Plateaubereich bestimmt. Diese ist bei den Proben der ersten Serie geringfügig größer.

	$\rho_{rel.} [\%]$	$m [\text{MPa}]$	$R_{pt} [\text{MPa}]$	$A_{pt-E} [\%]$
Variante 1 (ohne Hysterese)	$15,5 \pm 1,7$	489 ± 169	$6,10 \pm 1,68$	$47,11 \pm 2,45$
Variante 2 (mit Hysterese)	$16,3 \pm 1,2$	1242 ± 239	$7,40 \pm 1,15$	$45,04 \pm 2,18$

Tabelle 5: Auswertung der beiden Versuchsserien

Um die Streuung der Plateauspannung quantitativ zu beschreiben, wird die 2-parametrische Weibullverteilung (Gleichung 1) an die experimentell ermittelten Werte angepasst, wie in Kapitel 2.5 beschrieben. D. h. mit der Weibullverteilung wird für eine Druckbeanspruchung R , die die beliebige Beanspruchung σ in Gleichung 1 ersetzt, die Wahrscheinlichkeit P bestimmt, mit der die Druckbeanspruchung die Plateauspannung der Proben überschreitet. Der Lageparameter $R_{pt,m}$ steht für

den Median der Plateauspannung und der Parameter m_{plt} ist ein Maß für die Streuung der Plateauspannung. Die experimentellen Ergebnisse sowie die angepassten Weibullfunktionen sind für beiden Serien in Abbildung 18 dargestellt. Der Ausreißer, der bei der zweiten Prüfvariante auftrat, wurde bei der Auswertung nicht berücksichtigt. Für die Spannungs-Stauchungs-Kurven, bei denen ein Plateau auftrat, sind die Datenpunkte als Kreise dargestellt und für diejenigen, bei denen ein kontinuierlicher Spannungsanstieg festgestellt wurde, sind die Datenpunkte als Dreiecke dargestellt.

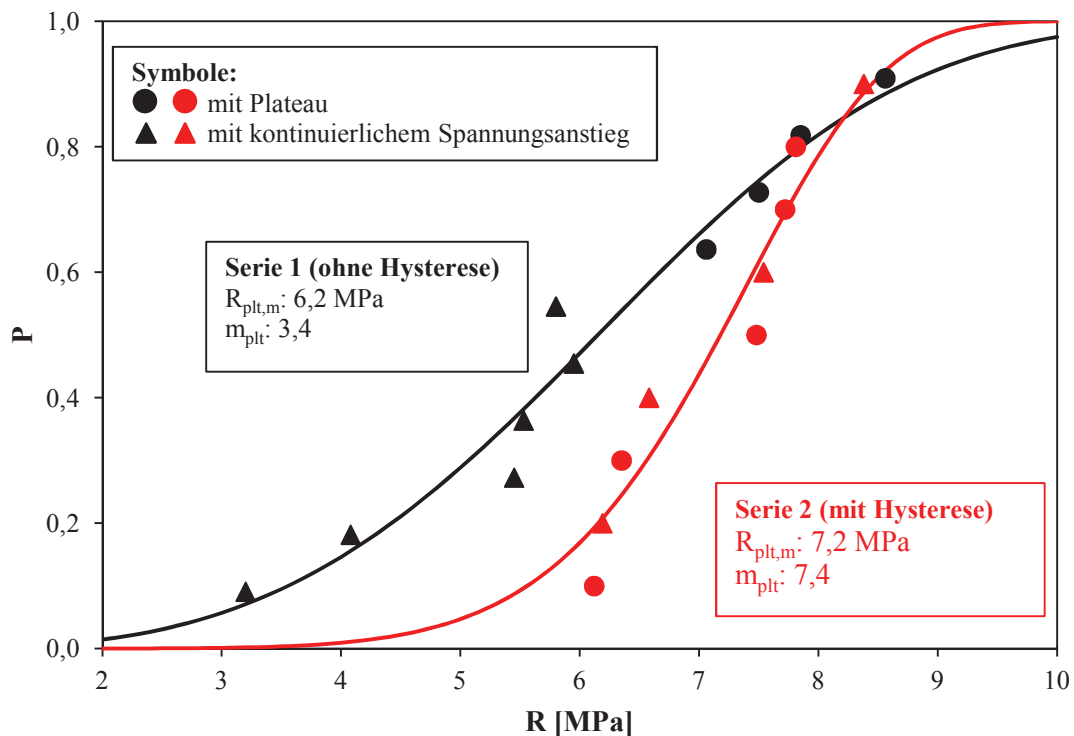


Abbildung 18: Verteilung der Plateauspannungen

Bei der zweiten Serie liegt eine höhere Plateauspannung vor als bei der ersten Serie, gleichzeitig ist die Streuung bei dieser Serie geringer. Da die Proben alle aus der gleichen Sandwichcharge stammen und die durchgeführte Hysterese keinen starken Einfluss auf die Plateauspannung haben sollte, müssten theoretisch für beiden Serien nahezu identische Verteilungen vorliegen. Vermutlich wird der Unterschied, wie in Tabelle 3 dargestellt, von der höheren mittleren Dichte der Proben der zweiten Serie hervorgerufen. Der Einfluss der Probendichte auf die Steigung m sowie die Plateauspannung ist in Abbildung 19 und Abbildung 20 dargestellt. Hier zeigt sich für beide Prüfvarianten, dass sowohl die Steigung m als auch die Plateauspannung mit der relativen Dichte ρ_{rel} des Aluminiumschaumkerns zunimmt. Diese variiert bei den Proben zwischen 12 und 18 %. In Abbildung 19 ist der Einfluss der Prüfmethode auf die Steigung m zu erkennen. Über dem gesamten Dichtebereich wird mit der zweiten Prüfvariante mit Hysterese im Vergleich zur ersten Methode ohne Hysterese eine höhere Steigung ermittelt. Die Plateauspannung wird hingegen von der Prüfvariante nicht beeinflusst. Beide Serien zeigen, mit Ausnahme des Ausreißers, eine nahezu identische Abhängigkeit von der relativen Dichte.

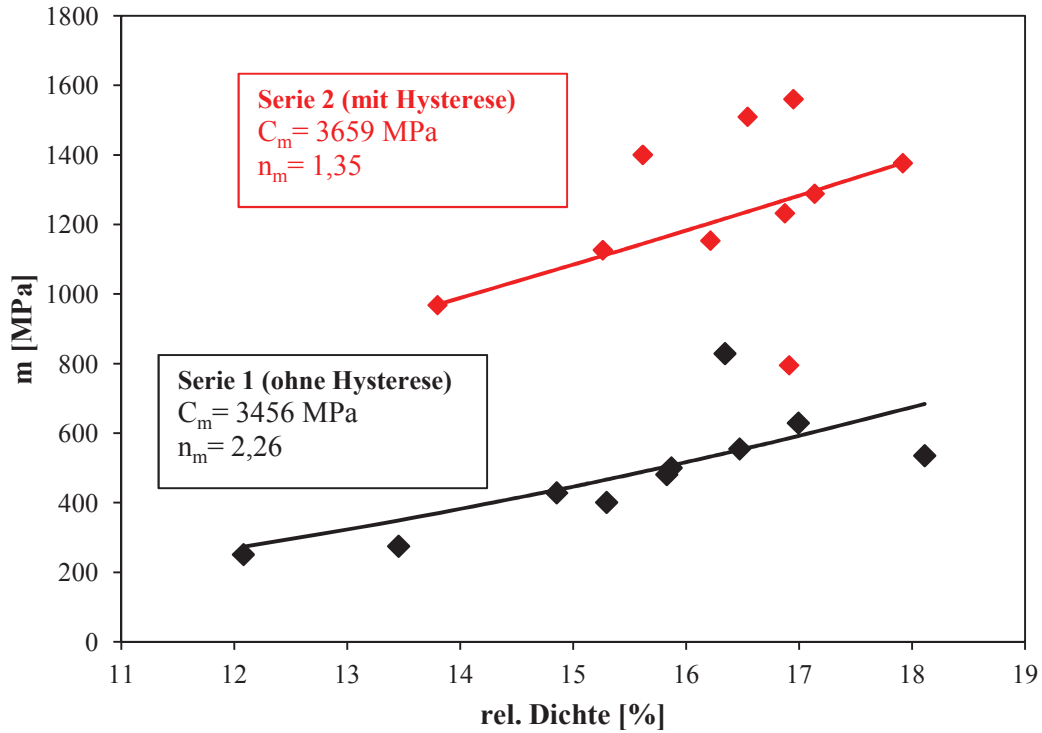


Abbildung 19: Einfluss der Probendichte auf die Steigung m

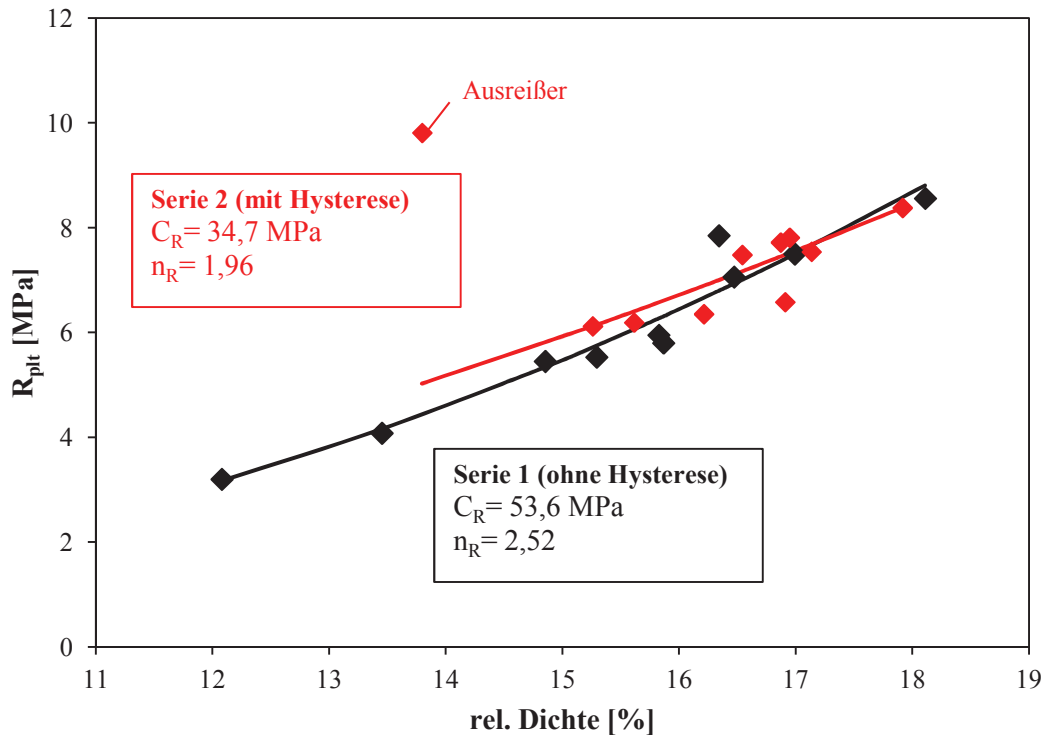


Abbildung 20: Einfluss der Probendichte auf die Plateauspannung

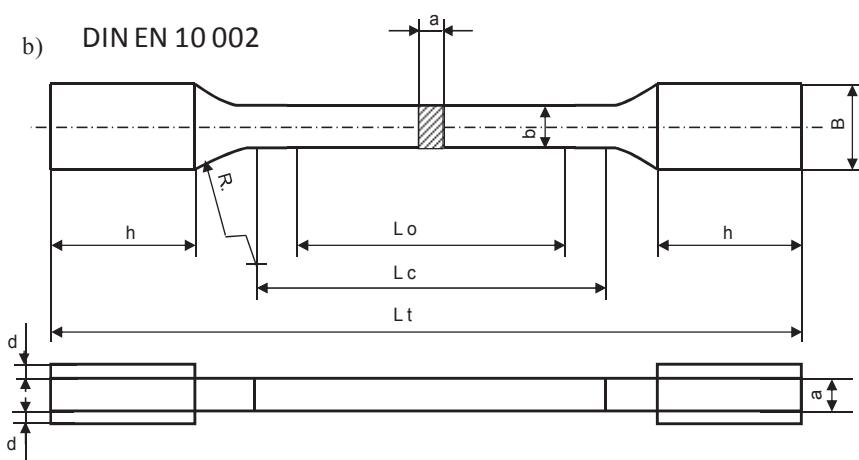
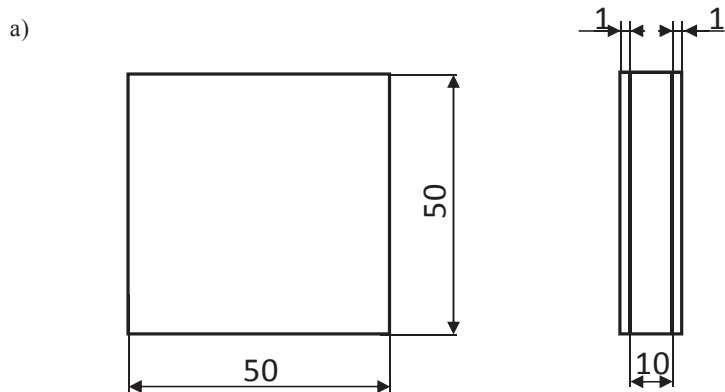
Für die quantitative Beschreibung der Dichteabhängigkeit werden jeweils die Parameter von Gleichung 3, wie in Kapitel 2.5 beschrieben, an die Plateauspannung sowie die Steigung m angepasst.

Mit den Parameter C_m und n_m wird die Steigung m beschrieben und die Parameter C_R und n_R charakterisieren die Dichteabhängigkeit der Plateauspannung. Bei der zweiten Prüfsérie wurde der zuvor erwähnte Ausreißer bei der Anpassung der Plateauspannung nicht berücksichtigt. In Abbildung 19 und Abbildung 20 sind die resultierenden Kurven und die dazugehörigen Parameter ebenfalls dargestellt. Der Dichteinfluss auf die Kennwerte wird mit ihnen gut beschrieben.

Zusammenfassend lässt sich aus der Untersuchung der Druckproben folgern, dass die variierende relative Dichte des Aluminiumschaumkerns einen maßgeblichen Einfluss auf die Streuung der Kennwerte hat. Durch eine Klassierung der Proben auf Basis ihrer Dichte ist eine deutlich geringere Streuung der Kennwerte zu erwarten. Ansonsten kann die Streuung der Plateauspannung mit einer 2-parametrischen Weibullverteilung beschrieben werden. Die Unterschiede zwischen den Verteilungen der ersten und zweiten Serie zeigen jedoch, dass bei Prüfumfang von 10 Proben die Streuung der Plateauspannung nicht ausreichend erfasst wird. D. h. die gewählte Probenanzahl reicht für eine statistisch abgesicherte Aussage nicht aus.

2.7.3 Zugfestigkeit des Aluminiumschaumkerns

Zugversuche an dem Aluminiumschaumkern wurden sowohl senkrecht als auch parallel zur Deckschichtebene durchgeführt. Die erstgenannte Prüfung erfolgte gemäß der Norm DIN 53 292 [12] an Sandwichproben mit einer quadratischen Grundfläche, wie in Abbildung 21 a dargestellt. Für die Prüfung des Kerns wurden die Deckbleche nicht entfernt. An ihnen wurden Metallblöcke mit einem Zwei-Komponenten-Kleber befestigt. Diese sind ein Teil der Spannvorrichtung, mit der die Kraft der Zugprüfmaschine in die Probe eingeleitet wurde. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde die Spannvorrichtung (Abbildung 22) speziell für die Prüfung der Metallschaumproben konstruiert. Mit zwei induktiven Wegaufnehmern, die an den aufgeklebten Metallblöcken befestigt wurden, wurde die Längenänderung der Probe während der Zugprüfung erfasst. Die Kraftaufbringung erfolgte weggeregelt an einer servohydraulischen Prüfmaschine der Firma Schenck (Typ PSA) mit einer Geschwindigkeit von 0,05 mm/min. Für die Prüfung des Kerns parallel zur Deckschichtebene wurden die Deckbleche im Prüfbereich durch Fräsen entfernt. Die Probengeometrie und die Abmessungen, die in Anlehnung in die Norm DIN EN 10 002 [9] festgelegt wurden, sind in Abbildung 21 b dargestellt. An einer elektromechanischen Zugprüfmaschine der Firma Zwick/Roell (Typ Z020) wurde die Prüfung durchgeführt. Die Ermittlung des quasi linearen Anstiegs m erfolgte kraftgeregelt mit einer Geschwindigkeit von 0,02 MPa/s. Anschließend wurde die Probe lagegeregelt mit einer Dehngeschwindigkeit von 20 ppm/s bis zum Bruch belastet. Beide Probentypen wurden jeweils mit zwei unterschiedlichen Prüfvarianten untersucht. Wie bei den zuvor beschriebenen Druckversuchen wurde die Anfangssteigung m durch Anpassen einer Geraden (Prüfvariante 1) bzw. mit Hilfe einer Hysterese-Schleife (Prüfvariante 2) bestimmt. Die Umkehrpunkte der Hystereseschleife lagen bei der Prüfung senkrecht zur Deckschichtebene bei 1,0 MPa und 0,2 MPa. Bei der Prüfung parallel zur Deckschichtebene lag der obere Umkehrpunkt bei 1,3 MPa und der untere Umkehrpunkt ebenfalls bei 0,2 MPa. Die Umkehrpunkte der Hystereseschleifen wurden auf Basis der Zugversuchsergebnisse der Prüfvarianten ohne Hystereseschleife gewählt. Pro Variante wurden 10 Proben zur Kennwertermittlung geprüft.



a	10
b	30
B	50
h	70
L_0	100
L_c	125
L_t	314
R	35
d	1

Abbildung 21: Geometrie und Abmessungen der Zugproben; a) Prüfung senkrecht zur Deckschichtebene; b) Prüfung parallel zur Deckschichtebene



Abbildung 22: Spannvorrichtung für die Prüfung des Aluminiumschaumkerns senkrecht zur Deckschichtebene

Beim Einrichten der Zugprüfmaschine für die Prüfung des Kerns parallel zur Deckschichtebene wurden zwei Proben beschädigt, sodass für die beiden Prüfvarianten jeweils nur neun Proben zur Verfügung standen. Bei der Prüfung senkrecht zur Deckschicht versagte bei der Variante ohne Hysterese bei einer Probe die Klebung, sodass ebenfalls nur neun Proben ausgewertet werden konnten. Deutlich weniger gültige Proben stehen bei der Auswertevorrichtung mit Hystereseschleife zur Verfügung. Hier hat bei drei Proben die Klebung versagt und bei fünf Proben versagte der Kern bevor der obere Umkehrpunkt der Hystereseschleife erreicht wurde. Die Auswertung der Steigung m dieser Proben erfolgte daher wie bei der Prüfmethode ohne Hystereseschleife.

Abbildung 23 zeigt exemplarisch für die beiden Belastungsrichtungen je zwei Spannungs-Dehnungskurven ohne Hystereseschleife. Diese verdeutlichen den Unterschied im Kernverhalten abhängig von der Belastungsrichtung. Bei der Belastung des Kerns senkrecht zur Deckschichtebene nimmt zunächst die Spannung mit zunehmender Dehnung zu. Nach Erreichen der Maximalspannung fällt die Spannung kontinuierlich bis nahe Null ab. Dabei werden Bruchdehnungen von 20 % erreicht. Bei der Belastung des Kerns parallel zur Deckschichtebene brechen hingegen die Proben bei Erreichen der Maximalspannung. In Abbildung 24 und Abbildung 25 sind die Anfangssteigung m bzw. die Zugfestigkeit R_m der Proben in Abhängigkeit von der Kerndichte dargestellt. Die Dichte der quadratischen Kernzugproben variiert zwischen 13 und 18 %. In dieser Streubreite ist eine Zunahme der Steigung m sowie der Zugfestigkeit mit der relativen Dichte des Kerns zu erkennen. Zwischen den Proben, die ohne und mit Hystereseschleife geprüft wurden, ist kein Unterschied bei der Anfangssteigung zu erkennen, zumal auch nur zwei Proben mit Hystereseschleife geprüft wurden. Auf

die Zugfestigkeit der Proben sollte das Einfügen der Hystereseschleife keinen Einfluss haben. Dieser ist auch nicht festzustellen. Bei den Kernzugproben für die Prüfung parallel zur Deckschichtebene liegt die relative Dichte zwischen 15,5 und 17 % und streut damit weniger als die Dichte der quadratischen Kernzugproben. Aber auch hier ist eine Zunahme der Steigung m und der Zugfestigkeit mit der relativen Dichte zu erkennen. Ein Einfluss der Prüfmethode auf die Anfangssteigung und die Zugfestigkeit ist nicht zu erkennen.

Der direkte Vergleich der beiden Probenvarianten zeigt, dass bei gleicher relativen Dichte die Steifigkeit (Anfangssteigung m) des Aluminiumschaums in Dickenrichtung kleiner ist als parallel zur Deckschichtebene. Das Gleiche gilt auch für die Zugfestigkeit der Proben. An die beiden Kennwerte werden jeweils, wie in Kapitel 2.5 beschrieben, die Parameter der Gleichung 3 durch Fehlerquadratminimierung angepasst. Da bei beiden Probenvarianten keine Unterschiede zwischen den Prüfvarianten aufgetreten sind, wurde bei der Auswertung nicht zwischen den Prüfmethoden unterschieden. Die berechneten Kurven sowie die Parameter sind in Abbildung 24 und Abbildung 25 ebenfalls dargestellt. Die Kurvenverläufe verdeutlichen, dass der Kern bei Belastung parallel zur Deckschichtebene eine höhere Steifigkeit und eine höhere Festigkeit aufweist als bei Belastung senkrecht zur Deckschichtebene.

