

# Schlussbericht vom 31.12.2025

zum IGF-Vorhaben 01IF22640N

## Thema

Ressourcenschonende Prozesskette für Bauteile aus hochfesten Aluminiummatrix-Verbundwerkstoffen für Leichtbauanwendungen – RePro-AMC

## Berichtszeitraum

01.09.2022 bis 31.12.2025

## Forschungsvereinigung

Stifterverband Metalle e.V.  
Wallstr. 58/59  
10179 Berlin

## Forschungseinrichtung(en)

**FE1:** Technische Universität Chemnitz, Fakultät Maschinenbau, Professur Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde,

Erfenschlager Straße 73, 09125 Chemnitz

**FE2:** Fraunhofer-Gesellschaft e.V., Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik,

Reichenhainer Straße 88, 09126 Chemnitz

**FE3:** Technische Universität Chemnitz, Fakultät Maschinenbau, Professur Fahrzeugsystemdesign

Reichenhainer Straße 70, 09126 Chemnitz

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse</b> .....	<b>4</b>
2.1	Arbeitspaket 1: Randbedingungen hinsichtlich der Demonstratorfertigung (FE1, FE2, FE3) .....	4
2.2	Arbeitspaket 2: Herstellung von mechanisch dispergiertem AMC-Verbundpulver (FE1, FE2) .....	9
2.3	Arbeitspaket 3: Strangpressen von AMC-Verbundpulvern (FE2) .....	14
2.4	Arbeitspaket 4: Auslegung, Konstruktion und finale Fertigung Demonstrator Pkw-Dämpfer (FE1, FE2, FE3) .....	30
2.5	Arbeitspaket 5: Planung und Fertigung Demonstrator Sitzteiler (FE1, FE2) .....	52
2.6	Arbeitspaket 6: Werkstoff- und Bauteilcharakterisierung (FE1, FE2, FE3) .....	56
2.7	Arbeitspaket 7: Dokumentation und Außendarstellung (FE1, FE2, FE3) .....	64
<b>3</b>	<b>Verwendung der Zuwendung</b> .....	<b>67</b>
<b>4</b>	<b>Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit</b> .....	<b>67</b>
<b>5</b>	<b>Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrags und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten</b> .....	<b>67</b>
<b>6</b>	<b>Wissenstransfer in die Wirtschaft</b> .....	<b>68</b>
<b>7</b>	<b>Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft</b> .....	<b>70</b>
7.1	Durchgeführte Transfermaßnahmen (vom Projektstart bis zum Projektende) .....	70
7.2	Geplante Transfermaßnahmen (nach Projektende) .....	71
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>72</b>

## 1 Einleitung

Das Projekt RePro-AMC (Ressourcenschonende Prozesskette für Bauteile aus hochfesten Aluminiummatrix-Verbundwerkstoffen für Leichtbauanwendungen) zielt auf die Ertüchtigung pulvermetallurgisch hergestellter Aluminiummatrix-Verbundwerkstoffe (AMC) ab, die in leichtbaurelevanten Branchen dringend benötigt werden. Nachdem die Leistungsfähigkeit der Werkstoffe in mehreren grundlagenorientierten Vorarbeiten belegt wurde [Hoc12, Sie13, Wag12, Wie10, Wol14], soll mit dem Projekt unter Mitwirkung von KMU und Großunternehmen eine attraktivere und wirtschaftlichere Prozesskette vorwettbewerblich erforscht werden. Ein Schlüssel des Vorhabens ist das unmittelbare Strangpressen von partikelverstärkten Verbundpulvern zur Herstellung von stangenförmigen AMC-Halbzeugen. Auf diesem Weg soll erreicht werden, dass die Werkstoffgruppe auch für viele Anwendungen im Automobilbau als erschwingliche metallische Leichtbaualternative zur Verfügung steht. Zur weiteren Steigerung der Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit wird der Einsatz von Al-Kreislaufmaterial in Form von Al-Grieß ohne energieaufwändige schmelzmetallurgische Zwischenschritte betrachtet. Zudem wird das direkte Recycling von AMC-Materialien evaluiert, um perspektivisch die aufwändig hergestellte Mikrostruktur im Kleinkreislauf wiederverwenden zu können. Die in Abbildung 1 dargestellten Kreislaufroutrouten c) und d) sowie die Nutzung gasverdünster Aluminiumlegierungspulver wurden im Projekt untersucht.

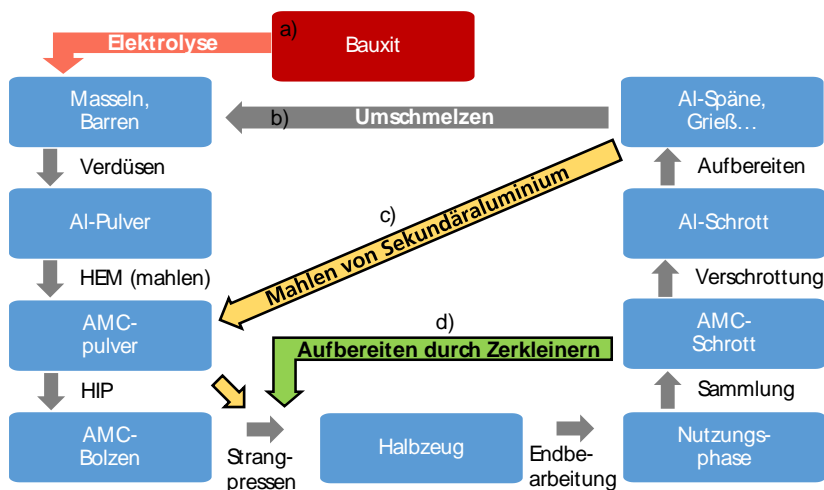


Abbildung 1: Mögliche Lebenszyklen von AMC-Werkstoffen: a) aufwändige Primäraluminiumgewinnung, b) Standard-Al-Recycling (nur 5 % des Energiebedarfs von a) erforderlich), c) verkürzte Herstellung für AMC aus sortenreinem Recyclingmaterial, d) AMC-Werkstoff-Wiederverwendung; (c) und d) werden im Projekt erforscht bzw. evaluiert und bewertet).

Der Werkstoff vereint sehr gute spezifische Festigkeitseigenschaften mit guter Verschleiß- und Korrosionsbeständigkeit. Im Fokus der wissenschaftlich-technischen Betrachtung steht deshalb mit der Substitution eines Kfz-Schwingungsdämpfers aus Stahl durch AMC eine Anwendung, die ein vielseitiges Anforderungsprofil aufweist, obgleich eine Vielzahl von Fahrwerks- oder Antriebstrangteilen zielführend aus den avisierten stangenförmigen Halbzeugen angefertigt werden könnten. Mit der Realisierung einer Komponente in Flugzeugsitzen wird ferner eine Anwendung adressiert, bei der jede Gewichtsreduktion direkt in eine Treibhausgas-minderung umgerechnet werden kann. Fertigungstechnologien wie Schmieden, wärmearmes Fügen und Oberflächenbehandlungen werden gemeinsam mit Industriepartnern erforscht und umgesetzt.

## 2 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

„RePro-AMC“ zielt auf eine ressourcenschonende Prozesskette zur Herstellung von partikelverstärkten Aluminiummatrix-Verbundwerkstoffen ab. Die Struktur der Arbeitspakete sowie die beteiligten Partner aus der Industrie sind in Abbildung 2 dargestellt. Das Vorhaben gliedert sich in sechs Arbeitspakete entlang der gesamten Prozesskette zur Herstellung und Anwendung von Aluminiummatrix-Verbundwerkstoffen (AMC) und das AP7, welches die Dokumentation beinhaltet.

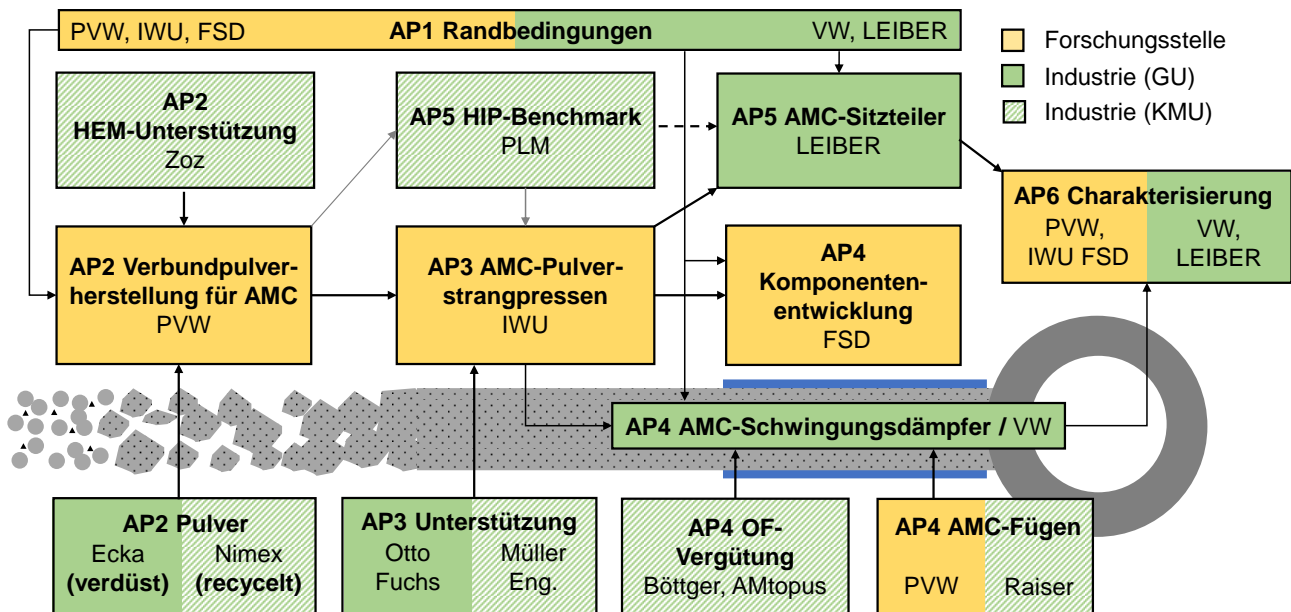


Abbildung 2: Struktur der Arbeitspakete und Zusammenwirken der Forschungseinrichtungen und Industriepartner im Vorhaben.

Nach Festlegung von Randbedingungen (AP1) erfolgte die Herstellung der Verbundpulver mittels Hochenergie-Kugelmahlen (HEM, AP2) und deren Weiterverarbeitung durch indirektes Pulverstrangpressen (AP3) ohne vorheriges heißisostatisches Pressen. Auf Basis dieser Materialentwicklung wurden die Demonstrator-komponenten Schwingungsdämpfer und Sitzstruktur entwickelt und gefertigt (AP4/AP5). Ergänzend wurden Fügeverfahren, Wärmebehandlungen sowie Benchmark-Untersuchungen durchgeführt. Begleitend erfolgte die Charakterisierung und Bewertung der hergestellten Werkstoffe im Rahmen von AP6.

Im Projekt werden zwei Leitdemonstratoren aus unterschiedlichen Branchen vorgesehen, an denen die Ergebnisse des Projektes erarbeitet und aufgezeigt werden.

- 1) Schwingungsdämpfer - Automobil
- 2) Sitzstruktur - Flugzeug

### 2.1 Arbeitspaket 1: Randbedingungen hinsichtlich der Demonstratorfertigung (FE1, FE2, FE3)

#### Durchgeführte Arbeiten

**Anforderungen an Demonstratorbauteile:** Gemeinsam mit den potenziellen Endanwendern der Demonstratoren, der Sitzstruktur (Leiber) und des Automobildämpfers (VW) wurden geeignete Zielkomponenten mit Substitutionspotenzial identifiziert. Darüber hinaus wurden die relevanten Randbedingungen für Werkstoffe, mechanische Kennwerte und die Geometrie festgelegt. Die Ergebnisse wurden in einem Lastenheft dokumentiert. Im nächsten Schritt wurden die von VW bereitgestellten Zweirohrdämpfer des Typs

1EA.513.049.AH demontiert und die einzelnen Komponenten hinsichtlich ihrer Eigenschaften untersucht. Zusätzlich wurden zwei Dämpfer im Originalzustand auf einem Prüfstand der FE3 vermessen. Die dabei ermittelten Kennwerte dienen als Referenz zur Bewertung der Eigenschaften der im Projekt entwickelten AMC-Komponenten.

**Werkstoffauswahl – Matrix- und Verstärkungskomponente:** In Abstimmung mit dem Projektausschuss (PA) wurde die Aluminiumlegierung EN AW-6082 als primäre Matrixlegierung zur Herstellung der AMC-Bauteile festgelegt. Das Material wurde von der Firma Ecka Granules Germany GmbH als Sachleistung bereitgestellt. Die chemische Zusammensetzung der Legierung wurde unter Berücksichtigung der Anforderungen der Fa. Leiber sowie auf Basis eigener werkstofftechnischer Erfahrungen angepasst. Insbesondere wurde ein geringer Eisengehalt angestrebt, um die Bildung spröder intermetallischer Fe-Al-Phasen im AMC zu vermeiden. Insgesamt wurden 100 kg der angepassten Legierung von Ecka hergestellt. Der Verkaufspreis dieser Legierung liegt im Bereich von ca. 30 €/kg.

Darüber hinaus wurde gemeinsam mit dem PA-Mitglied Nimex NE-Metall GmbH ein Rezyklatwerkstoff ausgewählt (MN4131 bzw. MN4142), der im Rahmen des Projekts als kostengünstiger Matrixwerkstoff (ca. 3 €/kg) für AMC untersucht werden soll. Ziel ist die Evaluierung der mechanischen Eigenschaften im Hinblick auf das Potenzial zur Kostensenkung. Die als Sachleistung bereitgestellten Pulver EN AW-6082 (gasverdüst) sowie die Al-Griese MN4131 bzw. MN4142 (Rezyklatwerkstoffe) wurden anschließend werkstofftechnisch analysiert.

Als Verstärkungskomponente wurden Siliziumkarbid-Partikel ( $\text{SiC}_p$ ) der Fa. ESK-SIC GmbH mit den Bezeichnungen SINSIC15 und SINSIC25 (Abbildung 3) ausgewählt. Die Partikel liegen in einer  $\mu\text{m}$ -skaligen Variante ( $D_{50} < 1 \mu\text{m}$ ) vor und wurden bereits in Vorgängerprojekten und -arbeiten erfolgreich eingesetzt [Gas24].

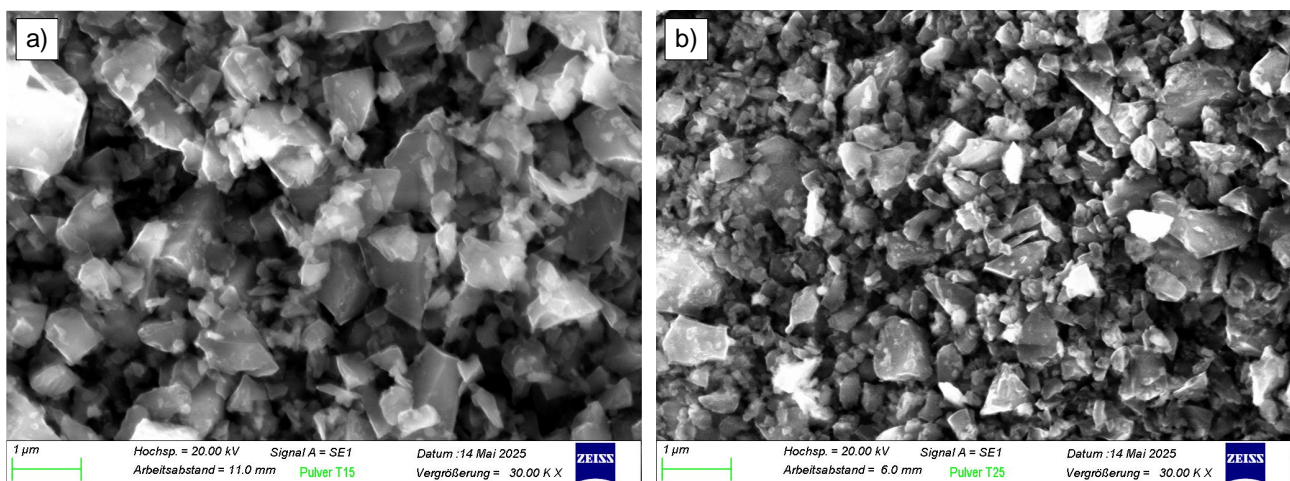


Abbildung 3: REM-Aufnahmen (SE-Bild) der Verstärkungskomponenten  $\text{SiC}_p$ : a) SINSIC15; b) SINSIC25.

### Erzielte Ergebnisse:

**Anforderungen an Demonstratorbauteile:** Bestimmte Werkstoffkennwerte wurden in einer Diskussion mit dem PA eingegrenzt und in einem Lastenheft fixiert. Das formulierte Ziel der Firma Leiber ist es, mit einer partikelverstärkten Legierung EN AW-6082 ausgewählte Kennwerte der aktuell eingesetzten Legierungen EN AW-2024 oder EN AW-7175 zu erreichen (Tabelle 1). Die Menge des Verstärkungsanteils unterliegt keiner Beschränkung und kann von den FEs nach Bedarf gewählt werden. Als zentrale Forderung sollte jedoch eine

Bruchdehnung von min. 7 % im Material vorhanden sein. Eine Steigerung des E-Moduls ist aufgrund der Partikel zu erwarten und wurde auf größer 80 GPa adressiert.

Tabelle 1: Material- und Geometriekenngrößen für den Demonstrator Flugzeugsitzstruktur.

Abstimmungsgegenstand		Ziel - RePro-AMC	Referenz (Leiber)	
Basislegierung		EN AW-6082	EN AW-2024	EN AW-7175
Verstärkungspartikel		SiC <sub>p</sub> – nach Bedarf	-	-
Streckgrenze R <sub>p0.2</sub>	MPa	425	290	425
Zugfestigkeit R <sub>m</sub>	MPa	490	430	490
Bruchdehnung	%	> 7	8	7
E-Modul	GPa	> 80	72	72
Wärmebehandlung		T6 oder T4	T4	T73 oder T47
Oberfläche		Hart-Eloxal	Natur-Eloxal	
Bolzendurchmesser	mm	26...38		
Bolzenlänge	mm	400...637		

**Dämpferanalyse:** Im Austausch mit der Volkswagen AG wurde abweichend von der ursprünglichen Planung ein Zweirohrdämpfer für die Demonstration der AMC-Vorteile ausgewählt. Die Auswahl erfolgt vor dem Hintergrund, dass die Volkswagen AG für zukünftige Fahrzeugprojekte bevorzugt diese Konstruktionsweise einsetzt. Das ursprünglich formulierte Ziel, die Bauteile Kolbenstange und Behälterrohr aus den neuartigen AMC zu fertigen, bleibt jedoch bestehen. Mit der VW AG wurde als Sachleistung die Bereitstellung von Zweirohrdämpfern für Referenzversuche am Hydropulsprüfstand, sowie Werkstoffprüfungen vereinbart. Mithilfe dieser Referenzdämpfer werden alle Funktionsmaße für die Herstellung des AMC-Dämpfer-Demonstrators definiert.



Abbildung 4: Demontierter Abstimmtdämpfer vom Typ 1EA.513.049.AH der VW AG; Beschriftete Bauteile mit hohem Substitutionspotenzial, Masse des Bauteils in kg | Prozentualer Anteil an der Gesamtmasse des Dämpfers.

Neben der Kolbenstange und dem Außen- und Innenrohr bietet das Dichtungs-Führungs-Element (D-F-Element) des Dämpfers eine dritte sinnvolle Möglichkeit zur Substitution durch ein AMC-Bauteil (Abbildung 4). Der Anteil an der Gesamtmasse beträgt 6 %. Die Herstellung lässt sich mit dem AMC-Pulver über das feldunterstützte Sintern bzw. Spark Plasma Sintern (FAST/SPS) an der FE1 realisieren. Dieser Umfang wurde ursprünglich im Antrag nicht explizit vorgesehen und erst aufgrund der ausführlichen Dämpferanalyse als sinnvolle Ergänzung identifiziert. Der PA hat dieser Erweiterung zugestimmt.

Die werkstofftechnische Analyse der Dämpferkomponenten ergab, dass die Kolbenstange einen Nenndurchmesser von 18 mm hat und aus einem thermochemisch behandelten und einsatzgehärteten Stahl mit einer Hartchromschicht besteht (Abbildung 5), die eine Oberflächenrauheit von  $R_a = 0,042 \mu\text{m}$  aufweist. Diese hohe Oberflächengüte wird durch ein Superfinish erreicht. Die Härte der ca. 15  $\mu\text{m}$  dicken Hartchromschicht erreicht bei der Mikrohärtemessung Werte von über 1000 HV0,03. Das Innenrohr mit einem Außendurchmesser von 38 mm hat eine Wandstärke von 0,886 mm und ist weniger anspruchsvoll hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften und der Oberflächengüte. Querschliffe der beiden Komponenten sowie das Spannungs-Dehnungs-Verhalten von entnommenen Zugproben aus den Werkstoffen sind in Abbildung 5 dargestellt.

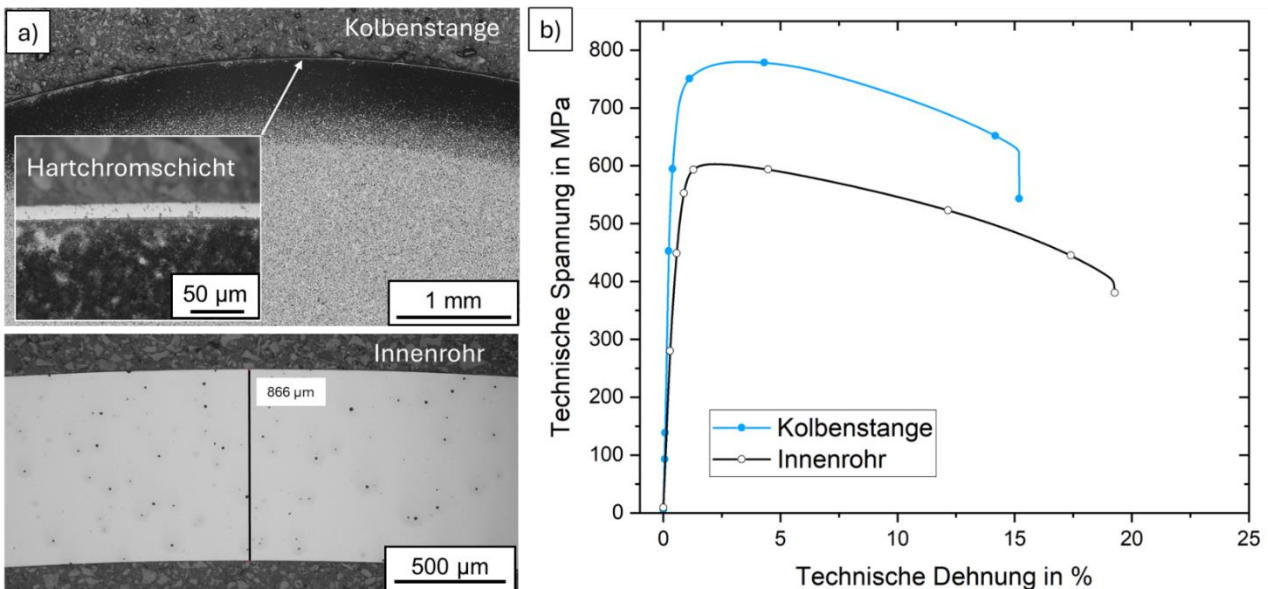


Abbildung 5: Referenzkomponenten Kolbenstange und Innenrohr: a) Lichtmikroskopischer Querschliff; b) Spannungs-Dehnungs-Kurven aus Zugversuchen zur Ermittlung der mechanischen Eigenschaften.

Die Details der ermittelten Werkstoff- und Oberflächenkennwerte sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Die Kolbenstange weist mit einer Zugfestigkeit von 780 MPa, einer Streckgrenze von 677 MPa und einer Bruchdehnung von 12,7 % ein hohes Festigkeitsniveau auf. Das Innenrohr erreicht eine Zugfestigkeit von 601 MPa bei einer Streckgrenze von 525 MPa und einer Bruchdehnung von 18,6 %. Im Vergleich zur Kolbenstange besitzt das Innenrohr eine geringere Festigkeit bei höherer Duktilität.

Tabelle 2: Werkstoff- und Oberflächenkennwerte der Dämpferkomponenten (Kolbenstange und Innenrohr).

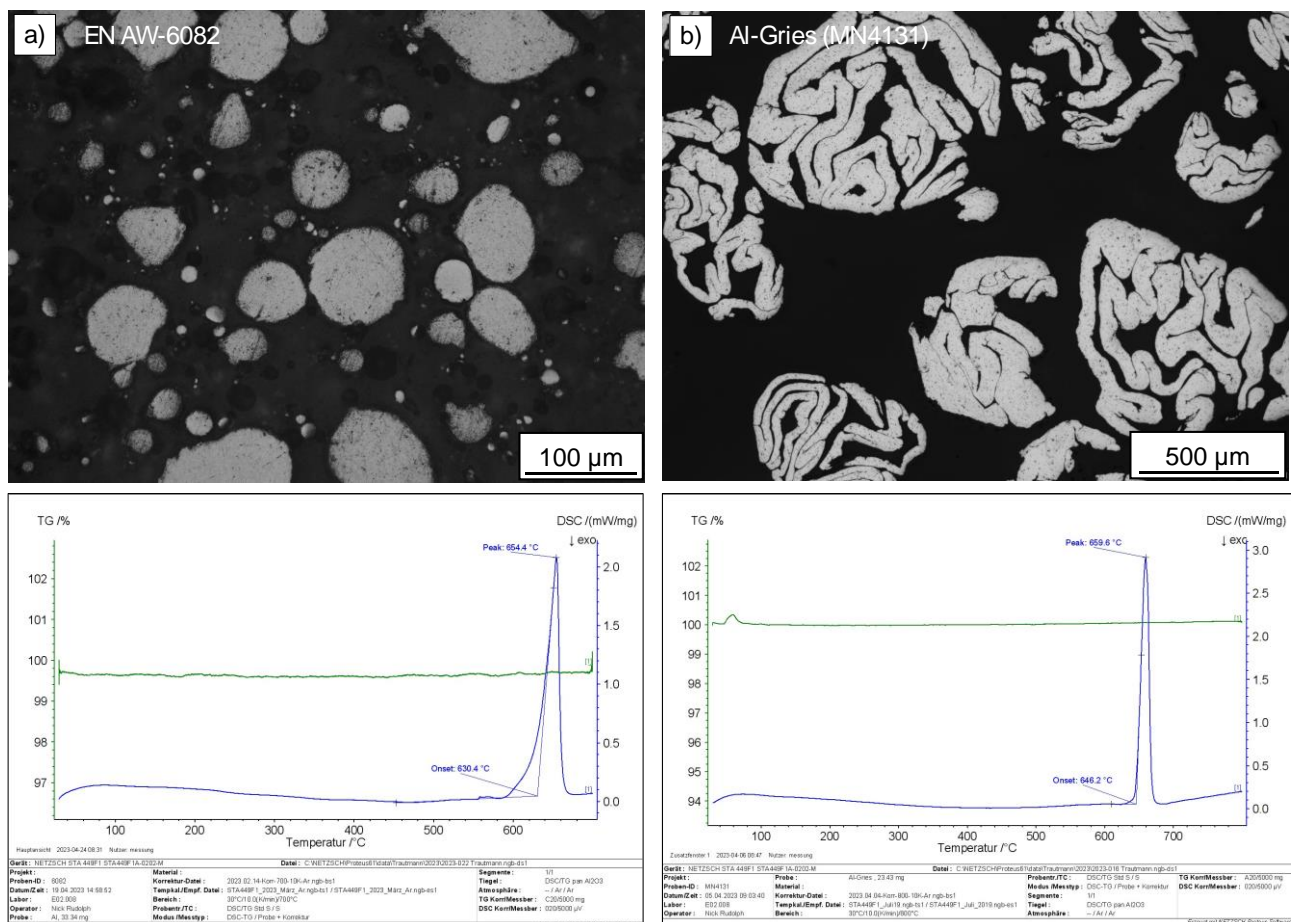
Komponente	Rauheit		Mechanische Eigenschaften			Härte HV
	$R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	$R_z$ ( $\mu\text{m}$ )	$R_m$ (MPa)	$R_{p0,2}$ (MPa)	$e_B$ (%)	
Kolbenstange (Kern)	-	-	780	677	12,7	240 HV1
Hartchromschicht ca. 15 $\mu\text{m}$	0,042	0,42	-	-	-	1053 HV0,03
Innenrohr	0,17	1,83	601	525	18,6	205 HV1

**Werkstoffauswahl – Matrix- und Verstärkungskomponente:** Das Legierungspulver EN AW-6082 hat nach den Laboruntersuchungen der Fa. Ecka Granules GmbH die gewünschte chemische Zusammensetzung (Tabelle 3) und eine relativ breite Korngrößenverteilung von  $D_{50} = 44,2 \mu\text{m}$ ,  $D_{10} = 14,2 \mu\text{m}$  und  $D_{90} = 89,7 \mu\text{m}$ . Lichtmikroskopische Untersuchung des Pulvers belegen die weite Spreizung der größtenteils runden Pulverteilchen. Mit der thermischen Analyse kann der beginnende Schmelzvorgang bei  $630 \text{ }^\circ\text{C}$  identifiziert werden. Das Maximum des endothermen Peaks liegt bei etwa  $654 \text{ }^\circ\text{C}$  (Abbildung 6a).

Die Rezyklate MN4131 und MN4142 bestehen aus aufbereitetem Folienmaterial, welche über mehrere Schritte der Zerkleinerung, thermischen Reinigung und Einförmung zu kleinen Kugeln (Gries) verarbeitet werden (Abbildung 6b). Die chemische Zusammensetzung des Materials entspricht einer Al-Legierung aus der 8000er-Reihe und weist einen erhöhten Fe-Gehalt auf (Tabelle 3). Das Al-Gries hat einen Durchmesser von ca.  $200 \mu\text{m}$ . Die thermische Analyse des Rezyklats MN4131 zeigt einen beginnenden Schmelzvorgang bei  $646 \text{ }^\circ\text{C}$ . Das Maximum des endothermen Peaks liegt bei etwa  $660 \text{ }^\circ\text{C}$ .

*Tabelle 3: Chemische Zusammensetzung des gasverdünsten Pulvers EN AW-6082 und des Al-Gries MN4131 für AMCs (Angaben in Gew.-%); Werte aus optischer Emissionsspektrometernalyse SPECTROMAXx.*

Bez.	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
EN AW-6082	1,10	0,94	<0,05	0,81	0,94	0,02	<0,01	<0,01	Rest
MN4131	0,18	1,24	<0,05	0,12	0,05	0,002	<0,01	0,11	Rest



**Abbildung 6: Matrixpulver für AMC: Lichtmikroskopische Aufnahme (oben); Thermische Analyse (unten): a) Gasverdünstes Legierungspulver EN AW-6082; b) Al-Rezyklat MN4131.**

## 2.2 Arbeitspaket 2: Herstellung von mechanisch dispergiertem AMC-Verbundpulver (FE1, FE2)

### Durchgeführte Arbeiten:

**Basis EN AW-6061:** Im Rahmen des Projektes erfolgen zu Beginn Vorversuche mit der Leg. AW-6061 und SiC<sub>p</sub>, um erste Erfahrungen in der Verarbeitung einer 6000er-Legierung beim HE-Mahlen zu sammeln und die Zeit bis zur Lieferung der vereinbarten Ziellegierung sinnvoll zu überbrücken. Sämtliche Mahlversuche erfolgten bei FE1 in einer Hochenergie-Kugelmühle Simoloyer CM08<sup>1</sup> der Fa. Zoz GmbH mit einer Pulvermenge von je 800 g. Die Leg. EN AW-6061 wurde mit 10 Vol.-% SiC<sub>p</sub> verarbeitet. Das SiC, das als Partikelverstärkung dient, stammt von der Fa. ESK-SiC und hat eine mittlere Größe von D<sub>50</sub><1 µm. SiC<sub>p</sub> wurden auf Basis der Vorarbeiten an der FE1 als bevorzugte Verstärkungsphase ausgewählt. SiC weist eine hohe Härte und Steifigkeit auf, was eine deutliche Verbesserung der mechanischen und tribologischen Eigenschaften des AMCs ermöglicht. Darüber hinaus weist SiC eine gute Kompatibilität mit Aluminium auf und führt aufgrund des unterschiedlichen Wärmeausdehnungsverhaltens zu zusätzlichen Verfestigungseffekten im Verbundwerkstoff. Während der Mahlung werden stündlich Proben entnommen, aus denen Pulverschleife hergestellt werden, die zur Bewertung der Partikelverteilung und der Pulvergröße dienen. Dieses Vorgehen ist an der FE1 seit vielen Jahren erprobt und dient der Entwicklung eines geeigneten Mahlrezeptes [Nes11, Tra22]. Ein besonderer Fokus liegt auf der Mahldauer und der Zugabe und Dosierung eines Prozesshilfsstoffes (PCA), der das Mahlergebnis und die Pulvergröße stark beeinflusst. Im Rahmen des Projektes wird Stearinsäure als PCA verwendet.

**Basis EN AW-6082:** Das gasverdünste Pulver EN AW-6082 wurde auf Basis der Erkenntnisse von Vorversuchen mit der Leg. EN AW-6061 mit 10 Vol.-% SiC<sub>p</sub> für 4 Stunden gemahlen (Rezept: HEM288a) und davon Pulverschleife zu verschiedenen Zeiten angefertigt. Basierend auf diesen Ergebnissen wurde für das neue Matrixpulver ein statistischer Versuchsplan (DoE1) mit der Software Cornerstone 8.0 von Camline erstellt, welcher die Einflussgrößen SiC<sub>p</sub>-Anteil, Mahldauer und Mahlatmosphäre beinhaltet (Tabelle 4).

Tabelle 4: DoE1 für das HEM mit der Legierung EN AW-6082 + SiC<sub>p</sub> (Mahlrezept: HEM288a).

Bez.	SiC (Vol.-%)	Mahldauer (h)	Atmosphäre
V1	5	6	Restluft
V2	15	4	Restluft
V3	15	2	Ar
V4	10	6	Ar
V5	10	2	Ar
V6	5	4	Ar
V7	10	2	Restluft
V8	5	4	Ar
V9	10	4	Restluft
V10	15	6	Ar
V11	5	2	Restluft

Die Zielgrößen des DoE1 fokussieren sich auf die mechanischen Eigenschaften (Härte, Streckgrenze, Zugfestigkeit und Bruchdehnung) der aus diesen Pulvern hergestellten stranggepressten AMCs (vgl. AP3). Für diese Varianten (V1-V11) erfolgten Mahlversuche in der Hochenergie-Kugelmühle Simoloyer CM08 mit Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-Rotor und ZrO<sub>2</sub>-Kugeln. Es wurden Pulverschleife der Endzustände angefertigt. Im weiteren Verlauf des Projekts

<sup>1</sup> <https://gmbh.zoz.de/simoloyer-cm08/>

wurden aus der Vorzugsvariante V10 des DoE1 insgesamt 6 kg gemahlen, um daraus Halbzeuge für die Komponentenfertigung der Kolbenstange bereitzustellen. Während des Mahlens kam es zu größeren Verunreinigungen, deren Quelle im Laufe des Vorhabens identifiziert werden konnte. Es wurden der Mahlhilfsstoff und die Verstärkungskomponente SiC<sub>p</sub> ausgetauscht.

**Basis Al-Gries:** Neben dem gasverdüsterten Pulver wurde das Recyclinggries der Fa. Nimex NE-Metall GmbH (MN4131) als Ausgangswerkstoff für die AMC-Herstellung untersucht. Es wurden initiale Mahlversuche mit 10 Vol.-% SiC<sub>p</sub> (Rezept: HEM295) durchgeführt und darauf aufbauend ein statistischer Versuchsplan mit konstantem SiC<sub>p</sub>-Gehalt von 10 Vol.-% entworfen (DoE2), Tabelle 5. Die Zielgrößen des DoE2 beinhalten Ausmahlmenge, Härte im Pulver, Härte im Strang, sowie die mech. Eigenschaften (Streckgrenze, Zugfestigkeit und Bruchdehnung). Für diese 10 Varianten wurden die HE-Mahlversuche in der Mühle Simoloyer CM08 mit Stahlrotor durchgeführt. Der ohnehin hohe Fe-Gehalt der Legierung rechtfertigt nicht die Verwendung von keramischen Mahlwerkzeugen. Es wurden Pulverschliffe der Endzustände angefertigt. Auf Basis der positiven Ergebnisse wurde ein weiterer Versuchsplan (DoE3) mit dem Al-Gries MN4142 aufgestellt, welcher auch die Variation des SiC<sub>p</sub>-Gehalts zwischen 5 und 20 Vol.-% beinhaltet, sowie die Betrachtung der Mahldauer zwischen 2 und 8 h vorsieht, Tabelle 6. Die Zielgrößen des DoE3 waren die mechanischen Eigenschaften (Streckgrenze, Zugfestigkeit und Bruchdehnung).

Sämtliche Pulver wurden nach dem Mahlen einem Heißentgasungsprozess im Rohofen unterzogen (530 °C für 4 h im Vakuum bei 1·10<sup>-2</sup> MPa). Dieser Schritt ist erforderlich, um die Stearinsäure zu entfernen und damit die Konsolidierung der Pulver zu ermöglichen.

*Tabelle 5: DoE2 für das HEM mit dem Al-Gries MN4131 + 10 Vol.-% SiC<sub>p</sub> (Mahlrezept: HEM295).*

Bez.	Mahl-dauer (h)	PCA-Gehalt (g/30min)	Atmo-sphäre	Drehzahl (min <sup>-1</sup> )
295a	1	1,25	Restluft	600/400
295b	3,5	0,5	Restluft	600/400
295c	6	0,5	Restluft	600/400
295d	1	2	Restluft	600/400
295e	6	2	Argon	600/400
295f	1	0,5	Argon	500
295g	3,5	2	Restluft	500
295h	3,5	1,25	Argon	600/400
295i	3,5	1,25	Argon	500
295k	6	1,25	Restluft	500

*Tabelle 6: DoE3 für das HEM mit dem Al-Gries MN4142 + SiC<sub>p</sub> (Mahlrezept: HEM304).*

Bez.	SiC <sub>p</sub> -Gehalt (Vol.-%)	Mahl-dauer (h)
DoE3_1	5	5
DoE3_2	12,5	2
DoE3_3	5	2
DoE3_4	20	2
DoE3_5	12,5	8
DoE3_6	20	5
DoE3_7	20	2
DoE3_8	20	8
DoE3_9	5	8
DoE3_10	12,5	8

**Verbundpulver für Demonstratoren:** Auf Basis der Versuchspläne wurden Mahlrezepte festgelegt (Tabelle 7), welche für die Bereitstellung größerer Mengen an Pulver genutzt wurden und der Realisierung der in AP1 festgelegten Komponenten, wie Kolbenstange (AP4), Rohr, Dichtungs-Führungs-Element und Schmiedeteil (AP5) dienen. Am Projektende wurden durch das PA-Mitglied Zoz GmbH für die Demonstratorfertigung 5 kg Verbundpulver auf Basis von HEM297neu hergestellt.

