

Gemeinsamer Schlussbericht zum Projektvorhaben

KoLibri – Komplexe Leichtbaustrukturen für elektronische Anwendungen innerhalb der Mobilität

im Rahmen des
Technologietransfer-Programm Leichtbau (TTP LB)
des
Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWE)

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie



**projektträger
jülich**

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Laufzeit des Vorhabens
01.12.2021 bis 28.02.2025

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren

Beteiligte Projektpartner:

	Christian Walbrecker-Baar Tel.: +49 174 326 7406 christian.baar@siemens.com <i>(Verbundkoordinator)</i>
	Dr. Benedikt Lunz +49 173 3962 380 benedikt.lunz.jv@valeo.com
	Prof. Maik Gude +49 351 463-38153 maik.gude@tu-dresden.de
	Prof. Holger Lieberwirth +49 3731 39-2558 Holger.Lieberwirth@iam.tu-freiberg.de
	Ralf Tank-Döring +49 371 45001-410 ralf.tank-doering@enas.fraunhofer.de
	Christian Hannemann +49 371 5397-1972 Christian.Hannemann@iwu.fraunhofer.de
	Christian Eberlein +49 371 28155 – 0 christian.eberlein@nru-gmbh.de
	Jan Hedemann +49 172 4016855 jan.hedemann@ipoint-systems.de

Inhalt

1. Kurzdarstellung	5
1.1. Aufgabenstellung	5
1.2. Voraussetzungen des Vorhabens	6
1.3. Planung und Ablauf des Vorhabens	7
1.4. Stand der Wissenschaft und Technik	8
1.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen	9
2. Eingehende Darstellung	10
2.1. Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse	10
2.2. Hauptarbeitspaket 0 Projektmanagement	10
2.3. Hauptarbeitspaket 1 Requirements	11
2.4. Hauptarbeitspaket 2 Konzepterstellung	14
2.5. Hauptarbeitspaket 3 Technologien	54
2.6. Hauptarbeitspaket 4 Demonstratoren	81
2.6.1. 4.1 Automotive.....	81
2.6.2. AP 4.2 Bahntechnik	90
2.6.3. AP 4.3 Aerospace.....	94
2.7. Hauptarbeitspaket 5 Test, Simulation und Evaluation	98
2.7.1. AP 5.3 Simulation	100

2.7.2. AP 5.4 Charakterisierung.....	108	
2.7.3. AP 5.5 Messungen und Validierung	108	
2.7.4. Hauptarbeitspaket 6 Fertigungsprozess Transfer	120	
2.8. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises Fehler!	Textmarke	nicht
definiert.		
2.9. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten		123
2.10. Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse		123
2.11. Bekanntgewordene Konkurrenzprodukte und -verfahren im Bewilligungszeitraum		127
2.12. Veröffentlichungen		128

1. Kurzdarstellung

Das Projekt KoLibri konzentriert sich auf die Kühlung von Batteriemodulen und Leistungselektronik durch den Einsatz innovativer Leichtbaustrukturen, wie beispielsweise offenporige Metallschaumstrukturen. Diese Strukturen versprechen nicht nur eine verbesserte Kühlleistung, sondern ermöglichen auch neue Konstruktionsansätze. Ziel ist es, die Kühlleistung bei gleichem Bauraum zu steigern oder alternativ das Gewicht bei gleicher Leistung zu reduzieren.

Darüber hinaus zielt das Projekt auf eine erhebliche Kostensenkung ab. Durch die im Projekt fokussierten Produktionsmethoden, Feinguss und Beschichtung, könnten die Kosten bis zu 75 % niedriger sein als bei herkömmlicher additiver Fertigungstechniken, wie dem Selective Laser Sintering. Weiterhin soll das direkte Drucken von Metallschaumstrukturen auf Leistungsmodulen untersucht werden.

Das Projekt legt einen besonderen Fokus auf die Entwicklung kreislauffähiger Strukturen, die über den Lebenszyklus der Bauteile hinweg geringere Umweltwirkungen haben als herkömmliche Lösungen. Dabei ist der Verbundaufschluss der Komponenten (Kühler und Bauteil) und die sortenreine Rückgewinnung der verwendeten Werkstoffe von zentraler Bedeutung.

1.1. Aufgabenstellung

Das Projekt KoLibri zielt darauf ab, neuartige Leichtbaustrukturen zur Verbesserung der Kühlung von E-Motoren und Leistungselektronik in der Mobilität zu entwickeln. Die geplanten Arbeiten konzentrieren sich auf die Entwicklung von offenen Metallschaumstrukturen, die eine Kühlleistung von 20-50 % bei gleichbleibendem Bauraum oder eine Gewichtsreduktion von bis zu 50 % bei gleicher Leistung ermöglichen.

Ein zentrales Ziel ist die Reduzierung der Produktionskosten um bis zu 75 % durch neuartige Herstellungsverfahren wie Feinguss und Beschichtung. Zudem wird das direkte Drucken von Metallschaumstrukturen auf Leistungsmodulen untersucht, um Gewicht und Ressourcen zu sparen und die thermische Performance zu steigern.

Das Projekt legt großen Wert auf die Schaffung kreislauffähiger Strukturen, um Umweltwirkungen zu minimieren. Dabei spielen die sortenreine Rückgewinnung der verwendeten Materialien und der Verbundaufschluss der Kühler mit Bauteilen eine zentrale Rolle.

Besondere Schwerpunkte der geplanten Arbeiten umfassen:

- **Entwicklung neuer Designs für Kühler und Leistungsmodule:** Hierbei wird auf die mechanische Stabilität und die thermische Effizienz geachtet.
- **Erhöhung der Kühlperformance:** Dies wird als Schlüssel zur Elektrifizierung der Mobilität betrachtet, um das Temperaturmanagement von Batteriesystemen zu optimieren und die Reichweite zu steigern.
- **Ressourcenschonende Herstellungsverfahren:** Die Verwendung von offenporigen Aluminiumschaumstoffen soll den Materialeinsatz bei der Kühlerfertigung um bis zu 75 % reduzieren.

- **Recycling und Wiederverwendung von Ressourcen:** Das Projekt zielt darauf ab, ein verbessertes Recyclingkonzept zu entwickeln, das die Rückgewinnung von Materialien während des gesamten Lebenszyklus der Produkte berücksichtigt.
- **CO₂-Reduktion:** Eine umfassende Ökobilanzierung wird angestrebt, um die Umweltauswirkungen der neuen Technologien zu bewerten und zu optimieren.

Insgesamt sollen durch die interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Industrie und Forschung innovative Konzepte für die Herausforderungen der Elektromobilität entwickelt werden.

1.2. Voraussetzungen des Vorhabens

Das Vorhaben baut auf mehreren technischen, organisatorischen und förderpolitischen Voraussetzungen auf, die essenziell für eine erfolgreiche Durchführung sind:

1. Projektplanung und Management

- Die Projektplanung liegt vor und wurde verabschiedet; alle Projektmanagement-Regeln werden angewendet.
- Ein regelmäßiger und abgestimmter Projektstand sowie ein abgestimmtes Vorgehen bei Änderungen sind sichergestellt.
- Das Konsortium besteht aus erfahrenen Partnern mit komplementären Kompetenzen (u.a. Maschinen- und Anlagenbauer, Materialhersteller, Forschungseinrichtungen, Endanwender).

2. Interdisziplinäre und vernetzte Arbeitsweise

- Die Zusammenarbeit ist interdisziplinär angelegt und deckt die gesamte Prozesskette ab: von der Konzeption über den Aufbau von Fertigungsstrecken bis zur Modellierung, Simulation, Konstruktion und Validierung von Demonstratoren.
- Ein intensiver Informations- und Kommunikationsfluss wird aktiv gefördert, u.a. durch webbasierte Plattformen.
- Arbeitsgruppen innerhalb des Konsortiums bearbeiten definierte Arbeitspakete und Schlüsselstellen.

3. Finanzielle und strukturelle Voraussetzungen

- Eine Umsetzung ohne Förderung, insbesondere ohne Bundesmittel, ist aufgrund des hohen technischen und wirtschaftlichen Risikos, der Innovationshöhe und der bundesländerübergreifenden Partnerstruktur nicht möglich.
- Eine Finanzierung auf europäischer oder föderaler Ebene ist ausgeschlossen, da es sich um ein rein nationales, regional und bundesweit verzahntes Industriekonsortium handelt.
- Die Nutzung von Bundesfördermitteln wirkt als Katalysator für einen schnellen und gezielten Wissensaufbau und -transfer.

4. Experimentelle, technische und wissenschaftliche Voraussetzungen

- Die technischen Anforderungen sind anspruchsvoll; die Herstellung, Verarbeitung und Validierung neuartiger Materialien und Prozesse gehen über den Stand der Technik hinaus.
- Es bestehen methodische Grundlagen für Konstruktions-, Simulations- und Fertigungsstrategien, etwa zur Prozessentwicklung von Feinguss- und Galvanotechnologien sowie zur Ökobilanzierung (einschließlich Integration in Softwaretools).
- Die Erstellung detaillierter Lastenhefte und Spezifikationen auf Basis der Anforderungen aller Partner ist abgeschlossen. Konzepte zu Fertigungs- und Recyclingstrategien sind vorhanden und ihre Machbarkeit nachgewiesen.

5. Risiko- und Ressourcenmanagement

- Das Konsortium plant, implementiert und steuert proaktiv Maßnahmen zur Risikoabsicherung, insbesondere hinsichtlich technischer und ökologischer Herausforderungen (z.B. Recyclingfähigkeit neuer Werkstoffe, Bewertung der Umweltwirkungen).
- Personelle und infrastrukturelle Ressourcen sind durch die Projektpartner gesichert, insbesondere durch Ergänzung institutsinterner Mittel auf Seiten der Forschung.

6. Förderpolitische und gesellschaftliche Einbettung

- Das Projekt ist in die nationale Technologie- und Nachhaltigkeitsstrategie eingebettet (z.B. Technologietransfer-Programm Leichtbau, Beitrag zu CO₂-Reduktion und Circular Economy).
- Es wurde in keiner anderen nationalen oder europäischen Fördermaßnahme beantragt und adressiert mit seinen Zielen die aktuellen förderpolitischen Schwerpunkte.

1.3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Formaler Verbundkoordinator war der Projektpartner SIEMENS. Für die Verbundpartner ergaben sich die nachfolgenden Arbeitsziele der einzelnen Arbeitspakete entsprechend dem Projektantrag, wobei die übergreifenden Projektziele nur durch eine enge Zusammenarbeit aller Partner erreicht werden konnten. Die in Tabelle 1 in der ursprünglichen Planung zur Projektbeginn aufgeführten Arbeitspakete wurden abgearbeitet und im Rahmen regelmäßiger Projektbesprechungen kontrolliert. Dabei wurden aufgetretene Schwierigkeiten mit allen Partnern konstruktiv diskutiert und entsprechende Lösungen gefunden.

Während des Projektverlaufes stellte das Ausscheiden des ursprünglichen Projektpartners HSO Herbert Schmidt GmbH & Co. sowie der assoziierten Partner Rolls-Royce Deutschland Ltd. & Co. KG und METROM Mechatronische Maschinen GmbH eine zusätzliche Herausforderung dar.

Dabei konnten die Aufgaben der ausgeschiedenen Partner durch die in Konsortium verbleibenden Partner aufgefangen werden, allerdings ergab sich zum Erreichen des Gesamtzieles die Notwendigkeit

eine zuwendungsneutrale Verlängerung der Projektlaufzeit um drei Monat bis zum 28.02.2025, die von allen Projektpartnern mitgetragen wurde.

1.4. Stand der Wissenschaft und Technik

Offenporige Schäume für Kühlanwendungen

Geschlossenzelliger Aluminiumschaum ist seit über 25 Jahren Forschungsgegenstand, insbesondere am Fraunhofer IWU, und wird im Automobil- und Maschinenbau als schubsteifer Kern in Sandwichstrukturen genutzt. Mit Dichten bis $0,25 \text{ g/cm}^3$ fand ein Wissenstransfer in die Industrie statt. Offenporige Schäume zeichnen sich, bei Dichten von $0,15\text{--}0,2 \text{ g/cm}^3$, durch eine exzellente Durchströmbarkeit und ein hohes Oberflächen-Volumen-Verhältnis aus, ideal für Wärmetauscher und Kühlanwendungen, insbesondere in der Leistungselektronik. Die Herstellung erfolgt je nach Werkstoff über Feinguss (Aluminium) oder galvanische Beschichtung (Kupfer), wodurch neue, anwendungsspezifische Geometrien möglich werden. Moderne 3D-Druckverfahren bieten zusätzliche gestalterische Freiheiten hinsichtlich Wandstärke, Zellgröße und Strömungsführung.

Entwicklungsmethodik und hybride Strukturen

Das KoLibri-Projekt erweitert etablierte Entwicklungsprozesse (z.B. VDI 2221, 2243) um Leichtbau- und Kreislaufwirtschaftskonzepte sowie eine verkürzte Lebenszyklusanalyse. Unterstützt durch Partner wie TUD-ILK und IFU, werden dabei Recyclingpotenziale und Ressourceneffizienz von Beginn an berücksichtigt. Im Automobilbau setzen sich hybride Strukturen durch, welche über gezielte Materialkombinationen (z.B. Stahl-Faserverbund) die Bauteilleistung optimieren. Additive Fertigung bietet einen vielversprechenden Ansatz für innovative Hybridlösungen.

Recycling und Innovation

Forschungsschwerpunkte liegen auf der Rückgewinnung von Legierungen und dem ressourcenschonenden Aufbau umweltgerechter Produkte. Besonders innovativ ist der direkte Aufbau zellulärer Schäume auf Leistungsmodulen, wodurch Fügestellen entfallen, und die thermische Performance steigt. Herausforderungen bestehen im 3D-Druck auf gekrümmten Oberflächen und in der gleichmäßigen galvanischen Metallschichtbildung.

Leistungselektronik-Kühler

Leistungselektronik nutzt sowohl passive Luftkühler als auch flüssigkeitsgekühlte Platten – meist aus Aluminium – zur effizienten Abwärmeabfuhr. Die effektive Wärmespreizung erfolgt bereits im Aufbau des Leistungsmoduls durch Kupfermetallisierungen und Substrate. Mehr als die Hälfte des gesamten thermischen Widerstandes entfällt im System allerdings auf den Kühlkörper und vor allem auf die thermischen Grenzflächen. Vakuumgelötete Kühlkörper bieten robuste, korrosionsbeständige Lösungen mit großer Oberfläche und turbulenter Strömung, führen jedoch zu erhöhtem Druckabfall im Kühlkreis. Offene Flüssigkeitskühler mit PINs bieten nochmals niedrigeren Widerstand, erfordern aber zuverlässige Abdichtung.

Gieß-, Galvano- und additive Verfahren

Das Fraunhofer IWU beherrscht Feingießverfahren für offenporige Strukturen bis zu einer Porendichte von 45 ppi. Galvanische Beschichtungen benötigen elektrisch leitfähige Urmodelle, erste erfolgreiche Ansätze gibt es bereits für die Beschichtung von 3D-gedruckten Wachsstrukturen. Additive Manufacturing, insbesondere Pulverbett-Verfahren (PBF), ermöglichen komplexe metallische Geometrien für das Wärmemanagement. Neuerdings werden für hoch leitfähige Werkstoffe wie Aluminium oder Kupfer für diese Verfahren speziell optimierte Legierungen und Laserquellen (z.B. grüne Wellenlänge) eingesetzt, um Materialdichte und Wärmeleitfähigkeit weiter zu optimieren.

1.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Innerhalb des Konsortiums erfolgte ein regelmäßiger und konstruktiver Austausch zu den jeweilig relevanten Entwicklungsthemen. Zudem erfolgt ein Austausch mit Austerlitz electronic GmbH zur Kühlplattenstruktur des Benchmark Produkts.

2. Eingehende Darstellung

2.1. Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

Alle Zuwendungen wurden im Vorhaben bestimmungsgemäß verwendet, um entsprechende personelle Stellen sowie die Beschaffung von Material, Fremdleistungen und Investitionen zu finanzieren. Die gestellten Ziele der geplanten Arbeitspunkte konnten mit den zur Verfügung gestellten Ressourcen größtenteils erreicht werden. Im Folgenden sind die durchgeführten Arbeiten sowie die erzielten übergeordneten Ergebnisse zusammengefasst dargestellt.

Tabelle 1: Planung des Projektvorhabens nach Arbeitspaketen

Nr.	Vorgangsname (Hauptverantwortung)	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Q9	Q10	Q11	Q12	
1	AP 0 Projektmanagement (SAG)	█												
2	AP 1 Requirements (VSeA)	█												
3	AP 1.1 Anforderungsprofile	█	█											
4	AP 1.2 Grenzparameter		█	█										
5	AP 1.3 Lastenheft			█	█									
6	MS 1 <i>Requirements festgelegt</i>			◆										
7	AP 2 Konzepterstellung (SAG)		█											
8	AP 2.1 Konstruktiven Merkmale		█											
9	AP 2.2 Druckstrategie		█											
10	AP 2.3 Beschichtung AM Kunststoffe		█											
11	AP 2.4 Mikrofeinguss		█											
12	AP 2.5 Ökobilanzierung / Recyclingfähigkeit		█											
13	AP 2.6 Simulationsansätze		█											
14	MS 2 <i>Konzepte erstellt</i>													
15	AP 3 Technologien (ILK)		█											
16	AP 3.1 Technologieentwicklung Herstellung		█											
17	AP 3.2 Technologieentwicklung Recycling		█											
18	MS 3 <i>Basis-Technologien entwickelt</i>								◆					
19	AP 4 Demonstratoren (NRU)		█											
20	AP 4.1 Automotiv		█											
21	AP 4.2 Bahntechnik		█											
22	AP 4.3 Aerospace		█											
23	MS 4 <i>erste Demonstratoren fertig für Tests</i>								◆					
24	AP 5 Test, Simulation und Evaluation (SAG)		█											
25	AP 5.1 Testplan		█											
26	AP 5.2 Teststand		█											
27	AP 5.3 Simulation		█											
28	AP 5.4 Charakterisierung		█											
29	AP 5.5 Messungen und Validierung		█											
30	MS 5 <i>Validierung durchgeführt</i>													
31	AP 6 Fertigungsprozess Transfer (IWU)		█											
32	AP 6.1 Technologietransfer		█											
33	AP 6.2 Ökobilanzierung und Software		█											
34	MS 6 <i>Konzepte für Transfer erstellt</i>													

2.2. Hauptarbeitspaket 0 Projektmanagement

Als Koordinationstools dienten im Verlauf des Projektes folgende Anwendungen:

- Conceptboard zur Ideensammlung und Planung
- GANNT zur Aufgabenverteilung und Terminübersicht
- Fraunhofer OwnCloud für das Speichern und Teilen von Dokumenten
- Miroboard zur Erfassung der Produktionslinien für die LCA-Erstellung

Die Abstimmung zum Projektfortschritt erfolgte mit dem gesamten Konsortium online im 14-tägigen Rhythmus. Zusätzlich erfolgten in Abhängigkeit von den Inhalten bi- und trilaterale Abstimmungs- und Arbeitstreffen vorwiegend online.

Vor-Ort-Treffen/Workshops

Tabelle 2: Liste Vor-Ort Treffen

Datum	Ort
03.02.2022	Online
13.07.2022	Chemnitz
12.10.2022	München
07.02.2023	Dresden
24.05.2023	Hamburg
26.09.2023	Chemnitz
20.02.2024	Freiberg
10.07.2024	Chemnitz

Koordination/Planung von Veröffentlichungen

Im Rahmen des Projektmanagements bestand eine wesentliche Aufgabe in der Übernahme und Neuverteilung der Arbeiten nach dem Wegfall des Projektpartners HSO Galvanik (vertreten durch Siemens AG) sowie des assoziierten Partners Rolls Royce, vertreten durch Electric Flytrain. Durch die Substitution mit Electric Flytrain erfolgte eine Neuausrichtung der Projektziele: Der ursprünglich vorgesehene Fokus auf elektrische Motoren wurde angepasst und auf thermisch optimierte Batteriesysteme für Flugdrohnen ausgerichtet. Dadurch mussten sowohl die inhaltlichen Schwerpunkte als auch die Arbeitspakete entsprechend überarbeitet und an die neuen Anforderungen angepasst werden.

2.3. Hauptarbeitspaket 1 Requirements

Wie im Antrag beschrieben, wurden die branchentypischen Parameter und Anforderungsprofile von SAG, SMO, Valeo und den jeweiligen Partnern geliefert, auf deren Basis alle Demonstratoren ausgelegt und validiert wurden. In enger Abstimmung mit den Industriepartnern wurden die spezifischen Einsatzbedingungen und Grenzwerte für jede Anwendungsdomäne (z.B. Automobil, e-Mobilität, Drohnen) erhoben und dokumentiert.

Für sämtliche Demonstratorvarianten wurden die zentralen technischen Parameter systematisch erfasst und bei der Auslegung sowie beim Test berücksichtigt:

- **Leistungsaufnahme:** Die maximale elektrische Leistung der Systeme, basierend auf realen Einsatzprofilen.
- **Volumenstrom und Druckabfall:** Sowohl der minimale als auch der maximale Volumenstrom sowie der Druckverlust über die jeweiligen Kühlstrukturen wurden gemessen und analysiert.
- **Maximal- und Arbeitstemperatur:** Die maximal erreichbaren sowie die unter realen Lasten typischen Betriebstemperaturen wurden bestimmt.
- **Spannungs- und Stromgrenzen:** Für jeden Demonstrator wurden die zulässigen Grenzwerte für Betriebsspannung und Strombelastung definiert und überprüft.
- **Herstellungskosten:** Für jede Technologie wurden die Stückkosten anhand realer Herstellprozesse ermittelt.
- **LCA-Parameter (Life Cycle Assessment):** In allen Entwicklungsschritten wurden LCA-relevante Daten (z.B. Ressourcenverbrauch, CO₂-Bilanz, Recyclingfähigkeit) erhoben und für die ganzheitliche Bewertung dokumentiert.

Die Zusammenstellung dieser Parameter erfolgte in Form von Text, Tabellen und Grafiken. IPOINT und ENAS stellten sicher, dass neben den technischen und ökonomischen Aspekten insbesondere die für die Ökobilanzung wesentlichen Umweltdaten erfasst wurden. Die Mission Profiles sowie die thermo-mechanischen Beanspruchungen wurden im Versuchsplan berücksichtigt und dienen als Grundlage für die Validierung der Demonstratoren in realitätsnahen Szenarien. Sämtliche Lastenhefte wurden durch SAG in Kooperation mit den Industriepartnern erstellt, regelmäßig aktualisiert und um die Anforderungen der Galvanik- und Fertigungsprozesse sowie die Daten für die Ökobilanz (IFU) erweitert und tiefgreifend geprüft. Insgesamt wurde bei der Umsetzung besonders darauf geachtet, dass neben den rein technischen Kennwerten die ökobilanzierten Parameter mit erhoben und in die Bewertung der Demonstratorvarianten einbezogen wurden, um eine fundierte Aussage zur ökologischen und wirtschaftlichen Nachhaltigkeit der entwickelten Kühl- und Bauteilstrukturen treffen zu können.

Valeo möchte die herausragende Stelle der Anforderungen an den e-Mobilitätskühlern für Frequenzumrichtern in diesem Abschnitt betonen. Preislich, weil sie in hohen Stückzahlen produziert werden müssen, aber auch konzeptionell, weil sie eine sehr hohe spezifische Leistungsdichte kühlen müssen. Sie stellen deswegen Herausforderungen, die bei anderen Bereichen in der e-Mobilität weniger stringent gelten. Andere Bereiche in der e-Mobilität wie Kühler für Batterien im Auto fordern weniger Leistungsdichte aber verzeichnen Gewichts- und Struktur- Anforderungen sowohl als auch einen gleichmäßigen Wärmewiderstand in allen Positionen. Ladegeräten im Auto setzen wiederum anderen Schwerpunkten.

Mit Namen die Leistungsaufnahme und –dichte bei Frequenzumrichtern der Traktion sowohl als auch Druckabfall und Herstellungskosten sind enge Grenzen gesetzt. Die Anforderungen an den Kühlern sind deswegen in ein paar Abbildungen und 4 Tabellen zusammengefasst. Hierbei ist eine sorgfältige Marktsegmentierung angewandt.

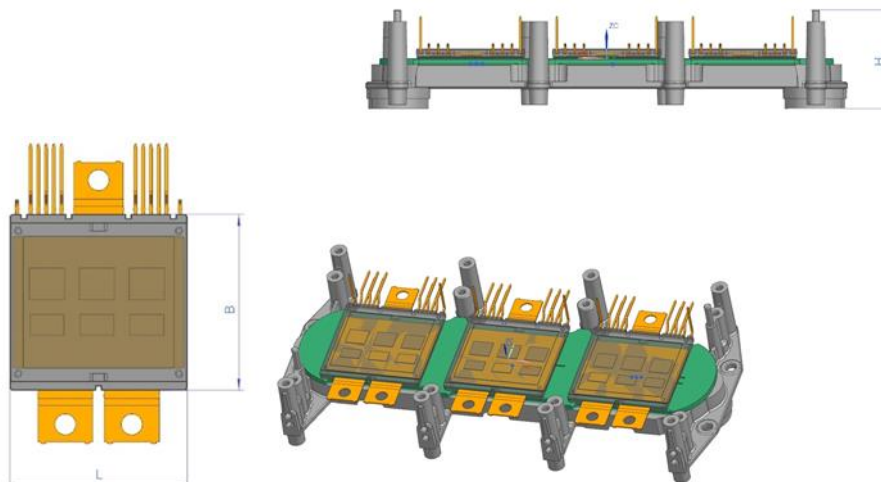


Abbildung 0: Dimensionierung des Kühlers

Tabelle 3: Anforderungen an Kühler in Frequenzumrichter für Traktion der e-Mobilität (stand 2022)

Tabelle der Leistungsklasse bei Flüssigkeitskühler			
	Kategorie 1	Kategorie 2	Kategorie 3
Elektrische Ausgangsleistung	100kW	150kW	250kW
Marktsegment:	preis sensitives Segment	niedriger Leistung	Brot- und Butter Segment ; high end
Type der Leistungsmodule:	Bodenplatte Los (Umgossen DCB)	Bodenplatte Los (Umgossen DCB)	Bodenplatte Los (Umgossen DCB)
Kühlermaterial:	Aluminium	Aluminium	Kupfer
Oberflächenbeschichtung:	Nickel zur Leistungselektronik hin	Nickel zur Leistungselektronik hin	Nickel zum Kühlkreislauf hin

	Kategorie 1	Kategorie 2	Kategorie 3
Kühler Type:	(in-)direkt (geschlossener Kühler)	direkt (offen /geschlossener Kühler)	direkt (offen /geschlossener cooler)
aktiv gekühlte Fläche B*L	B=50 * L=100 mm	B=50 * L=135 mm	B=50 * L=180
Höhe H	H < 50 mm	H < 50 mm	H < 50 mm
Preis Indikation	1x €6,00		
Verlustleistungsdichte	2kW	3kW	5kW
Leistungsdichte [W/dm ²]	4000	4444	5556
Leistungsdichte der Küche Kochplatte (zum Vergleich) [W/dm ²]	750		

Tabelle 3: Tabelle der spezifischen Anforderungen an den Kühlern

Automotive Lieferanten	ISO / TS 16949 und ISO 9001 zertifiziert
verwendete Lieferanten @ Valeo's	präferierten Lieferanten aus dem Panel
Betriebslebensdauer	15 Jahre im Feld, mit Ersatzteilgarantie
aktive Betriebslebensdauer	aktive Betriebslebensdauer für Frequenzumrichter mit Leistungsmodul ≥ 8.000 [Std]
Umwelt Bedingungen	
Klima Stress (Temperatur und Feuchte)	
Umgebungstemperatur des Betriebs	$J_{env,op,min} -40 [^{\circ}C]$; $J_{env,op,max} 120 [^{\circ}C]$
Umgebung nicht aktiv (Lagerung)	$J_{storage,min} -40 [^{\circ}C]$; $J_{storage,max} 140 [^{\circ}C]$
Kühlmittel	Ethylen-Glykol G13 - Wasser 50%-50% Gewicht Prozentsatz
Maximale Verschmutzungsgrad des Kühlwassers	5g/5L
maximale Diameter der Verschmutzung Teilchen	1mm
Oberfläche Kompatibilität	Aluminium oder Nickel (geschlossener Kühler)
Mechanische Parameter	
Zielgewicht	<300g

Im Rahmen des Arbeitspakets 1.2 „Grenzparameter“ wurden am IART die wesentlichen Parameter erarbeitet, die eine verbesserte Recyclingfähigkeit von Produkten sicherstellen sollen. Der Fokus lag dabei auf Abfallvermeidung und -trennung, dem Einsatz von Verbundwerkstoffen sowie unterschiedlichen Verbauungszuständen. Besonders betrachtet wurden Verbindungstechniken, wobei lösbare Verbindungen wie Form- oder Kraftschlüsse priorisiert wurden, um eine einfache Demontage zu ermöglichen. Weiterhin wurde festgestellt, dass duktile oder plastische Werkstoffe die mechanische Recyclingroute erschweren und daher möglichst zu vermeiden sind. Auch die Vielfalt der eingesetzten Kunststoffe wurde kritisch bewertet: Dunkle oder schwarze Kunststoffe lassen sich in NIR-gestützten Sortieranlagen kaum zuverlässig erkennen, weshalb helle oder farbneutrale Alternativen empfohlen werden, um die Sortierbarkeit zu verbessern. Zudem wurde untersucht, inwieweit Verbundwerkstoffe durch monomateriale Alternativen ersetzt werden können. Die Ergebnisse dieser Analysen sind in einem Lastenheft dokumentiert, das konkrete Handlungsempfehlungen liefert und als Leitfaden für eine recyclinggerechte Produktentwicklung dient.

Die definierten Parameter werden in dem relevanten Kapitel näher dargestellt.

2.4. Hauptarbeitspaket 2 Konzepterstellung

Auf Basis des erstellten Lastenheftes werden konkrete Konzeptideen diskutiert und bewertet. Fokus liegt dabei auf den Anforderungen und die technische Umsetzbarkeit der Lösungsansätze im Konsortium und Projektrahmen.

Kernziel der Optimierung für alle drei adressierten Anwendungsbereich ist eine Erhöhung des Wärmeübergangs und die daraus resultierende Verbesserung der Kühlleistung. Dabei werden im Folgenden neben globalen Konzepten auch Varianten diskutiert, die nur im Bereich eines Hotspots

Veränderungen vorsehen, um somit eine gleichmäßige thermische Belastung der Bauteile zu gewährleisten. Hauptaugenmerk bei der Anwendung von metallischen Schäumen muss dabei auf der thermischen Anbindung und einer idealen Wärmeeinleitung in die Struktur und damit auch in das umströmende Kühlmedium liegen. Dieser Herausforderung soll mit Hilfe der folgenden in Abbildung 1 dargestellten Konzepte begegnet werden.

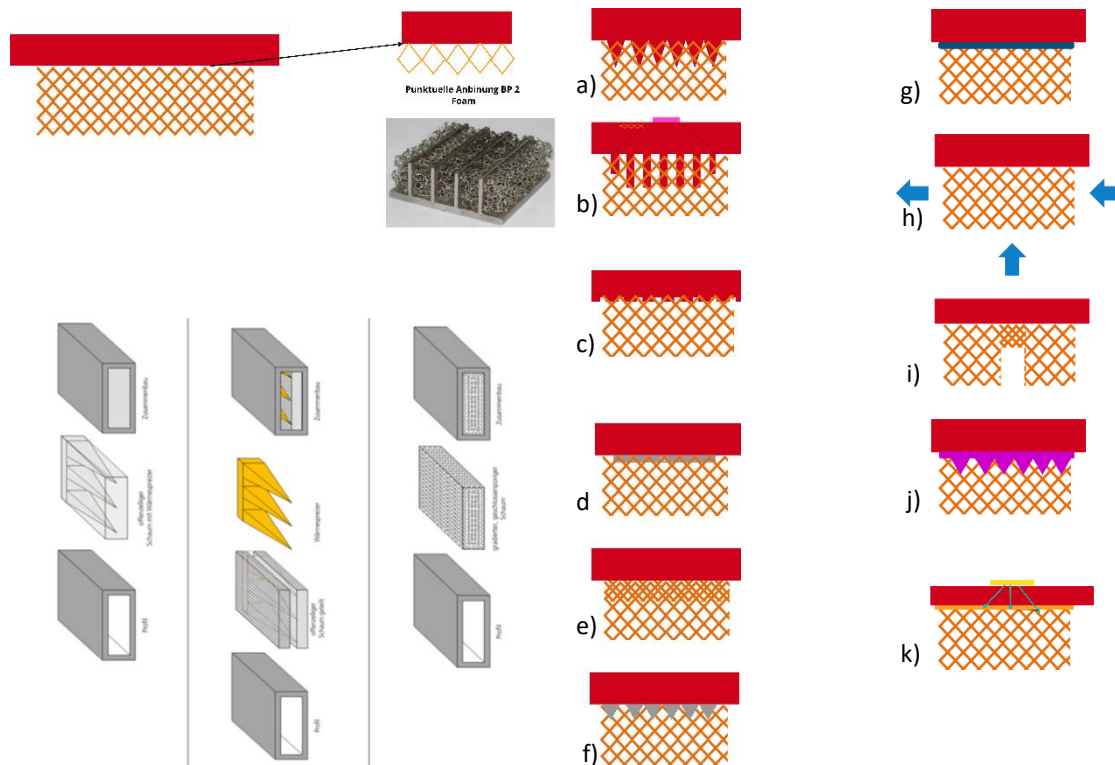


Abbildung 1: Konzepte zum Einsatz von Schaumstrukturen

a) & b) verfolgen den Ansatz eine bestehende PinFin-Struktur durch die Anbindung von metallischen Schaumstrukturen zu erweitern. Durch die zusätzlich entstehenden Turbulenzen bilden sich Wirbel, die den Wärmeabtransport vom Festkörper in das Medium verbessern. Allerdings steht dem eine Erhöhung des Druckabfalls entgegen. Dies gilt es durch einen gezielten ggf. nur lokalen Einsatz der Schäume auszuloten.

c) basiert darauf, statt des teuren Herstellungsprozesses von PinFins die Oberfläche nur zu strukturieren und mit metallischen Schaumstrukturen zu verbinden, wodurch sich das Konsortium eine geringe Verbesserung der Kühlperformance bei gleichen oder ggf. geringfügig erhöhten Produktionskosten erhofft.

d) & g) Gehen auf die Problematik der Anbindung der offenzellularen Struktur an die Grundplatte ein. Aus vorangegangenen Messungen und Tests ist bereits bekannt, dass die reine Schaumstruktur aufgrund der geringen Stegdicke eine zu kleine Kontaktfläche für den Wärmeübergang bietet. Eine mögliche Lösung könnte es sein, durch den bewussten Einsatz von zusätzlichem Lot (d) im Anbindungsprozess der porösen Struktur an die Grundplatte ein „Aufdicken“ der dünnen Stege im Kontaktbereich und somit eine Erhöhung der Wärmeleitung zu erreichen. Alternativ könnte eine stoffschlüssige Verbindung auch durch schäumbares Vormaterial (grau dargestellt in f) erzeugt werden.

Ein ähnliches Konzept ist in e) dargestellt. Hier ist die Überlegung durch die Verwendung von Schäumen unterschiedlicher Porendichte eine Verbesserung zu erreichen. So erscheint es sinnvoll im Bereich der Wärmeleitung zwischen Grundplatte und poröser Struktur dichtere Schäume einzusetzen und mit steigendem Abstand zur Wärmequelle auch die Porosität zu erhöhen. Zur Umsetzung einer solchen Gradierung der offenzellularen Struktur scheint zunächst das Feingussverfahren sehr passend, da eine sehr feine Schaumstruktur aufgrund Elektronenablenkung im galvanischen Prozess nicht zu beschichten ist. Analog wäre ein alternativer Ansatz eine lokale Verdichtung i) vor allem in Bereichen hoher thermischer Belastung.

Mit dem Ziel die Wärmeleitung zwischen Grundplatte und Schaumstruktur zu erhöhen könnten im Grenzschichtbereich Strukturen ähnlich dem PinFin als „Wärmeautobahnen“ fungieren. Diese könnte durch eine gezielte Steuerung im Lötprozess (f) oder aus einem thermisch leitfähigen Kunststoff (TIM) (j) erzeugt werden.

Eine stoffschlüssige Verbindung, die somit eine hohe Wärmeleitfähigkeit ermöglicht könnte direkt im galvanischen Prozess erzeugt werden. (k)

Im Rahmen des Arbeitspakets wurden Empfehlungen für eine recyclinggerechte Produktgestaltung gemäß VDI 2243¹ erarbeitet. Der Fokus lag auf lösbaren Verbindungen (Form- und Kraftschluss) zur erleichterten Demontage, während stoffschlüssige Verbindungen möglichst vermieden wurden. Besonders bei Baseplate und Kühleranbindung wird empfohlen, bei stoffschlüssigen Fügeverfahren wie Schweißen oder Löten gleiche Materialien zu verwenden, um schwer trennbare Mischzonen zu vermeiden. Bei unterschiedlichen Materialien sollten Klebe- oder formschlüssige Verbindungen – idealerweise in Kombination – eingesetzt werden.

Die Werkstoffvielfalt, insbesondere bei Kunststoffen, sollte reduziert werden. Nichtmetallische Bauteile wie Gehäuse sind möglichst in Monokunststoff-Ausführung zu realisieren. Werkstoffkombinationen wie Cu-Al, die laut problematische Mischzonen bilden, sind zu vermeiden. Reine Kupfer- oder Aluminiumkühler sind vorzuziehen; bei beschichteten Materialien besteht geringerer Trennaufwand (vgl. AP 2.5). Dunkle Kunststoffe wurden ausgeschlossen, da sie optisch schwer sortierbar sind. Insgesamt wurde die Konstruktion auf gute Zugänglichkeit und zerstörungsfreie Demontage ausgelegt, um eine sortenreine Trennung und hohe Recyclingfähigkeit sicherzustellen.

Konstruktiv wurden am Fraunhofer IWU in Abstimmung mit NRU verschiedene Modelle einer offenzellularen Struktur entwickelt. Basierend auf dem Ausgangsmaterial des stochastischen Schaumes wurde für eine zeit- und ressourcenschonende Auslegung die Kelvinzelle als geometrische Beschreibung der Schaumstruktur gewählt.

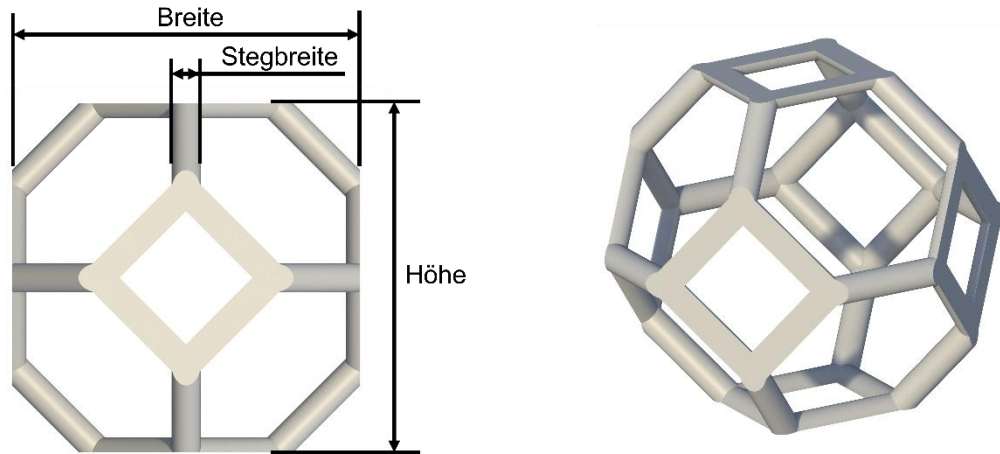


Abbildung 2: Zellstruktur "Kelvin"

Des Weiteren wurden Rahmen- und Grenzbedingungen hinsichtlich des Druckprozesses und der anschließenden Extraktion des Modells abgestimmt und für die laufende Herstellung von Probekörpern umgesetzt.



Abbildung 3: Erste Druckmuster vom 20.04.2023



Abbildung 4: Probekörper Abmessung L/T/H (in mm) = 38/20/25 hergestellt im Wachsdruckverfahren.

3D-

Zielstellung von AP2.2 ist die Bewertung und Planung von additiven Techniken für die Umsetzung der im Projekt zu entwickelnden Strukturen. Das direkte Erzeugen von Kupfer-Kühlstrukturen auf DCB-Platten mittels Lasersintern bietet maximale Gestaltungsfreiheit und somit ein großes Optimierungspotenzial für das Kühlstrukturlayout. Durch die unmittelbare Generierung der Kühlstruktur auf die DCB-Substrate kann der thermische Pfad optimiert werden, da auf eine herkömmliche Basismontage (z.B. Bonding auf eine separate Baseplate) verzichtet wird. Dies reduziert Übergangswiderstände und ermöglicht eine kompaktere Bauweise. Gleichzeitig ist jedoch zu beachten, dass durch den Wegfall der klassischen Baseplate auch die Funktion der Wärmespreizung eingeschränkt wird, was bei der weiteren Entwicklung und Auslegung direkt implementierter Kühlstrukturen berücksichtigt werden muss.

Die größten Herausforderungen zeigen sich aktuell in der thermomechanischen Beanspruchung der DCB während des additiven Fertigungsprozesses. Es konnten zwar erfolgreich erste Proben gefertigt werden, jedoch ist der Prozess derzeit noch nicht vollständig stabil. Der Entwicklungsaufwand bis zur Herstellung zuverlässiger Proben war erheblich, die bisherigen Ergebnisse hinsichtlich Kühlperformance und mechanischer Stabilität sind jedoch vielversprechend. Die ersten Tests deuten auf eine hohe Kühlwirkung sowie ausreichend hohe mechanische Belastbarkeit der direkt generierten Strukturen hin. Ergebnisse werden im zu den Messungen betrachtet.

Alternative wurde die kostengünstigere Variante des Feingusses mit additiv erzeugten Wachsmodellen fokussiert. (AP2.4) Die Wachsmodelle für die Erzeugung der Kühlstrukturen wurden von IWU und NRU gefertigt bzw. mittels 3D-Druck hergestellt. Neben Wachsmodellen mit homogener Schaumstruktur auf Basis von Kelvinzellen wurden von TUD-ILK gezielt thermisch optimierte 3D-Strukturen entwickelt und konstruiert. Das zentrale Ziel dabei war, den thermischen Pfad vom metallischen Schaum in das Fluid optimal auszulegen und so den Wärmeübergang signifikant zu verbessern.

Nach ihrer Herstellung werden die erprobten Wachsmodelle dem Mikrofeingussverfahren zugeführt, um daraus die endgültigen metallischen Kühlstrukturen zu fertigen.

Für die Umsetzung im Feinguss eignen sich als Grundmodell sowohl die kommerziell günstig erhältlichen stochastisch offenzellularen Kunststoffschäume als auch speziell im 3D Wachsdruck erzeugte Strukturen. Hierbei ist nur zu beachten, dass in Abhängigkeit von der Steggeometrie eine begrenzte Gießtiefe und somit Bauteildicke zur Verfügung steht. Diese Grenze spielt aber nach Abschätzung durch NRU und IWU bei den geplanten Modellen eine untergeordnete Rolle.

Die mechanische Entformung der Modelle ist Stand der Technik und erfolgt derzeit durch Wasserstrahlen. Aufgrund der Strahlstärke sind sowohl Zelldichte, minimale Stegdicke und Bauteildicke begrenzt.