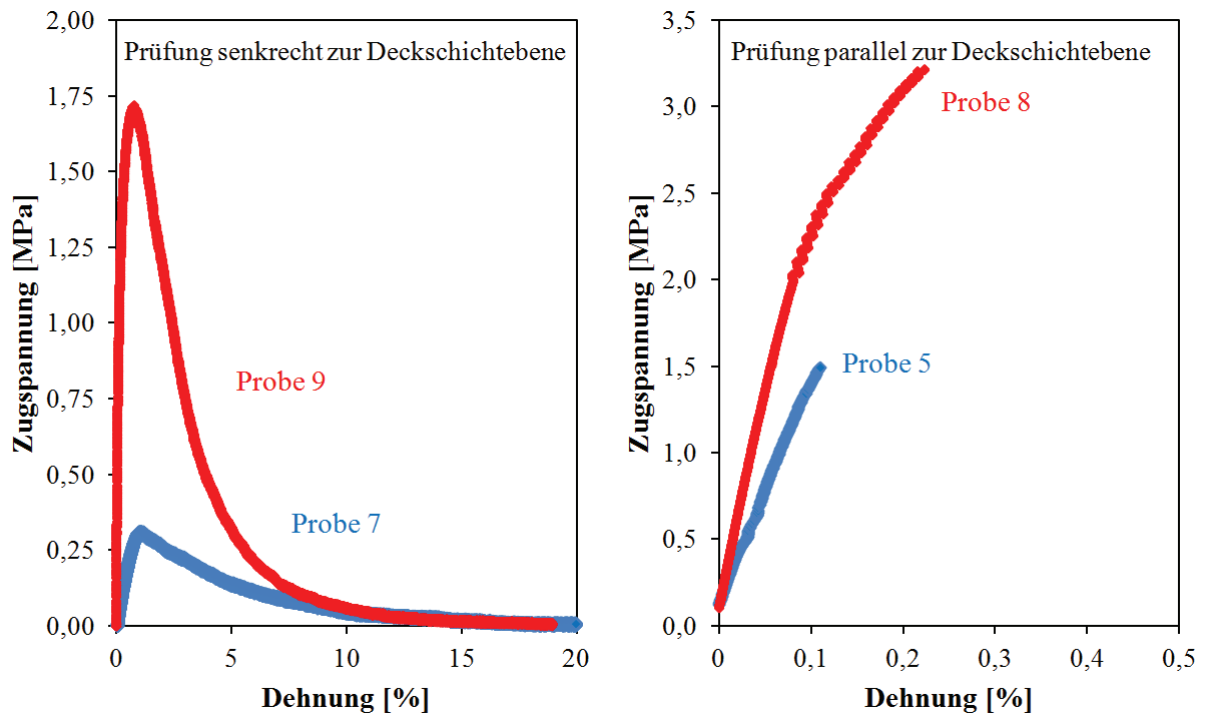


Abbildung 23: Spannungs-Dehnungskurven des Aluminiumschaumkerns bei Belastungen senkrecht und parallel zur Deckschichtebene

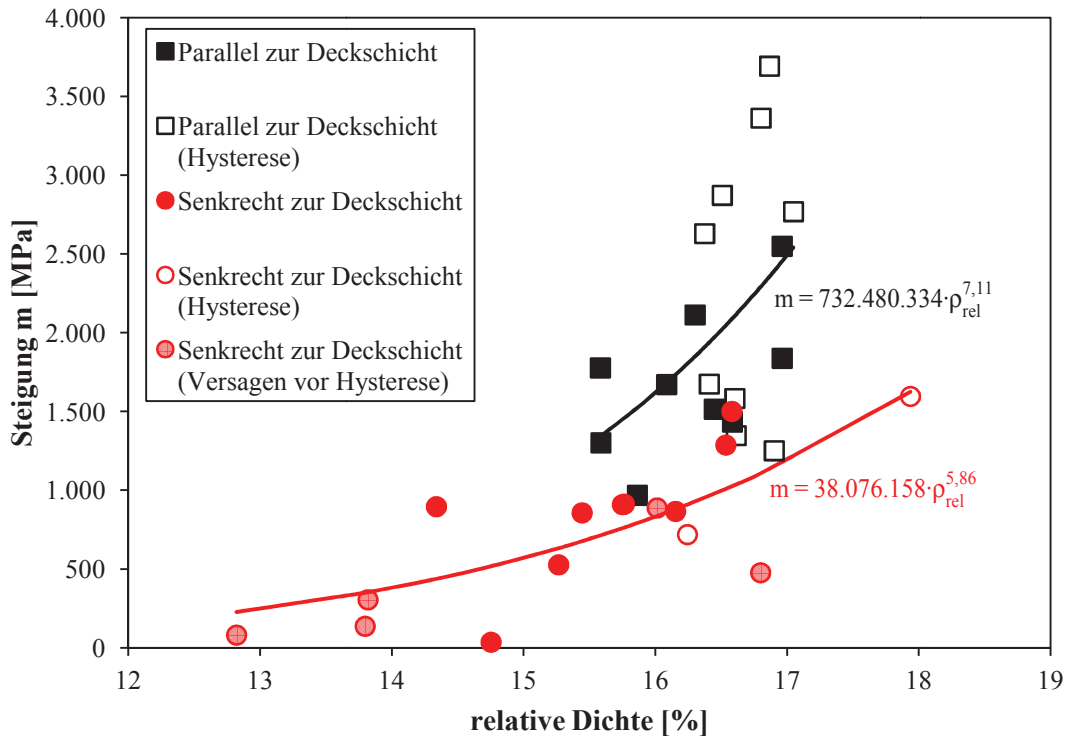


Abbildung 24: Einfluss der Probendichte auf die Anfangssteigung m

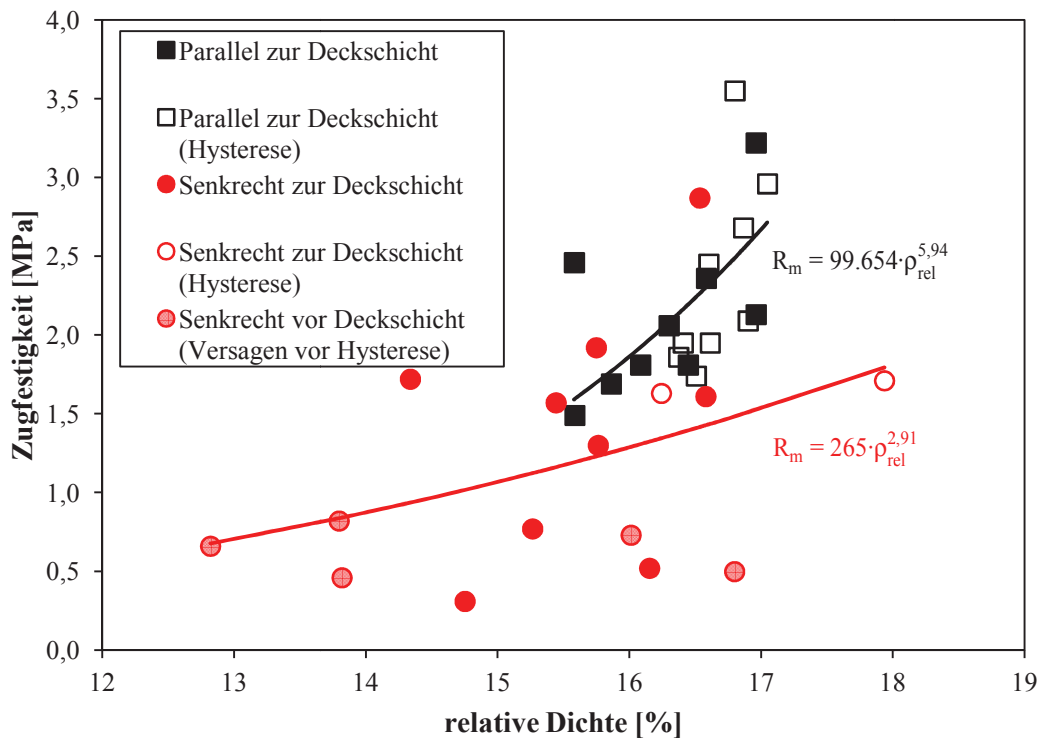


Abbildung 25: Einfluss der Probendichte auf die Zugfestigkeit

In Tabelle 6 sind die Mittelwerte und die dazugehörigen Standardabweichungen der Aluminiumschaumkennwerte für die beiden Belastungsrichtungen zusammengefasst. Um die Streuung der beiden Zugfestigkeiten des Kerns quantifizieren zu können, wurde die zwei-parametrische Weibullverteilung aus Gleichung 1, wie in Kapitel 2.5 beschrieben, an die experimentellen Werte

angepasst. Zwischen den Prüfmethode mit und ohne Hysterese wurde dabei nicht unterschieden. In Abbildung 26 sind die experimentell ermittelten Bruchwahrscheinlichkeiten sowie die angepassten Weibullverteilungen dargestellt. Bei der Prüfung des Kerns parallel zur Deckschichtebene ist der Median der Zugfestigkeit $R_{m,50\%}$ doppelt so groß wie der Median bei einer Prüfung senkrecht zur Deckschichtebene. Dies liegt zum einen an der höheren mittleren Kerndichte, wie in Tabelle 6 dargestellt. Zum anderen ist aber auch bei gleicher Dichte die Zugfestigkeit des Aluminiumschaums parallel zur Deckschichtebene größer als senkrecht hierzu, wie Abbildung 25 zeigt. Die Streuung ist bei einer Prüfung des Kerns parallel zur Deckschichtebene geringer. Hierzu trägt vermutlich die geringere Streuung der relativen Dichte der Proben bei.

	$\rho_{rel.} [\%]$	$R_m [\text{MPa}]$	$m [\text{MPa}]$	$A_g [\%]$
Parallel zur Deckschichtebene	$16,5 \pm 0,5$	$2,24 \pm 0,56$	2020 ± 780	$0,086 \pm 0,055$
Senkrecht zur Deckschichtebene	$15,5 \pm 1,3$	$1,19 \pm 0,71$	751 ± 472	$0,317 \pm 0,379$

Tabelle 6: Ergebnis der Aluminiumschaumkernprüfung

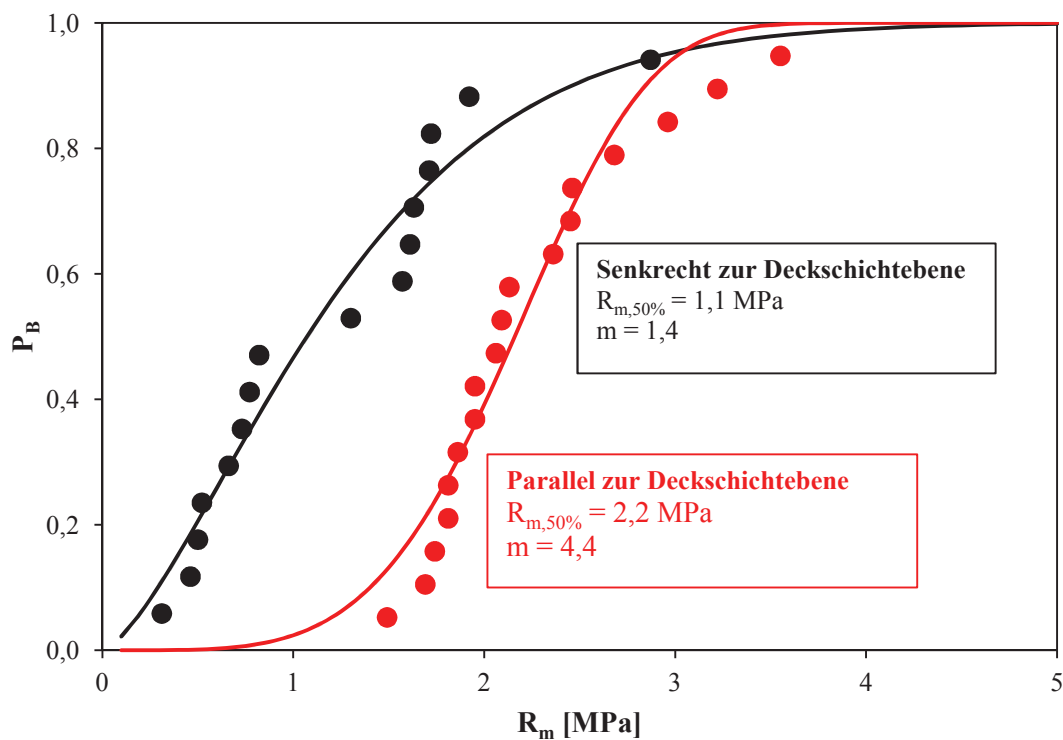


Abbildung 26: Streuung der Zugfestigkeit des Aluminiumschaums bei Belastung senkrecht und parallel zur Deckschichtebene

Zusammenfassend zeigen die Zugversuche, dass der Aluminiumschaum ein anisotropes Verhalten sowohl in Bezug auf die Steifigkeit als auch die Festigkeit aufweist. Bei einer Belastung parallel zur Deckschichtebene sind die Anfangssteigung und die Zugfestigkeit höher als bei einer Belastung senkrecht zur Deckschichtebene. In beiden Belastungsrichtungen treten im Vergleich zu Vollmaterialien große Streuungen der Kennwerte auf. Senkrecht zur Deckschichtebene schwankt die Anfangssteigung zwischen 37 und 1597 MPa und die Zugfestigkeit zwischen 0,3 und 2,9 MPa.

Parallel zur Deckschichtebene lag die Anfangssteigung zwischen 969 und 3693 MPa und die Zugfestigkeit variierte zwischen 1,5 und 3,6 MPa. Zu der starken Streuung der Kennwerte, tragen vermutlich die Dichteunterschiede zwischen den einzelnen Proben bei. In beiden Belastungsrichtungen wurde ein Anstieg der Zugfestigkeit und der Steigung m mit der relativen Dichte des Aluminiumschaumkerns festgestellt. Ein Einfluss der Prüfmethode auf die Anfangssteigung m oder die Zugfestigkeit wurde bei den Zugversuchen in beiden Belastungsrichtungen nicht festgestellt.

2.7.4 Zugfestigkeit des vorgeschädigten Aluminiumschaumsandwichs

Der Einfluss einer Vorschädigung auf die Eigenschaften des Aluminiumschaums wurde an der gleichen Probengeometrie untersucht, mit der auch die Zugversuche senkrecht zur Deckschichtebene (Abbildung 21 a) durchgeführt wurden. Dementsprechend wird der Einfluss einer Vorschädigung auf die Kerneigenschaften bei einer Zugbelastung senkrecht zur Deckschichtebene untersucht. Die Vorschädigung wurde durch ein Stauchen der Proben von 10, 30 und 50 % erzeugt. Gemäß der Norm DIN 50134 für Druckversuche an metallischen zellularen Werkstoffen liegt der Plateaubereich der Proben bei einer Stauchung von 20 bis 40 %. Wie in Abbildung 27 dargestellt, wurden dementsprechend die Proben 10 % vor Beginn des Plateaubereichs, genau in der Mitte des Plateaubereichs, sowie 10 % nach dem Ende des Plateaubereichs gestaucht bzw. vorgeschädigt. Der Einfluss der drei unterschiedlichen Vorschädigungsstufen wurde an jeweils zehn Proben untersucht. Diese wurden mit den gleichen Parametern und derselben Vorrichtung, wie in Kapitel 2.7.2 beschrieben, gestaucht. Die Zugprüfung erfolgt im Anschluss mit der in Kapitel 2.7.3 beschriebenen Vorrichtung (Abbildung 22) für die Prüfung der Kernproben senkrecht zur Deckschichtebene. Wie auch bei diesen Proben erfolgte die Belastung der Proben weggeregelt mit einer Prüfgeschwindigkeit von 0,05 mm/min. Auf das Fahren einer Hystereseschleife während der Prüfung wurde bei den vorgeschädigten Proben verzichtet.

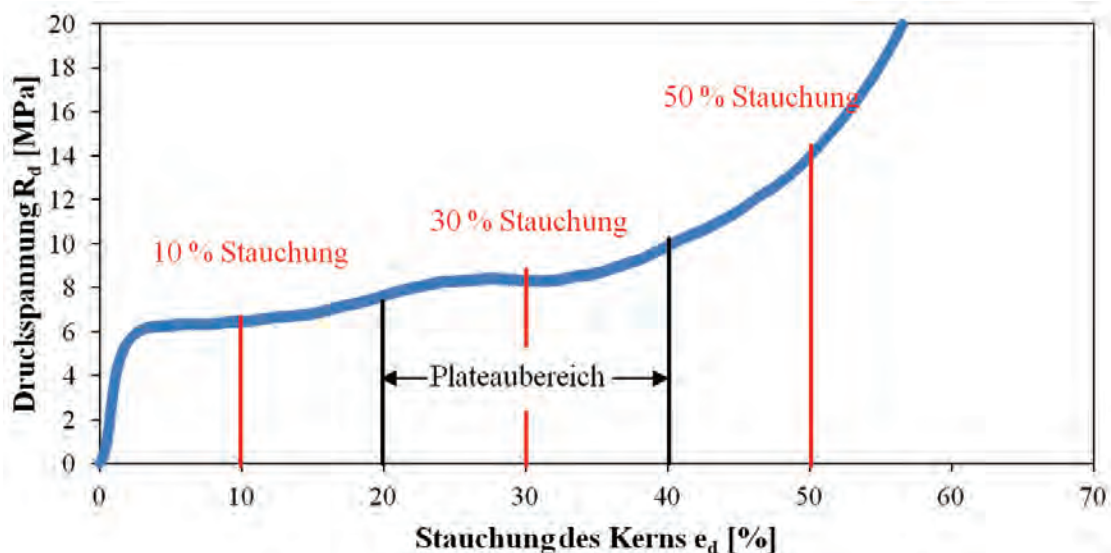


Abbildung 27: Vorschädigung der Zugproben

Bei der Serie mit 10 % Vorschädigung versagte bei einer Probe die Klebung zur Spannvorrichtung, sodass von dieser Serie insgesamt 9 Proben ausgewertet wurden. Bei jeweils 2 der 30 und 50 % vorgeschädigten Proben lag die Vorlast zu Beginn des Versuchs nur geringfügig unterhalb der Zugfestigkeit, sodass bei diesen Proben die Anfangssteigung und die Gleichmaßdehnung nicht ermittelt werden konnten. Abbildung 28 zeigt aus jeder Versuchsserie exemplarisch eine Spannungs-Dehnungs-Kurve. Qualitativ liegt bei allen Zugproben ein ähnlicher Kurvenverlauf vor. Zunächst steigt die Spannung mit steigender Dehnung relativ steil an. Nach Erreichen der Zugfestigkeit fällt die

Spannung mit der weiteren Probendehnung ab. Die Bruchdehnungen liegen bei allen Vorschädigungsvarianten, wie bei den nicht vorgeschädigten Zugproben, bei etwa 20 %. Wie in Tabelle 7 dargestellt, sinkt mit steigender Vorschädigung die Zugfestigkeit der Proben. Bei der 10%-Variante liegt die Zugfestigkeit nur geringfügig unterhalb der nicht vorgeschädigten Proben. Die Zugfestigkeiten der um 30 bzw. 50 % vorgeschädigten Proben liegen hingegen deutlich niedriger und sind nahezu identisch. Bei der Anfangssteigung m ist bei allen drei Vorschädigungsstufen ein deutlicher Abfall gegenüber den ungeschädigten Proben zu erkennen. Die Gleichmaßdehnung ist hingegen bei den vorgeschädigten Proben größer als bei den nicht vorgeschädigten Proben. Vermutlich werden die Stege des Schaumkerns durch die Stauchung gebogen. Durch die anschließende Zugbelastung werden die verformten Stege zunächst wieder gerade gezogen, bevor sie versagen. Dieser Effekt führte vermutlich zu der höheren Gleichmaßdehnung der vorgeschädigten Proben gegenüber den nicht vorgeschädigten Proben. Um den Einfluss der Kerndichte auf die Schaumkennwerte zu ermitteln, sind in Abbildung 29 und Abbildung 30 die Anfangssteigung und die Zugfestigkeit der Proben in Abhängigkeit von ihrer relativen Dichte dargestellt.