Tabelle 7: Mahlrezepte für AMC-Komponenten.

Komponente	Rezept	SiC <sub>p</sub> -Gehalt (Vol.-%)	Mahldauer (h)	Menge / Mahlungen
Kolbenstange	HEM297 (neu)	15	6	10 kg (15 Chargen)
Rohr	HEM303	10	6	2 kg (3 Chargen)
D-F-Element	HEM308	20	6	1 kg (2 Chargen)
Schmiedeteil	HEM308	20	6	7 kg (12 Chargen)

### Erzielte Ergebnisse:

**Basis EN AW-6061:** Die ersten Mahlversuche (Rezept: HEM252c) mit der Leg. EN AW-6061 zeigen, dass es bereits nach einer Mahldauer von einer Stunde zur Vergrößerung bei gleichzeitiger Einarbeitung der SiC<sub>p</sub>-Verstärkungspartikel kommt, Abbildung 7a. Eine annähernd gleichmäßige Verteilung der SiC<sub>p</sub> mit einem geringen Anteil unverstärkter Bereiche wird nach 3 h erreicht. Die Zugabe von Stearinsäure als PCA beträgt 1,5 g/30 min. Das Rezept dient als Basis für die Übertragung auf die Ziellegierung.

**Basis EN AW-6082:** Bei der Übertragung des Mahlrezeptes HEM252c auf die Legierung EN AW-6082 mit 10 Vol.-% SiC<sub>p</sub> (HEM288a) zeigt sich ein ähnliches SiC<sub>p</sub>-Partikelverteilungsbild und es findet ebenso eine Vergrößerung des Pulvers statt. Nach 4 h ist eine gute Verteilung der SiC<sub>p</sub> im Matrixpulver erreicht, jedoch sind noch geringe unverstärkte Bereiche erkennbar, Abbildung 7b. Für die Untersuchungen im DoE1 wird deshalb eine Höchstmahldauer von 6 h festgelegt, um eine noch bessere Dispersion der keramischen Teilchen zu erreichen. Die Mahldauer ist aus wirtschaftlichen und ökologischen Gründen so kurz wie möglich zu wählen. Die Zugabe der Stearinsäure als PCA beträgt 1,5 g/30 min. Das Rezept HEM 288a dient als Basis für die Umsetzung des Versuchsplans DoE1.

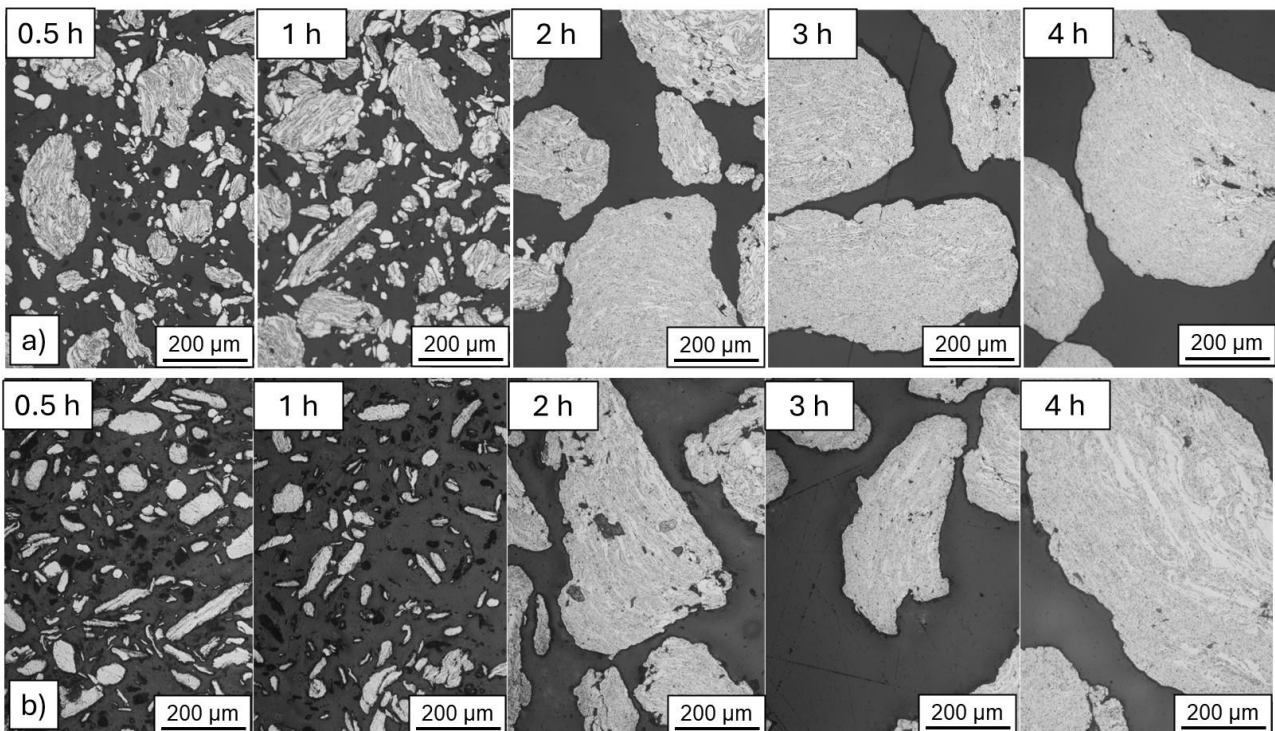


Abbildung 7: Pulverschliffe nach dem HE-Mahlen bei verschiedenen Mahldauern: a) EN AW-6061 + 10 Vol.-% SiC<sub>p</sub> (HEM252c); b) EN AW-6082 + 10 Vol.-% SiC<sub>p</sub> (HEM 288a).

Das Rezept HEM288a wurde als Basis für die Durchführung des DoE1 verwendet und darauf aufbauend wurde entschieden, die Mahldauern bis 6 h zu untersuchen. Die Endzustände der Pulver aus den 11 Versuchen (vgl. Tabelle 4) sind in Abbildung 8 dargestellt.

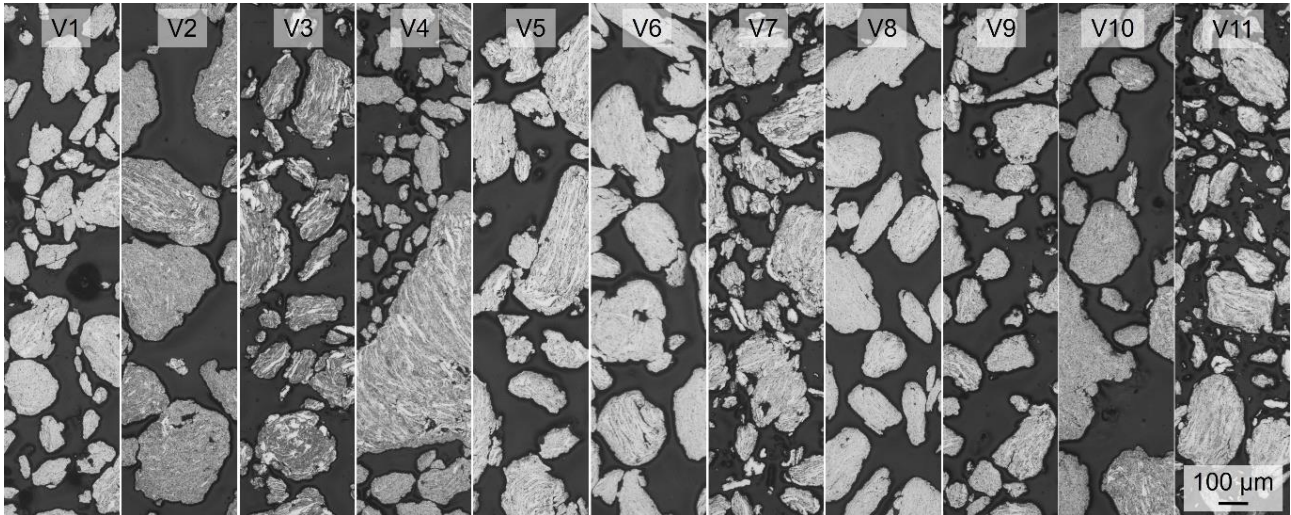


Abbildung 8: Pulverschiffe der Endzustände aus dem DoE1 für EN AW-6082 + SiC<sub>p</sub> (Mahlrezept HEM 288a).

**Basis Al-Gries:** Die Verarbeitung des Al-Gries im HE-Mahlprozess erwies sich als unproblematisch. Trotz der verhältnismäßig großen folienartig eingerollten Schnipsel werden diese bereits nach kurzer Mahldauer von 3 h zu kompakten Pulvern mit lamellarer SiC<sub>p</sub>-Anordnung ausgeformt. Nach 6 h Mahldauer konnte eine sehr homogene Verteilung der Partikel beobachtet werden (Abbildung 9).

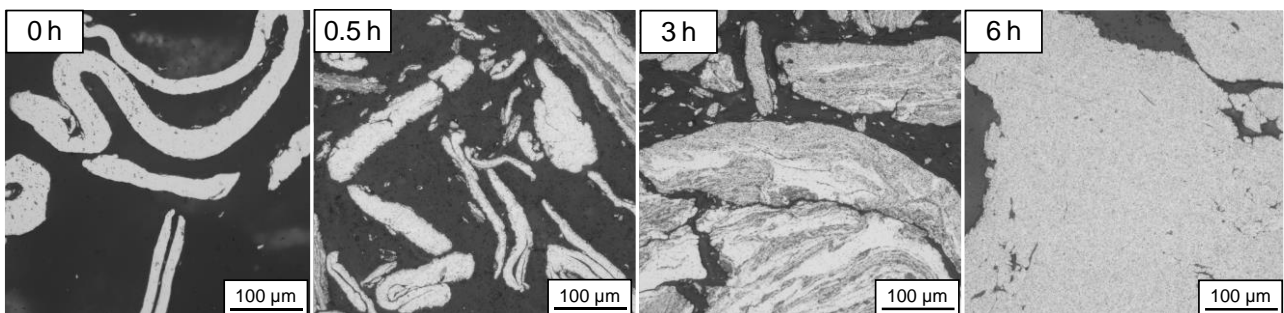


Abbildung 9: Pulverschiffe des Ausgangsmaterials und HEM295 nach 30 min, 3 h und 6 h Mahldauer (Al-Gries: MN4131 mit 10 Vol.-% SiC<sub>p</sub>).

Die partikelverstärkten Griesen konnten entsprechend des Versuchsplans DoE2 erfolgreich im HE-Mahlprozess verarbeitet werden. Die Endzustände der Pulver sind in Abbildung 10 dargestellt und weisen erwartungsgemäß Unterschiede in der Homogenität der SiC<sub>p</sub>-Verteilung auf. Insgesamt wurden ca. 1,5 kg jeder Variante an die FE2 zum Strangpressen übergeben und in AP3 weiterführend untersucht. Als Zielgrößen des Mahlprozesses wurden zu diesem Zeitpunkt die Ausmahlmenge sowie die Pulverhärte betrachtet.

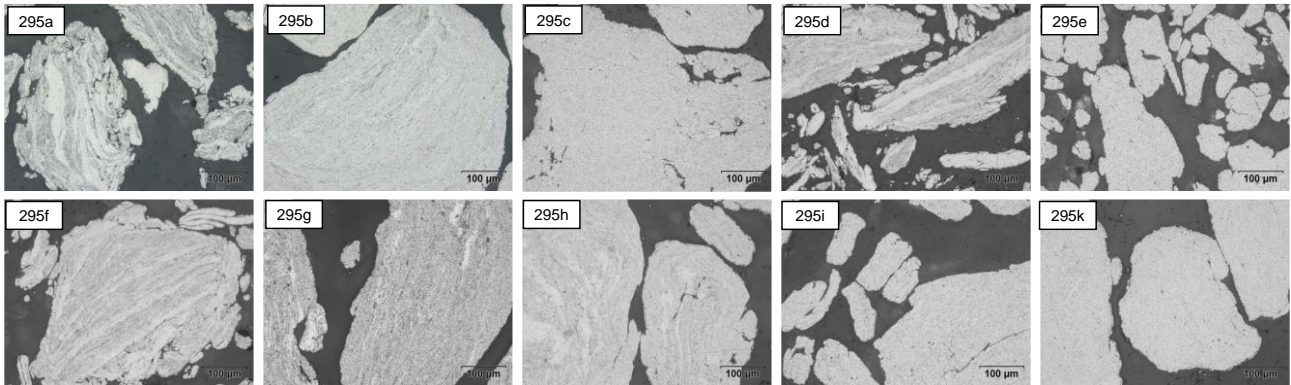


Abbildung 10: Pulverschiffe der Endzustände aus dem statistischen Versuchsplan DoE2 mit Al-Gries + 10 Vol.-% SiC<sub>p</sub>.

Das auf Basis der DoE-Auswertung erstellte lineare Regressionsmodell mit Zweifach-Wechselwirkungen liefert nachvollziehbare Vorhersagen hinsichtlich des Einflusses der Prozessparameter auf beide Zielgrößen (Abbildung 11). Die statistische Auswertung zeigt, dass die Pulverhärte (HV1) im Wesentlichen durch die Mahldauer beeinflusst wird, während die übrigen Prozessparameter keinen signifikanten Einfluss aufweisen. Mit zunehmender Mahldauer nimmt der Ausmahlverlust deutlich zu. Ursache hierfür sind Anhaftungen der Pulver an Mahlkugeln, Rotor und Behälterwand sowie die im Verlauf der Untersuchungen entnommenen Probenmengen. Gleichzeitig führt die längere Mahldauer zu einer verbesserten Homogenisierung und Verfestigung des Pulvers, was sich in einer kontinuierlichen Erhöhung der Pulverhärte widerspiegelt. Eine Erhöhung des PCA-Gehalts führt ebenfalls zu einem geringen Ausmahlverlust. Dies ist auf die Wirkung der Stearinsäure zurückzuführen, welche die Kaltverschweißung der Pulverpartikel reduziert und dadurch die Pulverrückgewinnung verbessert. Darüber hinaus zeigen die Ergebnisse, dass eine Mahlung unter Restluft sowie die alternierende Rotordrehzahl (5 min bei 600 min<sup>-1</sup> und 5 min bei 400 min<sup>-1</sup>) den Ausmahlverlust zusätzlich positiv beeinflussen. Der geringste Ausmahlverlust (21 g) bei gleichzeitig hoher Härte wird mit 6 Stunden Mahldauer, erhöhtem PCA-Gehalt von 2 g/30 min, Restluft und alternierender Rotordrehzahl erreicht (Abbildung 11). Das Regressionsmodell hat eine hohe Güte mit einem korrigierten Bestimmtheitsmaß von 0,932 für die Härte und 0,993 für den Ausmahlverlust.

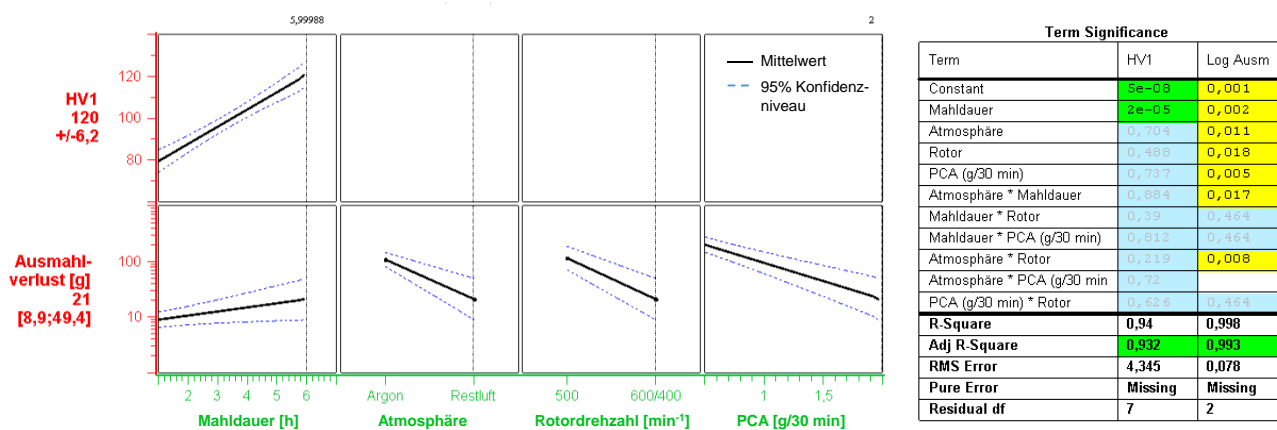


Abbildung 11: a) Vorhersagediagramm mit Optimierung auf maximale Härte und minimalen Ausmahlverlust (links) und b) Signifikanzwerte des Regressionsmodells für Pulverhärte und Ausmahlverlust beim HE-Mahlen von DoE2.

Die Mahlversuche des DoE3, bei dem der SiC<sub>p</sub>-Gehalt, sowie der Haupteffekt Mahldauer eingehender untersucht wurde, konnten erfolgreich realisiert werden und es wurden jeweils 1,5 kg von jeder Variante an FE2 zum Strangpressen übergeben. Am Beispiel der Variante DoE3\_8 mit 20 Vol.-% SiC<sub>p</sub> und einer Mahldauer von 8 h ist die hohe Dynamik des Prozesses bereits nach kurzer Mahldauer sichtbar. Die ursprünglichen

Folienkugeln werden nach 1 h zu Flakes und bereits nach 2 h zu einem globular-blockförmigen Pulver umgeformt. Die weitere Mahldauer sorgt vor allem für eine stetige Homogenisierung der Partikelverteilung, wenngleich auch nach 8 h noch kleine unverstärkte Bereiche erkennbar sind, Abbildung 12.

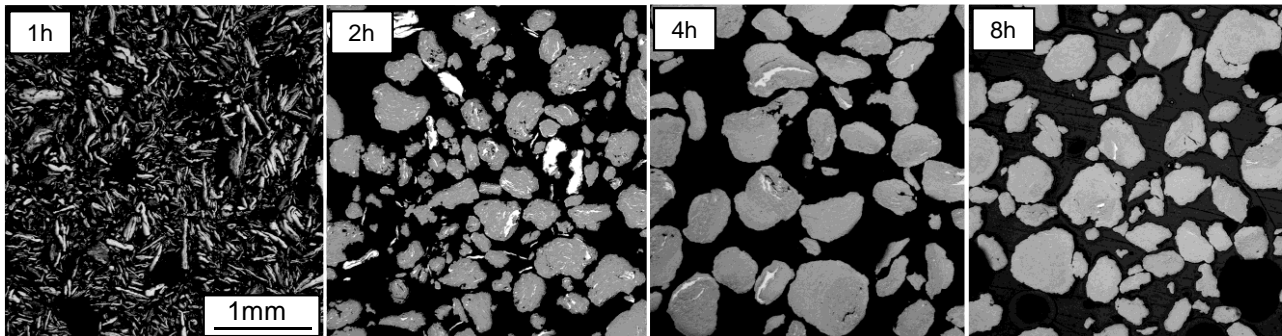


Abbildung 12: Pulverschleife der Variante 8 des DoE3\_8 zu verschiedenen Mahldauern (Al-Gries + 20 Vol.-% SiC<sub>p</sub>).

### 2.3 Arbeitspaket 3: Strangpressen von AMC-Verbundpulvern (FE2, FE1)

#### Durchgeführte Arbeiten:

Alle im Folgenden beschriebenen Pressversuche wurden auf einer indirekten NE-Strangpresse (Müller Engineering GmbH & Co. KG, Sand/Todtenweis) mit einem Rezipientendurchmesser von 100 mm, einer Rezipientenlänge von 560 mm und einer Maximalkraft von 6,3 MN durchgeführt. Das Prinzip des indirekten Pulverstrangpressens, wie es bei der FE2 durchgeführt wird, ist in Abbildung 13 veranschaulicht. Ein zentrales Projektziel bestand darin, das Kompaktieren der Verbundpulver direkt durch Strangpressen zu realisieren. Die frühe Projektphase – bis zur Lieferung der Ziellegerung – wurde genutzt, um Vorversuche mit verfügbaren Legierungen durchzuführen.

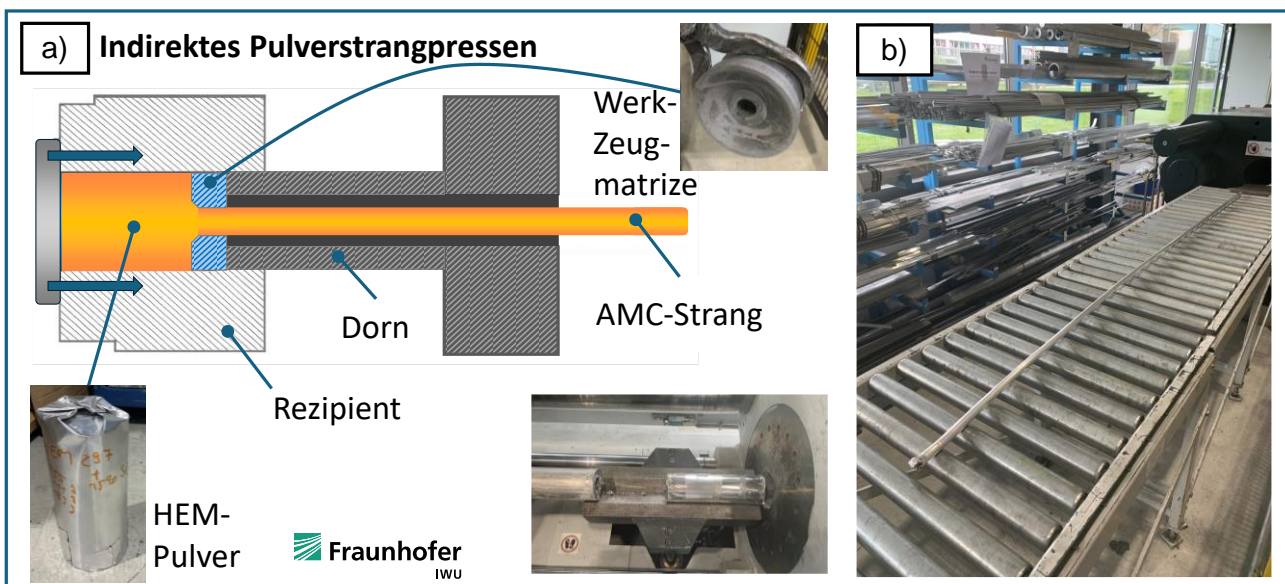


Abbildung 13: Indirektes Pulverstrangpressen vom AMC: a) Schematische Darstellung, b) AMC-Strang im Auslauf.

Zunächst wurde die aus dem SFB 692 gut bekannte Legierung EN AW-2017 unverstärkt verarbeitet, gefolgt von Versuchen mit EN AW-6061, bevor der Fokus auf die gemeinsam mit den PA-Partnern ausgewählte

Ziellegierung EN AW-6082 sowie das Rezyklat Al-Gries gelegt wurde. Um die Verarbeitung der Pulver ohne vorgelagerte Vorkompaktierung zu ermöglichen, wurden Kartuschen aus Aluminiumfolie (Wandstärke 120  $\mu\text{m}$ ) als Kapselmaterial eingesetzt. Die dünnwandigen Aluminiumkartuschen halten das Pulver sicher im Rezipienten, wirken beim Pressen nicht als störende Fremdphase und verhalten sich im Idealfall mit dem Halbzeug kompatibel. Die Versuchsreihen dienen der schrittweisen Validierung des Direktkonsolidierungsansatzes: von risikoarmen Vorversuchen auf bekannter Legierungsbasis über Übergangsversuche mit der verfügbaren 6xxxer-Legierung bis hin zur finalen Validierung an der abgestimmten Ziellegierung EN AW-6082. Die gewonnenen Erkenntnisse fließen in die Ableitung eines belastbaren Prozessfensters für Konsolidierung, Gefügeausbildung und mechanische Kennwerte ein.

**Basis EN-AW-2017:** Stichversuche zum Strangpressen direkt aus Pulvern ohne Vorverdichtung wurden in einer sehr frühen Projektphase an der unverstärkten Legierung EN AW-2017 durchgeführt. Dabei wurden insbesondere Pressverhältnis (Verhältnis der Halbzeug-Querschnittsflächen vor und nach dem Strangpressen<sup>2</sup>) und Pressgeschwindigkeit variiert, um die Machbarkeit des Strangpressens ohne übliche Vorverdichtung zu erproben.

**Basis EN AW-6061:** Einzelversuche zur Übertragung des Verfahrens auf EN AW-6061 wurden durchgeführt; diese Versuche umfassten sowohl die unverstärkte Legierung als auch Varianten mit SiC-Partikeln. Die Legierung EN AW-6082 stand zu Beginn nicht durchgängig zur Verfügung und wurde erst später in Versuchen eingesetzt.

**Basis EN AW-6082 – DoE1:** Indirektes Pulverstrangpressen an dem AMC auf Basis der Legierung EN AW-6082 wurde entsprechend des Versuchsplans DoE1 (11 Varianten) durchgeführt. Aus den Strängen wurden Rundzugproben A3 nach DIN EN ISO 6892-1 in Strangpressrichtung gefertigt und geprüft. Zudem wurden metallografische Quer- und Längsschliffe angefertigt und untersucht sowie Wärmebehandlungsversuche zur Einstellung der Zustände T4 und T6 durchgeführt (Lösungsglühen bei 530 °C / 1 h, Warmauslagern 2 h / 180 °C).

**Basis Al-Gries – DoE2 und DoE3:** Im Rahmen der Rezyklatbetrachtungen wurden die Pulver der zwei Versuchspläne DoE2 und DoE3 mittels indirekten Pulverstrangpressens verarbeitet. Die Vorwärmtemperatur der Bolzen lag bei 440 °C und das Strangpressen wurde bei 450 °C Rezipiententemperatur durchgeführt. Die Stempelgeschwindigkeit lag zwischen 1 mm/s und 3 mm/s. Das Pressverhältnis war größer als 25. Aus den Strängen wurden Zugproben in Strangpressrichtung entnommen und einer mechanischen Prüfung unterzogen, sowie mittels statistischer Verfahren ausgewertet.

**Herstellung von Rohrgeometrien:** Konzepte für Innen-/Außenrohre wurden erarbeitet und Versuche zur Herstellung eines Rohres mit Außendurchmesser 38 mm und Innendurchmesser 30 mm aus EN AW-6082 sowie aus EN AW-6082 + 10 Vol.-% SiC<sub>p</sub> und EN AW-6082 + 15 Vol.-% SiC<sub>p</sub> mittels geteilter Mehrkammermatrize und indirektem Pulverstrangpressen durchgeführt. Das erzielte Pressverhältnis betrug 18,4. Die eingesetzte geteilte Mehrkammermatrize formt das Rohr ohne mitlaufenden Dorn, indem der Strang im Matrizeninneren kurzzeitig geteilt und anschließend wieder zusammengeführt wird. Vorteilhaft ist der normale und serientaugliche Verfahrensablauf ohne Dornantrieb mit robuster, einfacher Austrittsmechanik und die

---

<sup>2</sup> für Kreisquerschnitte ergibt sich das Pressverhältnis vereinfacht aus dem Verhältnis der Quadrate des Rezipienten- und des Strangdurchmessers:  $\Psi = D_R^2/D_S^2$

Möglichkeit, das Innenprofil rein geometrisch zu erzeugen. Nachteile können beim Wiederausammenfluss auftreten: mögliche Nahtlinien, unvollständige Verschweißung oder lokale Porositäten. Es wurden zunächst Versuche mit der unverstärkten Legierung EN AW-6082 durchgeführt und die Erkenntnisse dann auf die AMC-Werkstoffe übertragen.

**Querschnittsvarianten zur Richtungsuntersuchung:** Eine wichtige Fragestellung für die PA-Mitglieder war die Richtungsabhängigkeit der Eigenschaften längs und quer zur Strangpressrichtung sowie der mögliche Einschluss von Luft zwischen den Pulverteilchen beim Strangpressen. Zu diesem Zweck wurde mit unverstärktem Pulver EN AW-6082 eine weitere Versuchsreihe zum Strangpressen durchgeführt. Es wurden Stränge in verschiedenen Runddurchmessern (20 mm, 14 mm, 10 mm, 5,9 mm) sowie ein Rechteckprofil 40 × 8 mm<sup>2</sup> für Querkzugproben hergestellt und untersucht.

**AMC-Recycling-Versuche:** Geplant war, die Rezyklierbarkeit der AMC-Werkstoffe durch ein zweistufiges Verfahren zu prüfen: Zunächst sollten AMC-Bauteile in einem Querstromzerspaner der FE2 zu Gries/Spänen zerkleinert und diese Zerkleinerungsprodukte anschließend erneut als Ausgangsmaterial für das Pulver-/Partikel-Strangpressen verwendet werden. Dieses Vorgehen sollte Aufschluss über die Bedeutung der Partikelmorphologie für Packdichte, Konsolidierung und mechanische Eigenschaften geben. Während der Projektlaufzeit erwies sich der Querstromzerspaner jedoch über längere Zeit als nicht einsatzfähig. Parallel dazu zeigten Zerkleinerungsversuche gegen Ende der Projektlaufzeit ein deutliches Verkugeln des Materials: Das kompakte Ausgangsmaterial bildete kugelige Agglomerate statt der gewünschten sofortigen Zerkleinerung. Daraus folgt die technische Konsequenz, dass das kompakte Material vor einer Gries-/Pulverherstellung mechanisch vorzerkleinert werden muss, da der Querstromzerspaner allein keine technologisch und wirtschaftlich sinnvolle Zerkleinerungsstrategie ermöglicht.

Aufgrund der genannten Einschränkungen wurden die Rezyklierversuche adaptiv umgestellt und mit sortenreinen AMC-Spänen sowie mit vorzerkleinerten Massivmaterialresten (z. B. Strangpressreste) durchgeführt. Der Rezipient wurde entsprechend befüllt (Abbildung 14). Die resultierenden Stränge wurden nach dem Pressen in die Bereiche Strangende (H), Strangmitte (M) und Stranganfang (V) unterteilt und systematisch untersucht. Ziel war es, Längsgradienten in Dichte, Gefüge und mechanischen Kennwerten zu identifizieren und die Eignung der Rezyklate für die Direktkonsolidierung zu bewerten.

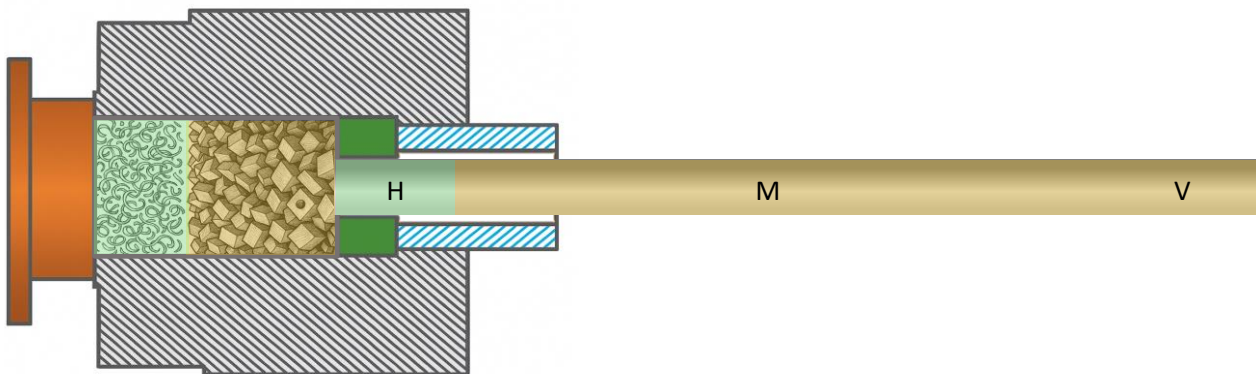


Abbildung 14: Prinzipdarstellung des indirekten Pulverstrangpressens; Rezipient gefüllt mit AMC-Spänen (grün) und Grobstücken (gelb); Strangsegmente H/M/V für vorderen, mittleren und hinteren Bereich.

**Strangpressen von Stangen und Bolzen:** Für die Herstellung der Demonstratoren, Kolbenstange in AP4 und Sitzteiler in AP5, wurden die in AP2 gemahlene Verbundpulver auf Basis der Legierung EN AW-6082 mit 15 und 20 Vol.-% SiC<sub>p</sub> gepresst und zu weiteren Strängen unterschiedlicher Durchmesser verarbeitet. Auf Basis der vorher gewonnenen Erkenntnisse konnten die Pressungen problemlos erfolgen.

### Erzielte Ergebnisse:

**Basis EN AW-2017:** Bei den durchgeführten Strangpressversuchen von EN AW-2017-Pulver gelang eine porenfreie Überführung der Pulver in den massiven Zustand. Die im Zugversuch erreichbaren Kennwerte lagen sowohl hinsichtlich der Festigkeit als auch der Bruchdehnung deutlich über den für diese Legierung handelsüblichen Angaben (Abbildung 15). Dies belegt eindrucksvoll, auch unabhängig vom Pressverhältnis, dass ein heißisostatisches Pressen und vorheriges Konsolidieren der Pulver nicht erforderlich sind.

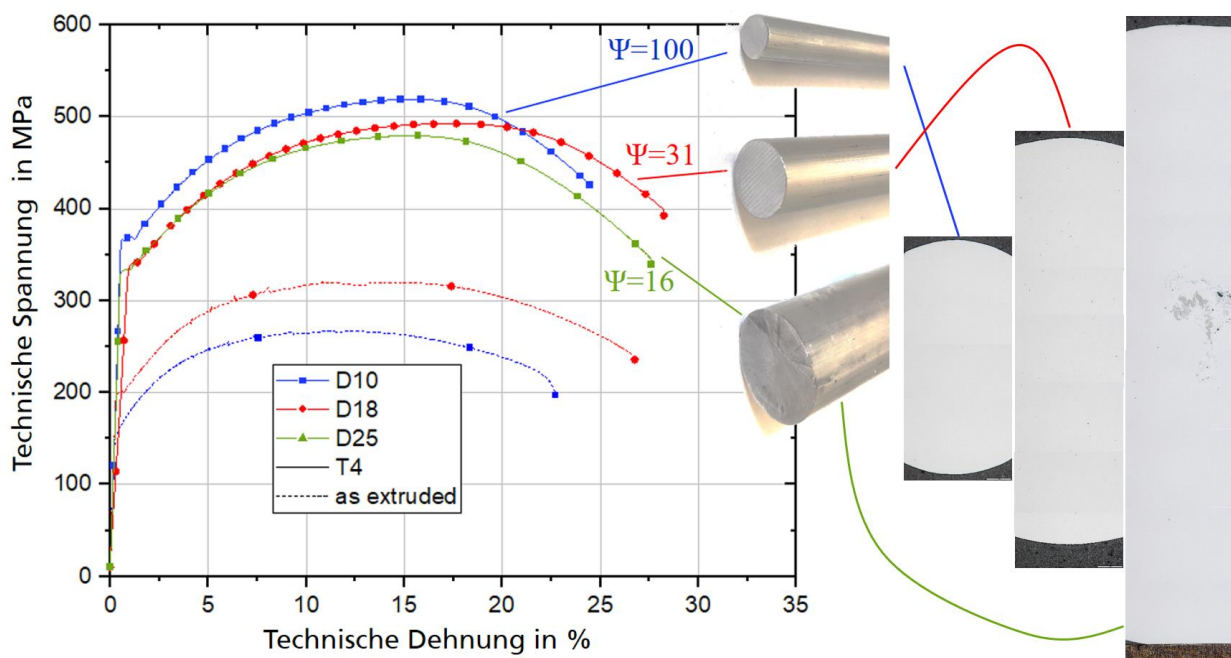


Abbildung 15: Spannungs-Dehnungs-Verhalten der direkt aus Pulvern stranggepressten Legierung EN AW-2017 bei unterschiedlichen Pressverhältnissen  $\Psi$  sowie zugehörige lichtmikroskopische Aufnahmen am Querschliff.

**Basis EN AW-6061:** Ähnlich einzuordnende Ergebnisse konnten auch mit der unverstärkten Legierung EN AW-6061 erreicht werden. Die Überführung eines mit 10 Vol.-% SiC<sub>p</sub> verstärkten Werkstoffes auf Basis dieser Legierung gelang ebenfalls, jedoch entstanden während der Wärmebehandlung Poren in der Mikrostruktur (Abbildung 16), die auf Rückstände des Mahlhilfsmittels (Stearinsäure) hinweisen. Die angestrebte Zugfestigkeit konnte entsprechend nicht erreicht werden, obgleich der Werkstoff im Zustand „F“ (wie stranggepresst) deutlich über dem unverstärkten Referenzwerkstoff (EN AW-6061 unverstärkt) liegt. Um diesen Mangel zu beseitigen, wurde in der Folge die Prozedur zur Entfernung der Mahlhilfsmittel (Heißentgasen) verbessert und erprobt.

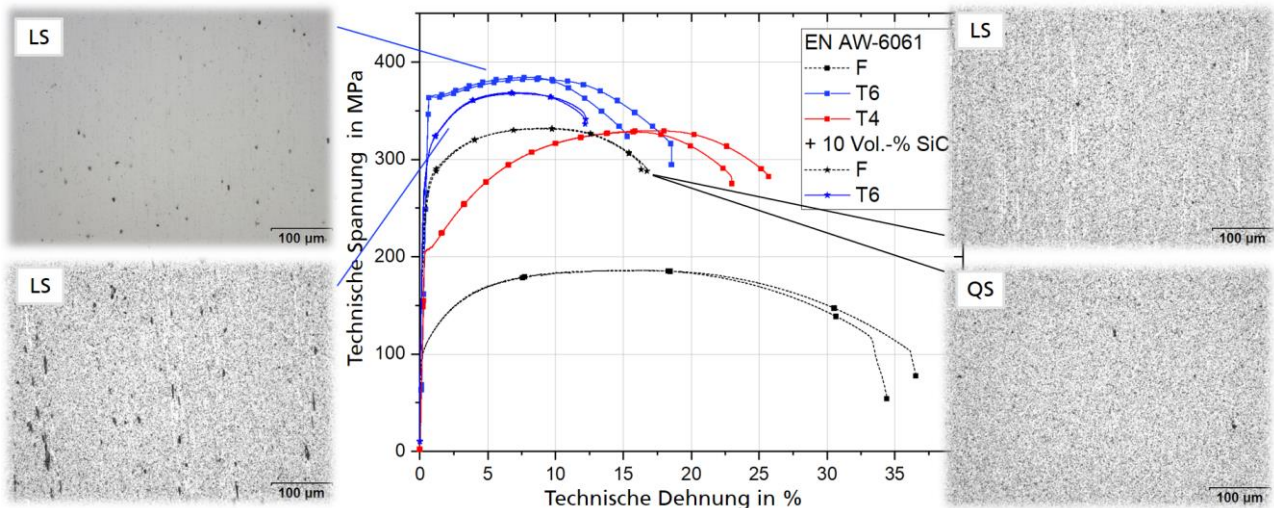


Abbildung 16: Spannungs-Dehnungs-Verhalten der direkt aus Pulvern stranggepressten Legierung EN AW-6061 ohne und mit SiC<sub>p</sub> in unbehandeltem sowie in wärmebehandelten Zuständen und zugehörige lichtmikroskopische Schliffaufnahmen am Längs- (LS) und Querschliff (QS).