Großserientauglichkeit ist im Feinguss nicht erreichbar. Trotzdem sehen die Projektpartner verschiedene Ansätze, die eine Übertragung in einen serientauglichen Prozess ermöglichen. So stellt eine Geometrieentwicklung mit sich wiederholendem Zellaufbau eine umsetzbare Möglichkeit dar. Auf diese Weise könnte die zellulare Struktur des Rohlings in Schichten aufgesplittet und in serientauglichen Verfahren wie dem Spritzguss alternativ zum 3D-Wachsdruk gefertigt werden. Dies stellt aber nur einen möglichen Ausblick dar und Bedarf weiterführenden Untersuchungen

Für die Einschätzung der Abhängigkeit des Gießergebnisses vom gewählten Werkstoff und Bauteilgeometrie werden Technologiedemonstratoren geplant und in AP 3.1 gefertigt. Dabei erfolgte auch die Datenerfassung für die produktspezifische Ökobilanz. Allerdings ist dabei zu beachten, dass es sich um Daten einer prototypischen Herstellung handelt.

Durch den Wegfall des Partners HSO wurde der Schwerpunkt des Arbeitspakets 2.3 auf die direkte Anbindung von Mittelstrukturen (z. B. Metallschäume) an die Wärmequelle gelegt. Im Verlauf des Projekts erfolgte eine vertiefte Untersuchung der Beschichtung von PU-Werkstoffen – sowohl aus fertigungstechnischer als auch aus ökologischer Sicht. Ziel war es, zuverlässige und effiziente Verbindungstechnologien zu identifizieren und deren ökobilanzielle Auswirkungen systematisch zu bewerten.

Es wurde untersucht, wie sich die Galvanotechnik zur Herstellung zuverlässiger und effizienter Metall-Metall-Verbindungen zwischen Kühlstrukturen, wie Metallschaum, und der Wärmequelle – beispielsweise einer Kupfer-Baseplate – nutzen lässt.

Außerdem sollte die Galvanotechnik ebenfalls zur Beschichtung der Schaumstrukturen verwendet werden, durch den bereits erwähnten Wegfall des Partner HSO wurde diese Aufgabe von SAG und dem IART übernommen und teilweise an Dritte verlagert.

Zunächst übernahmen die Projektpartner des IART in Zusammenarbeit mit einer ansässigen Anlage am Fraunhofer IWU die Beschichtung von Vollmaterialien und Schäumen. Die Ergebnisse dieser Eigenbeschichtung waren jedoch nicht zufriedenstellend und geeignet für weitergehende Untersuchungen (Anhaftung an Baseplate, Rezyklierfähigkeit etc.), weshalb die Aufgaben ausgelagert wurden. Die Beschichtung der Vollmaterialien wurde an die Saxonia Galvanik GmbH in Halsbrücke vergeben, während die Schaumherstellung für die Versuche von der MacPanther GmbH in Bremerhaven übernommen wurde.

Basismaterial (Filament)

Um ein möglichst CO₂-armes Bauteil zu entwickeln, wurde zunächst der CO₂-Fußabdruck verschiedener Kunststoffe untersucht. Für die additive Fertigung sind zwei der am häufigsten verwendeten Kunststoffe ABS und PLA. Diese sind jedoch nicht die gängigen Kunststoffe zum Aufschäumen. Der am häufigsten verwendeter Kunststoff zum Aufschäumen ist PUR, von dem jährlich 15,23 Mio.-t verwendet werden.

Tabelle 4: CO₂-Fußabdruck der genannten Kunststoffe

Kunststoff	CO ₂ -Fußabdruck (kg CO ₂ pro produziertes Kilogramm)
ABS	Ca. 7,2 ²
PLA	1,3 – 2,2 ³
PUR	Ca. 2,7 ⁴

Auf Grundlage der verfügbaren Daten stellte sich PLA zunächst als geeigneter Kandidat zur Reduzierung des CO₂-Fußabdrucks dar. Für die angestrebte Anwendung war jedoch ein chemisch geschäumter Werkstoff erforderlich. Eine chemische Aufschäumung mit stochastisch verteilten Porenstrukturen in variabler Porendichte ist ausschließlich mit zweiphasigen Werkstoffen wie Polyurethan (PUR) möglich. Daher wurden im Rahmen des Projekts Versuche mit drei Materialvarianten durchgeführt: massivem PUR, ABS sowie geschäumtem PUR.

Die Untersuchungen ergaben, dass PUR in kompakter Form nur eine geringe Haftung zur aufgetragenen Kupferschicht entwickelt (zusehen in Abbildung 5). Dies ist primär auf die gleitfähige Oberfläche des Vollmaterials zurückzuführen. Industriell beschichtetes ABS zeigte hingegen eine gute Haftung, ließ sich jedoch nicht in vergleichbarer Weise aufschäumen wie PUR.

² B. P. Flannery, J. W. Mares; Greenhouse Gas Index for Products in 39 Industrial Sectors: Plastic Material and Resin Manufacturing; NAICS CODE 325211

³ G. Chen et al; Replacing Traditional Plastics with Biodegradable Plastics: Impact on Carbon Emissions; Engineering 32 (2024); DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eng.2023.10.002>

⁴ L. Karulf et. al; Carbon dioxide utilization: CO₂-based polyurethane foam; Journal of CO₂ Utilization 91 (2025); DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2024.103000>



Abbildung 5: Probleme bei der Schichthaftung der Cu-Schicht auf dem PUR-Substrat (Vollmaterial)

Die Wahl ist auf PUR-Schaum gefallen, da bei diesem Material durch die poröse Struktur eine meso- und mikroskopische mechanische Verklammerung mit der Cu-Schicht entsteht. Die Oberflächenbeschaffenheit tritt hierbei in den Hintergrund, wodurch eine reproduzierbare Haftung gewährleistet werden kann (siehe Abbildung 6). Außerdem entsteht durch den Flammprozess, womit die Zellwände entfernt werden eine dreieckige Form mit konkaven Seiten, welche einen zusätzlichen Formschluss gewährleistet.

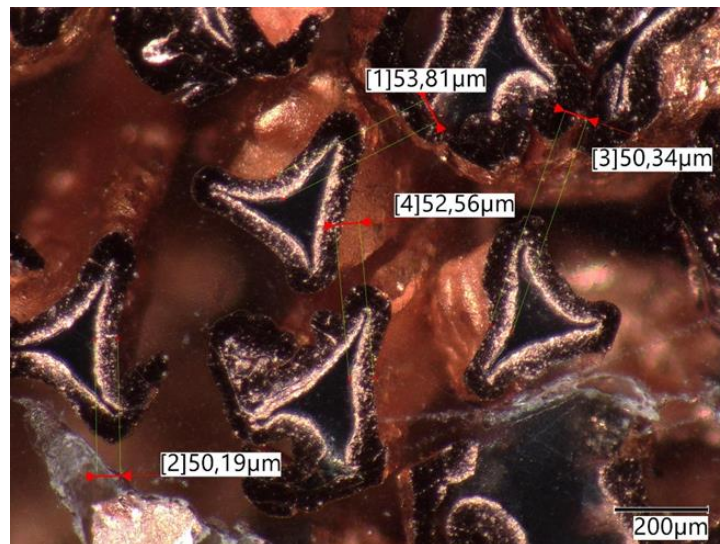


Abbildung 6: Form der PUR-Stege im Schaum inkl. gemessener Schichtdicken

Zwischenschichten/Aktivierungsschichten

Die Zwischenschichten, welche bei der elektrochemischen Beschichtung von Kunststoffen zur Aktivierung der Oberfläche (galvanische Beschichtung von Kunststoffen) aufgebracht werden sind üblicherweise Palladiumbeimungen, Kupfer- und/oder Nickelschichten oder auch Suspensionen aus nanoskaligen Eisenpartikeln und Lösemittel.

In Abbildung 7 sind einmal die typischen Schritte der Galvanisierung von Kunststoffen (hier PUR-Schaum) dargestellt. Als erstes wird die Oberfläche aktiviert, damit sie elektrisch leitfähig ist (2 unten), anschließend findet eine stromlose Abscheidung von in diesem Fall Kupfer statt (3 unten) statt, um eine geschlossene leitfähige Schicht zu erzeugen. Als letztes (um den Prozess zu beschleunigen) wird das Substrat als Kathode in eine Elektrolytbad getaucht und die Schicht bis zur gewünschten Dicke „wachsen“ lassen (4 unten).



Abbildung 7: Verschiedene Stufen der Galvanisierung von PUR-Schaum (1-Schaum, 2-nanoskaliges Fe, 3-chemisch Cu, 4-galvansich Cu)

Der Schichtaufbau der verwendeten Kunststoffe und die analysierten Zwischenschichten sind in Tabelle 5 gegenübergestellt.

Tabelle 5: Zwischenschichten der Materialproben

Materialprobe	Zwischenschicht	Nachweismethode
PUR-Vollmaterial	Nanoskaliges Fe in Lösemittel-suspension	Eigenständige Beschichtung
ABS-Vollmaterial	Abgeschiedenes Ni	REM-EDX
PUR-Schaumwerkstoff	Abgeschiedenes Ni	LIPS

Anbindung an die Baseplate

Die direkte Angalvanisierung der Strukturen auf die Baseplate wurde von den Projektpartnern untersucht. Seitens IART erfolgte eine begleitende Beratung gemäß VDI 2243. Da stoffschlüssige Verbindungen die beste Temperaturübertragung gewährleistet, wurde das Diffusionsschweißen als alternatives Verfahren vorgeschlagen (siehe Abbildung 8). Da es sich um ein Niedertemperaturverfahren handelt, wird das Bauteil bei der Wärmebehandlung nicht übermäßig beansprucht - vorausgesetzt, es werden gleiche Werkstoffe verwendet, wie bereits im Vorfeld betont.

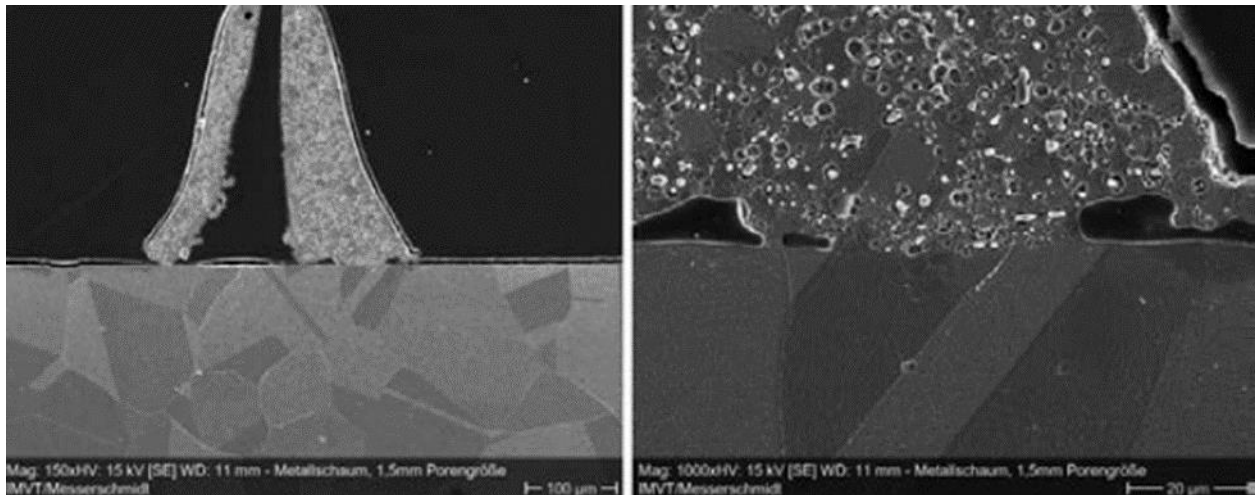


Abbildung 8: Diffusionsschweißen von Metallschäumen⁵

AP2.4 Mikrofeinguss

Das Technologiekonzept zur Umsetzung im Mikrofeinguss wurde von NRU erarbeitet. Die Herstellung von Metallschaumstrukturen im Mikrofeinguss unterliegt mehreren Faktoren. Um die Ergebnisse der Versuchsreihen möglichst präzise auswerten zu können, wurden für die Herstellung Konzepte mit verschiedenen Kombinationen der Einflussfaktoren erarbeitet. Für die Strategieentwicklung zur Entformung der Gussteile sowie die Überprüfung der Entformungsqualität wurden Randbedingungen für das Entformungsverfahren sowie ein ideales Resultat für den Entformungsprozess definiert.

Es wurde in Abstimmung mit IWU Fraunhofer (Chemnitz) Rahmen- und Grenzbedingungen hinsichtlich des Druckprozesses und der anschließenden Extraktion des Modells abgestimmt und für die laufende Herstellung von Probekörpern mit der Abmessung L/T/H (in mm) = 38/20/25 hergestellt im 3D-Wachsdrukverfahren umgesetzt. Die Rahmenstruktur zur Verbesserung der Handlingsprozesse und Vermeidung von Beschädigung der filigranen Kühlgitter-Strukturen weist sehr scharfe Eckkonturen auf. Entsprechend wurden während des Extraktionsprozesses des Modells von den Stützwachsstrukturen einige Modelle zerstört. Generell sollten möglichst große Radien eingebracht werden, um die Bruchgefahr zu vermeiden. Die ersten Modelle wurden mit Öffnungen in der Bodenplatte hergestellt zur Verbesserung des Extraktionsprozesses mit Isopropanol. Dies ist nach entsprechenden Versuchen nicht erforderlich. Für die weitere Verarbeitung im Mikrofeinguss wurden diese Öffnungen geschlossen.

Die Folgeprozesse wurden hinsichtlich des Entfernens des Stützwaxes und Anschnitttechnik untersucht. In Kooperation mit dem Hersteller konnten Aspekte bzgl. der Druckprozesse und Extraktionsverfahren zum Entfernen der Supportstrukturen noch vertieft werden. Hinsichtlich der Extraktion des Stützwaxes (VisiJet M2 SUW) wurden weitere Herstellerprodukte zB. VisiJet Support Wax Remover untersucht. Als geeignetes Lösungsmittel hat sich allerdings Isopropanol 99,9% bestätigt. Es wurde festgestellt, dass die Qualität bzgl. der Modelloberfläche bzgl. Rauigkeit und Detailgrad durch eine kombinierte Behandlung mit Isopropanol 99,9% (32-36°C / 15min) und anschließenden mit VisiJet Support Wax Remover von Fa. 3D SYSTEMS (32-36°C / 15min) noch erhöht werden kann. Die Extraktionsgeschwindigkeit von Isopropanol ist doppelt so schnell wie das Remover- Produkt vom Hersteller. Allerdings verbleibt ein Belag aus

⁵ M. K. Altstede; Diffusionsschweißen von Metallschäumen zur Anwendung in Latentwärmespeichern für fahrzeuggerechte Thermoelektrische Generatoren, Chemie-Ingenieur-Technik; 2023; DOI: 10.5445/IR/1000064924

Rückständen des Stützwachs auf der Modelloberfläche, was insbesondere für filigrane Strukturen nachteilig ist. Durch die Anwendung von VisiJet Support Wax Remover kann dieser Umstand deutlich verbessert werden. Hinsichtlich der Prozesszeiten und Oberflächenqualität ergibt sich somit der bestmögliche Kompromiss.

Für die gießtechnische Umsetzung und Herstellung der metallischen Prüfkörper im Feingussverfahren bietet sich der Kompaktformprozess. Für die im Projekt untersuchten niedrigschmelzenden Al- und Cu – Basislegierung mit einer Schmelztemperatur unter 1200°C sollte aufgrund der sehr guten Auspackverhaltens ein gips-basierter Formstoff eingesetzt werden.

AP2.5 Ökobilanzierung/Recyclingfähigkeit

Zur Erstellung eines Konzepts zur Verbesserung der Recyclingfähigkeit der entwickelten Kühlstrukturen. Grundlage der Vorgehensweise ist die Abfallhierarchie gemäß Artikel 4 der EU-Abfallrahmenrichtlinie (2008/98/EG), welche die Priorisierung von Maßnahmen nach dem Grundsatz „Vermeidung vor Verwertung vor Beseitigung“ vorgibt und anschließend die Wiederverwertung vorschreibt. Im Rahmen der Konzeptentwicklung wurde zunächst die Ist-Situation hinsichtlich der Materialzusammensetzung, Fügeverfahren und Demontagefähigkeit analysiert. Dabei fanden die Vorgaben der DIN EN 45555 (Bewertung der Rezyklierbarkeit und Wiederverwendbarkeit) Anwendung.

Die Bewertung erfolgte entlang des Produktlebenszyklus mit dem Fokus auf den End-of-Life-Bereich. Es wurden verfügbare Recyclingpfade identifiziert und auf ihre technische Umsetzbarkeit sowie mögliche Optimierungspotenziale geprüft. Die gewonnenen Erkenntnisse lassen sich an den in der untenstehenden Abbildung dargestellten Verzugsvarianten verdeutlichen:

So setzt sich die Metallfraktion in den Versuchsreihen M1/M2 überwiegend aus Aluminium (83,25 %) und zu 14,25 % aus Kupfer zusammen, während die Polymerfraktion 38 % Polypropylen und 60 % Polycarbonat enthält. In der Versuchsreihe M3 beträgt der Aluminiumanteil 81,25 % und der Kupferanteil 18 %, bei den Polymeren 39,75 % Polypropylen und 58 % Polycarbonat. In der Versuchsreihe E1 zeigt sich eine Metallfraktion mit 70,2 % Aluminium, 2,1 % Kupfer und 26,3 % leichten Elementen. In der Mischfraktion derselben Reihe wurden 52 % Aluminium, 1,5 % Kupfer und 44,5 % leichte Elemente bestimmt.

Diese Ergebnisse dienen als Basis für konkrete Handlungsempfehlungen zur Verbesserung der Recyclingfähigkeit – stets unter Berücksichtigung ökologischer, gesetzlicher und wirtschaftlicher Rahmenbedingungen.

Aufbauend den im vorangegangenen AP herausgearbeiteten Rahmenbedingungen und wurden im nächsten Schritt die potenziellen Aufschlussverfahren kategorisiert und hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit bewertet. Grundsätzlich lassen sich drei Verfahrensansätze unterscheiden: mechanisch, thermisch und chemisch-thermisch.

Mechanische Verfahren verfolgen das Ziel, die Verbundstruktur durch rein physikalische Maßnahmen wie Zerkleinern, Schreddern oder Fräsen aufzubrechen. Die getrennten Bestandteile lassen sich im Anschluss – je nach Materialkombination – durch klassische Sortierprozesse weiter differenzieren, beispielsweise mittels Siebung, Windsichtung oder Dichtentrennung. Thermische Verfahren wie die Pyrolyse arbeiten unter Sauerstoffausschluss und setzen auf die thermische Zersetzung der Matrix, um faser- oder metallbasierte Bestandteile zurückzugewinnen. Sie sind jedoch mit hohem Energieeinsatz, Emissionspotenzialen und einem teilweise unkontrollierbaren Zersetzungsverhalten verbunden. Ähnlich

aufwendig gestalten sich chemisch-thermische Verfahren, etwa die Solvolyse, bei der gezielt chemischen Reaktionen eingesetzt werden, um bestimmte Materialverbindungen selektiv zu lösen. Neben dem Einsatz aggressiver Medien ist hierbei auch die Rückgewinnung und Aufbereitung der eingesetzten Chemikalien zu berücksichtigen. Außerdem ist es bei den thermischen und chemischen Prozessen nicht möglich, beide Bestandteile in ihrem ursprünglichen Zustand wieder zurückzugewinnen.

Im direkten Vergleich zeigt sich, dass mechanische Verfahren trotz gewisser Einschränkungen hinsichtlich der vollständigen Stofftrennung den geringsten technischen und energetischen Aufwand erfordern. Sie bieten eine robuste und skalierbare Grundlage für erste Aufschlussversuche und ermöglichen eine prozessnahe Umsetzung ohne hohen infrastrukturellen Zusatzaufwand. Des Weiteren hat man so die Möglichkeit, die Rezyklate wiederzuverwenden und muss diese nicht aufwendig aufbereiten. Aufgrund dieser Bewertung wird für die folgenden Versuchsreihen für das Benchmarking der Recyclingfähigkeit der Fokus auf den mechanischen Aufschluss gelegt. Abbildung 9 zeigt den verwendeten Verfahrensablauf für AP 3 und die anschließenden Technologieentwicklungen.

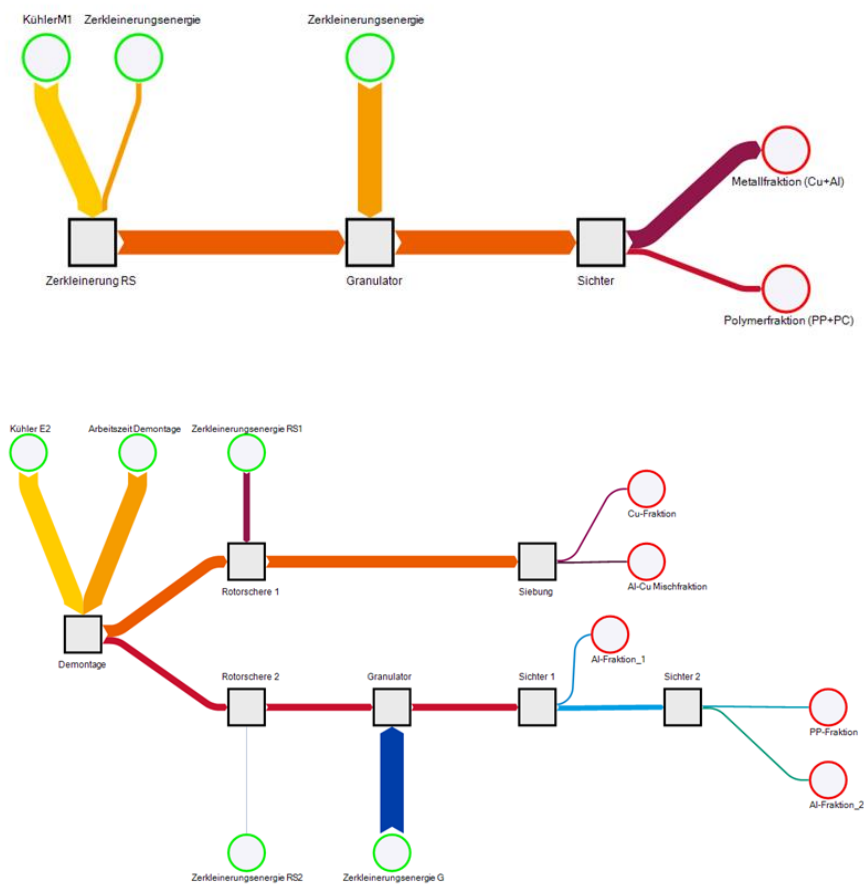


Abbildung 9: Verwendete Verfahrensabläufe (oben ohne Demontage, unten mit Demontage) für die Benchmarkingversuche

IPOINT Ökobilanzierung Herstellung:

Im Rahmen des Arbeitspakets 2 wurde ein Ökobilanzmodell für ein konventionelles Leistungsmodul inklusive Kühlkörper aus dem Automobilbereich entwickelt, das als Grundlage für ein LCA-Benchmarking dient. Dabei handelte es sich um das HybridPACK Drive von Infineon mit einer PinFin Baseplatte (siehe Abbildung 10). Das Bauteil kommt in Elektrofahrzeugen zum Einsatz und dient als Schalter zur Umwandlung von Gleichstrom in Wechselstrom. Die dabei entstehende Wärme wird über einen Kühlkörper und Kühlkanal abgeführt. Die angenommene Nutzungsdauer beträgt 8000 Betriebsstunden..



Abbildung 10: HybridPACK Drive Powermodul von Infineon

Das Powermodul wurde als Benchmark genommen, um die unterschiedliche Arten von im Projekt entwickelten Kühlkörpern als Ersatz für die PinFin Kühlerstruktur anzunehmen. Dabei wurde besonders der Feinguss betrachtet. Dabei wurden zwei alternative Herstellungsverfahren – unter Verwendung von Polyurethanschäum und Wachsmodellen – berücksichtigt. Die funktionelle Einheit des Benchmark-Modells wurde gemeinsam mit Siemens und Valeo entwickelt, insbesondere im Hinblick auf die Nutzungsphase. Dabei wurde untersucht, ob durch den Einsatz von Metallschäumen die Lebensdauer des Moduls verlängert und die Junction-Temperatur gesenkt werden kann bzw. wurden gewisse Annahmen getroffen.

Für die Erstellung der Ökobilanzmodelle wurde einerseits die Experten Desktopapplikation für Lebenszyklusanalysen (LCA) Umberto 11 genutzt und andererseits die Webapplikation auch für nicht LCA-Experten IPOINT Product Sustainability. Während die Modelle detailliert in Umberto erstellt wurden, wurden sich zur einfacheren Handhabung auch zu Product Sustainability hochgeladen. In Product Sustainability werden die erstellten Umberto Modelle als Basis für Berechnungen herangezogen. Der

Vorteil hierbei ist, dass nicht Experten die Modelle nutzen können und auch ohne Experten Wissen Veränderungen an den Produktvariationen machen können. Das bietet den Vorteil, Veränderungen am Produkt zu analysieren und bspw. Hot Spot und What-If Analysen vorzunehmen. Dies ermöglicht unter anderem Ingenieure und Produkt Designer Entscheidungen bezüglich Nachhaltigkeitsaspekten bereits in der Design Phase von Produkten machen zu können. Dies ist Teil des AP 6.2 Ökobilanzierung wurde zum besseren Verständnis hier mit aufgenommen anstatt es zu trennen.

Bei der Modellierung der unterschiedlichen Ökobilanzmodelle wurden je nach Modell unterschiedliche Features genutzt. Es wurde unter anderem Gebrauch gemacht von sogenannten „Production Orders“. Diese basieren auf der Struktur von Stücklisten (Bill of Materials - BOMs) und dienen der Beschreibung der Herstellung eines Produkts oder einer Komponente. Sie sind mit einer definierten Route durch das Produktionssystem entlang einer Reihe von Arbeitsplätzen, Maschinen oder Prozesseinheiten verbunden. In der Regel werden Production Orders zur Abbildung von Fertigungsprozessen eingesetzt. Dabei können unterschiedliche Produktionsaufträge erstellt werden, etwa zum Vergleich verschiedener Produktvarianten mit jeweils eigenen Stücklisten. Ein in Product Sustainability hochgeladenes Umberto-Modell mit Produktionsaufträgen bietet den Vorteil einer klaren Darstellung: Es listet die verwendeten Materialien übersichtlich auf und ermöglicht deren Bearbeitung. Der Fertigungsprozess wird komponentenbasiert dargestellt und folgt einer hierarchischen Struktur. Dies ist auch Bestandteil des generischen Modellierens. Ein generisches LCA-Modell beschreibt einen Modellaufbau, der die Bewertung verschiedener Produktvarianten innerhalb eines einzigen Modells ermöglicht. Dadurch kann die Lebenszyklusanalyse (LCA) für eine Vielzahl von Varianten – mit unterschiedlichen Stücklisten, Fertigungsprozessen oder Entsorgungsszenarien – flexibel durchgeführt werden. Diese Vielseitigkeit macht das Modell besonders effizient und anpassungsfähig. Dem gegenüber steht das herkömmliche lineare Modellieren. Bei linearer Modellierung wird ein Produkt in einem Modell dargestellt, kann dafür sehr detailliert und spezifiziert werden. Innerhalb von KoLibri wurden beide Modellierungsarten angewandt.

In der ersten Phase wurde die Produktion der Kühlkörper genau betrachtet. Dabei wurden die Herstellungsweisen von den Schaum Demonstratoren in Ökobilanzmodelle überführt. Folgende Herstellungsweisen der Metallschäume wurden dabei betrachtet:

1. Feinguss
 - a. mittels Polyurethanschaum in Aluminium und Kupfer
 - b. mittels Wachsmoellen in Aluminium und Kupfer
2. Galvanisierung
 - a. Galvanisierung eines Polyurethanschaums mit Kupfer
 - b. An Galvanisierung eines Kupfer Schaums an eine Baseplate

Der Umfang dieser Ökobilanzmodelle waren Cradle-to-Gate. Cradle-to-Gate bezeichnet eine Betrachtungsgrenze, die alle Umweltwirkungen von der Rohstoffgewinnung („Cradle“) bis zum Verlassen des Produktionsstandorts („Gate“) umfasst. Dabei werden nachgelagerte Phasen wie Nutzung oder Entsorgung nicht berücksichtigt. Diese Methode eignet sich besonders für die Bewertung von Zwischenprodukten oder zur Integration in modulare LCA-Modelle. Da die Modelle am Ende mit dem Benchmarking Modell zusammengeführt wurden, passt diese Betrachtungsweise. Des Weiteren wurde der Schwerpunkt hier auf die Emissionen der Produktion gelegt.

Der Feinguss wurde mittels Production Orders in ein LCA-Modell dargestellt. Dabei wurden zwei unterschiedliche Herstellungsmethoden betrachtet: Zum einen wurde ein Modell aus Polyurethanschaum, zum anderen ein Modell aus Wachs erstellt. In beiden Fällen entstanden nach mehreren Verarbeitungsschritten gegossene Formen aus Kupfer und Aluminium. Bei der Herstellung im Feingussverfahren mit einem Wachsmo­dell gibt es einen zusätzlichen Arbeitsschritt (siehe Abbildung 11). Die Produktionskette stellt sich wie folgt dar:

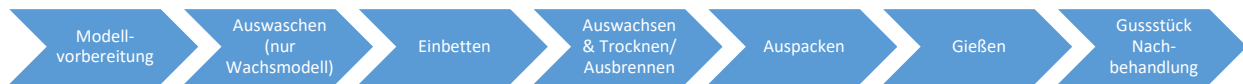


Abbildung 11: Produktionsschritte Feinguss

Die Datenerhebung und -zusammenführung erfolgte durch IPOINT in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern NRU und IWU im Rahmen mehrerer Online-Termine. Zunächst wurden die einzelnen Produktionsschritte mithilfe des Online-Whiteboards Miro visualisiert. Anschließend wurden die Input- und Output-Daten der jeweiligen Prozessschritte in einer Excel-Datei dokumentiert. Die Messungen der Daten erfolgte direkt durch IWU und NRU. Abschließend wurden alle Informationen in ein Umberto-Modell überführt und im weiteren Projektverlauf iterativ weiterentwickelt.

Die definierten funktionelle Einheiten sind für den Feinguss die Herstellung von 1 kg Kupferschaum und 1 kg Aluminiumschaum beziehen (siehe Abbildung 12). Das in Umberto erstellte Ökobilanzmodell wurde in der Product Sustainability hochgeladen und Ergebnisse visualisiert. Die Ergebnisse ermöglichen eine transparente Darstellung der Umweltwirkungen und bieten eine fundierte Grundlage für weitere Optimierungen (auch AP 6.2).

Der Vergleich zeigt, dass der Aluminium-Feinguss in Kombination hergestellt mittels eines Polyurethanschaummodells die geringsten CO₂-Emissionen aufweist. Besonders auffällig war der hohe Energieverbrauch bei der Herstellung des Wachsmo­dells mittels 3D-Druck. Da der Energieverbrauch während des 3D-Drucks sehr schwanken kann und auch viel Optimierungspotential anbietet wurden zwei Produktvarianten mittels Produktion Order in Umberto dargestellt mit 50% weniger Energienutzung während des 3D-Drucks. Auf der Abbildung 12 werden die Emissionen in kg CO₂-eq. dargestellt. Es wird deutlich was die Reduktion des Energieverbrauches während des 3D-Drucks ausmacht. Dies verdeutlicht das vorhandene Optimierungspotenzial in der Prozessgestaltung und trägt zur Ressourcenschonung bei.

Die gewonnenen Erkenntnisse liefern wertvolle Impulse für die Weiterentwicklung nachhaltiger Fertigungsprozesse und unterstützen die Zielsetzung, Materialeinsatz und Energieverbrauch signifikant zu reduzieren.

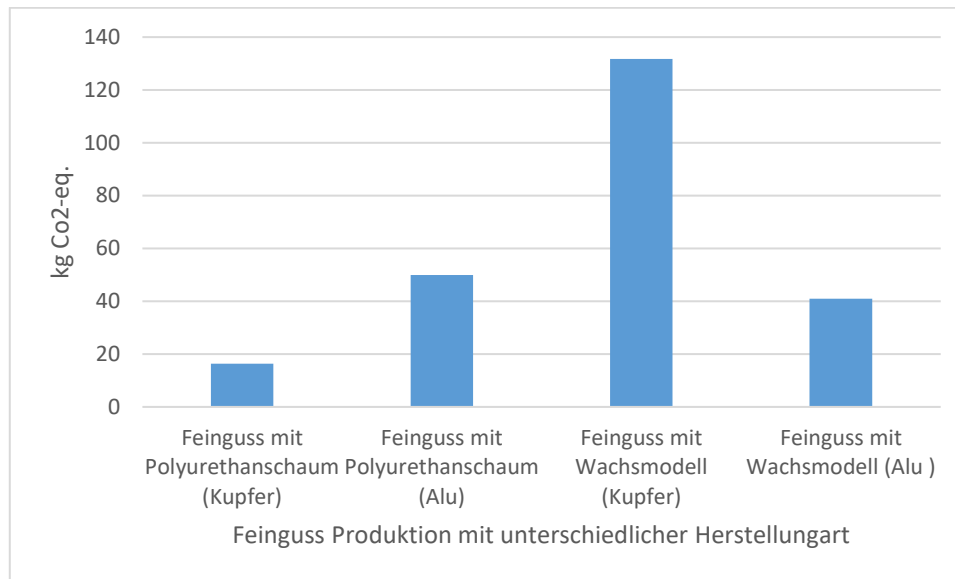


Abbildung 12: Ergebnisse der Feinguss Produktion von Metallschäumen in kg CO₂-eq.

Eine weitere betrachtete Herstellungsmethode war die Galvanisierung eines Metallschaums. Als zentrale Referenz diente hierbei die Galvanisierung eines Polyurethan-(PU)-Schaums mit Kupfer, welcher anschließend als metallisch verstärkter Schaumkörper betrachtet wurde. Zusätzlich wurden zwei weitere Versuchsaufbauten konzipiert, jedoch nicht vertiefend analysiert, da sie als hypothetische Szenarien außerhalb des eigentlichen Projektfokus einzuordnen sind. Dabei handelte es sich um (1) die Herstellung eines Kupferschaums, der auf eine Basisplatte galvanisiert wird, sowie (2) die mögliche Galvanisierung im Rahmen einer Kleinstserie.

Die durchgeführte LCA erfolgte nach dem „Cradle-to-Gate“-Ansatz, sodass sämtliche Prozessschritte von der Rohstoffgewinnung bis hin zur Fertigstellung des galvanisierten Schaums berücksichtigt wurden. Da die Galvanisierung erst zum Ende des Projektes durchgeführt werden konnte. Ist die Betrachtung nicht so vertiefend wie die Herstellung eines Metallschaums mittels Feinguss. Als funktionelle Einheit wurde die Herstellung eines galvanisierten Schaums definiert, wodurch die ökologischen Auswirkungen dieser spezifischen Produktionsmethode vergleichbar und messbar gemacht werden konnten.

Die Galvanisierung bietet im Kontext der Metallschaumherstellung mehrere positive Eigenschaften:

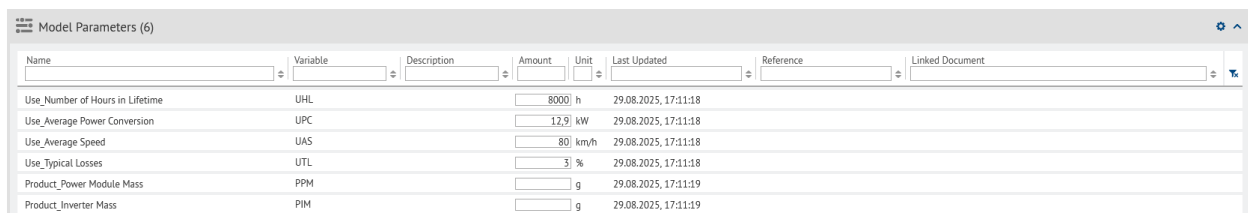
- **Hohe Gestaltungsfreiheit:** Bestehende poröse Strukturen, wie PU-Schäume, können direkt metallisch verstärkt werden, wodurch komplexe Geometrien reproduzierbar herstellbar sind.
- **Gezielte Materialeigenschaften:** Durch die Wahl des galvanisch abgeschiedenen Metalls lassen sich Eigenschaften wie elektrische Leitfähigkeit, Wärmeleitfähigkeit oder mechanische Festigkeit gezielt anpassen.
- **Material- und Ressourceneffizienz:** Da lediglich ein dünner metallischer Überzug aufgebracht wird, kann der Materialeinsatz im Vergleich zu massiven Metallschaumverfahren reduziert werden.
- **Oberflächenqualität und Korrosionsschutz:** Galvanische Überzüge verbessern die Beständigkeit des Schaums gegen Korrosion und ermöglichen zusätzliche Funktionalisierungen.

In einem weiteren Szenario wurde die Lebensdauer bei gleichbleibender Temperatur von 120 °C auf 16.000 h angesetzt. Diese Annahme reflektiert den potenziellen Vorteil der verbesserten Kühlstrukturen, die trotz unveränderter Betriebstemperatur eine deutlich höhere Lebensdauer des Moduls ermöglichen.

Im Modell werden die unterschiedlichen Kühlkörper gegenübergestellt und ihre Auswirkungen im Lebenszyklus ausgewertet. Dabei zeigte sich, dass der im Projekt entwickelte Prototyp (siehe AP 5) erfolgreich in Umberto abgebildet werden konnte und die Software eine Modellierung mit Datensätzen für einzelne Komponenten erlaubt. Dadurch wird die Handhabung komplexer Modelle erleichtert und vereinfacht. Gleichzeitig wurden Aspekte identifiziert, die für eine verbesserte Nutzbarkeit in künftigen Anwendungen angepasst werden müssen.

Das Gesamtmodell wurde zusätzlich in die Webanwendung Product Sustainability hochgeladen. Damit ist es auch für Personen ohne vertiefte Fachkenntnisse möglich, das Modell zu nutzen und Szenarien zu analysieren. Besonders vorteilhaft ist hierbei, dass Parameter direkt in der Webanwendung angepasst werden können (siehe Abbildung 14). Dies erleichtert die Handhabung großer Modelle erheblich und eröffnet neue Möglichkeiten für zukünftige Anwendungsfälle. So können beispielsweise Lebensdauer, durchschnittliche Geschwindigkeit, Leistungsumwandlung, typische Verluste oder Massen einzelner Komponenten wie des Powermoduls oder des Inverters flexibel verändert werden.

Diese Parametrisierung ermöglicht es, verschiedene Szenarien systematisch zu untersuchen, ohne die gesamte Modellstruktur neu aufbauen zu müssen. Gleichzeitig wird die Nachvollziehbarkeit und Vergleichbarkeit der Ergebnisse verbessert. Insbesondere für Anwenderinnen und Anwender, die nicht über tiefgehende Modellierungskenntnisse verfügen, bietet die Parametereinstellung in Product Sustainability eine praxisnahe und effiziente Möglichkeit, die Auswirkungen veränderter Annahmen zu analysieren und fundierte Entscheidungen zu treffen (AP 6.2).



Name	Variable	Description	Amount	Unit	Last Updated	Reference	Linked Document
Use_Number of Hours in Lifetime	UHLL		8000	h	29.08.2025, 17:11:18		
Use_Average Power Conversion	UPC		12.9	kW	29.08.2025, 17:11:18		
Use_Average Speed	UAS		80	km/h	29.08.2025, 17:11:18		
Use_Typical Losses	UTL		3	%	29.08.2025, 17:11:18		
Product_Power Module Mass	PPM			g	29.08.2025, 17:11:19		
Product_Inverter Mass	PIM			g	29.08.2025, 17:11:19		

Abbildung 14: Abbildung von Parameter des Benchmark Modells in Product Sustainability.

Abbildung 15 zeigt die Ergebnisse der LCA, insbesondere das Treibhauspotenzial, vom Benchmark-Modell mit PinFin-Kühler und den alternativen Metallschaumkühlern. Diese unterscheiden sich sowohl hinsichtlich des eingesetzten Materials (Kupfer oder Aluminium) als auch in Bezug auf die angenommene Lebensdauer (100 %, 150 % und 200 %). Die Ergebnisse sind normiert auf den Wert 1, wobei der Benchmark als Referenz dient. Wie bereits oben genannt, berücksichtigt die Analyse die Lebenszyklusphasen Nutzung, Rohmaterialien, Montage sowie End-of-Life. Dabei wird deutlich, dass die Nutzungsphase mit einem Anteil von rund 82 % die Umweltbelastung dominiert und somit den entscheidenden Einflussfaktor darstellt – unabhängig vom Material oder der Lebensdauer. Unterschiede zwischen den Materialvarianten zeigen sich vor allem bei den Rohmaterialien: Während Kupfer-Metallschaum-Kühler insgesamt geringere Belastungen in dieser Phase aufweisen, sind die Werte bei Aluminiumvarianten höher. Mit zunehmender Lebensdauer reduziert sich zudem der relative Anteil der

Rohmaterialphase, was auf eine effizientere Ressourcennutzung hinweist. Die Beiträge aus Montage und End-of-Life sind dagegen gering und für die Gesamtergebnisse kaum ausschlaggebend.

Insgesamt verdeutlicht die Grafik, dass insbesondere langlebige Metallschaum-Kühler ökologische Vorteile bieten können. Kupferbasierte Varianten zeigen hier bei 150 % und 200 % Lebensdauer deutliche Vorteile gegenüber dem Benchmark, da sie durch die längere Nutzung und den vergleichsweise geringen Rohmaterialanteil zu einer Reduktion der Umweltbelastung beitragen. Es wurden diese Kühler ausgewählt für einen Vergleich, da diese im Vergleich zu den anderen Kühler Alternativen das meiste Potential aufweisen hinsichtlich ökologischer Aspekte. Die Galvanik bietet auch viel Potential, wurde jedoch nicht ganz so tief untersucht wie die Herstellung mittels Feinguss.