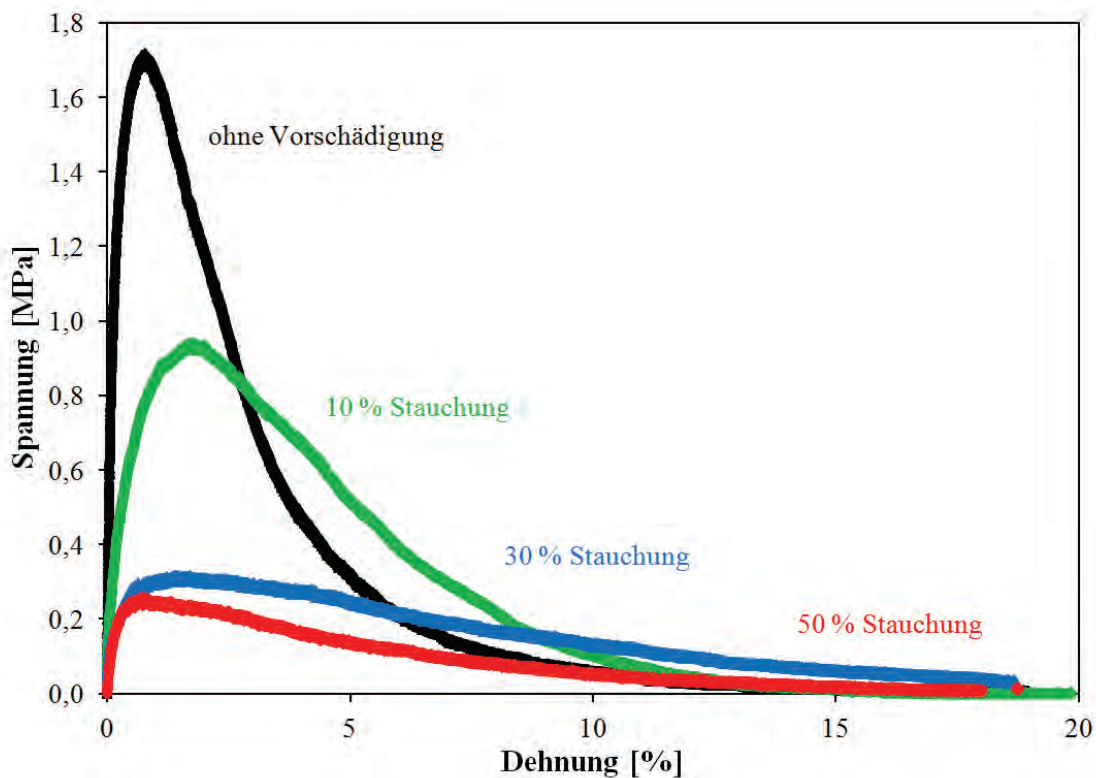


Abbildung 28: Spannungs-Dehnungs-Kurven von einer nicht vorgeschädigten Zugprobe sowie von Zugproben mit einer vorherigen Stauchung von 10, 30 und 50 %

	$\rho_{\text{rel.}} [\%]$	$R_m [\text{MPa}]$	$m [\text{MPa}]$	$A_g [\%]$
ohne Vorschädigung	$15,5 \pm 1,3$	$1,19 \pm 0,71$	751 ± 472	$0,317 \pm 0,379$
10 % Stauchung	$17,4 \pm 1,0$	$1,16 \pm 0,39$	170 ± 67	$1,133 \pm 0,127$
30 % Stauchung	$16,6 \pm 1,9$	$0,24 \pm 0,12$	80 ± 69	$1,306 \pm 0,251$
50 % Stauchung	$16,7 \pm 1,9$	$0,20 \pm 0,08$	194 ± 95	$0,685 \pm 0,207$

Tabelle 7: Ergebnis der Aluminiumschaumkernprüfung

Analog zu den nicht vorgeschädigten Proben zeigen auch die vorgeschädigten Proben eine Zunahme der Anfangssteigung mit einem Anstieg ihrer relativen Dichte, jedoch fällt er bei den vorgeschädigten Proben deutlich geringer aus. Unabhängig vom Grad der Vorschädigung liegen, bei identischer Probendichte, die Anfangssteigungen auf einem ähnlichen Niveau. Bei der Zugfestigkeit der Proben, ist bei der dichteabhängigen Darstellung der Ergebnisse ein größerer Unterschied, als die in Tabelle 7 dargestellten Mittelwerten vermuten lassen, zwischen den nicht vorgeschädigten und den 10 % vorgeschädigten Proben zu erkennen. Bei gleicher Dichte liegt die Zugfestigkeit der nicht vorgeschädigten Proben 0,5 MPa höher. Im Mittel haben die 10 % vorgeschädigten Proben eine 2 % höhere Dichte als die nicht vorgeschädigten Proben. Diese kompensiert vermutlich den schädlichen Einfluss der Stauchung auf die Zugfestigkeit, sodass die Mittelwerte nahezu identisch sind. Zwischen den 30 und 50 % vorgeschädigten Varianten ist bei gleicher Dichte nahezu kein Unterschied bei der Zugfestigkeit der Proben festzustellen. Sie liegen deutlich unterhalb der Zugfestigkeit der 10 % gestauchten Proben. Um die Dichteabhängigkeit der Anfangssteigung und der Zugfestigkeit der Proben quantitativ zu beschreiben, wurden jeweils die beiden Parameter der Gleichungen 3 durch Fehlerquadratminimierung an die experimentellen Daten angepasst. Die resultierenden Parameter sind in Tabelle 8 zusammengefasst sowie grafisch in Abbildung 29 und Abbildung 30 dargestellt.

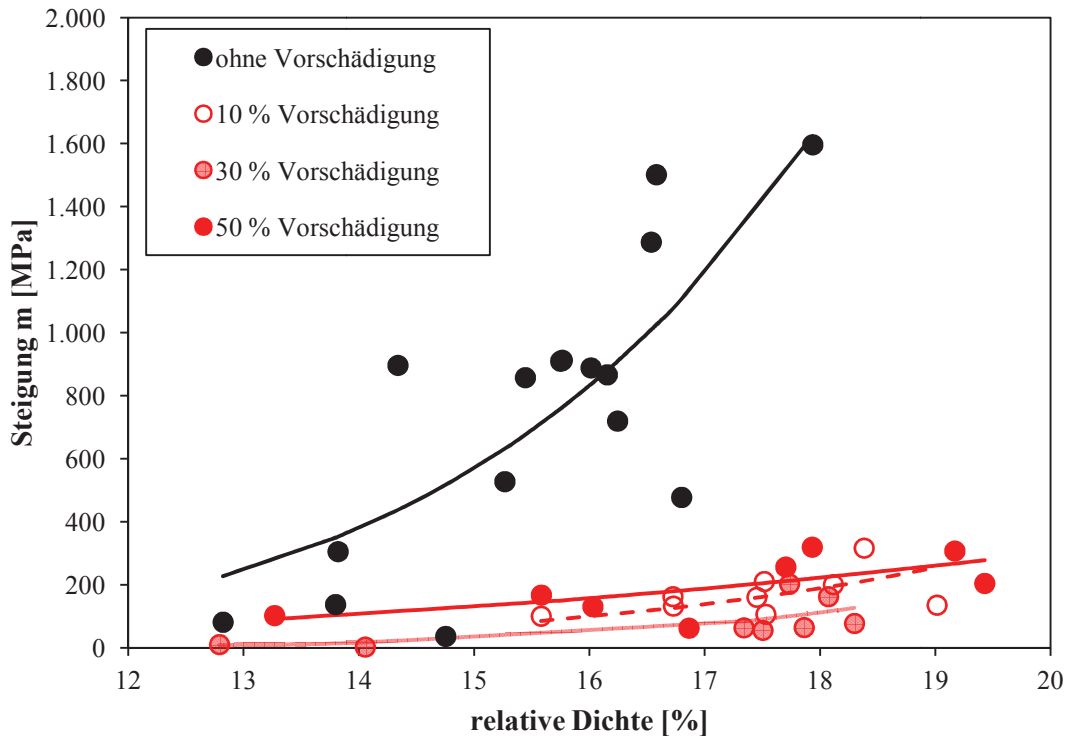


Abbildung 29: Einfluss der Probendichte auf die Anfangssteigung m der unterschiedlich vorgeschädigten Zugproben

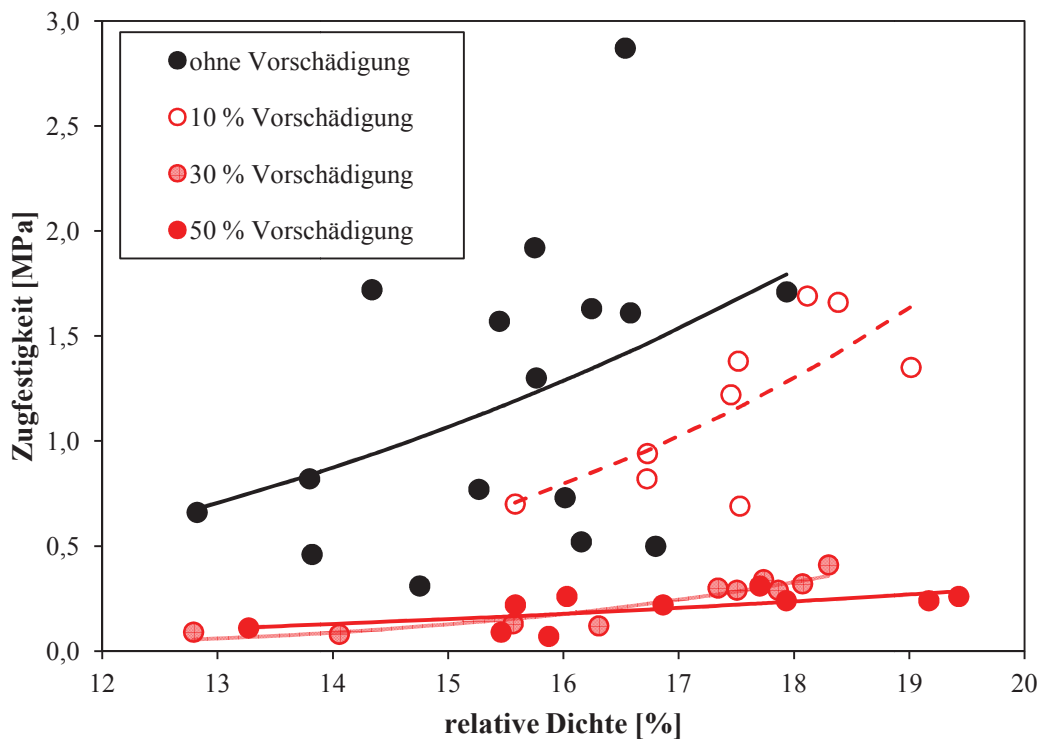


Abbildung 30: Einfluss der Probendichte auf die Zugfestigkeit der unterschiedlich vorgeschädigten Zugproben

	R_m		m	
	C_R [MPa]	n_R	C_m [MPa]	n_m
ohne Vorschädigung	265	2,91	38.076.158	5,86
10 % Stauchung	1.798	4,22	2.295.686	5,49
30 % Stauchung	2.563	5,23	44.418.864	7,51
50 % Stauchung	15,5	2,44	34.403	3,94

Tabelle 8: Parameter zur Beschreibung der Anfangssteigung und der Zugfestigkeit in Abhängigkeit von der relativen Dichte

Um die streuenden Zugfestigkeiten der zuvor gestauchten Proben quantitativ zu beschreiben, wurde die Weibullverteilung aus Gleichung 1 an die experimentellen Daten angepasst. In Abbildung 31 sind die experimentellen Werte sowie die ermittelten Verteilungen dargestellt. Der Median der Zugfestigkeit der 10 % vorgeschädigten Proben ist geringfügig höher als der von den nicht vorgeschädigten Proben. Die höhere Zugfestigkeit ist jedoch nicht auf die Stauchung, sondern auf die höhere Dichte der vorgeschädigten Proben zurückzuführen. Darüber hinaus ist vermutlich auch deren geringere Streuung auf die Probendichte bzw. deren geringere Streuung zurückzuführen. Bei den 30 und 50 % vorgeschädigten Proben liegen die Mediane der Zugfestigkeit geringfügig oberhalb von 0,2 MPa und betragen damit ein Fünftel der nicht vorgeschädigten Proben.

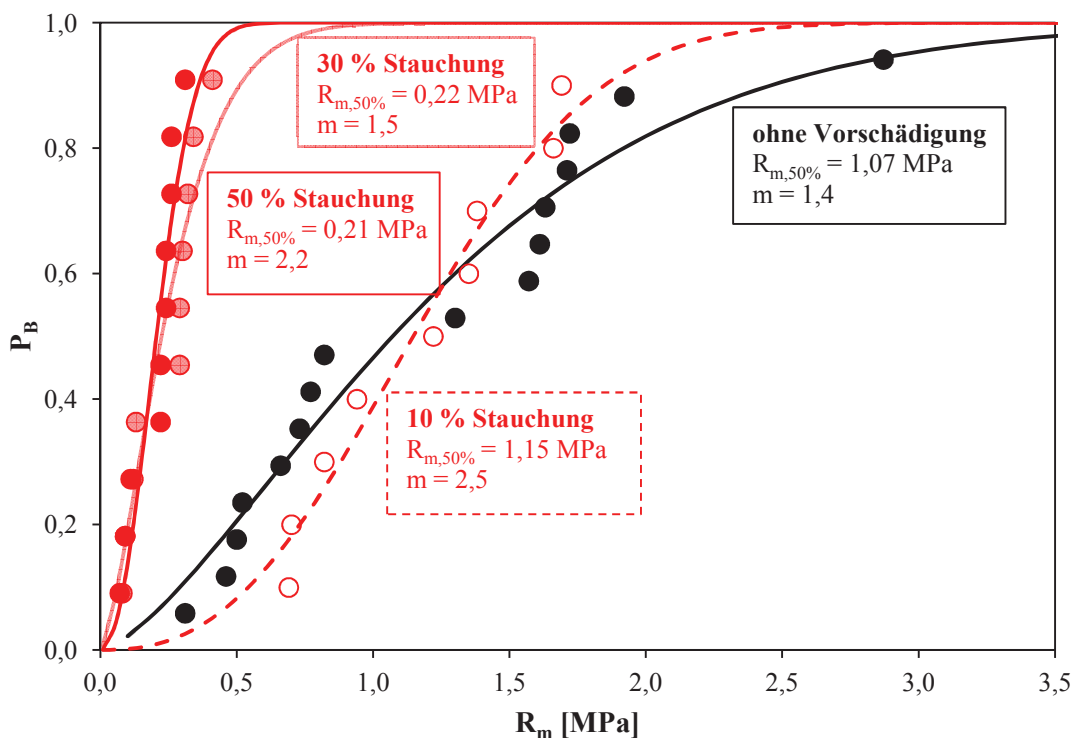


Abbildung 31: Streuung der Zugfestigkeit der unterschiedlich stark vorgeschädigten Aluminiumschaumzugproben bei Belastung senkrecht zur Deckschichtebene

Zusammenfassend zeigt sich, dass dichtebereinigt sowohl die Zugfestigkeit als auch die Anfangssteigung bereits bei einer Vorschädigung durch eine 10-%-ige Stauchung deutlich abnehmen. Oberhalb der 30-%-igen Stauchung führte eine weitere Vorschädigung zu keiner weiteren Entfestigung des Aluminiumkerns, wie die nahezu identische Zugfestigkeit der 30 und 50 % vorgeschädigten Proben zeigt.

2.7.5 Schubfestigkeit des Aluminiumschaumsandwichs

Die Schubversuche an Aluminiumschaumsandwichen wurden gemäß der Norm DIN 53 294 [13] an den in Abbildung 32 dargestellten Proben durchgeführt. Hierfür wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens eine normgerechte Spannvorrichtung angeschafft. Diese besteht unter anderem aus Krafteinleitplatten, die mit einem Zwei-Komponenten-Kleber an den Deckblechen des Sandwichs befestigt wurden. Über diese erfolgte die Krafteinleitung von der Zugprüfmaschine in die Probe, wie schematisch in Abbildung 33 dargestellt. Die Schubverformung der Probe, die während der Prüfung auftritt, wurde mit einem induktiven Wegaufnehmer erfasst. Die Kraftaufbringung erfolgte weggeregelt an einer servohydraulischen Prüfmaschine der Firma Schenck (Typ PSA) mit einer Geschwindigkeit von 0,3 mm/min. Insgesamt wurden 10 Proben getestet.

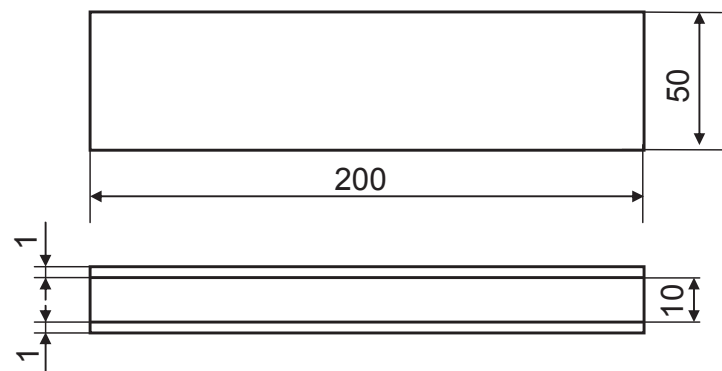


Abbildung 32: Abmessungen der Aluminiumschaumsandwichproben für die Schubversuche

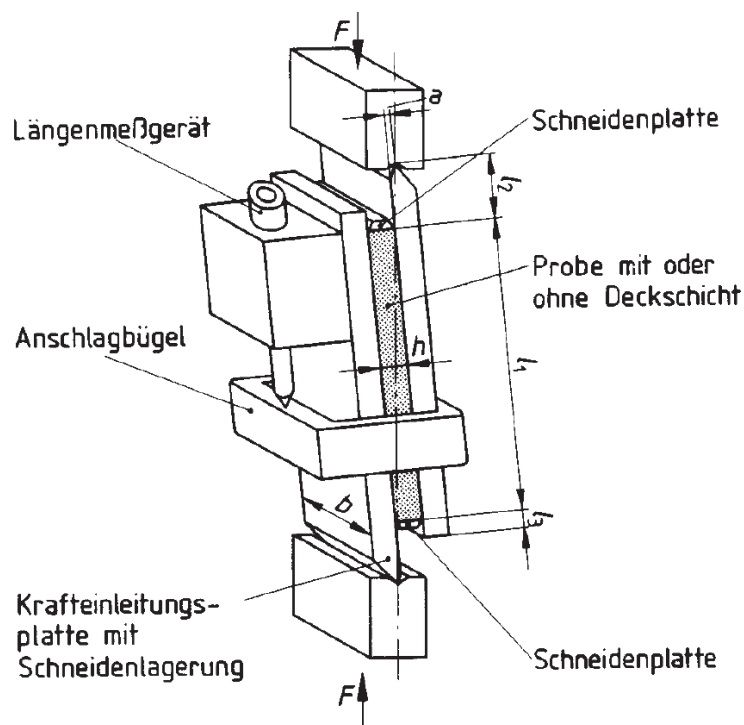


Abbildung 33: Schematische Darstellung des Prüfaufbaus [13]

Für die Darstellung der Versuchsergebnisse wird die Schubspannung τ über der Schiebung γ aufgetragen. Die Schubspannung berechnet sich aus der auftretenden Kraft F bezogen auf die Grundfläche der Sandwichprobe A_0 . Durch die Belastung verschieben sich die Probengrenzflächen zueinander. Diese Verschiebung v wird mit dem Wegaufnehmer erfasst. Die Schiebung γ ergibt sich

aus dem Quotienten der Schubverformung v und der Sandwichhöhe h . Da mit dem Schubversuch die Eigenschaften des Kerns untersucht werden sollen und die Deckbleche des Sandwichs deutlich schubsteifer als der Schaumkern sind, wird als Höhe h nur die Dicke des Sandwichkerns angenommen. In Abbildung 34 sind exemplarisch drei Schubspannungs-Schiebungskurven dargestellt. Die Schubspannungs-Schiebungskurven steigen kontinuierlich mit der Schiebung bis zum Erreichen der Schubfestigkeit τ_B an. Anschließend fällt die Schubspannung bei einer weiteren Zunahme der Schiebung kontinuierlich ab (schwarze Kurve) oder sie fällt sprunghaft ab (blaue bzw. rote Kurve).

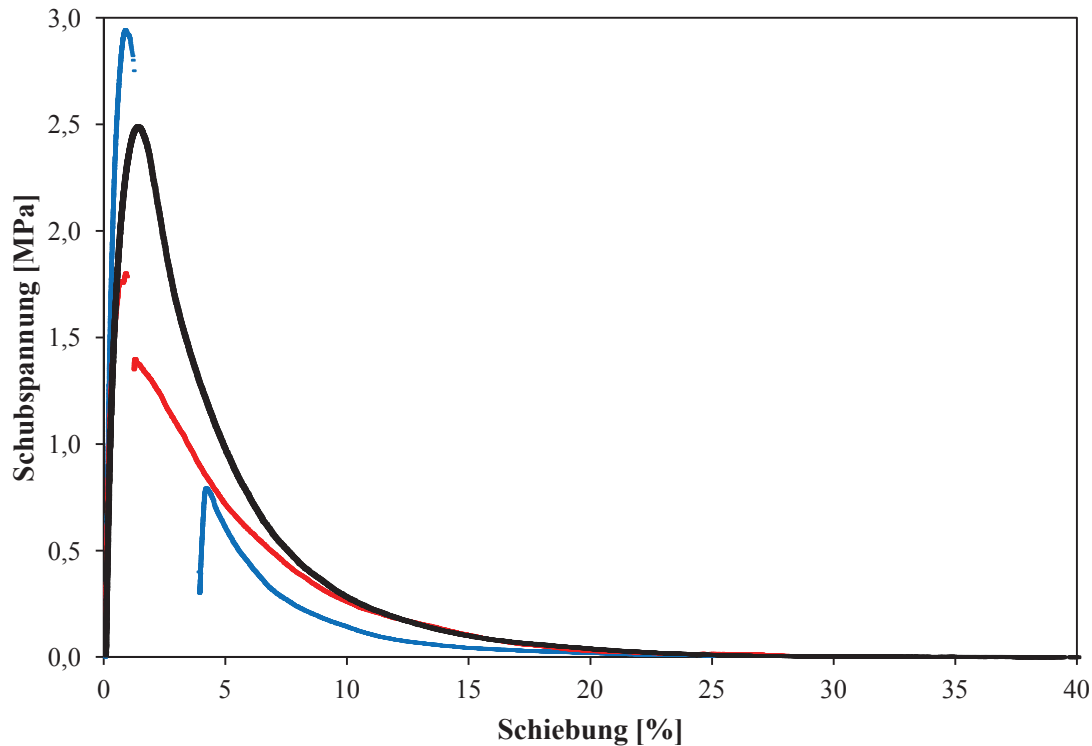


Abbildung 34: Schubspannungs-Schiebungs-Kurven

Anhand der Kurven werden die Schubfestigkeit τ_B des Kerns, die der maximalen Schubspannung entspricht, sowie der Schubmodul G_K des Kerns bestimmen. Dieser entspricht der linearen Anfangssteigung der Schubspannungs-Schiebungskurve und wurde durch Anpassen einer Geraden an die experimentellen Ergebnisse ermittelt. Der Bereich, in dem die Gerade angepasst wurde, wurde bei jeder Probe individuell festgelegt. Die mittlere Schubfestigkeit und der mittlere Schubmodul sind zusammen mit der dazugehörigen Standardabweichung in Tabelle 9 dargestellt. Wie auch bei den Zug- und Druckproben wurden bei den Schubproben zwischen den einzelnen Proben schwankende Kerndichten ermittelt. Der Dichteinfluss auf den Schubmodul und die Schubfestigkeit sind in Abbildung 35 und Abbildung 36 dargestellt. Die relative Dichte der Proben schwankt zwischen 14 und 18 %. Wie bereits in den vorherigen Kapiteln beschrieben, wurden die Parameter der Gleichung 3 durch Fehlerquadratminimierung an die experimentellen Daten angepasst. Die resultierenden Kurven sind ebenfalls in Abbildung 35 und Abbildung 36 dargestellt, und in Tabelle 10 sind die dazugehörigen Parameter zusammengefasst. Sowohl bei dem Schubmodul als auch bei der Schubfestigkeit ist ein Anstieg mit der Kerndichte zu erkennen.