**Basis EN AW-6082 – DoE1:** Bei den durchgeführten Strangpressversuchen mit  $\Psi = 25$  gelang auch bei höheren SiC<sub>p</sub>-Gehalten von bis zu 15 Vol.-% eine porenfreie Überführung der Pulver in den massiven Zustand. Längsschliffe der Stränge des Versuchsplans DoE1 V1 bis V11 sind in Abbildung 17 dargestellt. Entsprechend den im Versuchsplan untersuchten Einflussgrößen wie Mahldauer lassen sich Unterschiede in der Homogenität der SiC<sub>p</sub>-Verteilung ausmachen. Helle Bereiche deuten auf axial verstreckte unverstärkte Werkstoffbereiche hin, die gerade aufgrund kürzerer Mahldauern entstehen.

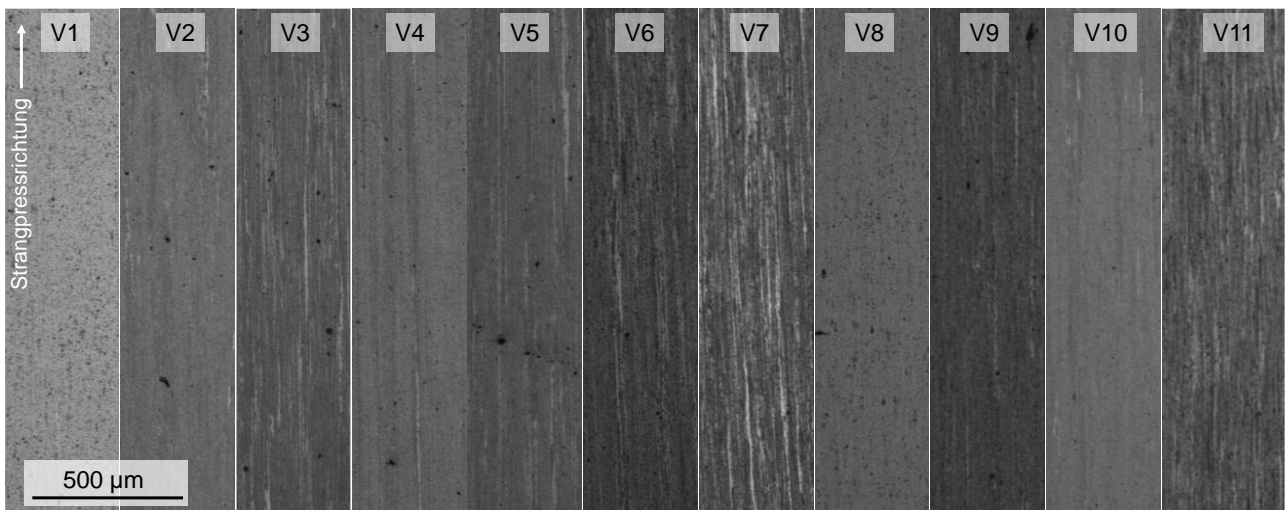


Abbildung 17: Lichtmikroskopische Aufnahmen der Längsschliffe von den 11 Varianten des DoE1 (Legierung EN AW-6082 mit SiC<sub>p</sub>).

Aus den Einzelversuchen hervorzuheben ist die Variante V10 mit 15 Vol.-% SiC<sub>p</sub>-Verstärkungsanteil. Die Proben (N = 3) erreichten im Zugversuch eine Zugfestigkeit von 380 MPa, eine Streckgrenze von 317 MPa und eine Bruchdehnung von 7 %. Die Kennwerte liegen bezüglich der Festigkeit deutlich über denen der unverstärkten Legierung, Abbildung 18. Einzig ein drastischer Rückgang der Bruchdehnung auf teilweise 5–6 % ist zu verzeichnen. In den Bruchflächen der Proben sind größere sprödbrechende Phasen erkennbar, die auf eine Verunreinigung der Pulver oder auf eine Kontamination während des Mahlens zurückzuführen sind und neben der Partikelverstärkung und Verfestigung auch zu der geringen Bruchdehnung beitragen. Es wurden Maßnahmen ergriffen, um diesen Fremdphaseneintrag zu unterbinden (weitere Erklärungen dazu in AP6).

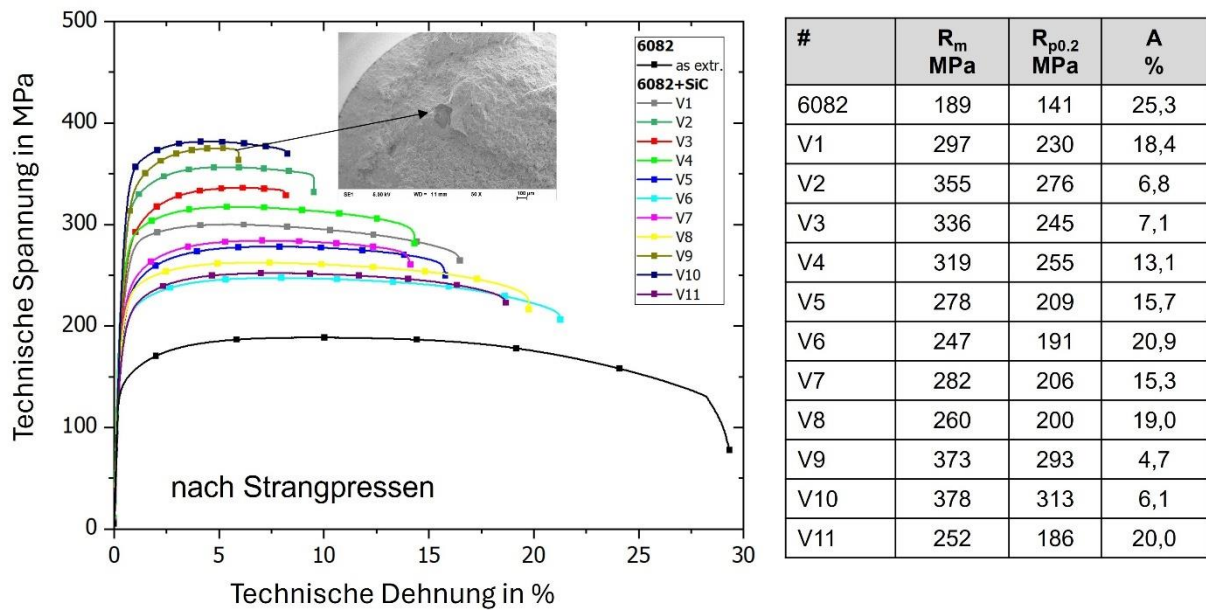
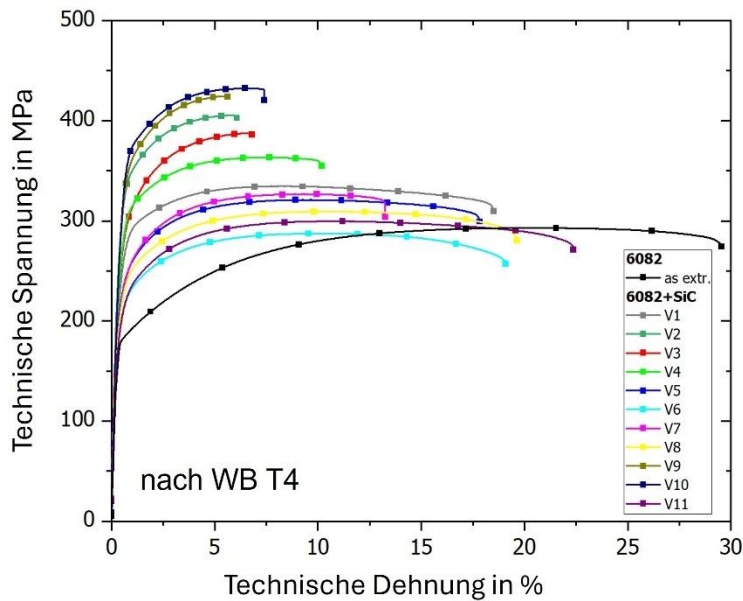


Abbildung 18: Spannungs-Dehnungs-Verhalten der Zugproben (A3) und Mittelwerte der mech. Kennwerte (N = 3) von direkt aus Pulvern stranggepressten Strängen der Legierung EN AW-6082 nach DoE1 bei konstantem Pressverhältnis ( $\Psi = 25$ ).

In AP6 wird der Aspekt der Ausscheidungshärtung des AMC näher untersucht und diskutiert, was zu dem Resultat führt, dass eine T4-Wärmebehandlung der T6-Behandlung vorzuziehen ist. Die Ergebnisse der Zugversuche der wärmebehandelten Proben zeigen im Vergleich zum gepressten Zustand eine Erhöhung der Zugfestigkeit, die über alle Varianten hinweg zwischen 10 und 16 % liegt. Bei der Streckgrenze ist der Effekt geringer und liegt zwischen 3 und 8 %. Zum Vergleich kann an der unverstärkten Legierung EN AW-6082 ein Zuwachs von 60 % bei der Zugfestigkeit und von 35 % bei der Streckgrenze beobachtet werden. Dieser signifikante Unterschied stellt im Vorhaben eine zentrale Problemstellung dar und war auf Basis bisheriger Forschungsarbeiten an der Leg. EN AW-2017 mit SiC nicht zu erwarten. Dadurch konnte das ursprünglich avisierte Festigkeitsniveau im Vorhaben nur teilweise erreicht werden. Mögliche Ursachen für den verminderten Effekt der Ausscheidungshärtung werden in AP6 diskutiert.

Mit der AMC-Variante V10\_T4 konnten die höchste Zugfestigkeit von 431 MPa und eine Streckgrenze von 333 MPa bei einer Bruchdehnung von 7,6 % erreicht werden. Die Festigkeitswerte liegen immer noch deutlich über der Festigkeit der unverstärkten Legierung, (Abbildung 19).



Bez.	R <sub>m</sub> MPa	R <sub>p0.2</sub> MPa	A %
6082_T4	302	189	23,1
V1_T4	332	245	18,5
V2_T4	403	301	6,9
V3_T4	379	261	4,5
V4_T4	363	273	11,8
V5_T4	319	215	13,4
V6_T4	287	197	19,5
V7_T4	325	213	12,6
V8_T4	307	214	19,0
V9_T4	401	298	5,4
V10_T4	431	333	7,6
V11_T4	298	195	20,3

Abbildung 19: Spannungs-Dehnungs-Verhalten der Zugproben (A3) und Mittelwerte der mech. Kennwerte (N=3) von direkt aus Pulvern stranggepressten Legierung EN AW-6082 nach DoE1 bei konstantem Pressverhältnis  $\Psi = 25$  nach einer T4-Wärmebehandlung).

Die Auswertung der Zielgrößen (Regression mit quadratischem Ansatz) des DoE1 zeigte für die Festigkeiten  $R_m$  und  $R_{p0.2}$  sowie die Bruchdehnung eine sehr gute Modellgüte von  $R^2 > 0,93$ , was sich auch in den engen Konfidenzintervallen widerspiegelt. Der E-Modul lässt sich dagegen aus den Versuchen nicht sicher beschreiben. Die Modellgüte liegt nur bei  $R^2 = 0,3$ . Die Ableitung des E-Moduls aus den Spannungs-Dehnungs-Kurven ist zu fehlerhaft und weist zu große Schwankungen auf. Grundsätzlich lässt sich für AMC der E-Modul theoretisch über die Mischungsregel oder über den Ansatz nach Halpin-Tsai berechnen [Yua14].

Das bei RePro-AMC gefundene Modell ist für Zugfestigkeit und Streckgrenze sehr genau und erlaubt in Kombination mit der Bruchdehnung valide Vorhersagen für die Einflussgrößen SiC-Gehalt, Mahldauer und Mahl-atmosphäre. Der SiC<sub>p</sub>-Gehalt erhöht erwartungsgemäß die Zugfestigkeit und die Streckgrenze des AMC, während die Bruchdehnung abnimmt. Interessant stellt sich das Verhalten des Faktors Mahldauer dar. Die Regressionskurven zeigen ein lokales Maximum der Festigkeit in dem Bereich von ca. 4,5 h, was aus Sicht der Wirtschaftlichkeit vorteilhaft ist. Gleichzeitig nimmt die Bruchdehnung sehr geringe Werte an. Über eine Optimierungssuche konnte ein Kompromiss aus maximaler Festigkeit und mindestens 7 % Bruchdehnung über das Modell ermittelt werden.

Ein weiterer Baustein für die avisierte Performance der AMC ist die Ausscheidungshärtung, welche durch eine Wärmebehandlung (WB) erfolgt. Nachweislich fällt der Zuwachs an Härte durch die T6-WB geringer (von 95 HV1 auf 116 HV1) aus als bei der unverstärkten Legierung (von 59 HV1 auf 95 HV1). Die T4-WB ist nach aktuellen Untersuchungen dem T6-Zustand zu bevorzugen. Die Ergebnisse der Zugversuche sind in dem Vorhersagediagramm (Abbildung 20) als rote Linie eingetragen und beschreiben den im Projekt maximal erreichten Eigenschaftsraum der AMCs bis 15 Vol.-% SiC<sub>p</sub>.

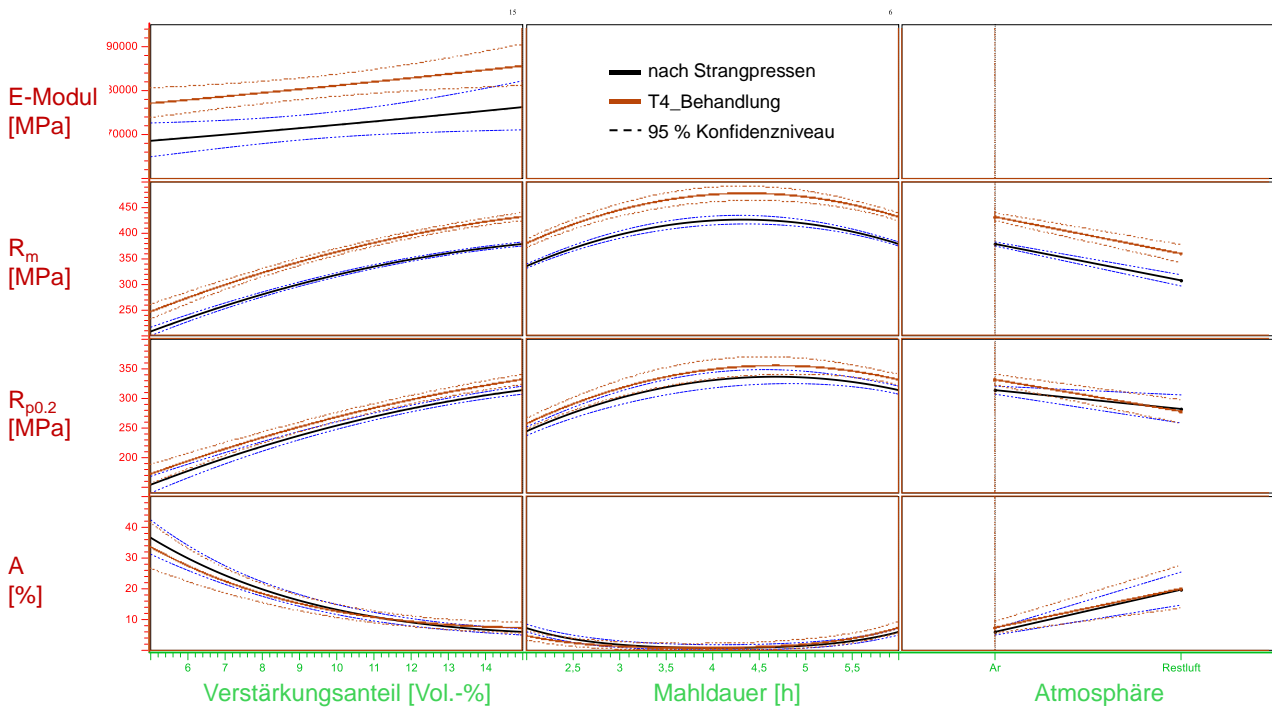


Abbildung 20: Vorhersage-Diagramm der Zielgrößen für die HE-gemahlen partikelverstärkte EN AW-6082 Legierung (Zugproben in Strangpressrichtung ohne Wärmebehandlung).

**Basis Al-Gries – DoE2 und DoE3:** Beim Strangpressen konnten alle Kombinationen des **DoE2** erfolgreich verarbeitet werden, außer die Variante 295k. Bei dem anfangs gewählten Durchmesser ( $D_S = 15 \text{ mm} / \Psi = 44$ ) stellte sich kein plastisches Fließen ein. Für weitere Versuche wurde dann der Durchmesser  $D_S = 20 / \Psi = 25$  genutzt, mit dem die weiteren Versuche erfolgreich durchführbar waren. Die Probe konnte in den weiteren Analysen nicht berücksichtigt werden.

Die Ergebnisse der Zugversuche aller weiteren Varianten mit dem Al-Gries zeigen einen starken Einfluss der Mahldauer auf die Homogenität der Mikrostruktur, was sich deutlich in der erreichten Festigkeit ablesen lässt, Abbildung 21. Mit Variante 295c konnten im Versuchsprogramm ein Maximum von 380 MPa Zugfestigkeit, 158 MPa Streckgrenze und 14,9 % Bruchdehnung erzielt werden, was im Vergleich zu den Ergebnissen der gasverdüsterten Variante aus DoE1 auf einem ähnlichen Niveau liegt. Interessanterweise konnten deutlich höhere Bruchdehnungswerte erreicht werden, was für den Einsatz und Anwendungsfall vorteilhaft ist. An den Quer- und Längsschliffen ausgewählter Varianten mit 1 h, 3,5 h und 6 h Mahldauer werden die Unterschiede in der Homogenität der Partikelverteilung deutlich. Je länger das Pulver gemahlen wird, desto homogener ist die Mikrostruktur und die Festigkeitswerte erreichen ihr Maximum. Die Kurvenverläufe implizieren, dass es bei längerer Mahldauer zur Erhöhung der Bruchdehnung kommt.

Die statistische Auswertung erfolgte mittels eines quadratischen Regressionsmodells unter Berücksichtigung der Haupteffekte, quadratischer Terme sowie ausgewählter Wechselwirkungen der Prozessparameter Mahldauer, Atmosphäre, Rotordrehzahl und PCA-Gehalt. Die Qualität der Modelle wurde anhand des Bestimmtheitsmaßes  $R^2$  sowie des korrigierten Bestimmtheitsmaßes (adj.  $R^2$ ) bewertet, Tabelle 8.

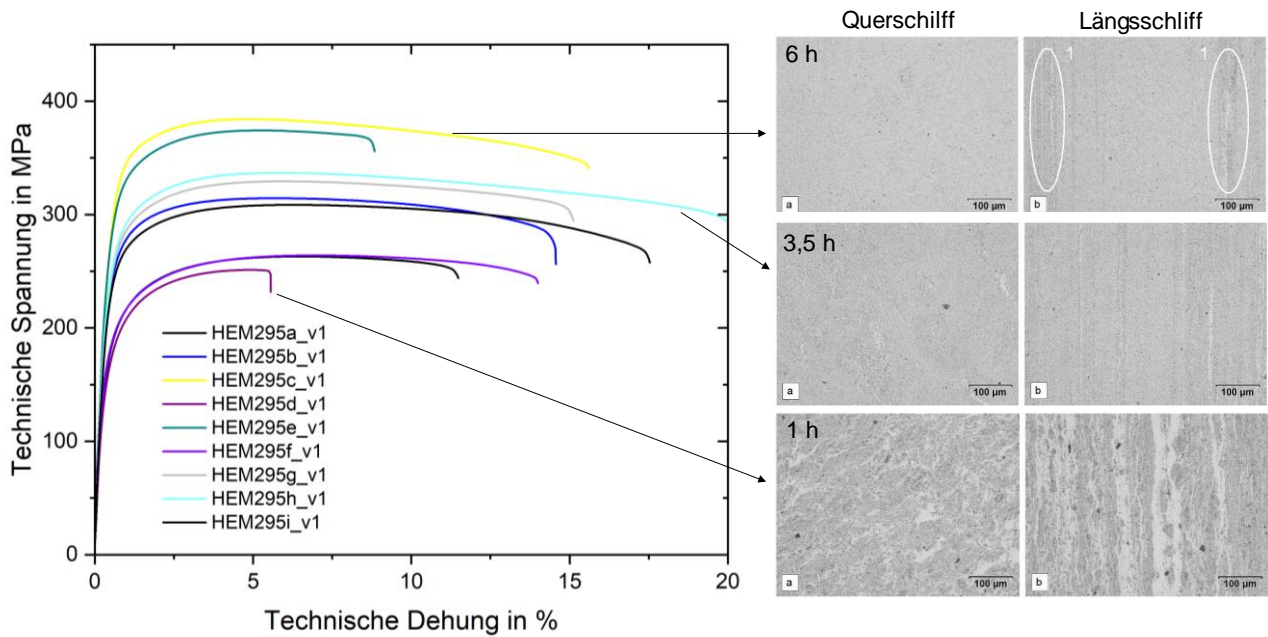


Abbildung 21: Spannungs-Dehnungs-Verhalten des direkt aus Pulvern stranggepressten Al-Gries mit 10 Vol.-% SiC<sub>p</sub> im unbehandelten Zustand sowie ausgewählte lichtmikroskopische Schlifffaufnahmen am Längs- (LS) und Querschliff (QS).

Für die Zugfestigkeit ( $R_m$ ) und die Streckgrenze ( $R_{p0,2}$ ) wurden mit  $R^2$ -Werten von 0,999 bzw. 0,988 sowie korrigierten  $R^2$ -Werten von 0,998 bzw. 0,985 sehr hohe Modellgüten erreicht. Die ermittelten Regressionsmodelle beschreiben die experimentellen Daten somit nahezu vollständig und ermöglichen eine zuverlässige Vorhersage der Festigkeitskennwerte innerhalb des untersuchten Parameterraums.

Die Bruchdehnung wird mit einem  $R^2$ -Wert von 0,785 und einem korrigierten  $R^2$  von 0,747 ebenfalls zufriedenstellend beschrieben. Zwar bleibt ein Teil der Streuung durch das Modell unerklärt, die wesentlichen Einflüsse der Prozessparameter werden jedoch erfasst. Interessanterweise kann kein signifikanter Einfluss der Mahldauer auf die Bruchdehnung abgeleitet werden, anders als es die Kurvenverläufe im Spannungs-Dehnungs-Diagramm erahnen lassen.

Für den Elastizitätsmodul ergibt sich dagegen lediglich ein  $R^2$ -Wert von 0,467 beziehungsweise ein korrigierter  $R^2$ -Wert von 0,422. Das Modell besitzt daher nur eine eingeschränkte Aussagekraft. Nur etwas 47 % der Varianz der Zielgröße werden durch das Modell erklärt – eine Abhängigkeit ist nicht klar nachweisbar. Etwa 53 % bleiben unerklärt und müssen auf hier nicht untersuchte Einflussgrößen, Messfehler oder den Zufall zurückgeführt werden. Das Ergebnis ist ein Indiz dafür, dass das E-Modul nur schwach von den untersuchten Prozessparametern beeinflusst wird. Dies war zu erwarten, da der E-Modul maßgeblich durch den SiC-Gehalt beeinflusst wird und dieser im Versuchsplan nicht variiert wurde. Zudem war aus DoE1 bekannt, dass der E-Modul, abgeleitet aus den Spannungs-Dehnungs-Kurven, zu fehlerhaft bestimmt wird und damit als auswertbare Zielgröße nicht geeignet ist.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass der gewählte Regressionsansatz insbesondere für die Beschreibung der Festigkeitskennwerte sehr gut geeignet ist. Die hohe Übereinstimmung zwischen Modell und

Versuchsdaten bestätigt die Eignung des Versuchsplans zur Identifikation der wesentlichen Einflussgrößen auf die mechanischen Eigenschaften des AMC auf Basis von Aluminium-Rezyklat mit 10 Vol.-% SiC<sub>p</sub>.

Tabelle 8: Signifikanzanalyse des Regressionsmodells für DoE2 (Al-Gries + 10 Vol.-% SiC<sub>p</sub>).

Term Significance				
Term	E-Modul [	Rm	Rp02	A
Constant	0	0	0	0
Mahldauer	0,003	0	0	0,2
Atmosphäre	0,983	0,805	0,006	1e-05
Rotor	9e-04	7e-05	0,439	9e-07
PCA (g/30 min)	0,436	3e-06	0,017	0,919
Mahldauer*2	0,579		0,45	0,162
Atmosphäre * Mahldauer	0,582		0,231	0,056
Mahldauer * Rotor	0,091		0,45	0,196
Mahldauer * PCA (g/30 min)	0,648		0,121	0,565
Atmosphäre * Rotor	0,828	3e-11	7e-05	0,714
Atmosphäre * PCA (g/30 min)	0,916	3e-05	0,231	0,945
PCA (g/30 min) * Rotor	0,884	2e-05	0,45	8e-08
PCA (g/30 min)*2	0,599	1e-07	0,002	0,524
<b>R-Square</b>	<b>0,467</b>	<b>0,999</b>	<b>0,988</b>	<b>0,785</b>
<b>Adj R-Square</b>	<b>0,422</b>	<b>0,998</b>	<b>0,985</b>	<b>0,747</b>
<b>RMS Error</b>	<b>5,864</b>	<b>1,997</b>	<b>5,74</b>	<b>2,1</b>
<b>Pure Error</b>	<b>6,088</b>	<b>1,997</b>	<b>5,637</b>	<b>2,048</b>
<b>Residual df</b>	<b>24</b>	<b>18</b>	<b>20</b>	<b>22</b>

Das aus der quadratischen Regression abgeleitete Vorhersagediagramm in Abbildung 22 zeigt die modellierten Haupteffekte der HEM-Prozessparameter Mahldauer, Atmosphäre, Rotordrehzahl und PCA-Gehalt auf die mechanischen Eigenschaften des Aluminium-Rezyklat-AMC mit 10 Vol.-% SiC<sub>p</sub>. Mit zunehmender Mahldauer steigen der E-Modul sowie die Festigkeitskennwerte R<sub>m</sub> und R<sub>p0,2</sub> deutlich an, während die Bruchdehnung aufgrund der zunehmenden Verfestigung und der damit einhergehenden reduzierten plastischen Verformbarkeit abnimmt. Eine Verarbeitung unter Argon-Atmosphäre führt im Vergleich zur Mahlung unter Restluft zu höheren Festigkeitskennwerten und einer verbesserten Duktilität. Ebenso wirkt sich eine alternierende Rotordrehzahl (5 min bei 600 min<sup>-1</sup> und 5 min bei 400 min<sup>-1</sup>) positiv auf die mechanischen Eigenschaften aus. Der Einfluss des PCA-Gehalts zeigt insbesondere für die Festigkeitskennwerte einen nichtlinearen Verlauf. Während niedrige bis mittlere PCA-Gehalte die höchsten Festigkeitswerte ermöglichen, führt eine weitere Erhöhung des PCA-Gehalts zu einer Abnahme des E-Moduls, der Festigkeit sowie der Bruchdehnung. Die auf Grundlage der quadratischen Regressionsmodelle durchgeführte numerische Optimierung aller mechanischen Zielgrößen ergibt als optimalen Parametersatz eine Mahldauer von 6 h, Argonatmosphäre, eine alternierende Rotordrehzahl sowie einen niedrigen PCA-Gehalt. Unter diesen Prozessbedingungen werden die höchsten vorhergesagten mechanischen Eigenschaften des Aluminium-Rezyklat-AMC mit 10 Vol.-% SiC<sub>p</sub> erreicht.

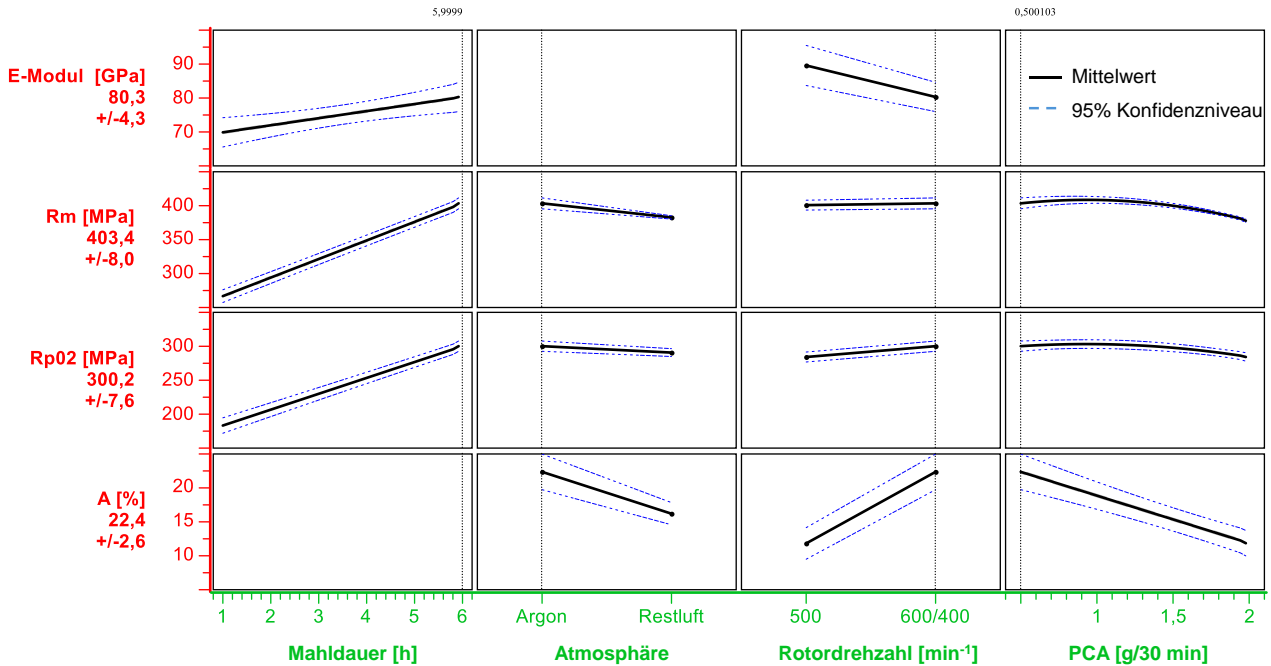


Abbildung 22: Vorhersagediagramm für DoE2 (Al-Gries + 10 Vol.-% SiC<sub>p</sub>);  
Zugproben A3 in Strangpressrichtung ohne Wärmebehandlung.

Nach den positiven Ergebnissen des DoE2 wurden die Untersuchungen hinsichtlich verschiedener SiC-Gehalte und Mahldauern erweitert, um ein umfassendes Bild des Eigenschaftsraums zu erhalten. Das Strangpressen der Pulver mit dem Pressverhältnis  $\Psi = 25$  war bei 20 Vol.-% SiC problemlos möglich. Die metallografischen Längsschliffe der stranggepressten Verbundpulver aus DoE3 (vgl. Tabelle 6) sind in Abbildung 23 gegenübergestellt. In der Mikrostruktur lassen sich deutliche Unterschiede in der Homogenität feststellen.

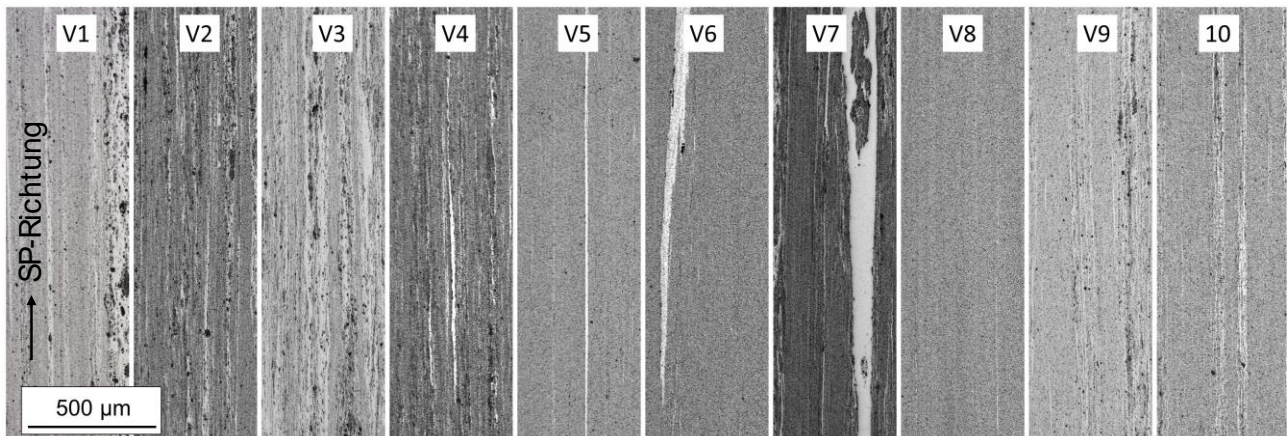
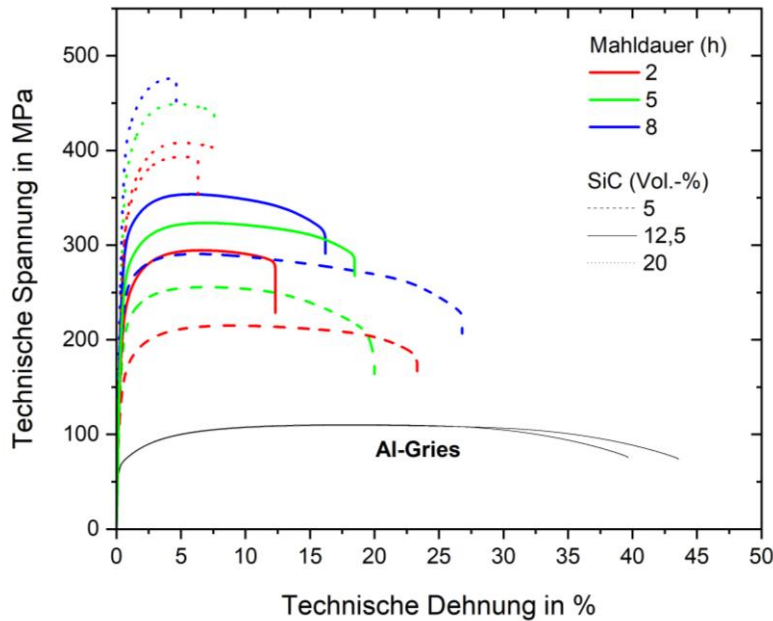


Abbildung 23: Längsschliffe der Stränge aus DoE3 mit Al-Gries + SiC<sub>p</sub> in verschiedenen Gehalten und Mahldauern.

Die Spannungs-Dehnungs-Diagramme in Abbildung 24 zeigen den deutlichen Einfluss des SiC<sub>p</sub>-Gehalts und der Mahldauer auf die mechanischen Eigenschaften der aus Aluminium-Gries hergestellten AMC-Werkstoffe. Mit zunehmendem SiC-Anteil steigt die Zugfestigkeit deutlich an, während die Bruchdehnung abnimmt. Gleichzeitig führt eine Verlängerung der Mahldauer von 2 h auf 8 h zu einer weiteren Steigerung der Festigkeit. Die höchsten Zugfestigkeiten von bis zu 470 MPa werden bei einem SiC-Gehalt von 20 Vol.-% und einer Mahldauer von 8 h erreicht. Demgegenüber weist das unverstärkte Aluminium-Gries mit maximal etwa 110 MPa deutlich geringere Festigkeitswerte auf, erreicht jedoch Bruchdehnungen von über 40 %. Insgesamt

verdeutlichen die Ergebnisse eindrucksvoll die festigkeitssteigernden Effekte durch die SiC-Partikel sowie den zusätzlichen positiven Einfluss einer längeren mechanischen Verfestigung durch den Mahlprozess.



Bez.	R <sub>m</sub> MPa	R <sub>p0,2</sub> MPa	A %
Al-Gries	110	66	41,5
DoE3_1	251	184	25,0
DoE3_2	294	204	12,9
DoE3_3	215	140	21,3
DoE3_4	407	299	7,4
DoE3_5	350	276	12,1
DoE3_6	440	345	4,8
DoE3_7	399	304	6,1
DoE3_8	461	381	5,1
DoE3_9	288	221	22,5
DoE3_10	323	245	16,1

Abbildung 24: Spannungs-Dehnungs-Verhalten repräsentativer Kurven der Versuche aus DoE3 mit Al-Gries + SiC<sub>p</sub> in verschiedenen Vol.-%-Gehalten und Mahldauern sowie die mechanischen Kennwerte aus den Zugversuchen (N = 3).

Die Tabelle 9 zeigt die Signifikanzanalyse eines Regressionsmodells für die Einflussgrößen SiC-Anteil und Mahldauer auf die Eigenschaften Härte (HV1), E-Modul, Zugfestigkeit (R<sub>m</sub>), Streckgrenze (R<sub>p0,2</sub>) und Bruchdehnung (A). Die statistische Auswertung zeigt, dass die Mahldauer den wichtigsten Einfluss auf die Härte, die Zugfestigkeit und die Streckgrenze ausübt. Demgegenüber wirkt sich der SiC-Anteil insbesondere auf die Härte sowie die Bruchdehnung aus. Für die Zugfestigkeit und die Streckgrenze zeigt sich zudem ein überwiegend nichtlinearer Zusammenhang mit dem SiC-Gehalt, was durch die Signifikanz des quadratischen Terms belegt wird. Das Elastizitätsmodul wird hingegen durch die untersuchten Einflussgrößen nur unzureichend beschrieben. Dies spiegelt sich auch in der Modellgüte wider. Während für die Zugfestigkeit (R<sup>2</sup> = 0,984) und die Streckgrenze (R<sup>2</sup> = 0,976) sehr hohe Bestimmtheitsmaße erreicht werden, weist das Modell für den Elastizitätsmodul mit einem R<sup>2</sup>-Wert von 0,226 lediglich eine geringe Aussagekraft auf. Insgesamt wird deutlich, dass die mechanischen Eigenschaften der untersuchten AMC-Werkstoffe maßgeblich durch die Mahldauer und den SiC-Anteil bestimmt werden, wobei insbesondere die Festigkeitskennwerte mit hoher Zuverlässigkeit durch die verwendeten Regressionsmodelle beschrieben werden können.

Tabelle 9: Signifikanzanalyse des Regressionsmodells für DoE3.