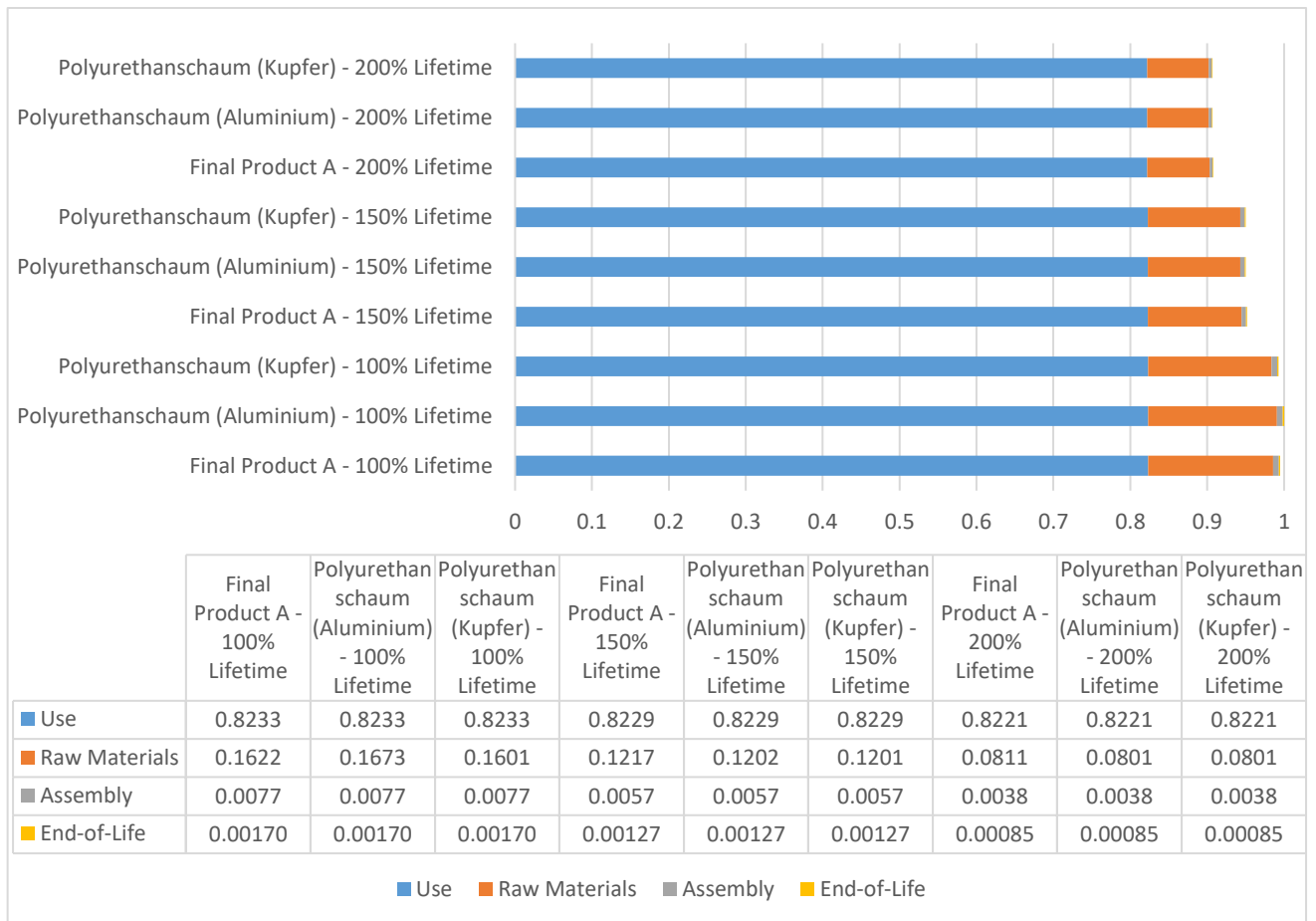


Abbildung 15: CO2 Fußabdruck des Benchmarks aufgeteilt in Lebenszyklusphasen mit PinFin Kühler im Vergleich zu Metallschaum-Kühlern unterschiedlicher Herstellungsarten und unter Nutzung unterschiedlicher Materialien (normiert auf 1).

Zusätzlich wurde im Rahmen des Projekts in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IWU auch die Herstellung geschlossenzelliger Aluminiumschäume untersucht und eine LCA aufgebaut. Auch diese Herstellung wurde in Umberto modelliert und für weitere Nutzung in Product Sustainability hochgeladen (fließt ein in AP 6.2) und die Ergebnisse den Projektpartnern zur Verfügung gestellt. Diese Schäume werden mittels eines pulververschmelzmetallurgischen Schäumprozesses aus industriellen Aluminiumschnitten gefertigt. Ein wesentlicher Vorteil dieses Ansatzes liegt in der sinnvollen Nutzung von Verschnittmaterialien, wodurch eine höhere Ressourceneffizienz erreicht wird. Darüber hinaus sind die

zugrundeliegenden Prozesse bereits weitgehend ausgereift, was zu vergleichsweise günstigen CO₂-Emissionen in der Herstellung führt. Da geschlossenzellige Aluminiumschäume vor allem für Anwendungen im Bereich Zugtechnik vorgesehen sind, wurde jedoch kein direkter Vergleich mit dem im Benchmark-Modell betrachteten Kühlkörper vorgenommen.

IPOINT Ökobilanzierung Recycling:

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Lebenszyklusanalyse (LCA) der Recycling-Benchmark dargestellt. Anschließend folgen die Resultate der Versuche mit den verkupferten Polyurethanschäumen. Die Analysen wurden überwiegend durch IPOINT in Zusammenarbeit mit der TU Freiberg durchgeführt.

Die Ergebnisse beziehen sich auf mehrere Arbeitspakete (AP), wobei der Schwerpunkt auf AP 2, insbesondere AP 2.5 – Ökobilanzierung/Recyclingfähigkeit, liegt. Weitere relevante Beiträge stammen aus AP 2.1 und AP 2.3. Zur besseren Lesbarkeit sind auch Ergebnisse aus AP 3.2 – Technologieentwicklung Recycling in die Darstellung integriert.

Zu Beginn des Projekts wurden Benchmarking-Versuche durchgeführt. Hierfür nutzte die TU Freiberg handelsübliche Kühler, die mittels mechanischer Verfahren getrennt wurden. Detaillierte Informationen zum Versuchsaufbau und zur genauen Benennung der Kühler sind im AP 3.2 dokumentiert.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Ökobilanzierung dargestellt. Die funktionelle Einheit der Analyse war das Recycling von jeweils 1 kg Kühler, um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse sicherzustellen. Betrachtet wurde ausschließlich die End-of-Life-Phase der Kühler.

Zur Bewertung wurden zwei Szenarien angenommen:

1. Nutzung eines konventionellen Strommixes
2. Nutzung von erneuerbaren Energien

Diese Szenarien ermöglichen eine differenzierte Betrachtung der Umweltauswirkungen unter verschiedenen Energieversorgungsbedingungen. Im folgenden (siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**, **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) werden die Stoffströme aufgezeigt wie die Recyclingprozesse in der Software Umberto modelliert wurden und auf dessen Basis die Berechnungen in der Software durchgeführt wurden. Im AP 3.2 ist das Ergebnis des Recyclings zu finden, welche Stoffe voneinander getrennt wurden und wie erfolgreich diese Prozesse für das Recyclings der konventionellen Kühler ist.

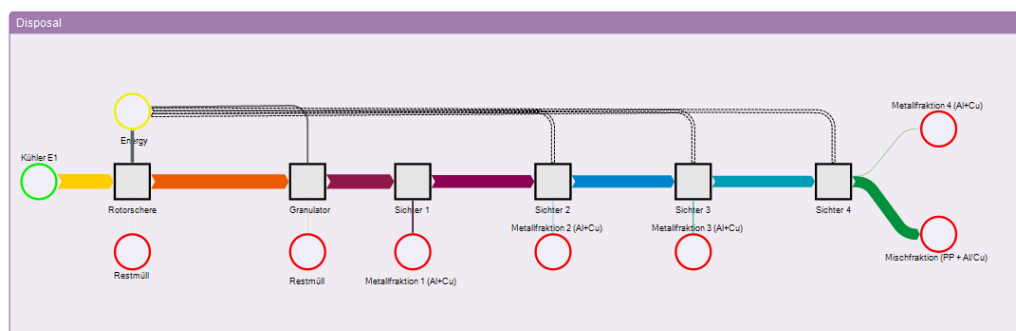


Abbildung 16: Stoffströme der Kühler E1-E3 (siehe auch AP 3.2)

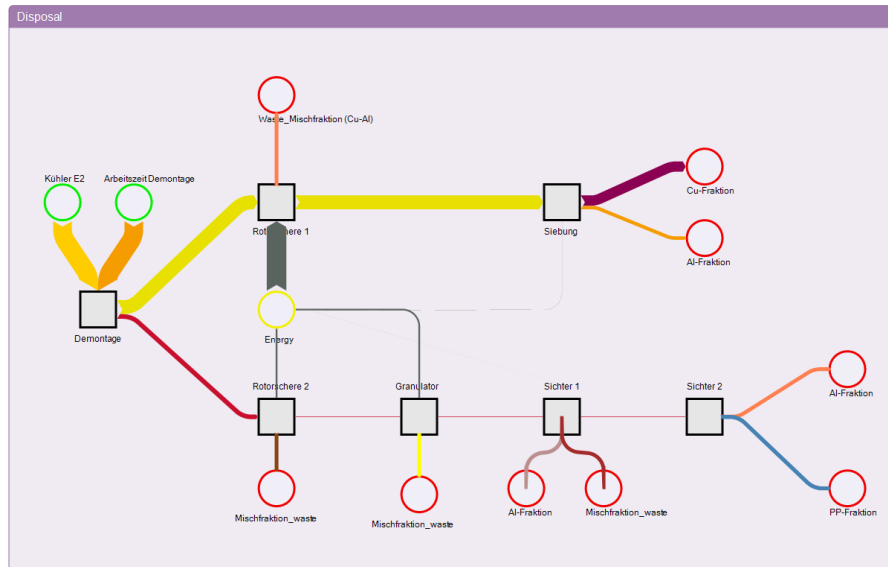


Abbildung 17: Stoffströme des Kühlers E2 (siehe auch AP 3.2)

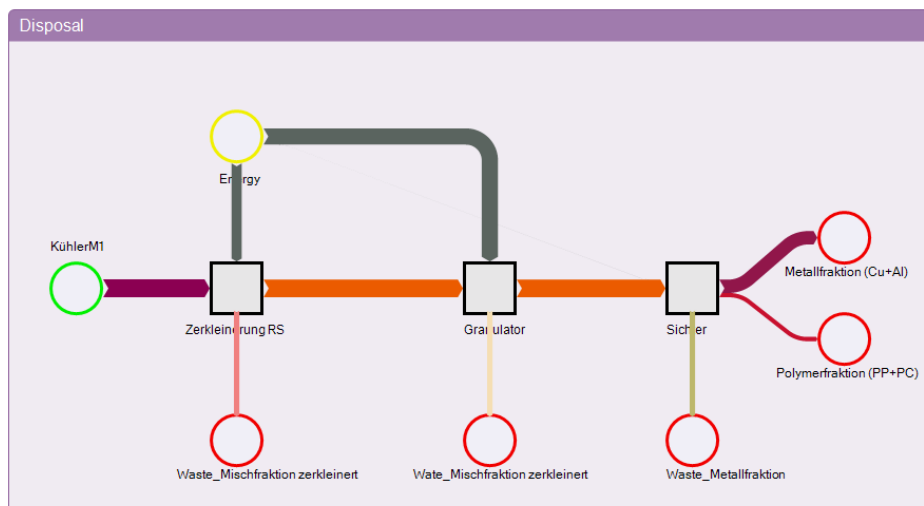


Abbildung 18: Stoffströme der Kühler M1, M2, M3 (Abbildung ist stellvertretend für die LCAs der Kühler M1, M2 und M3, da der Versuchsaufbau ähnlich ist)

Die folgende Abbildung 19 zeigt den CO₂-Fußabdruck (in kg CO₂-Äquivalent) verschiedener Kühlerdesigns (E1 & E3, E2, M1, M2, M3) unter Berücksichtigung zweier Energieversorgungsszenarien: Strommix aus erneuerbaren Energien (EE) und konventioneller Strommix. Die Emissionen setzen sich aus den Anteilen für „electricity, high voltage“ sowie „Restmüll / Mischfraktion“ zusammen.

In sämtlichen Fällen führt die Nutzung von erneuerbaren Energien zu einem signifikant geringeren CO₂-Fußabdruck im Vergleich zum konventionellen Strommix. Dies verdeutlicht den hohen Einfluss der Energiequelle auf die Umweltwirkung des Recyclingprozesses.

Die Kühler E1 & E3 sowie E2 weisen im konventionellen Szenario die höchsten Emissionen auf. Dies ist auf höhere Anteile an Stromverbrauch und Restmüll zurückzuführen. Die Kühler der M-Serie (M1–M3) zeigen insgesamt geringere Emissionen, insbesondere im EE-Szenario. M3 (EE) erreicht den niedrigsten CO₂-

Fußabdruck aller betrachteten Varianten. Bei den Kühlern E2 und M3 ist der Anteil der Restmüll-/Mischfraktion vergleichsweise hoch, was auf eine geringere Recyclingfähigkeit oder komplexere Trennprozesse hinweisen kann. Die Kühler M1 und M2 zeigen hier deutlich geringere Werte, was auf eine effizientere Materialtrennung schließen lässt.

Die Ergebnisse unterstreichen die Relevanz der Energiequelle und der Materialzusammensetzung für die ökologische Bewertung von Kühlerdesigns. Die Kombination aus hoher Recyclingfähigkeit und Nutzung erneuerbarer Energien bietet das größte Potenzial zur Reduktion von Treibhausgasemissionen. Besonders die Kühler der M-Serie zeigen in dieser Hinsicht eine vorteilhafte Umweltbilanz.

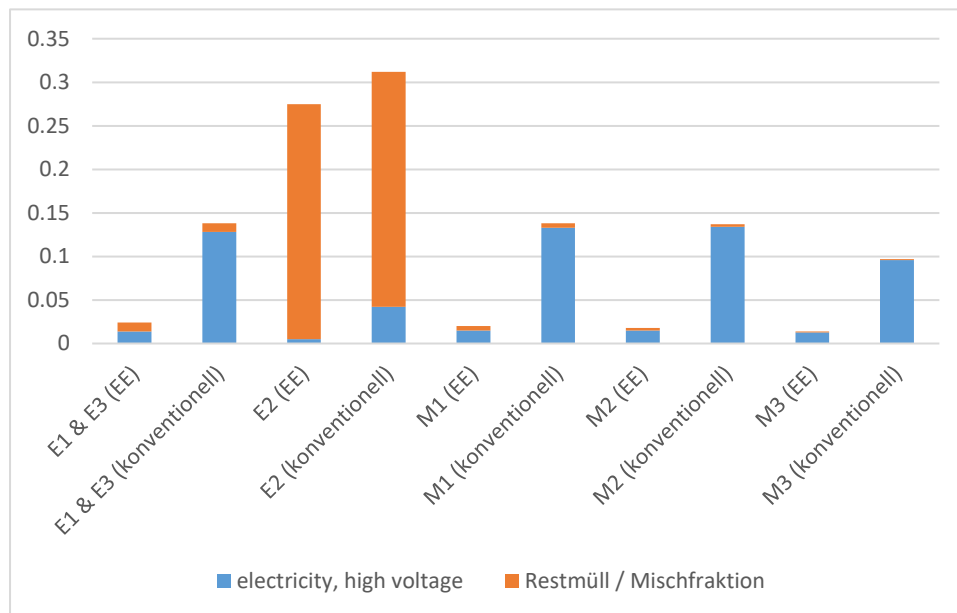


Abbildung 19: CO₂-Fußabdruck der Recyclingrouten der Benchmark Produkte (in kg CO₂-eq.)

Um Nachhaltigkeitsaspekte bereits in die Produktentwicklung zu integrieren, wurde im Rahmen des Projekts eine LCA bei der Untersuchung energieeffizienter Recyclingverfahren eingesetzt. Dabei wurden zwei verschiedene Recyclingprozesse analysiert, um den Ansatz mit dem geringsten Energieverbrauch und der besten Umweltperformance zu identifizieren. Ziel war die Entwicklung eines nachhaltigen, geschlossenen Recyclingsystems für kupferbeschichtete Polyurethanschäume, um Abfall zu vermeiden und die Ressourceneffizienz zu steigern.

Der gewählte Ansatz kombiniert Polymerstreben innerhalb der Metallschäume, wodurch sowohl die strukturelle Integrität als auch das Wärmemanagement verbessert werden. Gleichzeitig wird die Recyclingfähigkeit bereits in den frühesten Phasen der Produktentwicklung berücksichtigt. Durch die konsequente Fokussierung auf fortschrittliche Recyclingtechnologien und Lebenszyklus-Nachhaltigkeit

werden die Grenzen bisheriger Verfahren überwunden und ein wesentlicher Beitrag zur Entwicklung umweltverträglicher Leistungselektronik geleistet.

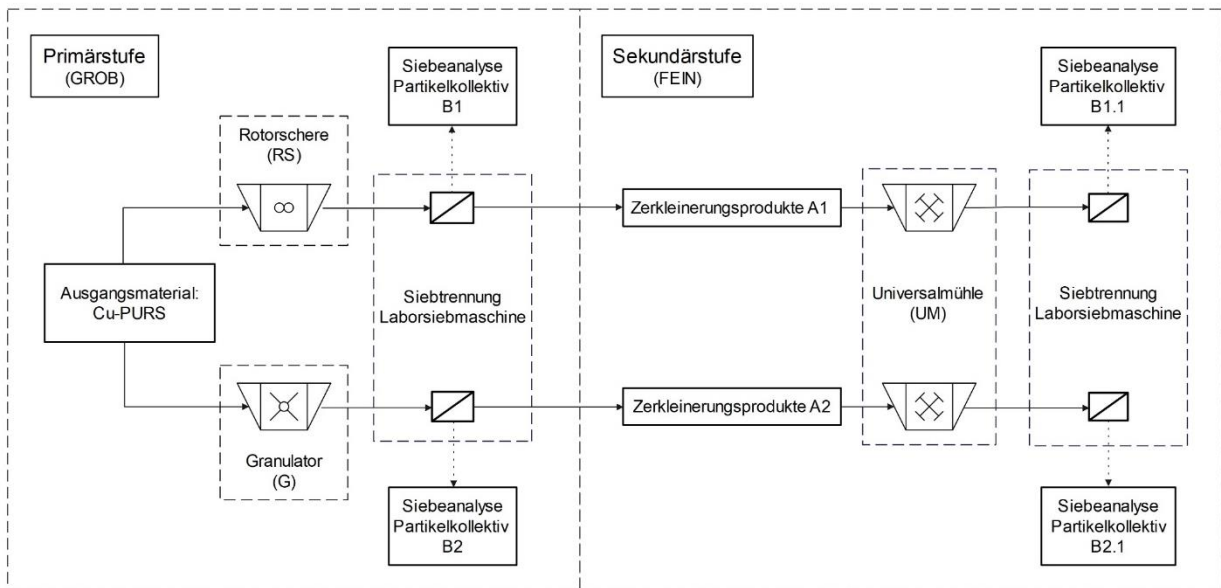


Abbildung 20: Versuchsaufbau für Recyclingprozesse zum Zerkleinern von verkupferten Polyurethanschäume

Für die Untersuchung verschiedener Recyclingwege zur Entschichtung und Wiederverwertung der metallisierten Polymer-Schäume (Cu-PUR) wurde ein spezieller Versuchsaufbau entwickelt (siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Im Mittelpunkt standen zunächst mechanische Recyclingrouten, die insbesondere die Fähigkeit zur Entschichtung der kupferbeschichteten Polyurethanschäume erproben sollten. In diesem Zusammenhang wurden zwei Verfahren getestet: In der ersten Variante wurde der Cu-PUR-Schaum mit einer Rotorschere zerkleinert und anschließend in einer Universalmühle weiter zerkleinert (1). In der zweiten Variante erfolgte die Zerkleinerung zunächst mit einem Granulator, bevor das Material ebenfalls in der Universalmühle weiter verarbeitet wurde (2) (siehe Abbildung 21).

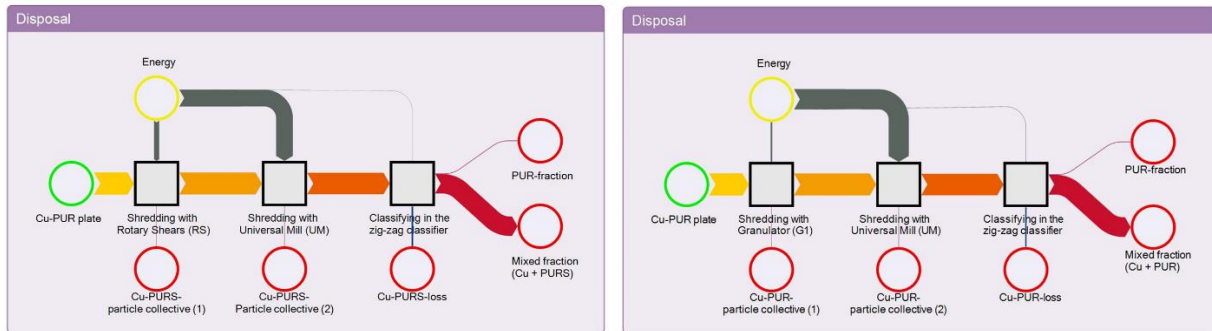


Abbildung 21: Links - Material- und Stoffströme des Recyclingweges 1 & Rechts - Material- und Stoffströme des Recyclingweges 2.

Zur Bewertung der ökologischen Auswirkungen dieser Recyclingrouten wurde eine Screening-LCA durchgeführt. Hierfür kam die Software Umberto zum Einsatz, wobei auf Sekundärdaten aus der Datenbank ecoinvent 3.10 zurückgegriffen wurde (siehe Abbildung 4 und 5). Als Rahmenbedingungen wurden eine Systemgrenze auf End-of-Life-Ebene, unter Berücksichtigung der Prozess- und Abfallstromauswirkungen, sowie die funktionelle Einheit des Recyclings einer 1 kg Cu-PUR-Schaumplatte definiert.

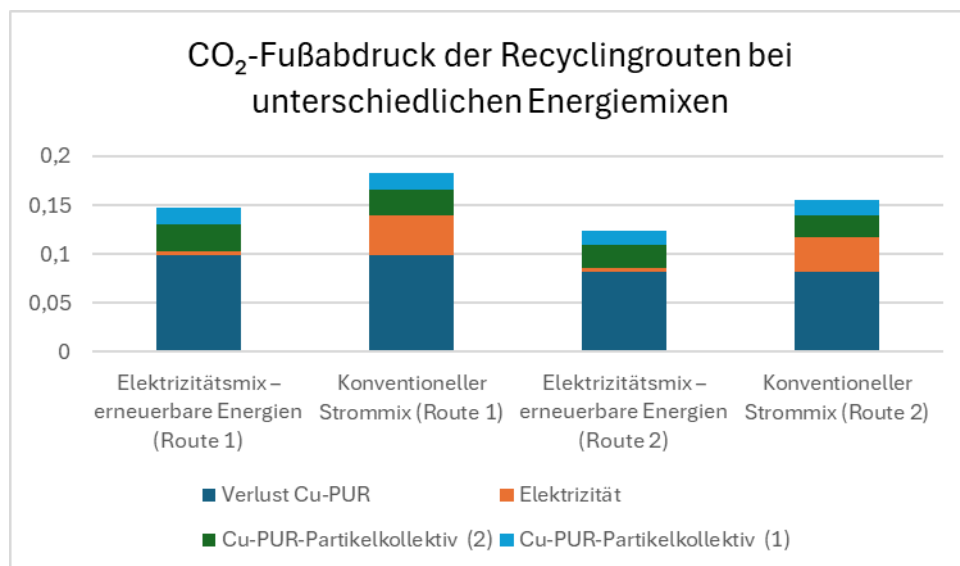


Abbildung 22: CO₂-Emissionen verschiedener Recyclingrouten in Abhängigkeit vom Energiemix

Die Ergebnisse zeigten, dass die rein mechanische Zerkleinerung (siehe Abbildung 22) im Vergleich zu alternativen Verfahren einen deutlich geringeren Energieverbrauch aufweist, da keine zusätzlichen Prozessschritte notwendig sind. Zudem können beide Materialien als Feststoffe zurückgewonnen werden, was beispielsweise bei Pyrolyse- oder Solvolysenverfahren nicht immer der Fall ist. Allerdings erwiesen sich rein mechanische Recyclingprozesse insgesamt als unzureichend für ein zufriedenstellendes Recycling des Materials, da der Entschichtungsgrad des Kupfers lediglich etwa 20–25 % beträgt.

Eine besondere Herausforderung besteht darin, dass die strukturellen Eigenschaften der Schäume deren Recycling erschweren und sie nicht in gleicher Weise wie andere beschichtete Materialien behandelt werden können. Als Lösungsansatz wurde daher die Kombination mechanischer Verfahren mit einer

vorangestellten Vorbehandlung identifiziert, um die Schichtverbunde vor dem Zerkleinern gezielt zu schwächen und damit die Trenneffizienz im mechanischen Prozess zu verbessern.

Für die weitere Untersuchung optimaler Recyclingrouten wurden verschiedene Vorbehandlungsansätze definiert. Diese umfassen den Einsatz von flüssigem Stickstoff, mechanische Impulse, die unter Wasser durch elektrische Entladung erzeugt werden, elektrische Impulse im Schaum selbst sowie gezielte Variationen von Belastungstypen innerhalb des Zerkleinerungsprozesses. Die zwei optimierte Recyclingansätze wurden getestet und miteinander verglichen. Auch hier wurde eine Screening-LCA durchgeführt. Wiederum fand die Software Umberto Anwendung und die Sekundärdaten aus der Datenbank ecoinvent 3.10 wurden genutzt. Als Rahmenbedingungen wurden wie bei den vorangegangenen Recycling Prozessen die Systemgrenze auf End-of-Life-Ebene, unter Berücksichtigung der Prozess- und Abfallstromauswirkungen, sowie die funktionelle Einheit des Recyclings einer 1 kg Cu-PUR-Schaumplatte definiert.

1. Optimierter Recyclingversuch mit Elektrohydraulische Vorbehandlung

Bei diesem Verfahren wurde eine elektrohydraulische Vorbehandlung eingesetzt, um die Materialtrennung zu erleichtern. Das Ergebnis zeigte einen Entschichtungsgrad von 81 %, was eine signifikante Verbesserung gegenüber herkömmlichen Verfahren darstellt.

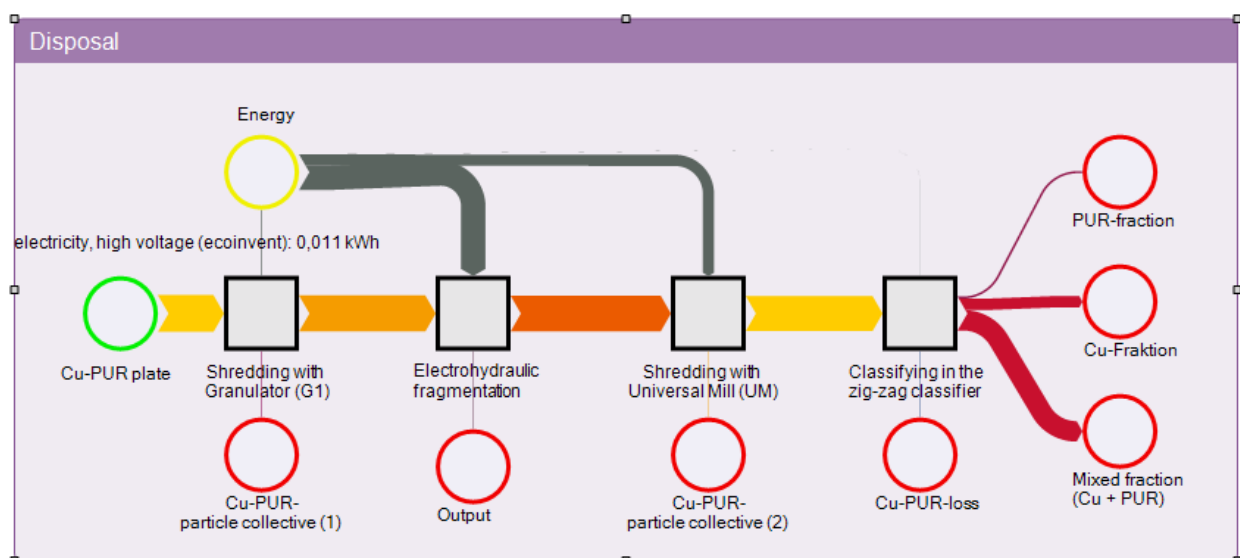


Abbildung 23: Material- und Stoffströme des Recyclingweges mit Elektrohydraulische Vorbehandlung

2. Optimierter Recyclingversuch mit Kryogene Vorbehandlung

Im zweiten Ansatz wurde eine kryogene Vorbehandlung durchgeführt. Die Proben wurden zehnmal jeweils für eine Minute in flüssigen Stickstoff bei -197 °C getaucht. Die Dauer der einzelnen Tauchvorgänge wurde so gewählt, dass eine vollständige Durchkühlung des Materials gewährleistet war. Die notwendige Zeit wurde rechnerisch ermittelt. Das Verfahren führte zu einem Entschichtungsgrad von 83 %.

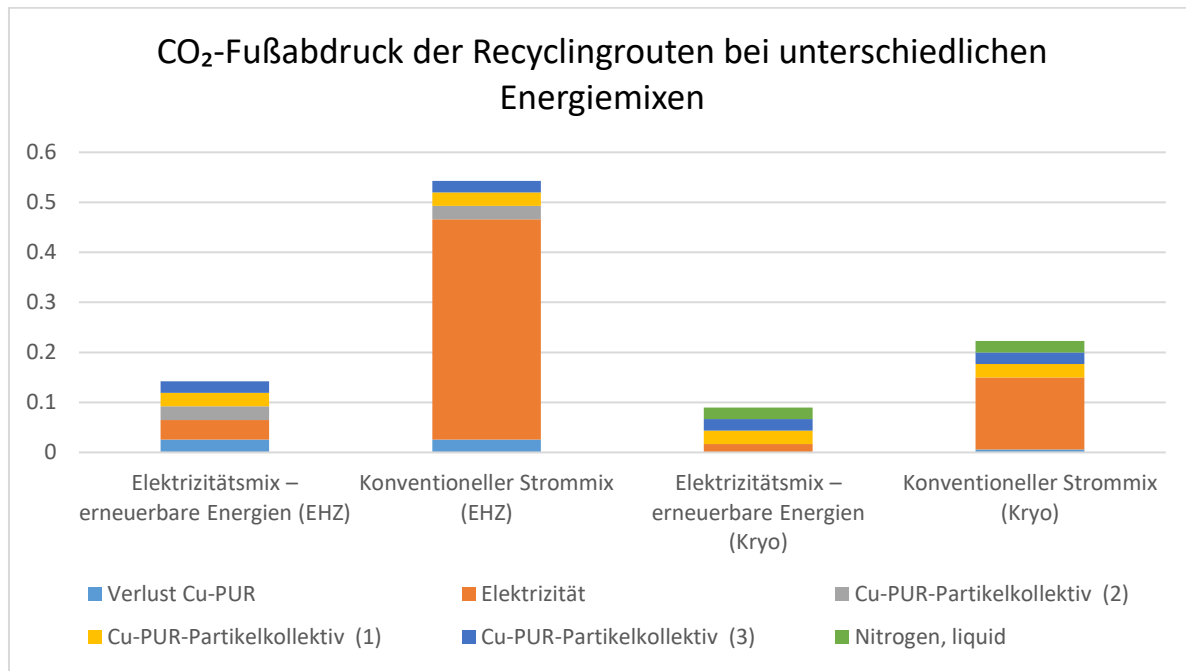


Abbildung 25 CO₂-Fußabdruck der Recyclingrouten mit elektrohydraulischer Vorbehandlung und kryogener Vorbehandlung bei unterschiedlichen Energiemixen

Neben der erfolgreichen Optimierung der Recyclingprozesse im Rahmen der Lebenszyklusanalyse des Metallschaums wurden auch potenzielle Verwertungswege für die zurückgewonnenen Materialfraktionen aufgezeigt. Es wird angenommen, dass sowohl das Kupferpulver als auch die Misch- und PUR-Fraktionen vielfältig weiterverwendet werden können und somit einen wertvollen Beitrag zur Ressourcenschonung leisten.

Die Kupferfraktion, die in Form von feinem Pulver vorliegt, eignet sich prinzipiell für alle Anwendungen, bei denen metallische Pulver eingesetzt werden. Besonders hervorzuheben sind pulvermetallurgische Verfahren, die Herstellung von Bauteilen mittels additiver Fertigung sowie das Schmelzspritzen, bei dem das Pulver thermisch aufgetragen wird. Auch eine Verwendung in der Gießerei ist grundsätzlich möglich, wobei hier mit einem Abbrand im zweistelligen Prozentbereich gerechnet werden muss, was die Effizienz dieses Pfades einschränken kann.

Die Mischfraktion, bestehend aus metallischen Bestandteilen und PUR-Resten, kann direkt in der Metallurgie eingesetzt werden, etwa durch Einschmelzen unter Berücksichtigung der organischen Anteile. Alternativ sind zusätzliche Recyclingprozesse wie die Pyrolyse denkbar, bei denen die organischen Bestandteile thermisch zersetzt und die metallischen Rückstände separiert werden.

Für die PUR-Fraktion bieten sich ebenfalls mehrere Verwertungsoptionen an. Eine energetische Nutzung als Ersatzbrennstoff ist möglich, insbesondere in industriellen Feuerungsanlagen. Darüber hinaus existieren lösemittelbasierte Verfahren, mit denen das PUR in seine Ausgangsbestandteile zerlegt und anschließend erneut aufgeschäumt werden kann – ein Ansatz für echtes chemisches Recycling. Schließlich kann das Material auch einem Downcycling zugeführt werden, etwa als Füllstoff im Spritzguss oder in Pressanwendungen, bei denen die mechanischen Anforderungen geringer sind.

Diese vielfältigen Verwertungsmöglichkeiten unterstreichen das Potenzial eines ganzheitlichen Recyclingansatzes für Metallschaum und stärken die ökologische Bilanz des Materials über seinen gesamten Lebenszyklus hinweg.

AP 2.6 Simulationsansätze

TUD-ILK

Aufgabe von TUD-ILK war die Entwicklung einer Simulationsmethodik für die im Rahmen des Vorhabens notwendige gekoppelte Thermo-Fluid-Simulationen (TFI). Die TFI dient dabei zur Ermittlung der Temperaturverteilung bei Kühlkörpern aus Schaumstoff, sowohl im Kühlkörper als auch im Kühlmedium. Hierzu wurden zunächst in AP2.6 geeignete Softwarelösungen näher untersucht, bewertet und eine Vorzugslösung ausgewählt. Ein weiterer Aspekt, der in diesem Arbeitspaket betrachtet wurde, ist die Vergleichbarkeit zwischen Simulation und Experiment.

Im Rahmen des Projektes wurde angestrebt, dass es sich möglichst um eine frei verfügbar SW handelt, die für alle Projektpartner kostenlos zur Verfügung stehen kann. Sie SW sollte bereits in vielen Bereichen eingesetzt werden (keine Spezialsoftware für wenig Anwender) und die für die Simulation des hier betrachteten Problems eines „Wärmetauschers“ geeignet ist. Aus den möglichen Softwarelösungen Comsol, StarCCM und OpenFOAM erfüllt OpenFOAM^{6,7} alle Kriterien und wird für die im Vorhaben durchzuführenden gekoppelten TFI genutzt.

Für eine erste Beurteilung der Vergleichbarkeit von Simulation und Experiment und zur Ableitung einer ersten Methodik zur Modellerstellung wurde ein Vordemonstrator (D-00) mit den Projektpartnern zur Modellvalidierung erarbeitet und von TUD-ILK virtuell umgesetzt. Dafür wurden die Eingangs- und Ausgangsparameter innerhalb der Simulationsgrenzen gemessen und zusätzlich zu Ein- und Ausgangswerten noch weitere „virtuelle“ Sensoren an Messpunkte hinzugefügt. Die relevanten Größen sind dabei Druck, Strömungsgeschwindigkeit (beides im Fluid) und die Temperatur (im Festkörper und im Fluid).

Für im Rahmen des Projektes durchgeführte Thermo-Fluid-Struktur-Simulationen ergeben sich im Wesentlichen zwei unterschiedliche Ansätze. Zum einem kann der Schaum detailliert modelliert werden, so dass jedes Details des Schaums berücksichtigt werden kann. Zum anderen kann die die Schaumstruktur als Kontinuum mit homogenen Eigenschaften modelliert werden. Nachteile dieses Kontinuumsansatzes sind unter anderem ein hoher Aufwand bei der Bestimmung der homogenisierten Erstatzeigenschaften, die schlechte lokale Vergleichbarkeit von Teilergebnissen mit Experimenten, da nur gemittelte Größen zur Verfügung stehen. Weiterhin werden alle Erstatzeigenschaften für jeweils eine spezielle (Schaum-)Geometrie, eine Größe und ein Material ermittelt und müssen bei Änderungen der Geometrie- oder Schaumtopologie erneut ermittelt werden. Ein weiterer Nachteil ist die Notwendigkeit eines direkten Eingriffs in die OpenFOAM Software zur Anpassung von Solvern.

Innerhalb des Projekts wurde daher zuerst der erste Ansatz gewählt. Dabei wird die Geometrie (Stege und Knoten) des Schaums detailliert abgebildet. Nachteil dieses Ansatzes ist unter anderem der sich

⁶ A. Gómez, C. Montañés, M. Cámara, A. Cubero, N. Fueyo, J. M. Muñoz: An OpenFOAM-based model for heat-exchanger design in the Cloud, Applied Thermal Engineering, 139 (2018), 239-255, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.04.093>.

⁷ S. He, M. Wang, W. Tian, S. Qiu, G.H. Su: Development of an OpenFOAM solver for numerical simulations of shell-and-tube heat exchangers based on porous media model, Applied Thermal Engineering, 210 (2022), 118389, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118389>.

ergebende hohe Modellierungsaufwand, eine Abhängigkeit der Simulationsergebnisse von der Vernetzung, sowie der Ressourcenbedarf während des Simulationslaufes. Vorteile wiederum sind die lokale Auflösung der Ergebnisse und die einfache Möglichkeit unterschiedliche Geometrien des Kühlkörpers, wie Pin-, Lamellen- oder Schaumstrukturen zu simulieren, da es keine geometrie- und strukturabhängigen Parameter gibt. Des Weiteren sind die Kalibrierung und der Vergleich mit dem Experiment einfacher.

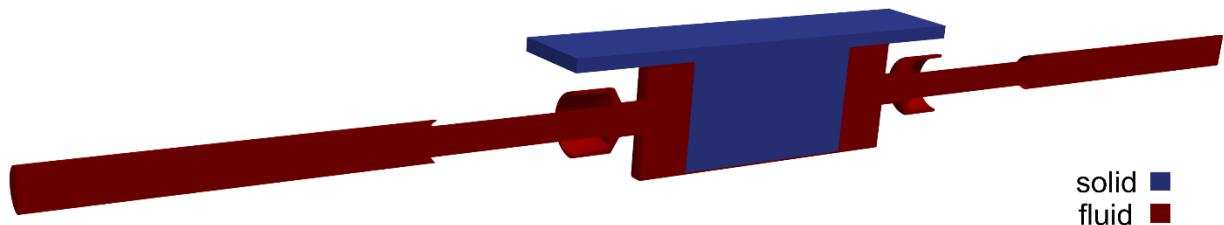


Abbildung 26: Simulationsaufbau des D-00

Der allgemeine Aufbau von D-00 ist in Abbildung dargestellt, in Abbildung ist der experimentelle Versuchsaufbau abgebildet. Daraus ergeben sich die in Abbildung 26 dargestellten Bereiche für die Simulation. Im Modell werden die Bereiche in Fluid und Solid eingeteilt. Während beim Fluid der gesamte Bereich simulativ abgebildet wird, werden von den als Solid gekennzeichneten Bereichen nur der Kühlkörper selbst mit simuliert. Das Simulationsmodell umfasst somit das Ende der Kühlmittelzufuhr, das Anschlussstück hinführend zur Kühlkammer, das Anschlussstück wegführend von der Kühlkammer und dem Anfang der Kühlmittelabfuhr. Es wird die Durchströmung dieser Konstruktion mit Wasser simuliert. Die Randbedingungen sind in Abbildung 27 zu sehen.

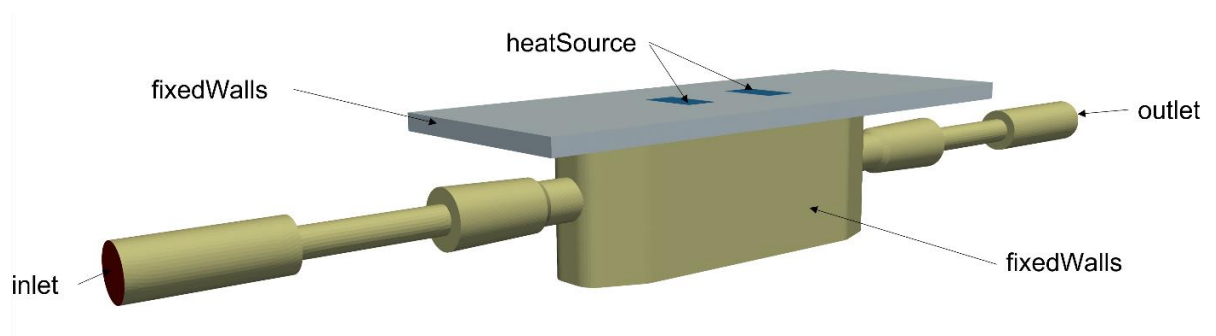


Abbildung 27: D-00 beschriftet mit den unterschiedlichen Bereichen der Randbedingungen

Um eine erste Bewertung der Übereinstimmung von numerischen und experimentellen Ergebnissen zu ermöglichen, wurde mittels OpenFOAM am Demonstrator D-00 eine Parameterstudie zum Druckabfall in Abhängigkeit der Flussgeschwindigkeit durchgeführt. Zur Durchführung der Simulation wurde der OpenFOAM-Solver `chtMultiRegionalFoam` genutzt. In Abbildung 28 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** ist exemplarisch der lokale Druck im Fluids über den gesamten Strömungsraum dargestellt.

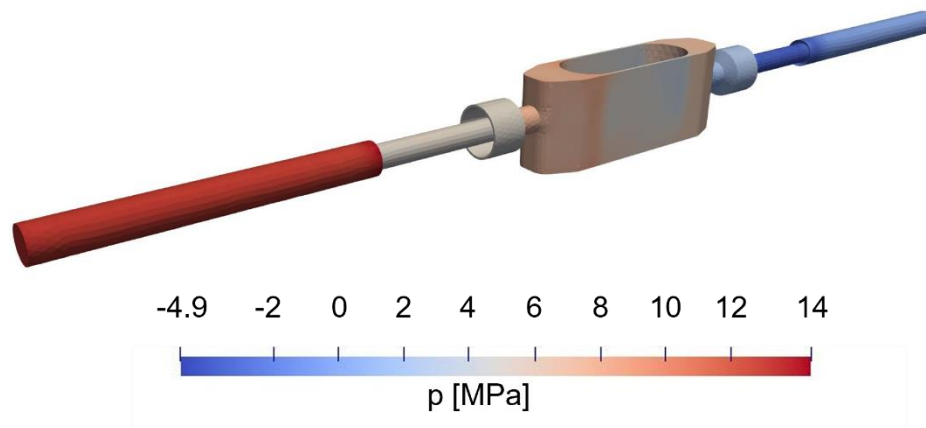


Abbildung 28: Geschwindigkeitsabhängiger Druckabfall in Demonstrator D-00

Die Ergebnisse der numerischen Parameterstudie wurden den experimentellen ermittelten Daten von SAG gegenübergestellt (Abbildung 29 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Dabei konnte innerhalb des betrachteten Parameterraums eine gute Übereinstimmung der experimentellen Messwerte und der Simulationsergebnisse festgestellt werden.

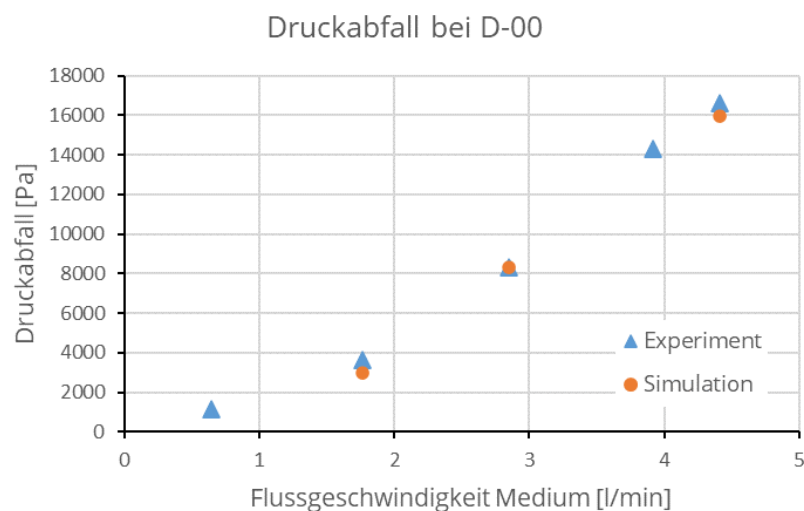


Abbildung 29: Druckabfall in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit

Während des Projekts wurden mehrere Schäume aus Kupfer und Aluminium mit unterschiedlichen ppi-Werten (Pores per inch) betrachtet und mit einem Computertomographen bei TUD-ILK gescannt. Die Schäume hatten variierende Abmaße, alle größer als 36 mm x 20.2 mm x 12.8 mm, so dass der Kühlkörper für D-00 virtuell hinausgeschnitten werden kann. In Abbildung 30 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** ist ein solcher Scann mit einer Auflösung von 12 μm abgebildet. Die Scans wurden genutzt, um die Stegbreitenvariation der Schäume zu untersuchen, da ppi-Werte nicht genormt sind. Des Weiteren wurde untersucht, welcher Querschnitt sich, im Falle der beschichteten Kunststoffschäume, nach der Galvanisierung einstellt (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**rechts).