	$\rho_{\text{rel.}} [\%]$	$\tau_{\text{B}} [\text{MPa}]$	$G_{\text{K}} [\text{MPa}]$
Schubproben	$16,4 \pm 1,1$	$2,34 \pm 0,58$	1128 ± 624

Tabelle 9: Ergebnis der Schubprüfung

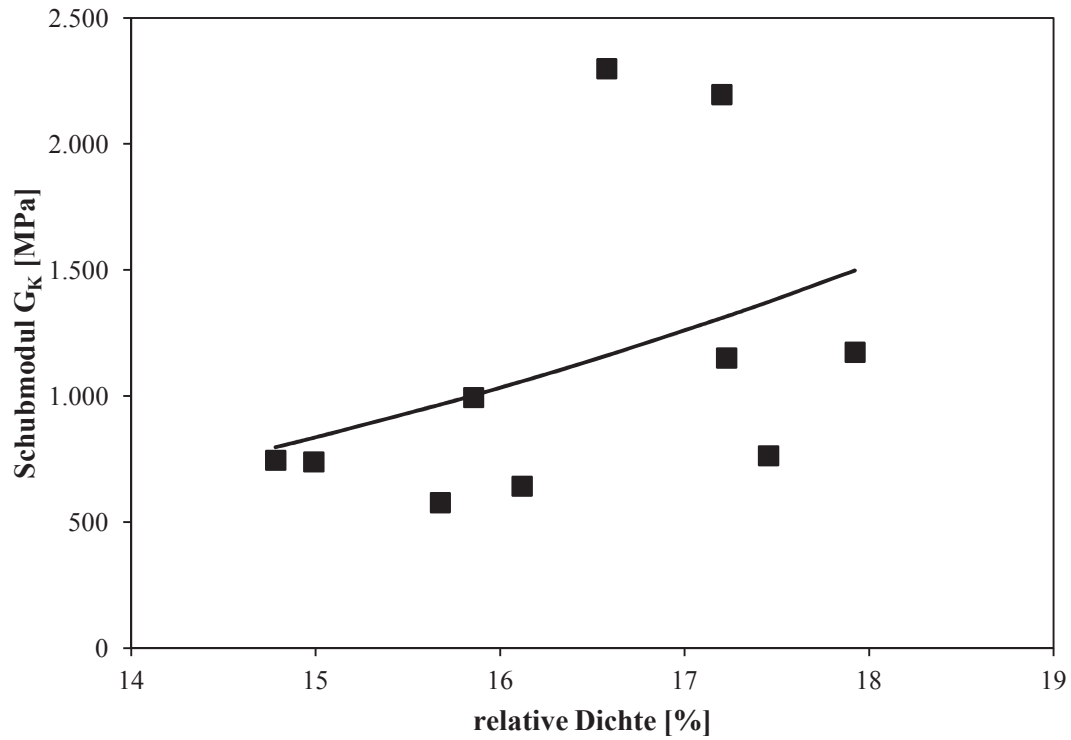


Abbildung 35: Einfluss der Probendichte auf den Schubmodul

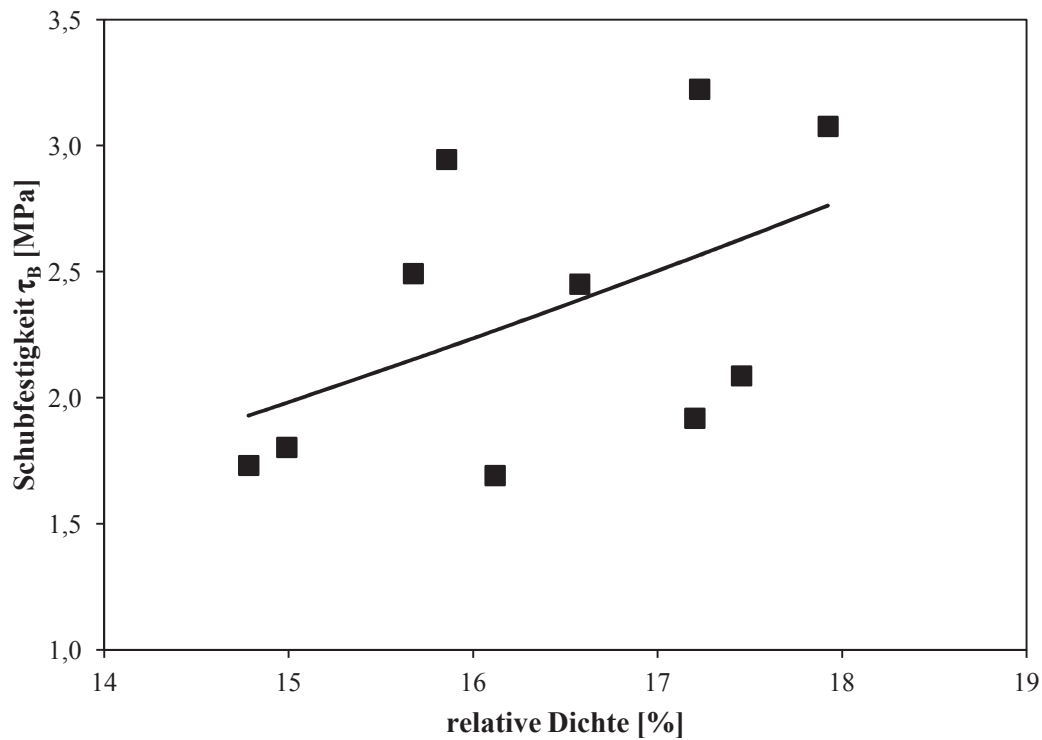


Abbildung 36: Einfluss der Probendichte auf die Schubfestigkeit

	τ_B		G_K	
	C_τ [MPa]	n_τ	C_G [MPa]	n_G
Schubproben	67,9	1,86	415.583	3,27

Tabelle 10: Parameter zur Beschreibung der Schubfestigkeit und des Schubmoduls in Abhängigkeit der relativen Dichte

Für eine quantitative Beschreibung der streuenden Schubfestigkeit wurde die zwei-parametrische Weibullverteilung aus Gleichung 1 an die experimentellen Werte angepasst. Diese ist zusammen mit den gemessenen Schubfestigkeiten in Abbildung 37 dargestellt. Der Median der Schubfestigkeit liegt bei 2,3 MPa. Bei einer Bruchwahrscheinlichkeit von 10 bzw. 90 % liegt die Schubspannung bei 1,4 bzw. 3,4 MPa.

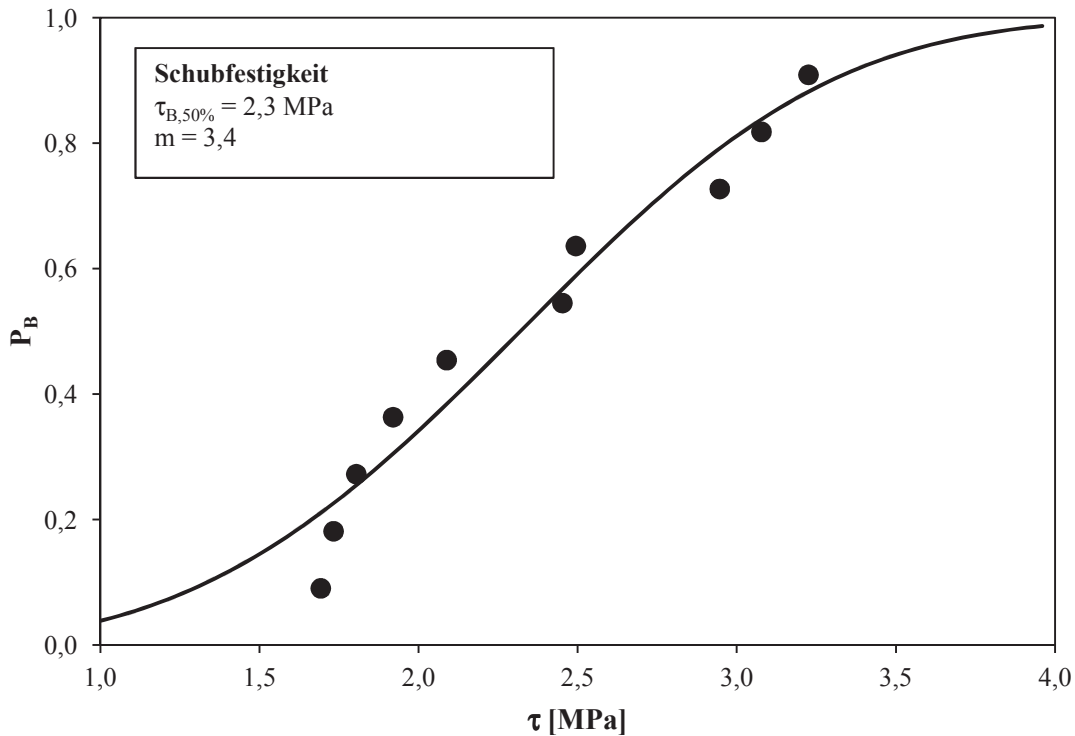


Abbildung 37: Streuung der Schubfestigkeit des Aluminiumschaumsandwiches

2.8 Zyklische Materialcharakterisierung

2.8.1 Prüfverfahren

Das Versagensverhalten des Aluminiumschaumsandwichs bei zyklischer Belastung wurde durch 3-Punkt-Biegeversuche charakterisiert. Die Versuche wurden an Proben mit den in Abbildung 38 dargestellten Abmessungen bzw. an einer kurzen Variante mit einer Länge von 180 mm durchgeführt.

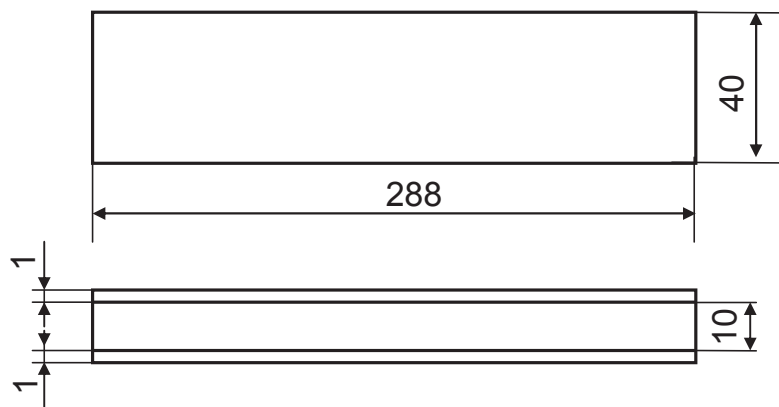


Abbildung 38: Abmessungen der 4-Punkt-Biegeproben

Über eine Stahlrolle mit einem Durchmesser von 10 mm erfolgte über die gesamte Breite der Probe die linienförmige Krafteinleitung (Abbildung 39). Die beiden Auflager bestanden ebenfalls aus Stahlrollen mit einem Durchmesser von 10 mm. Ihr Abstand konnte beliebig zwischen 30 und 270 mm eingestellt werden.

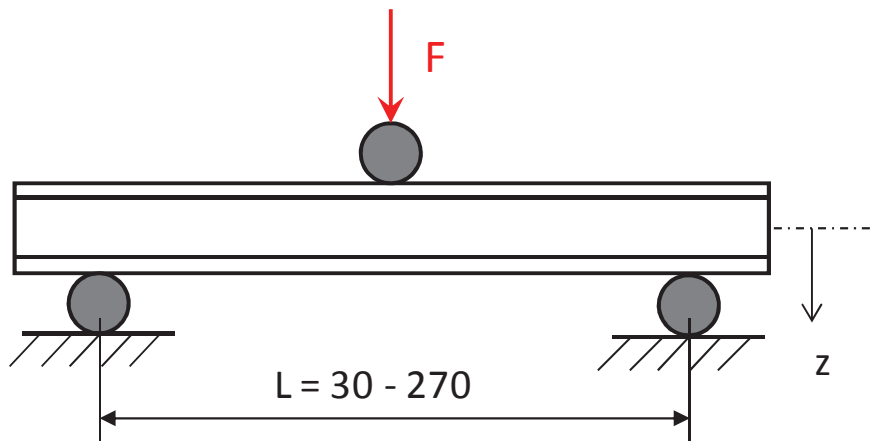


Abbildung 39: 3-Punkt-Biegebelastung des Aluminiumschaumsandwichs

Die Kraftaufbringung erfolgte an einer servohydraulischen Prüfmaschine der Firma Schenck (Typ PSA) bei einem Spannungsverhältnis von $R = 0,1$. Die Grenzschwingspielzahl lag bei 1 Million Lastwechseln, d. h. Proben, die diese Schwingspielzahl ohne Schädigung erreichten, wurden als Durchläufer bezeichnet, und der Ermüdungsversuch wurde beendet. Als Versagens- bzw. Abbruchkriterium wurde die Stempelposition bei der maximalen Belastung festgelegt. Wenn diese die bei Versuchsbeginn ermittelte Stempelposition um 2 mm überschreitet, wurde der Versuch abgebrochen.

2.8.2 Berechnung der örtlichen Normal- und Schubspannungen

Bei der 3-Punkt-Biegung wird im Prüfbereich zwischen den Auflagern ein Biegemoment erzeugt, das in der Mitte der Probe, wo die Kraft eingeleitet wird, maximal ist. Die Höhe des maximalen Biegemomentes $M_{b,max}$ hängt von der Kraft F sowie von dem Abstand L der Auflager ab:

$$M_{b,max} = \frac{F \cdot L}{4} \quad (\text{Gleichung 6})$$

Bei homogenen Proben, mit einem über die Probenhöhe konstanten Elastizitätsmodul, führt das Biegemoment zu einer linearen Normalspannungsverteilung. In Abhängigkeit vom Abstand z zur neutralen Faser lassen sich die lokal auftretenden Normalspannungen $\sigma(z)$ mit Gleichung 7 bestimmen.

$$\sigma(z) = \frac{M_{b,max} \cdot z}{I} \quad (\text{Gleichung 7})$$

Mit steigendem Abstand z von der Probenmitte steigt die Biegespannung in der Probe. Für eine rechteckige Probe mit der Höhe h und der Breite b errechnet sich das Flächenträgheitsmoment I nach Gleichung 8.

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad (\text{Gleichung 8})$$

Die maximale Spannung σ_{max} tritt an der Probenoberfläche im Abstand $z = h/2$ von der neutralen Faser auf (Gleichung 9).

$$\sigma_{max} = \sigma(z=h/2) = \frac{M_{b,max} \cdot h}{2 \cdot I} \quad (\text{Gleichung 9})$$

In Aluminiumschaumsandwichproben unterscheiden sich die Elastizitätsmoduln vom Kern E_{Kern} und der Aluminiumdeckbleche E_{Blech} deutlich. Die Bestimmung der Spannungsverteilung nach Gleichung 7 sowie die Berechnung der maximalen Spannung nach Gleichung 9 sind für die Sandwichproben daher nicht möglich. Um die lokalen Spannungen analytisch bestimmen zu können, wird angenommen, dass die Biegelinie des Schaumkerns w_{Kern} mit der Biegelinie der Deckbleche w_{Blech} identisch ist. Damit diese Bedingung erfüllt ist, müssen die Biegemomente, die von dem Kern M_{Kern} und von den Deckblechen M_{Blech} aufgenommen werden, wie folgt in Beziehung stehen:

$$\frac{M_{\text{Kern}}}{E_{\text{Kern}} \cdot I_{\text{Kern}}} = \frac{M_{\text{Blech}}}{E_{\text{Blech}} \cdot I_{\text{Blech}}} \quad (\text{Gleichung 10})$$

Das Flächenträgheitsmoment des Kerns I_{Kern} wird mit Gleichung 8 berechnet, die für homogene Körper, deren Biegelinie mit der Schwerachse zusammenfällt, gültig ist. Die Flächenträgheitsmomente der Deckbleche mit der Dicke h_{Blech} können ebenfalls mit Gleichung 8 ermittelt werden. Jedoch haben ihre Schwerpunkte den Abstand z_S von der Biegeachse, sodass der Steineranteil berücksichtigt werden muss. Das Flächenträgheitsmoment der beiden Deckbleche bezüglich der Biegelinie ergibt sich daher zu:

$$I_{\text{Blech}} = 2 \cdot \left(\frac{b \cdot h_{\text{Blech}}^3}{12} + z_S^2 \cdot h_{\text{Blech}} \cdot b \right) \quad (\text{Gleichung 11})$$

Neben den identischen Biegelinien von Kern und Deckblechen, ist die zweite Bedingung für die Berechnung der örtlichen Normalspannungsverteilung, dass die Summe der Biegemomente, die von dem Kern M_{Kern} und den Deckblechen M_{Blech} aufgenommen werden, dem aufgebrachtem Biegemoment $M_{b,\text{max}}$ entsprechen (Gleichung 12).

$$M_{b,\text{max}} = M_{\text{Kern}} + M_{\text{Blech}} \quad (\text{Gleichung 12})$$

Durch das Auflösen von Gleichung 10 nach dem Deckblechbiegemoment M_{Blech} und Einsetzen in Gleichung 12 lässt sich das vom Kern aufgenommene Moment M_{Kern} (Gleichung 13) bestimmen. Wird hingegen Gleichung 10 nach dem Kernbiegemoment M_{Kern} aufgelöst und in Gleichung 12 eingesetzt, lässt sich das von den Deckblechen aufgenommene Moment M_{Blech} (Gleichung 14) ermitteln.

$$M_{\text{Kern}} = \frac{M_{b,\text{max}}}{\frac{E_{\text{Blech}} \cdot I_{\text{Blech}}}{E_{\text{Kern}} \cdot E_{\text{Kern}}} + 1} \quad (\text{Gleichung 13})$$

$$M_{\text{Blech}} = \frac{M_{b,\text{max}}}{\frac{E_{\text{Kern}} \cdot I_{\text{Kern}}}{E_{\text{Blech}} \cdot E_{\text{Blech}}} + 1} \quad (\text{Gleichung 14})$$

Mit den berechneten Flächenträgheitsmomenten sowie mit Kenntnis der Elastizitätsmoduln von Kern und Deckblech können die jeweilig aufgenommenen Biegemomente ermittelt werden. Die Spannungsverteilungen in den beiden Körpern können unabhängig voneinander durch Einsetzen des jeweiligen Biegemoments in Gleichung 7 berechnet werden. Bei unterschiedlichen Elastizitätsmoduln tritt ein Spannungssprung am Werkstoffübergang auf, wie in Abbildung 40 zu erkennen ist. Hier wurde für eine Belastung des Sandwichs von 500 N und einem Auflagerabstand von 130 mm die Normalspannungsverteilung an der Krafteinleitungsstelle berechnet. Als Elastizitätsmoduln wurden basierend auf den ermittelten Kennwerten für die Längszugproben des Deckblechs (Tabelle 3) und den Kernzugproben, die parallel zur Deckschicht geprüft wurden (Tabelle 6), für die Deckbleche $E_{\text{Blech}} = 69.677 \text{ MPa}$ und für den Kern $E_{\text{Kern}} = 2.020 \text{ MPa}$ für die Berechnung verwendet. Im

Deckblech treten deutlich höhere Spannungen als im Kern auf. Sie betragen im Kern maximal 0,9 MPa während die Spannungen im Deckblech zwischen 32,2 und 38,6 MPa liegen. D. h. die maximale Randspannung im Deckblech beträgt mehr als das Vierzigfache der maximalen Normalspannung im Kern.