Term	Term Significance				
	HV1	E-Modul [	Rm	Rp02	A
Constant	0	0	0	4e-11	0
SiC-Anteil	0	0,753	0,656	0,125	0
Mahldauer	1e-08	0,489	0	0	0,947
SiC-Anteil^2	0,107	0,789	4e-07	6e-07	0,567
Mahldauer * SiC-Anteil	0,202	0,021	0,366	0,875	0,3
Mahldauer^2	0,197	0,012	0,499	0,458	0,516
<b>R-Square</b>	<b>0,913</b>	<b>0,226</b>	<b>0,984</b>	<b>0,976</b>	<b>0,865</b>
<b>Adj R-Square</b>	<b>0,911</b>	<b>0,168</b>	<b>0,982</b>	<b>0,974</b>	<b>0,855</b>
<b>RMS Error</b>	<b>9,446</b>	<b>10,83</b>	<b>10,68</b>	<b>11,81</b>	<b>2,947</b>
<b>Pure Error</b>	<b>8,64</b>	<b>11,47</b>	<b>9,581</b>	<b>11,37</b>	<b>2,998</b>
Residual df	95	27	26	26	27

Das Vorhersagediagramm in Abbildung 25 stellt die Einflüsse der untersuchten Faktoren auf die mechanischen Eigenschaften dar. Der  $\text{SiC}_p$ -Gehalt beeinflusst die mechanischen Eigenschaften des AMC deutlich stärker als die Mahldauer. Mit steigendem  $\text{SiC}_p$ -Anteil erhöht sich die Härte nahezu linear von etwa 75 HV bei 5 Vol.-% auf rund 150 HV bei 20 Vol.-%  $\text{SiC}_p$ . Dies bestätigt den direkten Verfestigungsbeitrag der keramischen Verstärkungspartikel.

Auch die Festigkeitskennwerte steigen deutlich an. Die Zugfestigkeit  $R_m$  nimmt von etwa 280 MPa auf über 420 MPa zu, während die Streckgrenze  $R_{p0,2}$  von etwa 220 MPa auf rund 370 MPa ansteigt. Die Verstärkungspartikel behindern die Versetzungsbewegung bzw. erhöhen die Versetzungsdichte und steigern dadurch sowohl die Fließspannung als auch die maximale Tragfähigkeit des Werkstoffs. Demgegenüber sinkt die Bruchdehnung nahezu linear von etwa 24 % auf unter 10 %. Die zunehmende Partikelkonzentration reduziert die plastische Verformbarkeit und begünstigt die Entstehung lokaler Spannungsspitzen. Beim Elastizitätsmodul zeigt sich ebenfalls ein deutlicher Anstieg von etwa 65 GPa auf nahezu 80 GPa. Aufgrund der vergleichsweise großen Streuung und der geringen Modellgüte aus der Signifikanzanalyse ist dieser Trend jedoch mit größerer Unsicherheit behaftet. Die senkrechten Linien im Diagramm beschreiben den Optimierungszustand bei einer Bruchdehnung von 8 %.

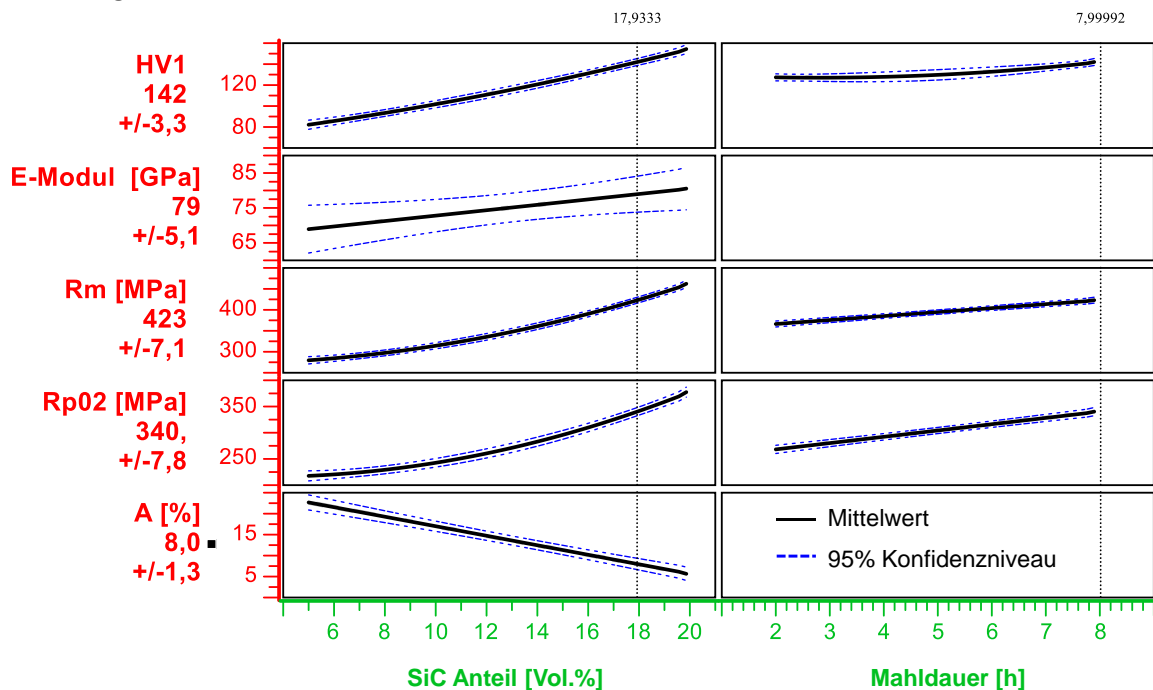


Abbildung 25: Vorhersagediagramm für DoE3 (Al-Gries +  $\text{SiC}_p$ ); Zugproben in Strangpressrichtung ohne Wärmebehandlung.

**Herstellung von Rohrgeometrien:** Die Rohre ohne Verstärkung sowie mit 10 Vol.-%  $\text{SiC}_p$  konnten erfolgreich hergestellt werden (Abbildung 26a). Die mikroskopischen Aufnahmen zeigen in Längsrichtung eine dichte und homogene Mikrostruktur (Abbildung 26b), einzig durch die konstruktionsbedingten Stege der Rohrmatrize kommt es zu vier Inhomogenitätsbereichen verteilt über den Querschnitt. Das unverstärkte Aluminium von der Folienummantelung des Pulvers wird während des Strangpressens in den inneren Bereich transportiert (Abbildung 26c). Die ermittelten Anforderungen an das Innenrohr – insbesondere an die Wandstärke – sind so hoch, dass eine Realisierung im Projekt nicht möglich war. Die Dimension des Außenrohrs ( $D_i = 50 \text{ mm}$ ) konnte an der Strangpresse bei der FE2 nicht realisiert werden und hätte nur über einen externen Auftrag abgebildet werden können, jedoch kaum wissenschaftlichen Mehrwert generiert. Das

hergestellte AMC-Rohr mit  $D_i = 30$  mm diente daher zur Realisierung von weiteren Arbeitspunkten (Fügeoperation, mech. Untersuchungen, etc.). Mit einer Wanddicke von 4 mm ergibt sich das Pressverhältnis 18,4.

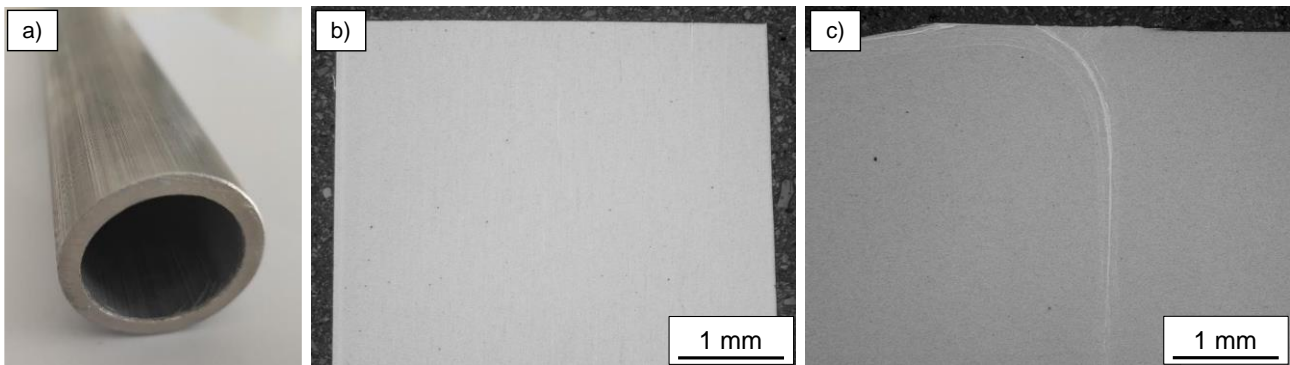


Abbildung 26: a) AMC-Rohr mit  $D_A = 38$  mm (EN AW-6082 + 10 Vol.-% SiC<sub>p</sub>) b) Längsschliff und c) Querschliff mit Inhomogenitäten im Stegbereich.

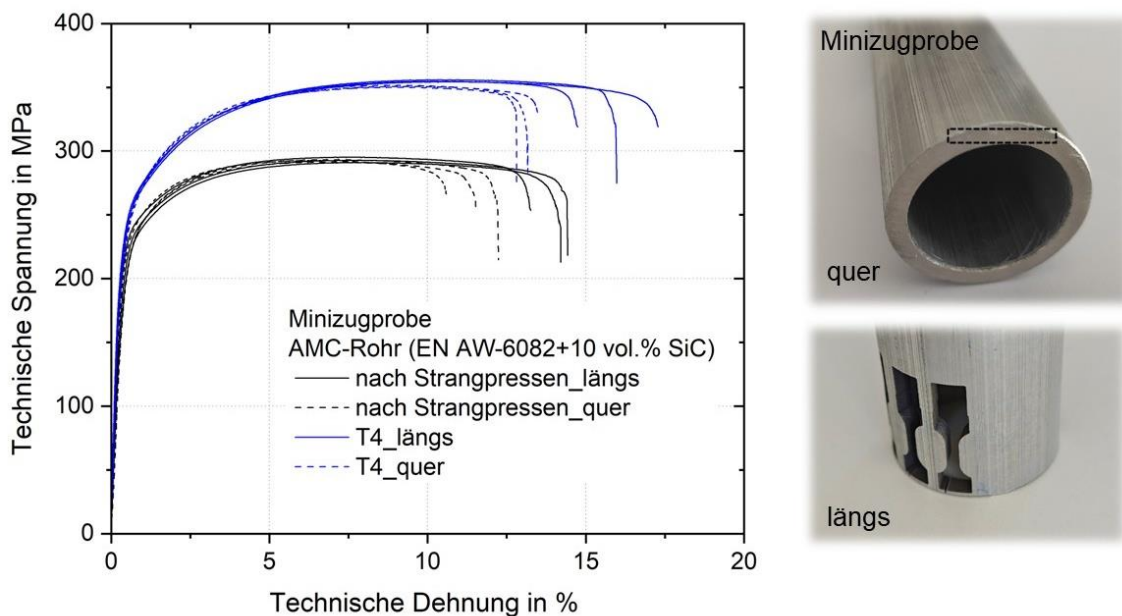


Abbildung 27: Spannungs-Dehnungs-Diagramm von Minizugproben aus AMC-Rohr (AW-6082 + 10 Vol.-% SiC<sub>p</sub>) in Längs- und Querrichtung entnommen.

**Querschnittsvarianten zur Richtungsuntersuchung:** Die durchgeführten Untersuchungen zu den richtungsabhängigen Eigenschaften zeigen im Zustand nach dem Strangpressen keinen signifikanten Unterschied. Erst nach den Wärmebehandlungen T4 oder T6 kam es bezüglich Zugfestigkeit, Streckgrenze und Bruchdehnung zu einer Minderung der Kennwerte (Abbildung 27a). Ursächlich dafür kann die eingeschlossene Luft sein, die in Querrichtung den tragenden Querschnitt nach einer Wärmebehandlung stärker reduziert als in Längsrichtung (Abbildung 27b). Über den Prozessschritt des Entlüftens beim Strangpressen konnten die Lufteinschlüsse reduziert, aber nicht vollständig beseitigt werden. Der Effekt trat bei hohen Strangpressverhältnissen weniger stark auf.

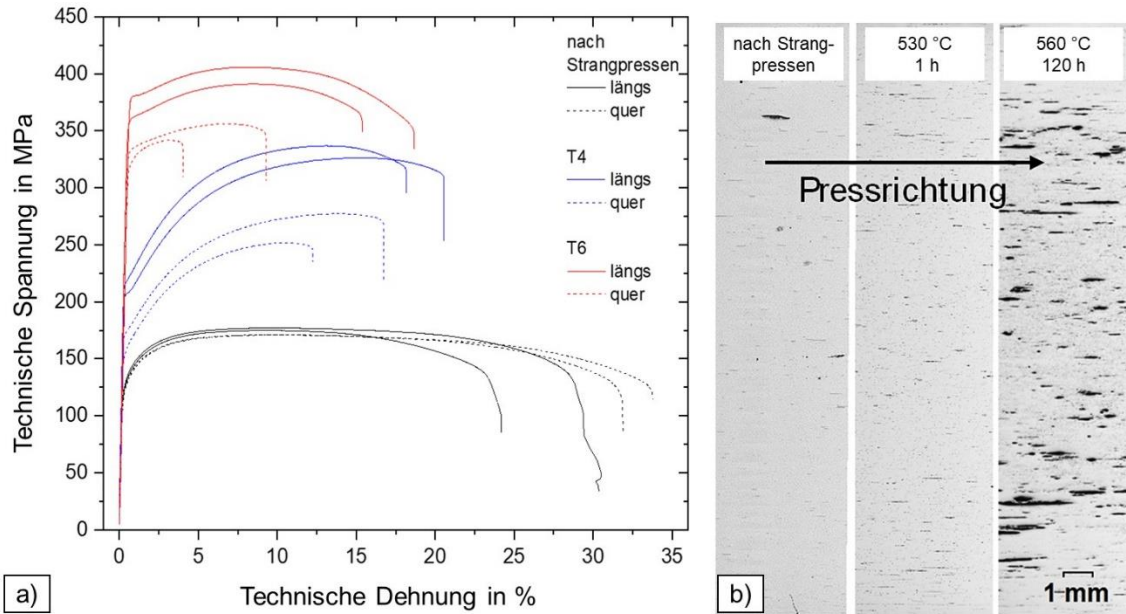


Abbildung 28: a) Richtungsabhängige mechanische Eigenschaften der Strangpressprofile aus EN AW-6082 in Quer- und Längsrichtung in verschiedenen Zuständen. Zugprobe A3; b) Längsschliffaufnahmen des Strangs mit  $D = 14$  mm in verschiedenen Zuständen zur Verdeutlichung der Lufteinschlüsse

#### AMC-Recycling-Versuche:

Die erneute Verarbeitung der AMCs nach Abbildung 14 konnte erfolgreich durchgeführt werden. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zeigt die Gefüge der unterschiedlichen Strangabschnitte: Sie können der gleichen AMC-Zusammensetzung in unterschiedlicher Pressgutform zugeordnet werden. Die optische Anisotropie (helle Zeilen) ist auf unverstärkte Bereiche zurückzuführen, die vorwiegend durch Folie aus der Kapselung beim Strangpressen eingetragen wurden. Der Anteil ist bei den Rezyklatspänen (hinterer Strangbereich) signifikant erhöht, weil diese beim Überdrehen der stranggepressten Stangen entstanden sind und die Folie der Kapsel eine äußere sehr dünne Schicht der Stangen bildet. Die Festigkeit fällt entsprechend im hinteren Bereich des Strangs am geringsten aus (vgl. Abbildung 30).

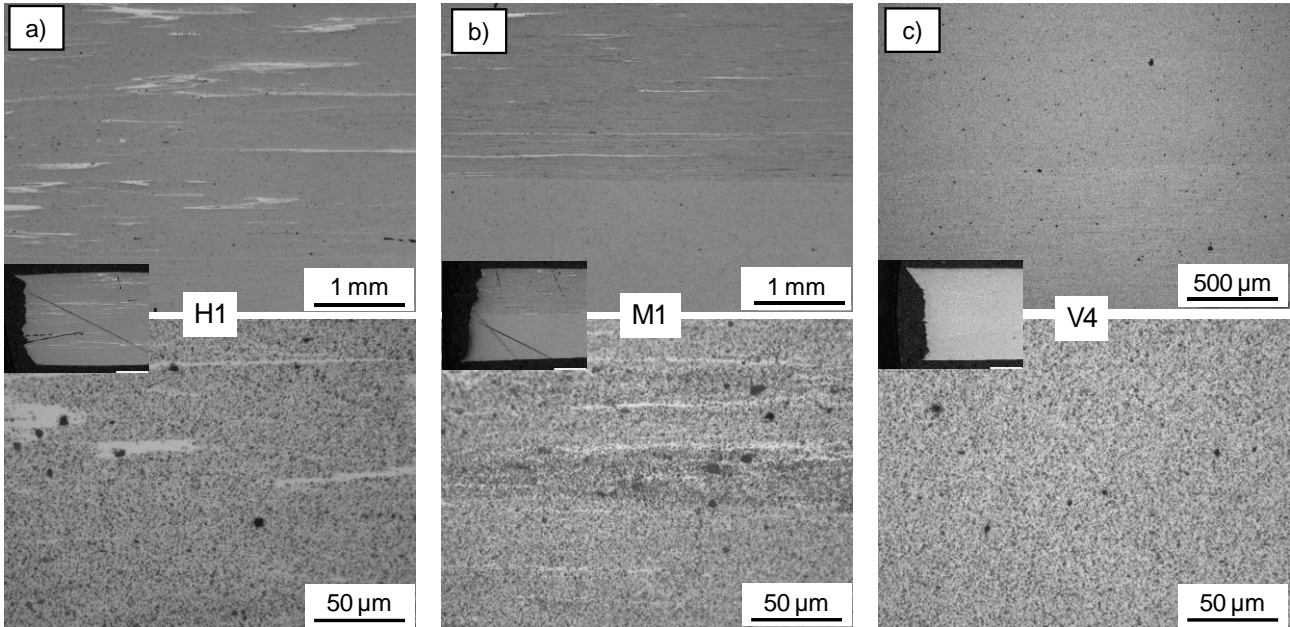


Abbildung 29: Mikrostruktur der Zugproben der Abschnitte hinten (a), Mitte (b) und vorn (c) des Recyclingstrangs im Längs- (oben) und Querschliff (unten) sowie lichtmikroskopische Aufnahmen der Bruchflächen entsprechender Zugversuchsproben.

Die höchste Festigkeit wurde im mittleren Bereich (M) des Strangs gemessen, obgleich die Proben aus diesem Bereich offenbar eine Mischform aus den Bereichen H und V aufweisen. Das kann vermutlich zumindest anteilig zurückgeführt werden: auf die Fließbedingungen, die dort üblicherweise am homogensten sind – beim kommerziellen Strangpressen werden Stranganfang und -ende deshalb entfernt. Die punktförmigen Verunreinigungen sind auf die Herkunft des Materials aus einer frühen Projektphase zurückzuführen und stehen im Zusammenhang mit dem in AP6 näher erläuterten Fremdphaseneintrag. Insgesamt bestätigen die Ergebnisse die prinzipielle Rezyklierfähigkeit der AMC-Materialien, da alle Proben im Bereich der hergestellten Primär-AMCs liegen.

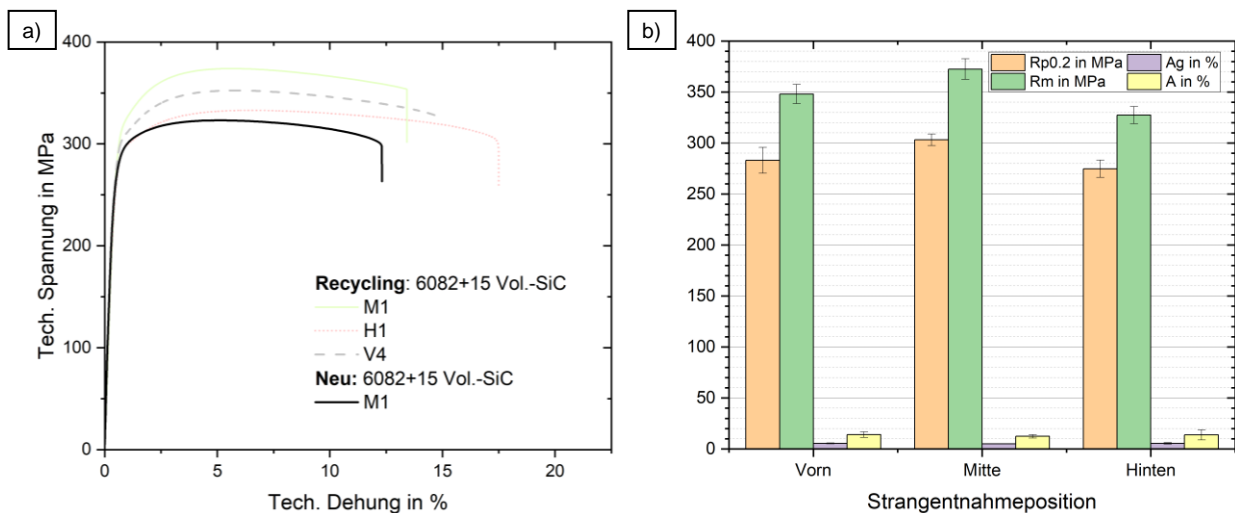


Abbildung 30: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Proben aus dem Recyclingstrang.

## 2.4 Arbeitspaket 4: Auslegung, Konstruktion und finale Fertigung Demonstrator Pkw-Dämpfer (FE1, FE2, FE3)

Die in AP1 bis AP3 ausgewählten und gefertigten Komponenten wurden sowohl virtuell als auch mechanisch hinsichtlich ihres Einsatzes gemäß OEM-Normen geprüft. Im Fokus standen dabei insbesondere die Kolbenstange sowie das Dichtungs-Führungs-Element.

### Durchgeführte Arbeiten:

Im Rahmen der Substitution der Bauteile wurde ein systemischer Ansatz verfolgt, um sicherzustellen, dass sämtliche Anforderungen an die Komponenten ganzheitlich berücksichtigt werden.

### Kolbenstange:

Die zentrale Herausforderung bestand in der Auslegung der Kolbenstange aus AMC. Zur Erreichung einer mit der Stahlkolbenstange vergleichbaren Steifigkeit ist ein größerer Durchmesser erforderlich. Eine solche Durchmessererhöhung bedingt jedoch zwangsläufig Anpassungen an den angrenzenden Komponenten. Wie in Abbildung 31 dargestellt, betrifft dies insbesondere das Führungslager, die Dichtung sowie den Zuganschlag. Darüber hinaus führt die vergrößerte Kolbenstange zu einer veränderten Volumenverdrängung während des Hubs beim Eintauchen in die Dämpferkammer. Dies hätte eine umfassende Neuauslegung des Gesamtsystems erforderlich gemacht.

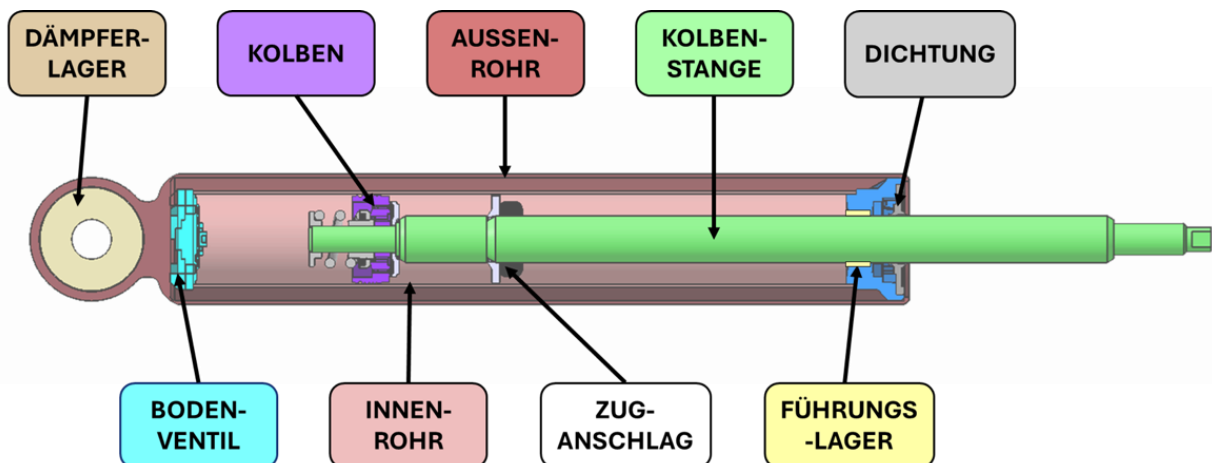


Abbildung 31: CAD-Schnittmodell des Zweirohrdämpfers.

Zur Verdeutlichung des Potenzials von AMC wird im Folgenden die spezifische Steifigkeit  $\Phi$  der beiden Werkstoffe berechnet (1), (2):

$$\Phi_{Steel} = \frac{E}{\rho_{steel}} = 26751,6 \frac{N \cdot m}{g} \quad (1)$$

$$\Phi_{AMC} = \frac{E}{\rho_{AMC}} = 32727,3 \frac{N \cdot m}{g} \quad (2)$$

Damit weisen AMC eine um etwa 22 % höhere spezifische Steifigkeit auf, was die Werkstoffe insbesondere für Leichtbauanwendungen prädestiniert.

Dieser Vorteil wird anhand eines vereinfachten Beispiels weiter konkretisiert. Betrachtet wird ein Vollzylinder mit einer Höhe von 100 mm, der sowohl aus Stahl als auch aus AMC die gleiche Biegesteifigkeit aufweisen

soll. Während die Geometrie des Stahlzylinders konstant bleibt, wird der Durchmesser des AMC-Zylinders angepasst. Grundlage hierfür ist das Verhältnis von Elastizitätsmodul und Flächenträgheitsmoment.

$$m_{steel} = \frac{\pi r^2 \cdot h}{\rho_{steel}} = 129,67 \text{ g} \quad | \quad d_{Steel} = 18 \text{ mm} \quad (3)$$

$$m_{AMC} = \frac{\pi r^2 \cdot h}{\rho_{AMC}} = 57,83 \text{ g} \quad | \quad d_{AMC} = 22,5 \text{ mm für gleiche Steifigkeit} \quad (4)$$

Der AMC-Vollzylinder weist somit eine um rund 54 % geringere Masse im Vergleich zum Stahlzylinder auf. Auf Komponentenebene ergibt sich daraus ein erhebliches Leichtbaupotenzial.

#### Herstellung und Design:

Nach dem Strangpressen (AP3) lag das Profil nicht in axialsymmetrischer Form vor. Die vorhandenen Geometrieabweichungen konnten durch spanende Bearbeitung nicht vollständig kompensiert werden, weshalb das Strangpressprofil auf einer Universalprüfmaschine durch eine plastische Dehnung von 2 % im kalten Zustand gerichtet wurde. Mit einem geeigneten Ziehwerkzeug, welches im Projekt noch nicht zur Verfügung stand, kann dieser Prozessschritt bereits technologisch in den Strangpressprozess integriert werden.

Die spanende Bearbeitung des AMC zeigte einen signifikant erhöhten Werkzeugverschleiß, der etwa um den Faktor 30 über dem von Stahl lag. Nach Beseitigung von Verunreinigungen aus den initialen Strangpressversuchen (vgl. AP3) reduzierte sich der Verschleiß, verbleibt jedoch weiterhin auf einem hohen Niveau. Das Unternehmen ZF, welches erst zum Ende des Projekts dem PA beigetreten ist, bot an, den zerspanungsfreien Serienfertigungsprozess für Stahlkolbenstangen auch am AMC zu testen. Entsprechende Untersuchungen konnten im Zeitrahmen des Projekts aber noch nicht umgesetzt werden.

Für den Zuganschlag wurde ein alternatives Design erforderlich, da die Referenzvariante auf einer kalt eingepressten Sicke basierte, in die eine dünne Scheibe eingebördelt wurde. Die hierfür notwendigen Fertigungsverfahren standen den beteiligten Forschungseinrichtungen sowie dem Projektpartner nicht zur Verfügung.

Zudem musste die Scheibe aufgrund der vorgesehenen Werkstoffumstellung auf Aluminium bzw. AMC mit einer größeren Dicke ausgeführt werden, um die erforderliche Festigkeit sicherzustellen. Auf Basis einer Voruntersuchung wurde daher ein angepasstes Design der AMC-Kolbenstange gewählt, das in Abbildung 32 dargestellt ist.

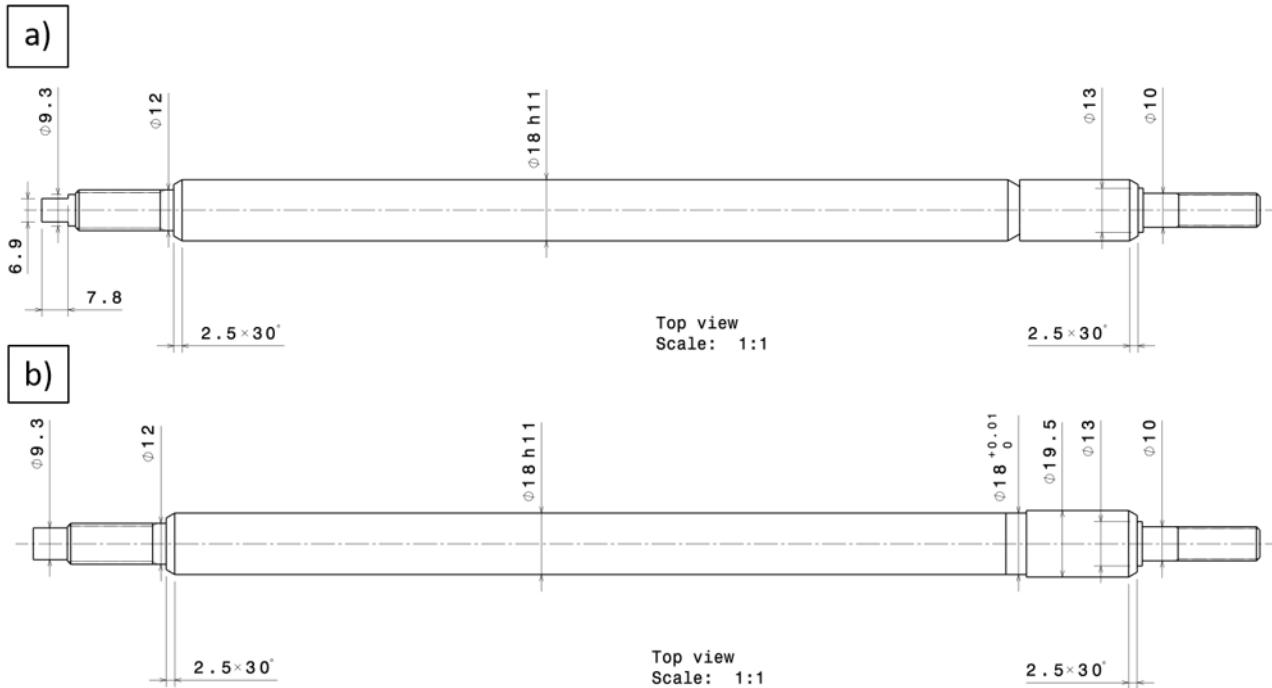


Abbildung 32: Design der Kolbenstangen: a) Referenzkolbenstange b) AMC-Kolbenstange.

Das Rohmaß des eingesetzten Halbzeugs beträgt 19,5 mm, wodurch der gewählte Absatz die Bearbeitung in diesem Fall gezielt vereinfacht. Zur Sicherstellung der Positionierung des Zuganschlags wurde der Durchmesser im Bereich unmittelbar vor dem Absatz (Nennmaß 18 mm) toleranzseitig so angepasst, dass ein Aufpresen der Scheibe mit moderater Kraft möglich ist und ein Verrutschen zuverlässig verhindert wird.

Als Zuganschlag kommt eine 6 mm dicke Scheibe aus EN AW-6082-T6 zum Einsatz. Voruntersuchungen haben gezeigt, dass dieses Design eine höhere Kraftaufnahmefähigkeit ermöglicht als die Referenzlösung.

#### Oberfläche:

Die Oberfläche der bearbeiteten AMC-Kolbenstange wies eine Härte von 120 HV sowie Rauheitswerte von  $R_a = 0,27 \mu\text{m}$  und  $R_z = 1,19 \mu\text{m}$  auf. Damit werden die Anforderungen an die Oberflächenhärte ( $\geq 600 \text{ HV}$ , vgl. Tabelle 10) deutlich unterschritten. Zum Vergleich erreicht die originale Stahlkolbenstange etwa 1050 HV. Aufgrund dieser Tatsache ist eine Beschichtung der AMC-Kolbenstange unumgänglich. Das bisherige Beschichtungssystem Hartchrom kann nicht angewendet werden. Hintergrund ist die Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 (REACH), die ein Stoffverbot für Chrom(VI) vorsieht, welches beim Prozess des Hartverchromens benötigt wird. Dieses Thema stößt auch im Rahmen der Projektausschusssitzungen auf großes Interesse. Zudem sind für die Funktion gezielt eingebrachte Mikrorisse erforderlich, die durch kapillare Effekte einen stabilen Schmierfilm zwischen Kolbenstange und Axialdichtung ermöglichen. Diese Mikrorisstruktur ist bei der AMC-Kolbenstange nicht vorhanden.

Tabelle 10: Oberflächenanforderung an die Kolbenstange für Dämpfer.

	Anforderung	Referenz (Stahl)	AMC (EN AW-6082 + 15 Vol.-% SiC <sub>p</sub> )
$R_a$	[ $\mu\text{m}$ ]	0,1	0,3
$R_z$	[ $\mu\text{m}$ ]	1	1,2
Härte	[HV]	> 600	120
Mikrorisse	[R/cm]	< 1500	ca. 1300

Zur Verbesserung der Oberflächeneigenschaften wurden vier Verfahren untersucht (vgl. Abbildung 33). Durch Polieren konnte zwar eine den Rauheitsanforderungen entsprechende Oberfläche erzeugt werden, jedoch ohne Ausbildung der geforderten Mikrorisse und bei weiterhin unzureichender Härte, was die Oberfläche anfällig für mechanische Beschädigungen macht.

Zur Erhöhung der Härte und Verschleißbeständigkeit wurde das Hartanodisieren an AMC-Rundprofilproben untersucht (vAW, Fa. Böttger Oberflächentechnik). Mit diesem Verfahren konnten weder die geforderten Härte- noch die Rauheitswerte erreicht werden. Es ist anzumerken, dass eine nachträgliche Politur der Proben nicht durchgeführt wurde; diese hätte die Rauheit möglicherweise verbessert, jedoch keinen signifikanten Einfluss auf die Härte gehabt.

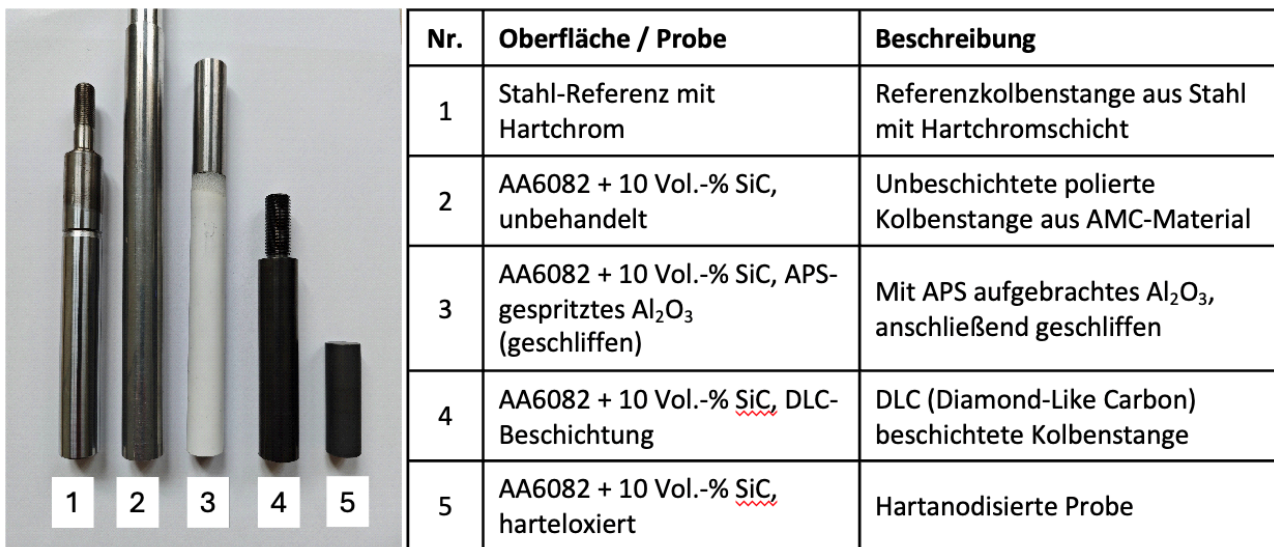


Abbildung 33: Verfahren zum Verbessern der Oberfläche von AMC-Rundprofilen.

Weiterhin wurden Beschichtungsversuche mittels thermischen Spritzens von Aluminiumoxid durchgeführt. Die resultierende Schicht erfüllt mit einer Härte von etwa 1100 HV die Anforderungen deutlich, weist jedoch nach dem Außenrundsleifen eine erhöhte Rauheit ( $R_a = 0,52 \mu\text{m}$ ) auf. Diese kann allerdings funktional vorteilhaft sein, da sie als Schmiermittelepot wirkt. Die thermisch gespritzte Schicht stellt somit eine vielversprechende Oberflächenlösung dar, bedarf jedoch weiterer Untersuchungen.

Durch den, ebenfalls im Projektverlauf zum PA beigetretenen Partner Fa. Oerlikon, wurde kam zudem ein PVD-Verfahren zum Einsatz. Durch dieses Verfahren wird eine amorphe Kohlenstoffschicht (Diamond-like Carbon, DLC) erzeugt (vgl. Abbildung 34), welche neben einer sehr hohen Verschleißfestigkeit auch einen tribologischen Film ausbildet, um die Reibung zu minimieren. Die Schicht weist eine Härte von über 2000 HV bei einer Schichtdicke von ca. 5–10  $\mu\text{m}$  auf. Aufgrund dieser geringen Schichtdicke entspricht die Oberfläche nach der Beschichtung praktisch der des Substrats.



Abbildung 34: Kolbenstangenabschnitte aus a) Stahl hartverchromt b) AMC mit DLC beschichtet.

### Komponentenuntersuchungen:

In der anschließenden Versuchsreihe wurde das mechanische Verhalten der Kolbenstange unter statischer Biegebelastung mittels Dreipunkt-Biegeversuch gemäß den Herstellervorgaben untersucht (Abbildung 35). Die Kolbenstange wurde dabei auf zwei zylindrischen Auflagern mit einer Stützweite von 280 mm gelagert. Die Krafteinleitung erfolgte mittig über einen Prüfkörper mit 10 mm Durchmesser. Um die Einbausituation im Dämpfer möglichst realitätsnah abzubilden, wurde die Last nicht direkt auf die Kolbenstange aufgebracht, sondern über einen Adapter eingeleitet. Dieser simuliert die Kraftübertragung über das axiale Gleitlager beziehungsweise die Führungsbuchse des Dämpfersystems. Die Prüfung erfolgte weggesteuert bis zu einer maximalen Durchbiegung von 60 mm. Durch den gewählten Versuchsaufbau konnte das Biegeverhalten der Kolbenstange unter anwendungsnahen Randbedingungen untersucht werden.