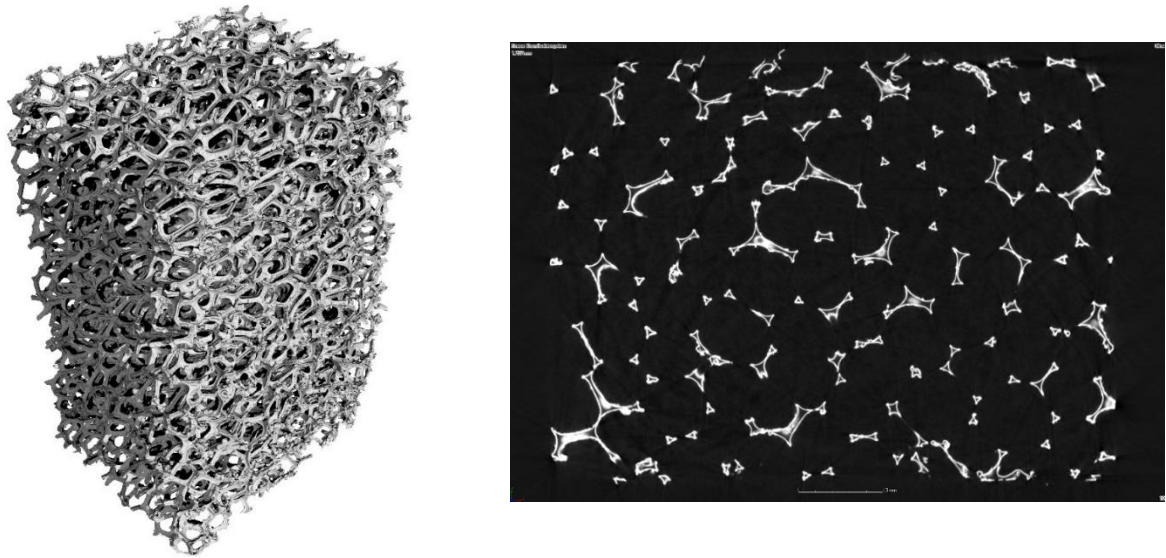


Abbildung 30: links: Iso-Blick eines mit Kupfer galvanisierten PP Schaums; rechts XY Schnitt eines mit Kupfer galvanisierten PP Schaums

Die Konstruktionsdateien der Schäume haben aufgrund der notwendigen Auflösung eine Speichergröße von bis zu 4.85 GB. Dadurch sind die Simulationen speicherintensiv. Durch die Größe müssen die Simulation und zum Teil auch die Netzgenerierung bereits auf dem Hochleistungsrechner (HPC) am NHR-Zentrum der TU Dresden⁸ durchgeführt werden.

Um Rechenressourcen zu sparen wurden ausgehend von den Scans Ersatzstruktur für die Schäume abgeleitet. Als Ersatzstrukturen wurden Schäume aus Kelvinezellen genutzt. Diese sind geometrisch einfacher als reale Schäume bilden aber die gleichen physikalischen Eigenschaften ab. Ein direkter Vergleich der Strukturen ist in Abbildung 31 abgebildet. In Absprache mit dem Projektpartner IWU wurden dabei die Parameter, wie Stegbreite, Steggeometrie und Zellhöhe, für die Kelvinezellen im Falle einen 10 ppi Schaum festgelegt (siehe Abbildung 2).

⁸ Die Autoren bedanken sich für die ihnen zur Verfügung gestellte Rechenzeit auf dem Hochleistungsrechner am NHR-Zentrum der TU Dresden. Dieses wird gemeinsam durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung und den am NHR beteiligten Landesregierungen (www.nhr-verein.de/unsere-partner) unterstützt.

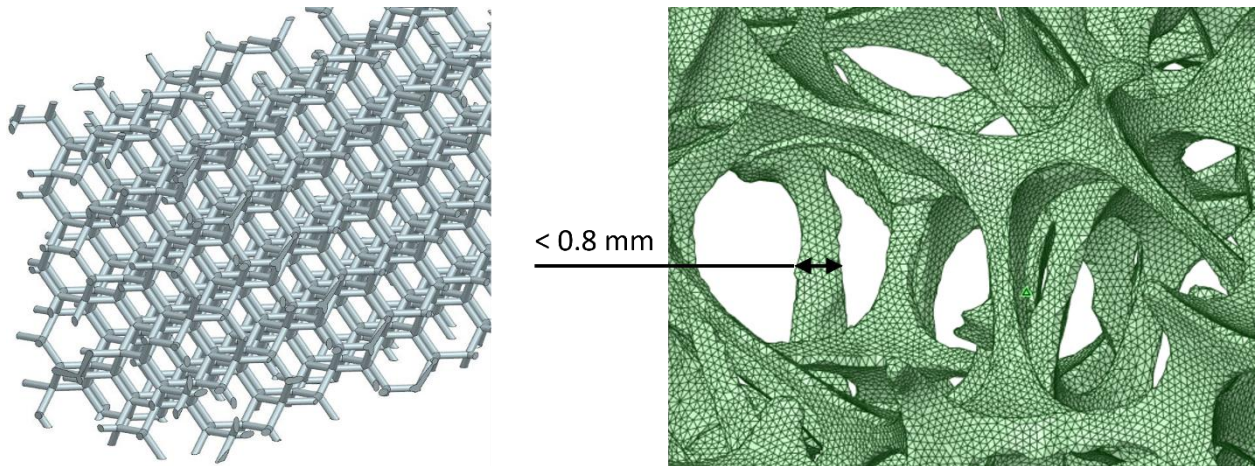


Abbildung 31: Schaum aus Kelvinzellen (CAD) (links) und Ausschnitt CT-Scan eines Al-Schaums (rechts)

Für diese „Ersatzschaumstoffe“ ergab sich im Verlauf des Projektes die Notwendigkeit, diese unterschiedlich zur Strömungsrichtung des Kühlmediums zu orientieren. Dabei wurden einmal die Zellwände senkrecht zur Strömungsrichtung angeordnet, so dass das Kühlmedium relativ ungestört durch den Schaum fließen konnte. Bei einer weiteren Variante wurde darauf geachtet, dass keine Zellwände normal zur Fließrichtung angeordnet waren, so dass ein maximaler Fließwiderstand gegeben war. Die Generierung der entsprechenden CAD-Modelle oblag dabei TUD-ILK.

Fraunhofer ENAS

Aufgabe des ENAS ist in diesem Arbeitspaket ist die Entwicklung einer Simulationsmethodik, welche unter Berücksichtigung der konkreten Halbleiter-Bauelemente und der zugehörigen Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT) der Leistungsmodule die Aspekte der entwickelten Kühllösungen und die Einbeziehung der Ökobilanz zusammenfasst und anhand experimenteller Ergebnisse kalibriert und verifiziert. Ziel der Entwicklung ist die Generierung eines Simulationstools, welches mit numerischen Mitteln die thermische Belastung der Powermodule unter Berücksichtigung unterschiedlicher Kühlmethoden ermöglicht. Des Weiteren ist die Einbeziehung der Ökobilanz für die Herstellung und Betrieb solcher Module zu demonstrieren. Das Tool benötigt somit Schnittstellen zu Arbeiten der Projektpartner für die Kühlleistung (TUD-ILK) und die Ökobilanz (iPoint). Die Ergebnisse der Simulationen wurden mit experimentell gewonnenen Ergebnissen des Projektpartners SAG verglichen.

Entwickelt wurde die Methodik an einem Konzeptdemonstrator, welcher vom Projektpartner SAG entwickelt und genutzt wurde. Der Demonstrator ist eine klassische Halbbrücke, bei der die Leistungsdioden auf ein DCB-Substrat gelötet (SAC-Lot) und mittels Dickdrahtbonds kontaktiert sind (Abbildung 32).

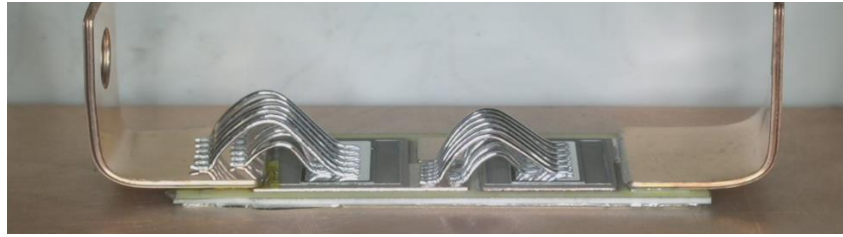


Abbildung 32: Konzeptdemonstrator

Grundlage der entwickelten Methodik ist zunächst die Simulation des thermischen Verhaltens des Leistungsmoduls. Dabei kommt eine langjährig bewährte kombinierte experimentelle-simulative Methode zum Einsatz, mit deren Hilfe die numerischen Simulationen experimentell überprüft und somit vertrauenswürdig gemacht werden. Dieser Schritt ist unerlässlich, da die Simulationen mehrere potenzielle Fehlerquellen enthalten (notwendige geometrische Vereinfachungen, hochgradig nichtlineares Materialverhalten, Bewertungsmethodik der physikalischen Fehlermoden).

Im zweiten Schritt können weitere, für den Designprozess wichtige Bewertungskriterien hinzugezogen werden. Das vereinfachte Verhaltensmodell (Surrogate) wird mittels Parametervariation für einen definierten Parameterraum erzeugt und mittels standardisierter Schnittstelle zur externen Nutzung zur Verfügung gestellt. Zusammengefasst sind diese Schritte in Abbildung 33.

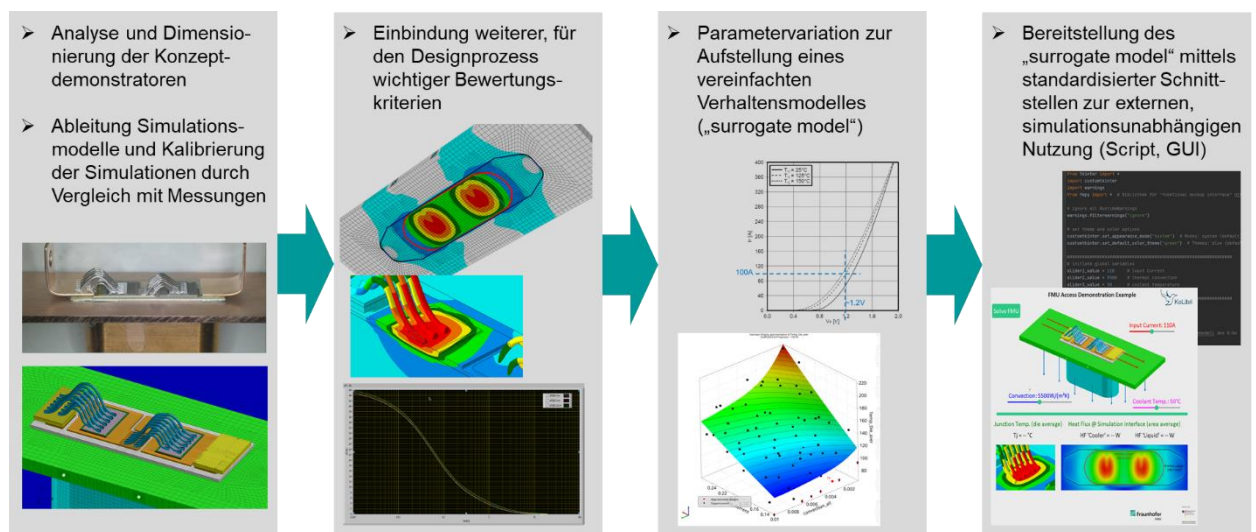


Abbildung 33: Zusammenfassung der Methodik zur Aufstellung eines ‚Surrogate‘

Alle Aspekte der (AVT) haben die Aufgabe, die Funktionalität der Leistungsmodule unter den gegebenen Bedingungen sicherzustellen. Von dominanter Bedeutung ist hierbei die Einhaltung der vom Hersteller der Leistungsbausteine definierten Junction-Temperatur [T_j] bei möglichst großer Leistungsausbeute sowie die Sicherstellung der Stromlastfähigkeit über die Lebensdauer der Module. Wesentliche Einflussgrößen sind hierbei die eingebrachte Leistung, die Kühlbedingungen, die Materialien im Kühlpfad sowie ein geringer elektrischer Widerstand in Durchflussrichtung.

Die Bewertung der thermischen Performance des Konzeptdemonstrators erfolgt mittels gekoppelter elektrisch-thermischer Simulation. Zunächst ist es notwendig ein Simulationsmodell aufzubauen, welches

alle simulationsrelevanten Bestandteile des Moduls geometrisch ausreichend detailliert wiedergibt. Die betrifft insbesondere die Form der Bonddrähte (Abbildung 34).

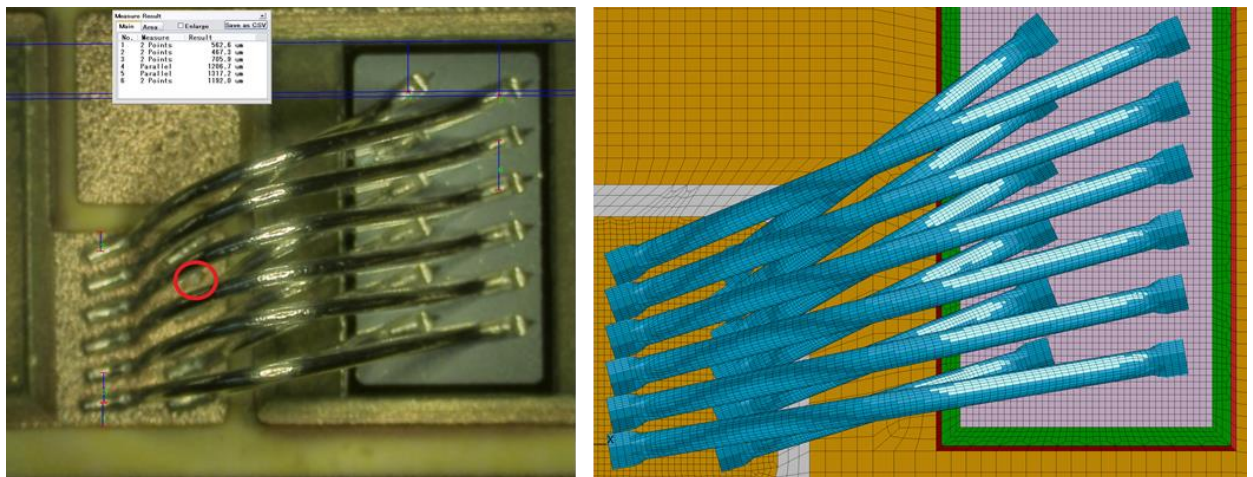


Abbildung 34: Ausschnitt des Simulationsmodells mit detailliert modellierten Bonddrähten

Ziel der elektrisch-thermisch gekoppelten Simulation ist die Berechnung des Temperaturfeldes, welches durch die Verlustleistung der verwendeten Leistungsdioden generiert wird. In der Simulation wird die stationäre elektr. Leitfähigkeit in eine instationäre thermische Verlustleistung umgerechnet. Dazu müssen zunächst die elektrischen Parameter der Diode abgeleitet werden. Hierzu wird aus der Durchlasskennlinie der temperaturabhängige ohmsche Widerstand und danach unter Verwendung von aktiver Chipfläche und -höhe die spezifische Leitfähigkeit berechnet. Das Bauelement verhält sich in der Simulation mithin wie ein einfacher ohmscher Widerstand. In Abhängigkeit von der eingebrachten elektrischen Stromstärke und der festgelegten Kühlbedingungen bildet sich ein Temperaturfeld um die Dioden aus (Abbildung 35 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Der Spannungsabfall dient als Güteparameter der abgeleiteten elektrischen Parameter der Dioden.

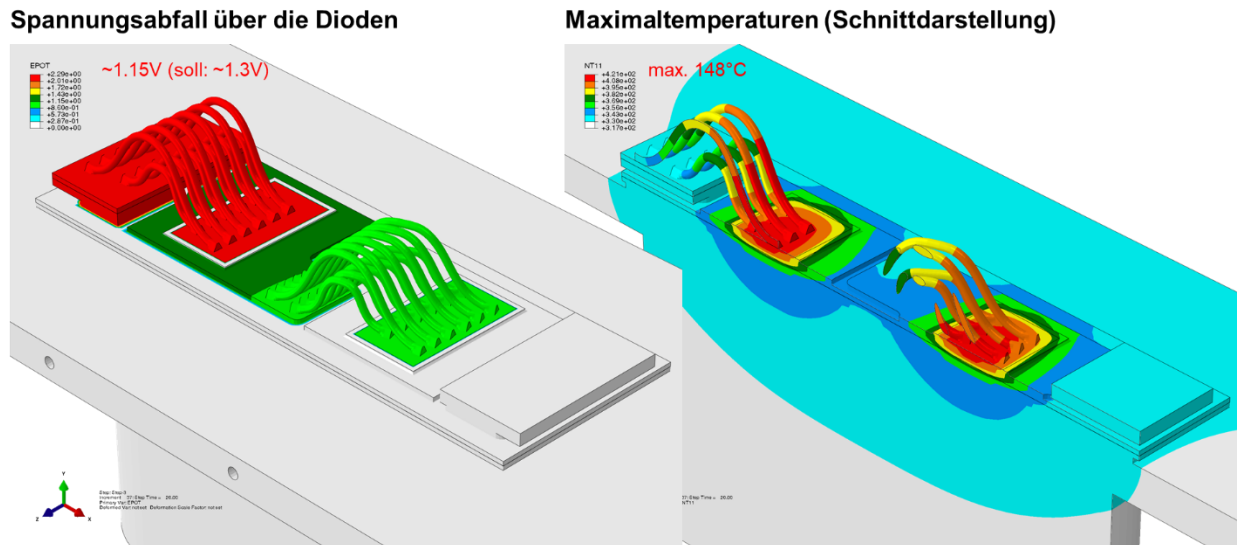


Abbildung 35: Exemplarische Darstellung einer elektrisch-thermisch gekoppelten Simulation

Um die Ergebnisse der Simulation vertrauenswürdig zu machen, müssen diese zunächst kalibriert werden. Hierzu wurden vom Projektpartner IFAG experimentell die Abkühlkurven der Dioden unter identischen Lastverhältnissen (Stromstärke, Einschaltzeit, Kühlmitteltemperatur) und variierenden Kühlbedingungen (Kupferkühler, Schaumkühler, etc.) ermittelt (Abbildung 35).

Das Maß für die variierenden Kühlbedingungen ist in der Simulation die thermische Konvektion. Diese wurde während der Kalibrierung solange angepasst, bis die Ergebnisse der Simulation ausreichend genau mit den experimentellen Ergebnissen ($I=70A$) übereinstimmten. Diese ermittelten Werte wurde alsdann in Simulationen genutzt, welche die Temperaturentwicklung unter anderen Lastbedingungen ($I=100A$) prognostizierte (Abbildung). Nachfolgend durchgeführte Messungen ergaben eine sehr gute Übereinstimmung der experimentellen und simulierten Werte, womit die Güte der Simulation verifiziert wurde.

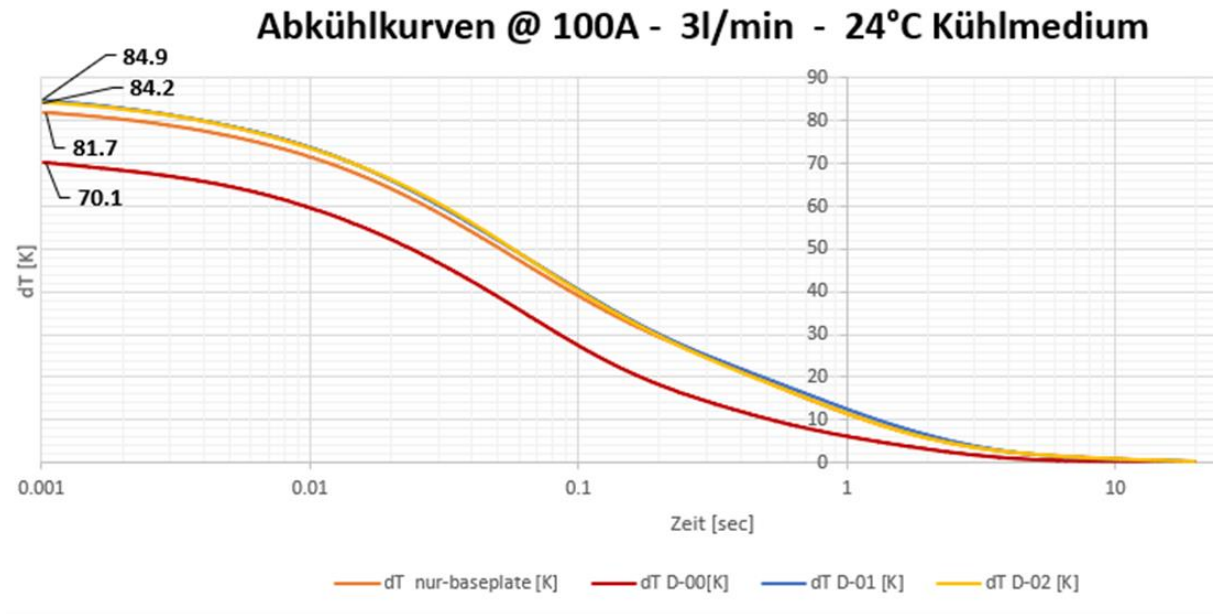


Abbildung 36: Experimentell ermittelte Abkühlkurven bei unterschiedlichen Kühlertypen

Variantenvergleich 70A (Kalibrierung)

Aufbau	Laststrom [A]	Konvektion [W/(m²K)]	Kühlmitteltemperatur [°C]	Tj [°C]	Δ Tj [°C] Simu	Δ Tj [°C] Exp
Baseplate	70	2600	24	80	56	56.5
D-00	70	6000	24	70	46	45.3
D-01	70	3000	24	78	54	53.8
D-02	70	2600	24	80	56	57.0

Variantenvergleich 100A (Prognose)

Aufbau	Laststrom [A]	Konvektion [W/(m²K)]	Kühlmitteltemperatur [°C]	Tj [°C]	Δ Tj [°C] Simu	Δ Tj [°C] Exp
Baseplate	100	2600	24	105	87	81.7
D-00	100	6000	24	94	71	70.1
D-01	100	3000	24	118	84	84.9
D-02	100	2600	24	108	87	84.2

Abbildung 37: Ergebnisse der Kalibrierung der Simulation sowie der Prognose für alternative Lastbedingungen

Die vom Leistungsmodul generierte Verlustleistung in in Form von Wärmeenergie fast ausschließlich über das Interface von der Baseplate zum Kühlkörper abgeführt. Der dabei generierte Wärmestrom dient als Eingangsparameter für die zur Ermittlung der realen Wärmeübergangseigenschaften am Bauteil-Kühler-Interface notwendigen Fluidsimulationen, welche vom Projektpartner TUD-ILK durchgeführt wurden. Da die Verteilung des Wärmestroms örtlich sehr stark schwankt, wurde das Interface in 3 sinnvolle Bereiche aufgeteilt und die Werte über diese Bereiche gemittelt (Abbildung). Dieser Datensatz wurde dem Projektpartner TUD-ILK zur Verfügung gestellt, da er ein notwendiger Eingangsparameter zu den dort durchgeführten Simulationen ist.

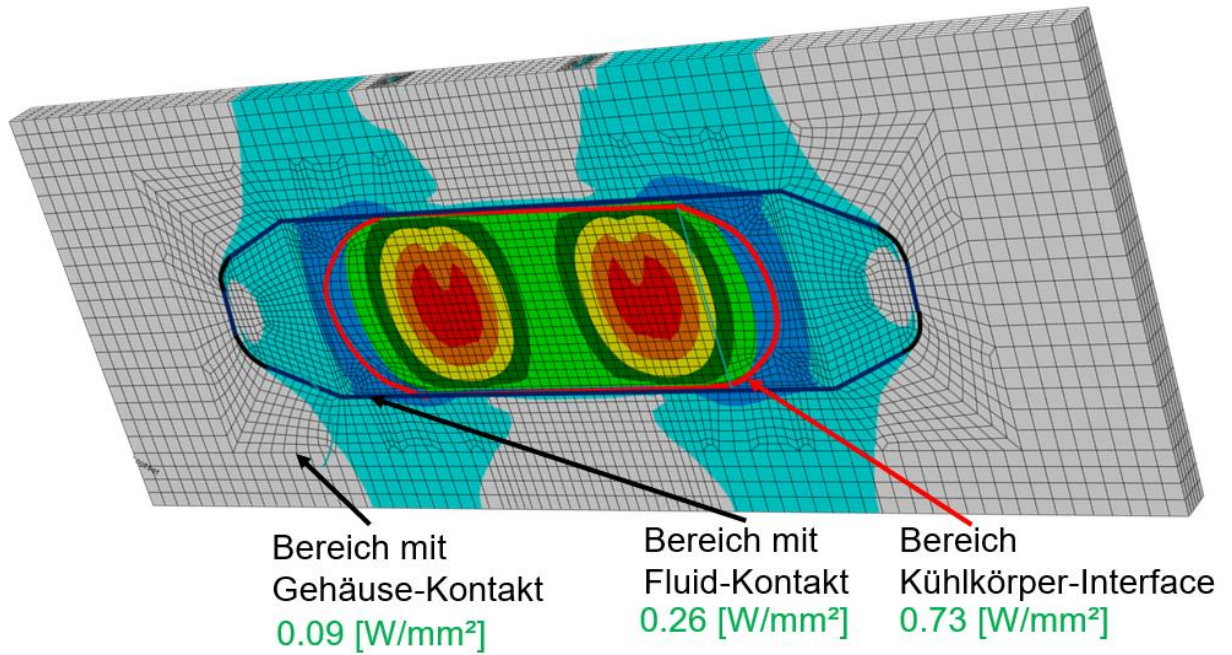


Abbildung 38: Regional gewichtete Mittelwerte des Wärmestromes am Interface Baseplate - Kühlkörper

Neben der thermischen Performance der Leistungsmodule können während des Designprozesses noch weitere Bewertungskriterien berücksichtigt werden. Ein Beispiel dafür ist die Ermittlung der Umweltbilanz für Herstellung, Betrieb und Entsorgung von Produkten, welche in zunehmendem Maße für die Aufstellung von Umweltbilanzen von Produkten an Bedeutung gewinnen. Im Projekt wird dies exemplarisch zusammen mit dem Projektpartner iPoint am Beispiel der Substitution der Kupfer-Baseplate durch Schaumwerkstoffe untersucht (Abbildung).

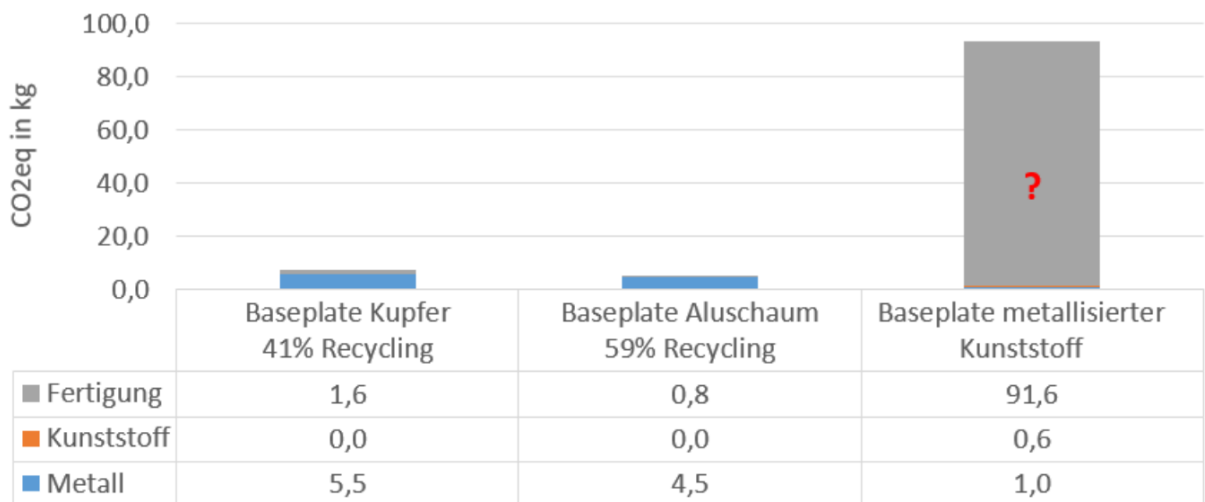


Abbildung 39: Vergleich der Treibhausgasemissionen bei äquivalenter Kühlleistung und 1 kg Ausgangsmasse „cradle to grave“ (Quelle: Berechnungen von TUD-ILK)

Bewertet wird die Ökobilanz der Baseplate in Abhängigkeit der Menge des verwendeten Kupfers. 100% Dichte entspricht einer soliden Kupfer-Baseplate, während 10% Dichte einem stark porösen

Kupferschaum entspricht. Die Reduktion der Masse und damit Verbrauch des Kupfers reduziert das zur Herstellung des Moduls nötige CO₂-Äquivalent deutlich. Allerdings nimmt auch die Wärmeleitfähigkeit des Kupferschaums mit steigender Porosität ab, was die thermische Performance des Moduls beeinträchtigt.

Es gibt in diesem Fall also einen Widerspruch zwischen der Ökobilanz (Kupferverbrauch) und der Funktionalität (thermische Performance) des Leistungsmoduls. Die sich einstellende maximale Chiptemperatur T_j wird von vier wesentlichen Einflussfaktoren bestimmt, welche in definierten Grenzen schwanken können: eingebrachte Leistung (Stromstärke), Kühlbedingungen (Konvektion und Kühlmitteltemperatur) sowie der Porigkeit des Schaumwerkstoffes. Zur Wichtung des Einflusses dieser Parameter ist die Durchführung einer Sensitivitätsanalyse notwendig (Abbildung).

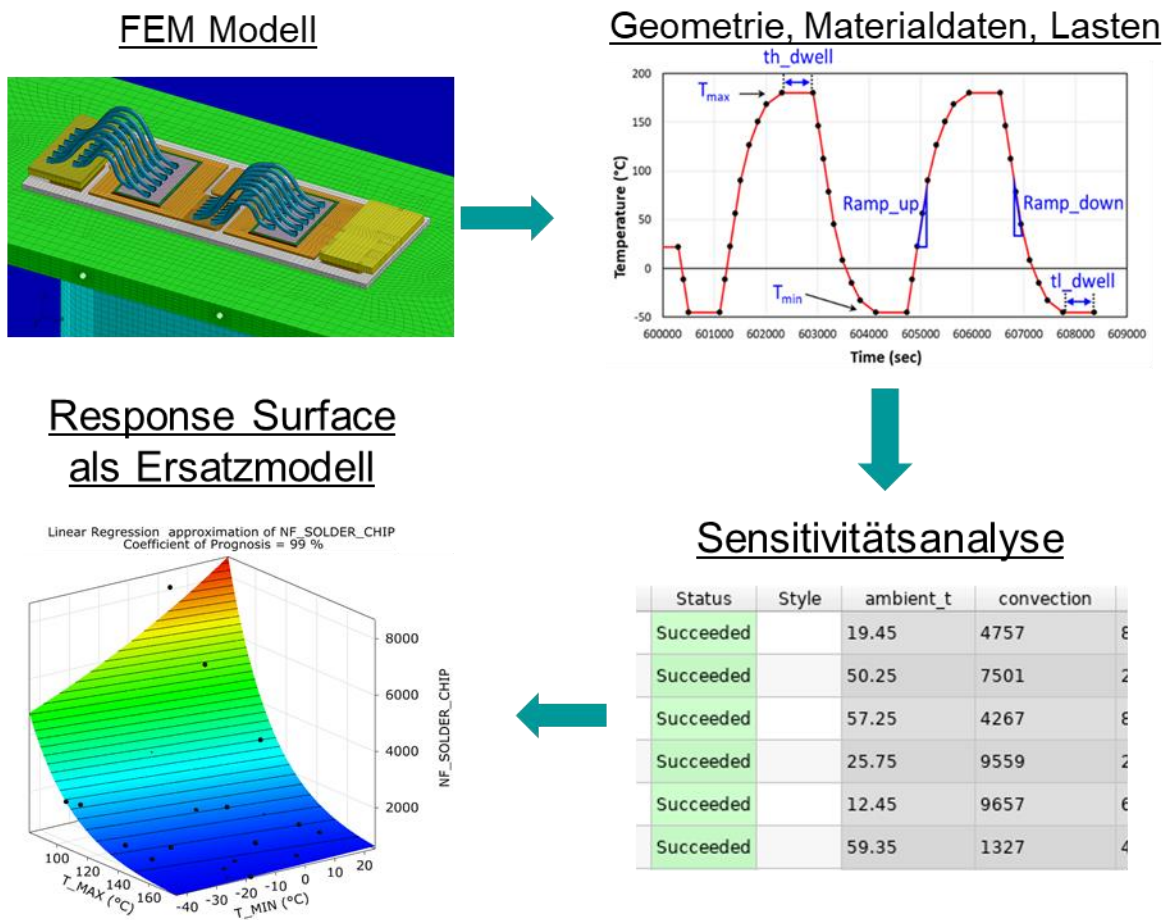


Abbildung 40: Generierung eines Surrogats mit Hilfe einer Sensitivitätsanalyse

Das vereinfachte Verhaltensmodell (Surrogate) wird mittels Parametervariation unter Nutzung der Response-Surface-Methode erzeugt. Die Response-Surface ist ein analytisches Abbild des Verhaltens der Chiptemperatur T_j unter dem Einfluss der angegebenen Input-Parameter. Sie bündelt zwei wesentliche Vorteile gegenüber der numerischen Simulation: es muss nicht für jeden neuen Anwendungsfall eine neue, zeitaufwendige, Simulation durchgeführt werden und der Anwender braucht das für die Simulation notwendige Spezialwissen nicht zu kennen.

Um dem Anwender das Modell zur Verfügung stellen zu können, muss es mittels einer standardisierten Schnittstelle ansprechbar sein. Hierfür wurde das „Functional Mockup Interface“ (FMI) genutzt. FMI ist ein freier Standard, der einen Container und eine Schnittstelle für den Austausch von dynamischen Simulationsmodellen mit einer Kombination aus XML-Dateien, Binärdateien und C-Code definiert. Er wird von über 170 Tools unterstützt und als „Modelica Association Project“ gepflegt. Der Standard ist das bevorzugte Modellaustausch- und Co-Simulationsformat führender Industriepartner auf Systemebene und ermöglicht den Austausch von Modellen mit internen und externen Partnern, die unterschiedliche Modellierungswerkzeuge verwenden.

Mittels dem „Functional Mockup Interface“ wird ein FMI-Objekt (.fmu) erzeugt, auf das mittels frei verfügbarer Bibliotheken zugegriffen werden kann. Mit der Python-Bibliothek „fmpy“ können somit Skripte mit unterschiedlichen Einsatzmöglichkeiten generiert werden:

- Unterprogramm für andere Simulationen
- Einbindung in Systemprogramme
- Einbindung in GUI

In Abbildung ist exemplarisch die Einbindung des im Projekt erstellten Surrogats in Form einer „Functional Mockup Unit“ in eine Python-GUI dargestellt.

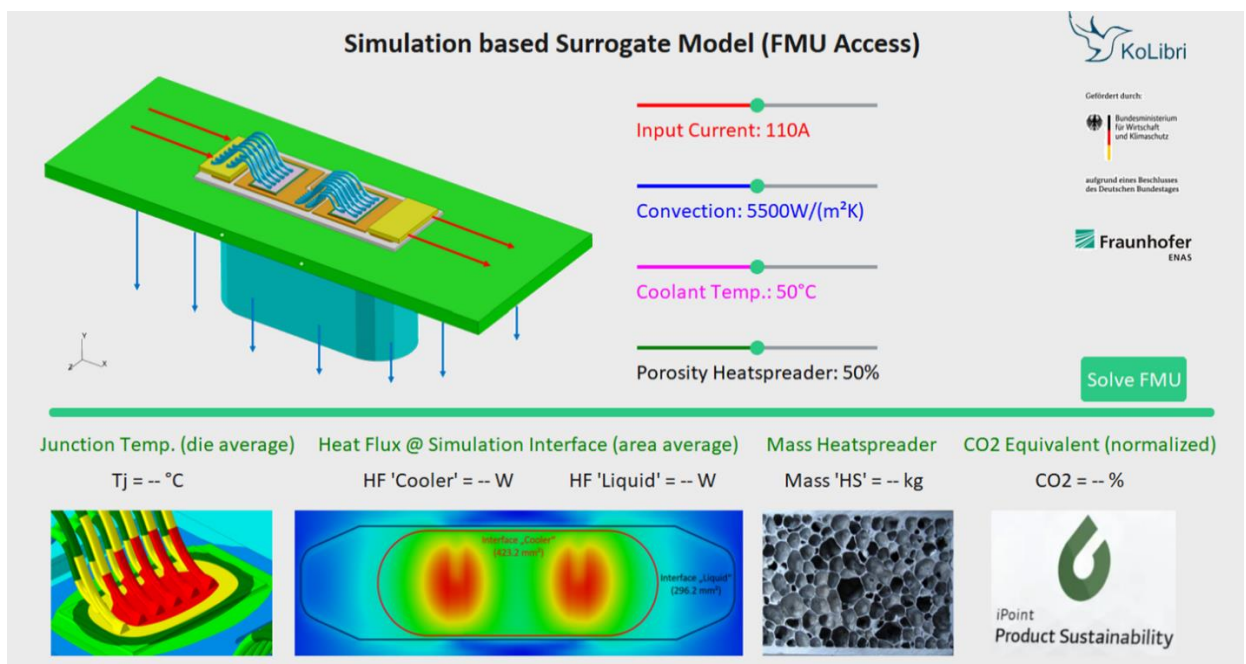


Abbildung 41: Python GUI zur Nutzung des generierten Surrogats

Dieses Tool liefert in Abhängigkeit von den gegebenen Inputparametern sowohl die resultierende Chiptemperatur als auch das CO₂-Äquivalent der Baseplate und die Wärmeübergangsbedingungen am Kühlerinterface. Es liefert nicht nur die im Projekt geforderten Schnittstellen zu den Arbeiten der Projektpartner iPoint und TUD-ILK, sondern kann in dieser Form auch effektiv von Designingenieuren als Entscheidungshilfe für die Auslegung derartiger Module genutzt werden.

Das Tool ist der finale Demonstrator der im Projekt von ENAS entwickelten Simulationemethodik.

2.5. Hauptarbeitspaket 3 Technologien

Aufbauend auf den in AP 2 erarbeiteten Konzepten und Methoden werden im AP3 die benötigten Technologie- und Prozessketten konzipiert und implementiert (AP3.1).

Arbeitspaket 3.1 Technologientwicklung Herstellung

Für die Herstellung von Technologiedemonstratoren werden die beiden Prozessrouten Feinguss und Galvanik betrachtet.

Feinguss:

Zunächst erfolgt die Beschreibung der urformenden Demonstratorherstellung im Feinguss in Kombination mit dem additiven Verfahren des 3D Wachsdrukkes für geometrisch definierte Strukturen.

Hinsichtlich der gefundenen optimalen Anschnittvariante zur Vermeidung von Kaltlauffehlern zur Herstellung der Kühlkörperzellstruktur (Stegdicke = 0,5mm / Zellgröße = 6mm) mit einer Abmessung L/T/H (in mm) = 38/20/25 wurden zur Bestimmung von Verfahrensgrenzen weitere Versuche mit offenzelligen Gitterstrukturwürfeln durchgeführt.

Ermittelt wurde die kleinsten, noch herstellbaren Zellstrukturen hinsichtlich Stegdicke und Zellgröße am Beispiel von „Kelvin“-Gitter für einen Zellwürfel mit der Abmessung 50x50x50mm. Insbesondere die Höhe (H) der Struktur in Gießrichtung stellt beim Gravitationsguss die begrenzende Dimension dar.

Es konnten nur Zellstrukturen mit einer Stegdicke von 1,0 mm und einer Zellgröße von 6mm über die gesamte Höhe von 50mm vollständig ohne Kaltlauf hergestellt werden.

Für kleiner Stegdicken von 0,7mm und einer Zellgrößen von 6mm war dies nur noch für eine Höhe von ca. 40mm realisierbar. Entsprechend ergibt sich die technische Grenze des zu Grunde liegenden Verfahrens für eine vollständige Formfüllung und damit Realisierbarkeit größerer Abmessung der Gitterstruktur bei einer Zellgröße von 6mm bezüglich der realisierbaren Höhe mit der näherungsweise linearen Beziehung [Höhe H/mm] = 48,7 x [Stegdicke/mm] + 2,6

Anhand einer definierten Traubenmontage wurden verschiedene Gießparameter untersucht für die beiden Werkstoffe:

- | | |
|--------------------------|---------------------------------|
| 1. Al-Basisgusslegierung | EN AC-44200 / EN AC-Al Si12 (a) |
| 2. Cu-Basislegierung | 2.1050 / CuSn10-C (CC480K) |



Abbildung 42: Traubenmontage für Mikrofeinguss

Es wurde ein Gips basierter Formstoff verwendet. Dieser kann durch seinen reversible Bindungsverhalten in Wasser aufgeweicht und entsprechend gut entfernt werden. Allerdings kann die Mikrostruktur nur durch ein entsprechende Gipslösemittel im Ultraschallbad entfernt werden. Hierbei hat sich das Produkt „GipEx“ (Fa. Ernst Hinrichs Dental GmbH) als geeignet erwiesen. Ein Druckwasser-Strahl kann nicht angewendet werden, da eine Beschädigung der Gitterstruktur Wahrscheinlichkeit ist.

Für beide Werkstoffe wurden geeignete Parametersätze ermittelt:

Tabelle 6.1: Parametersätze für den Mikrofeinguss für Aluminium und Kupfer

Werkstoff	Gießtemperatur (in °C)	Formtemperatur (in °C)	Unterdruck in der Kokillenkammer (in mbar u.Ath.)
1.	720	500	450
2.	1150	800	800

Bzgl. der Cu-Basislegierung 2.1050 / CuSn10-C (CC480K) wurden noch weitere Abgüsse zur Optimierung der Mikrofeingusstechnologie durchgeführt. Die ersten Abgüsse wiesen noch sporadisch Kaltlauffehler an der Gitterstruktur auf. Um dem entgegenzuwirken, wurde der Parameter Unterdruck in der Kokillenkammer und die Gießhöhe weiter erhöht. Für Cu-Basislegierung 2.1050 / CuSn10-C (CC480K) wurde der folgende optimierte Parametersatz angewendet:

Tabelle 7.2: optimierte Parametersätze für den Mikrofeinguss für Kupfer

Werkstoff	Gießtemperatur (in °C)	Formtemperatur (in °C)	Unterdruck in der Kokillenkammer (in mbar u.Ath.)	Gießsäule (in mm)
1.	1150	800	800	200

Mit den getroffenen Maßnahmen konnte der Kaltlauf-Fehler auch für Cu-Basislegierungen erfolgreich behoben werden.

Mit dem optimierten Mikrofeingussprozess wurden weitere „D-0“ - Demonstratoren mit der Abmessung L/T/H (in mm) = 38/20/25 mit unterschiedlicher Querschnittsgeometrien der Stege in beiden Werkstoffen EN AC-44200 / EN AC-AI Si12 (a) und 2.1050 / CuSn10-C (CC480K) hergestellt.