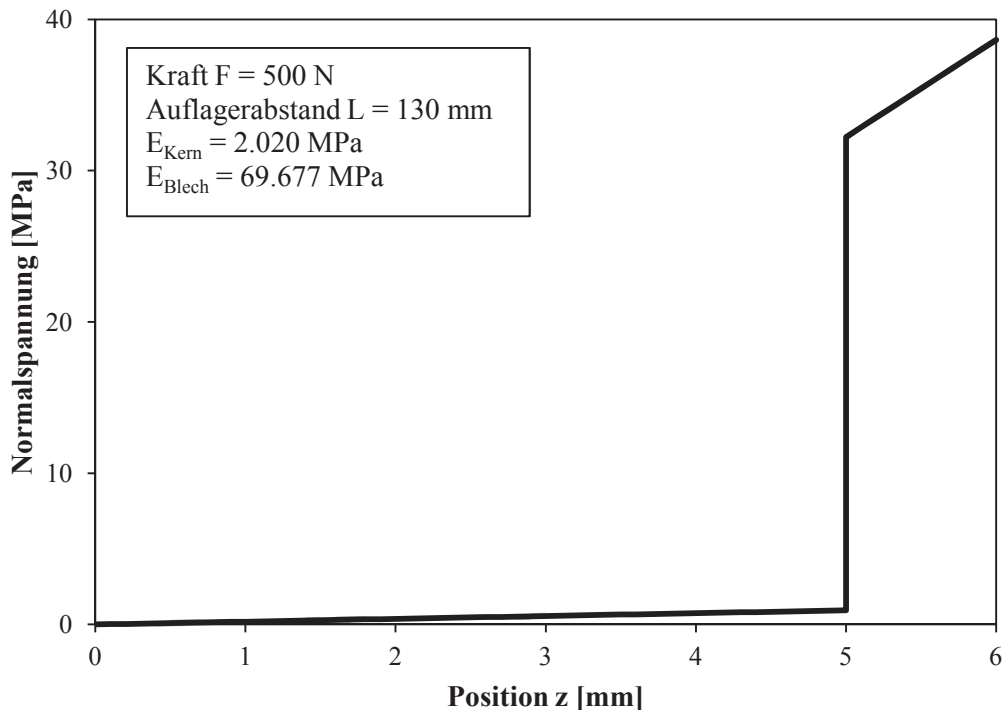


Abbildung 40: Normalspannungsverteilung im Aluminiumschaumsandwich

Neben Normalspannungen treten im Aluminiumschaumsandwich bei einer 3-Punkt-Biegebelastung Schubspannungen auf. Diese werden durch die auftretende Querkraft F_Q verursacht. Sie ist, abgesehen von einem Vorzeichenwechsel bei der Krafteinleitungsstelle, zwischen den beiden Auflagern konstant und halb so groß wie die von außen eingeleitete Kraft F . Da die Querkraft konstant ist, ist auch die Schubspannungsverteilung $\tau(z)$ im Sandwich im Bereich zwischen den Auflagern identisch. Wie von Schnell et al. beschrieben [14], liegt in einem rechteckigen, homogenen Körper der Breite b und der Höhe h , der durch die Querkraft F_Q belastet wird, eine parabelförmige Schubspannungsverteilung vor. In Abhängigkeit vom Abstand z von der Schwerachse der Probe lässt sich die örtliche Schubspannung $\tau(z)$ wie folgt berechnen:

$$\tau(z) = \frac{F_Q \cdot S(z)}{I \cdot b} \left(1 - \frac{4 \cdot z^2}{h^2} \right) \quad (\text{Gleichung 15})$$

Wobei $S(z)$ das statische Moment einer von z aus gezählten Teilfläche ist. Für einen Rechteckquerschnitt ergibt es sich zu [14]:

$$S(z) = \frac{b \cdot h^2}{8} \left(1 - \frac{4 \cdot z^2}{h^2} \right) \quad (\text{Gleichung 16})$$

Da das Aluminiumschaumsandwich keine konstanten Materialeigenschaften aufweist, müssen, wie bei der Berechnung der Normalspannungsverteilungen, die Spannungsverteilungen im Kern und in den Deckblechen getrennt voneinander betrachtet werden. Diese ergeben sich nach Wiedemann [15] zu:

$$\tau_{\text{Blech}}(z) = \frac{F_Q \cdot E_{\text{Blech}}}{S_B} \left(\frac{(h_{\text{Kern}} + 2 \cdot h_{\text{Blech}})^2}{8} - \frac{z^2}{2} \right) \quad (\text{Gleichung 17})$$

$$\tau_{\text{Kern}}(z) = \frac{F_Q}{S_B} \left(E_{\text{Blech}} \frac{h_{\text{Blech}}(h_{\text{Kern}} + h_{\text{Blech}})}{2} + E_{\text{Kern}} \left(\frac{h_{\text{Kern}}^2}{8} - \frac{z^2}{2} \right) \right) \quad (\text{Gleichung 18})$$

Hierbei ist S_B die Biegesteifigkeit des Aluminiumsandwichs. Sie berechnet sich aus den Sandwichabmessungen und den Elastizitätskonstanten der Werkstoffe wie folgt:

$$S_B = b \cdot E_{\text{Blech}} \left(\frac{h_{\text{Blech}} \cdot (h_{\text{Blech}} + h_{\text{Kern}})^2}{2} + \frac{h_{\text{Blech}}^3}{6} \right) + b \cdot E_{\text{Kern}} \frac{h_{\text{Kern}}^3}{12} \quad (\text{Gleichung 19})$$

Abbildung 41 zeigt für die gleichen Randbedingungen, unter denen zuvor die Normalspannungsverteilung berechnet wurde, die Schubspannungsverteilung im Sandwich. Aufgrund der unterschiedlichen Materialeigenschaften von Deckblechen und Kern ergeben sich zwei unterschiedliche parabelförmige Schubspannungsverläufe. Am Übergang vom Kern zum Deckblech haben die Schubspannungen den gleichen Wert. Aufgrund der flach verlaufenden Parabel im Kern liegen dort über die gesamte Höhe nahezu die gleichen Schubspannungen vor. Das Schubspannungsmaximum liegt in der Mitte des Kerns. Im Vergleich mit der Nennschubspannung im Kern, die sich aus der Querkraft F_Q bezogen auf den gesamten Sandwichquerschnitt ergibt (gestrichelte Linie in Abbildung 41), liegen die lokalen Schubspannungen geringfügig höher. An der Oberfläche der Deckbleche liegen keine Schubspannungen vor.

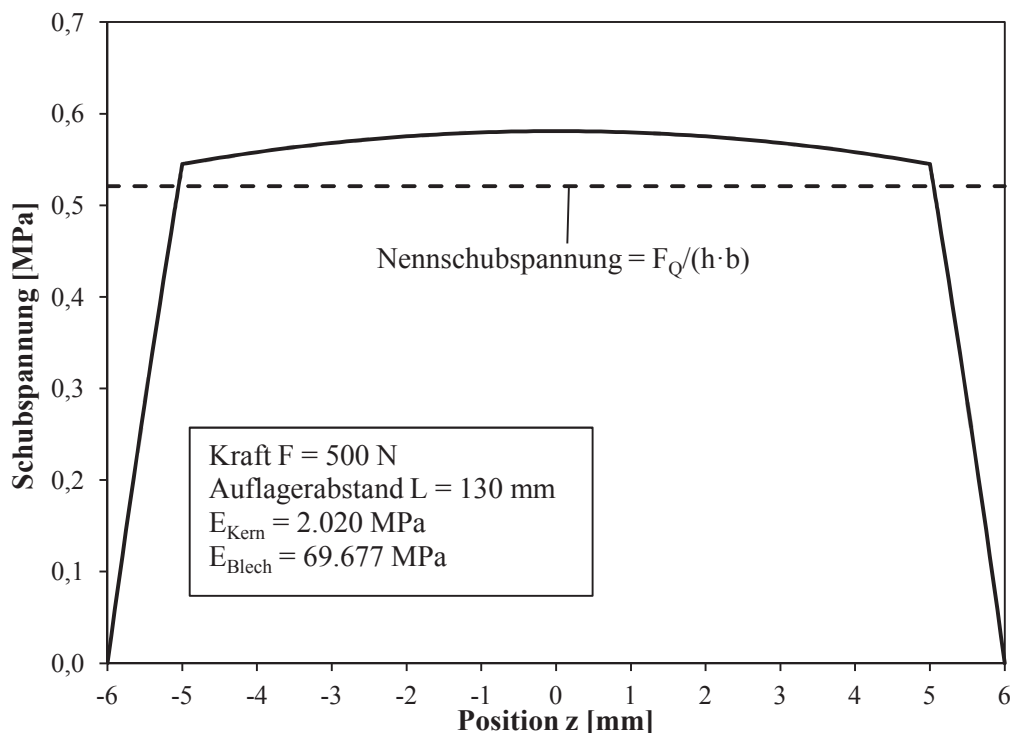


Abbildung 41: Schubspannungsverteilung im Aluminiumschaumsandwich

Für die Darstellung und Auswertung der Ergebnisse werden im Folgenden das Schubspannungsmaximum im Kern und die maximale Normalspannung an der Oberfläche der Deckbleche verwendet.

2.8.3 Ergebnis der Ermüdungsversuche

Die 3-Punkt-Biegeversuche wurden mit zwei unterschiedlichen Auflagerabständen durchgeführt. Bei der ersten Variante lag der Auflagerabstand bei 130 mm und bei der zweiten Variante bei 270 mm. Für die Versuche mit dem kurzen Auflagerabstand wurden die kurzen Proben mit einer Länge von 180 mm verwendet, und für die Versuche mit dem großen Auflagerabstand wurden entsprechend die 288 mm langen Proben eingesetzt. Die Prüffrequenz lag bei dem kurzen Lagerabstand bei 20 Hz. Aufgrund der geringeren Steifigkeit der Prüfanordnung lag bei den langen Proben die Prüffrequenz bei 10 Hz. Das Ergebnis der Ermüdungsversuche, die mit dem kurzen Auflagerabstand durchgeführt wurden, ist in Abbildung 42 dargestellt.

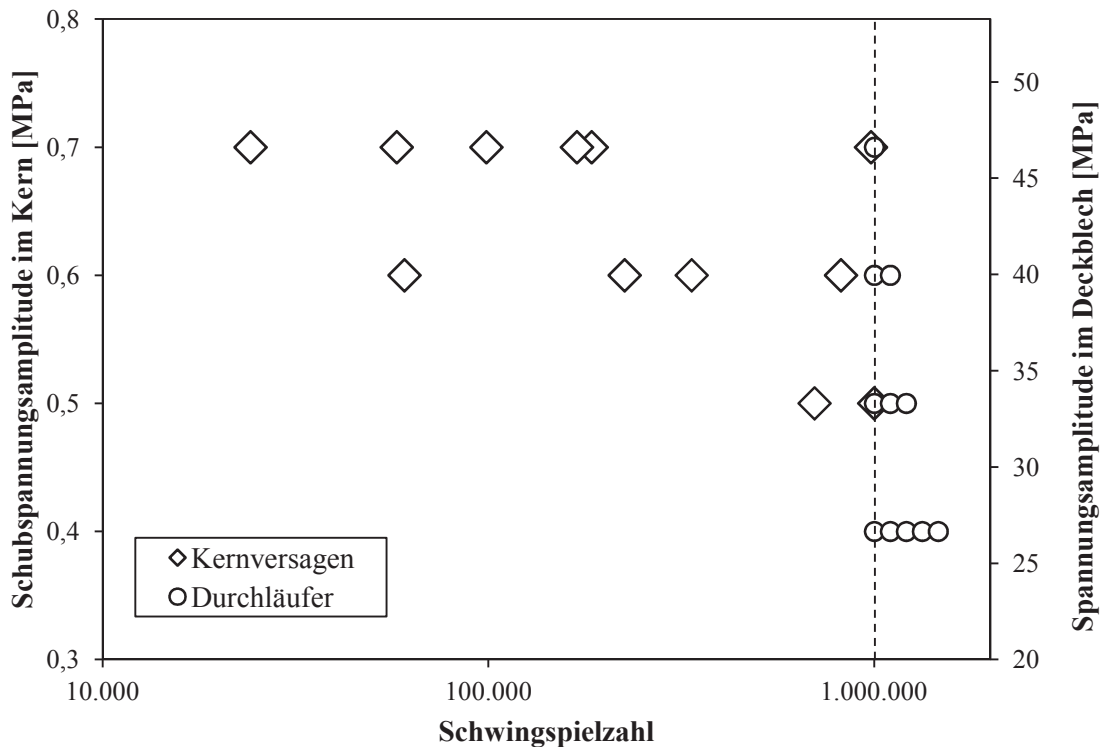


Abbildung 42: Wöhlerdiagramm des Aluminiumschaumsandwichs bei einer 3-Punkt-Biegebelastung mit dem kurzen Auflagerabstand (130 mm)

In dem Wöhlerdiagramm ist auf der linken vertikalen Achse die maximale Schubspannungsamplitude, die in der neutralen Faser des Aluminiumschaumkerns wirkte, dargestellt. Die rechte vertikale Achse zeigt die parallel hierzu auftretende maximale Spannungsamplitude, die an der Oberfläche des Deckblechs wirkte. In den Versuchen wurden Schubspannungsamplituden zwischen 0,4 und 0,7 MPa eingestellt. Bei der erstgenannten Spannungsamplitude sind alle Proben durchgelaufen, während bei der höchsten Schubspannungsamplitude alle bis auf eine Probe versagten. Abgesehen von den Durchläufern trat bei allen Proben ein Schubversagen des Kerns auf. Abbildung 43 zeigt exemplarisch eine gebrochene 3-Punkt-Biegeprobe. Beim Kernversagen bildet sich ein Riss im Kern, der sich bis zum Abbruchkriterium der Prüfmaschine weiter ausbreitet. Der Riss wandert entweder parallel zur Deckschicht oder aber breitet sich unter 45° dazu aus.

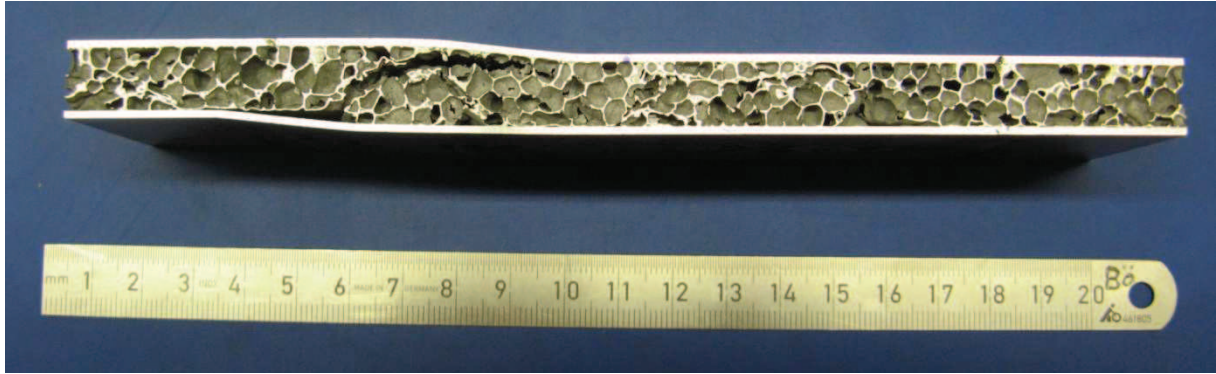


Abbildung 43: 3-Punkt-Biegeprobe mit Schubversagen des Aluminiumschaumkerns ($L = 130 \text{ mm}$;
 $\tau_a = 0,7 \text{ MPa}$; $N_B = 57.809$)

Bei der Sandwichprüfung mit dem kurzen Lagerabstand trat in den Deckblechen eine maximale Spannungsamplitude von $46,5 \text{ MPa}$ auf. Diese scheint unterhalb der Deckblechdauerfestigkeit zu liegen, da sämtliche Proben im Kern versagten. Dementsprechend wurde mit dem kurzen Lagerabstand ausschließlich die Dauerfestigkeit des Kerns ermittelt. Deren Verteilung ist in Abbildung 44 dargestellt. Für jeden Spannungshorizont wurde mit nachfolgender Formel die experimentelle Bruchwahrscheinlichkeit bestimmt:

$$P_B = \frac{n_B}{n_H} \quad (\text{Gleichung 20})$$

Sie hängt von der Anzahl der auf einem Spannungshorizont geprüften Proben n_H und von der Anzahl der auf diesem Horizont gebrochenen Proben n_B ab. An die experimentellen Bruchwahrscheinlichkeiten wurde die zwei-parametrische Weibullverteilung aus Gleichung 1 angepasst, um den Median der Schubdauerfestigkeit des Kerns τ_D und deren Streuung m zu bestimmen.

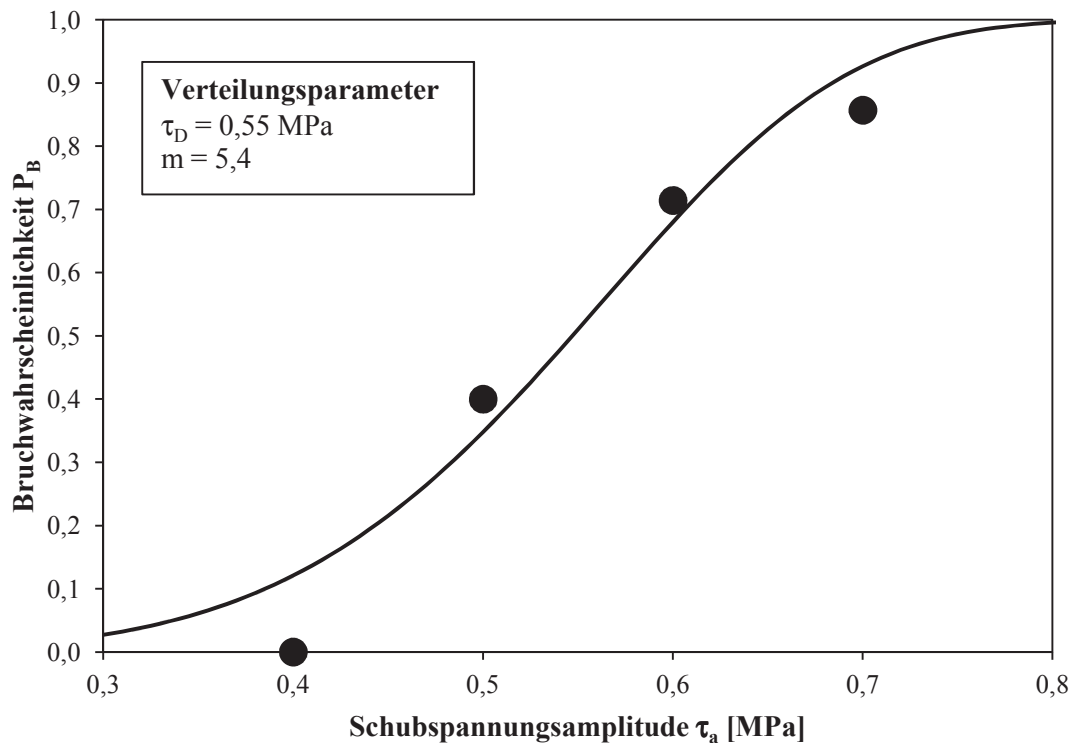


Abbildung 44: Verteilung der Schubdauerfestigkeit des Aluminiumschaumkerns

Der Median der Schubdauerfestigkeit des Kerns liegt bei 0,55 MPa. Damit beträgt sie, bei dem gegebenen Spannungsverhältnis von $R = 0,1$, knapp ein Viertel der Schubfestigkeit des Kerns.

Um die Dauerfestigkeit des Deckblechs ermitteln zu können, muss die Beanspruchung in den Deckblechen erhöht werden und gleichzeitig die Beanspruchung des Kerns unterhalb dessen Dauerfestigkeit liegen. Dementsprechend wurde die zweite Serie mit dem maximal möglichen Lagerabstand von 270 mm geprüft. Das Ergebnis ist in Abbildung 45 dargestellt.

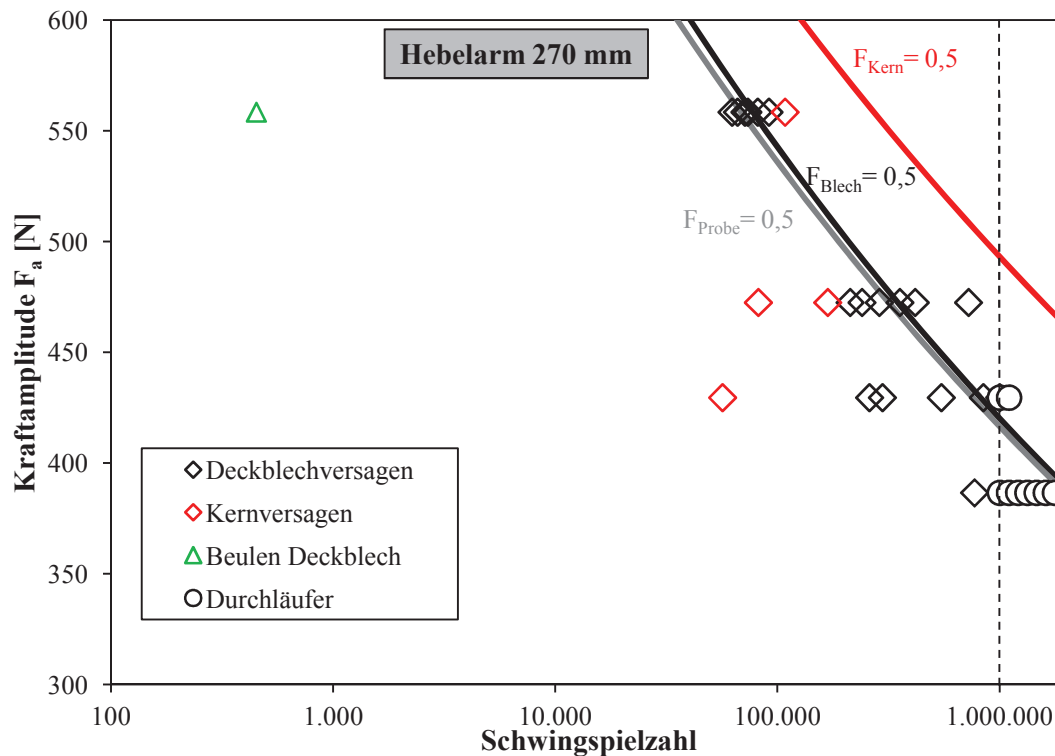


Abbildung 45: Wöhlerdiagramm des Aluminiumschaumsandwichs bei einer 3-Punkt-Biegebelastung mit dem langen Auflagerabstand (270 mm)

Auf 4 Belastungshorizonten wurden die Ermüdungsversuche durchgeführt. Die Kraftamplitude F_a lag dabei zwischen 387 und 559 N. Hieraus resultierten die in Tabelle 11 gezeigten Schubspannungsamplituden τ_a im Kern bzw. Normalspannungsamplituden σ_a im Deckblech. Neben Durchläufern bei den beiden unteren Belastungshorizonten traten 3 unterschiedliche Versagensmechanismen auf. Bei den meisten Proben trat das gewünschte Deckblechversagen auf. Hier bildeten sich mittig zwischen den Auflagern Risse in den Deckblechen, wie in Abbildung 46 a dargestellt. D. h. die Risse traten im Bereich der maximalen Normalspannung unterhalb des Biegestempels auf. Parallel hierzu trat bei vier Proben ein Kernversagen auf. In Abbildung 46 b ist exemplarisch eine Probe mit Riss im Kern dargestellt. Das Versagensverhalten ist mit dem der kurzen Proben vergleichbar, bei denen ausschließlich ein Kernversagen auftrat. Bei einer einzelnen Probe trat als dritter Versagensmechanismus ein Beulen der Deckbleche auf. Wie in Abbildung 46 c dargestellt, führte die Belastung auf dem höchsten Horizont zu einer starken plastischen Deformation der Probe, die zu einem frühzeitigen Ausbeulen des Deckblechs führte. Demzufolge können die Proben nicht bei höheren Kraftamplituden geprüft werden, da sonst ihre statische Festigkeit überschritten werden würde.