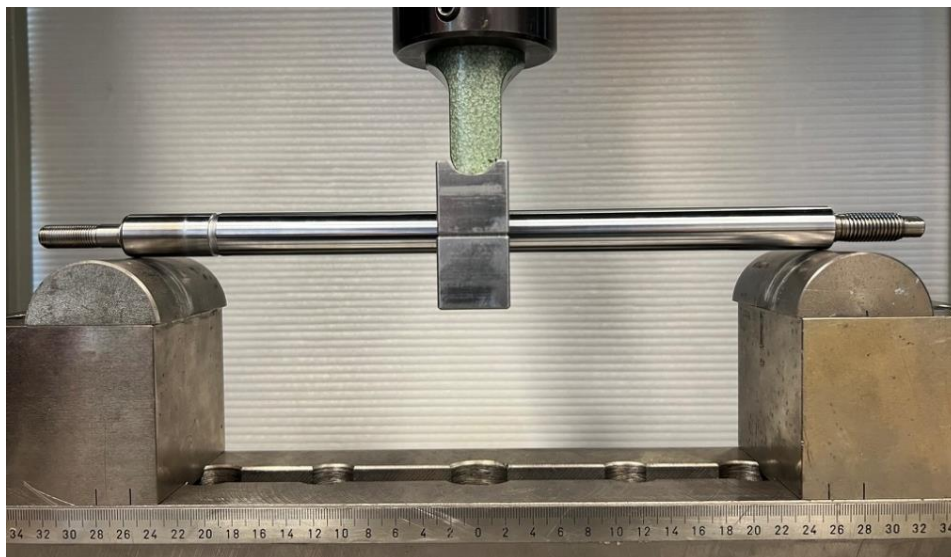


Abbildung 35: Testaufbau für den Dreipunkt-Biegeversuch der Kolbenstangen.

Für die zweite Untersuchungsreihe wurde das isolierte Reibungsverhalten der Kolbenstange untersucht, um den Einfluss unterschiedlicher Oberflächenzustände und Beschichtungen zu bewerten (Abbildung 36). Hierfür wurde ein Prüfaufbau verwendet, bestehend aus einem ölgefüllten zylindrischen Gehäuse und dem Dichtungs-Führungs-Element. Die Kammer ist grundsätzlich druckbeaufschlagbar, wurde im Rahmen dieser Untersuchungen jedoch bei atmosphärischem Druck betrieben. Eine Ausgleichsleitung sorgte dabei für konstante Randbedingungen während der Messungen. Im Fokus der Untersuchung standen die beiden

tribologisch relevanten Kontaktstellen der Kolbenstange: zum einen der Kontakt zwischen Kolbenstange und Dichtung, zum anderen der Kontakt zwischen Kolbenstange und Führungsbuchse beziehungsweise Gleitlager. Diese beiden Schnittstellen bestimmen maßgeblich das Reibungsverhalten des Dämpfers und wurden daher gezielt untersucht.

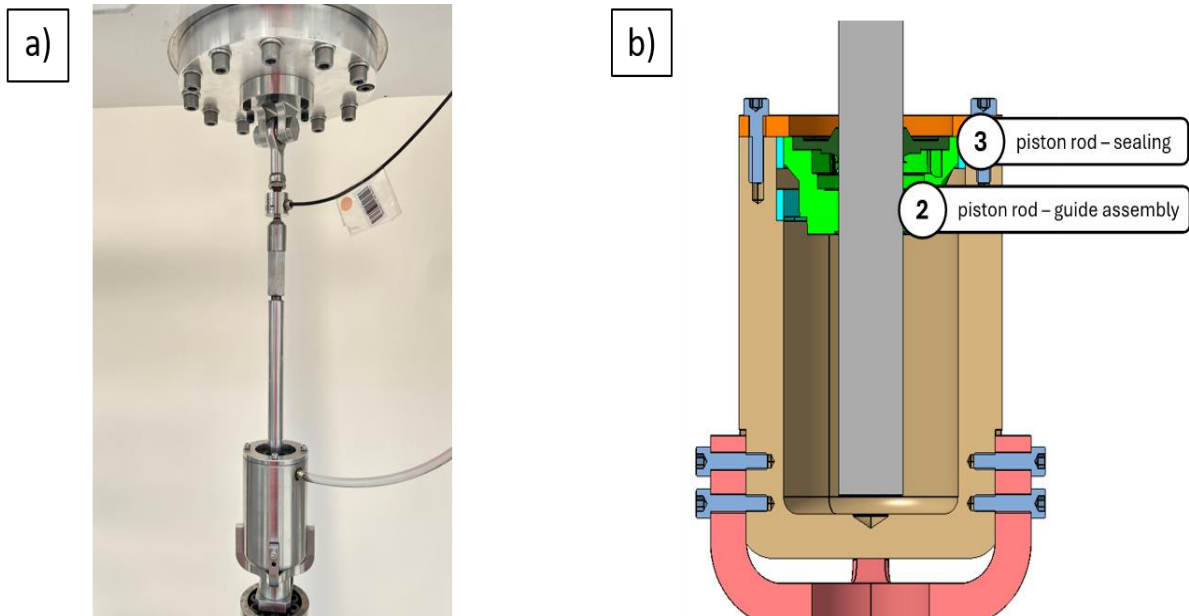


Abbildung 36: a) Apparat zur isolierten Reibungsmessung b) CAD-Querschnittsdarstellung des Prüfaufbaus.

Das Messverfahren wurde so ausgelegt, dass sowohl die Gleitreibung als auch das Losbrechverhalten der Kolbenstange untersucht werden konnten. Zur Bestimmung der Gleitreibung wurde die Kolbenstange mit einer konstanten Geschwindigkeit von 0,5 mm/s in Zug- und Druckrichtung verfahren. Dabei wurde die stationäre Reibungskraft erfasst. Zur Untersuchung des Losbrechverhaltens erfolgte die Bewegung der Kolbenstange mit einer höheren Geschwindigkeit von 100 mm/s. Der maximale Kraftanstieg zu Beginn der Bewegung wurde dabei als Losbrechkraft ausgewertet. Dadurch konnten sowohl die dynamischen als auch die statischen Reibungsanteile charakterisiert werden. Der Prüfaufbau ermöglicht einen reproduzierbaren Vergleich unterschiedlicher Kolbenstangen- und Beschichtungsvarianten unter definierten Randbedingungen. Die Ergebnisse dienen insbesondere zur Bewertung der tribologischen Leistungsfähigkeit sowie zur Identifikation geeigneter Oberflächen- und Beschichtungssysteme für AMC-Kolbenstangen.

#### Dichtungs-Führungs-Element:

Im Rahmen der Arbeit wurde das Dichtungs-Führungs-Element aus Sinterstahl hinsichtlich seiner Funktion und mechanischen Anforderungen analysiert. Ziel war die Substitution durch AMC. Auf Basis eines 3D-Scans des Referenzbauteils erfolgte die Rekonstruktion der Geometrie. Darauf aufbauend wurde eine Sinterform (Abbildung 37 a) zur Herstellung des Bauteils entwickelt.

Zur Bewertung der Bauteilbelastung wurde eine FEM-Analyse (Abbildung 37 b) durchgeführt, mit der insbesondere Spannungsverteilungen und kritische Bereiche identifiziert wurden. Parallel dazu wurde eine geeignete Sinterform entwickelt. Diese wurde axial geteilt und segmentiert ausgeführt, um sowohl eine gleichmäßige Verdichtung während des Pressvorgangs als auch eine möglichst einfache Entformung zu gewährleisten. Besonderes Augenmerk lag auf der Reduktion von Nachbearbeitungsaufwand, da die Bearbeitung von AMC-Werkstoffen aufgrund der keramischen Verstärkung erschwert ist.

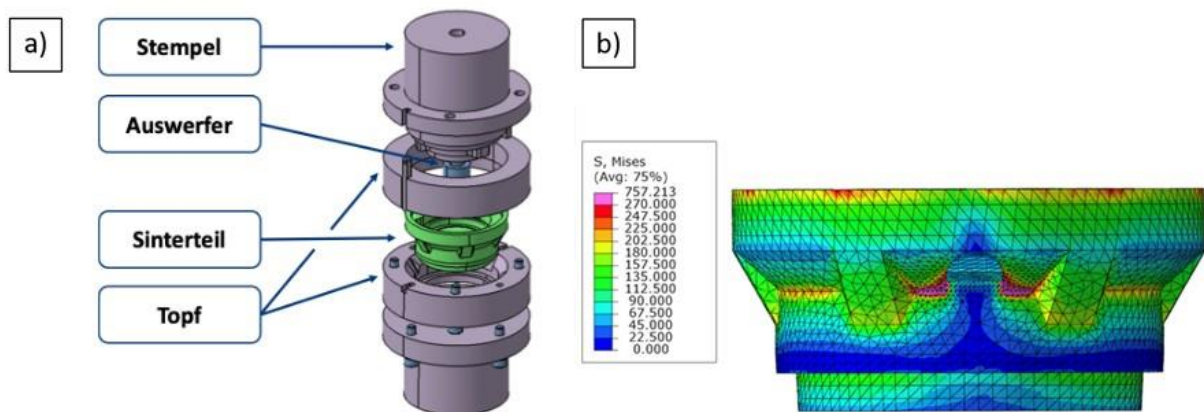


Abbildung 37: a) Mehrteilige Sinterform für das Dichtungs-Führungs-Element b) Spannungsverteilung des belasteten Dichtungs-Führungs-Elements.

Die Fertigung des Bauteils erfolgte mittels Spark-Plasma-Sintern (SPS). Dieses Verfahren wurde aufgrund seiner kurzen Prozesszeiten und vergleichsweise niedrigen Sintertemperaturen gewählt. Während des Prozesses traten insbesondere beim Entformen Herausforderungen auf. Aufgrund des unterschiedlichen thermischen Ausdehnungsverhaltens zwischen Werkstoff und Werkzeug kam es zu erhöhten Klemmkraften, wodurch das Bauteil auf dem Stempel haften blieb. Zur Verbesserung dieses Verhaltens wurden konstruktive Anpassungen der Formgeometrie betrachtet. Nach dem Sintern waren zusätzliche Nachbearbeitungsschritte erforderlich, unter anderem zur Herstellung funktionaler Durchbrüche und Passungen.

Abschließend wurde das Bauteil experimentell validiert. Hierfür wurde ein spezifischer Prüfaufbau entwickelt, da keine standardisierten Prüfverfahren für diese Anwendung existieren. Die Belastung erfolgte unter realitätsnahen Bedingungen hauptsächlich in axialer Richtung mittels einer Universalprüfmaschine. Vergleichsuntersuchungen wurden mit dem Referenzbauteil, AMC sowie mit einer unverstärkten Aluminiumvariante durchgeführt.

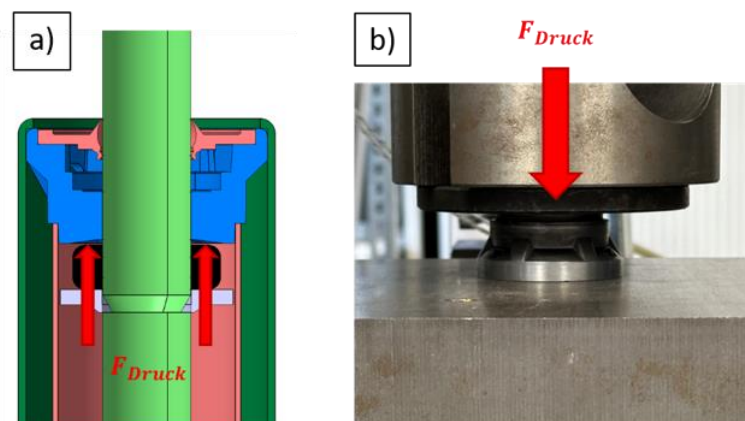


Abbildung 38: a) Schnittdarstellung vom Schwingungsdämpferauschnitt zur Darstellung der Belastung b) abgeleitete Bauteilprüfung des Dichtungs-Führungs-Elements.

### Validierung des modifizierten Demonstrators:

Zum geplanten Projektabschluss wurden zwei Schwingungsdämpfer der Hinterachse des Versuchsfahrzeugs mit einer beschichteten AMC-Kolbenstange sowie einem aus Aluminium gesinterten Dichtungs-Führungs-Element ausgestattet und in das Fahrzeug integriert.

Als Versuchsfahrzeug kam ein VW ID.4 (Abbildung 39a) mit einer Gesamtmasse von 2.500 kg zum Einsatz, wobei sich die Achslast auf 1.380 kg an der Vorderachse und 1.120 kg an der Hinterachse verteilte. Die Erprobung erfolgte auf dem unternehmensinternen Prüfgelände von Volkswagen in Wolfsburg und umfasste verschiedene hochdynamische Anregungen sowie definierte Einzelereignisse.

Zur Bewertung des Schwingungsverhaltens wurde die Aufbaubeschleunigung am Fahrzeugdach mithilfe eines Messsystems von Racelogic (Abbildung 39 b) erfasst. Die aufgenommenen Messdaten wurden anschließend mit den Ergebnissen der Referenzbauteile verglichen, um eine fundierte Bewertung der Leistungsfähigkeit der entwickelten Komponenten zu ermöglichen.



Abbildung 39: a) Versuchsfahrzeug VW ID.4 (Quelle: Volkswagen); b) Beschleunigungsaufnehmer von Racelogic (Quelle: Racelogic).

## Erzielte Ergebnisse:

### Kolbenstange:

#### Tribologisches Verhalten:

Die Oberflächentopografie wurde an einem Laser-Scanning-Mikroskop (Keyence VK-X) im 3D-Modus erfasst (Abbildung 40a). Pro Probe wurden drei Messstellen entlang der Kolbenstange aufgenommen (Positionen A, B, C mit jeweils 50 mm Abstand) und über den Mittelwert ausgewertet (Abbildung 40b). Vor der Auswertung erfolgte eine Konturkorrektur unter Berücksichtigung des Kolbenstangendurchmessers; die Profilauswertung wurde gemäß ISO 13565-2 mit einer Cut-off-Wellenlänge  $\lambda_n = 0,08$  durchgeführt.

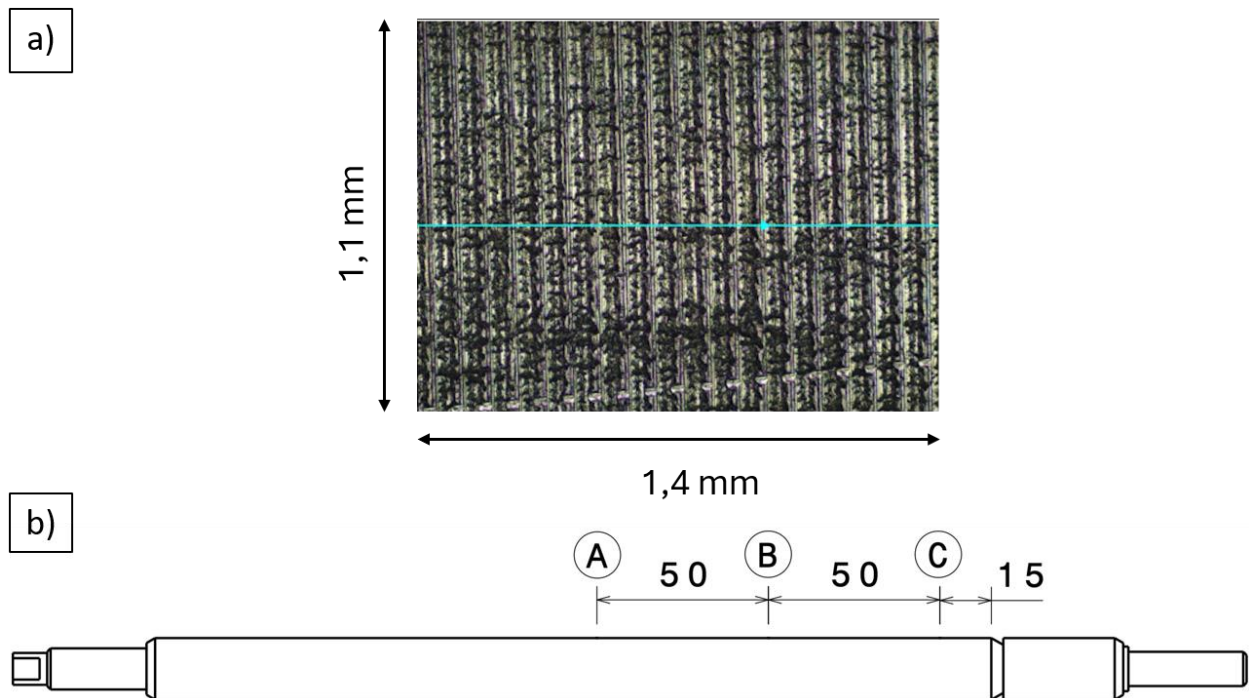


Abbildung 40: a) Darstellung des 1,1 x 1,4 mm<sup>2</sup> großen Auswertebereichs LSM; b) Messstellen an der Kolbenstange zur Bewertung der Oberfläche.

Die Rauheitsparameter aller untersuchten Oberflächenzustände sind in Tabelle 11 zusammengefasst. Die unbeschichtete, abgedrehte AMC-Oberfläche ( $R_a = 1,1 \mu\text{m}$ ;  $R_z = 5,4 \mu\text{m}$ ) liegt deutlich über der Stahl-Referenz mit Hartchromschicht und Superfinish ( $R_a = 0,3 \mu\text{m}$ ;  $R_z = 2,6 \mu\text{m}$ ). Durch reines Polieren der AMC-Kolbenstange lassen sich die Rauheitswerte ( $R_a = 0,4 \mu\text{m}$ ;  $R_z = 3,1 \mu\text{m}$ ) auf Referenzniveau absenken; die geforderte Oberflächenhärte wird damit jedoch nicht erreicht. Die DLC-Beschichtung bildet die Substrattopografie weitgehend ab ( $R_a = 1,6 \mu\text{m}$ ;  $R_z = 8,3 \mu\text{m}$ ) – mit deutlich erhöhter Spitzenrauheit  $R_{pk}$  und verkleinerter Tiefenrauheit  $R_{vk}$  gegenüber der unbeschichteten AMC-Variante.

Tabelle 11: Rauheitsparameter der untersuchten Oberflächenvarianten der Kolbenstange (Auswertung nach ISO 13565-2).

Variante	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_k$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{pk}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{vk}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$M_{r1}$ [%]	$M_{r2}$ [%]
Ref. Stahl + Hartchrom + Superfinish	0,3	2,6	1,0	0,7	0,9	8,9	86,6
AMC abgedreht	1,1	5,4	3,7	0,7	2,0	4,4	88,5
AMC poliert	0,4	3,1	1,0	0,7	1,5	9,9	85,0
AMC + DLC	1,6	8,3	5,2	3,1	1,4	13,0	95,4

Aus den Abbott-Firestone-Kurven der unbeschichteten und der DLC-beschichteten AMC-Kolbenstange (Abbildung 41) sowie dem direkten Vergleich mit der Stahl-Referenz (Abbildung 42) wird ersichtlich, dass das DLC-Verfahren den Materialanteilskenwert  $M_{r2}$  von 90,5 % auf 92,1 % anhebt – ein Hinweis auf eine verbesserte Tragfähigkeit der Kontaktfläche. Gleichzeitig steigt der Spitzenanteil  $R_{pk}$  durch das nachgelagerte Schleifen leicht an. Die Stahl-Referenz erreicht aufgrund des Hartchrom-Superfinish-Prozesses einen niedrigeren  $M_{r1}$  (8,9 %) bei deutlich geringerer Gesamtrauheit.

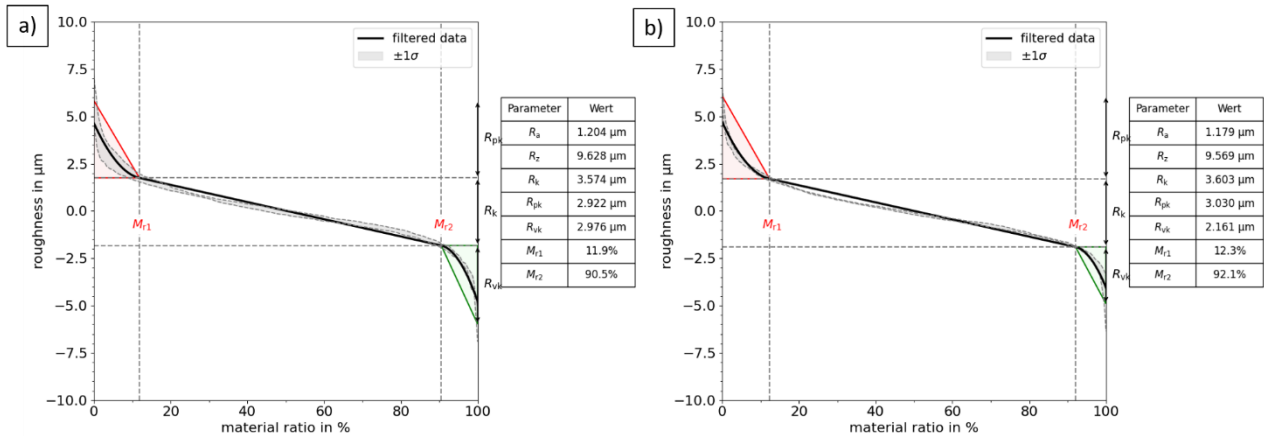


Abbildung 41: Abbott-Firestone-Kurven der AMC-Kolbenstange im Vergleich: a) unbeschichtet, abgedreht; b) DLC-beschichtet und geschliffen.

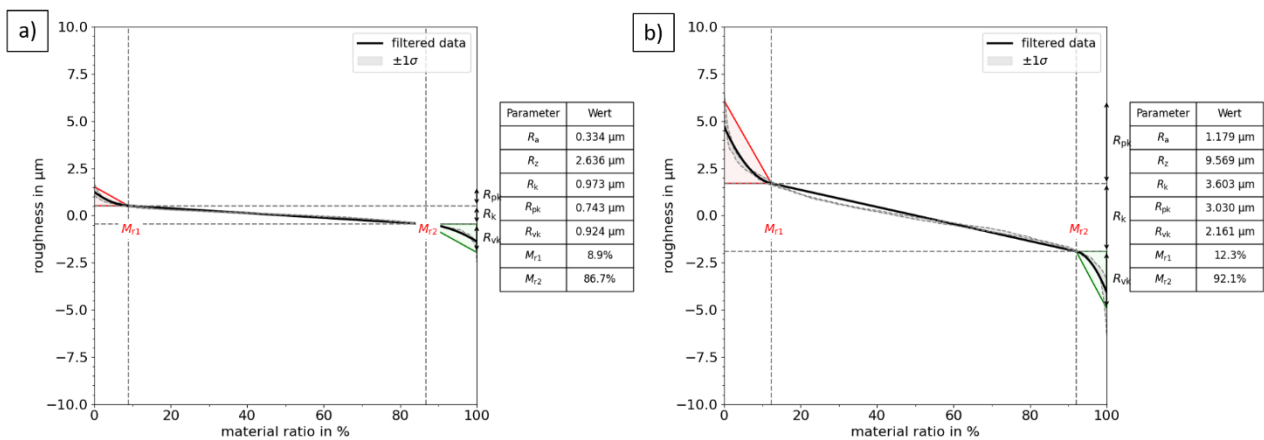


Abbildung 42: Abbott-Firestone-Kurven der Kolbenstangen aus a) Stahl-Referenz mit Hartchrom + Superfinish b) AMC (EN AW-6082 + 15 vol.-%  $\text{SiC}_p$ ) mit DLC-Beschichtung und Schliff.

Die Reibungsuntersuchungen wurden in zwei Konfigurationen durchgeführt. Bei der Gesamtreibungsmessung, dargestellt in Abbildung 43, am Dämpfer ( $N = 3$ ,  $v = 0,5 \text{ mm/s}$ ) wurde die Reibungskraft am kompletten Dämpfer aufgenommen; die Ausschubkraft des Dämpfers wurde dabei in Abhängigkeit vom Hub kompensiert. Die Auswertung erfolgte als Mittelwert der gefilterten Reibungskräfte. Trotz der höheren Substratrauheit zeigt die DLC-beschichtete AMC-Kolbenstange mit einer mittleren Reibungskraft von  $F_{rm} = 19,5 \text{ N}$  und einer Reibarbeit von  $W_r = 1,95 \text{ J}$  einen geringfügig niedrigeren Wert als die Stahl-Referenz mit  $F_{rm} = 20,9 \text{ N}$  und  $W_r = 2,09 \text{ J}$ .

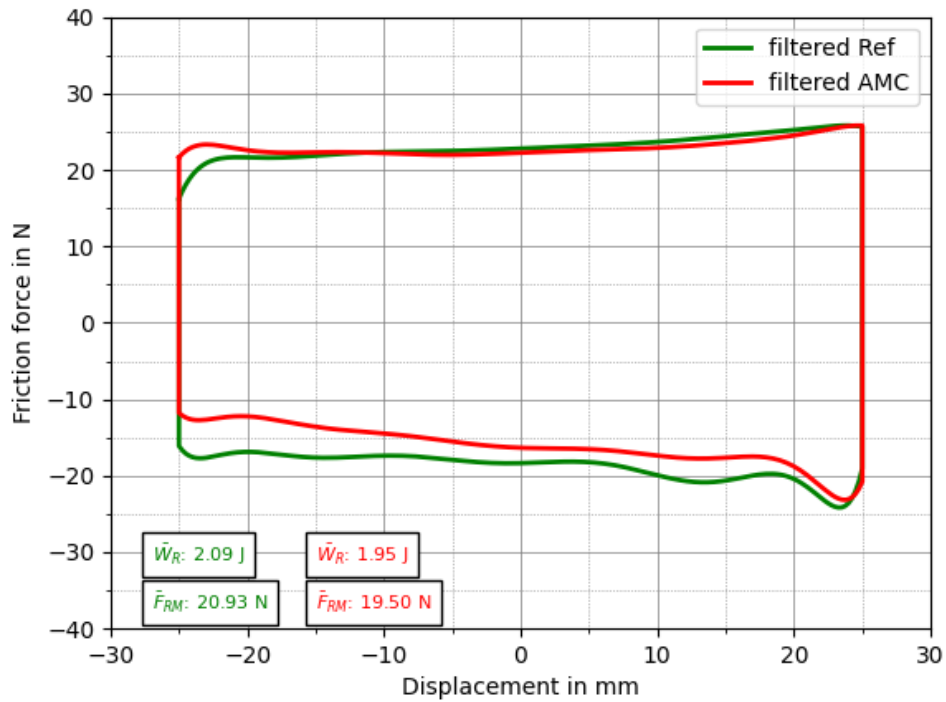


Abbildung 43: Gesamtreibkraft des Dämpfers über den Verfahrenweg ( $N = 3, v = 0,5 \text{ mm/s}$ ) – Stahl-Referenz (grün) und AMC mit DLC-Beschichtung (rot).

Weiterhin wurde, wie in Abbildung 44 dargestellt, die Reibungskraft isoliert bestimmt. Die isolierte Messung bestätigt das Ergebnis der Gesamtreibungsmessung: Die DLC-beschichtete AMC-Variante ( $F_{rm} = 7,66 \text{ N}$ ;  $W_r = 0,15 \text{ J}$ ) erreicht das Niveau der Stahl-Referenz ( $7,85 \text{ N}$ ;  $0,16 \text{ J}$ ), während die unbeschichtete AMC-Kolbenstange erhöhte Reibung aufweist ( $9,13 \text{ N}$ ;  $0,18 \text{ J}$ ).

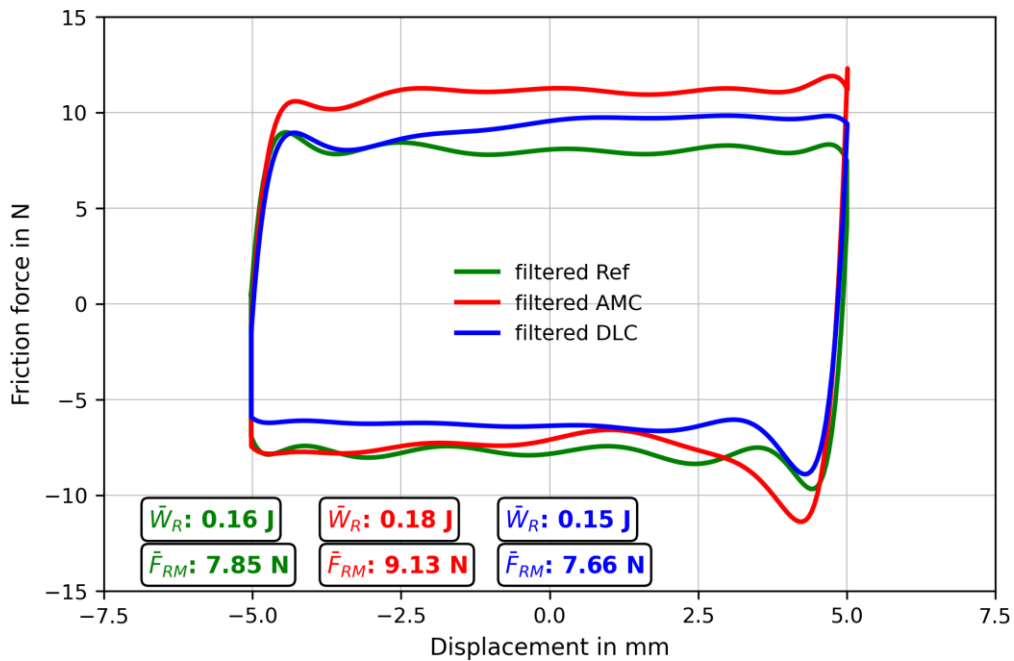


Abbildung 44: Isolierte Reibungskraft Kolbenstange – Dichtung ( $N = 5, v = 0,5 \text{ mm/s}$ ) im Vergleich für Referenz (grün), AMC unbeschichtet (rot) und AMC mit DLC (blau).

Zur Bewertung des Losbrechverhaltens wurde der gleiche Aufbau ruckartig mit erhöhter Verfahrensgeschwindigkeit beaufschlagt (Abbildung 45). Die DLC-beschichtete AMC-Kolbenstange weist auch hier deutlich geringere Losbrechmomente auf als die unbeschichtete AMC-Variante; die Werte liegen im Bereich der Stahl-Referenz.

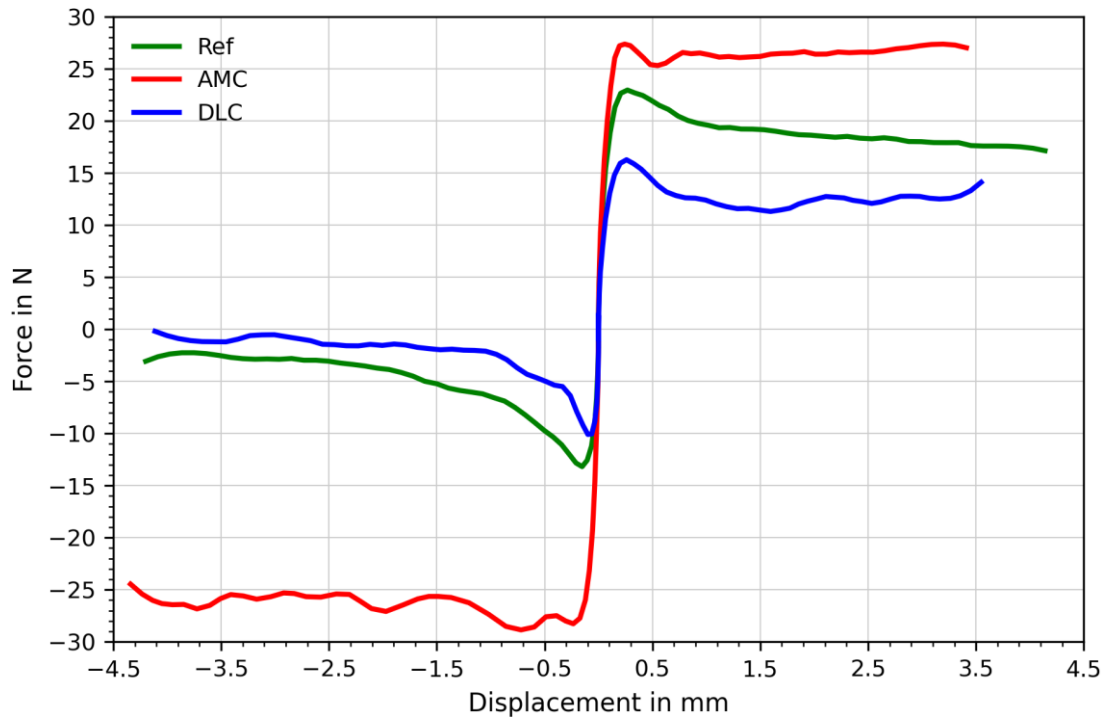


Abbildung 45: Losbrechkraft im Übergang Stillstand/Bewegung ( $n=5$ ,  $v = 100 \text{ mm/s}$ ) für Referenz, AMC unbeschichtet und AMC mit DLC.

#### Mechanisches Verhalten:

Das mechanische Verhalten der entwickelten AMC-Kolbenstangen wurde mithilfe von Dreipunkt-Biegeversuchen untersucht und mit einer konventionellen Stahlkolbenstange (D18 mm) verglichen (Abbildung 46). Ziel der Untersuchungen war die Bewertung der strukturellen Leistungsfähigkeit der AMC-Varianten hinsichtlich Steifigkeit, Tragfähigkeit und Energieabsorption.

Die Ergebnisse der Kraft-Weg-Kurven in Tabelle 12 zeigen deutliche Unterschiede zwischen den untersuchten Werkstoffvarianten. Die Stahl-Referenz erreicht mit einer Steifigkeit von 2140 N/mm den höchsten Wert im Vergleich der untersuchten Proben. Die AMC-Variante mit einem Durchmesser von 18 mm weist dagegen eine deutlich reduzierte Steifigkeit von 1037 N/mm auf. Durch die Erhöhung des Durchmessers auf 20 mm konnte die Steifigkeit der AMC-Kolbenstange auf 1561 N/mm gesteigert werden.

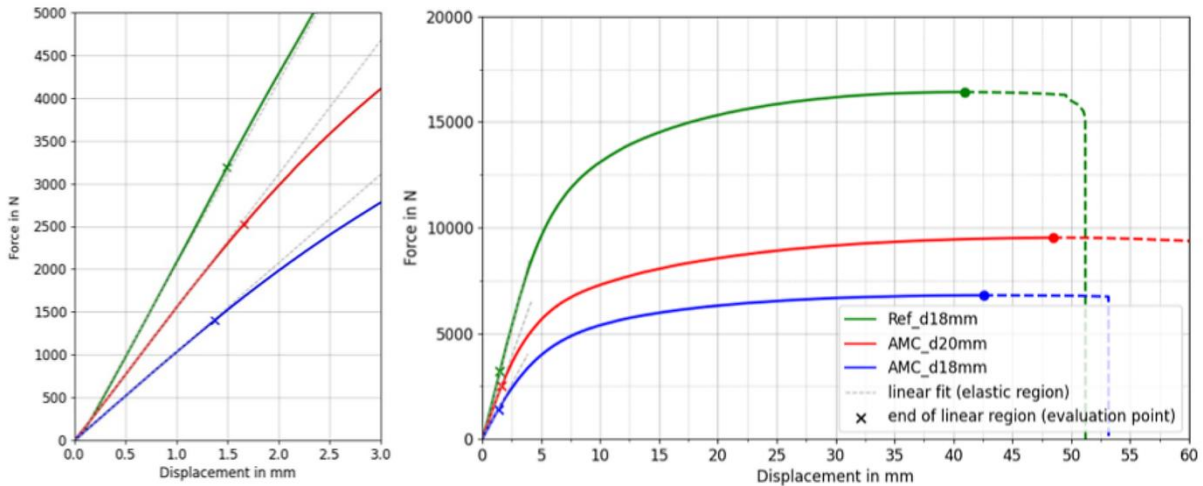


Abbildung 46: Kraft-Weg-Verläufe aus Dreipunkt-Biegeversuchen der Kolbenstangen aus Referenzstahl (D18 mm, grün) und AMC (EN AW-6082 mit 15 Vol.-% SiC<sub>p</sub> T4-Varianten; D18, blau; D20, rot).

Ein vergleichbares Verhalten zeigt sich bei der maximal aufgenommenen Kraft während des Biegeversuchs. Während die Stahlkolbenstange eine maximale Kraft von 16.415 N erreicht, liegen die Werte der AMC-Varianten bei 6.793 N (D18) beziehungsweise 9.524 N (D20). Die Vergrößerung des Durchmessers führt somit zu einer deutlichen Verbesserung der Tragfähigkeit, kompensiert jedoch die werkstoffbedingten Unterschiede zum Stahl nur teilweise.

Auch die maximal erreichbare Biegespannung zeigt die Grenzen des eingesetzten Verbundwerkstoffs auf. Die Stahlreferenz erreicht eine Biegespannung von 1560 N/mm<sup>2</sup>, während die AMC-Varianten lediglich 685 N/mm<sup>2</sup> (D18) beziehungsweise 899 N/mm<sup>2</sup> (D20) erzielen. Damit bleiben beide AMC-Ausführungen unterhalb der angestrebten Zielgröße von 1000 N/mm<sup>2</sup>. Insbesondere für hochbelastete Anwendungen stellt dies ein relevantes Auslegungskriterium dar.

Die Verformungsenergie folgt ebenfalls diesem Trend. Die Stahlkolbenstange absorbiert mit 732 J die höchste Energie, während die AMC-Varianten bei 316 J (D18) beziehungsweise 501 J (D20) liegen. Dies verdeutlicht die geringere Energieaufnahmefähigkeit der AMC-Varianten vor dem Versagen.

Tabelle 12: Gemessene mechanische Eigenschaften der Kolbenstangen (AMC: EN AW-6082 mit 15 Vol.-% SiC<sub>p</sub> + T4).

Werkstoff	Durchmesser [mm]	Steifigkeit [N/mm]	Biege- spannung [N/mm <sup>2</sup> ]	Max. Kraft [N]	Verformungs- energie [J]
AMC	18	1037	685	6793	316
AMC	20	1561	899	9524	501
Stahl	18	2140	1560	16415	732

Die insgesamt reduzierte mechanische Leistungsfähigkeit der AMC-Kolbenstangen ist im Wesentlichen auf den geringeren Elastizitätsmodul sowie die niedrigere Festigkeit des AMCs zurückzuführen. Wie in Formel (1) berechnet, müsste der Durchmesser der AMC-Kolbenstange auf 22,5 mm erhöht werden, um die gleiche Steifigkeit wie die Referenzkolbenstange aus Stahl zu erreichen. Eine solche geometrische Anpassung war im Rahmen des Demonstrators jedoch nicht realisierbar, da hierfür umfangreiche Änderungen angrenzender Dämpferkomponenten notwendig geworden wären. Darüber hinaus sind derartige Durchmesser in aktuellen

Dämpferanwendungen nur selten anzutreffen, sofern keine hohlen Kolbenstangegeometrien eingesetzt werden.