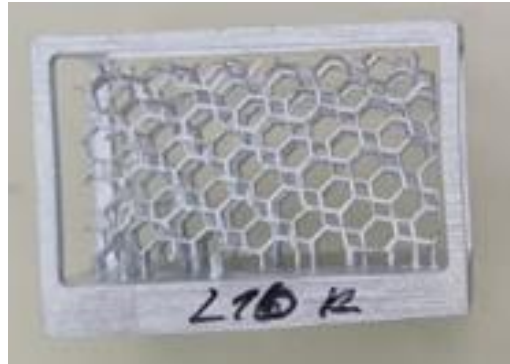


Abbildung 43: Kühlgitter-Modell in EN AC-Al Si12 (a) mit runden Stegquerschnitte (Typ R)



Abbildung 44: Kühlgitter-Modell in CuSn10-C (CC480K) mit runden Stegquerschnitte (Typ R)



Abbildung 45: Kühlgitter-Modell in CuSn10-C (CC480K) mit runden Stegquerschnitte (Typ D)

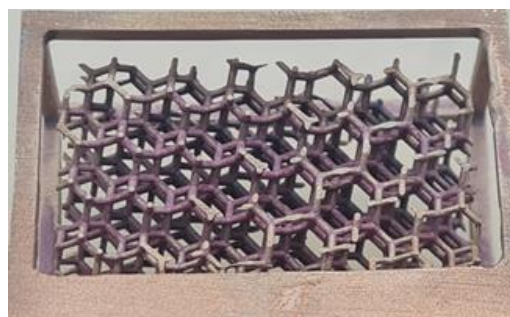


Abbildung 46: Kühlgitter-Modell in CuSn10-C (CC480K) mit runden Stegquerschnitte (Typ D)

Die Demonstrator-Gussmodelle wurde an die Projektpartner für entsprechende Prüfstandtests weitergeleitet.

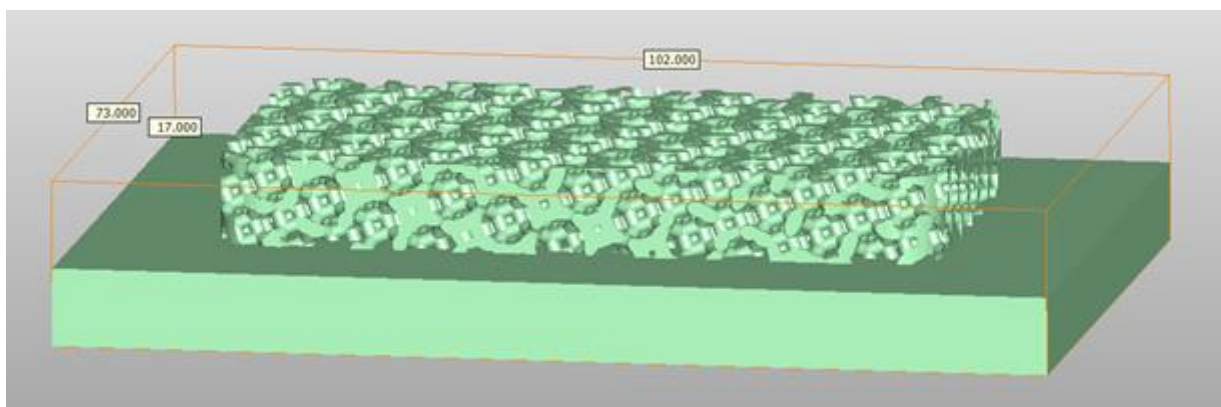
Auf Basis von Messstandprüfungen der „D-0 -Demonstratormodelle“ bei dem Projektpartner SAG wurden vom Projektpartner TUD-ILK 10 Varianten optimierte D-1 Demonstratormodelle hinsichtlich Kühlleistung und Strömungsbedingung der Kühlkörperzellstrukturen simuliert. Die Kühlstruktur wurden aus „Kelvinzellen“ mit einer Zellgröße von 6mm aufgebaut. Die Höhe der Kühlkörperstruktur ist mit 4,5mm und 9mm variiert. Die Stegdicken variieren zwischen Durchmesser (DM)=0,6mm und DM=1,6mm. Hierbei wurden die Verfahrensgrenzen hinsichtlich noch herstellbarer Zellstrukturen berücksichtigt. Die Kühlkörperstruktur mit einer Grundabmessung von 43x74mm wird von eine Montageplatte mit der Abmessung 8x73x102mm getragen und ist somit stoffschlüssig miteinander verbunden. Hierdurch ist ein optimaler Wärmeabfluss von der Kühlkörperstruktur an die Trägerplatte gewährleistet. Mit optimierten Mikrofeingussprozess wurden diese Demonstratoren in beiden Werkstoffen EN AC-44200 / EN AC-AI Si12 (a) und 2.1050 / CuSn10-C (CC480K) hergestellt.

Hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit des 3D-Wachsdrukverfahrens wurden des Weiteren die Möglichkeiten untersucht, das gegenüber dem Stützwachs deutlich teurere Modellwachs durch Supportwachs-Wabenstruktur zu ersetzen. Die Beschaffungspreis für Modellwachs (Visijet M2 Cast) liegen derzeit bei 464,00 €/kg und für Stützwachs (80%, Visijet M2 SUW) bei 156,43 €/kg.

Dies ist insbesondere für massivere Bauteilgeometrien von Interesse. Mit einer entsprechenden Versuchsreihe konnte die Wandstärke der Randschicht aus Modellwachs, welche das Volumen aus Supportwachs-Wabenstruktur umschließt, bis auf 1,5mm reduziert werden. Die theoretisch drucktechnisch realisierbare, minimale umhüllende Randschicht beträgt 0,1mm. Weitere entsprechende Versuche laufen aktuell, diese Randschicht maximal zu reduzieren.

Somit wird dies Verfahrensweise ab Querschnittsdimensionen größer 5mm interessant. Dies soll am Beispiel der aktuell in Simulation befindlichen D-1 Demonstratorkühlkörper kurz erläutert werden. Die Kühlkörperstruktur wird stoffschlüssig mit der Montageplatte hergestellt. Dies kann entsprechend auch im 3D-Wachsdruk nur durch das direkte Aufdrucken der Kühlstruktur auf die Montageplatte realisiert werden. Das zum Herstellen benötigte Supportwachs zur Herstellung der äußeren Strukturen bleibt im Beispiel unberücksichtigt, da dies für beide Varianten „Volldruck“ und „Fülldruck“ gleich ist

Abbildung 14 D-1 Demonstratorkühlkörper (Volumen 61,66cm³) / Abmessung der Platte: 8 x 73 x 102mm



Bei der Herstellung der Wachsausgangsmodelle im zugrundeliegenden 3D-Druckverfahren zeigte sich, dass die in den Vorversuchen ermittelten Druckparameter und -strategie für diese Demonstratorbauteile

nicht geeignet sind. Ursache ist die „plattenartige“ Gestalt und deutlich größeren Abmessungen. Es wurde zunächst eine horizontale Ausrichtung angestrebt.

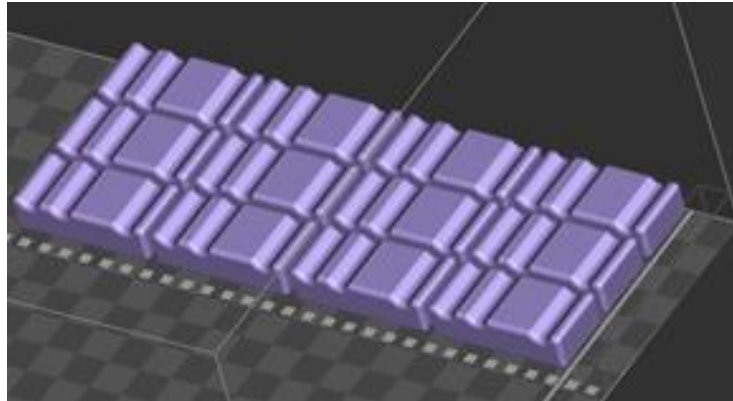


Abbildung 47: Horizontale Ausrichtung einer Versuchsgeometrie

Der Druckprozess baut zunächst eine ca. 4mm dicke Stützwachsunterlage auf. Auf diese wird dann die eigentliche Modellstruktur aufgebaut. Es zeigte sich, dass sich die Trägerplatte mit zunehmender Dicke insbesondere an den Außenbereichen von der Stützwachsunterlage löst und nach oben wölbt. Der zentrale Bereich der Platte bleibt stehen. Es wird entsprechend in den aufgewölbten Bereichen weniger Material aufgetragen. Dies führt zu einer Abweichung und Wölbung der Unterseite der Platte von mehreren Millimetern. Die Teile sind entsprechend nicht verwendbar. Ursache sind die unterschiedlichen Abkühlbedingungen über die Plattenausdehnung.



Abbildung 48: Fehlerhafte Bauteile bei horizontaler Bauausrichtung

In einer Reihe von Versuchen zeigte sich, dass ein seitlicher, horizontaler Aufbau zu verwendungsfähigen Bauteilen ohne Verzug führt.

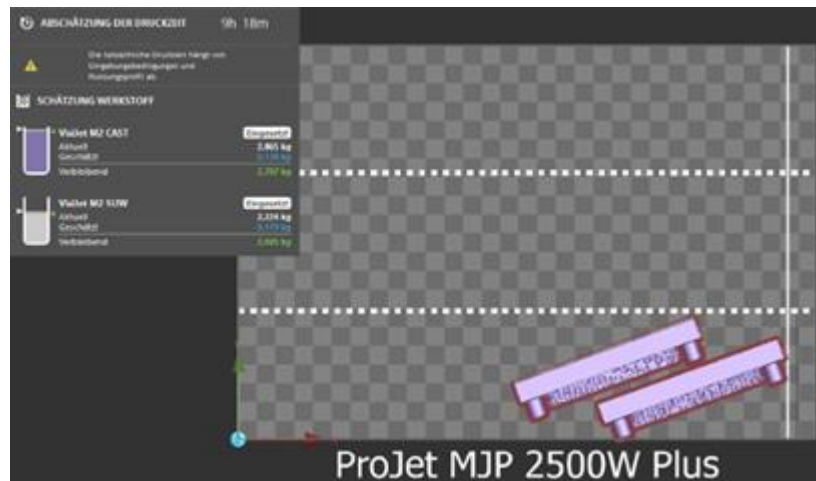


Abbildung 49: - seitlicher, vertikale Bauausrichtung der Demonstratorgeometrie auf der Druckplattform

Hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit insbesondere für derartige massive Bauteile wurde auch bei dem Demonstrator versucht, möglichst große Mengen an Modellwachs durch Stützwachsmaterial zu ersetzen. In mehreren Versuchen wurde eine Wabenstruktur entwickelt, die die Anforderung an eine ausreichende Steifigkeit der Trägerplatte gewährleistet bei möglichst geringem Einsatz an Modellwachsmaterial.

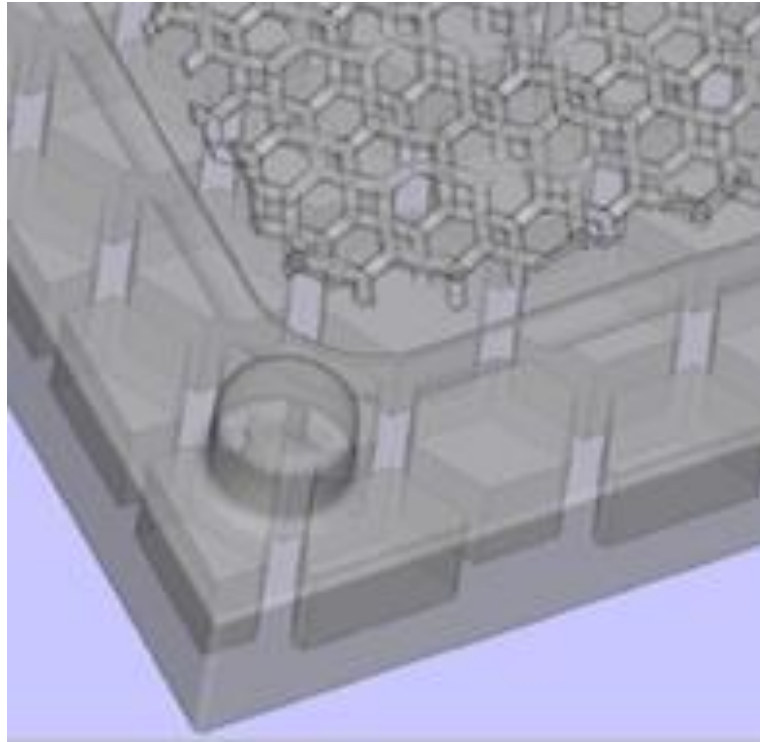


Abbildung 50: Wabenstruktur des Modellwachs-/Stützwachssystems



Abbildung 51: Gedrucktes Demonstratorbauteil mit der Draufsicht auf die Unterseite. Die beschriebene Wabenstruktur ist deutlich erkennbar

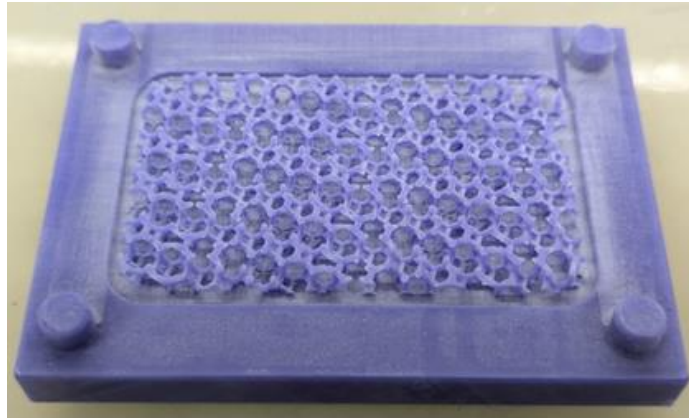


Abbildung 52: Übersicht eines Ausgangsmodells eines D-1 Demonstrators

Tabelle 8: Verbrauchsmengen an Stütz- und Modellwachs und entsprechende Materialkosteneinsparung

Volumenanteil (cm³)	Modellwachs (Visijet M2 Cast) Dichte: 0,95g / cm ³	Stützwachswabenstruktur (Visijet M2 SUW) Dichte: 0,95g / cm ³	Materialkosten gesamt (in €)	Einsparung Materialkosten (in %)
Volldruck (Reines Modellwachs)	185	0	85,84	
Fülldruck (Volumen mit Stützwachs gefüllt)	83	101	54,31	-37%

Aus monetärer Sicht ist der Ersatz der Teilegeometrievolumina durch die Stützwachs-Wabenstruktur sehr sinnvoll. Es besteht ein hohes Einsparpotential hinsichtlich der Materialkosten von 37% am Beispiel der Herstellung des Wachs-Modells für den „D-1 Demonstrator-Kühlkörper“ mit einer umlaufenden Randschichtdicke von 1,5mm. Eine weitere Reduzierung der Randschicht reduziert weiter die Modellherstellkosten. Die Druckdauer bleibt hiervon unberührt.

Nachdem die 3D-Wachsdrukstrategie für die D-1 Demonstratoren entsprechend adaptiert war, wurden je Variante ein Kühlkörper aus einer AL-Basislegierung (G- AlSi7Mg / 3.2371) und einer CU-Basislegierung (G- CuSn10 / CC480K) hergestellt. Für beide Werkstoffe wurde das gleiche Gieß- und Speisersystem verwendet. Die Rohgussteile an der Ober- und Unterseite der Trägerplatte wurden abschließend noch zerspanend bearbeitet.

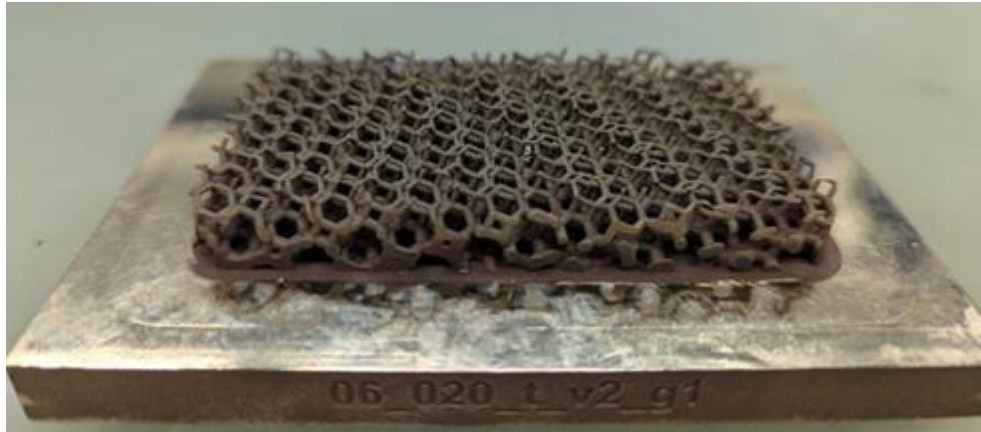


Abbildung 53: D-1 Demonstrator Werkstoff: G- CuSn10 / CC480K; Kelvinzelle „06_020_t_v2_g1“

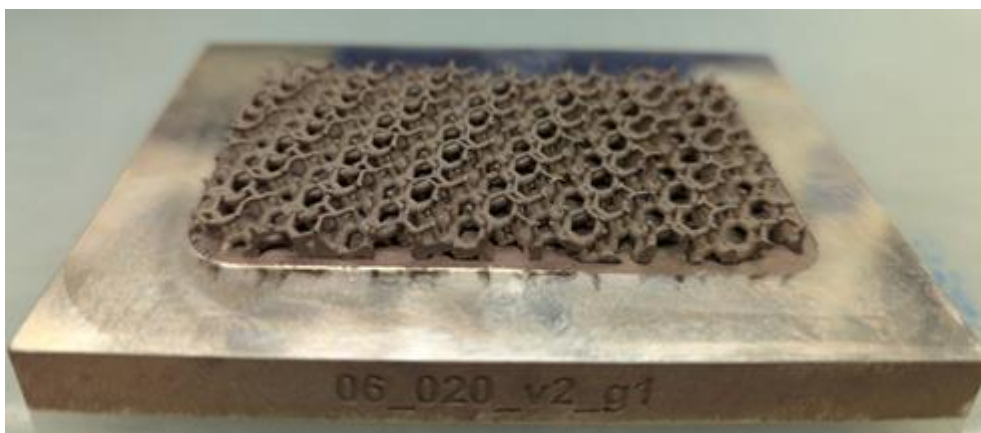


Abbildung 54: D-1 Demonstrator Werkstoff: G- CuSn10 / CC480K; Kelvinzelle „06_020_v2_g1“

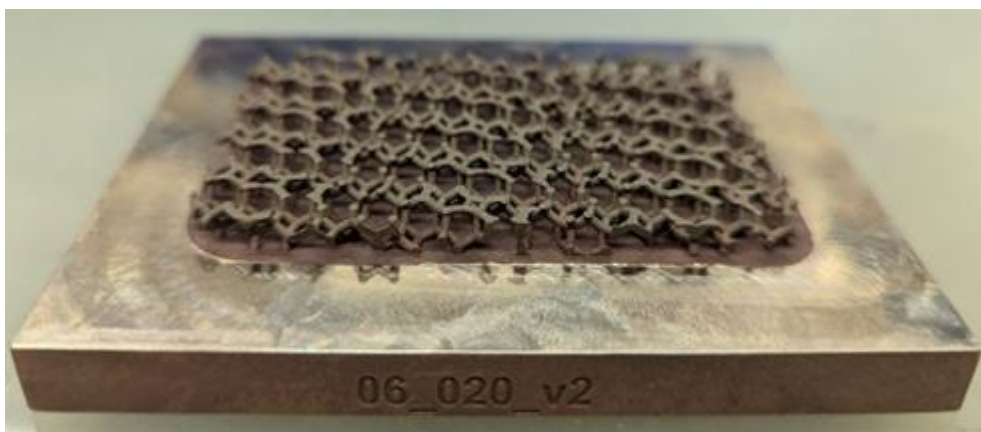


Abbildung 55: D-1 Demonstrator Werkstoff: G- CuSn10 / CC480K; Kelvinzelle „06_020_v2“

Basierend auf die erarbeitete Wachsdruck- / Mikrofeingussstrategie und durch weitergehende Simulationen durch den Projektpartner TUD-ILK hinsichtlich Kühlleistung und Strömungsbedingungen nochmals angepassten D-1 Demonstratoren mit PinFin-Strukturen wurde die Fertigungsroutine etabliert.

Die Demonstratoren wurden jeweils an die verantwortlichen Projektpartner für Prüfstandsversuche weitergeleitet.

Mit dem ursprünglichen Ziel aus den Technologiedemonstratoren Daten durch Tests Daten für die Simulation zu generieren, wurden CAD Modelle einer Kelvinzelle erstellt. Aus den Tests sollen Kurven die dann für eine Rückkopplung in die CAD genutzt werden kann um eine entsprechende Anpassung der Geometrie vorzunehmen



Abbildung 56: Technologiedemonstratoren Feinguss (links) Dreieckssteg, (Mitte) Rundsteg, (rechts) gradierte Stege

Eine weitere Einschränkung in den angedachten Konzepten betrifft das „Angießen“ der Struktur an die Grundplatte/Leistungselektronik. Wie bereits in AP 2.2 festgestellt, führen die durch den Laserprozess eingespeiste thermische Leistung zum Verzug der DCB, und ggf. zum Defekt der angebrachten Elektronik. Aus diesem Grund wird der nachträgliche Montageprozess für den weiteren Projektverlauf weiter betrachtet. Mit dem Zweck die Anbindung der Gussstruktur an die Grundplatte zu erleichtern, wird im Feingussprozess nicht nur die Schaumstruktur, bestehend aus metallischen Stegen, sondern auch eine Platte gefertigt.

Galvanische Kontaktierung

Es wurden Metallschaum und Baseplate unter mechanischem Druck gemeinsam in ein Galvanikbad eingebracht. An der Kontaktstelle bildet sich durch galvanische Abscheidung eine stoffschlüssige Metall-Metall-Verbindung aus. Ursprüngliche Bedenken, der Prozess könnte durch den Faraday'schen Käfig-Effekt behindert werden, bestätigten sich nicht – es konnten sowohl für kleine (D-0x) als auch größere Demonstratoren (D-1x, D-2) erfolgreich Kontaktierungen realisiert werden. Beim Demonstrator D-2 wurde die galvanisch hergestellte Verbindung zusätzlich chemisch vernickelt. Diese nachträgliche Nickelschicht erhöht einerseits die Schichtstärke und wirkt andererseits als Schutzschicht: Die Kupferoberfläche wird vom Kühlmedium isoliert, was insbesondere im praktischen Einsatz wichtig ist, da Kupferionen im Kühlkreislauf Korrosions- oder Schädigungsmechanismen verursachen können.

Die wesentlichen Schritte der Kunststoffgalvanisierung lassen sich am Beispiel von PUR-Schaum wie folgt beschreiben: Zunächst wird die Oberfläche aktiviert, um die ursprünglich nichtleitfähige Kunststoffoberfläche elektrisch leitfähig zu machen. Im nächsten Schritt erfolgt eine stromlose Abscheidung von Kupfer, wodurch eine durchgehende leitfähige Schicht entsteht. Abschließend wird das Substrat in ein elektrolytisches Bad eingetaucht, in dem die Kupferschicht galvanisch bis zur gewünschten Dicke aufgebaut wird.

Die Galvanik dient dabei der Funktionalisierung nichtleitfähiger Substrate, ist jedoch aus Sicht der Rückgewinnung kritisch zu bewerten. Wird die Leitfähigkeit – wie häufig üblich – durch nanoskalige Eisenpartikel oder sogenannte Nickelfahnen erzeugt (siehe REM-Aufnahme Abbildung 57), entstehen schwer trennbare Mischphasen.



Abbildung 57: Nickelfahne zur Aktivierung der Kunststoffoberflächen

Recyclingfreundlicher ist der Einsatz von Kupfer-basierten Leitlacken oder Pasten. Idealerweise bestehen Aktivierung und Deckschicht aus demselben Material – so entsteht ein reines Zweiphasensystem, was die spätere Trennung deutlich vereinfacht. Nach diesem Prinzip wurden die Beschichtungen am IWU durch die Partner des IART durchgeführt. Jedoch ist die Beschichtung von PUR als Vollmaterialien und Schäumen nicht ohne weiteres in einer herkömmlichen Labor Galvanikanlage umzusetzen. Außerdem war mit dem Ausscheiden von HSO Solingen aus dem Konsortium, das technische Verständnis für den Prozess eingeschränkt. Außerdem war bei den Projektpartner des Fraunhofer IWU nur eine Aktivierung durch nanoskaliges Eisen oder Kupferlack möglich. Durch die dünnen Stegverbindungen des Schaums wurde dieser durch die in der Suspension befindlichen Lösemittel beim zu langen Tauchvorgängen beschädigt.

Da ein solches Ergebnis weder für die Verwendung als Kühlstruktur, noch für die Recyclingversuche geeignet ist, wurden reinen Beschichtungen der Kunststoffbasismaterialien an die Saxonia Galvanik GmbH aus Halsbrücke für die ABS Platten (siehe AP 2) und die Beschichtungen der Schaumstrukturen an die MacPanther Materials GmbH in Bremerhaven in Auftrag geben.

AP 3.2 Technologieentwicklung Recycling

Im folgenden Arbeitspaket wurden verschiedene Versuchsabläufe dargestellt, die zur Bewertung der Recyclingfähigkeit unterschiedlicher Materialsysteme durchgeführt wurden. Ziel war es, sowohl Referenzdaten zu generieren als auch die Wirksamkeit konkreter Entschichtungsansätze zu untersuchen. Zu Beginn wurden Benchmarking-Versuche mit vorhandenen Modulen des Projektpartners Valeo sowie handelsüblichen CPU-Kühlern durchgeführt, um etablierte Strukturen und Prozesse aus der industriellen Praxis hinsichtlich Ausbringens, Reinheit der Produkte und Trennbarkeit zu bewerten. Aufbauend auf diesen Ergebnissen folgten Versuche an beschichteten Werkstoffen, darunter massive Substrate wie ABS und PUR sowie PUR-Schäume mit unterschiedlichen Porendichten und galvanischen Beschichtungen. Ziel war es, den Einfluss der Substratstruktur und -morphologie auf den Entschichtungsprozess systematisch zu erfassen.

Benchmarkingversuche mit Valeomodulen und CPU-Kühlern

Ziel der Untersuchungen war es eine Benchmark zu setzen, welche zum Vergleich bei den beschichteten Voll- und Schaumwerkstoffen anzustellen. Für die Untersuchungen wurden verschiedene Kühlstrukturen ausgewählt, darunter CPU-Kühler in Rippenbauweise sowie Module des Projektpartners Valeo (Abbildung 58).

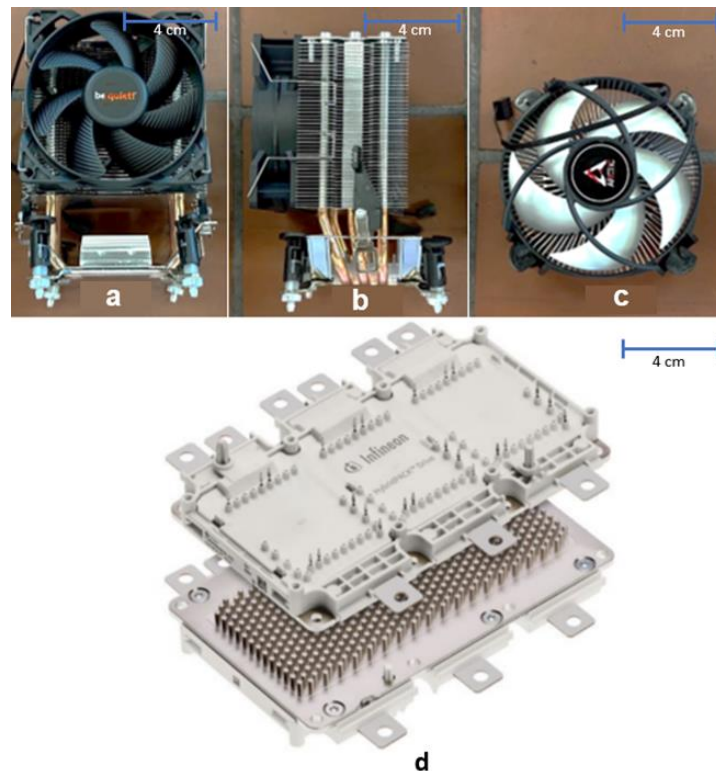


Abbildung 58: verwendete Kühleinheiten für Benchmarking Versuche

Die Materialanalysen mittels RFA und FTIR ergab ein weitgehend ähnliches Abbild der Materialzusammensetzungen: Die PM-Module bestanden aus einer massiven Kupferstruktur, welche mit Nickelbeschichtet wurde, während die M-, E- und R-Module überwiegend eine Kühlstruktur aus Aluminium aufwiesen. Lediglich die elektrischen Kabel waren aus Kupfer gefertigt. Häufig eingesetzte Polymere waren Polypropylen (PP) und Polycarbonat (PC) (Tabelle 9). Schon aufgrund dieser zur Verfügung stehenden Daten hinsichtlich der Werkstoffkombination lässt auf eine gute Recyclingfähigkeit schließen. Lediglich die Module PM 1 und 2 der Firma Valeo werden eine schlechte Trennung der metallischen Komponenten aufweisen, da die stoffschlüssigen Beschichtung mechanisch nicht zu trennen ist.

Tabelle 9: Werkstoffe der verwendeten Proben

Probennummer	Metalle	Polymere
E1, E2, E3	Cu, Al	PP
R1, R2, R3	Cu, Al	PA, PC
M1, M2, M3	Al	PP, PC
PM1, PM2	Cu, Ni	PP, PC

Die Zerkleinerung der Proben erfolgte in einer Rotorschere (Bauart TUBAF) sowie in einem Granulator der Firma THM. Die Versuchsreihe PM musste aufgrund ihrer Abmessungen und Masse im Vorfeld von den Zerkleinerungsversuchen ausgeschlossen werden. Im weiteren Verlauf wurden die Versuchsreihen E, R

und M bearbeitet. Bei der Versuchsreihe R wurde der Versuch aufgrund des massiven Kerns abgebrochen. Wie in Abbildung 59 zu sehen, verhakten sich die Zerkleinerungswerkzeuge im dichten Kernmaterial, wodurch die Anlage an ihre Belastungsgrenze stieß. Ein ähnliches Verhalten zeigte die Versuchsreihe E im Granulator: Durch die Bauart mit feinen Rippen wurden diese nicht zerkleinert, sondern lediglich zusammengedrückt (siehe Abbildung 59). Aus diesem Grund wurde die Versuchsreihe E anschließend in der Rotorschere zerkleinert, um eine ausreichende Aufbereitung zu ermöglichen.

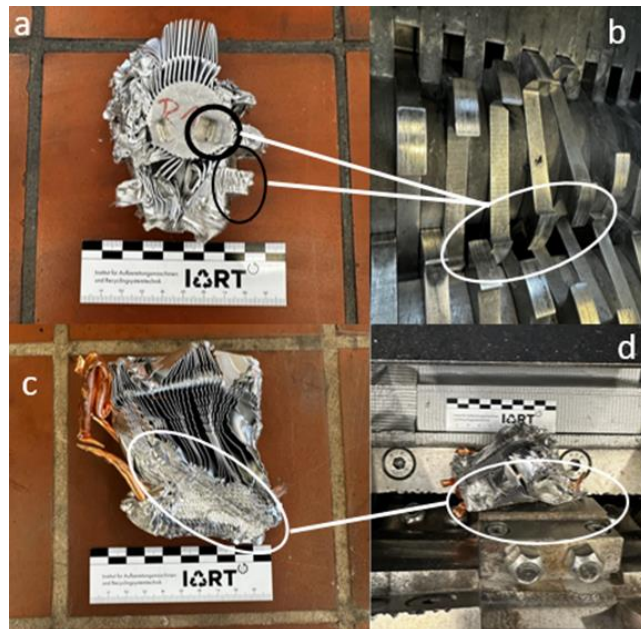


Abbildung 59: Proben nach der Zerkleinerung in der Rotorschere (a und b) und im Granulator (c und d)

Bei den M-Modulen zeigte ein zweistufiger Prozess aus Vorzerkleinerung (Rotorschere oder Granulator) und Nachzerkleinerung im Granulator mit 6 mm Rost, gefolgt von der Sichtung im Zick-Zack-Sichter, eine nahezu sortenreine Trennung der Metall- und Polymerfraktionen (Tabelle 10: Zusammensetzung der einzelnen Fraktion nach der Sortierung der Werkstoffe). Die E-Module erwiesen sich als deutlich schwieriger zu trennen: Bei E1 waren trotz mehrfacher Sichtung noch 26 % leichte Elemente in der Metallfraktion enthalten, während bei E2 durch vorherige Demontage eine weitgehende Trennung in Kupfer-, Aluminium- und PP-Fraktionen erreicht werden konnte (siehe Tabelle 10)

Tabelle 10: Zusammensetzung der einzelnen Fraktion nach der Sortierung der Werkstoffe

Versuchsreihe M1/M2		
Metallfraktion	Aluminium	Kupfer
	83,25 %	14,25 %
Polymerfraktion	Polypropylen	Polycarbonat
	38 %	60 %

Versuchsreihe M3			
Metallfraktion	Aluminium	Kupfer	
	81,25 %	18 %	
Polymerfraktion	Polypropylen	Polycarbonat	
	39,75 %	58 %	
Versuchsreihe E1			
Metallfraktion	Aluminium	Kupfer	leichte Elemente
	70,2 %	2,1 %	26,3 %
Versuchsreihe E1			
Mischfraktion	Aluminium	Kupfer	leichte Elemente
	52 %	1,5 %	44,5 %

Der spezifische Energiebedarf war bei ausschließlicher Granulatornutzung am niedrigsten (M3: 93,9 kWh/t), während Prozessketten mit Rotorschere zwischen 130–160 kWh/t lagen (Tabelle 11). Eine vorherige Demontage hatte keinen wesentlichen Einfluss auf den Gesamtenergiebedarf. Massive PIN-FIN-Strukturen lassen sich mit einem einfachen zweistufigen Zerkleinerungs- und Sichtungprozess gut trennen. Rippenstrukturen erfordern dagegen mehr Aufbereitungsschritte und liefern geringere Reinheiten. Granulator-basierte Prozessketten sind unabhängig von der Kühlerbauart energieeffizienter und damit für eine skalierbare Aufbereitung vorteilhaft.

Tabelle 11: spez. Energiebedarf der Prozesse

Probenr.	Unternr.	spezifischer Energiebedarf Stufe 1 in kWh/t	spezifischer Energiebedarf Stufe 2 in kWh/t	spezifischer Energiebedarf gesamt in kWh/t
M1	-	47,14	82,83	129,97
M2	-	62,38	95,5	157,88
M3	-	8,5 (Granulator)	85,4	93,9
E1	-	92,52	45,3	137,82
E2	E2M	51,01	-	51,01
	E2K	13,13	93,5	106,63

Die Recyclingfähigkeit der Benchmark-Module ist insgesamt als ausreichend gut zu bewerten. Aus den Aufbereitungsversuchen konnte sowohl eine Metall- als auch eine Kunststofffraktion abgetrennt werden. Die Metallfraktion, bestehend aus Aluminium und Kupfer, ließe sich in einem weiteren Schritt mittels Wirbelstromscheider sortenrein trennen. Die Kunststofffraktion erwies sich hingegen als schwieriger zu separieren, da die Analysen mindestens zwei verschiedene Kunststofftypen nachwiesen, die jedoch farblich identisch beziehungsweise teilweise schwarz waren. Diese Eigenschaften erschweren eine

optische Sortierung, sodass hier nur eine moderate Trennqualität erreicht werden kann. Eine Sortierung wäre allerdings mit einer MIR-Technologie wie bspw. dem BlackEye System der Firma Steinert zu realisieren.

Die nachfolgenden Ausführungen (*Vergleich von Beschichteten Vollwerkstoffen und beschichteten PUR-Schaum mit einer Porendichte von 20 PPI*) beziehen sich ausschließlich auf die Entschichtung von Schichtwerkstoffen, insbesondere auf verkupferten PUR-Schaum. Aufgrund der direkten Galvanisierung ist eine vorherige Trennung der Schichten nicht möglich. Entsprechend der Abfallhierarchie der EU hat die Wiederverwertung Vorrang vor der thermischen Verwertung. Bei beschichteten Materialien liegt dies vor allem daran, dass vollgegossene Schäume ohne weitere Vorbehandlung einer metallurgischen Recyclingroute zugeführt werden können, was dem Stand der Technik entspricht. Trotzdem wurde eine Zerkleinerung von Aluminiumstrukturen durchgeführt, um zu prüfen, welche alternativen Verwertungsmöglichkeiten sich für die entstehenden Granulate neben der metallurgischen Route ergeben könnten. Diese Betrachtung erfolgt zu einem späteren Zeitpunkt in Verbindung mit der Analyse der Sortiertechnik unter Einsatz von LIBS- und RFA-Verfahren.

Vergleich von beschichteten Vollwerkstoffen (industriell beschichtetes ABS und PUR) und beschichteten PUR-Schaum mit einer Porendichte von 20 PPI

Diese Untersuchungen wurden angestellt, um zu evaluieren, ob eine nähere Betrachtung der Entschichtung überhaupt von Nöten ist oder ob diese nach dem Stand der Technik einer ausreichend guten Separierung unterzogen werden können.

Für die Untersuchungen zur Zerkleinerung und Entschichtung wurden sowohl metallisierte Massivkunststoffe aus ABS und PUR als auch verkupferte PUR-Schäume mit einer Porendichte von 20 PPI betrachtet. Ziel war es, Unterschiede im Zerkleinerungsverhalten, der Entschichtungsrate sowie der resultierenden Fraktionsqualität zu ermitteln. Trotz der bereits zuvor festgestellten Tatsache, dass PUR als Vollmaterial für eine Beschichtung nur eingeschränkt geeignet ist, wurde die Zerkleinerung von PUR-Vollmaterial sowie ABS im Vergleich zu PUR-Schaum durchgeführt. Ziel war es, einen werkstofflichen und industriellen Vergleich zu den Schaumstrukturen zu ermöglichen und zudem für zwei unterschiedliche Werkstoffsysteme den spezifischen Energiebedarf der angewendeten Zerkleinerungsverfahren zu ermitteln.

Alle Proben sollten nach dem gleichen Verfahren untersucht werden (vgl. Ablauf in Abbildung 60). Der genaue Versuchsablauf mit den einzelnen Zwischenschritten zur Charakterisierung ist in Abbildung 60-oben dargestellt. Ziel war es, dass alle Materialtypen denselben Prozess durchlaufen. Dies war jedoch, wie in Abbildung 60-unten ersichtlich, nicht vollständig möglich: Beim Zerkleinern von ABS-Vollmaterial in der Universalmühle kam es bei Verwendung eines 2 mm Rostes zu einem Aufschmelzen des Materials. Daher musste für ABS-Vollmaterial auf den Granulator umgestellt werden. Somit verlief der Ablauf für PUR-Vollmaterial und 20 PPI-Schaum vollständig identisch, während bei ABS-Vollmaterial die sekundäre Zerkleinerung im Granulator mit einer Rostweite von 6 mm (kleinster verfügbarer Rost) durchgeführt wurde.

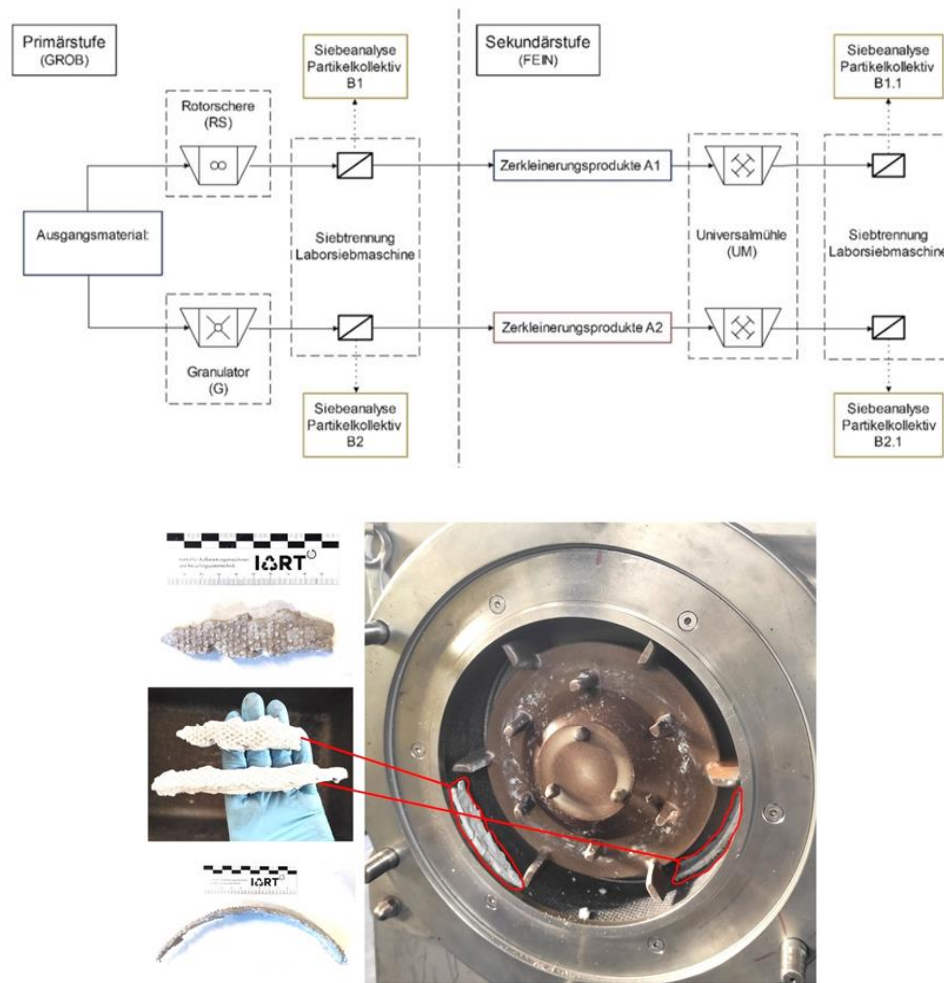


Abbildung 60: Verfahrensablauf für die Charakterisierung der Produkte (oben) und Aufschmelzungen der ABS Werkstoffe in der Universalmühle (unten)

Der detaillierte Ablauf der Versuche gliederte sich wie folgt: Zunächst erfolgte die Vorzerkleinerung der Proben, einmal in der Rotorschere ohne Austragsrost und einmal im Granulator mit einem 10 mm Austragsrost, um den möglichen Einfluss der Vorzerkleinerung auf das Endergebnis zu bewerten. Anschließend wurde eine Zwischensiebung durchgeführt, um die Produkte der Vorzerkleinerung zu charakterisieren. Darauf folgten Pyknometermessungen zur Bestimmung des genauen Massenverhältnisses von PUR zu Kupfer. Diese Werte dienen als Grundlage für spätere Berechnungen zum Entschichtungsgrad. In der Nachzerkleinerung wurde ABS-Vollmaterial im Granulator bei maximaler Umfangsgeschwindigkeit mit einem 6 mm Rost zerkleinert. Für PUR-Vollmaterial und 20 PPI PUR-Schaum erfolgte die Nachzerkleinerung in der Schlagnasenmühle bei einer Umfangsgeschwindigkeit von 82,1 m/s und einem Austragsrost von 2 mm. Im Anschluss wurden die zerkleinerten Proben mittels Schwertrübetrennung bei einer Trennschichtdichte von 1,26 g/cm³ in PUR- und Kupferfraktion beziehungsweise eine Mischfraktion aufgeteilt. Für gröbere Partikel wurde ergänzend eine Windsichtung durchgeführt. Die Abmessungen und Materialdaten der Versuchsmaterialien sind in Tabelle 12 dargestellt.