Belastung der Probe F_a	Schubspannungsamplitude Kern τ_a	Normalspannungsamplitude Blech σ_a
387 N	0,45 MPa	62,1
430 N	0,50 MPa	69,0
473 N	0,55 MPa	75,9
559 N	0,65 MPa	89,7

Tabelle 11: Belastungshorizonte und resultierende Kern- und Deckblechbeanspruchungen

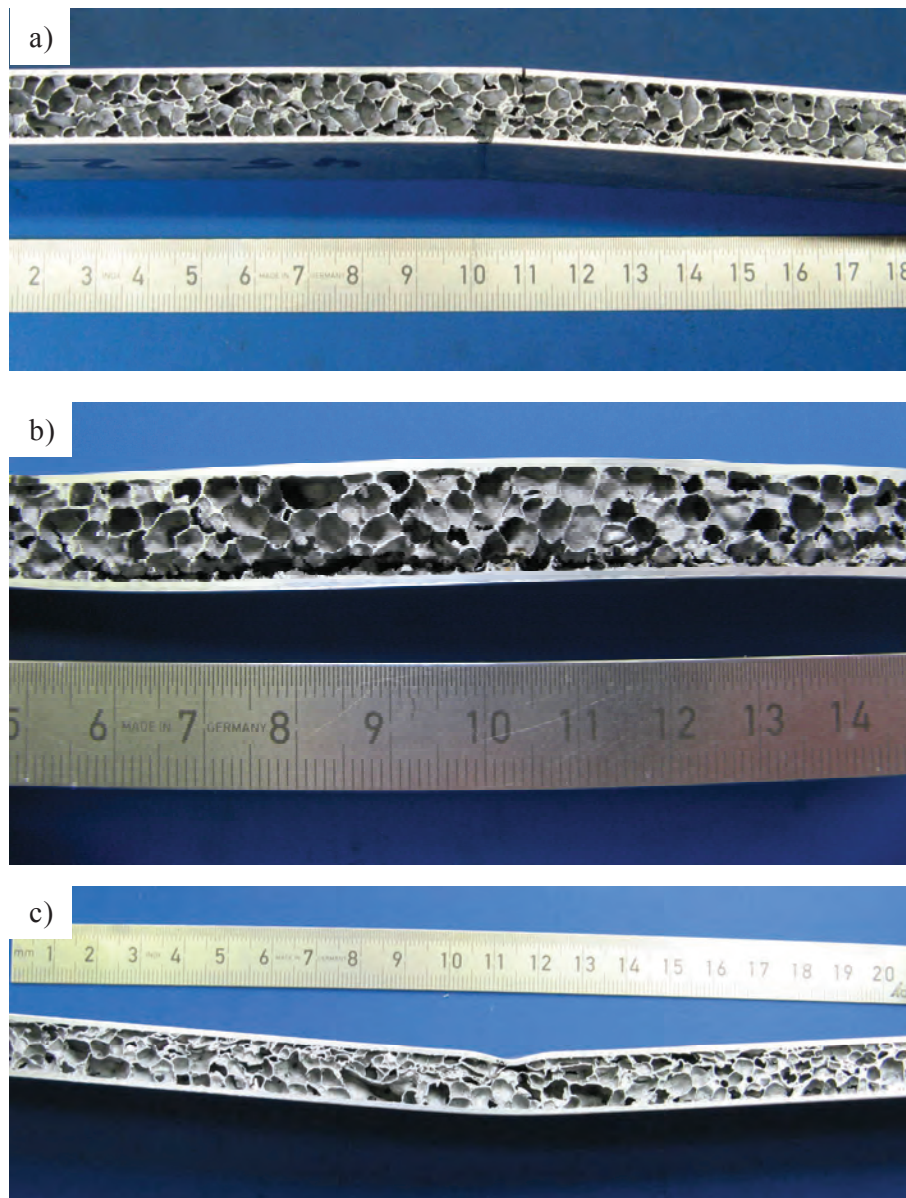


Abbildung 46: Versagensverhalten der 3-Punkt-Biegeproben, die mit dem langen Auflagerabstand (270 mm) geprüft wurden; a) Deckblechversagen ($F_a = 473$ N; $N_B = 211.803$); b) Kernversagen ($F_a = 473$ N; $N_B = 167.973$); c) Beulen des Deckblechs ($F_a = 559$ N; $N_B = 450$)

Anders als bei den kurzen Proben, traten bei den langen Proben die drei zuvor beschriebenen Versagensmechanismen parallel zueinander auf. Aus diesem Grund kann die Verteilung der Dauerfestigkeit der langen Proben nicht wie die Dauerfestigkeit der kurzen Proben ausgewertet werden. Neben der Dauerfestigkeitsverteilung der gesamten Probe sollen die Verteilungen des Kerns und der Deckbleche separat ermittelt werden. Die Dauerfestigkeitsberechnung basiert auf der Lebensdauerverteilung des Kerns bzw. des Deckblechs. Diese wird für die beiden

Versagensmechanismen jeweils getrennt ermittelt. Für beide Mechanismen wird angenommen, dass, bei einer gegebenen Belastung F_a , die Lebensdauern der zwei-parametrischen Weibullverteilung aus Gleichung 21 gehorchen.

$$F(N, F_a) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{N}{N_{63}(F_a)}\right)^c\right) \quad (\text{Gleichung 21})$$

Im Gegensatz zu den vorherigen Auswertungen wird eine Weibullverteilung mit der Basis e und nicht der Basis 2 gewählt. Dementsprechend charakterisiert der Lageparameter N_{63} nicht die Schwingspielzahl mit einer Bruchwahrscheinlichkeit von 50 % sondern die Schwingspielzahl mit einer Bruchwahrscheinlichkeit von 63 %. Die Weibullverteilung beschreibt die Lebensdauer der Probe für eine bestimmte Belastung. Da im Versuch mehrere Horizonte untersucht wurden, muss eine Verbindung zwischen der Bruchschwingspielzahl N_{63} und der Belastungsamplitude F_a hergestellt werden. Dies erfolgte mit der Basquin-Gleichung:

$$N_{63}(F_a) = N_0 \cdot \left(\frac{F_0}{F_a}\right)^k \quad (\text{Gleichung 22})$$

Mit ihr können in Abhängigkeit der Parameter N_0 , F_0 und k für eine beliebige Belastung F_a die Schwingspielzahl mit einer Bruchwahrscheinlichkeit von 63 % berechnet werden. Der Parameter F_0 kann frei gewählt werden, sodass nur die Parameter N_0 und k an die experimentellen Werte angepasst werden müssen. Die Anpassung dieser Parameter sowie des Streuparameters c aus der Weibullverteilung erfolgte über die Likelihood-Funktion L_j :

$$L_j \propto \prod_{i=1}^n h_j(N_i)^{d_{ij}} \cdot (1 - F_j(N_i)) \quad (\text{Gleichung 23})$$

Mit ihr können für die Ausfallursache j (Kern oder Deckblech) die bestmöglichen Verteilungsparameter der Lebensdauer ermittelt werden. Diese wurden erreicht, wenn die Likelihood-Funktion ihr Maximum hat. Für die Anpassung der Parameter an die Ausfallursache j wurden für jede geprüfte Probe, neben der Verteilungsfunktion $F_j(N_i)$, die Ausfallrate $h_j(N_i)$ und der Zensurindikator d_{ij} der Ausfallursache j berechnet. Der Zensurindikator d_{ij} ist für eine Probe i , die durch die Ursache j versagt hat, gleich 1 und für alle übrigen Proben i , die durch eine andere Ursache versagt haben oder unbeschadet die Grenzschwingspielzahl erreicht haben, gleich 0. Die Ausfallrate $h_j(N)$ ist abhängig von der Verteilungsfunktion $F_j(N)$ sowie der dazugehörigen Dichtefunktion $f_j(N)$. Die Dichtefunktion ergibt sich durch Ableiten der Verteilungsfunktion $F_j(N)$ zu:

$$f_j(N) = \frac{c}{N_{63}} \cdot \left(\frac{N}{N_{63}}\right)^{c-1} \cdot \exp\left(-\left(\frac{N}{N_{63}}\right)^c\right) \quad (\text{Gleichung 24})$$

Damit berechnet sich die Ausfallrate $h_j(N)$ wie folgt:

$$h_j(N) = \frac{f_j(N)}{1 - F_j(N)} = \frac{c}{N_{63}} \cdot \left(\frac{N}{N_{63}}\right)^{c-1} \quad (\text{Gleichung 25})$$

Mit den Verteilungsparametern für eine Versagensursache j , die durch Maximieren der Likelihood-Funktion L_j bestimmt werden, kann für eine gegebene Belastung F_a und eine vorgegebene Schwingspielzahl N die Überlebenswahrscheinlichkeit der Probe berechnet werden. Sie ergibt sich durch Einsetzen der Basquin-Gleichung (Gleichung 22) in die Verteilungsfunktion in Gleichung 21:

$$F_j(N, F_a) = 1 - \exp\left(-\left(\left(\frac{F_a}{F_0}\right)^k \cdot \left(\frac{N}{N_0}\right)^c\right)\right) \quad (\text{Gleichung 26})$$

Die ermittelten Verteilungsparameter für den Kern und das Deckblech sind in Tabelle 12 zusammengefasst. Die sich daraus ergebenden Lebensdauerkurven sind für eine Bruchwahrscheinlichkeit von jeweils 0,5 zusätzlich zu den experimentellen Daten in Abbildung 45 dargestellt. Parallel hierzu ist die Lebensdauerkurve der gesamten Probe dargestellt. Die hierfür benötigten Kraftamplituden-Schwingspielzahl-Paarungen ergeben sich durch Multiplikation der Überlebenswahrscheinlichkeiten von Kern und Deckblech (Gleichung 27), die zu einer Überlebenswahrscheinlichkeit von 0,5 führen. Für den gegebenen Auflagerabstand hat bei der gleichen Kraftamplitude der Kern eine höhere Lebensdauer als das Deckblech.

$$F_{\text{Probe}}(N, F_a) = 1 - (1 - F_{\text{Kern}}) \cdot (1 - F_{\text{Blech}}) \quad (\text{Gleichung 27})$$

Parameter	Kern	Deckblech
F_0	430 N	430 N
N_0	6.180.388	941.393
k	10,5	9,0
c	0,96	2,51
F_{63}	512 N	427 N
m	10,1	22,5

Tabelle 12: Verteilungsparameter für die Lebensdauer und die Dauerfestigkeit des Kerns und der Deckbleche

Wird in Gleichung 26 die Schwingspielzahl N durch die Grenzschwingspielzahl N_G ersetzt, ergibt sich die Verteilung der Bruchwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit der Belastungsamplitude:

$$F_j(F_a) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{F_a}{F_{63}}\right)^m\right) \quad (\text{Gleichung 28})$$

Hierbei sind $m = c \cdot k$ und $F_{63} = F_0 \cdot (N_0/N_G)^{1/k}$. Dies bedeutet, dass sich aus den zuvor bestimmten Verteilungsparametern der Lebensdauer und den Parametern der Basquin-Gleichung der Lageparameter der Weibullverteilung F_{63} sowie der Streuparameter m der Verteilung bestimmen lassen. Diese sind für den Kern und das Deckblech ebenfalls in Tabelle 12 dargestellt. Wie bereits erwähnt, gelten die Verteilungen nur für eine Versagensursache. Die Überlebenswahrscheinlichkeit der gesamten Probe ergibt sich durch Multiplikation der Überlebenswahrscheinlichkeiten des Kerns und der Deckbleche. Dementsprechend ergibt sich die Verteilung der Bruchwahrscheinlichkeit der gesamten Probe, analog zu Gleichung 27, zu:

$$F_{\text{Probe}}(F_a) = 1 - (1 - F_{\text{Kern}}) \cdot (1 - F_{\text{Blech}}) \quad (\text{Gleichung 29})$$

In Abbildung 47 sind die berechneten Bruchwahrscheinlichkeiten vom Kern und Deckblech sowie der gesamten Probe dargestellt. Der Median der Verteilung liegt bei einer Kraftamplitude von 493 N, was nach Gleichung 18 einer Schubspannungsdauerfestigkeit von 0,57 MPa entspricht. Diese stimmt nahezu mit der an den kurzen Proben ermittelten Kernschubdauerfestigkeit von 0,55 MPa überein. Die Streuung ist jedoch bei den langen Proben deutlich geringer. Diese Abweichung liegt vermutlich an der geringen Anzahl an Kernbrüchen, die für die Auswertung heran gezogen wurden. Demzufolge ist ihre Anzahl zu gering, um die Kerndauerfestigkeitsverteilung exakt zu beschreiben. Für die Charakterisierung der Kerndauerfestigkeit sollten daher die Daten der kurzen Proben herangezogen werden. Bei dem langen Auflagerabstand von 270 mm ist der Median der Deckblechbelastbarkeit mit

420 N geringer als die des Kerns. Diese entspricht nach Gleichung 9 einer Dauerfestigkeit von 67,4 MPa und beträgt damit 29 % der Zugfestigkeit.

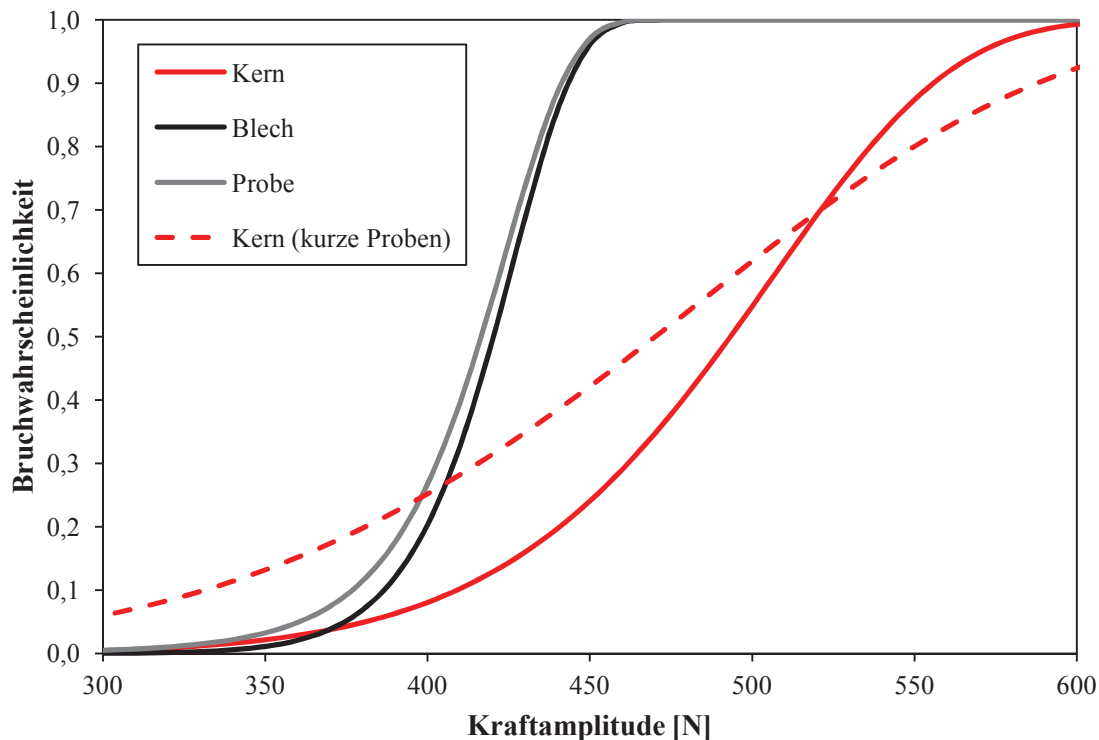


Abbildung 47: Verteilungsfunktionen der Dauerfestigkeit bei $N = 10^6$ von Kern, Deckblech und der gesamten Probe

2.9 Fertigungstechnische Grenzen

Die Grenzformänderungskurven (GFK) sind ein wichtiges Charakterisierungsverfahren für das Umformvermögen eines Materials. Jedes Material hat seine individuelle Grenzformänderungskurve, die gewöhnlich mit Hilfe von Tiefungsversuchen an Blechproben ermittelt wird. Im vorliegenden Fall sollte die Beeinflussung der Materialeigenschaften durch Fertigungsoperationen, d.h. vor und nach dem Aufschäumen untersucht und bewertet werden, um so die fertigungstechnischen Grenzen zu ermitteln. Dies erlaubt eine Beurteilung der Kompatibilität des Materials mit bestehenden Fertigungs- und Montageprozessen.

Für die Ermittlung der GFK nach DIN EN ISO 12004-2 (2009) [16] werden zahlreiche taillierte Proben verschiedener Abmessungen benötigt, jeweils im Zustand geschäumt und ungeschäumt. Zunächst wurde nach Eingang des Versuchsmaterials am IFAM das ungeschäumte Material zur Einstellung eines gut umformbaren, definierten Ausgangszustands weichgeglüht. Das bereits geschäumte Material wurde nicht wärmebehandelt. Aus diesem Versuchsmaterial wurden dann 30 Proben in den folgenden Abmessungen hergestellt: 400mm x 400mm, 400mm x 330mm, 400mm x 250mm, 400mm x 170mm und 400mm x 130mm und zwar jeweils 3 Proben für jede der 2 Varianten (geschäumt und ungeschäumt). Die Proben wurden am 10.09.2009 an das IWU, Chemnitz, geliefert, wo die Messung der GFK im Unterauftrag des IFAM erfolgte. Einige der Proben sind in Abbildung 48 dargestellt, wobei das auf die Proben aufgebrachte Messraster zur optischen Ermittlung der Werkstoffverschiebungen zu erkennen ist.

Die Messungen am IWU erfolgten mit Hilfe eines Versuchswerkzeugs mit einem Ziehstempeldurchmesser von 200 mm, siehe Abbildung 49, und unter Einsatz maximaler Schmierung

(Ziehöl und Ziehfolie). Jeweils 2 Proben jeder Geometrie wurden bei Raumtemperatur vermessen, die jeweils dritte Probe bei erhöhter Temperatur (150°C).