Zusätzlich deuten metallographische Untersuchungen darauf hin, dass die mechanischen Eigenschaften der AMC-Proben durch eine nicht vollständig homogene Verteilung der SiC-Partikel beeinflusst werden. Lokale Inhomogenitäten innerhalb der Mikrostruktur können zu Spannungskonzentrationen und damit zu einer reduzierten Festigkeit beitragen. Hier besteht weiteres Optimierungspotenzial für zukünftige Werkstoff- und Prozessentwicklungen.

Unter Leichtbaugesichtspunkten sind die Ergebnisse dennoch positiv zu bewerten. Aufgrund der deutlich geringeren Dichte des AMC-Werkstoffs konnte das Bauteilgewicht von etwa 611 g bei der Stahlkolbenstange auf rund 221 g bei der AMC-Variante reduziert werden. Dies entspricht einer Gewichtsersparnis von etwa 66 % pro Bauteil und stellt insbesondere im automobilen Leichtbau einen erheblichen Vorteil dar.

Im Hinblick auf den vorgesehenen Einsatz im Demonstrator werden die erreichten mechanischen Eigenschaften als ausreichend bewertet. Da die Kolbenstangen in Hinterachsdämpfern eingesetzt werden und dort vergleichsweise geringe Querlasten auftreten, sind die Anforderungen an die Biegefestigkeit deutlich geringer als beispielsweise in radführenden Fahrwerkskomponenten. Unter diesen Randbedingungen wird die AMC-Kolbenstange daher als geeignet für die prototypische Fahrzeugerprobung angesehen.

#### Ergebnisdiskussion Kolbenstange:

Die Kolbenstange stellt die kritischste der untersuchten Komponenten dar. Zwar konnte gegenüber der Stahlreferenz eine Gewichtsreduktion von rund 66 % erreicht werden, jedoch werden die erforderlichen mechanischen Sicherheitsreserven – insbesondere hinsichtlich der maximalen Biegespannung – unter den aktuellen Randbedingungen noch nicht vollständig erfüllt. Eine Vergrößerung des Kolbenstangendurchmessers würde die Steifigkeit sowie die Tragfähigkeit erhöhen, ist jedoch mit bestehenden Dämpferkonzepten nur eingeschränkt vereinbar und würde umfassende konstruktive Anpassungen auf Systemebene erfordern.

Die Ergebnisse zeigen zudem, dass die Funktionsfähigkeit von AMC-Kolbenstangen maßgeblich durch die Oberflächen- und tribologischen Eigenschaften bestimmt wird. Aufgrund der begrenzten Substrathärte reicht eine rein mechanische Nachbearbeitung nicht aus, um ein tribologisch konkurrenzfähiges Verhalten zu erzielen. Stattdessen ist der Einsatz geeigneter Beschichtungssysteme erforderlich.

Unter den untersuchten Ansätzen weisen DLC-Beschichtungen das größte Potenzial auf. Trotz einer vergleichbaren Oberflächenrauheit zur unbeschichteten AMC-Variante zeigt die DLC-beschichtete Kolbenstange ein deutlich verbessertes Reibungsverhalten. Dieses kann auf die Bildung scherermer Tribofilme sowie auf günstige Grenzflächenmechanismen zurückgeführt werden. Die Ergebnisse verdeutlichen damit die entscheidende Bedeutung tribologisch wirksamer Beschichtungssysteme für die Funktionalität der AMC-Komponenten.

Insgesamt bieten AMC-Kolbenstangen ein erhebliches Leichtbaupotenzial, erfordern jedoch eine abgestimmte Optimierung von Werkstoffeigenschaften, Oberflächenzustand und Systemauslegung. Die Einsatzfähigkeit wird somit nicht allein durch den Werkstoff selbst bestimmt, sondern durch das Zusammenspiel mechanischer, tribologischer und konstruktiver Randbedingungen.

### Dichtungs-Führungs-Element:

Zur Bewertung der strukturellen Belastbarkeit des gesinterten Dichtungs-Führungs-Elements wurde ein quasi-statischer axialer Druckversuch durchgeführt. Ziel der Untersuchung war die Bewertung der strukturellen Integrität des Dichtungs-Führungs-Elements unter anwendungsnahen Belastungsbedingungen. Hierzu wurden Kraft-Weg-Kurven (Weg = Verformung des Prüfkörpers) für die Referenzkomponente, das AMC-Material (EN AW-6082 mit 15 Vol.-% SiC<sub>p</sub> im T4-Zustand) sowie die Aluminiumlegierung EN AW-6082 in den Wärmebehandlungszuständen T4 und T6 aufgenommen und miteinander verglichen (Abbildung 47). Die Ergebnisse basieren auf jeweils drei Versuchen pro Variante (N = 3); zusätzlich wurden  $\pm 1\sigma$ -Hüllkurven dargestellt, um die Streuung zwischen den einzelnen Proben zu visualisieren.

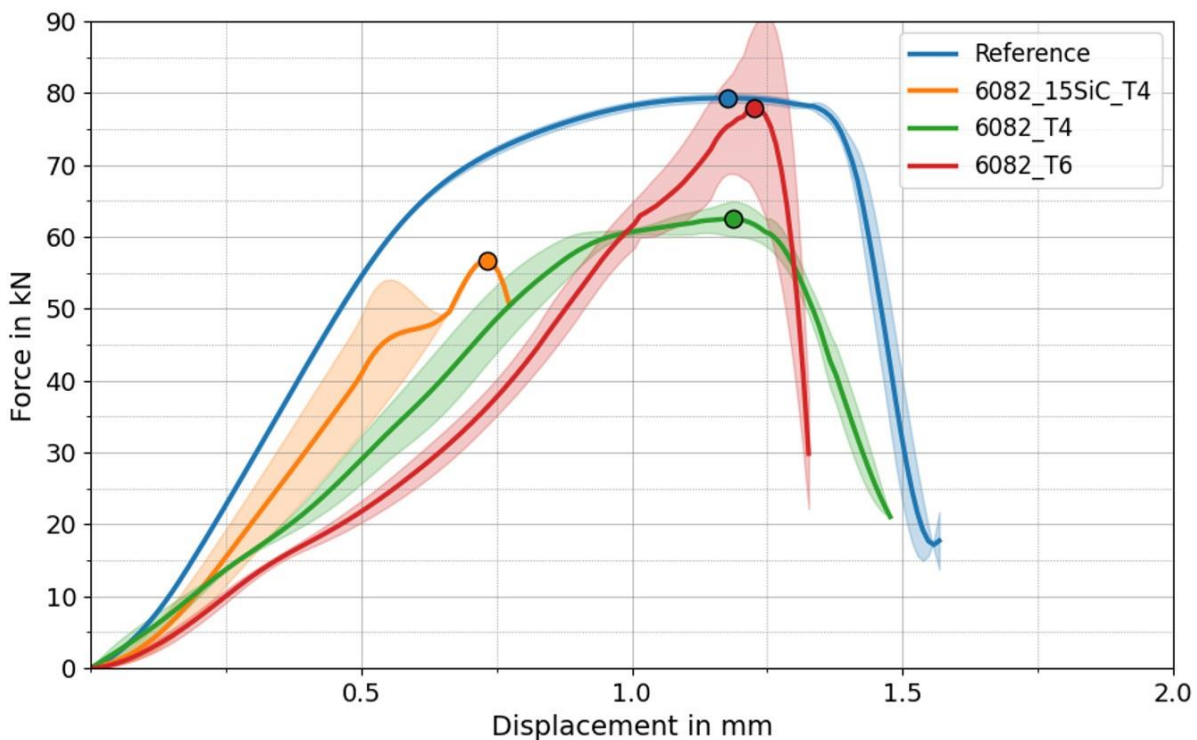


Abbildung 47: Ergebnis der Druckversuche an Dichtungs-Führungs-Elementen, AMC vs. EN AW-6082-T4/T6 vs. Stahl-Referenz.

Die Ergebnisse zeigen, dass sämtliche untersuchten Materialvarianten die geforderte Konstruktionslast von 30 kN deutlich überschreiten. Damit erfüllen alle geprüften Werkstoffe grundsätzlich die mechanischen Mindestanforderungen für den vorgesehenen Einsatz im Dämpfersystem.

Das AMC-Material erreicht eine maximale Druckkraft von etwa 48 kN und liegt damit deutlich oberhalb der geforderten Grenzlaster. Die Aluminiumlegierung EN AW-6082 erzielt im T4-Zustand maximale Kräfte von rund 62 kN, während im T6-Zustand Spitzenwerte von etwa 78 bis 80 kN erreicht werden. Das mechanische Verhalten der T6-Variante nähert sich damit dem Niveau der Referenzkomponente an und zeigt insgesamt die höchste Tragfähigkeit aller untersuchten Leichtbauvarianten.

Neben den maximalen Kräften zeigen sich deutliche Unterschiede im Verformungs- und Versagensverhalten der Werkstoffe. Das AMC erreicht seine Spitzenlast bereits bei einer vergleichsweise geringen Verformung von etwa 1,0 mm. Nach Überschreiten der Maximalkraft tritt ein ausgeprägter Lastabfall auf, was auf eine begrenzte Duktilität sowie eine reduzierte strukturelle Stabilität des Verbundwerkstoffs hinweist. Dieses

Verhalten ist typisch für partikelverstärkte AMCs, bei denen die keramischen Verstärkungsphasen die Festigkeit erhöhen, gleichzeitig jedoch die plastische Verformbarkeit reduzieren.

Im Gegensatz dazu zeigen die Aluminiumlegierungen ein deutlich duktileres Verhalten. Sowohl EN AW-6082-T4 als auch EN AW-6082-T6 erreichen ihre maximale Belastbarkeit erst bei größeren Verformungen im Bereich von etwa 1,1 bis 1,25 mm. Darüber hinaus verläuft die Kraftabnahme nach Erreichen der Spitzenlast deutlich gradueller, was auf ein stabileres Verformungsverhalten und eine höhere Energieaufnahmefähigkeit schließen lässt.

Insbesondere die T6-Wärmebehandlung zeigt eine vorteilhafte Kombination aus hoher Festigkeit, ausreichender Duktilität und im Vergleich zu den substituierten Varianten guter Reproduzierbarkeit der Messergebnisse. Die geringe Streuung zwischen den Einzelversuchen deutet auf ein homogenes Werkstoff- und Fertigungsverhalten hin. Insgesamt weist EN AW6082 im T6-Zustand damit die günstigsten mechanischen Eigenschaften der untersuchten Aluminiumvarianten auf und erreicht ein Verhalten, das mit der Referenzkomponente vergleichbar ist.

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass sowohl das AMC-Material als auch die untersuchten Aluminiumlegierungen grundsätzlich für den Einsatz als Dichtungs-Führungs-Element geeignet sind. Während das AMC insbesondere unter Leichtbaugesichtspunkten Vorteile bietet, zeigen die Untersuchungen gleichzeitig, dass die reduzierte Duktilität bei der konstruktiven Auslegung berücksichtigt werden muss. Die Aluminiumlegierung EN AW-6082-T6 stellt dagegen einen ausgewogenen Kompromiss zwischen mechanischer Leistungsfähigkeit, Verformungsverhalten und Prozessstabilität dar und eignet sich daher besonders für hochbelastete Anwendungen innerhalb des Dämpfersystems.

Die lichtmikroskopischen Untersuchungen zeigen, dass die Stahlreferenz (Abbildung 48a und b) eine ausgeprägte Porosität aufweist und keine vollständig dichte Sinterstruktur besitzt. Die gemessene Härte beträgt  $90 \pm 3$  HV1.

Die mittels FAST/SPS-Prozess hergestellten Aluminium- und AMC-Komponenten zeigen dagegen eine nahezu vollständig verdichtete Mikrostruktur mit nur vereinzelt kleinen Poren (Abbildung 48 c–f). Nach der T4-Wärmebehandlung wurde insbesondere bei der Aluminiumlegierung eine zunehmende Mikroporosität innerhalb der Körner sowie an Korngrenzen beobachtet. Ursache hierfür könnte eingeschlossene Luft während des Sinterprozesses sein, die sich während der Wärmebehandlung ausdehnt. Die Härte der Aluminiumlegierung beträgt  $88 \pm 1$  HV1.

Wie bereits beim extrudierten Material festgestellt wurde, weist auch das AMC lokal unverstärkte Bereiche auf, die jedoch zufällig im Material verteilt sind. Eine signifikante Porosität ist nach dem Pressprozess nicht erkennbar. Mit einer Härte von  $147 \pm 3$  HV1 erreicht das AMC deutlich höhere Werte im Vergleich zur Aluminiumlegierung sowie zur Stahlreferenz.

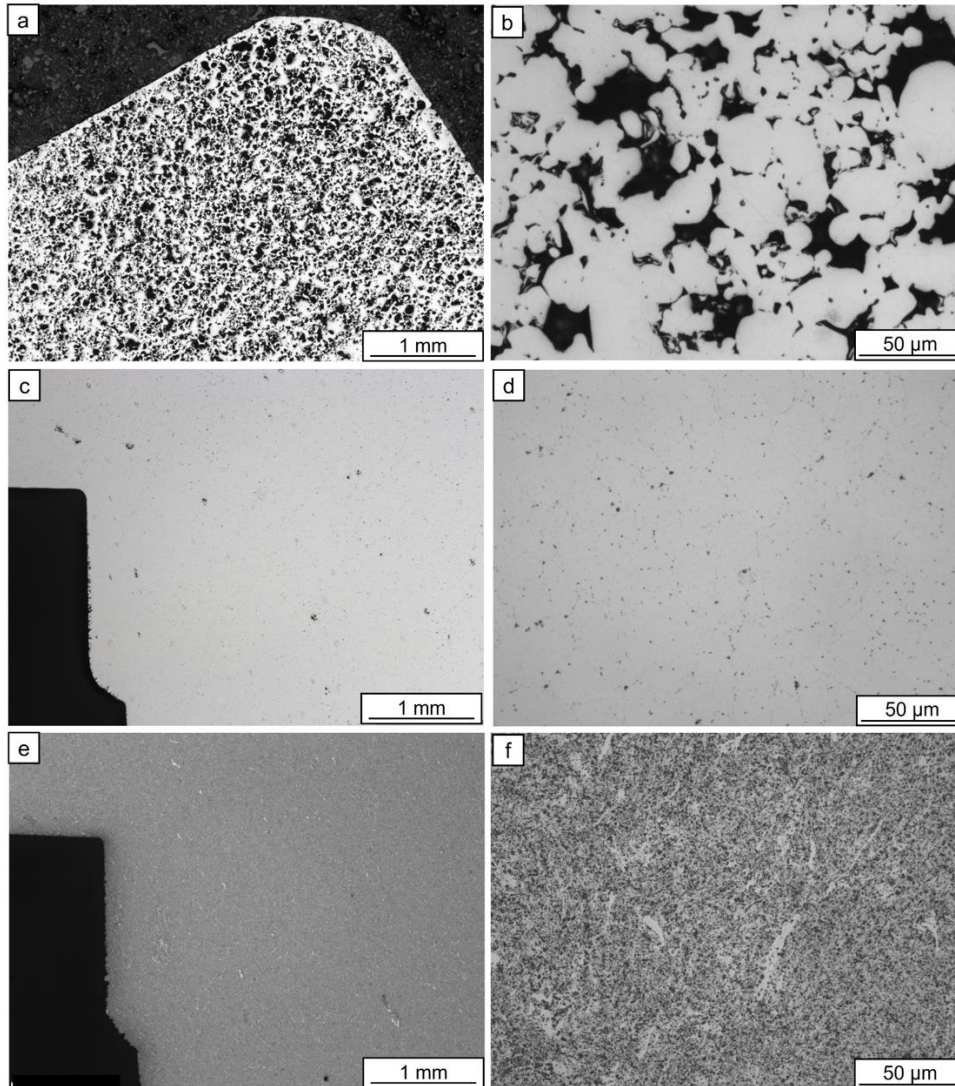


Abbildung 48: Mikrostruktur des Dichtungs-Führungs-Elements: a), b) Stahl c), d) EN AW-6082 e), f) EN AW-6082 + 20 Vol.-% SiC<sub>p</sub>.

Die Ergebnisse zeigen insgesamt, dass der FAST/SPS-Prozess eine hohe Materialverdichtung ermöglicht. Insbesondere das AMC zeichnet sich durch eine hohe Härte und eine nahezu dichte Mikrostruktur aus, während bei der unverstärkten Aluminiumlegierung wärmebehandlungsbedingte Mikroporosität berücksichtigt werden muss.

#### Ergebnisdiskussion Dichtungs-Führungs-Element

Die vorliegende Arbeit zeigt die grundsätzliche Eignung von Aluminium-Matrix-Verbundwerkstoffen (AMC) sowie EN AW-6082-basierten Werkstoffen für den Einsatz in automobilen Dämpferkomponenten auf Bauteilebene. Sämtliche untersuchten Materialvarianten erfüllen die geforderte Tragfähigkeit und bestätigen damit ihre generelle strukturelle Einsatzfähigkeit.

Die Ergebnisse verdeutlichen jedoch, dass partikelverstärkte AMCs eine reduzierte Duktilität sowie ein weniger stabiles Verhalten nach Erreichen der Maximallast aufweisen. Dies kann die strukturelle Robustheit unter bestimmten Belastungsbedingungen einschränken. Demgegenüber bietet die Aluminiumlegierung EN AW-6082 – insbesondere im T6-Zustand – eine vorteilhafte Kombination aus Festigkeit, Duktilität und guter Verarbeitbarkeit und erreicht gleichzeitig ein mechanisches Leistungsniveau, das mit der Referenzkomponente vergleichbar ist.

Darüber hinaus unterstreicht die deutliche Gewichtsreduktion von etwa 138 g auf 49 g pro Bauteil das erhebliche Leichtbaupotenzial aluminiumbasierter Verbundwerkstofflösungen für Anwendungen im automobilen Dämpfersystem.

Insgesamt bestätigen die Ergebnisse die grundsätzliche Eignung aluminiumbasierter Werkstoffe für Leichtbauanwendungen im Bereich von Dämpferkomponenten, verdeutlichen jedoch gleichzeitig die Notwendigkeit einer weiteren bauteilspezifischen Optimierung hinsichtlich des Werkstoffverhaltens, des Oberflächenzustands und der konstruktiven Auslegung.

#### **Auswertung Fahrversuch mit modifiziertem Dämpfer:**

Für den Fahrversuch wurden zwei Paar Abstimm dampfer (Abbildung 49) aufgebaut und entsprechend abgestimmt. Das erste Dämpferpaar wurde mit den serienmäßigen Referenzkomponenten ausgestattet, während das zweite Paar eine AMC-Kolbenstange mit DLC-Beschichtung sowie ein Dichtungs-Führungs-Element aus Aluminium erhielt.

Durch den Einsatz der Leichtbaukomponenten konnte eine deutliche Reduktion der Bauteilmasse erzielt werden. Die Masse der Kolbenstange verringerte sich von 611 g auf 221 g, während das Dichtungs-Führungs-Element von 138 g auf 49 g reduziert wurde. Insgesamt ergibt sich daraus eine Masseinsparung von 0,479 kg pro Dämpfer. Die Gesamtmasse des Abstimm dampfers konnte dadurch von 2,505 kg bei der Referenzvariante auf 2,026 kg in der AMC-Ausführung reduziert werden. Die Ergebnisse verdeutlichen das erhebliche Leichtbaupotenzial der entwickelten Komponenten und zeigen, dass sich durch den Einsatz aluminiumbasierter Verbundwerkstoffe signifikante Gewichtsvorteile auf Systemebene realisieren lassen.



*Abbildung 49: Abstimm dampfer von ZF a) Referenzkomponenten b) AMC-Kolbenstange mit DLC-Beschichtung und Dichtungs-Führungs-Element aus Aluminium.*

#### Dämpferkennlinien:

Die in Abbildung 50 dargestellten Dämpferkennlinien der linken und rechten Referenzdämpfer (rot und grün) zeigen lediglich geringe Abweichungen und liegen damit im üblichen Toleranzbereich. Die Kennlinien verlaufen weitgehend symmetrisch, wodurch ein gleichmäßiges Dämpfungsverhalten beider Dämpfer bestätigt wird. Insgesamt weisen die Referenzdämpfer somit ein unauffälliges und funktionsgerechtes Verhalten auf.

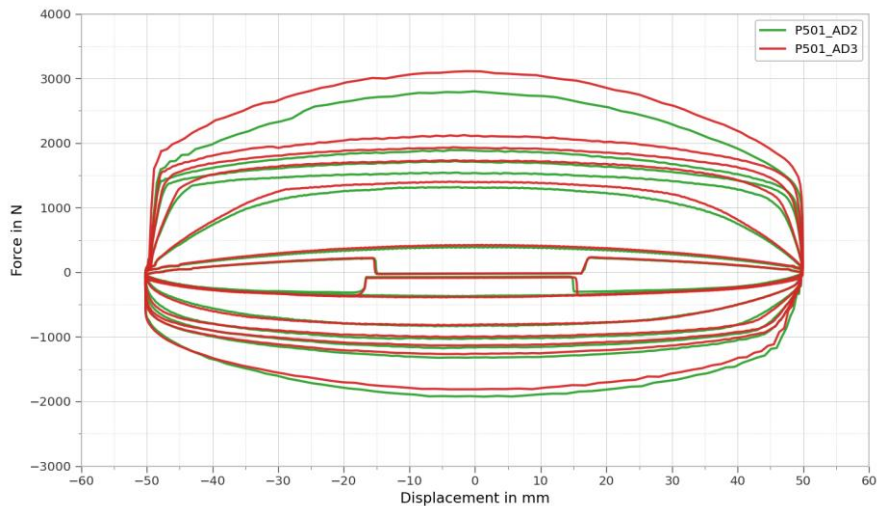


Abbildung 50: Dämpferkennlinien der Referenzdämpfer links und rechts (rot/grün).

Die in Abbildung 51 dargestellten Dämpferkennlinien der linken und rechten AMC-Dämpfer (rot und grün) zeigen ebenfalls lediglich geringe Abweichungen zueinander und liegen damit innerhalb des üblichen Toleranzbereichs. Die Kennlinien verlaufen weitgehend symmetrisch, wodurch ein gleichmäßiges Dämpfungsverhalten beider Dämpfer bestätigt wird.

Im Vergleich zur Referenz zeigt sich jedoch eine Abweichung der Dämpfungskraft von etwa 30 %. Diese Unterschiede sind auf die gewählte Ventileinstellung zurückzuführen und stehen nicht im Zusammenhang mit den eingesetzten AMC- beziehungsweise Aluminiumkomponenten. Insgesamt weisen die AMC-Dämpfer damit ebenfalls ein funktionsgerechtes und reproduzierbares Verhalten auf.

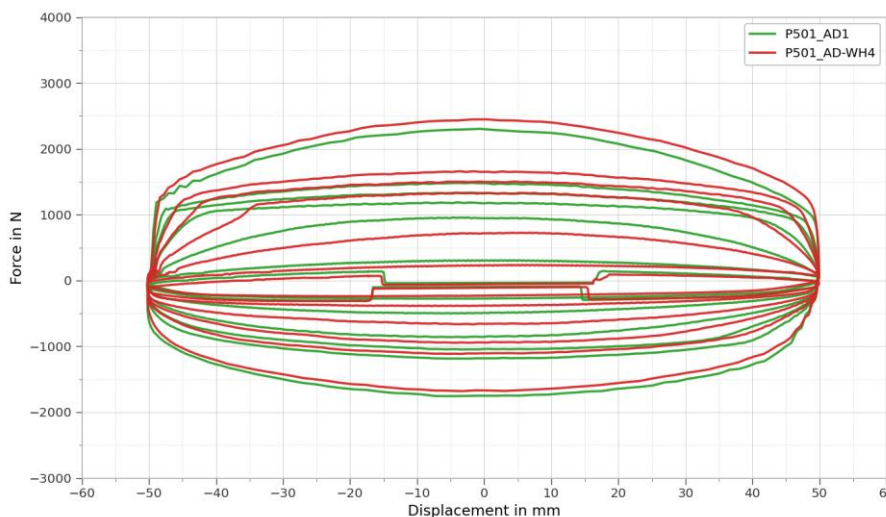


Abbildung 51: Dämpferkennlinien der AMC-Dämpfer links und rechts (rot/grün).

### Fahrversuche:

Zur vergleichenden Bewertung des Fahr- und Schwingungsverhaltens wurden Referenz- und AMC-Setup auf dem VW-Prüfgelände in Wolfsburg über ein definiertes Manöverportfolio gefahren. Für die Auswertung werden exemplarisch zwei hochdynamische Anregungen (wellige Teerstraße bei 100 km/h, Wechselwellen bei 15 km/h) sowie zwei diskrete Einzelereignisse (Speedbreaker 60 mm bei 15 km/h, Lombarda-Schwelle 120 mm bei 17 km/h) herangezogen. Erfasst wurde die Aufbaubeschleunigung am Fahrzeugdach. In allen

folgenden Diagrammen (Abbildung 52 bis Abbildung 55) ist das Referenz-Setup in grün und das AMC-Setup in rot dargestellt; die Aufbaubeschleunigung ist jeweils als durchgezogene, die Fahrgeschwindigkeit als gestrichelte Linie aufgetragen.

Beide Setups in Abbildung 52 zeigen einen nahezu deckungsgleichen Verlauf der Aufbaubeschleunigung über die gesamte Messstrecke. Die Spitzenwerte des AMC-Setups liegen ca. 10 % über der Referenz, der RMS-Wert der Aufbaubeschleunigung weicht um  $0,4 \text{ m/s}^2$  ab. Das Schwingungsverhalten auf stochastischer Anregung ist damit auf vergleichbarem Niveau.



Abbildung 52: Vergleich der Aufbaubeschleunigung und Fahrgeschwindigkeit auf welliger Teerstraße bei 100 km/h für Referenz- und AMC-Setup.

Im Manöver mit wechselseitigen Hindernissen (Abbildung 53) liegt der zeitliche Verlauf der Aufbaubeschleunigung beider Setups eng beieinander. Das AMC-Setup weist leicht erhöhte Amplituden und ein geringfügig verzögertes Einschwingen auf beides konsistent mit der weicheren Ventilkennlinie (vgl. Abbildung 51).

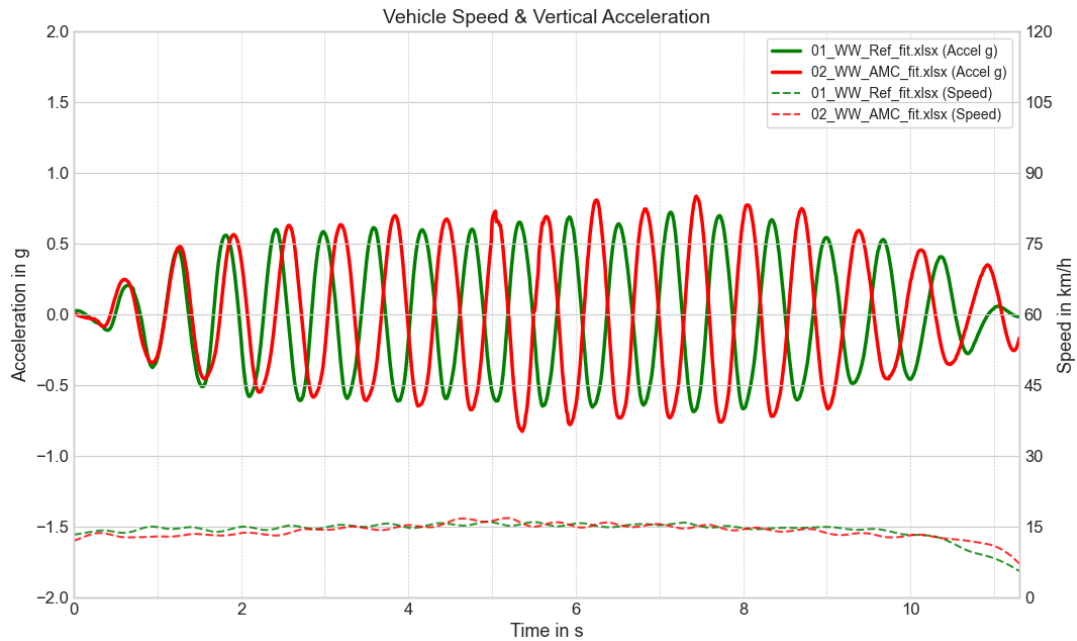


Abbildung 53: Vergleich der Aufbaubeschleunigung und Fahrgeschwindigkeit beim Überfahren von Wechselwellen bei 15 km/h für Referenz- und AMC-Setup.

Der charakteristische Stoß (Abbildung 54) beim Überfahren der Schwelle (Negativpeak bei  $t \approx 1,75$  s) ist mit  $-0,55$  g in beiden Konfigurationen identisch; ebenso stimmt die Differenz zum nachfolgenden positiven Peakwert mit  $1,05$  g (Referenz) bzw.  $1,07$  g (AMC) nahezu überein. Im Rückschwingen tritt der zweite positive Peak beim AMC-Setup mit etwa  $0,05$  s Zeitverzug auf, was die weichere Ventilabstimmung bestätigt.

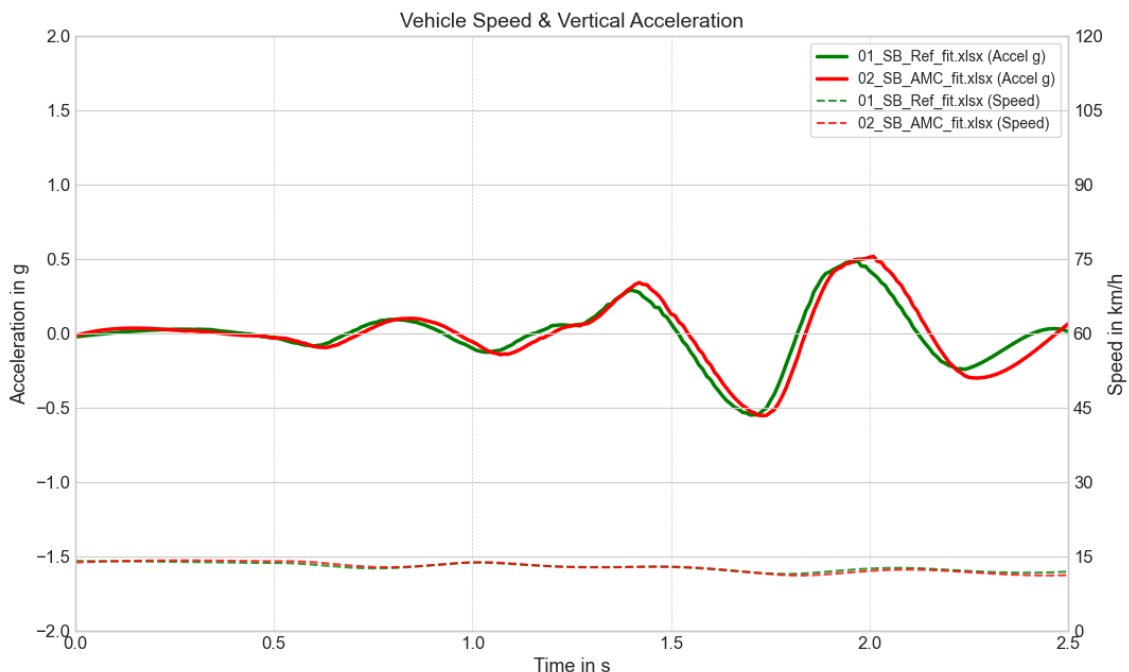


Abbildung 54: Vergleich der Aufbaubeschleunigung und Fahrgeschwindigkeit beim Überfahren eines 60 mm hohen Speedbreakers bei 15 km/h für Referenz- und AMC-Setup.

Auch bei der höheren Schwelle (Abbildung 55) stimmen die Spitzenbeschleunigungen weitgehend überein. Das längere Ausschwingen des AMC-Setups entspricht qualitativ dem Verhalten am Speedbreaker und ist ebenfalls auf die reduzierte Dämpfungskraft zurückzuführen.

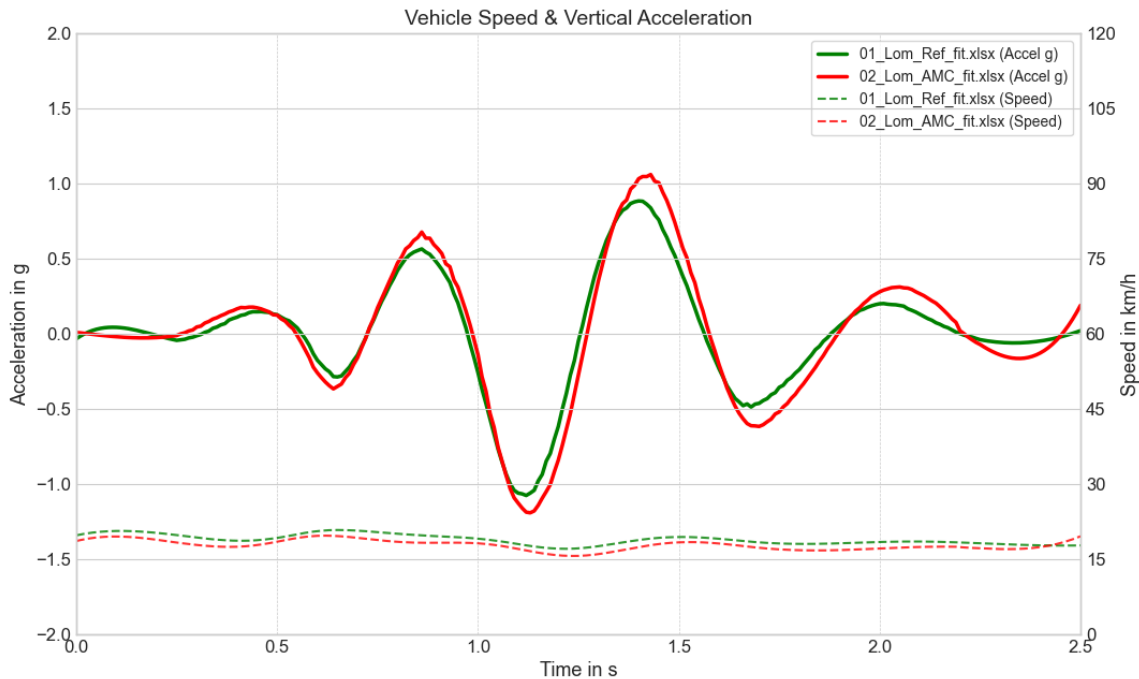


Abbildung 55: Vergleich der Aufbaubeschleunigung und Fahrgeschwindigkeit beim Überfahren einer 120 mm hohen Lombarda-Schwelle bei 17 km/h für Referenz- und AMC-Setup.

#### Ergebnisdiskussion Fahrversuche:

Über alle vier Manöver hinweg verläuft die Aufbaubeschleunigung des AMC-Setups nahezu deckungsgleich mit der Referenz. Die durchgängig leicht erhöhten Amplituden und das geringfügig längere Ausschwingen sind quantitativ klein und auf die im AMC-Dämpfer eingestellte weichere Ventilabstimmung ( $\approx 30\%$  geringere Dämpfungskraft, vgl. Kapitel „Dämpferkennlinien“) zurückzuführen, nicht auf die werkstoffliche Substitution selbst. Ein Hinweis auf eine grundsätzlich schlechtere fahrdynamische Performance der AMC-Komponenten lässt sich aus den Messungen nicht ableiten.

Die AMC-Komponenten konnten im Rahmen der Fahrversuche erfolgreich validiert werden. Während und nach den Versuchen wurden keine Leckagen sowie kein überproportionaler Verschleiß an den eingesetzten Komponenten festgestellt. Dies bestätigt die grundsätzliche Funktions- und Betriebsfähigkeit der entwickelten Leichtbaukomponenten unter realitätsnahen Einsatzbedingungen.

#### **Zusammenfassung des Arbeitspakets 4**

Im Rahmen des Arbeitspakets wurden AMC-basierte Leichtbaukomponenten für automobiler Zweirohrdämpfer entwickelt, gefertigt und umfassend validiert. Im Fokus standen die Kolbenstange sowie das Dichtungs-Führungs-Element. Ziel war die Bewertung der technischen Eignung von Aluminiummatrix-Verbundwerkstoffen (AMC) hinsichtlich mechanischer Belastbarkeit, tribologischer Eigenschaften und Leichtbaupotenzial.

Die Untersuchungen zeigten, dass AMC-Kolbenstangen gegenüber der Stahlreferenz eine Gewichtsreduktion von rund 66 % ermöglichen. Aufgrund der geringeren Festigkeit und Steifigkeit von AMC wären für eine vollständige Substitution jedoch größere Durchmesser und damit konstruktive Anpassungen des Gesamtdämpfers erforderlich. Besondere Herausforderungen ergaben sich zudem bei der spanenden Bearbeitung sowie bei der Erreichung geeigneter Oberflächeneigenschaften.

Zur Verbesserung des tribologischen Verhaltens wurden verschiedene Oberflächenverfahren untersucht. Insbesondere DLC-Beschichtungen erwiesen sich als vielversprechend und ermöglichten Reibungs- und

Verschleißigenschaften auf dem Niveau der hartverchromten Stahlreferenz. Mechanische Biegeversuche bestätigten die grundsätzliche Einsatzfähigkeit der entwickelten AMC-Kolbenstangen für den vorgesehenen Demonstratoreinsatz.

Auch das Dichtungs-Führungs-Element konnte erfolgreich durch AMC- beziehungsweise Aluminiumvarianten substituiert werden. Die mittels FAST/SPS gefertigten Komponenten erfüllten die geforderten mechanischen Anforderungen deutlich. Besonders die Aluminiumlegierung EN AW-6082-T6 zeigte eine günstige Kombination aus Festigkeit, Duktilität und Prozessstabilität.

Die abschließenden Fahrversuche mit modifizierten Hinterachsdämpfern eines VW ID.4 bestätigten die Funktionsfähigkeit der entwickelten Leichtbaukomponenten unter kundenrelevanten Einsatzbedingungen. Die Masseinsparung belief sich auf rund 0,48 kg pro Dämpfer und es zeigten sich keine Leckagen oder auffälligen Verschleißerscheinungen. Insgesamt belegen die Ergebnisse das erhebliche Potenzial aluminiumbasierter Verbundwerkstoffe für zukünftige Leichtbauanwendungen in automobilen Dämpfersystemen.