Tabelle 12: Abmessungen und Parameter der Versuchsmaterialien

Parameter	Metallisierter PUR-Schaum	Beschichtetes PUR- Vollmaterial	Beschichtetes ABS-Vollmaterial
Abmessung	100 x 100 x 20 mm	70 x 20 x 2 mm	100 x 100 x 20 mm
Aktivierungsschicht	Nickelbekeimung	Nanoskaliges Eisen in Suspension	Nickelbekeimung
Schichtdicke	Ca. 30 µm	Ca. 100 µm	30 – 50 µm
Materialien	PUR, Cu, (Ni)	PUR, Cu, (Fe)	PUR, Cu, (Ni)
Name der Proben in Abbildung	Cu-ABS	Cu-PUR	Cu-PURFoam

Nach Auswertung der Ergebnisse ergibt sich ein eindeutiges Bild: Vollmaterialien lassen sich deutlich besser entschichten als Schaumwerkstoffe. Sowohl in der Prozessroute mit Rotorschere als auch mit Granulator als Vorzerkleinerung zeigten die beschichteten ABS-Kunststoffe eine deutlich höhere Entschichtungsrate als die metallisierten Schäume. PUR-Vollmaterial wurde in der grafischen Darstellung nicht berücksichtigt, da – wie bereits erwähnt – die fehlende Möglichkeit, Kupfer dauerhaft an der Oberfläche zu binden, bereits in der Vorzerkleinerung zu einer Entschichtung von nahezu 95 % führte. Nach der Nachzerkleinerung lag der Wert sogar bei 99,5 %, was die grundsätzliche Ungeeignetheit von PUR-Vollmaterial für metallische Beschichtungen nochmals unterstreicht.

Die Ergebnisse zeigen klar, dass beschichtetes ABS zu 55 % bzw. 63 % entschichtet werden konnte, während der metallisierte Schaum lediglich Entschichtungsraten von 22 % bzw. 23,5 % erreichte. Besonders bemerkenswert ist, dass das ABS im Granulator nachzerkleinert wurde und eine deutlich größere Endpartikelgröße aufwies, die Entschichtung dennoch um ein Vielfaches besser war.

Um eine vergleichbare Nachzerkleinerung darzustellen, wurde in der im Projekt angeschafften Hammermühle ein weiterer Versuch mit einem 2 mm Rost bei 50 m/s durchgeführt. Auch hier bestätigte sich das Bild: Bei ABS konnte eine Entschichtung von 82 % erreicht werden. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass Vollmaterialien mit dem Stand der Technik deutlich besser zu entschichten sind als metallisierte Schäume. Für letztere besteht klarer Handlungsbedarf, um wirtschaftlich und technisch geeignete Verfahren zu entwickeln.

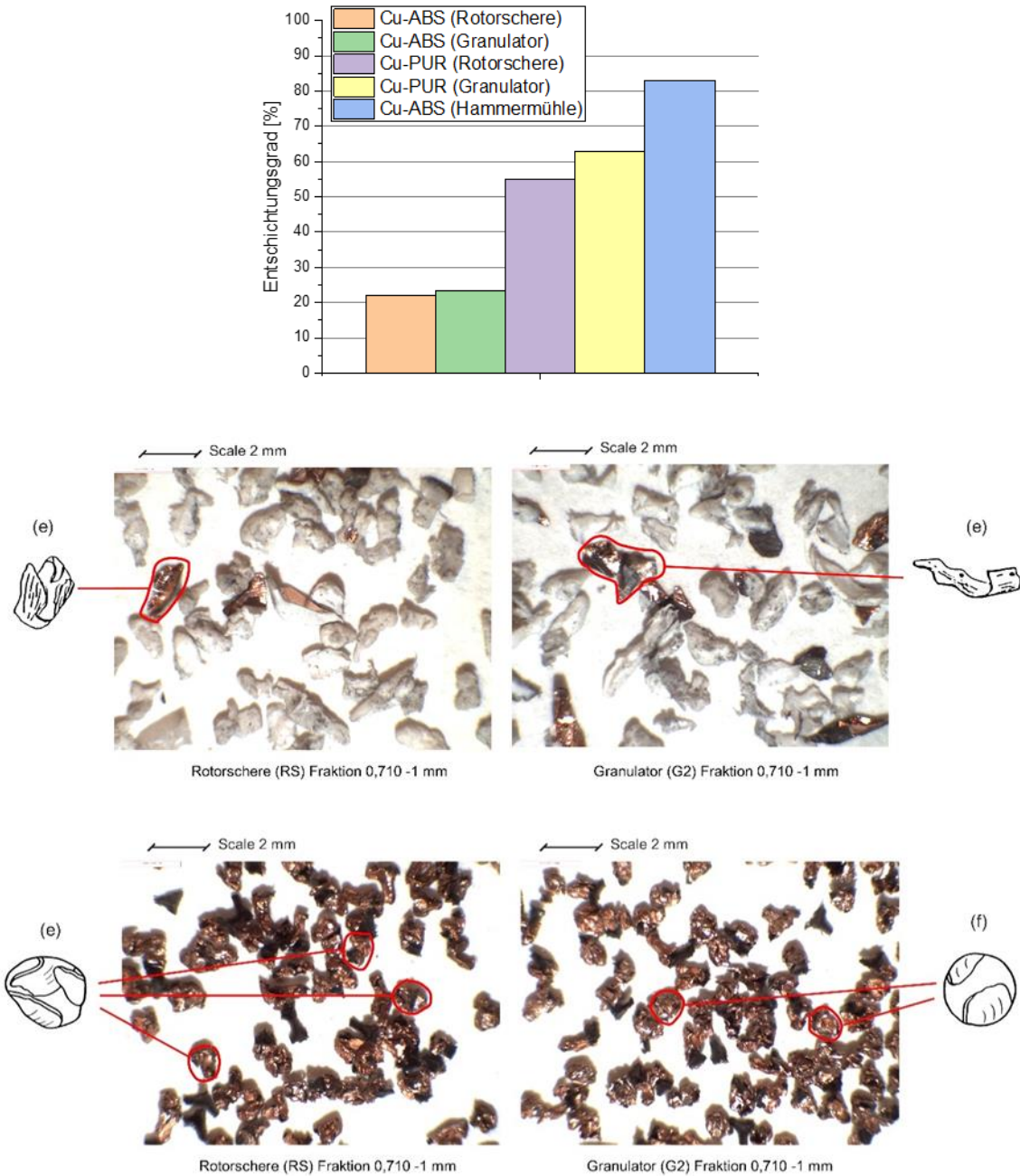


Abbildung 61: Entschichtungsgrade der verschiedenen Proben mit verschiedenen Maschinen in der Vorzerkleinerung (oben) und Partikelform der Proben (unten)

Die deutlich schlechtere Entschichtungsrate des metallisierten Schaums ist darauf zurückzuführen, dass bei der Nachzerkleinerung mit einem 2 mm Rost noch keine Zerkleinerung auf mikroskopischer Ebene stattfindet. Der Stegdurchmesser der Schäume liegt bei etwa 200 μm , sodass die Stege mikroskopisch vollständig mit Kupfer umschlossen sind und eine feste Einheit bilden. Wie in Abbildung 61 unten zu erkennen, führt dies dazu, dass sich beim Zerkleinern im Gegensatz zu ABS keine plattigen Partikel ausbilden, die sich leicht voneinander trennen lassen. Stattdessen neigt PUR dazu, zu verkugeln, was die Entschichtung zusätzlich erschwert. Um eine signifikante Steigerung der Entschichtungsrate zu erzielen, muss daher eine Partikelgröße unterschritten werden, die kleiner als der Stegdurchmesser ist. Abbildung

62 verdeutlicht, dass mit abnehmender Partikelgröße die Entschichtung kontinuierlich zunimmt bzw. der Kupfergehalt in gew.-% nach Klassierung und Sortierung zunimmt.

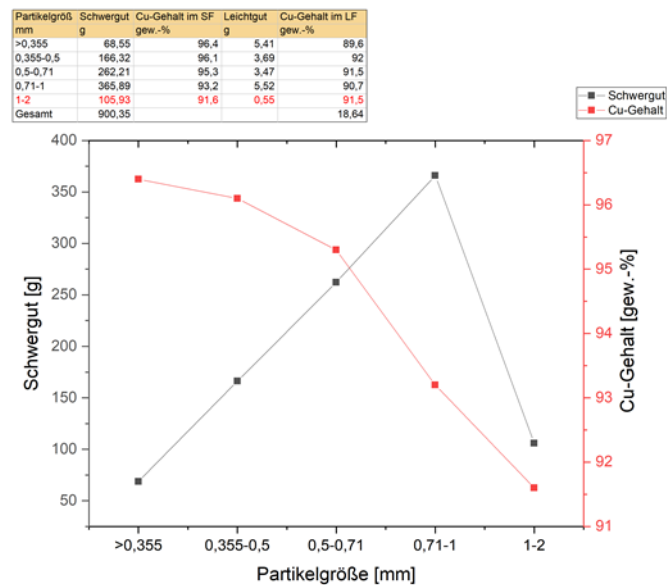


Abbildung 62: Kupfergehalt einzelner Größenfraktionen nach der Trennoperationen

Wie in Tabelle 14 dargestellt, weist die Zerkleinerung von Cu-ABS-Proben im Vergleich zu Cu-PUS-Proben durchweg einen höheren spezifischen Energiebedarf auf. Der höchste Gesamtenergiebedarf wurde für die Prozessroute Cu-ABS in Rotorschere + Granulator mit 111,50 kWh/t ermittelt, während der niedrigste Wert bei der Prozessroute Cu-PURS im Granulator mit 37,26 kWh/t lag. Der Einsatz der Universalmühle führt dabei zu einer deutlichen Erhöhung des Energiebedarfs, bei der zusätzlich 32,94 kWh/t aufgewendet werden mussten. Diese signifikanten Unterschiede in den spezifischen Zerkleinerungsenergien kommt dadurch zustande, dass das ABSVollmaterial deutlich massiver (erhöhte Wandstärke) ist als der Schaumwerkstoff und so eine deutlich höhere relative Dichte aufweist, als der metallisierte Schaum und sie die verwendeten Maschinen deutlich mehr Energie aufwenden müssen, um die Zerkleinerung zu realisieren.

Tabelle 13: spezifischer Gesamtenergiebedarf der einzelnen Prozessrouten

Benennung	massespezifische Zerkleinerungsenergie [kWh/t]			Gesamt
	Rotorschere	Granulator	Universalmühle	
Cu-ABS-Probe im RS	67,821	--	--	111,50
Cu-ABS-Probe im RS + G2	--	43,680	--	
Cu-ABS-Probe im G1	--	15,802	--	62,94
Cu-ABS-Probe im G1 + G2	--	47,134	--	
Cu-PUR-Probe im RS	10,150	--	--	43,09
Cu-PUR-Probe im RS + UM	--	--	32,940	
Cu-PUR-Probe im G1	--	2,769	--	37,26
Cu-PUR-Probe im G1 + UM	--	--	34,492	

Parameterstudie verschiedener Porendichte in Schlaghasen- und Hammermühle zu Steigerung der Entschichtung

Aufgrund der eingeschränkten Bewertbarkeit hinsichtlich der prinzipiellen Eignung der Maschinen in der vorangegangenen Versuchsreihe – bedingt durch die ausschließliche Untersuchung einer starren Parameterkombination und die bis dahin fehlende Möglichkeit, die Hammermühle einzusetzen (da die Lieferung der Hammermühle zum Zeitpunkt nicht geschehen war) – wurde in dieser Versuchsreihe ein vollfaktorielles Design über drei Parameter mit jeweils drei Stufen realisiert. Die Untersuchungen erfolgten sowohl mit der Hammermühle als auch mit der Universalmühle. Als Parameter wurden die Rostweite, die Beanspruchungsgeschwindigkeit sowie die Porendichte der metallisierten Schäume gewählt. Für die Hammermühle wurden Rostweiten von 2 mm, 4 mm und 8 mm sowie Umfangsgeschwindigkeiten von 20 m/s, 35 m/s und 50 m/s eingesetzt. Für die Universalmühle kamen Rostweiten von 0,5 mm, 1 mm und 2 mm sowie Umfangsgeschwindigkeiten von 20,5 m/s, 51 m/s und 82 m/s zum Einsatz. Die Siebrostgrößen entsprachen jeweils den zwei kleinsten verfügbaren Varianten, und die gewählten Umfangsgeschwindigkeiten deckten den gesamten möglichen einstellbaren Bereich der jeweiligen Maschine ab. Die großen Unterschiede bei den Rostweiten und Geschwindigkeiten sind konstruktionsbedingt. Um die Vergleichbarkeit besser beurteilen zu können, wurde in einem zusätzlichen Schritt in der Universalmühle eine Rostweite von 3,5 mm untersucht. Zur Veranschaulichung sind in Abbildung 63 die Schäume mit unterschiedlichen Porendichten dargestellt.

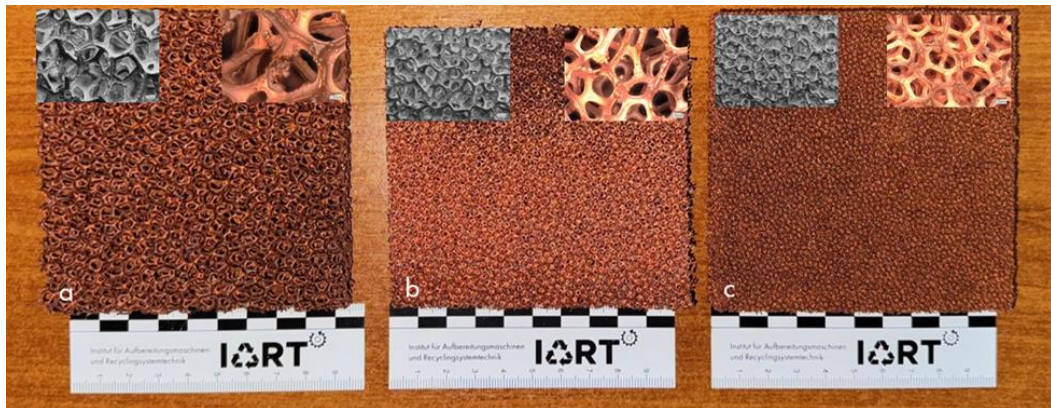


Abbildung 63: verschiedene Porendichten der metallisierten PUR-Schäume (a: 10 PPI b: 20 PPI c: 30 PPI)

Aufgrund des Umfangs der Versuchsreihen werden im Folgenden nur jene Untersuchungen betrachtet, die für weiterführende Analysen sinnvoll und zielführend sind. Alle Versuche, bei denen in der Hammermühle mit Rostweiten von 4 mm und 8 mm zerkleinert wurde, werden aus der Betrachtung ausgeschlossen, da hier praktisch keine Entschichtung stattgefunden hat. Bedingt durch strukturelle Besonderheiten der Proben lag der Entschichtungsgrad lediglich im deutlich einstelligen Prozentbereich, was eine weitere Untersuchung dieser Kombinationen als nicht zielführend erscheinen lässt.

Wie in Abbildung 64 ersichtlich, sind zudem die Beanspruchungsgeschwindigkeiten von 20 m/s und 35 m/s im vorliegenden Versuchsaufbau für die Hammermühle ungeeignet, da bei diesen Einstellungen Material im Mahlraum zurückbleibt und nicht ausreichend zerkleinert wird. Damit ergibt sich für die Hammermühle aus diesen Phänomenen heraus lediglich eine geeignete Parameterkombination: 50 m/s Beanspruchungsgeschwindigkeit und 2 mm Rostweite. Mit dieser Einstellung konnten bei 10 PPI- und 30 PPI-Schäumen Entschichtungsgrade von 44 % bzw. 32 % erzielt werden.



20 m/s



35 m/s



Abbildung 64: Nichtzerkleinertes Material in der Hammermühle bei 20 und 35 m/s (oben) und in der Universalmühle bei 20 m/s (unten)

Ein ähnliches Phänomen zeigte sich in der Universalmühle bei einer Rostweite von 3,5 mm: Auch hier lagen die Entschichtungsgrade deutlich unter 10 %, sodass diese Einstellung vernachlässigt werden kann. Ebenso waren die Versuche mit einer Beanspruchungsgeschwindigkeit von 20 m/s nicht zielführend, da – wie in Abbildung 64 dargestellt – das Mahlgut im Zerkleinerungsraum zurückblieb und keine weitere Zerkleinerung erfolgte.

Durch diese Parameterstudien konnten somit bereits zahlreiche Einstellungen aufgrund ihrer mangelnden Eignung ausgeschlossen werden.

In Abbildung 65 sind oben die Ergebnisse aller Porendichten bei der besten Einstellung der Hammermühle (50 m/s und 2 mm Rost) im Vergleich zu den drei besten Entschichtungsgraden der Universalmühle für alle Porendichten dargestellt. Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass mit steigender Umfangsgeschwindigkeit und kleiner werdender Rostweite die Entschichtung signifikant verbessert wird. Gleichzeitig steigt jedoch auch der spezifische Energiebedarf, da die Maschine höhere Beschleunigungsleistungen erbringen muss und die Zerkleinerung intensiver erfolgt.

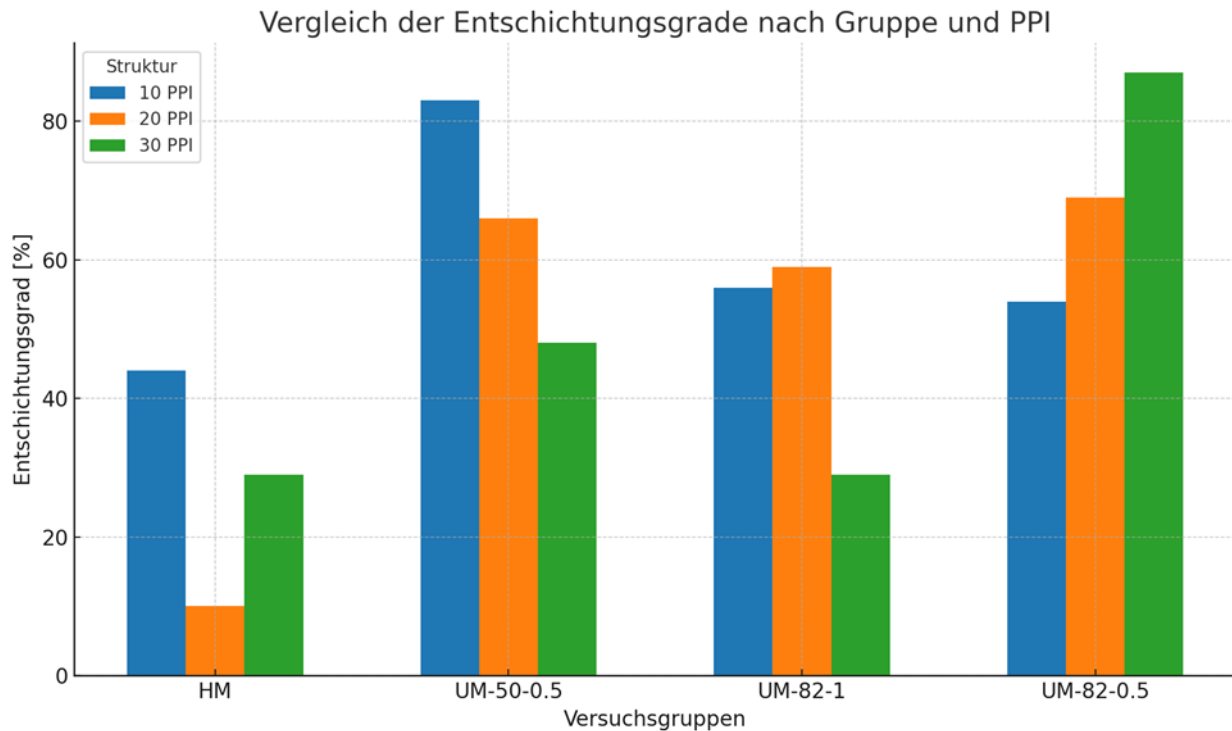
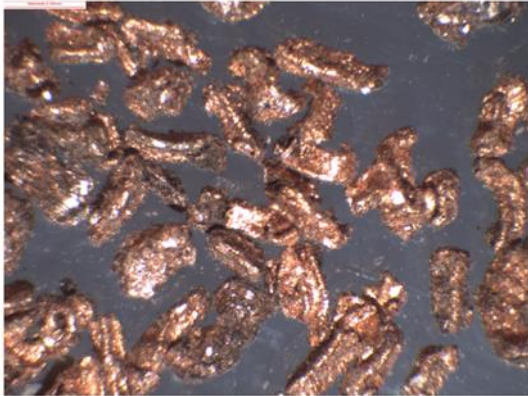


Abbildung 65: Entschichtungsgrad in verschiedenen Einstellungen und Maschinen

So lässt sich bei 10 PPI-Schäumen ein Entschichtungsgrad von bis zu 93 % erreichen. In einem Kreislaufprozess wäre hier sogar eine vollständige Entschichtung möglich. Bezogen auf den Entschichtungsgrad ergibt sich somit ein idealer Prozess bei einer Umfangsgeschwindigkeit von 82 m/s und einer Rostweite von 0,5 mm. Hinsichtlich des Energiebedarfs besteht jedoch noch Optimierungsbedarf, weshalb diese Parameterkombination dennoch in die weitere Betrachtung einbezogen wird.

Wie bereits erwähnt, erreichte die Hammermühle bei 10 PPI-Schäumen einen maximalen Entschichtungsgrad von rund 44 %, während der Energiebedarf im Vergleich zur Universalmühle um ein Vielfaches geringer war. Auffallend ist vor allem, dass bei nahezu gleichen Einstellungen (50 m/s und 2 mm Rost) die Hammermühle deutlich schlechter entschichtet, als dass die Universalmühle tut. Dies ist auf die verschiedenen Geometrien der Austragsroste zurückzuführen, wie in Abbildung 66 dargestellt. Insgesamt lässt sich zusammenfassen, dass ein hoher Entschichtungsgrad nicht mit einem moderaten Energiebedarf zu kombinieren ist. Eine ausreichende Entschichtung ist nur mit einem unverhältnismäßig hohen Energieeinsatz erreichbar. Deswegen wurde im nächsten Prozessschritt ein Verfahren entwickelt, das einen gezielten Vorbehandlungsprozess integriert.

Partikel – HM – 2 mm Rostweite



Partikel – UM – 2 mm Rostweite

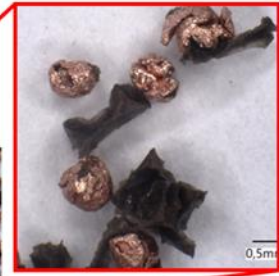
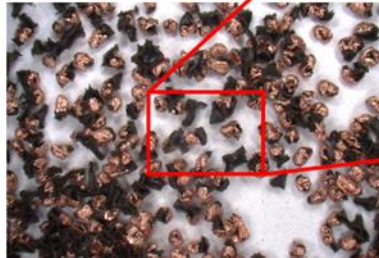


Abbildung 66: Geometrien der Roste und entstehenden Partikel

Vorversuche zur Auswahl der Entschichtung

Um die Entschichtung mit herkömmlichen Zerkleinerungsmaschinen zu verbessern, wurde der Ansatz verfolgt, eine zusätzliche Vorbehandlung in den bestehenden Prozess zu integrieren. Dadurch kann der eigentliche Zerkleinerungsablauf weitestgehend unverändert bleiben, während lediglich vorab ein gezielter Schritt zur Schwächung der Schichtverbunde erfolgt. Untersucht wurden zwei Methoden: die kryogene Vorbehandlung und die elektrohydraulische Zerkleinerung. In den vorliegenden Versuchen handelte es sich zunächst um Vorversuche, bei denen primär gefiltert werden sollte, welche der beiden Ansätze als ideale Vorbehandlung in Frage kommt. Beide Versuche wurden bei der gleichen Parameterkombination mit 20 PPI Schäumen durchgeführt.

Bei der kryogenen Vorbehandlung erfolgte zunächst eine Vorzerkleinerung der Probekörper, gefolgt von etwa zehn Zyklen aus Abkühlen in flüssigem Stickstoff (ca. 2 Minuten pro Zyklus) und Wiedererwärmen. Berechnungen zeigten, dass bereits etwa 0,5 Sekunden ausreichen, um die notwendige Abkühlung zu erzielen. Da die Berechnung allerdings lediglich an einem Einzelsteg durchgeführt wurden und es sich bei dem Schaum um ein komplexes gebildete aus zahlreichen Stegen handelt, wurde die entsprechend erhöht, um eine vollständige Durchkühlung zu gewährleisten. Die unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Kupfer ($16,5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) und PUR ($50\text{--}200 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, abhängig von Additiven) führen dabei zu mechanischen Spannungen, die die Schichten voneinander lösen. Abschließend wurde eine Feinzerkleinerung durchgeführt – einmal nach Wiedererwärmung und einmal im kryogenen Zustand.

Für die elektrohydraulische Zerkleinerung als Vorbehandlung begann der Prozess ebenfalls mit einer Vorzerkleinerung im Granulator bei 6 mm Rostweite. Anschließend wurden die Proben bei einem Elektrodenabstand von ca. 20 cm mit 15,8 kV und 100 Impulsen behandelt. Durch die im Wasserbad entstehenden Druckwellen infolge elektrischer Entladungen werden Materialverbunde mechanisch aufgebrochen und die Schichten voneinander getrennt.

Beide Methoden verfolgen das Ziel, die Adhäsion zwischen metallischen Beschichtungen und polymerem Grundmaterial gezielt zu reduzieren, um den nachfolgenden konventionellen Zerkleinerungsprozess deutlich effektiver zu gestalten.

In Abbildung 67 sind die Ergebnisse der beiden untersuchten Vorbehandlungsmethoden dargestellt. Die Versuche wurden jeweils unter identischen Parametereinstellungen durchgeführt: eine Umfangsgeschwindigkeit von ca. 50 m/s und ein Siebrast mit 2 mm Öffnungsweite. In Abbildung 17 links ist deutlich zu erkennen, dass nach der elektrohydraulischen Zerkleinerung (EHZ) die Entschichtungsgrade in beiden Maschinen signifikant gesteigert werden konnten. So erhöhte sich der Entschichtungsgrad in der Universalmühle (UM) von ursprünglich 22 % auf rund 35 %, was einer Verbesserung um über 10 Prozentpunkte entspricht. In der Hammermühle (HM) fiel der Effekt noch deutlicher aus: Hier konnte der Entschichtungsgrad von etwa 10 % auf 46 % gesteigert werden – also mehr als eine Verdreifachung.

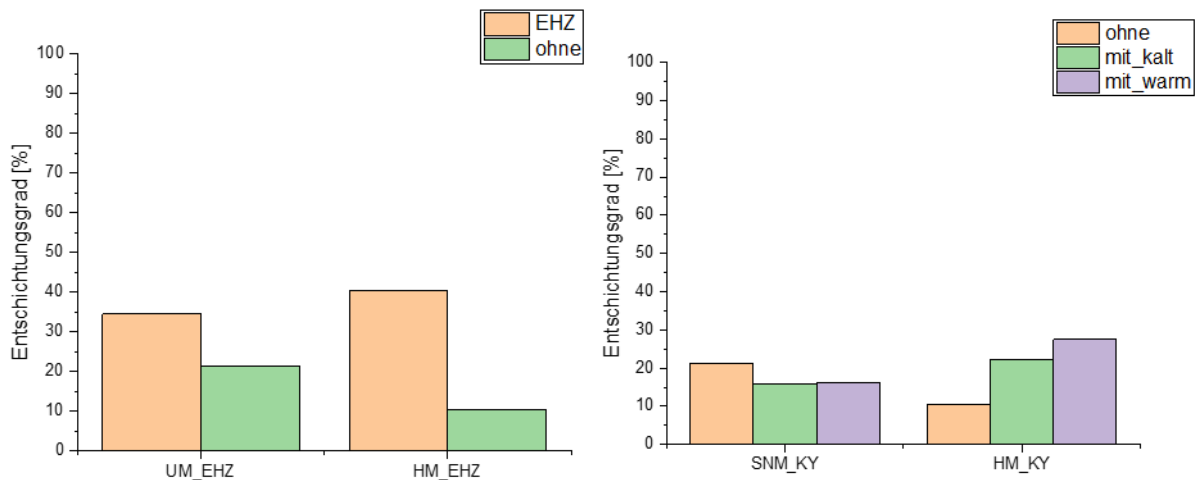


Abbildung 67: Ergebnisse der Vorversuche zur Auswahl der Vorbehandlungsmethode

In Abbildung 67 rechts sind die Ergebnisse der kryogenen Vorbehandlung dargestellt. Hierbei wurden zwei verschiedene Vorgehensweisen untersucht: Zum einen die Zerkleinerung direkt aus dem Kältebad heraus, zum anderen eine Zerkleinerung nach einer zusätzlichen 10-minütigen Erwärmung auf Raumtemperatur. Auffällig ist, dass bei der UM keinerlei Steigerung des Entschichtungsgrades festzustellen war – eine abschließende Erklärung hierfür konnte nicht gefunden werden. In der HM hingegen stieg der Entschichtungsgrad von 10 % auf etwa 30 %, wobei die besten Ergebnisse nach dem erneuten Erwärmen erzielt wurden. Dies lässt sich plausibel durch die unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten erklären: Kupfer dehnt sich bei Erwärmung deutlich schneller und stärker aus als PUR, sodass sich die metallische Schicht besser vom Substrat ablöst.

Aufgrund dieser Ergebnisse und der deutlich größeren Effektivität der EHZ-Methode wurde entschieden, für die weitere Betrachtung ausschließlich die elektrohydraulische Zerkleinerung einzusetzen.

Entwicklung einer geeigneten Sortierung für Al- und Cu-Legierungen (mechanisch und sensorbasiert)

Für die Sortierung der unterschiedlichen Strukturen stehen sowohl sensorbasierte als auch mechanische Systeme zur Verfügung. Mechanische Verfahren, die bereits im AP 3 im Rahmen der Benchmarking-Versuche untersucht und erprobt wurden, eignen sich ebenso für die Trennung von Kupfer, Aluminiumlegierungen und Verbundkombinationen wie metallisierten Schäumen. Aufgrund der hohen Dichteunterschiede zwischen Kupfer und Aluminium sowie der einstellbaren Dichte einer

Natriumpolywolframatlösung lassen sich beide Metalle effizient voneinander trennen. Bei gleicher Partikelform und -größe ist zudem eine Sortierung nach Sinkgeschwindigkeit in einem Windsichter möglich.

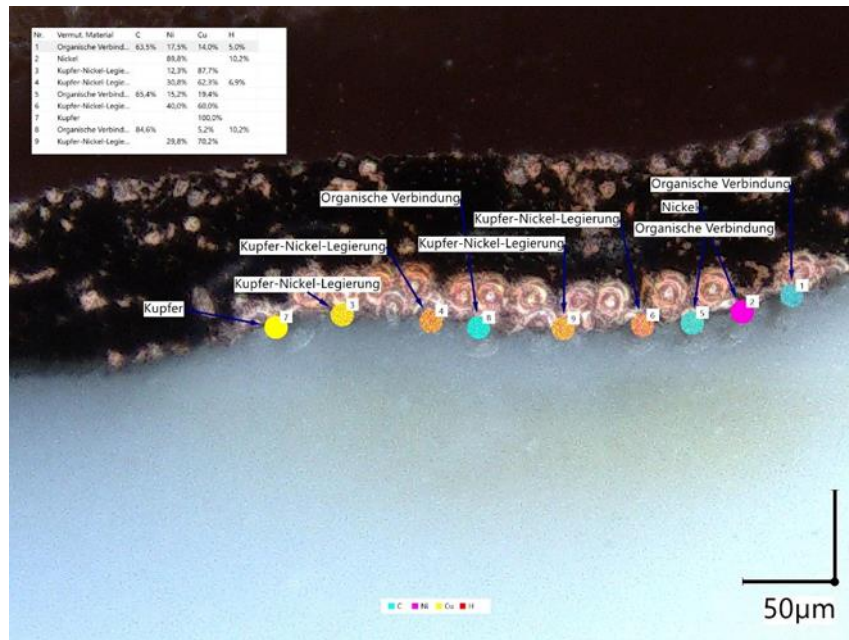


Abbildung 68: Ergebnisse der LIPS-Messungen

Darüber hinaus wurden, wie in Abbildung 68 dargestellt, auch sensorbasierte Systeme betrachtet. Dazu zählen einerseits ein in ein Mikroskop integriertes LIPS-System (Laserinduzierte Plasmaspektroskopie) sowie andererseits ein RFA-System (Röntgenfluoreszenzanalyse). Beide sind zunächst reine Detektionssysteme, die jedoch in Kombination mit einer nachgeschalteten Auswurfeinheit, beispielsweise auf Druckluftbasis, eine gezielte Trennung und sortenreine Separierung der Komponenten ermöglichen. Die Sortierung von Kupfer und Aluminiumlegierungen ist zudem bereits seit einiger Zeit Gegenstand intensiver Forschung; ihre grundsätzliche Eignung wird unter anderem in ⁹ und ¹⁰ nachgewiesen.

Demontage und Recyclebarkeit der Demonstratoren

Im Rahmen des Projekts wurden konstruktionstechnische Empfehlungen erarbeitet, die darauf abzielen, eine verbesserte Demontage- und Verwertbarkeit zu ermöglichen. Die vorliegenden Demonstratoren konnten jedoch – da es sich nur um Demonstratoren und nicht um vollständige Baugruppen handelte – nicht vollständig demontiert oder verwertet werden. Künftige Anwendungsbauteile sollen, soweit technisch umsetzbar, gemäß diesen Empfehlungen konstruiert und gefertigt werden, um deren Recyclingfähigkeit und Wiederverwertbarkeit deutlich zu verbessern.

⁹ Austin AI, Inc.; Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) Sensor Sorting Technology: A Significant Recycling Solution to Address the Looming Shortage of Copper, 11.08.2025; <https://recyclinginside.com/recycling-technology/separation-and-sorting-technology/laser-induced-breakdown-spectroscopy-libs-sensor-sorting-technology-a-significant-recycling-solution-to-address-the-looming-shortage-of-copper/>

¹⁰ European Commission; New industrial sorting systems based on laser spectroscopy (LIBS), magnetic induction, and machine vision for recycling of non-ferrous metals.; 2016; https://cordis.europa.eu/article/id/128556-new-industrial-sorting-systems-based-on-laser-spectroscopy-libs-magnetic-induction-and-machin?utm_source=chatgpt.com

2.6. Hauptarbeitspaket 4 Demonstratoren

Für die späteren experimentellen Untersuchungen und Evaluation werden in AP 4 die Demonstratoren entwickelt und gefertigt. Hierbei handelt es sich um Demonstratoren für die Anwendungsbereiche Automotive (AP 4.1), Bahntechnik (AP 4.2) und Aerospace (AP 4.3)

Im Rahmen unseres Forschungsprojekts wurden unterschiedliche Demonstrationen für jeden Bereich entworfen, um den spezifischen Herausforderungen und Möglichkeiten gerecht zu werden. An erster Stelle steht die Entwicklung eines Basis-Demonstrators, auch als "Vordemonstrator" bekannt. Das primäre Ziel dieser Initiative ist es, die Grundlagen der Messtechnik zu etablieren und die Simulation anhand dieses Demonstrators zu validieren.

2.6.1. 4.1 Automotive

Die Struktur der Vordemonstratoren ist bewusst geometrisch reduziert, um den Vernetzungs- und Rechenaufwand in der Simulation zu minimieren. Darüber hinaus wurden erste geometrische Modifikationen vorgenommen und analysiert, um die Effizienz und Genauigkeit weiter zu steigern.

Dieser Demonstrator wird unter dem Namen "D0x" definiert, wobei das "x" für Variationen innerhalb dieses Demonstratortyps steht. Diese Anpassungsmöglichkeiten erlauben eine flexible und gezielte Anpassung des Demonstrators abhängig von den spezifischen Anforderungen des untersuchten Bereichs.

Aufbauend auf den Erkenntnissen aus dem Basis-Demonstrator "D0x" wurde ein weiterer Test-Demonstrator entwickelt (D1x). Dieser Demonstrator zeichnet sich durch eine Geometrie und Proportionen aus, die denen eines realen Produkts näherkommen und somit ideal als finale Demonstrationsmodell dienen können.

Das Hauptziel der Entwicklung dieses Test-Demonstrators besteht darin, die Validierungs- und Optimierungsprozesse, die aus der Arbeit mit dem "D0x"-Demonstrator hervorgegangen sind, weiter zu verfeinern. Durch die Annäherung an echte Produktgeometrien bieten sich Möglichkeiten, spezifische Optimierungen zu identifizieren und die Simulationsergebnisse weiter zu verbessern.

Abschließend wurde ein Demonstrator aufgebaut und getestet, der auf einem realen Produkt basiert (D2x). Diese Entwicklung ermöglicht direkte Vergleiche mit bestehenden, marktreifen Produkten ("State of the Art"), um die Leistungsfähigkeit und Innovation des neuen Ansatzes zu evaluieren. In diesem finalen Demonstrator wurde eine signifikante Anpassung vorgenommen: Die herkömmlichen direkten Kühlstrukturen wurden durch Schaumstrukturen ersetzt. Diese Substitution zielt darauf ab, die Effizienz der Kühlung sowie andere funktionale Vorteile zu untersuchen, die durch die Verwendung von Schaumstrukturen entstehen können. Der Vergleich mit gängigen Produkten bietet wertvolle Einblicke in die Stärken und Schwächen der neuen Entwicklungen und ermöglicht es, datengestützte Entscheidungen zur weiteren Optimierung zu treffen.

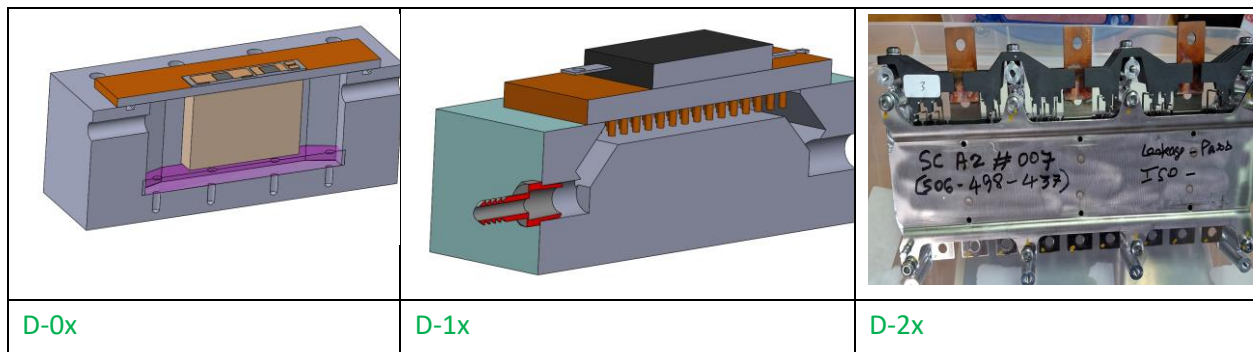


Tabelle 14: Skizzen bzw. Bild der Mobility Demonstratoren

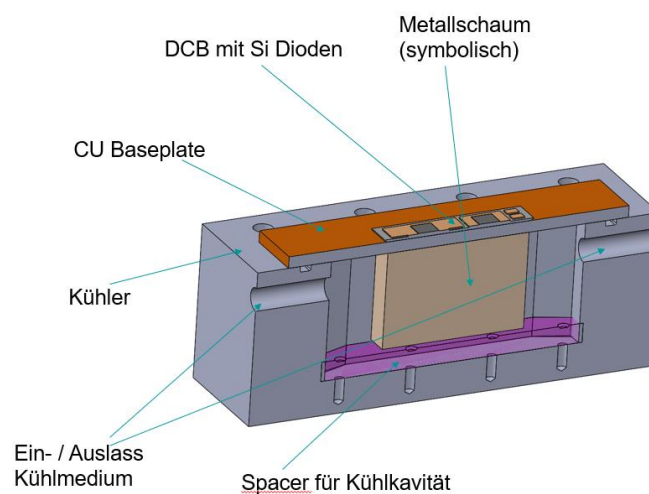


Abbildung 69: Detailbeschreibung D-0x

Abbildung bietet eine Übersicht über den schematischen Aufbau des Demonstrators D-0x. In grau zu sehen ist eine Kühlkavität, die aus einem gefertigten Aluminiumgehäuse besteht und sowohl über einen Einlass als auch einen Auslass verfügt. Diese Kavität enthält sogenannte "Spacer", die die Möglichkeit bieten, die Höhe der Kühlstrukturen flexibel zu variieren. Als Wärmequelle kommen Leistungshalbleiter zum Einsatz. Zwei Dioden wurden so konfiguriert, dass sie eine Halbbrücke bilden, durch die ein konstanter Strom fließt. Die Dioden sind auf einer Direct Copper Bonding (DCB)-Platte aufgelötet, was für eine effektive Wärmeregulierung sorgt. Darüber hinaus ist die DCB-Platte auf einer Kupferbodenplatte gelötet. Diese Kupferplatte dient als Wärmespreizer, der die Wärme effektiv verteilt. Gleichzeitig fungiert sie als Deckel für die Kühlkavität, indem sie die gesamte Struktur abschließt und mechanische Stabilität bietet. Die Schaumstrukturen wurden an die Bodenplatte gelötet. Weiterhin wurde Kupferschaum mittels galvanischer Prozesse formschlüssig an die Bodenplatte kontaktiert. Durch die Verwendung von Kupfergalvanik zur Kontaktierung von Kühlstrukturen auf einer Kupferbodenplatte wird eine materialschlüssige Verbindung geschaffen, die eine gute Wärmeleitfähigkeit und höhere mechanische Stabilität bietet (geringer bis kein CTE Mismatch). Dies erhöht die Zuverlässigkeit und Lebensdauer der Kühlstrukturen. Zudem entfällt der energieintensive Lötprozess, bei dem der gesamte Kühler, der viel

Wärme speichert, erhitzt werden muss. Dies führt zu einer effizienteren Fertigung und einer höheren Präzision im Design der Kühlstrukturen.

Der gesamte Demonstrator wurde intern bei der SAG entworfen und aufgebaut, einschließlich der Bestückung der DCB-Platte. Diese vollständige In-House-Entwicklung bot uns maximale Flexibilität, sowohl im Designprozess als auch bei der Definition der Rahmenbedingungen. Dadurch, dass alle Schritte von der Konzeption bis zur praktischen Umsetzung im Haus durchgeführt wurden, konnten spezifische Anforderungen und Anpassungen schnell und effizient in das Design integriert werden. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zeigt den Aufbau einer Halbbrücke in inklusive Bodenplatte und Kupferkühlstruktur.

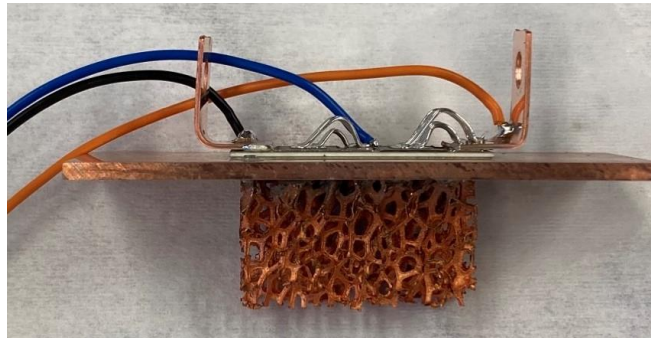


Abbildung 70: D-01 Demonstrator, DCB mit Kupfer-Kühlstruktur

Im späteren Verlauf des Projekts wurden gegossene Schaumstrukturen getestet, sowohl aus Kupfer als auch aus Aluminium, um Unterschiede in der thermischen Leistung zwischen den Materialien zu erfassen.