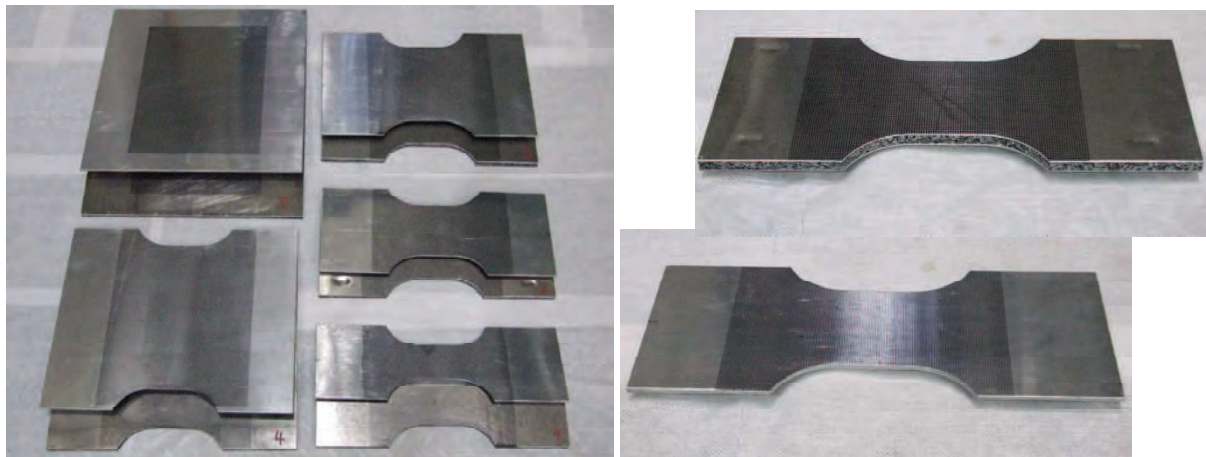


Abbildung 48: Proben für die Ermittlung der GFK

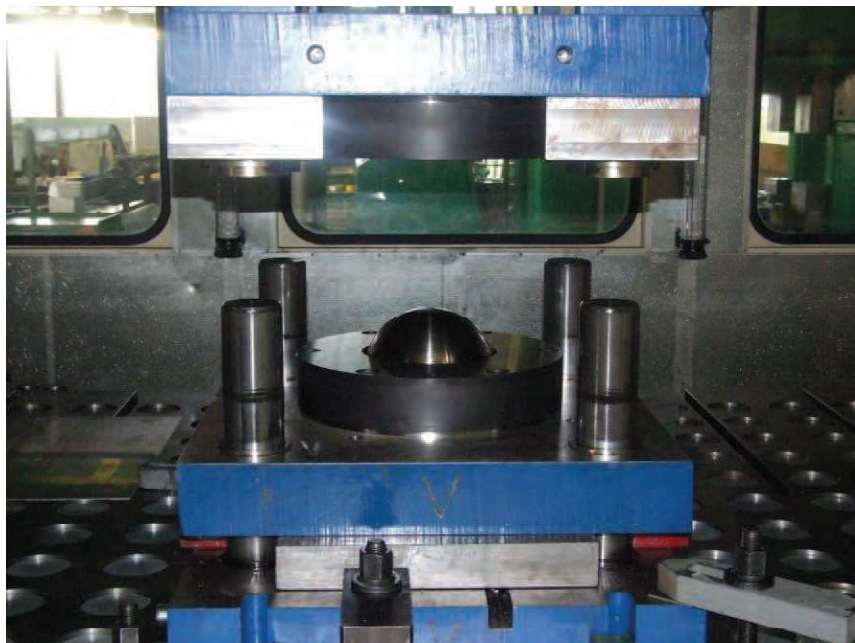


Abbildung 49: Ziehwerkzeug mit 200 mm Stempeldurchmesser

Die Ergebnisse der Messungen bei Raumtemperatur sind in der nachfolgenden Abbildung 50 dargestellt. Es zeigt sich, dass die Werte für das nicht geschäumte und das geschäumte Material überraschend dicht beieinander liegen. Dabei weisen die geschäumten Sandwiche erwartungsgemäß ein etwas schlechteres Umformvermögen auf.

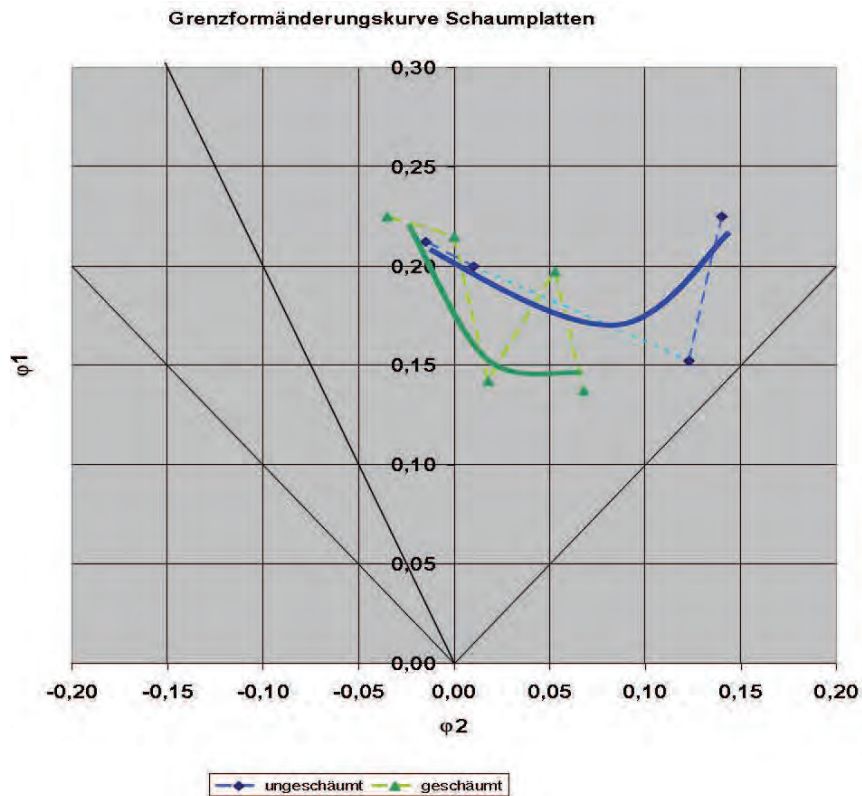


Abbildung 50: GFK des ungeschäumten und geschäumten Sandwichmaterials bei Raumtemperatur

Für die Messungen bei erhöhter Temperatur (150°C) wurde das Versuchswerkzeug mit einem beheizten Ziehring und beheiztem Niederhalter ausgestattet. Die Messungen erfolgten analog zu denen bei Raumtemperatur, jedoch stand von jeder Probengeometrie nur eine Probe zur Verfügung. Die Ergebnisse sind in den Abbildung 51 und Abbildung 52 dargestellt.

Bei den ungeschäumten Proben wurde im plane-strain-Bereich eine Verbesserung des Umformvermögens von bis zu 40 % gemessen. Dies ist vorteilhaft, da die meisten Umformprozesse im plane-strain-Bereich ablaufen. Auch bei den geschäumten Proben wurde eine deutliche Verbesserung erreicht. Diese betrug im Streckziehbereich bis zu 70 %.

Versuche mit erwärmten Proben: 150 °C - ungeschäumt (nur 1 Probe)

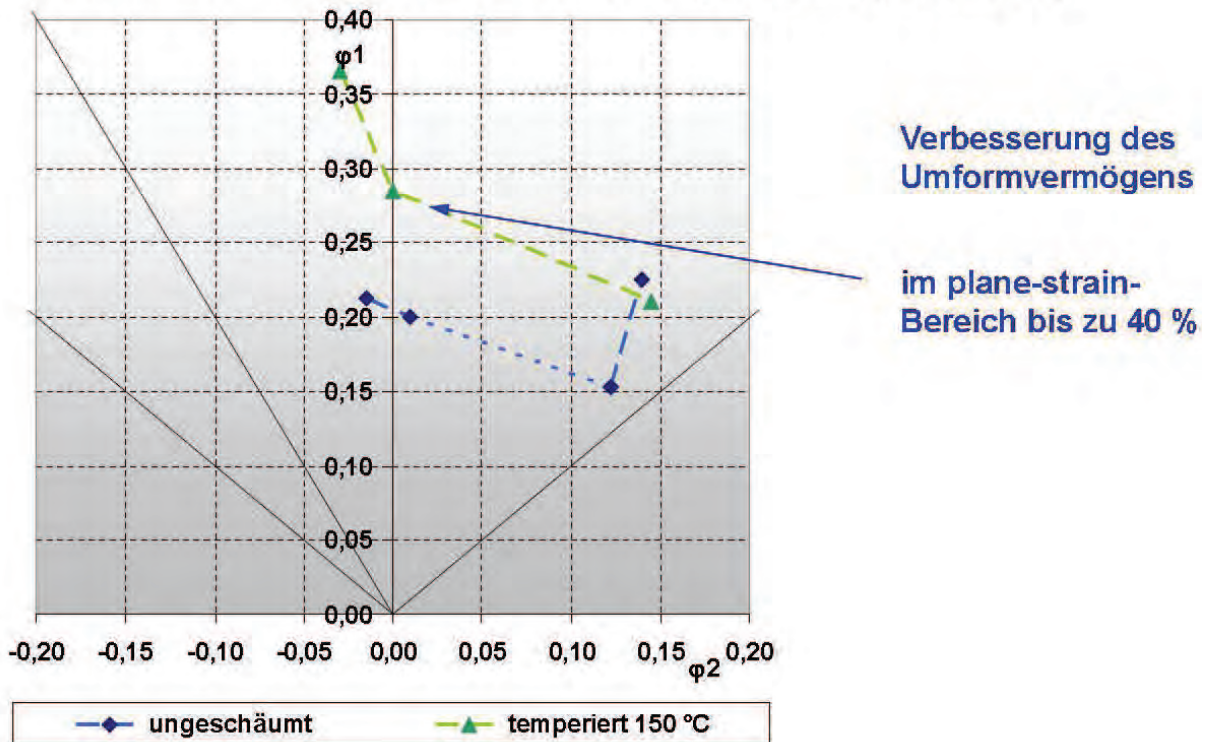


Abbildung 51: GFK des ungeschäumten Sandwichmaterials bei erhöhter Temperatur

Versuche mit erwärmten Proben: 150 °C - geschäumt (nur 1 Probe)

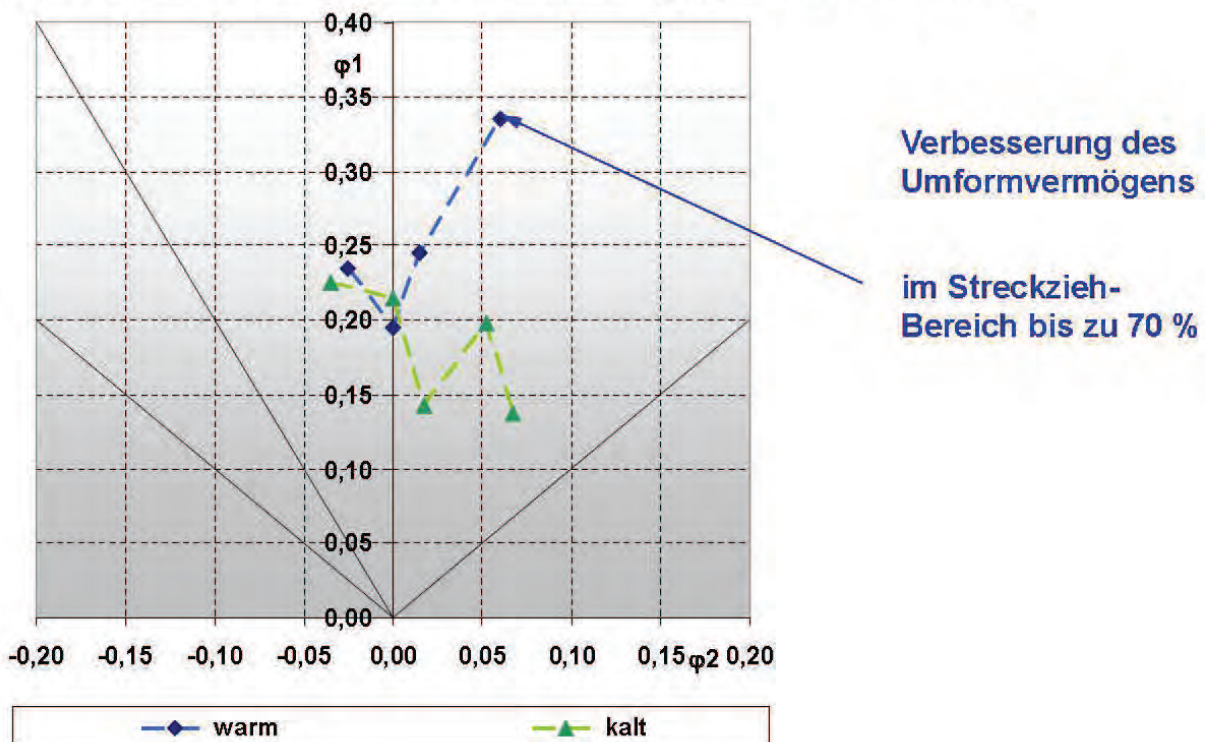


Abbildung 52: GFK des geschäumten Sandwichmaterials bei erhöhter Temperatur

Zur Messung des Blechdickenverlaufs der geprüften Proben wurden diese mit der Bandsäge aufgetrennt und an 8 verschiedenen Stellen ausgemessen. Die Messpunkte und die zugehörigen Ergebnisse sind in den Abbildung 53 und Abbildung 54 wiedergegeben.

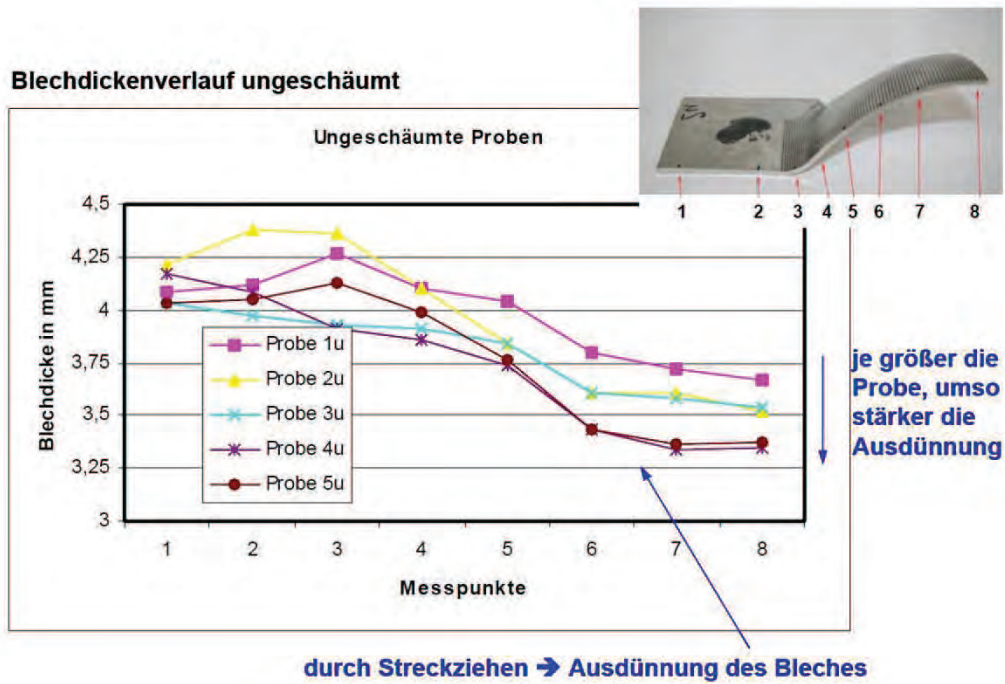


Abbildung 53: Blechdickenverlauf der geprüften ungeschäumten Proben

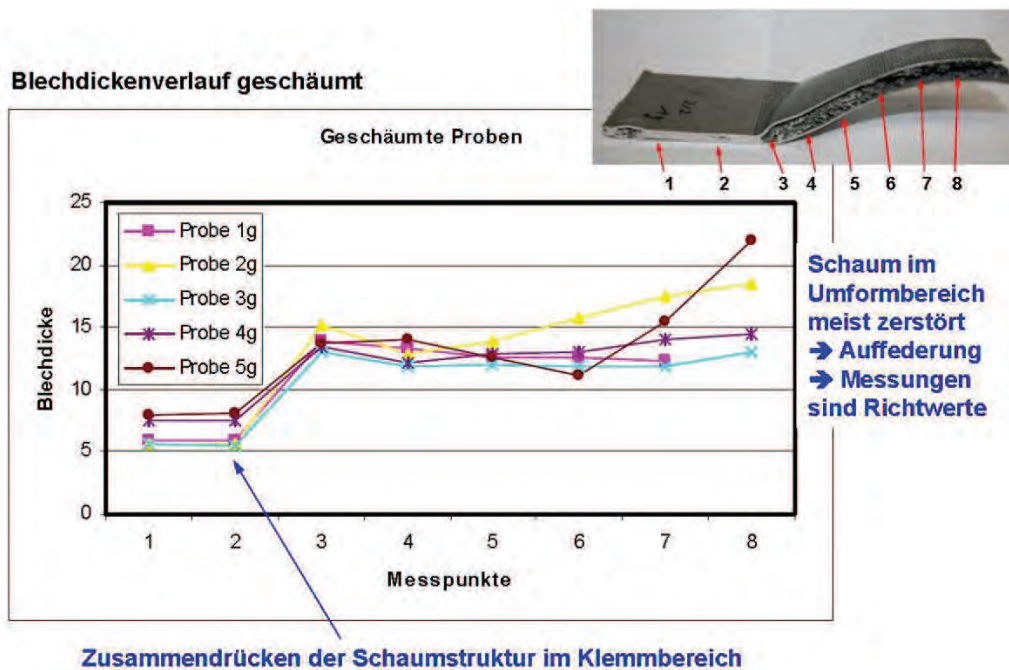


Abbildung 54: Blechdickenverlauf der geprüften geschäumten Proben

Bei den ungeschäumten Proben wurde eine deutliche Ausdünnung festgestellt, welche im Streckziehbereich am deutlichsten ausfiel. Demnach ist die Ausdünnung umso stärker, je größer die Proben waren.

Dagegen wurde bei den geschäumten Proben keine nennenswerte Ausdünnung festgestellt. Da bei den Versuchen meistens auch die Schaumstruktur zerstört wurde, federten die Deckbleche auf, so dass die Blechdicken hier nur näherungsweise ermittelt werden konnten. Die vermeintliche Ausdünnung der geschäumten Proben im Bereich der Messpunkte 1 und 2 ist ein Artefakt und auf das Zusammendrücken der Schaumstruktur in der Probeneinspannung zurückzuführen.

2.10 Kostenanalyse

Es war ursprünglich geplant, die Kostenanalyse anhand des Demonstrators durchzuführen. Auf der Grundlage der Materialkosten und der Erkenntnisse über die realistischen Fertigungsabläufe sollte ein qualitativer bzw. halbquantitativer Vergleich unterschiedlicher Werkstoffkonzepte erfolgen. Ein wesentlicher Grund für die Verwendung von Aluminiumschaumsandwich im Demonstrator „Rahmenmontageplatte“ sollte die hohe Biegesteifigkeit des Materials sein. Da aus den bereits beschriebenen Gründen kein Demonstrator erstellt werden konnte, wurde in der Sitzung des Projektausschusses vom 15.06.2010 beschlossen, dass die Kostenanalyse anhand von Stahlblechen, Aluminiumblechen und Aluminiumschaumsandwichblechen gleicher Biegesteifigkeit durchgeführt werden soll. Dabei sollte eine realistische Bestellmenge von 100 Quadratmetern zugrunde gelegt werden, da die Materialkosten stark von der Menge abhängen.

Die Biegesteifigkeit $E \cdot I$ eines Sandwiches setzt sich aus drei Einzelbeiträgen zusammen:

1. der Biegesteifigkeit der beiden Deckschichten, bezogen auf deren neutrale Achse,
2. der Biegesteifigkeit des Kerns
3. der Biegesteifigkeit der Deckschichten, bezogen auf die neutrale Achse des Sandwiches (Steineranteil)

In der Regel sind die ersten beiden Beiträge wesentlich kleiner als der dritte, so dass sich die Berechnung wie in Abbildung 55 dargestellt vereinfachen lässt.