## 2.5 Arbeitspaket 5: Planung und Fertigung Demonstrator Sitzteiler (FE1, FE2)

### Durchgeführte Arbeiten:

Die Zielstellung zum Demonstrator „Sitzteiler“ wurde mit dem PA-Mitglied Leiber in AP1 festgelegt (vgl. Tabelle 1). Auf Basis der bisher erzielten Ergebnisse erfolgte eine Spezifizierung zum Schmiedebauteil „Sitzteiler“. Es wurde eine Schmiedekampagne mit zwei AMC-Varianten (Tabelle 13) und je 7 Bauteilen geplant. Die Geometrie des durch FE1 und FE2 zu fertigenden Schmiedebolzens für die Sitzteilerstruktur beträgt  $D=26$  mm und besitzt eine Länge von 400 mm. Die bisherigen Ergebnisse der mech. Eigenschaften an der Leg. EN AW-6082 mit 15 Vol.-% SiC<sub>p</sub> haben für die Fa. Leiber zu wenig Potenzial für die Anwendung gezeigt, weshalb für die Versuche zum einen der Verstärkungsanteil auf 20 Vol.-% SiC<sub>p</sub> angehoben wurde (S1) und zusätzlich eine Variante der Leg. EN AW-2017 mit 10 Vol.-% SiC<sub>p</sub> (S2) als Schmiedematerial untersucht werden soll. Von den beiden Varianten wurden je 9 kg Verbundpulver hergestellt und heißentgast. Die Stränge wurden bei FE2 mittels indirektem Pulverstrangpressen mit einem größeren Durchmesser von  $D = 28$  mm und einem Pressverhältnis von  $\Psi = 13$  hergestellt. Im Anschluss erfolgte die mechanische Bearbeitung, um die geforderte Länge und den Durchmesser einzustellen. Die Stangen wurden der Fa. Leiber für Schmiedeversuche übergeben. Anschließend wurden bei der Fa. Leiber werkstofftechnische Untersuchungen, wie metallografische Schliffe und Zugprüfungen (Probenform A5) durchgeführt. Auf die exakte Geometrie und die Abläufe beim Schmieden kann aufgrund von Geheimhaltungsvereinbarungen mit Dritten, die nicht im Projekt beteiligten Kunden der Fa. Leiber, nicht näher eingegangen werden.

Tabelle 13: AMC-Werkstoffe für Schmiedeversuche und gewählte Temperaturen für die Schmiedungen.

	Werkstoff	HEM	Ofentemperatur (°C)	Werkzeugtemperatur (°C)
S1	AW-6082 + 20 Vol.-% SiC	308	540	158
S2	AW-2017 + 10 Vol.-% SiC	314	450	158

### Erzielte Ergebnisse:

**Pulver- und Bolzenherstellung:** Die Herstellung der Werkstoffvarianten in der verkürzten Prozessroute ohne heißisostatisches Pressen (HIP) erwies sich als problemlos. Sowohl die HE-Mahlung der Legierung EN AW-6082 mit 20 Vol.-% SiC unter Verwendung des Rezepts HEM308 als auch das nachfolgende Strangpressen konnten ohne Auffälligkeiten durchgeführt werden.

Die Verteilung der Partikel im Verbundpulver war ausgesprochen homogen. Lediglich in wenigen Bereichen waren im Pulverschleiff unverstärkte Werkstoffzonen erkennbar (Abbildung 56). Beim Abdrehen der Stangen auf den Nenndurchmesser zeigte sich jedoch ein Problem hinsichtlich der Konzentrität, das bei den späteren Schmiedeteilen überwiegend zu optischen Beeinträchtigungen führte.

Die Materialzugabe von 2 mm reichte nicht aus, um durch das Überdrehen der Stangen, die Abweichungen vom Rundlauf vollständig auszugleichen. Dadurch waren die Stangen nach der Bearbeitung in einigen Bereichen nicht vollständig überdreht. Prozessbedingt befand sich an diesen Stellen noch die Aluminiumfolie an der Oberfläche, die beim Strangpressen zur Ummantelung des Pulvers benötigt wird. Dieses Problem kann technologisch durch den Einsatz einer Pull-Einrichtung an der Strangpresse reduziert werden, eine entsprechende Einrichtung stand jedoch im Projekt nicht zur Verfügung.

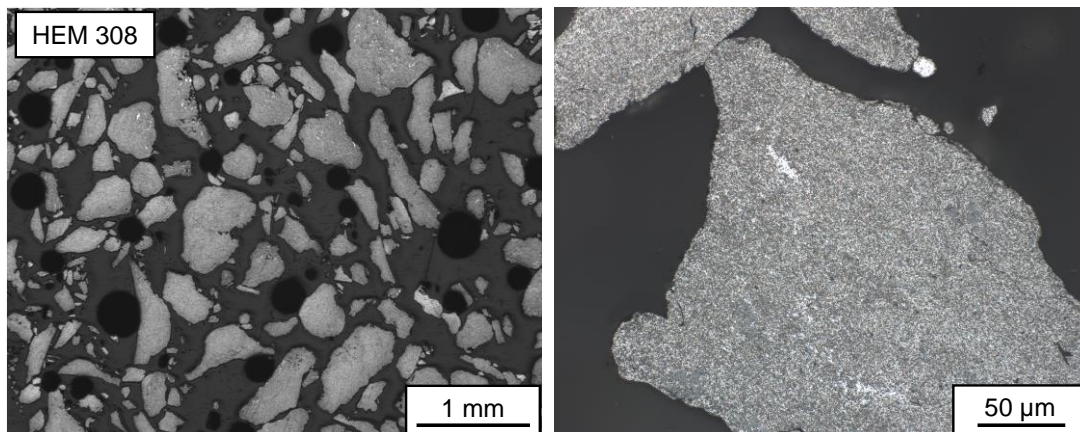


Abbildung 56: Verbundpulver EN AW-6082 + 20 Vol.-% SiC<sub>p</sub> für Schmiedebolzen.

**Schmiedekampagne:** Die Schmiedbarkeit beider AMC-Werkstoffe ist gegeben. Die Form wurde vollständig gefüllt. Die gefertigten Bauteile weisen optisch keine Unterschiede zu Bauteilen aus vergleichbaren Legierungen ohne SiC-Partikel auf. Zudem konnten die gleichen Schmiedeparameter beziehungsweise die gleiche Schmiedeenergie wie bei der Legierung EN AW-2024 verwendet werden. Während des Schmiedeprozesses traten keine negativen Auffälligkeiten, wie beispielsweise sprödes Verhalten, Rissbildung, Lunker oder vergleichbare Effekte auf (Abbildung 57). Begleitende mikrostrukturelle Betrachtungen zeigen im Kern der Struktur ein sehr homogenes Bild der Verstärkungspartikel ohne Risse und Fehlstellen, einzig in oberflächennahen Bereichen kommt es zum beschriebenen Effekt der Sichtbarkeit der Aluminiumfolie (Abbildung 58).



Abbildung 57: Schmiedebolzen und Schmiedebauteil: a) EN AW-6082 + 20 Vol.-% SiC<sub>p</sub>, b) EN AW-2017 + 10 Vol.-% SiC<sub>p</sub>.

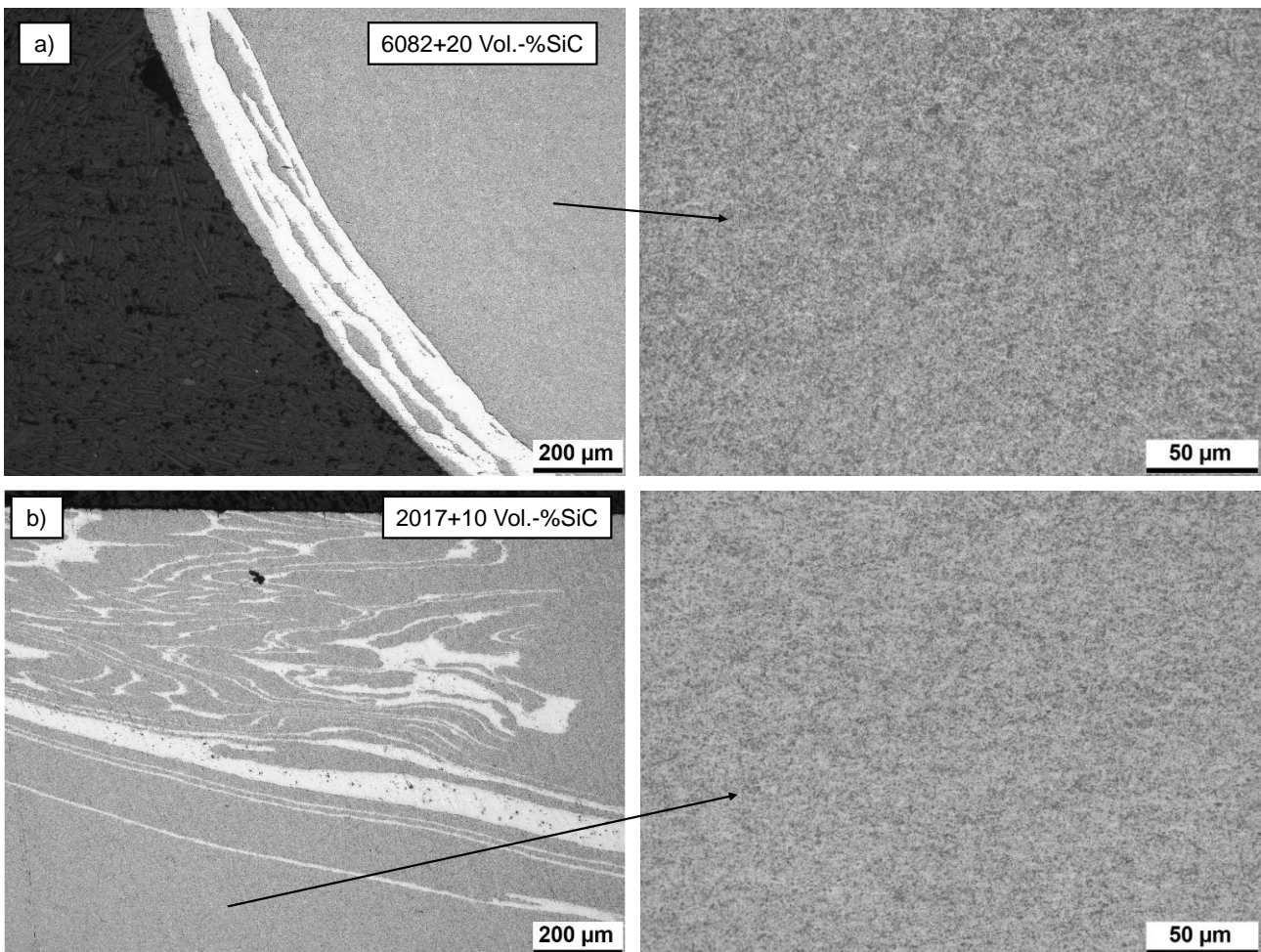


Abbildung 58: Mikrostruktur der geschmiedeten Bauteile im Querschliff: a) EN AW-6082 + 20 Vol.-% SiC<sub>p</sub>, b) EN AW-2017 + 10 Vol.-% SiC<sub>p</sub>.

**Mechanische Eigenschaften:** Die Ergebnisse der Zugprüfung an A5-Zugproben, die längs aus dem Schmiedebauteil entnommen wurden, zeigen für EN AW-6082 mit 20 Vol.-% SiC<sub>p</sub> eine Zugfestigkeit von 468 MPa und

eine Streckgrenze von 354 MPa. Die Bruchdehnung beträgt 5,4 Prozent, und der E-Modul beträgt 98 GPa. Die T4-Wärmebehandlung hat nahezu keinen Einfluss auf die mechanischen Kennwerte des Werkstoffs. Der Vergleich der Kennwerte mit der unverstärkten EN AW-6082 Legierung im Zustand T4 und der vorgegebenen Zielsetzung sind in Tabelle 14 dargestellt.

Die alternative Legierung EN AW-2017 mit nur 10 Vol.-% SiC<sub>p</sub> weist eine identische Zugfestigkeit von 468 MPa auf, jedoch eine etwas geringere Streckgrenze von 310 MPa. Der E-Modul ist gemäß der Mischungsregel für Verbundwerkstoffe erwartungsgemäß geringer und beträgt 86 GPa. Die Bruchdehnung des AMC liegt trotz geringeren SiC-Anteils bei lediglich 4,8 %.

Tabelle 14: Vergleich der mechanischen Kennwerte der geschmiedeten RePro-AMC Legierung EN AW-6082 mit 20 Vol.-% SiC<sub>p</sub>.

Mechanische Kennwerte		Standardleg. EN AW-6082-T6 <sup>3</sup>	RePro-AMC EN AW-6082+20%SiC	Zielsetzung EN AW-2024-T4	Vergleich
Zugfestigkeit	MPa	290	468	430	+ 8,1 %
Streckgrenze	MPa	250	354	290	+ 18,1 %
Bruchdehnung	%	5	5,4	7	-22,8 %
E-Modul	GPa	72	98	72	+26,5 %

Beide Werkstoffvarianten verfehlen im geschmiedeten Zustand eine Mindestbruchdehnung von 7 %. Die sehr geringen Bruchdehnungswerte sowie die glatten verformungsarmen Bruchflächen der Zugproben deuten auf ein sprödes Werkstoffversagen hin. Darüber hinaus konnten in der Bruchfläche Inhomogenitäten in Form glänzender Bereiche beobachtet werden. Dennoch können die Schmiedeversuche an den im Projekt RePro-AMC hergestellten Werkstoffen als erfolgreich betrachtet werden, da insbesondere die Verarbeitung und fehlerfreie Mikrostruktur ein großes Potenzial für weitere wissenschaftliche Untersuchungen bieten. Die gezielte Einstellung eines geringen SiC-Gehaltes für höhere Bruchdehnung sowie die Ursache für den kaum vorhandenen Ausscheidungshärtungseffekt nach der Wärmebehandlung werfen relevante wissenschaftliche Fragestellungen auf, die im Rahmen des Vorhabens nicht tiefgreifender untersucht werden konnten.

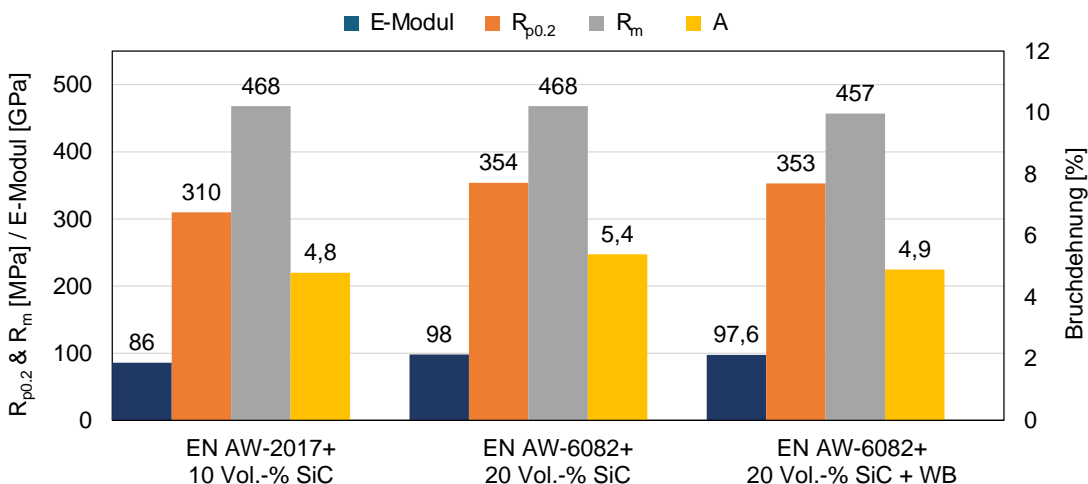


Abbildung 59: Ergebnisse der Zugversuche von geschmiedeten AMC-Werkstoffen (Mittelwert aus zwei Proben je Variante).

<sup>3</sup> Aluminium Werkstoff-Datenblätter: (Gesenschmiedestücke), S.219

## 2.6 Arbeitspaket 6: Werkstoff- und Bauteilcharakterisierung (FE1, FE2, FE3)

### Durchgeführte Arbeiten:

Innerhalb der AP1–AP5 wurden verschiedene werkstofftechnische Untersuchungen an den hergestellten AMC-Werkstoffen (Pulver und extrudierten Materialien) durchgeführt, sowie die bereitgestellten Dämpferkomponenten analysiert. Dies umfasst Methoden wie Licht- und Rasterelektronenmikroskopie, Härtemessungen, Rauheitsmessungen, Röntgenfeinstrukturanalyse, Röntgenfluoreszenzanalyse, quasistatische Zugversuche an Rundprüfkörpern nach DIN EN ISO 6892-1 mit Probeform A3 sowie an Kleinstproben mit Rechteckquerschnitt. Die Ergebnisse dieser werkstofftechnischen Untersuchungen werden direkt in dem jeweiligen AP beschrieben und ausgewertet, um eine bessere Übersichtlichkeit zu gewährleisten. Im Folgenden werden ausgewählte Untersuchungen aufgeführt, die keinem der bisherigen Kapitel direkt zuordenbar sind.

**Verunreinigung:** Die Ausgangswerkstoffe sowie die am Mahlprozess beteiligten Werkstoffe (Kugeln, Rotor) wurden als mögliche Quellen der Verunreinigung in Betracht gezogen. Es erfolgte eine Analyse der Verunreinigung im REM und XRD, sowie eine Überprüfung der Ausgangswerkstoffe SiC und Stearinsäure.

**Ausscheidungshärtung:** Im Laufe des Projektes wurde deutlich, dass der Effekt der Ausscheidungshärtung T6 der prozessierten AMC mit der Matrix EN AW-6082 wesentlich geringer ist, als bei den bisher untersuchten AMC auf Basis der Legierung EN AW-2017-T4. Die übliche Wärmebehandlung der Legierung liegt bei 530 °C Lösungsglüh-temperatur und anschließendem Ausscheidungshärten bei 180 °C für 2 h. Es gibt dazu verschiedene Theorien, die im Rahmen werkstofftechnischer Untersuchungen weiter untersucht wurden.

- a) Veränderte Ausscheidungskinetik durch hohe Versetzungsdichte im Werkstoff: Versuche zur Variation von Glüh-temperatur, -dauer, Warmauslagerungstemperatur und -dauer,
- b) Erhöhte Abschreckempfindlichkeit der Legierung: Stirnabschreckversuch
- c) Oxidation des Magnesiums in der Legierung und verminderte Mg<sub>2</sub>Si-Phasenbildung: REM

**AMC-Fügen:** Zur Realisierung des Dämpfers wurden im 3. PA-Treffen verschiedene Fügeaufgaben identifiziert, die bei der Anwendung von AMCs perspektivisch zu lösen sind. Zum einen muss bei einem AMC-Rohr einseitig ein Verschluss gefertigt werden sowie ein dazugehöriger Lagerpunkt für die Krafteinleitung. Zum anderen hat die Kolbenstange einen Zuganschlag, der über eine Fügeoperation mit der Stange verbunden werden muss. Es ist bekannt, dass die Fügezone von AMCs durch Schmelzschweißen stark geschwächt wird. Vor diesem Hintergrund wurde das Rotationspressschweißen im Projekt als Fügeverfahren untersucht. Das PA-Mitglied Raiser verfügt über Rotationsreibschweißanlagen und hat an zylindrischen Proben der Kolbenstange Stumpfstoßschweißungen durchgeführt. Die Fügeproben wurden bei FE1 hinsichtlich der Mikrostruktur und der mechanischen Eigenschaften untersucht und bewertet. Zusätzlich wurden Laserschweißversuche an einer Rohr-/Deckel-Verbindung aus AMC von der Professur Füge-technik der TU Chemnitz durchgeführt.

**AMC-Oberflächenbehandlung:** Bei der Analyse des Dämpfers und insbesondere der Kolbenstange zeigten sich die hohen Anforderungen an die Oberflächenhärte bei gleichzeitig geringer Oberflächenrauheit. Vor diesem Hintergrund wurden im Projekt gemeinsam mit dem PA-Partner verschiedene Konzepte zur Realisierung einer harten und verschleißbeständigen AMC-Oberfläche untersucht (Tabelle 15). AMC-Probekörper mit D = 18 mm wurden den Partnern für Beschichtungsversuche übergeben und anschließend von FE1 werkstoff-technisch untersucht.

Tabelle 15: Oberflächenbehandlung und Beschichtung für AMC.

Prozess	Schicht	Prozessparameter
Drehen	-	Feindrehbearbeitung mit einer herkömmlichen Drehmaschine und einem Schneidwerkzeug aus polykristallinen Diamanten
Hartanodisieren	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Böttger Oberflächenveredlung GmbH A = 0,33 dm <sup>2</sup> , I = 3 A/dm <sup>2</sup> , t = 40 min
Thermisches Spritzen	NiAl <sub>5</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Atmospheric Plasma Spraying (APS) – WOT TU Chemnitz GTV F6, 0,035 m/s. Rotation: 440 U/min
PVD-Beschichtung	DLC (a-C:H)	Produkt: „DLC-Star“ von Oerlikon Balzers

**Ermüdungs- und Verschleißuntersuchungen:** Im Arbeitsplan waren ursprünglich Ermüdungs- und Verschleißuntersuchungen an den AMC vorgesehen. Aufgrund der beschriebenen Herausforderungen mit Verunreinigungen im AMC, der gedämpften Ausscheidungshärtung sowie der verschiedenen Beschichtungs- und Fügeaufgaben wurde in Abstimmung mit den PA-Mitgliedern auf diesen Teilarbeitspunkt verzichtet. Die geplanten Personenmonate der FE1 wurden für umfangreiche Untersuchungen zur Ausscheidungshärtung der AMC genutzt, sowie zur Realisierung des Dichtungs-Führungs-Elementes. Hier wurde durch den PA und die FE ein größeres Verwertungspotenzial gesehen.

### Erzielte Ergebnisse:

**Verunreinigung:** Verschiedene werkstofftechnische Analysen mittels XRD haben gezeigt, dass die Stearinsäure mit Ca(SO<sub>4</sub>)·2H<sub>2</sub>O verunreinigt war. Diese Kontaminationen konnten mit neuer Stearinsäure vollständig eliminiert (Abbildung 60a+b) werden. Im Zuge der Fehlersuche wurde auch das SiC neu beschafft und ausgetauscht. Die Zugversuche des kontaminationsfreien AMC (vgl. Abbildung 60c) weisen geringere mechanische Eigenschaften auf als die ursprüngliche Variante, was zumindest anteilig auf eine geringfügig veränderte Partikelgrößenverteilung der neuen SiC-Charge zurückgeführt werden kann (Abbildung 60a+b).

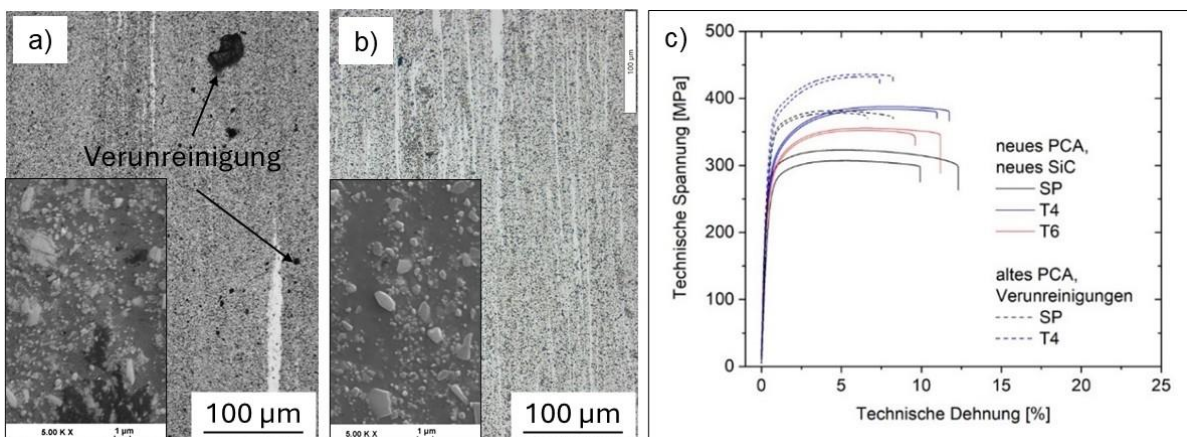


Abbildung 60: Vergleich der LM und REM-Bilder der Mikrostruktur von kontaminierten (a) und nicht kontaminierten (b) AMC; c) Ergebnisse der Zugversuche.

**Ausscheidungshärtung:** Ein Vergleich der Brinellhärtewerte in Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. zeigt deutliche Unterschiede zwischen der unverstärkten EN AW-6082 und den partikelverstärkten AMC-Werkstoffen. Die unverstärkte, aus Pulver stranggepresste EN AW-6082 erreicht nach dem Strangpressen eine Härte von etwa 59 HBW. Durch die T6-Wärmebehandlung steigt die Härte auf 111 HBW an, was auf eine ausgeprägte Ausscheidungshärtung zurückzuführen ist. Der AMC-Werkstoff EN AW-6082 mit 10 Vol.-%

SiC<sub>p</sub> weist bereits nach dem Strangpressen ein deutlich höheres Härteniveau von etwa 95 HBW auf. Die zusätzliche Härtesteigerung durch die Wärmebehandlung fällt jedoch vergleichsweise gering aus. Nach T6-Behandlung werden lediglich etwa 105 HBW erreicht, während im T4-Zustand mit etwa 116 HBW die höchsten Härtewerte gemessen wurden. Dies deutet darauf hin, dass der Beitrag der klassischen Ausscheidungshärtung im AMC reduziert ist und die Gesamtverfestigung bereits maßgeblich durch die SiC-Partikel bestimmt wird. Ein vergleichbares Verhalten zeigt auch die zu Beginn des Projekts eingesetzte Legierung EN AW-6061 mit 10 Vol.-% SiC<sub>p</sub>. Hier liegen die Härtewerte bereits im Ausgangszustand auf hohem Niveau und verändern sich durch die Wärmebehandlung nur geringfügig.

Die gemahlene und unverstärkte Legierung EN AW-6082\_HEM verdeutlicht zudem den Einfluss des Mahlprozesses auf die Ausscheidungshärtung. Trotz T4- und T6-Wärmebehandlung werden lediglich Härtewerte von etwa 74 bis 76 HBW erreicht. Dies lässt auf eine erhöhte Abschreckempfindlichkeit der AMCs oder eine Beeinträchtigung der Mg<sub>2</sub>Si-Ausscheidungsbildung schließen, beispielsweise infolge von Oxidbildung während des Mahlprozesses.

*Tabelle 16: Brinellhärtewerte HBW (2,5/62,5) verschiedener im Projekt untersuchter Werkstoffe an Stangenquerschnitten (D = 18 mm) vor und nach der Wärmebehandlung (530 °C Lösungsglühen für 1 h und Abschrecken in Wasser).*

Werkstoff	Bez.	nach Strangpressen	T4 (7d/25 °C)	T6 (2h/180 °C)
EN AW-6082	-	59,0 ± 0,5	87,3 ± 1,7	111,0 ± 0,8
EN AW-6082_HEM	HEM296	64,0 ± 0,5	74,0 ± 0,5	75,7 ± 0,5
EN AW-6082+10% SiC <sub>p</sub>	HEM288a	95,0 ± 0,5	116,0 ± 1,2	105,3 ± 4,5
EN AW-6061+10% SiC <sub>p</sub>	HEM252eN1	106,0 ± 0,5	116,0 ± 1,2	114,7 ± 2,1
Gries	MN4131	33,7 ± 1,2	31,7 ± 0,5	32,7 ± 0,5
Gries+10% SiC <sub>p</sub>	HEM295e	94,3 ± 1,7	k. l.	101,3 ± 2,5

Beim Rezyklatwerkstoff MN4131 zeigt sich ohne Partikelverstärkung praktisch kein Einfluss der Wärmebehandlung auf die Härte. Die Werte verbleiben in allen Zuständen bei etwa 32 HBW. Dagegen führt die Zugabe von 10 Vol.-% SiC<sub>p</sub> beim verstärkten Rezyklatwerkstoff zu einem deutlich höheren Härteniveau von etwa 94 HBW im Ausgangszustand sowie zu einer leichten weiteren Steigerung auf rund 101 HBW nach T6-Wärmebehandlung.

Die weiterführenden Untersuchungen an der partikelverstärkten Legierung EN AW-6082 zeigen insgesamt nur einen geringen Einfluss der Lösungsglühtemperatur und -dauer auf die erzielte Härte. Eine leichte Tendenz zu höheren Härtewerten ist bei Lösungsglühtemperaturen oberhalb von 530 °C erkennbar (Abbildung 61a). Die Unterschiede liegen jedoch lediglich im Bereich weniger HBW und sind daher nur eingeschränkt signifikant.

Die Untersuchungen zum Einfluss der Auslagerungstemperatur zeigen kein eindeutiges Verhalten (Abbildung 61b). Bei den niedrigeren Auslagerungstemperaturen von 80 °C und 140 °C wird bei einer Verlängerung der Auslagerungsdauer von 30 min auf 60 min ein leichter Härteabfall beobachtet. Bei 180 °C zeigt sich dagegen eine geringfügige Härtesteigerung. Insgesamt verbleiben die Härtewerte jedoch auf einem ähnlichen Niveau wie nach der T4-Behandlung. Ursache für diese Unterschiede können auch Eigenschaftsschwankungen innerhalb des Materials sein.

Der zeitliche Verlauf der Härte bei einer Auslagerungstemperatur von 140 °C ist in Abbildung 61c dargestellt. Die Härtewerte schwanken im Bereich zwischen etwa 108 und 114 HBW, ohne dass ein eindeutiger Verlauf

erkennbar ist. Die beobachteten Unterschiede liegen teilweise innerhalb der zu erwartenden Mess- und Materialstreuung.

Abbildung 61d zeigt den Vergleich zwischen unverstärkter EN AW-6082 und der SiC<sub>p</sub>-verstärkten Variante bei einer Auslagerungstemperatur von 180 °C. Beide Werkstoffe weisen nach kurzer Auslagerungsdauer ein Härtemaximum auf. Für die unverstärkte Legierung liegt dieses nach etwa 120 min bei rund 111 HBW, während die verstärkte Variante bereits nach etwa 60 min Härte von ca. 114 HBW erreicht. Bei längeren Auslagerungszeiten bis 24 h sinken die Härte von beiden Werkstoffen wieder auf etwa 100–105 HBW ab, was auf Überalterungseffekte hinweist.

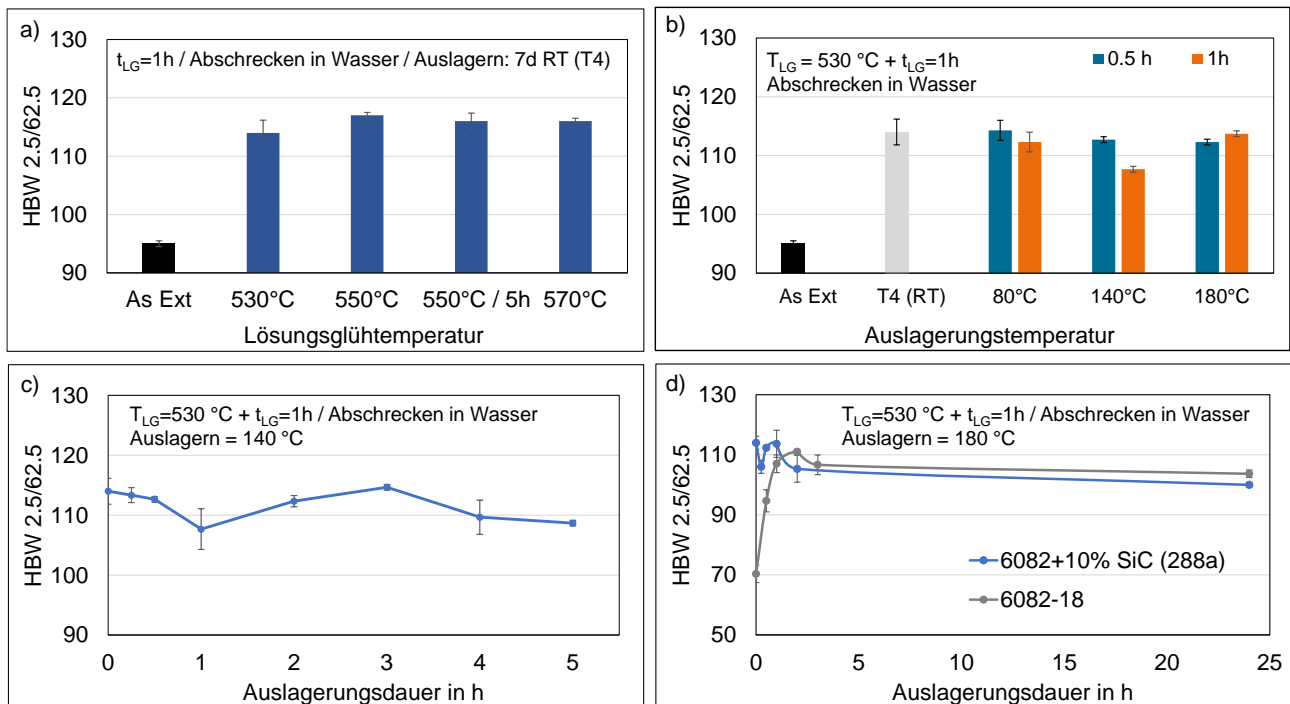


Abbildung 61: Auswertung der Härtemessungen an Querproben (HBW<sub>2,5/62,5</sub>) zu Auslagerungsversuchen an dem AMC EN AW-6082 + 10 Vol.-% SiC<sub>p</sub> (HEM288a): a) Einfluss der Lösungsglühtemperatur; b) Einfluss der Auslagerungstemperatur, c) Einfluss der Auslagerungsdauer bei 140 °C und d) Einfluss der Auslagerungsdauer bei 180 °C.

Die Ergebnisse des Stirnabschreckversuchs zeigen einen deutlichen Unterschied im Härtings- und Umwandungsverhalten zwischen der unverstärkten Legierung EN AW-6082 und dem AMC-Werkstoff mit 15 Vol.-% SiC-Partikeln nach Auslagerung T4 (Abbildung 62).

Bei der unverstärkten Aluminiumlegierung liegt die Härte im wasserabgeschreckten Bereich nahe der Stirnfläche zunächst bei etwa 80–85 HV und nimmt mit zunehmendem Abstand kontinuierlich ab. Ab etwa 50–60 mm wird ein nahezu konstantes Niveau von rund 60 HV erreicht. Dies weist auf eine begrenzte Härte der Legierung hin. Mit zunehmendem Abstand zur Stirnfläche sinkt die Abkühlgeschwindigkeit deutlich, wodurch die für die Ausscheidungshärtung erforderliche übersättigte Mischkristallbildung zunehmend eingeschränkt wird. Bereits während der Abkühlung treten verstärkt Ausscheidungsvorgänge auf, wodurch die später erreichbare Härte reduziert wird.

Demgegenüber zeigt der AMC-Werkstoff mit 15 Vol.-% SiC<sub>p</sub> über die gesamte Probenlänge deutlich höhere Härte von zwischen etwa 120 und 140 HV. Zudem fällt die Härte mit zunehmendem Abstand zur Stirnfläche nur geringfügig ab. Dies deutet grundsätzlich auf eine deutlich erhöhte Härte des Verbundwerkstoffs

hin. Die These einer erhöhten Abschreckempfindlichkeit lässt sich nicht belegen. Die SiC-Partikel beeinflussen offenbar sowohl die Wärmeleitung als auch das Ausscheidungsverhalten der Matrixlegierung. Zusätzlich tragen thermisch induzierte Versetzungsdichten infolge der unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten von Aluminium und SiC zur Verfestigung bei.

Auffällig ist außerdem der deutlich geringere Härtegradient des AMC-Werkstoffs. Während die unverstärkte Legierung einen kontinuierlichen Härteabfall von etwa 25 HV zeigt, beträgt der Abfall beim AMC lediglich 10–15 HV. Dies spricht einerseits für eine verringerte Empfindlichkeit gegenüber unterschiedlichen Abkühlgeschwindigkeiten; andererseits kann die Anzahl der vorhandenen Ausscheidungsphasen im AMC insgesamt geringer sein, da Mg an andere Elemente wie Sauerstoff gebunden ist.

Die Streuung der Messwerte ist beim AMC-Werkstoff größer als bei der unverstärkten Legierung. Ursache hierfür können lokale Unterschiede in der Partikelverteilung, Porosität oder mikrostrukturelle Inhomogenitäten sein, die den Härtewert lokal beeinflussen.

Insgesamt zeigt der Stirnabschreckversuch, dass der AMC keine höhere Abschreckempfindlichkeit hat als die unverstärkte Legierung. Der AMC-Werkstoff weist über größere Bauteilquerschnitte eine vergleichsweise homogene Härteverteilung auf, was für die Wärmebehandlung komplexer Geometrien vorteilhaft ist.

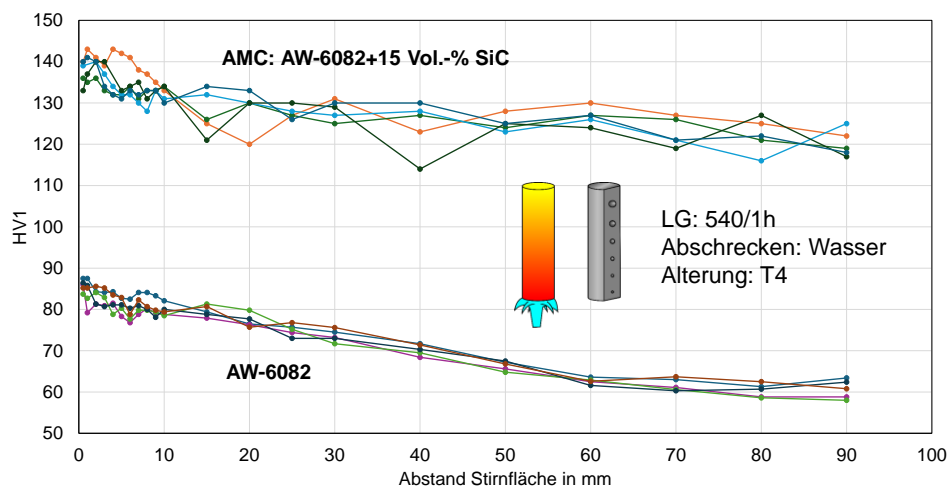


Abbildung 62: Stirnabschreckversuch an AMC EN AW-6082+10 Vol.-% SiC<sub>p</sub> (HEM288a) und EN AW-6082.

**AMC-Fügen:** Das Fügen der AMC-Werkstoffe im Stumpfstoß konnte erfolgreich realisiert werden. Nach dem Entfernen der verfahrensbedingt entstandenen Wulst (siehe Abbildung 63a) zeigt sich eine geschlossene und fehlerfreie Verbindung. Die Mikrostruktur im Bereich der Fügezone ist sehr homogen ausgeprägt. Die durch das Strangpressen hervorgerufene Orientierungsrichtung der Mikrostruktur wird im Fügebereich vollständig homogenisiert. Torsionsversuche an den Proben zeigen ein Versagen außerhalb der Fügezone (vgl. Abbildung 63a unten), was auf eine hohe Festigkeit der Verbindung hinweist.

Darüber hinaus wurde das Schmelzschweißen mittels Laserstrahls an einer Rohr-Deckel-Verbindung untersucht (Abbildung 63b). Äußerlich konnte zunächst ein gutes Nahtbild erzielt werden. Die metallographischen Untersuchungen der Mikrostruktur offenbaren jedoch eine ausgeprägte Defektbildung innerhalb der Schweißzone. Über den gesamten Verbindungsbereich sind zahlreiche schlauchartige Poren erkennbar. Belastungsversuche zeigen dementsprechend ein Versagen der Verbindung bereits bei vergleichsweise geringen Kräften in der Fügezone.