Zusätzlich konnten Messungen an einer speziellen Kupferstruktur durchgeführt werden. Diese Struktur wurde mittels eines Laser-Melting-Verfahrens direkt in 3D auf eine DCB-Platte aufgebracht. Dieses Herstellungsverfahren bot die Möglichkeit, die Kühlstruktur direkt zu integrieren, wodurch die Effizienz der Wärmeableitung und die mechanische Verbindung zwischen Kühlstruktur und Baseplate optimiert wurden. Tabelle zeigt eine Übersicht der D-0x Variationen

Tabelle 15: Übersicht D-0x Kühlstrukturen

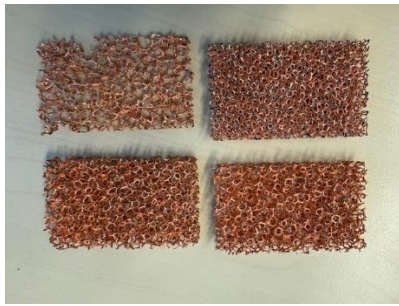


Abbildung 71: Geschäumte Kupferschäume

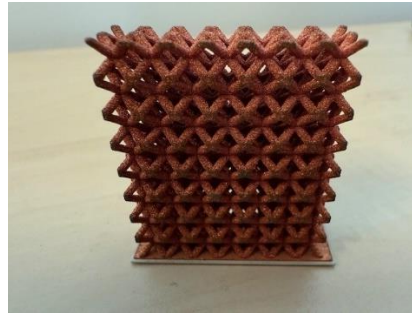


Abbildung 72: 3D erstellt Kühlstruktur aus Kupfer

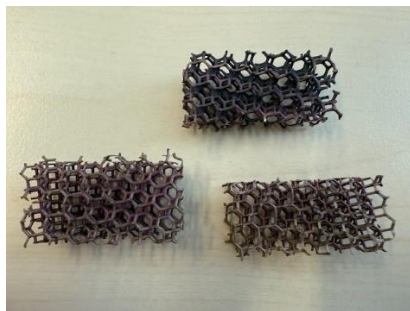


Abbildung 73: Mikrofeinguss Kupferschaum

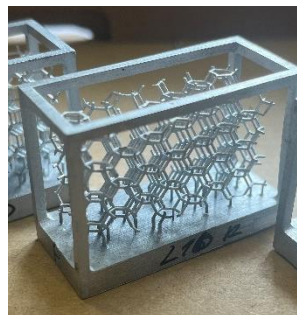


Abbildung 74: Mikrofeinguss Aluminiumschaum

Die Fertigung von Demonstratoren in AP 4.1 erfolgte auf Basis der vorangegangenen Arbeiten. Mit den Ergebnissen der Messungen aus den Vorversuchen werden Cu-Schäume auf den Benchmark. Mit dem Ziel durch Strömungsbeeinflussung den Wärmeübergang zu erhöhen, wurden kommerziell erhältliche Kupferschäume an den Anwendungsfall angepasst.

Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. zeigt eine Übersicht der D-0x Kühlstrukturen. Der detaillierte Aufbau des Leistungsmodul für D-1x wird im Arbeitspaket 5.3 Simulation beschrieben.




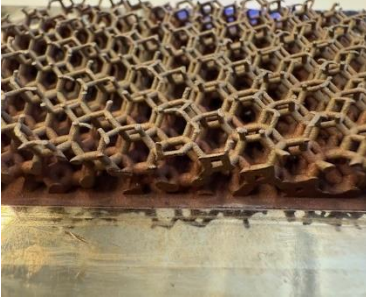



Bei der Variante D-1X des Demonstrators wurden verschiedene Kühlstrukturen eingehend untersucht. Die Kühlkavität wurde aus Aluminium gefertigt.



Abbildung 75: Leistungsmodul auf D-1x Kühlstruktur

Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. zeigt eine Übersicht der D-1x Kühlstrukturen

Tabelle 16: Übersicht D-1x Kühlstrukturen

 <p>Abbildung 76: D-10 Galvanisch kontaktierter Schaum</p>	 <p>Abbildung 77: D-11 Pin Fin Struktur</p>	 <p>Abbildung 78: D-12 Lamellenstruktur</p>
 <p>Abbildung 79: D-13 Gegossene Kupferstruktur ohne Pin Fins</p>	 <p>Abbildung 80: D-14 Gegossene Kupferstruktur mit Pin Fins</p>	 <p>Abbildung 81: D-15 Gegossene Kupferstruktur mit Pin Fins</p>
 <p>Abbildung 82: D-16-18 Gegossene Aluminiumstrukturen mit gleicher Geometrie wie die Kupfer Varianten</p>		

Lamellen und Pin Fin Kühler dienen als Referenzstrukturen. Mit den gegossenen Modellen wurden die Ideen aus AP 2 Konzepterstellung zum Thema „thermische Autobahn“ getestet. Aufbauend auf den Erkenntnissen der ersten Versuchsreihe wurden weitere Messungen mit optimierten Kühlstrukturen

durchgeführt. Ziel war es, die Wärmeeinkopplung sowie den Gesamtwärmetransport gezielt zu verbessern. Alle optimierten Strukturen entstanden im Feingussverfahren.

Bei Demonstrator D-13 wurde die Basis der Schaumstruktur im Bereich der Anbindung zur Baseplate massiver ausgeführt als die Spitzen. Damit konnte die Effizienz der Wärmeanbindung an die Grundplatte deutlich gesteigert und der Wärmetransport zum Kühlmedium optimiert werden.

In den Demonstratoren D-14 und D-15 wurden zusätzlich Pin-Fin-Elemente direkt in die Schaumstruktur eingebunden, um der Wärme gezielte Transportpfade („thermische Autobahnen“) zu bieten.

Für D-15 wurde zudem die Dichte der Schaumstruktur weiter erhöht, mit dem Ziel, die Wärmeleitung nochmals zu verbessern.

Die Demonstratoren D-16 bis D-18 folgen einem vergleichbaren Designansatz, sind jedoch vollständig aus Aluminium gefertigt, um das Materialverhalten im Vergleich zu Kupfer zu untersuchen.

Diese Anpassungen und Weiterentwicklungen dienen der stetigen Optimierung des Wärmeübergangs und stellen wichtige Schritte in der Entwicklung leistungsfähiger und anwendungsspezifisch angepasster Kühlstrukturen dar.

Der finale Demonstrator basiert auf einem realen Leistungsmodul von Valeo. Dieses Modul wurde modifiziert, um sowohl als Benchmark als auch als Grundlage für strukturelle Anpassungen zu dienen. In der neuen Variante wurde die bestehende Pin-Fin-Struktur entfernt und durch eine Schaumstruktur ersetzt. Die Schaumstruktur wurde mittels Kupfergalvanisierung elektrisch kontaktiert, was eine Wärmeleitung und mechanische Stabilität sicherstellen. Danach wurde im zweiten Durchlauf eine zusätzliche Nickelschicht aufgebracht. Die Nickelbeschichtung hat zwei wesentliche Funktionen: Zum

einen dient sie der Aufdickung der Verbindung, zum anderen wirkt sie als Passivierung gegen das Kühlmedium.



Abbildung 83: Finaler Demonstrator Mobility



Abbildung 84: Kühlstruktur aus Kupferschaum für finalen Mobility Demonstrator



Abbildung 85: Finale Kühlstruktur; Kupferschaum auf Kupfer baseplate galvanisiert und vernickelt



Abbildung

86:

Detailaufnahme

Kupferschaum

vernickelt

2.6.2. AP 4.2 Bahntechnik

Für den Anwendungsfall Mobility wurden Kühlkörper der Firma Austerlitz als Benchmark gewählt .

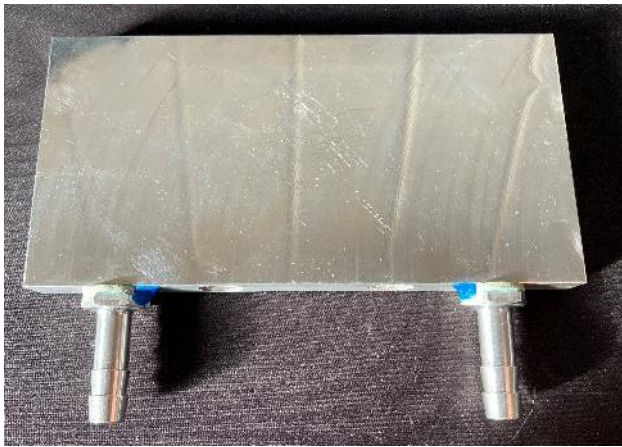


Abbildung 87: Benchmarkprodukte, links: Kühlkanäle innenliegend, rechts: Kühlkanäle durch Umlenkungen außen verbunden

Mit der Zielstellung der Gewichtsreduktion bei gleichbleibender Leistung wurden verschiedene Konzepte mit geschlossenem zellulärem Aluminiumschaum entwickelt, die im Folgenden kurz vorgestellt werden.

<p>Variante 1 Inkrementelles Umformen (zwei Halb-Schalen) inkrementelles Umformen ohne Rohre (\varnothing_i 10,5mm)</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 4 Kanäle ○ Rohrbiegung innen ○ Einpressen der Anschlüsse ○ Benchmark WK 80.11/160-80 	
--	--

Variante 1 orientiert sich an einem Kühlkörper mit innenliegenden Kühlkanal ohne zusätzliche Verrohrung. Um die Kühlstruktur in die Schaumplatte einzubringen, stehen verschiedene Fertigungsverfahren zur Verfügung. Eine Möglichkeit wäre, analog zur Fertigung bei Austerlitz in den Schaumblock Bohrungen zu setzen. Allerdings scheint das im Fraunhofer IWU erforschte Verfahren des inkrementellen Umformens vielversprechender. Da es sich beim Inkrementellen Umformen nicht um eine spanende, sondern umformende Bearbeitung handelt, wird das Material im Bereich der Kühlkanäle nur verdichtet und nicht abgetragen. Das Projektteam erhofft sich dadurch mögliche Undichtigkeit durch die Poren zu reduzieren. Zudem bleibt aber eine geringe Rauigkeit bestehen, die Turbulenzen in der Strömung des Kühlmediums begünstigt und somit den Wärmeübergang erhöht

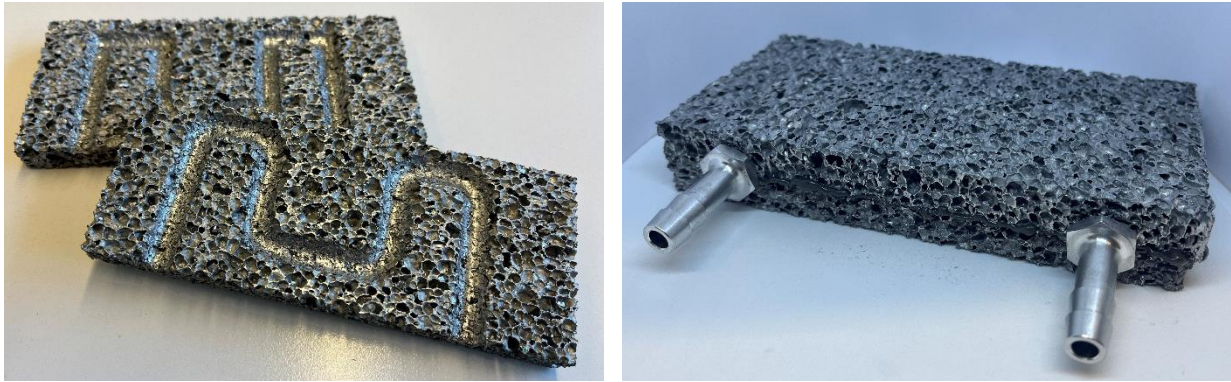


Abbildung 88: (links) inkrementell umgeformte Kühlkanäle; (rechts) geklebte Kühlplatte

Wie bereits zu Beginn befürchtet, konnte bei Platten mit analoger Dicke zum Benchmark keine Dichtheit erreicht werden. Leider wurden bereits im unmontierten Zustand auch bei einigen Platten größerer Dicke durch Drucklufttests **Leckage** detektiert.

Bei der Einleitung des Kühlmediums wurde auch bei der vorher als dicht getesteten Struktur klar, dass auch hier das Fluid in die Poren eindringt und über die gesamte Fläche austritt. Dies lässt sich mit dem Fertigungsprozess erklären. Aufgrund von Spannungen beim Abkühlen der aufgeschäumten Schmelzen entstehen kleine Mikrorisse in den Zellwänden. Aufgrund der Kapillarwirkung kann das Kühlmedium durch diese durch und aus der Struktur diffundieren.

Ein direktes Einbringen der Kanäle in die Schaumstruktur erweist sich aus diesem Grund als unpraktikabel.

Eine mögliche Alternative stellt die Verwendung von Schaumsandwiches. Da in diesem Fall aber der erhoffte Vorteil einer zusätzlichen Turbulenz durch die poröse Struktur nicht mehr gegeben ist und das Fügen der umgeformten Platten eine weitere Herausforderung darstellt, wurde dieser Ansatz im Projekt nicht mehr umgesetzt.

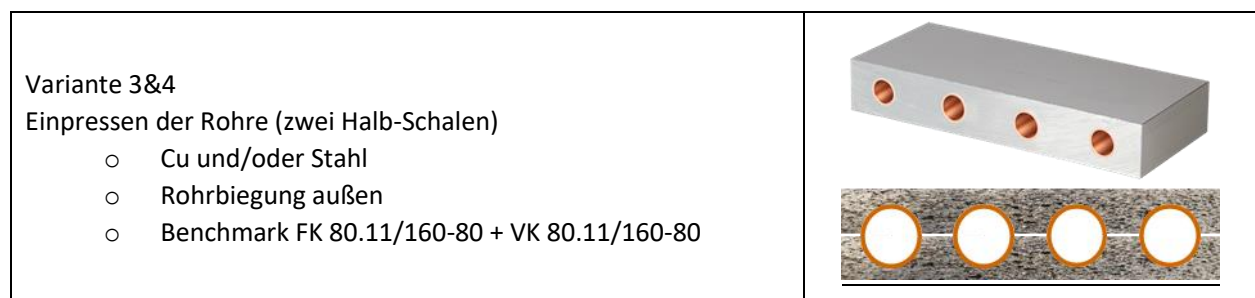


Abbildung 89: Einpressrohre

Nachdem die vorangegangenen Versuche, leider nicht zum gewünschten Erfolg geführt haben, wurde die nächste Varianten des Technologiedemonstrators umgesetzt. Um dem Problem der Leckage entgegenzuwirken, wurde auf eine Verrohrung zurückgegriffen. Analog zum Referenzprodukt werden sowohl Stahl als auch Kupferrohre verwendet und die Strömungsumlenkung erfolgt im Gegensatz zu den ersten Versuchen außerhalb der Kühlplatte mittels zugekaufter Rohrbiegungen, vgl. Abbildung 90.

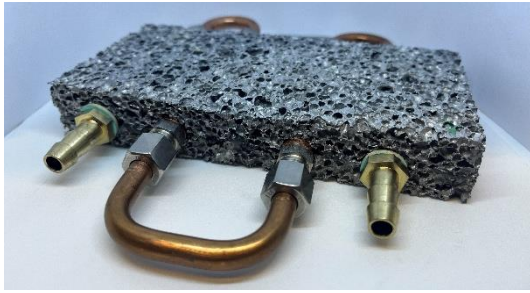


Abbildung 90: Kühlplatte mit Cu- (links) bzw. Edelstahlverrohrung (rechts)

Tabelle 17: Masse der unterschiedlichen Proben

Probe	Gewicht in g	Gesamtgewicht Schaum		Gesamtgewicht im Verbund	Gesamtgewicht geklebt	
1	33	82	→	418,2	442,7	1&8 Edelstahl
2	33,9	81,7	→	413	446,9	2&7 Cu
3	34	81,5	→	defekt		
4	34,3	81,7	→	defekt		
5	47,4					
6	47,5					
7	47,8					
8	49					
9	54	108,2		125,6	154	Benchmark
10	54,2					
11	47,9	96,5		114	138,3	Benchmark verrundet
12	48,6					

Die poröse Struktur des Schaumkühlkörpers erschwert die mechanische und thermische Anbindung der Leistungselektronik. Um dieser Problematik zu entgehen, wurden die Demonstratoren D-22 nochmals mit angeschäumten Deckblechen (vgl. Abbildung 91) gefertigt.

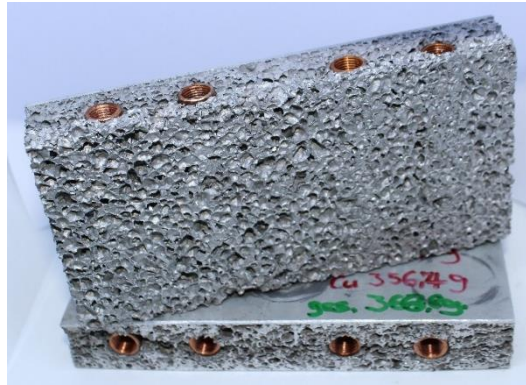


Abbildung 91: Kühlplatten mit Cu-Verrohrung und stoffschlüssig angebundenen Deckblechen

Variante 5&6 Einschäumen

- Schaumform mit eingelegten Stahl-Rohren
- VK 80.11/160-80
- Ggf. auch mit Cu



Um einen idealen Wärmeübergang von der Schaumplatte über die Rohre ins Kühlmedium zu gewährleisten, erfolgte abschließend noch die Untersuchung der direkten Einbringung der Rohre im Schäumprozess. Da sich das im Schäumprozess flüssige Aluminium mit der Verrohrung stoffschlüssig verbindet, werden auf diese Weise Wärmeübergangsverluste deutlich reduziert.

Für die Probenherstellung wurde ein Rahmen (Abbildung 92) gefertigt, der für eine Probenentnahme nach dem Versuch teilbar ausgelegt ist. Auflage erfolgte auf Grafitplatten, da diese einen gleichmäßigen Wärmeeintrag für den Schäumprozess ermöglichen. Um den Materialaustritt an den Rändern so gering und die Materialdichte damit so planbar wie möglich zu halten, erfolgte die Abdichtung mit Keramikpapier.



Abbildung 92: Stahlrahmen für Schäumversuche



Abbildung 93: Schäumergebnisse

In Abbildung 93 sind die Schäumergebnisse dargestellt. Wie sich gezeigt hat, treten zwei Probleme bei der Probengeometrie auf.

1. Im Bereich der Rohre schäumt das Material nicht ausreichend auf. Wenn man den Schäumprozess verlängert, um diese Bereiche aufzuschäumen, beginnen die Randbereiche bereits wieder einzufallen.

Das ungleichmäßige Schäumergebnis lässt sich durch einen Wärmeverlust im Prozess an den Rohren erklären und konnte bis Projektende nicht behoben werden.

2. Die Rohre reagieren im Prozess, was zu unregelmäßigen Undichtigkeiten führt. Dieser Leckage könnte durch eine größere Wanddicke entgegengewirkt werden. Da sich dadurch aber das erste Problem vergrößern würde, stellt dies für diesen Versuchsaufbau keine Lösung dar.

Abschließend konnte im Projektrahmen dieser Ansatz leider nicht erfolgreich abgeschlossen werden. Da es bereits mit anderen Materialkombinationen und Geometrien Erfolge gab. Ist dies aber nur auf den gewählte Probengeometrie zurückzuführen und wird weiter angepasst und erforscht.

2.6.3. AP 4.3 Aerospace

Im Bereich Aerospace kam es im Vergleich zum Antrag zu einem Partnerwechsel. Somit ergeben sich auch für die Zielstellung neue Rahmenbedingungen. Im zu betrachtenden Fall handelt es sich um eine Transportdrohne des jungen Unternehmens EFT Mobility.

Als Ausgangsgeometrie für den Demonstrator diente eine Anordnung von Rundzellen beispielhaft dargestellt in Abbildung .

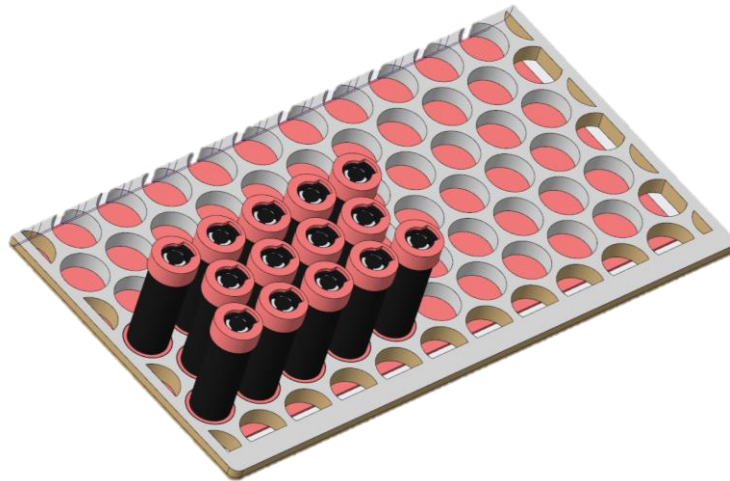


Abbildung 94: Ausschnitt einer Zellanordnung eines EFT Batteriestacks

Die Projektpartner haben sich darauf geeinigt für den Technologiedemonstrator nur eine begrenzte Anzahl an Zellen zu betrachten. Nach einer Literaturrecherche zu Thermal Runaway Test mit Rundzellen hat sich die in 95 dargestellte Anordnung ergeben.

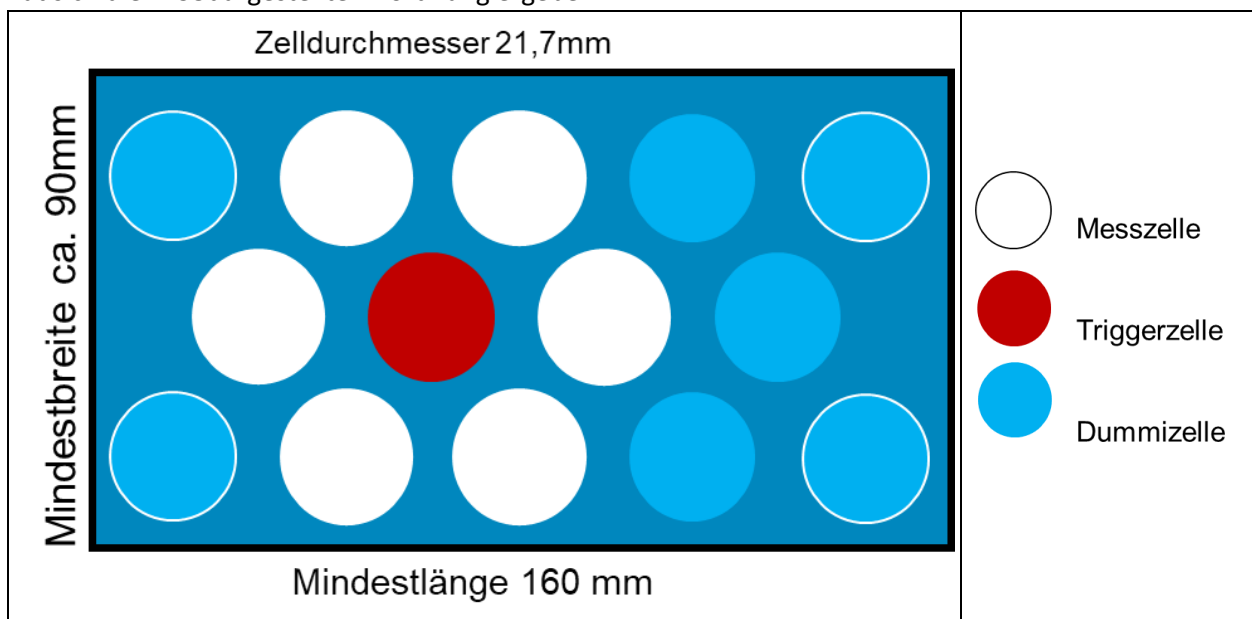


Abbildung 95: Zellanordnung des Demonstratoraufbaus

Für den Einsatz metallischer Schaumstrukturen in dieser Anordnung wurden verschiedene Konzepte diskutiert und zum Teil umgesetzt. In Abhängigkeit der Anforderungen kann sowohl der Einsatz von offenzellularen als auch von geschlossenzellularen Schäumen sinnvoll sein.

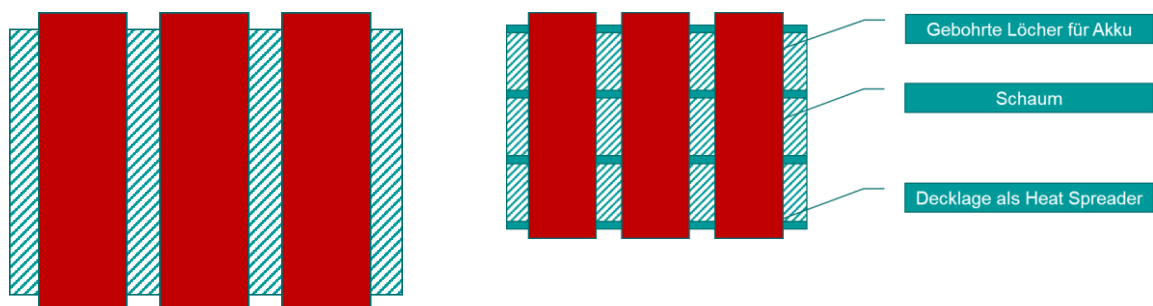


Abbildung 96: Schematische Darstellung der Aearospace Demonstratorkonzepte

Im einfachsten Fall Abbildung werden in einen noch zu definierenden Metallschaumkörper Bohrungen für die Batteriedummsis eingebracht.

Mit Blick auf den Havariefall wurde die Geometrie entsprechend ausgelegt. Eine überhitzende Batteriezelle tendiert i.d.R. dazu sich auszudehnen. Aus diesem Grund wurden die Abstände zwischen Schaumstruktur und Zelle so gewählt, dass im Normalbetrieb kein Kontakt der Zellen mit der umgebenden Schaumstruktur stattfindet. Der Spalt zwischen Zelle und Struktur ist aber entsprechend gering, dass bei Ausdehnung ein Kontakt erfolgt und somit Wärme über die Struktur abgeleitet werden kann. Da die Nachbarzellen nicht mit der Struktur in Berührung stehen, wird an diese keine Wärme übertragen und die Thermal Propagation verzögert oder gar verhindert.

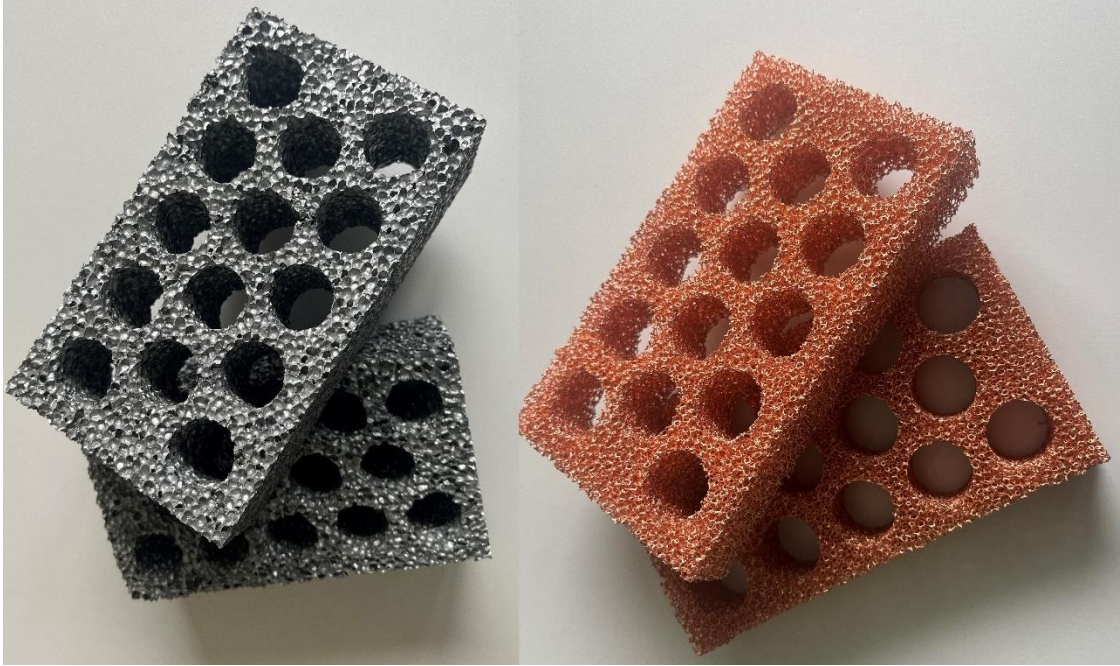


Abbildung 97: geschlossenzellularer Al- (links) bzw. offenzellularer Cu-Demonstrator

Da für eine thermische Auslegung Erfahrungswerte fehlten erfolgte die Demonstrator Produktion sowohl aus geschlossen zellularem Aluminiumschaum, der eine relativ hohe thermisch Kapazität aufweist. Als auch aus einem offenzellularen Kupferschaum, der eine geringe thermische Masse mit sich bringt, aber bei welchem Kupfer eine höhere Wärmeleitfähigkeit und somit ggf. eine schnelle Ableitung der Wärme aufweist. (Abbildung)

Abschließend und als Ausblick für eine weitere Zusammenarbeit wurde ein Konzept für den Aufbau eines kompletten Batteriemoduls mit verschiedenen Schäumen erarbeitet. (Abbildung)

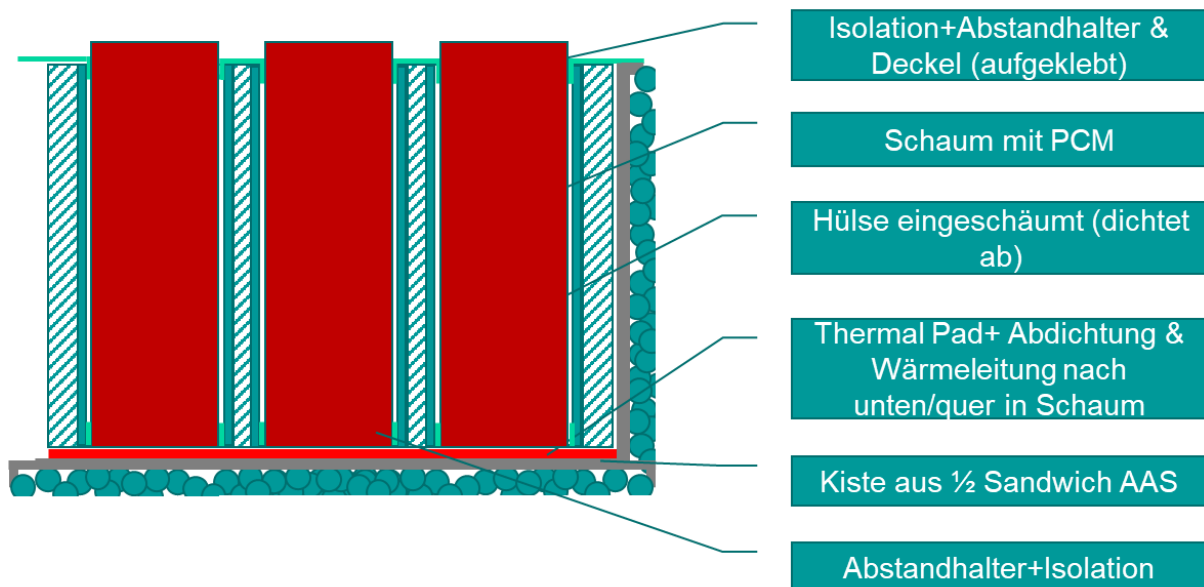


Abbildung 98: schematischer Aufbau eines Batteriekastens aus Schaumstrukturen

Mit dem Ziel eine passive Kühlung zu ermöglichen und die Crashesicherheit ohne zusätzliches Gewicht zu erhöhen wurde im gezeigten Schema der Einsatz von geschlossen zellularen Schaumsandwiches erarbeitet.

Als Außenwand dienen halbierte Sandwiches. Die offene Schaumstruktur erhöht die Oberfläche. Außerdem sollte die Rauheit der porösen Oberfläche zusätzliche Verwirbelungen im Flugbetrieb erzeugen. Diese beiden Effekte können den Wärmeaustausch zwischen Batteriepack und Umgebung erhöhen und somit zu einer passiven Kühlung beitragen. Zudem fungiert die Schaumstruktur als Crashabsorber.

Eine konkrete Auslegung war im Rahmen des Projektes zwar nicht (mehr) möglich, könnte aber ein interessanterer Ansatz für weitergehende Untersuchungen darstellen.

2.7. Hauptarbeitspaket 5 Test, Simulation und Evaluation

Die Evaluation der entwickelten neuartigen Kühlkörper erfolgt in AP 5 in umfangreichen experimentellen Tests und mittels vergleichender Simulationsrechnungen.

AP 5.1 Testplan

Für die umfassende Prüfung des Demonstrators wurden spezifische Testpläne entwickelt, insbesondere für die thermische Charakterisierung, bekannt als Zth (Transiente Thermische Impedanz). Die Rahmenbedingungen für diese Tests orientierten sich an den Vorgaben aus dem Lastenheft von Arbeitspaket 1. Zusätzlich zu den thermischen Tests wurde die mechanische Stabilität der Verbindung zwischen der Schaumstruktur und der Basisplatte untersucht. Die Testobjekte wurden in Klimakammern thermischen Wechselbeanspruchungen unterzogen, ergänzt durch Lastzyklustests, um die Belastbarkeit und Zuverlässigkeit der Verbindungen zu evaluieren.

Die Haupttests zur thermischen Charakterisierung umfassten verschiedene geometrische Varianten sowie

Randbedingungen wie Laststrom (als Wärmeeintrag), Volumenstrom des Kühlmediums und Auf- und Abkühlzeiten. Hierbei wurden entscheidende Messgrößen wie der thermische Verlustleistung, der Volumenstrom und der Druckabfall über den Kühler erfasst. Die Datenerfassung erfolgte mithilfe eines PXI-Systems von National Instruments. Um die Chiptemperaturen hochauflösend zu bestimmen, wurde die Spannung über den Halbleiter kontinuierlich gemessen. Diese temperaturempfindliche Messgröße ist ideal für präzise und schnelle Temperaturmessungen geeignet. Eine notwendige vorherige Kalibrierung des Systems erfolgte durch Erhitzung mittels des Kühlmediums im Messstand selbst. Aus den Aufheiz- und Abkühlkurven des Kühlers werden die transienten, thermischen Messkurven, die sogenannten Zth-Kurven, ermittelt. Neben der Bestimmung der maximalen Temperatur ermöglichen diese Messkurven Rückschlüsse auf das thermische Netzwerk des Demonstrators. Sie geben Aufschluss über die Wärmeleitfähigkeit und die Effizienz der gesamten Kühlstruktur.

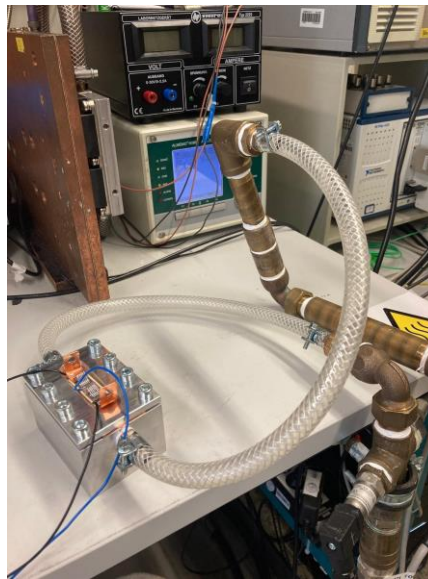


Abbildung 99: Demonstrator im Zth-Messtand

Aufbauend auf den Ergebnissen der vorangegangenen Vorversuche des IART wurde der Versuchsplan für die Entwicklung der finalen Recyclingroute gezielt spezifiziert. Für die Hammermühle wurde dabei ausschließlich die als geeignet identifizierte Parameterkombination aus 50 m/s Umfangsgeschwindigkeit und 2 mm Rostweite berücksichtigt. In allen weiteren Fällen kam die elektrohydraulische Zerkleinerung (EHZ) als Vorbehandlung zum Einsatz, da sie in den Vorversuchen die besten Entschichtungsergebnisse lieferte. Die Versuche mit der Universalmühle (UM) bezogen sich auf die drei besten Parameterkombinationen: 82 m/s und 0,5 mm Rostweite, 50 m/s und 1 mm Rostweite sowie 50 m/s und 0,5 mm Rostweite. Auf dieser Basis wurde der finale Versuchsplan erstellt und der vollständige Prozess unter praxisnahen Bedingungen (Alle Versuche wurden auf Laboranlagen durchgeführt, jedoch stehen von sämtlichen eingesetzten Maschinentypen auch Industriegrößen zur Verfügung. Dadurch können die erzielten Ergebnisse ohne grundlegende Anpassungen auf größere Maßstäbe übertragen werden. Die ermittelten Entschichtungs- und Prozessparameter lassen sich somit nach oben skalieren, sodass eine direkte Praxisübertragbarkeit gewährleistet ist). getestet, wobei gleichzeitig alle relevanten Prozess- und Energiedaten erfasst wurden und iPoint Systems für die Ökobilanz zur Verfügung gestellt. Der Versuchsbetrieb erfolgte dabei im Batchbetrieb, während in einer industriellen Umsetzung durch

geeignete Fördertechnik eine Kombination der Systeme zu einem vollautomatisierten Prozess realisierbar wäre.

2.7.1. AP 5.3 Simulation

TUD-ILK

Innerhalb des Arbeitspakets soll die Simulationsstrategie auf den realitätsnahen Demonstrator (D-01) übertragen werden und mit den von SAG experimentell erhobenen Daten verglichen werden.

Im Zuge dessen wurden auch für den Demonstrator D-1X unterschiedliche Geometrien erstellt (siehe Abbildung 100). Dabei sind Schäume aus Kelvinezellen mit unterschiedlichen Stegbreiten und mit zusätzlichen Pin-Geometrien erstellt worden. Bei einem Teil der Modelle war die Stegbreiten graduiert, sodass sie immer schmaler werden je weiter weg die Struktur von der Hitzequelle ist. Ziel war es eine optimale Geometrie zu finden, welche besonders gut die Energie vom Kühlkörper ableitet und auf die Kühlflüssigkeit überträgt.

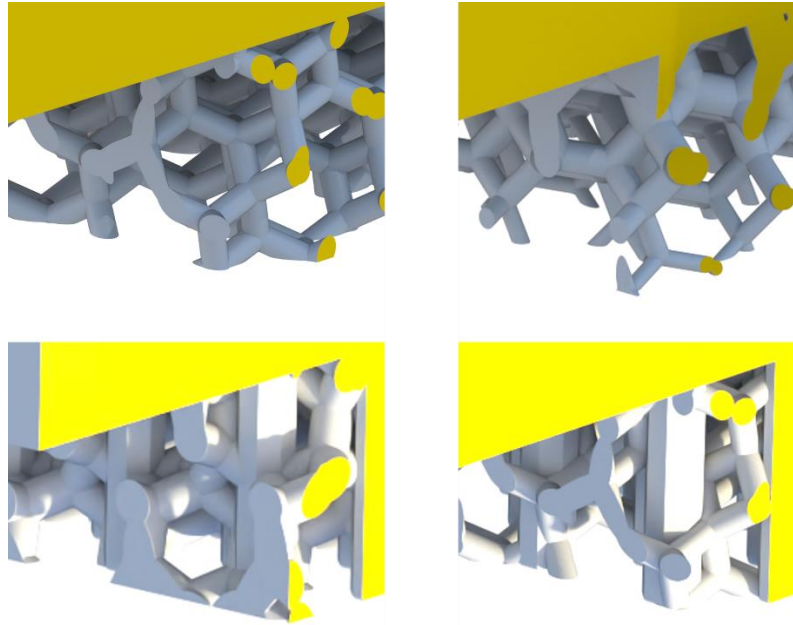


Abbildung 100: angepasste Stegbreiten der Kühlkörpergeometrien des D-1X; oben links: 0.2 mm breite Stege; oben rechts: linear abnehmend von 0.2 nach 0.1 mm; unten links: 0.25 mm mit Pin-Strukturen; unten rechts: 0.1 mm mit Pin-Strukturen

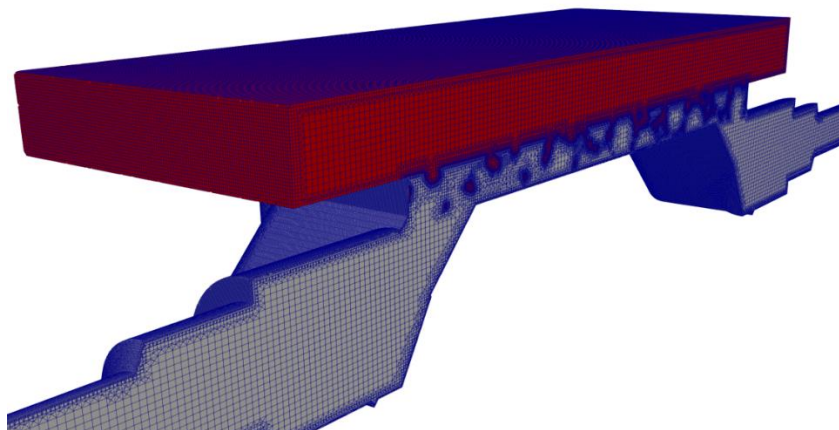


Abbildung 101: Querschnitt eines Simulationsaufbaus eines D-1X mit Kelvinstruktur

Für die hochauflösenden Simulationen von geometrisch komplexen Strukturen wie Schäumen wurde für die Modellerstellung geeignete Netzgenerierungstools untersucht. Dabei wurde während des Projekts, das in OpenFOAM integrierte SnappyHexMesh betrachtet. Beispielhaft ist ein Simulationsnetze eines Kühlkörpers mit einer Schaumstruktur aus Kelvinezellen in Abbildung 101 zusehen.

Die in AP2.6 aufgezeigte Simulationsstrategie wies bei der Umsetzung auf geometrisch große und gleichzeitig detaillierte Strukturen (siehe Abbildung 100) bereits bei der Modellaufbereitung hohe Herausforderungen auf. Die Aufbereitung der Modelle muss manuell durchgeführt werden und bei nicht korrekter Durchführung ist eine Vernetzung der Struktur nicht möglich bzw. wird schlecht ausgeführt. Letzteres kann zu Konvergenzproblemen bei der anschließenden Simulation führen. Da Konvergenzprobleme vielseitige Ursachen haben, ist eine Fehlerfindung schwierig und aufwendig. Die Vernetzung

und die anschließende Analyse müssen aufgrund der Größe der Dateien bereits auf dem HPC durchgeführt werden. Hier kam es auf Grund der mehrmonatigen Erneuerung eines Großteils der Großrechenanlage zu Verzögerungen, da in diesem Zeitraum nur lokal auf weniger performanten PC-Systemen von TUD-ILK gearbeitet werden konnte.

Um der Kapazitätsproblematik entgegenzuwirken wurde die Simulationsstrategie hin zum in Abschnitt 2.4 beschriebenen *Kontinuumansatz* gewechselt.