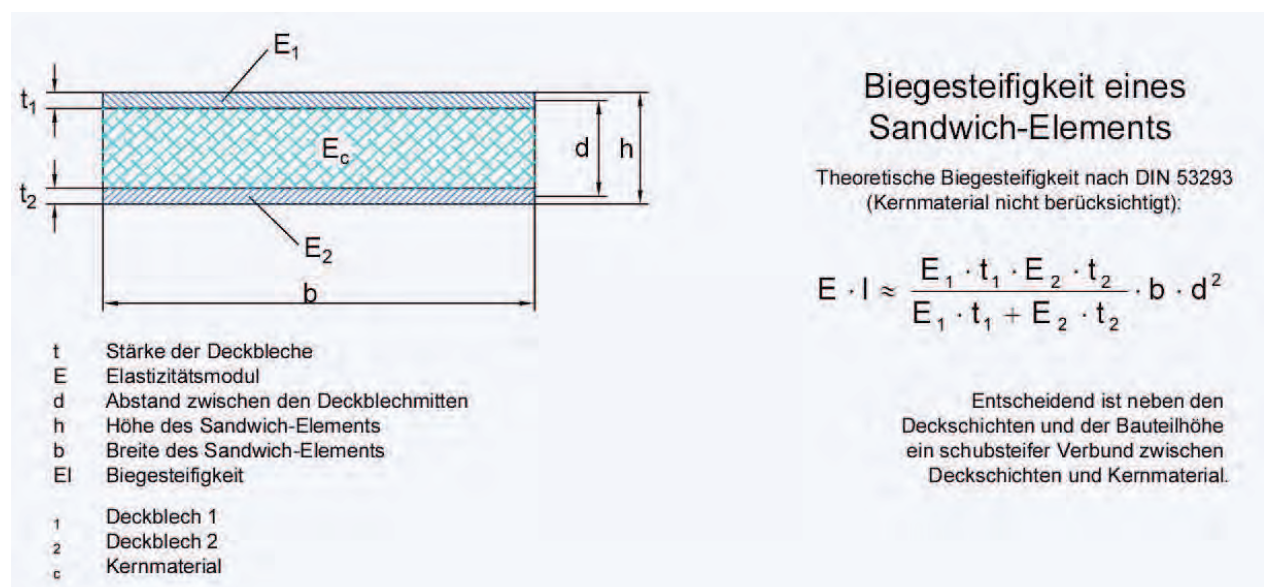


Abbildung 55: zur Berechnung der Biegesteifigkeit von Sandwichen [17]

Im hier vorliegenden Fall von symmetrischen Sandwichaufbauten ($t_1 = t_2 = t$, $E_1 = E_2 = E_D$) vereinfacht sich die Formel für die Biegesteifigkeit weiter zu

$$E \cdot I = \frac{1}{2} E_D b t d^2$$

Die Berechnungen ergaben, dass für eine Biegesteifigkeit von $E \cdot I \cong 4,25 \cdot 10^9 \text{ Nmm}^2$ folgende Blechdicken und Flächengewichte erforderlich sind:

- Aluminiumschaumsandwich: 12 mm Dicke, Flächengewicht 10,5kg/m²
- Aluminiumblech: 9,0 mm Dicke, Flächengewicht 24,3kg/m²
- Stahlblech: 6,3 mm Dicke, Flächengewicht 49,45kg/m²

Per Email und Internet wurden zahlreiche Anbieter von Blechmaterialien kontaktiert, um Preisauskünfte zu erhalten. Für die angefragte Bestellmenge von 100 Quadratmetern waren nur Stahlbleche von 6,0 mm Dicke, und Aluminiumbleche von 8 oder 10 mm Dicke erhältlich. Die genauen gewünschten Blechdicken von 6,3 und 9 mm waren entweder gar nicht verfügbar, oder hätten als Sonderanfertigung einen erheblich Mehraufwand und damit unrealistisch hohe Kosten verursacht. Aufgrund der vorliegenden Angebote der Blechlieferanten ergaben sich folgende Preisspannen:

Material	flächenspezif. Kosten*	(Mittlere) Kosten/kg
Aluminiumblech: 8,0 mm, $E \cdot I$ $\cong 2,99 \cdot 10^9 \text{ Nmm}^2$, Flächengewicht 21,6 kg/m ²	140 €/m ² [18] 277 €/m ² [19] 300 €/m ² [20]	250 €/m ² bei 21,6 kg/m ² \Rightarrow ca. 12€/kg
Aluminiumblech: 10,0 mm, $E \cdot I$ $\cong 5,8 \cdot 10^9 \text{ Nmm}^2$, Flächengewicht 27,0 kg/m ²	170 €/m ² [18] 386 €/m ² [19] 480 €/m ² [20]	300 €/m ² bei 27 kg/m ² \Rightarrow ca. 11€/kg
Stahlblech: 6,0 mm, $E \cdot I$ $\cong 3,6 \cdot 10^9 \text{ Nmm}^2$, Flächengewicht 46,8 kg/m ²	38,38 €/m ² [21] 52,50 €/m ² [22] 65,73 €/m ² [23]	50 €/m ² bei 46,8 kg/m ² \Rightarrow ca. 1,1€/kg
Aluminiumschaumsandwich $E \cdot I$ $\cong 4,25 \cdot 10^9 \text{ Nmm}^2$ Flächengewicht 10,5kg/m ²	291,60 €/m ² [24] 299,70 €/m ² [25]	290 €/m ² bei 10,5 kg/m ² \Rightarrow ca. 27,6€/kg

Tabelle 13: Kosten von Aluminiumblechen, Stahlblechen und Aluminiumschaumsandwichen; *: die Kosten beinhalten die Mehrwertsteuer, jedoch nicht die Lieferkosten

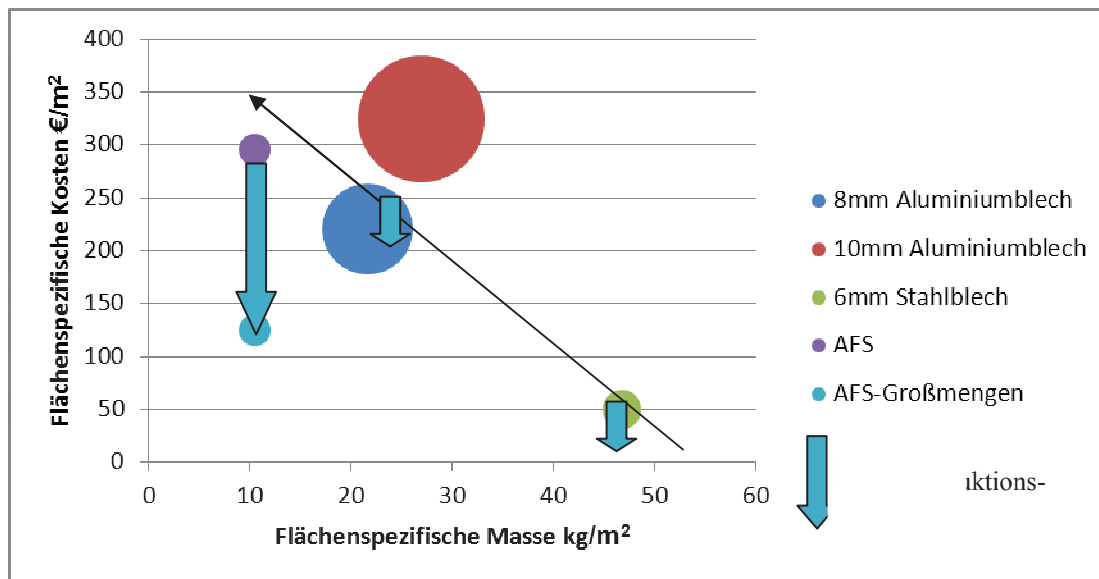


Abbildung 56: Vergleich von flächenspezifischen Massen und Kosten (die Größen der Kreise entsprechen den Preisunterschieden je nach Hersteller und Abnahmemengen)

Aus Tabelle 13 und Abbildung 56 wird deutlich, dass die Kosten der Aluminiumbleche in der gleichen Größenordnung wie die der Aluminiumschaumsandwiches liegen, wogegen die Stahlbleche um den Faktor 5 bis 10 günstiger sind. Das Verhältnis der flächenspezifischen Kosten zum Flächengewicht – also der Kilopreis [€/kg] – ist demzufolge erwartungsgemäß für Stahl besonders günstig. Dem steht allerdings das wesentlich höhere Flächengewicht der Stahlbleche gegenüber. Aus Abbildung 56 wird deutlich, dass eine Reduzierung des Flächengewichts im Sinne des automobilwerkstoffbasierten Leichtbaus nicht ohne eine Erhöhung der Bauteilkosten möglich ist. Auch alternative Werkstofflösungen wie CFK oder andere Sandwichlösungen würden sich in etwa in dieses Schema einordnen. Inwieweit ein derartiger Kostenmehraufwand rechtfertigbar ist, hängt offensichtlich von externen Rahmenbedingungen wie der Entwicklung von Treibstoffkosten oder gesetzlichen Auflagen (Flottenverbrauch) ab. Das Beispiel des zur Zeit intensiv diskutierten Einsatzes von CFK in der Automobilfertigung zeigt, wie sich hier Einsatzgrenzen eines Werkstoffs innerhalb eines Jahrzehnts verschieben können.

In Bezug auf Abbildung 56 ist eine weitere Betrachtung interessant: sowohl bei den Stahl- als auch den Aluminiumblechen handelt es sich im Gegensatz zu AFS um langetablierte Großserienprodukte. Wenn man berücksichtigt, dass sowohl die Aluminiumbleche als auch AFS auf dem gleichen Werkstoff Aluminium beruhen, muss sich der Kostenunterschied von immerhin 15€/kg (Tabelle 13, rechte Spalte) durch die unterschiedlichen Herstellungsverfahren für Al-Bleche und AFS ergeben. Hier bieten sich für die noch nicht so etablierte AFS-Fertigung im Vergleich zur ausgereiften Al-Blech-Technologie höhere Kostenreduktionspotentiale - auch wenn innerhalb der AFS-Fertigungskette (Pulverherstellung, Verdichtung, Walzen zum Vorprodukt, Schäumen, Kalibrierung) nicht alle Prozessschritte einen gleich hohen Spielraum für Kostensenkungen aufweisen. So wird von der Fa. Pohltec bereits jetzt ein verbindlicher Preis von 125,00 €/m² für Abnahmen größerer Mengen AFS (100 Quadratmeter bei regelmäßiger Abnahme, Legierungen: Al6082/AlSi8Mg4/Al6082) angegeben [26]. Hier sind innerhalb der letzten 2 Jahre offensichtlich Teile des Kostenreduktionspotenzials bereits realisiert worden.

3 Wissenschaftlich-technische Nutzung und Transfermaßnahmen

Die Publizierung der Forschungsergebnisse erfolgt durch Vorträge auf Fachtagungen und -messen sowie durch Veröffentlichungen in den einschlägigen Fachzeitschriften der Bereiche Automobiltechnik und Werkstoffwissenschaften, sowie über den einschlägig bekannten, kmU-orientierten Fraunhofer Mediendienst (Pressedienst, Darstellung im Internet, Newsletter, Jahresberichte, etc.). Des Weiteren wird eine Verbreitung über thematisch geeignete Netzwerke, denen die Forschungsstellen angehören, angestrebt (u. a. DGM-Arbeitskreis „Zellulare Metalle“ etc.). Schließlich ist die Einspeisung der Daten in Datenbanken mit Materialkennwerten geplant (z.B. <http://www.zellulare-metalle.com/wiam/wiamdb>), so dass diese direkt von Interessenten abgerufen werden können.

4 Veröffentlichungen zum Vorhaben

Es ist geplant, die Ergebnisse des Vorhabens im Journal of Materials Science zu veröffentlichen.

5 Förderhinweise

Das IGF-Vorhaben 15690 N der Forschungsvereinigung FAT wurde über die AiF im Rahmen der Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und –entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

6 Unterschriften

Forschungsstelle 1:

Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der
angewandten Forschung e. V.
Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und
angewandte Materialforschung (IFAM)

Wiener Straße 12
28359 Bremen

Leiter der Forschungsstelle:

Prof. Dr.-Ing. Matthias Busse

Projektleiter:

Dipl.-Phys. Joachim Baumeister

Wiener Straße 12
28359

Tel.: (0421) 2246 242
Fax: (0421) 2246 300

Bremen, 30.04.2012

Ort, Datum

Bremen, 30.04.2012

Ort, Datum

Forschungsstelle 2:

Institut für Werkstofftechnik
Hauptabteilung Werkstofftechnik

Badgasteiner Straße 3
28359 Bremen

Prof. Dr.-Ing. Hans-Werner Zoch

Dr. rer. nat. Hubert Bomas

Badgasteiner Straße 3
28359 Bremen

Tel.: (0421) 218 51350
Fax: (0421) 218 51333

Unterschrift des Projektleiters und
Stempelabdruck der Forschungsstelle 1

Unterschrift der Projektleiters und
Stempelabdruck der Forschungsstelle 2

7 Literaturverzeichnis

- [1] Bernard, T., Zoch, H.-W., *Aluminiumschäume – Eigenschaften und Einsetzbarkeit*, Härtereitechnische Mitteilungen (HTM) **57**, 2002, S. 308-315
- [2] Hanssen, A. G., Stöbener, K., Rausch, G., Langseth, M., Keller, H., *Optimisation of energy absorption of an A-pillar by metal foam insert*, International Journal of Crashworthiness, **11** (2006), Nr.3, S. 231-242
- [3] Baumeister, J., Lehmhus, D., *Commercially available products made of PM aluminium foams – status and prospects*, in: Banhart, J., Fleck, N. A., Mortensen, A. [Hrsg.], *Cellular Metals: Manufacture, Properties, Applications*, MIT-Verlag, Berlin, 2003, S. 13-18
- [4] Seeliger, H.-W., *Aluminium foam sandwich (AFS) – ready for market introduction*, in: Banhart, J., Fleck, N. A., Mortensen, A. [Hrsg.], *Cellular Metals: Manufacture, Properties, Applications*, MIT-Verlag, Berlin, 2003, S. 5-12
- [5] Schäffler, P., *A new generation of materials and their production method*, in: Nakajima, H., Kanetake, N. [Eds.], *Porous Metals and Metal Foaming Technology*, Proceedings of the 4th international conference on porous metals and metal foaming technology, Sept. 21-23, 2005, Kyoto (Jpn), The Japan Institute of Metals, Sendai, 2006, S. 153-156
- [6] Seeliger, H.-W., *Aluminium foam sandwich (AFS), developments driven by customer related enhancements*, in: Nakajima, H., Kanetake, N. [Eds.], *Porous Metals and Metal Foaming Technology*, Proceedings of the 4th international conference on porous metals and metal foaming technology, Sept. 21-23, 2005, Kyoto (Jpn), The Japan Institute of Metals, Sendai, 2006, S. 9-12
- [7] McCullough, K. Y. G.; Fleck, N. A.; Ashby, M. F.: Uniaxial stress-strain behaviour of aluminium alloy foams. *Acta mater.* **47** (1999) **8**, S. 2323-2330
- [8] <http://www.me.mtu.edu/~mrao/et-paper-brandon-revised.pdf>
- [9] DIN EN 10002-1: Metallische Werkstoffe - Zugversuch - Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur. Ausgabe: 2001-1, Beuth Verlag, Berlin
- [10] DIN 53291: Prüfung von Kernverbunden; Druckversuch senkrecht zur Deckschichtebene. Ausgabe: 1982-2, Beuth Verlag, Berlin
- [11] DIN 50134: Prüfung von metallischen Werkstoffen - Druckversuch an metallischen zellularen Werkstoffen. Ausgabe: 2008-10, Beuth Verlag, Berlin
- [12] DIN 53292: Prüfung von Kernverbunden; Zugversuch senkrecht zur Deckschichtebene; Ausgabe: 1982-2, Beuth Verlag, Berlin
- [13] DIN 53294: Prüfung von Kernverbunden; Schubversuch; Ausgabe: 1982-2, Beuth Verlag, Berlin
- [14] Schnell, W.; Gross, D.; Hauger, W.: Technische Mechanik, Band 2: Elastostatik. 6. Auflage Springer-Verlag, Berlin, 1998
- [15] Wiedemann, J.: Leichtbau 1: Elemente, 2. Auflage Springer-Verlag, Berlin, 1996
- [16] DIN EN ISO 12004-2: Metallische Werkstoffe - Bleche und Bänder - Bestimmung der Grenzformänderungskurve - Teil 2: Bestimmung von Grenzformänderungskurven im Labor. Ausgabe: 2009-02, Beuth Verlag, Berlin
- [17] http://www.metawell.com/pdf/bv07d_automotive.pdf
- [18] http://www.metall-kunststoffhandel.de/shop/shopping_cart.php?osCsId=b76586931ae9c898bff77e4fcc42b40d : 140-170 €/qm (8 und 10 mm dick)
- [19] http://www.metall-verkauf.com/de/shop-gemmel-metalle-aluminium/Bleche_-

- 11/index.html
- [20] http://www.aluminium-online-shop.de/de/shop-aluminium-kleinstmengen/Blech_-4/index.html?gclid=COKYjrPgpaYCFclj3wod4SuknQ : 300-480 €/qm (8 und 10 mm dick)
- [21] Angebot der Fa. Interfer Stahl GmbH vom 07.02.2011 per Email
- [22] Online Angebot der Fa. Feld GmbH vom 03.02.2011, Angebot-Nr. ANO110007
- [23] http://www.mein-stahlshop.de/product_info.php?cPath=37_40_43_133&products_id=715
- [24] Auftragsbestätigung Nr. 090751-53 vom 10.07.2009 der Fa. Alulight, Legierungen: AlMn1/AlSi7/AlMn1
- [25] Auftragsbestätigung Nr. 090751-53 vom 10.07.2009 der Fa. Alulight, Legierungen: Al6082/AlSi8Mg4/Al6082
- [26] Preisauskunft per Email vom 17.01.2012 der Fa. Pohltec, Legierungen: Al6082/AlSi8Mg4/Al6082

Bisher in der FAT-Schriftenreihe erschienen (ab 2006)

Nr.	Titel
199	Anwendungspotentiale und Prozeßgrenzen der Klebtechnik für die Umformung von Doppellagenblechen, 2006
200	Thermisches Fügen für die stahlintensive Hybridbauweise im Fahrzeugleichtbau, 2006
201	Lufthygienische Beurteilung von Pkw-Innenraumfiltern, 2006
202	Vergleich verschiedener Konzepte der Bodensimulation und von drehenden Rädern zur Nachbildung der Straßenfahrt im Windkanal und deren Auswirkung auf Fahrzeuge, 2006
203	Methodischer Ansatz im Stahlleichtbau am Beispiel Federbein/Dämpfer, 2006
204	Innovative Nfz-Konzepte - Gesamtwirtschaftliche Effekte durch Einführung schwerer und langer Lkw, 2006
205	Technische Kompatibilität von innovativen Nutzfahrzeugkonzepten auf den kombinierten Verkehr Straße/Schiene sowie den Containerverkehr, 2006
206	Größenaufgelöste physikalische und chemische Bestimmung von elementarem und organischem Kohlenstoff in Nanopartikeln, 2006
207	Erstellung einer VHDL-AMS-Modellbibliothek für die Simulation von Kfz-Systemen, 2006
208	Fahrer-Fahrzeug-Wechselwirkungen bei Fahrmanövern mit Querdynamikbeanspruchungen und zusätzlichen Vertikaldynamikstörungen, 2006
209	Innovative Nfz-Konzepte - Akzeptanzuntersuchungen zur Einführung und zum Einsatz innovativer Nutzfahrzeuge, 2007
210	Das Konzept des Situationsbewusstseins und seine Implikationen für die Fahrsicherheit, 2007
211	FAT-Richtlinie Dynamische Werkstoffkennwerte für die Crashsimulation, 2007
212	Innovative Nfz-Konzepte - Wirtschaftlichkeitsanalyse EuroCombi, 2007
213	Störfestigkeit von Fahrzeugelektronik bezüglich ESD und Impulseinkopplung, 2007
214	Betriebsfeste Bemessung von mehrachsig belasteten Laserstrahlschweißverbindungen aus Stahlblechen des Karosseriebaus, 2007
215	Örtlich ertragbare Beanspruchungen bei Spannungskonzentrationen in Karosseriebauteilen aus hoch- und höherfesten Stählen, 2008
216	Auswirkung der Berücksichtigung lokaler Größen des E-Moduls im Hinblick auf die verbesserte Auslegung umgeformter Karosserieblechstrukturen aus Stahl, 2008
217	Aktueller Stand und Trends in der CFK-Berechnung im Fahrzeugbau, 2008
218	In-vitro-Untersuchungen zur Bioverfügbarkeit von an Dieselpartikel gebundenen polyaromatischen Kohlenwasserstoffen und Nitropyrenen, 2008
219	Bewertender Vergleich der aktuellen Empfehlungen zu den Luftqualitätsgrenzwerten NO ₂ , Evidenzbasierter Vergleich der epidemiologischen Studien 2002-2006 zu Gesundheitseffekten durch NO ₂ , 2008
220	Fahrdynamische Analyse innovativer Nfz-Konzepte (EuroCombi), 2008
221	Entwicklung einer Methode zur vergleichenden Bewertung von Schwingfestigkeitsversuchen mit gefügten Stahlblechen in Abhängigkeit des Versagensverhaltens, 2009
222	Untersuchung zur Wahrnehmung von Lenkmomenten bei Pkw, 2009
223	Entwicklung einer Prüfspezifikation zur Charakterisierung von Luftfedern, 2009

- 224 Klimatische Daten und Pkw-Nutzung - Klimadaten und Nutzungsverhalten zu Auslegung, Versuch und Simulation an Kraftfahrzeug-Kälte-/Heizanlagen in Europa, USA, China und Indien, 2009
- 225 CO₂-Einsparung durch Verflüssigung des Verkehrsablaufs - Abschätzung staubedingter CO₂-Emissionen und von Reduktionspotentialen durch Verbesserung des Verkehrsablaufs, 2009
- 226 Modellbasierte Systementwicklung, 2009
- 227 Schwingfestigkeitsbewertung von Nahtenden MSG-geschweißter Dünnbleche aus Stahl, 2010
- 228 Systemmodellierung für Komponenten von Hybridfahrzeugen unter Berücksichtigung von Funktions- und EMV-Gesichtspunkten, 2010
- 229 Methodische und technische Aspekte einer Naturalistic Driving Study, 2010
- 230 Analyse der sekundären Gewichtseinsparung, 2010
- 231 Zuverlässigkeit von automotive embedded Systems, 2011
- 232 Erweiterung von Prozessgrenzen der Bonded Blank Technologie durch hydromechanische Umformung, 2011
- 233 Spezifische Anforderungen an das Heiz-Klimasystem elektromotorisch angetriebener Fahrzeuge, 2011
- 234 Konsistentes Materialmodell für Umwandlung und mechanische Eigenschaften beim Schweißen hochfester Mehrphasen-Stähle, 2011
- 235 Makrostrukturelle Änderungen des Straßenverkehrslärms, Auswirkung auf Lästigkeit und Leistung, 2011
- 236 Verbesserung der Crashsimulation von Kunststoffbauteilen durch Einbinden von Morphologiedaten aus der Spritzgießsimulation, 2011
- 237 Verbrauchsreduktion an Nutzfahrzeugkombinationen durch aerodynamische Maßnahmen, 2011
- 238 Wechselwirkungen zwischen Dieselmotortechnik und -emissionen mit dem Schwerpunkt auf Partikeln, 2012
- 239 Überlasten und ihre Auswirkungen auf die Betriebsfestigkeit widerstandspunktgeschweißter Feinblechstrukturen, 2012
- 240 Einsatz- und Marktpotenzial neuer verbrauchseffizienter Fahrzeugkonzepte, 2012
- 241 Aerodynamik von schweren Nutzfahrzeugen - Stand des Wissens, 2012
- 242 Nutzung des Leichtbaupotentials von höchstfesten Stahlfeinblechen durch die Berücksichtigung von Fertigungseinflüssen auf die Festigkeitseigenschaften, 2012
- 243 Aluminiumschaum für den Automobileinsatz, 2012

Impressum

Herausgeber	FAT Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. Behrenstraße 35 10117 Berlin Telefon +49 30 897842-0 Fax +49 30 897842-600 www.vda-fat.de
ISSN	2192-7863
Copyright	Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT) 2012

VDA | Verband der
Automobilindustrie

FAT | Forschungsvereinigung
Automobiltechnik

Behrenstraße 35
10117 Berlin
www.vda.de
www.vda-fat.de