Trotz mehrerer Parameterstudien konnte keine signifikante Verbesserung der Verbindungsqualität erzielt werden. Eine weiterführende Betrachtung des Schmelzschweißens wurde daher im Rahmen des Projekts nicht weiterverfolgt.

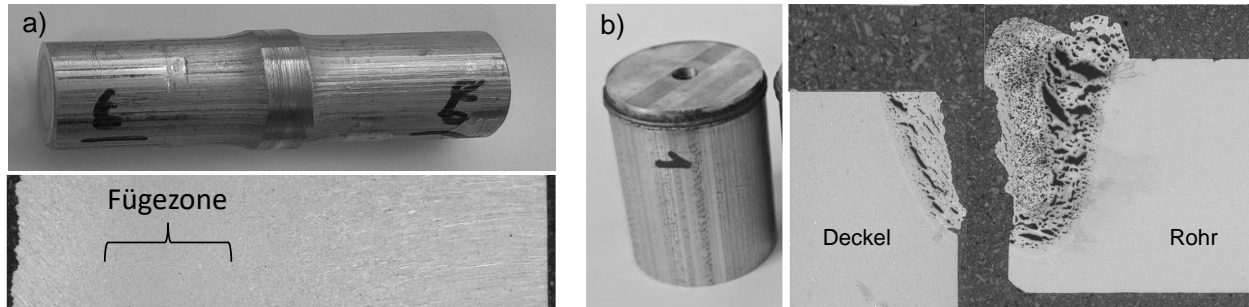


Abbildung 63: Fügeverbindungen an AMC EN AW-6082 + 10 Vol.-% SiC<sub>p</sub>: a) Rotationsgeschweißte Stumpfstoßverbindung von AMC-Stangen, b) Lasergeschweißte Fügeverbindung aus Rohr und Deckel.

Die Spannungs-Dehnungs-Kurven (Abbildung 64) zeigen den Einfluss des Rotationsschweißens sowie der Wärmebehandlung T4 auf das mechanische Verhalten des AMC-Werkstoffs EN AW-6082 mit 15 Vol.-% SiC<sub>p</sub>. Im Ausgangszustand („As pressed“) erreicht die Probe aus der stranggepressten Stange maximale Zugspannungen von etwa 380–390 MPa bei einer technischen Dehnung von ca. 4–5 %. Nach der T4-Wärmebehandlung steigt die maximale Zugspannung deutlich auf etwa 430–440 MPa an. Gleichzeitig erhöht sich die Bruchdehnung auf etwa 7–8 %, was auf eine verbesserte Duktilität hinweist. Die T4-Behandlung führt somit sowohl zu einer Festigkeitssteigerung als auch zu einer verbesserten plastischen Verformbarkeit.

Die Proben nach dem Rotationsschweißen zeigen ein nahezu identisches Spannungs-Dehnungs-Verhalten wie die Proben aus der Ausgangsstange. Sowohl im „As pressed“-Zustand als auch nach T4-Wärmebehandlung liegen die Kurven der geschweißten Proben sehr nahe an denen des Grundmaterials. Dies deutet darauf hin, dass das Rotationsschweißen keinen signifikanten negativen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften des AMC-Werkstoffs hat.

Besonders auffällig ist, dass weder die Streckgrenze noch die maximale Zugfestigkeit durch den Fügevorgang merklich reduziert werden. Auch die erreichbare Dehnung bleibt weitgehend erhalten. Dies bestätigt die bereits anhand der metallographischen Untersuchungen und Torsionsversuche festgestellte hohe Qualität der Verbindung.

Insgesamt belegen die Ergebnisse, dass das Rotationsschweißen eine geeignete Füge-technologie für die untersuchten AMC-Werkstoffe ist. Die mechanischen Eigenschaften der Verbindung erreichen nahezu das Niveau des Grundwerkstoffs, wodurch eine strukturell belastbare Verbindung realisiert werden konnte.

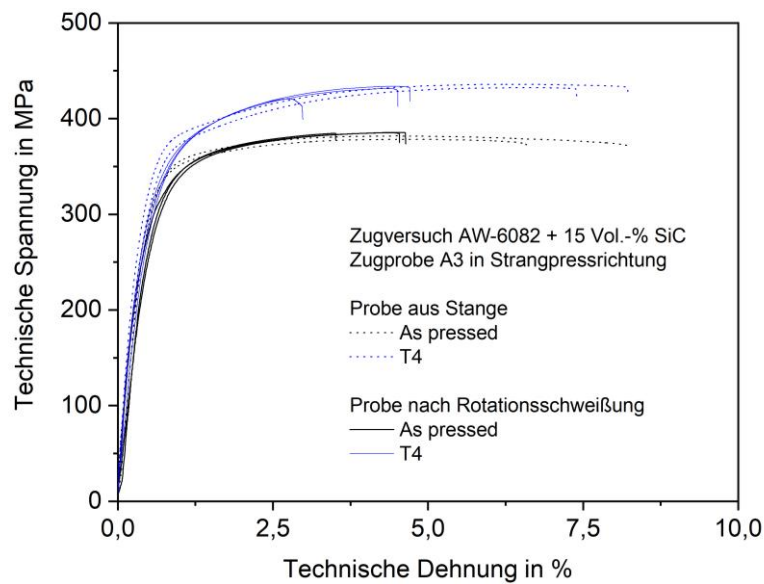


Abbildung 64: Ergebnisse der Zugversuche an rotationsgeschweißten AMC EN AW-6082 + 15 Vol.-% SiC<sub>p</sub>.

**AMC-Oberfläche:** Die Härte, Rauheit und Verschleißbeständigkeit der Kolbenstange sind wesentliche Kriterien für eine erfolgreiche Werkstoffsubstitution. Im Rahmen des Arbeitspakets wurden daher gemeinsam mit den PA-Partnern sowie teilweise im Rahmen von Unteraufträgen verschiedene Oberflächenbehandlungen und Beschichtungslösungen untersucht.

1) Drehen und Polieren: AMCs gelten aufgrund der keramischen Partikelverstärkung als problematisch in der Materialbearbeitung. Aufgrund der geringen Größe der Verstärkungspartikel ist die Drehbearbeitung jedoch vergleichsweise problemlos mit polykristallinen Diamantwerkzeugen möglich. Nach dem Drehen können sowohl am unverstärkten als auch am verstärkten AMC vergleichbare Rauheitswerte von  $R_a = 0,23\text{--}0,25\ \mu\text{m}$  erzielt werden. Die Härte bleibt unverändert auf dem Niveau des AMC-Grundwerkstoffs und liegt damit weiterhin deutlich unter den Anforderungen.

2) Hartanodisieren: Als besonders aussichtsreich erwies sich die Möglichkeit, die AMC-Werkstoffe durch anodische Oxidation in eine harte und verschleißbeständige  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Oberfläche zu überführen. Die von der Fa. Böttger Oberflächenveredelung anodisierten unverstärkten und partikelverstärkten AMC-Werkstoffe sind in Abbildung 65 makroskopisch und als Querschliffen dargestellt. Bei gleichen Parametern (Zeit und Spannung) beträgt die resultierende Sichtdicke der  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Schicht  $41\ \mu\text{m}$ , während die Schicht beim AMC dünner ist und ca.  $25\ \mu\text{m}$  beträgt. Makroskopisch ist kaum ein Unterschied in der schwarzen ungefärbten Schicht festzustellen.

Die Mikrohärtemessungen der erzeugten Oxidschichten zeigen deutliche Unterschiede zwischen den Werkstoffen. Die unverstärkte Legierung erreicht eine Schichthärte von  $791 \pm 33\ \text{HV}_{0,01}$ . Dagegen wird bei dem AMC-Werkstoff lediglich ein mittlerer Härtewert von  $291 \pm 45\ \text{HV}_{0,01}$  erreicht (Abbildung 66). Dies liegt deutlich unter dem Referenzwert für die Stahlkolbenstange von  $1053\ \text{HV}$  (vgl. Tabelle 2)

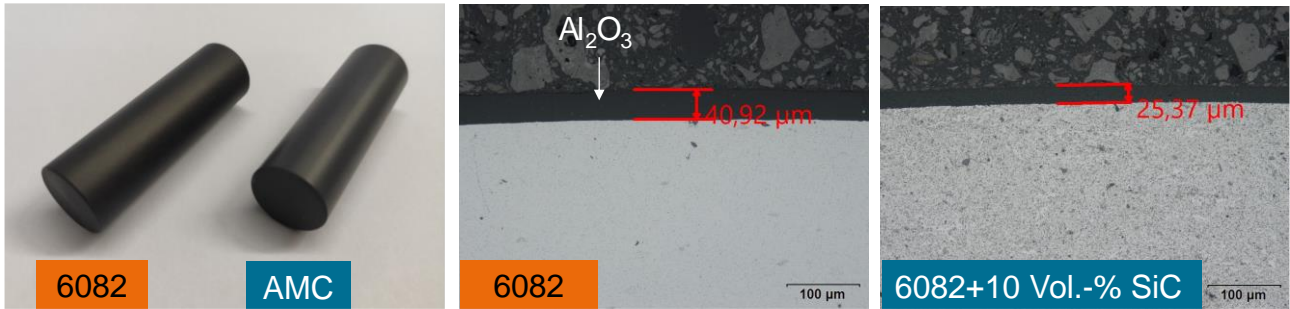


Abbildung 65: Hartanodisierte Proben aus EN AW-6082 und EN AW-6082 + 10 Vol.-% SiC<sub>p</sub>.

Bei hoher Vergrößerung zeigt die Oxidschicht des AMC-Werkstoffs eine deutlich porösere Struktur (Abbildung 66b). Im Gegensatz dazu erscheint die Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Schicht der unverstärkten EN AW-6082 wesentlich kompakter, weist jedoch ausgeprägte radiale Rissstrukturen auf (Abbildung 66a). Eine taktile Rauheitsmessung der Schichten ergibt für die EN AW-6082 einen Wert von R<sub>a</sub> = 0,7 µm und beim AMC R<sub>a</sub> = 0,45 µm.

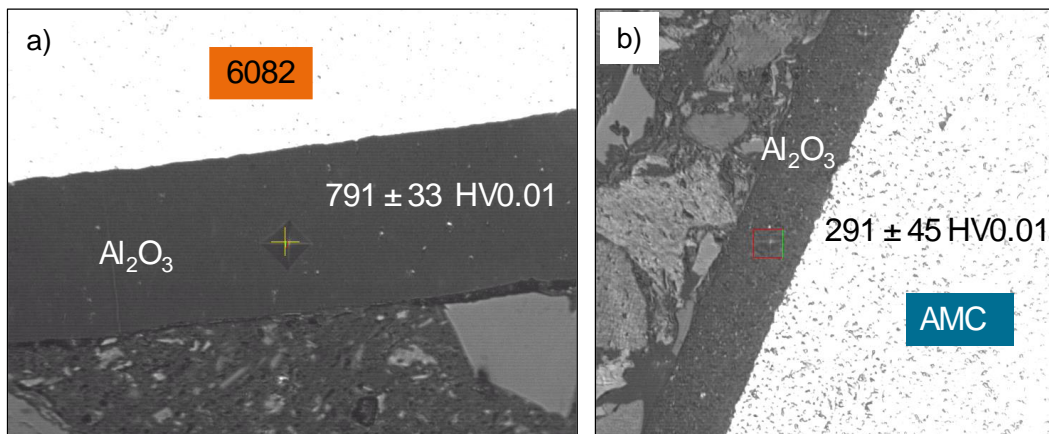


Abbildung 66: Härtemessung der hartanodisierten Proben: a) EN AW-6082 und b) EN AW-6082 + 10 Vol.-% SiC<sub>p</sub>.

**3) Thermisches Spritzen:** Als weitere Möglichkeit wurde die Applikation einer thermischen Spritzschicht aus Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> untersucht. Dabei wurde auf die Expertise der Professur Werkstoff- und Oberflächentechnik der TU Chemnitz zurückgegriffen.

Zur Haftvermittlung wird mittels atmosphärischen Plasmaspritzens zunächst eine NiAl-5-Schicht aufgebracht, anschließend erfolgt die Applikation der Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Schicht. Bei einer direkten Beschichtung mit Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kommt es hingegen zu Abplatzungen.

Die Spritzschicht weist verfahrensbedingt eine hohe Oberflächenrauheit von R<sub>a</sub> = 6,97 µm auf. Zur Einhaltung der geforderten Toleranzen sowie zur Reduzierung der Oberflächenrauheit ist daher ein nachträgliches Außenrundscheifen erforderlich. Nach dem Schleifprozess wird eine Rauheit von R<sub>a</sub> = 0,52 µm erreicht. Die spritzraue und geschliffene AMC-Kolbenstange sind in Abbildung 67 dargestellt.

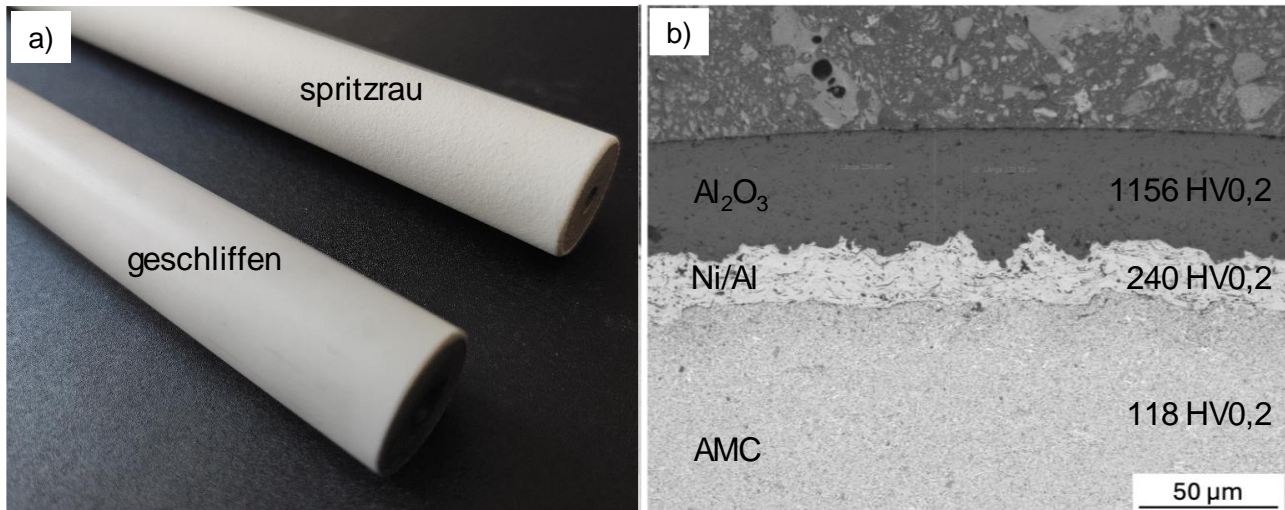


Abbildung 67: Thermische Spritzschicht  $Al_2O_3$  auf AMC: a) Stangen spritzrau und geschliffen, b) Querschliff.

4) PVD-Beschichtung: Teile der Kolbenstange wurden erfolgreich beschichtet und mit einer DLC-Beschichtung versehen, Abbildung 68. Die Schicht hat eine Dicke von ca. 1 µm und folgt der Oberflächenstruktur des Grundkörpers. Eine Nachbearbeitung ist demnach nicht möglich. Die Schichthärte konnte mit den zur Verfügung stehenden Messmethoden nicht bestimmt werden. Laut Herstellerangaben erreichen DLC-Schichten des Typs a-C:H („BALINIT DLC STAR“, Oerlikon Balzers) Mikrohärtigkeiten von über 2000 HV. Im Rahmen des Projektes wurde diese DLC-Beschichtungen für weiterführende Komponententests in AP4 verwendet.

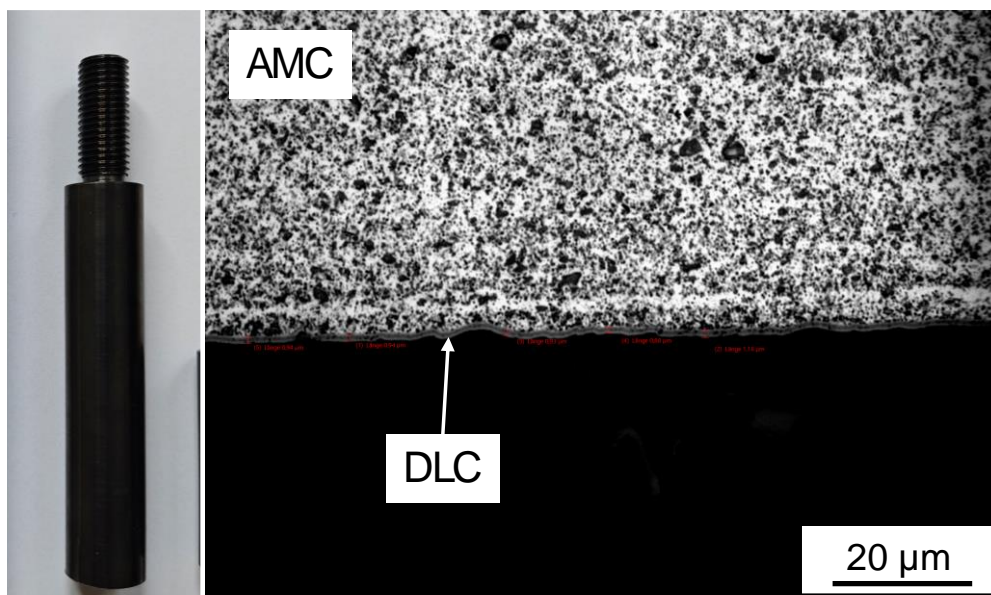


Abbildung 68: DLC-Schicht („BALINIT DLC STAR“) auf AMC-Kolbenstange: a) Stangen spritzrau und geschliffen, b) Querschliff.

## 2.7 Arbeitspaket 7: Dokumentation und Außendarstellung (FE1, FE2, FE3)

### Durchgeführte Arbeiten:

Die Ergebnisse aus den statistischen Versuchsplänen und Strangpressen (AP2 und AP3) wurden als Vorträge auf dem Landshuter Leichtbau-Colloquium (Landshut, Bayern) und der LightMAT 2025 (Montreal, Kanada) vorgestellt.

Ergebnisse zum AMC-Demonstrator wurden auf dem WKM-Symposium 2024 (Magdeburg) präsentiert und im AAET-Journal zur Veröffentlichung angenommen.

Eine im Projekt betreute Diplomarbeit mit dem Titel: „Einsatz von recyceltem Sekundäraluminium für die pulvermetallurgische Herstellung route partikelverstärkter Aluminiummatrix-Verbundwerkstoffe“ wurde im Februar 2024 an der TU Chemnitz abgeschlossen.

Zudem wurden im Projekt sowohl zu Beginn als auch am Ende über die Homepage und die Social-Media-Kanäle der FEs Informationen zum Projekt publiziert, Abbildung 69.



Abbildung 69: Öffentlichkeitsarbeit im Projekt RePro-AMC: a) Newsblogbeitrag der Professur Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde im Nov. 2022, b) LinkedIn-Post der Professur Fahrzeugsystemdesign Mai 2026.

## Erzielte Ergebnisse:

### Vorträge:

- (1) Trautmann, M.; Süß, C.; Siebeck, S.; Hohlfeld, J.; Wagner, G.: Particle-reinforced aluminum matrix composites based on recycled grit produced by high-energy ball milling and direct powder extrusion, Verbund 2026, Freiburg, Deutschland, 24.05.2024.
- (2) Trautmann, M.: Powder Extrusion of High-energy Ball-milled Particle-reinforced AlSi1MgMn for Lightweight Components, TMS 2024, Orlando, USA, März 2024.
- (3) Meyer, M.: Sustainability and lightweight construction in vertical dynamics, WKM-Symposium, Magdeburg, Deutschland, November 2024.
- (4) Siebeck, S: Strangpressen von partikelverstärkten Aluminiummatrix-Verbundwerkstoffen für Leichtbauanwendungen, Landshuter Leichtbau-Colloquium, Landshut, Deutschland, Februar 2025.
- (5) Trautmann, M.: Recycled aluminum foils for the powder metallurgical production of particle-reinforced aluminum matrix composites, LightMAT 2025, Montreal, Kanada, Juli 2025.

### Übersicht der im Projekt entstandenen Publikationen:

- (1) Meyer, M.; Mayer, R.: AMC materials for lightweight construction applications in vertical dynamics. AAET-Journal 10, 2025, DOI:10.1007/s41104-025-00154-w
- (2) Meyer, M.; Mayer, R.: Leichtbau im Fahrwerk: Sintern von AMC als Ersatz für Stahl. VDI-Konstruktion, 9, 2025, DOI:10.37544/0720-5953-2025-09-62

### Übersicht der im Projekt eingereichten und geplanten Publikationen:

- (3) Meyer, M.; Trautmann, M.; Siebeck, S.; Mayer, R.; Wagner, G.: Particle-reinforced Aluminum Matrix Composites (AMC) for sustainable lightweight structures: From research to automotive applications. Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=6332810> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.6332810>
- (4) Trautmann, M., Siebeck, S., Berndt, N., Wagner, G.: Powder extrusion of high-energy ball-milled particle-reinforced AA6082 aluminum alloy for lightweight components.
- (5) Trautmann, M., Siebeck, S., Hohlfeld, J., Wagner, G.: Particle-reinforced aluminum matrix composites based on recycled grit produced by high-energy ball milling and direct powder extrusion.

### 3 Verwendung der Zuwendung

In der nachfolgenden Tabelle 17 ist die Aufteilung der erhaltenen Verwendung auf den Einzelansatz des **Wiss.-tech. Personal** (A.1) des Finanzierungsplans dargestellt. Abweichungen im Vergleich zum Antrag sind in den geänderten Sätzen für Personalausgaben begründet.

*Tabelle 17: Verwendung der Zuwendung im Bewilligungszeitraum 01.09.2022 – 31.12.2025.*

Personal	FE1 (PVW)	FE2 (IWU)	FE3 (FSD)
A.1	14,5	20,43	16,48

- **Geräte** (Einzelansatz B des Finanzierungsplans)  
Es wurden keine Geräte beschafft.
- **Leistungen Dritter** (Einzelansatz C des Finanzierungsplans)  
Es wurden keine Leistungen Dritter in Anspruch genommen.

### 4 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Alle für den Projektfortschritt relevanten Arbeiten in den verschiedenen AP konnten planmäßig erfolgen. Der Umfang und die Notwendigkeit der Arbeiten stimmen größtenteils mit den im Antrag bewilligten Angaben überein. Folgende Abweichungen im Vergleich zum Antrag sind aufgetreten:

- Am 10.09.2024 beantragten alle drei FE eine kostenneutrale Verlängerung um 8 Monate bis zum 31.12.2025. Diese wurde am 18.09.2024 bewilligt.
- Im ursprünglichen Arbeitsplan waren in AP6.2 Ermüdungs- und Verschleißuntersuchungen an den entwickelten AMC-Werkstoffen vorgesehen. Aufgrund der im Projektverlauf identifizierten Herausforderungen hinsichtlich werkstoffbedingter Verunreinigungen, der eingeschränkten Ausscheidungshärtung sowie zusätzlicher Fragestellungen im Bereich der Beschichtungs- und Fügetechnik wurde dieser Teilarbeitspunkt in Abstimmung mit den Mitgliedern des Projektausschusses nicht weiterverfolgt. Die hierfür vorgesehenen Personalkapazitäten der FE1 wurden stattdessen gezielt für vertiefende Untersuchungen zur Ausscheidungshärtung der AMC-Werkstoffe eingesetzt. Darüber hinaus wurden zusätzliche Entwicklungsarbeiten zur Realisierung des Dichtungs-Führungs-Elements durchgeführt. Sowohl von den Projektpartnern als auch vom Projektausschuss wurde in diesen Themenfeldern ein höheres technisches und wirtschaftliches Verwertungspotenzial gesehen. Die Schwerpunktverlagerung ermöglichte daher eine zielgerichtete Bearbeitung der für die spätere industrielle Anwendung besonders relevanten Fragestellungen.

### 5 Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrags und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten

Im Rahmen des Vorhabens wurden wesentliche wissenschaftlich-technische Fortschritte bei der Verarbeitung und Anwendung von Aluminiummatrix-Verbundwerkstoffen (AMC) erzielt. Dazu zählt insbesondere die

erfolgreiche Überführung der pulvermetallurgischen Prozesskette von EN AW-2017 auf die industriell relevante Legierung EN AW-6082. Darüber hinaus wurde das Pulverstrangpressen von AMC mit unterschiedlichen Verstärkungsanteilen von 10 bis 20 Vol.-% erfolgreich umgesetzt, wobei auf einen zusätzlichen HIP-Prozess verzichtet werden konnte. Zusätzlich wurde die Verarbeitbarkeit von Rezyklatwerkstoffen aus 8xxx-Aluminiumlegierungen als Matrixwerkstoff für AMC untersucht, wodurch neue Ansätze für nachhaltige Materialkreisläufe geschaffen wurden. Die erzielten Ergebnisse rechtfertigen auch den Einsatz kostengünstiger Ausgangswerkstoffe ohne starke Einbußen bei den mechanischen Eigenschaften. Damit lässt sich beim Matrixwerkstoff ein Einsparpotenzial um den Faktor 10 erzielen. Das im Projekt verwendete Al-Gries der Fa. Nimex (KMU) wurde für den pulvermetallurgischen Verarbeitungsprozess qualifiziert und die darauffolgenden Erzeugnisse können mit mechanischen Kennwerten belegt werden. Dies eröffnet neue Absatzwege für zukünftige Kunden.

Ein weiterer Schwerpunkt lag in der erfolgreichen Herstellung komplex geformter Sinterbauteile aus Aluminiumlegierung und AMC mittels des feldunterstützten Sinterverfahrens (FAST/SPS). Hier könnte sich perspektivisch ein Anwendungsgebiet zur Substitution von Stahl bei kleineren Bauteilen in kleineren Serien ergeben.

Die erarbeiteten Ergebnisse zeigen die grundsätzliche Eignung pulvermetallurgischer Fertigungsprozesse für hochbelastete Leichtbaukomponenten.

Neben den wissenschaftlich-technischen Erkenntnissen konnten auch wirtschaftlich relevante Potenziale aufgezeigt werden. Gemeinsam mit den Projektpartnern wurden verschiedene Fertigungs- und Oberflächenverfahren für AMC untersucht, darunter das Plasmapolieren durch AMtopus GmbH, das Reibschweißen bei der Firma Raiser, das Hartanodisieren bei Böttger Oberflächenveredlung GmbH sowie DLC-Beschichtungen auf AMC-Komponenten von Oerlikon. Die gewonnenen Erkenntnisse zur Verarbeitung und den notwendigen Prozessparametern stehen den Unternehmen für zukünftige Anfragen und Aufträge rund um diese spezielle Werkstoffgruppe zur Verfügung und können in der Außendarstellung genutzt werden. Zudem konnte bei der Firma Leiber Expertise zur Schmiedbarkeit von AMC aufgebaut werden.

Besonders hervorzuheben ist die erfolgreiche Integration der entwickelten AMC- und Aluminiumkomponenten in Fahrzeugdämpfer eines VW ID.4. Die Fahrversuche bestätigten die grundsätzliche Funktionsfähigkeit der Leichtbaukomponenten unter realitätsnahen Bedingungen.

Die Ergebnisse bieten insbesondere für KMU entlang der Prozesskette – von der Pulverherstellung über Umform- und Beschichtungsprozesse bis hin zur Bauteilfertigung – neue Verwertungs- und Anwendungsmöglichkeiten. Gleichzeitig eröffnet die Nutzung von Rezyklatmaterialien zusätzliche wirtschaftliche Potenziale im Bereich nachhaltiger Werkstoffkonzepte.

## 6 Wissenstransfer in die Wirtschaft

Der Wissenstransfer in die Wirtschaft geschieht auf unterschiedlichen Wegen:

- Für PA-Mitglieder fanden während der Projektlaufzeit von 39 Monaten 9 Treffen statt, auf denen über aktuelle Projektfortschritte berichtet wurde. Den PA-Vertretern wurde die Technologie in den Laboren vor Ort demonstriert. Die Protokolle und die gezeigten Ergebnisse wurden den PA-Mitgliedern über eine Projekt-Cloud bereitgestellt.
- Nach Projektende wird der Abschlussbericht durch die Forschungsvereinigung (Stifterverband Metalle) veröffentlicht und steht allen interessierten Unternehmen zur Verfügung

(<https://www.wvmetalle.de>). Der Zugang zum Bericht wird auf den Homepages der FE verlinkt und ist barrierefrei abrufbar.

- Während der Projektlaufzeit wurden die Ergebnisse bereits in Fachzeitschriften und auf Tagungen präsentiert. Nach Ablauf der Projektlaufzeit erfolgen mind. drei weitere Veröffentlichungen in Fachzeitschriften.
- Nach Projektende erfolgte die Initiierung und Beantragung von anwendungsorientierten Folgeprojekten mit einem breiten Industriekonsortium aus dem Kreis der PA-Mitglieder und neu gewonnenen Partner (Antragskizzen bei „MaterialNeutral“, M-ERA.NET 2026 und TUC-Validierungsförderung)

## 7 Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

### 7.1 Durchgeführte Transfermaßnahmen (vom Projektstart bis zum Projektende)

Maßnahme	Ziel	Rahmen/Ort	Datum
Nationale Konferenzen und Messen	wiss. Präsentation und anwendungsorientierte Darstellung der Ergebnisse	Vortrag auf Verbund 2026 (Freiburg, DE) Vortrag auf TMS2024 (Orlando, USA) Vortrag WKM-Symposium (Magdeburg, DE) Vortrag Landshuter Leichtbau Kollo. (Landshut, DE) COM & LightMAT 2025 (Montreal, Kanada)	05/24 03/24 11/24 02/25 07/25
Veröffentlichungen	wiss. Präsentation der Ergebnisse internat.	- AAET-Journal „AMC MATERIALS FOR LIGHTWEIGHT CONSTRUCTION APPLICATIONS IN VERTICAL DYNAMICS“ - VDI-Konstruktion “Leichtbau im Fahrwerk: Sintern von AMC als Ersatz für Stahl“ - Materials Today Communications „Component-level evaluation of AA6082-SiCp aluminum matrix composites (AMC) for automotive damper systems“ (eingereicht)	06/25 09/25 06/26
Firmenbesuche	Akquisition von Folgeprojekten, Wissenstransfer	- Firmenbesuche bei VW, Diskussion Ergebnisverwertung, z.B. Fahrversuch - Firmenbesuch ZF (Folgeprojekt, Querlenker) - Firmenbesuch Böttger Oberflächenveredlung GmbH, Harteloxieren, Verfahrensablauf - Firmenbesuch Oerlikon, DLC-Beschichtung von AMC - Firmenbesuch Porsche - Firmenbesuch Schleifdienst Uhlemann, Außenrundscheifen von AMC-Kolbenstange mit Schicht	11/2024- 11/2025 10/2025 09/2023 04/2025 02/2025 08/2024
PA-Sitzung zur Information des PA und der Planung und Abstimmung der Projektschritte	1	Kick-Off, Kurzvorstellung; Planung des Projektablaufs und der nächsten Treffen, <b>Virtuelles Treffen</b>	17.11.22
	2	Projektvorstellung; Vorstellung erster Ergebnisse zu HEM; Feinabstimmung der Randbedingungen (AP1.1, 4.1, 5); <b>Virtuelles Treffen</b>	15.03.23
	3	Randbedingungen und Anforderungen an Oberflächen und Fügeaufgaben bei AMC-Demonstratoren, <b>Virtuelles Treffen</b>	04.07.23
	4	Mahlversuche Rezyklate, Strangpressen AMC, Wärmebehandlung, Diskussion über das weitere Vorgehen, <b>Virtuelles Treffen</b>	20.09.23
	5	Vorstellung der Ergebnisse zu den DOEs, Fixierung der Details und Start der Demonstratorfertigung, Diskussion über das weitere Vorgehen. <b>PVW, Chemnitz, Hybrid</b>	28.02.24
	6	Vorstellung der Demonstratoren, Start der Prüfphase, allg. Diskussion über das weitere Vorgehen; <b>IWU, Chemnitz, Hybrid</b>	26.09.24
	7	Vorstellung der Ergebnisse der Dämpferprüfung an Prüfständen und der Ergebnisse zum AMC-Direkt-Recycling, Einleitung Prüfphase VW, Abstimmung des weiteren Vorgehens hinsichtlich Verwertung; <b>FSD Chemnitz, Hybrid</b>	25.03.25
	8	Ergebnisse Kolbenstange, Recycling von AMC, Schmiedeversuche <b>IWU, Chemnitz, Hybrid</b>	11.09.25
	9	Abschlusspräsentation und Diskussion über weiterführende Aktivitäten <b>FSD, Chemnitz</b>	04.12.25

## Zusätzlich durchgeführte Maßnahmen

Maßnahme	Ort/Rahmen	Datum
Veröffentlichung einer Mitteilung zum Projekt auf der Homepage der Professur Fahrzeugsystemdesign	<a href="https://www.tu-chemnitz.de/mb/fsd/content.php?view=forschungsprojekte_details&amp;lang=de&amp;id=16">https://www.tu-chemnitz.de/mb/fsd/content.php?view=forschungsprojekte_details&amp;lang=de&amp;id=16</a>	10/2022
Veröffentlichung einer Mitteilung zum Projekt auf der Homepage der Professur Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde	<a href="https://www.tu-chemnitz.de/mb/pvw/professor/blog_text.php?id=209">https://www.tu-chemnitz.de/mb/pvw/professor/blog_text.php?id=209</a>	11/2022
LinkedIn Post zum Abschluss des Projektes mit Verweis auf baldigen Abschlussbericht	<a href="https://www.linkedin.com/posts/reproamc-leichtbau-nachhaltigkeit-share-7466062517325193216-JmUN/?utm_source=share&amp;utm_medium=member_desktop&amp;rcm=ACoAAC5X7LQB6yzLoLj-f6fljTulGmODpBdF4Ts">https://www.linkedin.com/posts/reproamc-leichtbau-nachhaltigkeit-share-7466062517325193216-JmUN/?utm_source=share&amp;utm_medium=member_desktop&amp;rcm=ACoAAC5X7LQB6yzLoLj-f6fljTulGmODpBdF4Ts</a>	05/2026

## 7.2 Geplante Transfermaßnahmen (nach Projektende)

Maßnahme	Ziel	Rahmen/ Ort	Zeitraum
Bauteilvalidierung durch Beantragung einer Förderung	Erhöhung des TRL	TUC-Validierungsförderung, Chemnitz	2027
Patentanmeldung zum Sinterbauteil aus AMCs	Absicherung des geistigen Eigentums	Patentrecherche+Erfindermeldung / Chemnitz	2026
Initiierung von anwendungsorientierten Folgeprojekten mit mehreren PA-Partnern	Vertiefung von Rezyklatnutzung, Weitere Bauteilumsetzung, Offene wiss. Fragestellungen klären	Skizze bei Call „MaterialNeutral“ (BMFTR) Skizze bei Call „M-Era.net 2026“ (SAB)	04/2026 05/2026)
Erasmus+ Partnerschaft mit der AGH Krakau und Gastvorlesung zu AMCs von Dr. Maik Trautmann	Internationalisierung der AMC-Forschung mit Partnern in Umformtechnik und Simulation	Erasmus+ Lehrendenaustausch an der AGH Krakau/Krakau, Polen	01/2026
Aufnahme der Inhalte in die Vorlesungen und Praktika der Professur Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde	Wesentliche AMC-Inhalte an Studierende weitergeben, Angebote für stud. Arbeiten, Profilbildung	Vorlesung Verbundwerkstoffe, Vorlesung Complex Materials for Manufacturing, Chemnitz	ab 2026
Veröffentlichungen Fraunhofer	Bekanntgabe und Anregungen für neue Projekte	Jahresbericht des IWU und in der Zeitschrift „weiter vorn“	2026
Bekanntmachung des Abschlussberichts auf Social-Media-Kanäle und Homepage der FEs	Breite Öffentlichkeit über die Projektergebnisse informieren	LinkedIn, Homepage	06/2026

## 8 Literaturverzeichnis

**[Gas24]** Gasha, S.B.; Trautmann, M.; Wagner, G. Effect of Milling Time and Reinforcement Volume Fraction on Microstructure and Mechanical Properties of SiCp-Reinforced AA2017 Composite Powder Produced by High-Energy Ball Milling. *Materials* 2024, 17, 435.

<https://doi.org/10.3390/ma17020435>

**[Hoc12]** Hockauf, M.; Wagner, M. F.-X.; Händel, M.; Lampke, T.; Siebeck, S.; Wielage, B.: High-strength aluminum-based light-weight materials for safety components - recent progress by microstructural refinement and particle reinforcement. *International Journal of Materials Research* 103 (2012), Heft 1, S. 3–11.

**[Nes11]** Nestler D., Siebeck S., Podlesak H., Wielage B., Wagner S., Hockauf M.: Beitrag zum Einfluss von Trennmitteln und Atmosphären zur Prozesskontrolle beim Hochenergie-Kugelmahlen bei der Herstellung von partikelverstärkten Aluminiummatrix-Verbundwerkstoffen, *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 42 (2011) 7, pp. 580 – 584; DOI: 10.1002/mawe.201100832

**[Sie13]** Siebeck, S.; Nestler, D.; Podlesak, H.; Wielage, B.: Influence of Milling Atmosphere on the High-Energy Ball-Milling Process of Producing Particle-Reinforced Aluminum Matrix Composites. In: Fathi, M. (Hrsg.): *Integration of Practice-Oriented Knowledge Technology: Trends and Perspectives*. Berlin Heidelberg: Springer, 2013, S. 315–321.

**[Tra22]** Trautmann M., Ahmad H., Wagner G.: Influencing the Size and Shape of High-Energy Ball Milled Particle Reinforced Aluminum Alloy Powder. *Materials*, 15 (2022)9, art. no. 3022, DOI: 10.3390/ma15093022

**[Wag12]** Wagner, S.; Siebeck, S.; Hockauf, M.; Nestler, D.; Podlesak, H.; Wielage, B.; Wagner, M. F.-X.: Effect of SiC-Reinforcement and Equal-Channel Angular Pressing on Microstructure and Mechanical Properties of AA2017. *Advanced Engineering Materials* 14 (2012), Heft 6, S. 388–393.

**[Wie10]** Wielage, B.; Nestler, D.; Siebeck, S.; Podlesak, H.: Untersuchungen zur Herstellung siliziumkarbid-partikelverstärkter Aluminiumpulver durch Hochenergiekugelmahlen. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* 41 (2010), Heft 6, S. 476–481.

**[Wol14]** Wolf, M.; Wagner, G.; Eifler, D.: Fatigue and Fracture Behavior of MMC in the HCF- and VHCF-Regime. *Materials Science Forum* 783-786 (2014), S. 1597–1602.

**[Yua14]** Yuan, Z.; Li, F.; Zhang, P.; Chen, B.; Xue, F.: Mechanical properties study of particles reinforced aluminum matrix composites by micro-indentation experiments. *Chinese Journal of Aeronautics*, 27 (2014) 397–406.