Beim Kontinuumansatz werden komplexe Geometrien als simple Blöcke mit homogenisierten (hier im Sinne von gemittelten) Materialeigenschaften modelliert, sodass eine detaillierte Darstellung der Mikrostrukturen entfällt. Vorteil der Strategie ist es, dass die Simulationsmodelle deutlich kleiner sind und daher lokal gerechnet werden können. In Abbildung 102 ist eine solche Einteilung abgebildet. Die Homogenisierung erfolgt im Bereich des Schaums. In diesem Bereich werden Eigenschaften des Fluids, sowie Eigenschaften des Schaums berücksichtigt. Den Bereichen in denen nur das Fluid existiert werden die normalen Materialkennwerte zugeordnet. Die Bestimmung der benötigten Materialkennwerte geschieht mittels Darcy-Forchheimer-Gleichung (1) und Vorsimulationen.¹¹ Diese werden benutzt um unter anderem den Druckabfall über den homogenisierten Bereich vorherzusagen.

$$\nabla p = -\frac{\mu}{K} v + \frac{c_f * \rho_f}{\sqrt{K}} |v|v \quad (1)$$



Abbildung 102: Rohrproben Simulation zur Überprüfung der Methodik

Innerhalb des Ansatzes werden abwechselnd zwei Phasen simuliert. Die dynamische Phase, in welcher die Druck- und Geschwindigkeitsverteilung berechnet werden und die statische Phase, in welcher die Temperaturverteilung berechnet wird. Zwischen diesen beiden Phasen werden jeweils die veränderten Werte gemapped. Mit dem Umstieg auf den neuen Ansatz konnten die Grundlagen geschaffen werden, auf denen eine Analyse des Problems zukünftig möglich ist. Eine erste Einschätzung des Reifegrades des Ansatzes verortet diesen für die hier betrachteten FTI-Berechnungen noch im Bereich der Grundlagenforschung. Bei TUD-ILK ist daher geplant, diesen Ansatz in zukünftigen Forschungsarbeiten weiter zu untersuchen.

¹¹ A. Kneer; Numerische Untersuchung des Wärmeübertragungsverhaltens in unterschiedlichen porösen Medien, KIT Scientific Publishing; 2014; DOI: 10.5445/KSP/1000042451

Fraunhofer ENAS

Die Aufgaben für ENAS wurden in diesem Arbeitspaket angepasst. Ein wesentlicher Teil der geplanten Aufgaben wurde bereits in Arbeitspaket 2.6 abgehandelt. Dies betrifft insbesondere die Aufstellung einer virtuellen Designmethode zur Optimierung der unterschiedlichen im Projekt betrachteten Kühlkonzepte in Form eines Surrogats (numerisches Ersatzmodell). Weiterhin wurde die Verzahnung mit Arbeiten der Projektpartner umgesetzt. Zusammen mit IPoint wurde eine Schnittstelle zur Einbeziehung der Ökobilanz von Leistungselektronik-Modulen während der Designphase exemplarisch realisiert. Des Weiteren wurde eine Schnittstelle elektrisch-thermischen Simulationen des ENAS zu den gekoppelten Fluid-Simulationen der TUD-ILK geschaffen, welche eine potentielle Interaktion beider Simulationstypen zur Bewertung der thermischen Performance unterschiedlicher Kühlkonzepte ermöglicht. In Zusammenarbeit mit dem Projektpartner SAG konnte die Methodik der elektrisch-thermischen gekoppelten Simulation des ENAS durch intensiven Abgleich mit experimentellen Ergebnissen deutlich verfeinert und damit vertrauenswürdig gemacht werden.

Die Ursache für die Verlagerung der Arbeiten liegt in der guten Eignung Verfügbarkeit der Varianten des Konzeptdemonstrators D-0x, an dessen Beispiel die in AP 2.6 aufgestellt Bewertungsmethodik komplett demonstriert werden konnte.

Verzichtet hingegen wurden auf die thermochemischen Simulationen und deren Bewertung der Leistungsmodule. Dies liegt einerseits in der geänderten Zusammensetzung des Projektkonsortiums während der Laufzeit durch das Ausscheiden der Projektpartner Rolls Royce und Electric Flytrain. Dadurch verschob sich der Fokus der Use Cases deutlich zur Bewertung der thermischen Performance von Powermodulen. Andererseits waren die dann noch zur Verfügung stehen Konzeptdemonstratoren zur Bewertung der thermomechanischen Zuverlässigkeit wenig geeignet, da sie ausschließlich zur Bewertung der Thermik konzipiert waren. Diese Anpassungen wurden in Abstimmung mit den Projektpartnern vorgenommen. Die dadurch frei gewordenen Ressourcen wurden bei ENAS in die Perfektionierung der in AP 2.6 entwickelten Simulationsmethodik und da vor allem in die Methodik zur Aufstellung von numerischen Ersatzmodellen (Surrogates) investiert. Diese repräsentieren den wissenschaftlich-fachlichen Ertrag von ENAS aus dem Projekt und konnten während der Projektlaufzeit bereits verwertet werden.

Im AP5.3 wurde die Anwendung der in AP2.6 entwickelt Methodik demonstriert. Da es sich beim in diesem AP genutzten Konzeptdemonstrator D-1x um ein kommerziell erhältliches Powermodul handelt, wurde der Fokus der Arbeiten auf die Simulation und Bewertung der thermischen Performance des Moduls unter verschiedenen Kühlbedingungen gelegt. Ziel der Untersuchungen war die Bewertung der im Projekt entwickelten Kühlstrukturen und deren Anbindung an das Modul. Um die Vergleichbarkeit der Eigenschaften der Kühlervarianten zu gewährleisten, sind die thermischen Lasten und Randbedingungen für alle Versuche definiert gleich zu halten. Dies war ein wesentlicher Grund zum Einsatz eines kommerziell verfügbaren Leistungsmoduls.

Das in diesem AP genutzte Leistungsmodul ist ein gemoldetes Powermodul (Mitsubishi Electric CT300DJG060). Für dieses Modul (Abbildung) ist ein Datenblatt verfügbar, welches die elektrischen Charakteristika und die äußere Geometrie beschreiben.

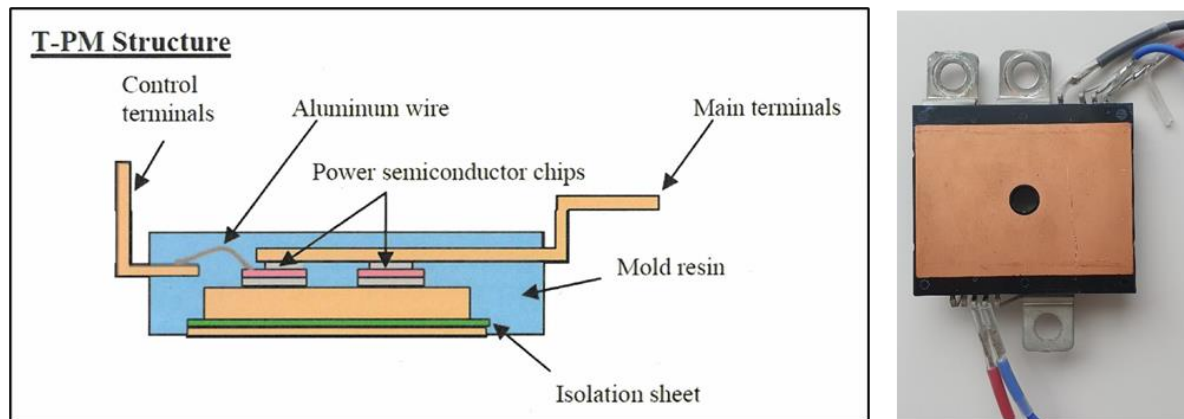


Abbildung 103: Schematischer und physischer Aufbau des Mitsubishi Electric CT300DJG060

Der innere Aufbau ist jedoch nur schematisch bekannt. Für ein sinnvoll einsetzbares Simulationsmodell muss dieser jedoch hinsichtlich der elektrischen Bestandteile möglichst genau bekannt sein. Dazu gehören die In-plane-Maße der Chips, Anschluss pads und Zwischenschichten, die Position der entsprechenden Bauteile sowie die Komponenten- und Schichtdicken. Zur Ermittlung dieser Werte wurde die Röntgen-Computertomographie genutzt, welche als zerstörungsfreies Analyseverfahren dafür hervorragend geeignet ist (Abbildung).

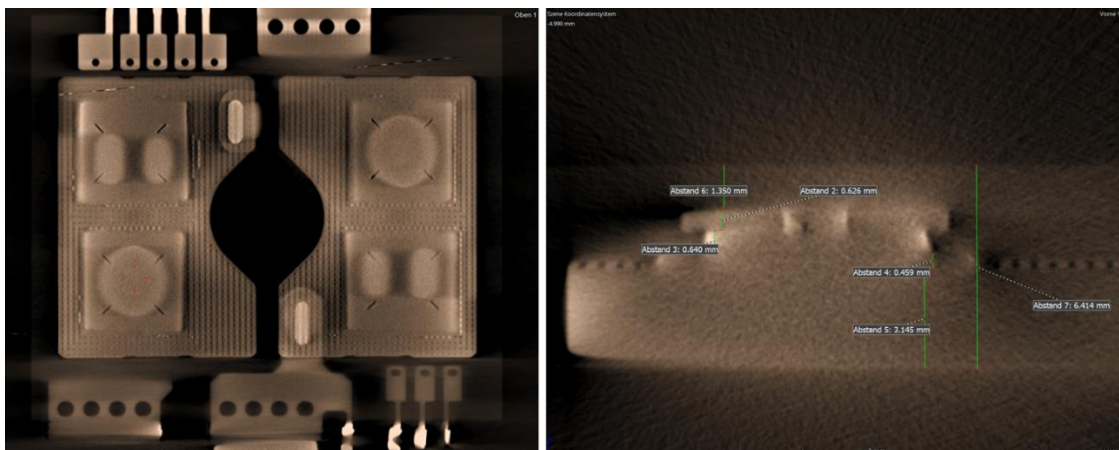


Abbildung 104: CT-Scans zur Ermittlung der inneren Geometrie des Powermoduls

Die internen Strukturen des Power Moduls wurden anhand der mittels Röntgen-CT ermittelten Daten modelliert (Abbildung). Die Strukturen sind stark vereinfacht, enthalten aber alle für die Simulation notwendigen Bestandteile. Für die geplante transiente thermische Simulation ist die modellierte Genauigkeit ausreichend.

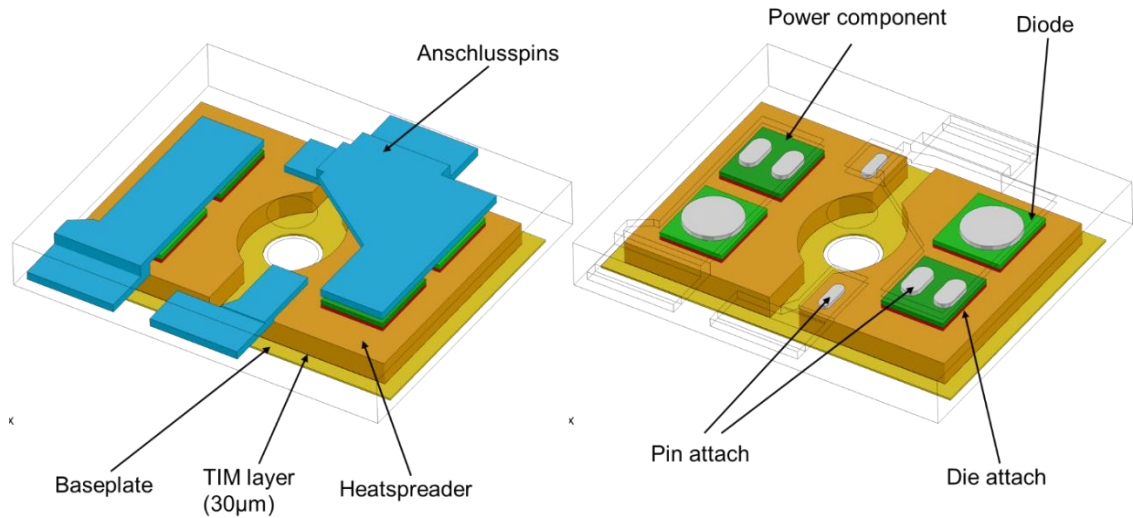


Abbildung 105: Simulationsmodell des Konzeptdemonstrators D-1

Die Lasten und Randbedingungen für die thermische Simulation wurden so festgelegt, dass sie dem experimentellen Aufbau des Projektpartners SAC entsprechen (Abbildung). Ziel der Simulation ist eine möglichst gute Übereinstimmung der resultierenden Chiptemperatur T_j und der daraus abgeleiteten Kühlbedingungen am Kühlkörper-Interface.

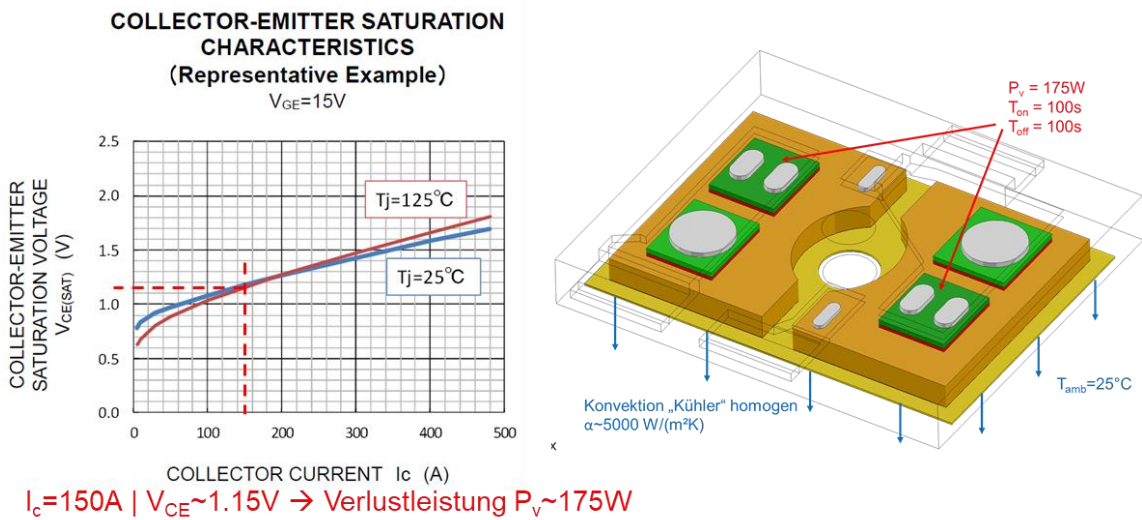


Abbildung 106: Festlegung der Lasten und Randbedingungen für die thermische Simulation

Die thermische Simulation wurde für das Abkühlverhalten bei unterschiedliche Kühlbedingungen durchgeführt. Es wird jeweils der gemessene und simulierte Temperaturhub ΔT_j verglichen. Aus dem Vergleich der simulierten Abkühlkurven mit dem Experiment kann die über das Kühlerinterface die gemittelte Konvektion α abgeschätzt werden:

Ohne Kühler: $\sim 5500 \dots 7500 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

Lammellen und Pin Fin: $\sim 7500 \dots 11000 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

Dies ist ein Maß für die Kühlleistung des verwendeten Kühlers und kann als Vergleichswert für die Fluidsimulationen der Kühlstrukturen verwendet werden. Die Ergebnisse der Simulation lagen im erwarteten Bereich (Abbildung).

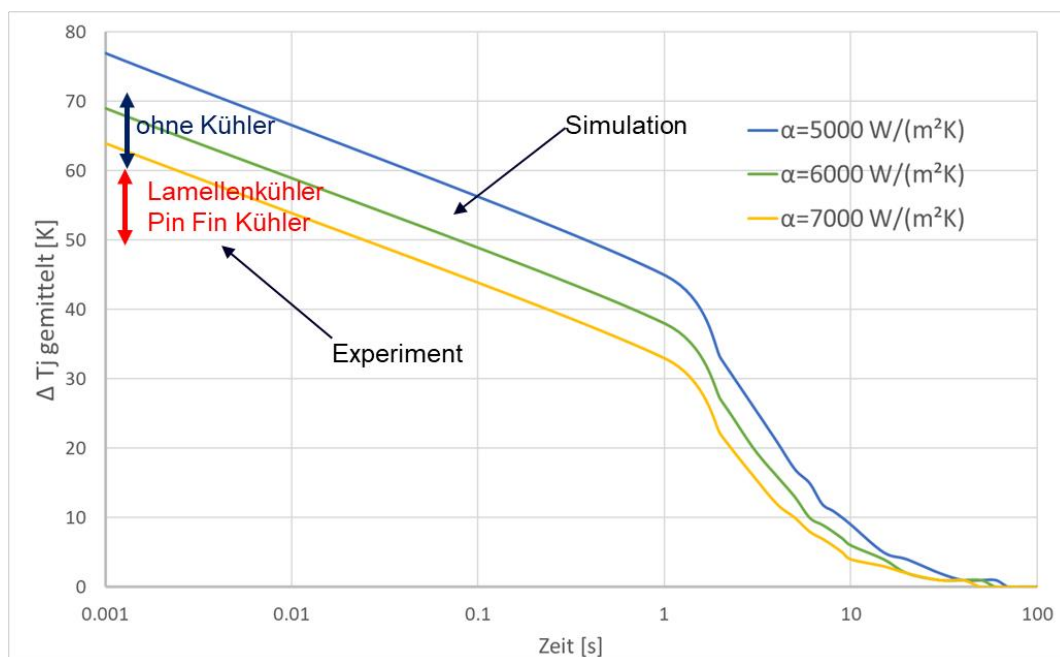


Abbildung 107: Vergleich der experimentellen und Simulationsergebnisse des Abkühlverhaltens

Die Arbeiten von ENAS in diesem Arbeitspaket lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Aufbau eines Simulationsmodells unter Berücksichtigung des Testplanes nach AP 5.1 und der Teststände nach AP 5.2 nach Vorgaben des Projektpartners SAG;
- Berücksichtigung der korrekten Lasten und Randbedingungen als notwendige Voraussetzung für die Vergleichbarkeit der experimentellen und simulierten Ergebnisse;
- Durchführung der thermischen Simulationsrechnungen;
- Abgleich der Ergebnisse mit den Messungen des Projektpartners SAG aus AP 5.5;
- Punktuelle Verfeinerung der in AP2.6 entwickelten Simulationsmethodik.

IPOINT Arbeitspaket 5.3 Anbindung von Ökobilanz an Simulation

Im Arbeitspaket 2.6 wurde die Anbindung von Simulation und Ökobilanzierung bereits erfolgreich geprüft und dann im AP 5.3 durchgeführt. Zusammenarbeit mit Siemens und dem Fraunhofer ENAS wurde eine

Schnittstelle zwischen dem zwischen der Graphical User Interface (GUI) optiSLang und der LCA Webanwendung Product Sustainability (PS) von IPOINT entwickelt. Ein vereinfachtes Ökobilanzmodell eines Kühlkörpers wurde erstellt, bei dem die funktionelle Einheit die Fertigung eines Leistungsmoduls ist (siehe Abbildung 108 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Mit diesem Modell wurde die Funktionalität der REST-API-Schnittstelle getestet. Die Schnittstelle ist dabei ein REST API (Representational State Transfer Application Programming Interface). Eine REST-API ist eine Schnittstelle, die es ermöglicht, auf Ressourcen und Daten eines Servers über standardisierte HTTP-Methoden zuzugreifen und zu manipulieren.

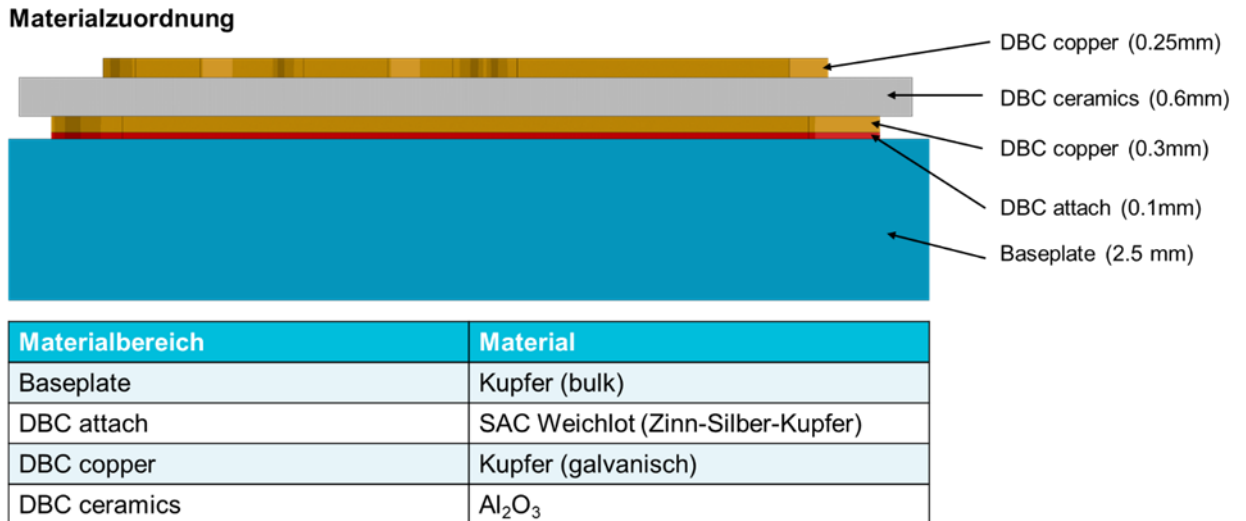


Abbildung 108: Versuchsaufbau eines Powermoduls mit Kühlplatte für die Anbindung der Ökobilanz an die Simulation

Die Simulation konzentriert sich auf die Kupferplatte mit einem Gewicht von 0,073 kg, da diese den größten Einfluss auf den CO₂-Fußabdruck hat. Unterschiedliche Plattendicken können simuliert werden, wobei PS jeweils den angepassten CO₂-Äquivalenzwert an optiSLang zurückliefert. Die Berechnung erfolgt nach dem „cradle-to-gate“-Ansatz.

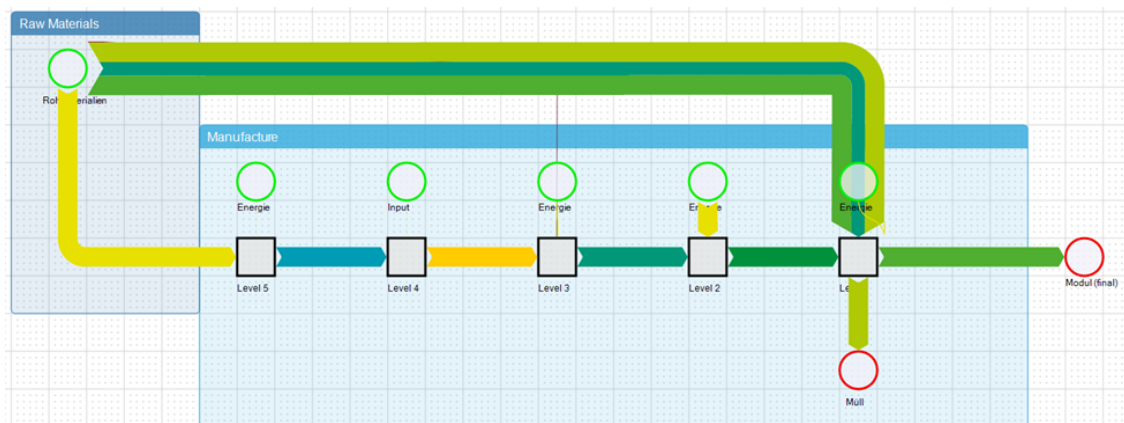


Abbildung 109: Vereinfachtes Ökobilanzmodell für die Anbindung an die GUI optiSLang

Das Ökobilanzmodell zeigt die vereinfachte Erstellung des Kühlkörpers mit der Montage an das Powermodul. Für die Simulation wurde es so vereinfacht, da der Scope in diesem Projekt nur die Prüfung einer Kopplung von Simulation und Ökobilanzsoftware vorsah. Die beiden Tools wurden über eine REST API angebunden und kommunizieren über ein Python Skript. Somit können unterschiedliche dicken der Platte simuliert werden und je nach dicke gibt PS den veränderten CO₂-eq.-Werts an optiSLang zurück. Die Kupferplatte wurde ausgewählt, da das Bauteil die größte Auswirkung auf den CO₂-Fußabdruck des gesamten Moduls hat. So kann in optiSLang analysiert werden, welche Variante des Leistungsmoduls am passendsten ist unter Berücksichtigung unterschiedlicher Aspekte wie Kühlleistung und Nachhaltigkeit. Mit dem erfolgreichen Durchlauf der Simulation unter Nutzung der Schnittstelle zu PS und der Analyse diese Methode im Hinblick auf die konstruktionsbegleitende Umweltbewertung. In Kapitel 2.6 Simulationsansätze ist das Interface (GUI) dargestellt, dass die Ergebnisse der LCA anzeigt. Es zeigt die Integration der CO₂-Äquivalente aus dem Modul Product Sustainability und veranschaulicht die Verbindung zwischen den Simulationsdaten und den Umweltwirkungen (siehe Abbildung 41). Bei Veränderung der Werte in der GUI wird Product Sustainability getriggert und spielt die passenden Ergebnisse zurück. Durch diese Anbindung konnte gezeigt werden, welche Vorteile eine ganzheitliche Betrachtung mitbringt und wie schon in der Produktentwicklung Nachhaltigkeit eine Rolle spielen kann.

2.7.2. AP 5.4 Charakterisierung

2.7.3. AP 5.5 Messungen und Validierung

Thermische / Zth Messungen


Die ersten Messungen wurden an den D-0x-Proben durchgeführt, um die Leistung und Effizienz verschiedener geschäumter Schaumstrukturen zu untersuchen. Als Teil des Validierungsprozesses wurden auch Referenzmessungen mit Kupferblöcken durchgeführt, die keine Kühlstruktur und keinen Kühler enthielten. Diese Referenzmessungen dienten dazu, Offsets im Messstand zu ermitteln und die Simulation durch Abgleich mit den experimentellen Daten zu validieren.

Die D-0x wurden Lastströmen von 70 / 100 A, einer Vorlauftemperatur des Kühlmediums von 24°C und unterschiedlichen Volumenströmen vermessen. Bei den Messungen werden die Leistungsmodul durch Joulsche Erwärmung bis zum statischen, thermischen Gleichgewicht erwärmt. Anschließend wird die Last weggenommen und im Mikrosekundenbereich die Temperatur mittels der Spannung über dem Halbleiter gemessen.

Der Einfluss des Volumenstroms auf die Kühlleistung zeigte keine signifikanten Auffälligkeiten. Aufgrund dieser konsistenten Ergebnisse wurden die Messungen für Vergleichszwecke auf einige festgelegte Volumenströme begrenzt. Diese Standardisierung erleichtert die Analyse und den Vergleich der Kühlstrukturen, indem sie eine konsistente Grundlage für die Bewertung der thermischen Leistungsfähigkeit bietet. Für jede untersuchte Kühlstruktur wurde der Druckabfall über den Kühler in Abhängigkeit vom Volumenstrom gemessen. Der Druckabfall ist ein entscheidender Parameter, wenn es um die wirtschaftliche Bewertung der Kühlleistung geht, da er direkt mit dem Energieverbrauch der Pumpen und damit den Betriebskosten zusammenhängt.

Messungen D-0x

Tabelle 18: Bild, Kennung und Beschreibung der D-0x

	D-01: Schaum auf PU Basis mit 10 PPI D-02: Schaum auf PU Basis mit 20 PPI D-01b: Glavnisiert 10 + 20 PPI
	D-03: Feinguss Schaum Kupfer dicke Stege D-04: Feinguss Schaum Kupfer mittlere Stege D-05: Feinguss Schaum Kupfer dünne Stege Alle 20 ppi
	D-06: Feinguss Schaum Alu dicke Stege D-07: Feinguss Schaum Alu mittlere Stege D-08: Feinguss Schaum Alu dünne Stege 20 ppi

Die maximale Temperatur der D-0x Demonstratoren ist in Abbildung 2.55 dargestellt.

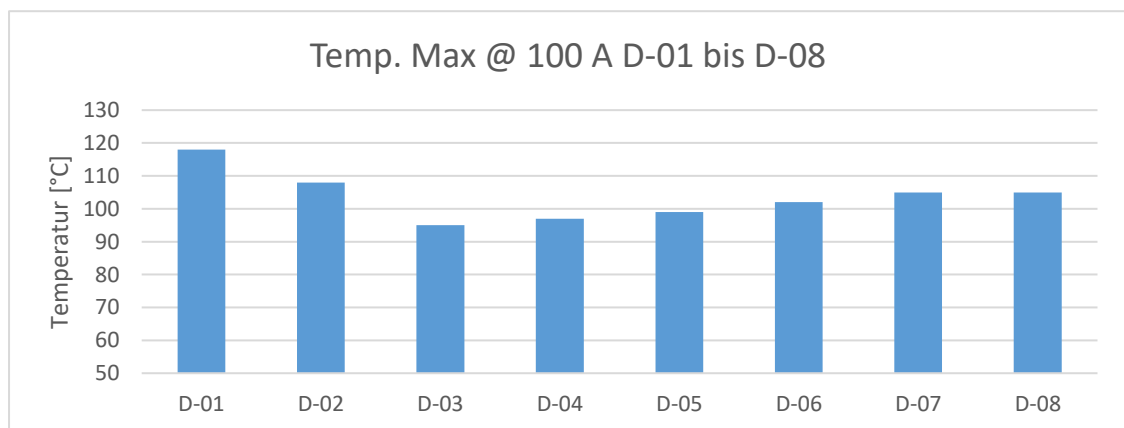


Abbildung 110: T_max der D-0x Demonstratoren

Die Leistung der Kühlstrukturen zeigte, dass Schäume mit 20 PPI (Poren pro Zoll) eine bessere Kühlleistung erbrachten als solche mit 10 PPI. Trotz der geringeren Querschnitte der Schaumstege, die für die Wärmeübertragung ins Kühlmedium entscheidend sind, bieten die 20 PPI Schäume durch ihre größere Oberfläche und die erhöhte Turbulenzbildung einen dominierenden Kühleffekt. Basierend auf diesen Erkenntnissen wurden weitere Kühlstrukturen mit 20 PPI entwickelt. Beim Vergleich der Materialtypen zeigten die gegossenen Schäume eine bessere Leistung als die auf Polyurethan (PU) basierten Schäume. Ein wesentlicher Faktor ist, dass die Stege bei den gegossenen Schäumen nicht hohl sind, was zu einer signifikant besseren Wärmeleitung innerhalb des Schaums führt. Dies spiegelt sich in einer niedrigeren

maximalen Temperatur (T_{\max}) wider, was auf eine effizientere Wärmeableitung hinweist. Die Feinguss-Schäume aus Aluminium zeigen aufgrund der materialbedingten geringeren Wärmeleitfähigkeit eine schlechtere Kühlperformance im Vergleich zu den gegossenen Kupfervarianten.

Abbildung zeigt einen leicht erhöhten Druckabfall bei den 20 PPI Schäumen im Vergleich zu den 10 PPI Varianten. Diese Erhöhung ist auf die dichtere Struktur und die daraus resultierende höhere Oberflächenreibung zurückzuführen. Trotz dieses Anstiegs weisen die gegossenen Schäume einen deutlich geringeren Druckabfall auf, was auf ihre regelmäßige Struktur zurückzuführen ist. Diese Regelmäßigkeit ermöglicht eine gleichmäßigere Strömungsverteilung und verringert die Widerstände, wodurch der Energieaufwand für die Kühlung reduziert wird.

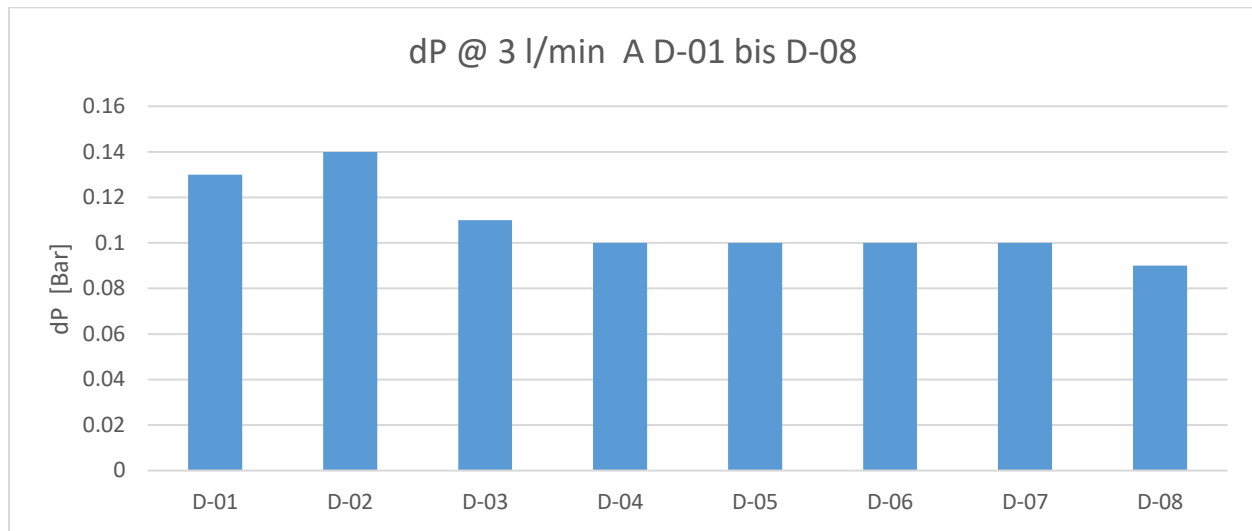


Abbildung 56: Druckabfall der D-0x Varianten bei 3 l/min Volumenstrom

Die D-0x Demonstratoren wurden 1000 Stunden lang zwischen -40 °C und 110 °C in 30-Minuten-Zyklen getestet, um die Verbindungsstellen zwischen der Schaumstruktur und der Baseplate zu überprüfen. Aufgrund unterschiedlicher CTE-Werte könnten mechanische Spannungen die Bondingstellen gefährden. Analysen durch Sichtproben, Zth-Kurven und elektrische Widerstandsmessungen vor und nach den Tests zeigten jedoch keine Beschädigungen.

Bei Probe D-01b wurde der Schaum mittels Kupfergalvanik kontaktiert. Die ersten Testergebnisse zeigen, dass die thermische Performance der galvanisch kontaktierten Proben mit der der gelöteten Varianten vergleichbar ist, wenn auch mit geringfügigen Abweichungen. Trotz des begrenzten Kontakts an den Kontaktierstellen weisen die galvanisierten Strukturen überraschend gute Wärmeleiteigenschaften auf.

Auch die mechanische Stabilität der galvanisch kontaktierten Proben erscheint auf den ersten Blick solide. Detaillierte Zugversuche zur direkten Vergleichbarkeit mit gelöteten Schäumen wurden bislang nicht durchgeführt. Die Proben wurden jedoch zyklischen thermischen Belastungen im Klimaschrank ausgesetzt (s. oben), wobei die Ergebnisse als zufriedenstellend und robust bewertet wurden.

Die Proben D-02 und D-01b (galvanisiert) wurden einem Lastwechseltest unterzogen. Testbedingungen: T-Max 150°C, ΔT 90°C, mit einer Zykluszeit von 3 Sekunden für Erwärmung und Abkühlung. Auch nach Abschluss der Tests konnten keine Beschädigungen am Bonding der Kühlstruktur festgestellt werden.

Messungen D-1x

Abbildung XY stellt die Ergebnisse der ZTH-Messung (thermischer Widerstand über Zeit) für verschiedene D1-Demonstratoren dar. Getestet wurden:

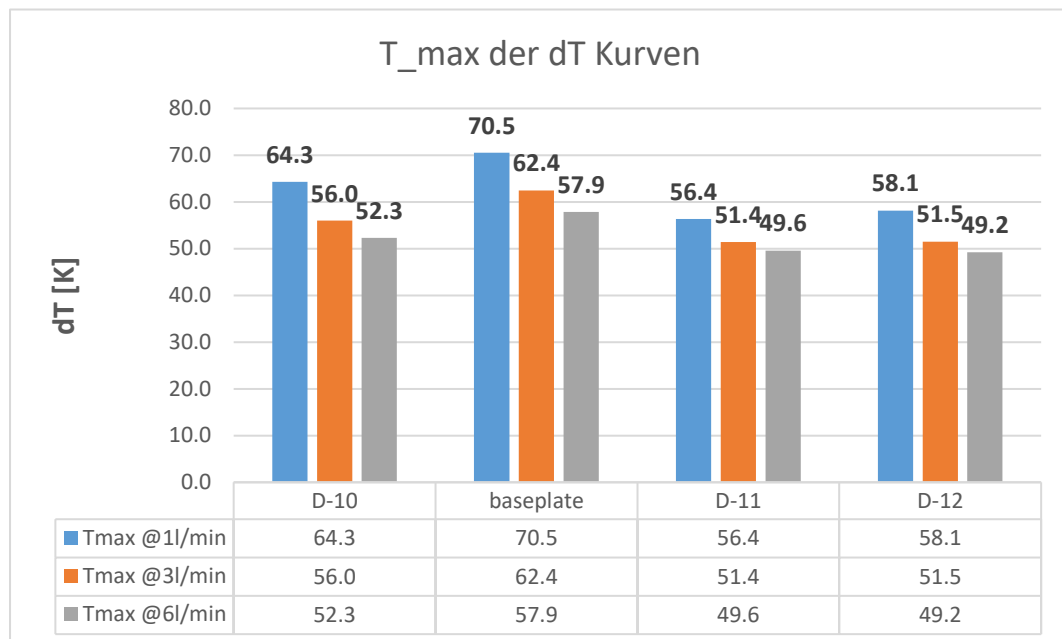


Abbildung 111: Diagramm zu T-max D-1x Basis Strukturen

Zwar zeigt sich, dass die galvanisch kontaktierte Schaumstruktur den herkömmlichen Fin- und Lamellenstrukturen thermisch noch unterlegen ist, jedoch verringert sich diese Differenz mit steigendem Volumenstrom signifikant. Zu berücksichtigen ist dabei, dass die galvanische Kontaktierung hier in einer einfachen, nicht weiter optimierten Form umgesetzt wurde: Weder der Kontaktierungsprozess selbst noch die Wärmeleitung in den Schaum ("thermische Autobahn") wurden speziell optimiert. Vor diesem Hintergrund sind die bislang erzielten Ergebnisse als sehr vielversprechend zu bewerten. Sie zeigen, dass auch ohne gezielte Optimierungsmaßnahmen bereits eine beachtliche Performance erzielt werden kann. Es ist davon auszugehen, dass durch weitere Verbesserung der Kontaktierung und gezielte Maßnahmen zur Optimierung der Wärmeleitung im Schaum deutliche Leistungssteigerungen erreichbar sind.

Aufbauend auf den Erkenntnissen der ersten Versuchsreihe wurden weitere Messungen mit optimierten Kühlstrukturen durchgeführt. Ziel war es, die Wärmeeinkopplung sowie den Gesamtwärmetransport gezielt zu verbessern. Alle optimierten Strukturen entstanden im Feingussverfahren.

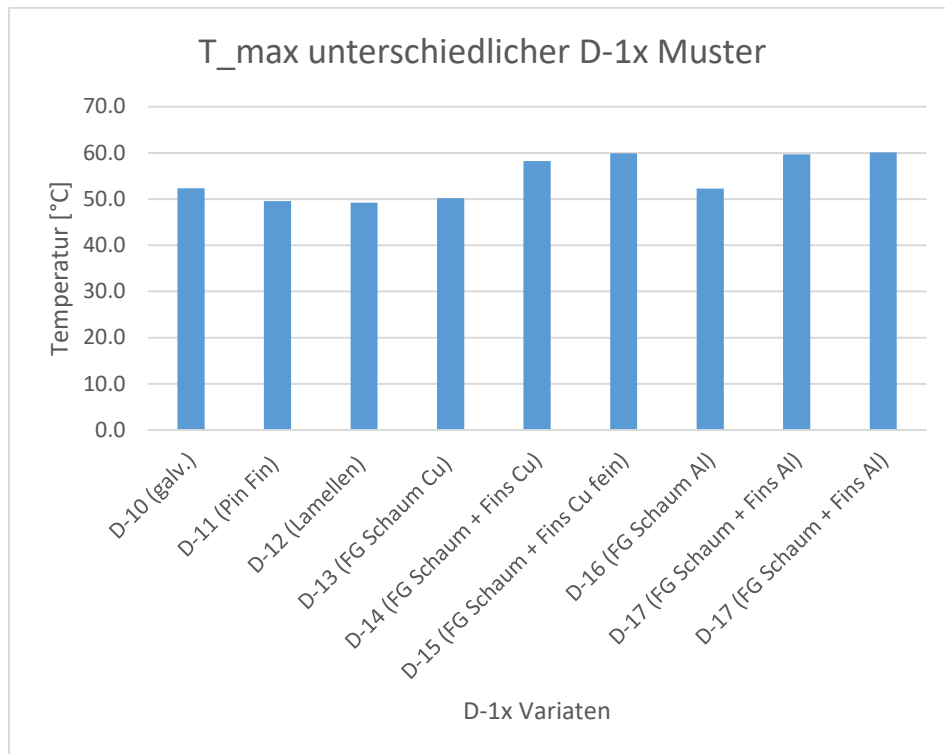


Abbildung 112: T_max Ergebnisse für die erweiterten D-1x Modelle

Bei Demonstrator D-13 wurde die Basis der Schaumstruktur im Bereich der Anbindung zur Baseplate massiver ausgeführt als die Spitzen. Damit konnte die Effizienz der Wärmeanbindung an die Grundplatte deutlich gesteigert und der Wärmetransport zum Kühlmedium optimiert werden.

In den Demonstratoren D-14 und D-15 wurden zusätzlich Pin-Fin-Elemente direkt in die Schaumstruktur eingebunden, um der Wärme gezielte Transportpfade („thermische Autobahnen“) zu bieten.

Für D-15 wurde zudem die Dichte der Schaumstruktur weiter erhöht, mit dem Ziel, die Wärmeleitung nochmals zu verbessern.

Die Demonstratoren D-16 bis D-18 folgen einem vergleichbaren Designansatz, sind jedoch vollständig aus Aluminium gefertigt, um das Materialverhalten im Vergleich zu Kupfer zu untersuchen.

Diese Anpassungen und Weiterentwicklungen dienen der stetigen Optimierung des Wärmeübergangs und stellen wichtige Schritte in der Entwicklung leistungsfähiger und anwendungsspezifisch angepasster Kühlstrukturen dar.

Die Messungen an den Demonstratoren der D-1x Serie verdeutlichen, wie entscheidend und wirkungsvoll gezielte Optimierungskonzepte zur Leistungssteigerung von Schaumkühlern sind. Erst durch konstruktive Anpassungen – wie eine verbesserte Wärmeinkopplung, die Integration von Pin-Fin-Elementen oder die Variation der Schaumdichte – können die thermischen Eigenschaften dieser Kühlstrukturen in den für die Anwendung erforderlichen Bereich gebracht werden. Die Versuchsergebnisse zeigen, dass sich durch derartige Maßnahmen die Kühlperformance signifikant steigern lässt und belegen somit klar die Notwendigkeit und das Potenzial der entwickelten Optimierungsstrategien für den Einsatz zukünftiger Schaumkühlkonzepte.

Messungen D-2x

Daten Valeo Modul:

Die Aufgaben für den Valeo betrafen vor allem die Vermessung eines realistischen Demonstrators mit einer offenen Schaumstruktur an der Bodenplatte für den Automotive Traktionsbereich und einen Vergleich mit einem handelsüblichen Kühler eines Traktionsumrichters. Der Leser soll dabei an einen Frequenzumrichter denken, der den Batteriestrom so zerhackt, dass daraus einen Drehstrom für einen Synchronmotor entsteht, der das Auto antreiben kann.

Dazu wurde auch ein kommerziell verfügbares Power Modul verwendet, das dazu die benötigte Größe hat, um genügend Strom für ein Auto zu liefern. Die gesamte Chipoberfläche pro Schalter war dann auch mit 200 mm² nicht zu klein bemessen. Weil das Power-Modul schon einen höheren Reifegrad hat, und damit repetitive Ergebnisse liefert kann es für einen Vergleich herangezogen werden. Um eine sinnvolle und wiederherstellbare Trennung zwischen Power Modul und Bodenplatte zu realisieren, wurde eine thermisch leitende Paste mit definierter Teilchengröße zwischen den beiden Elementen Power-Modul und Kühler verwendet. Große Sorgfalt wurde dabei sowohl bei der Teilchengröße als auch bei der Menge der Paste angewandt, um eine vergleichbare Abwärme-Widerstand zu realisieren.



Abbildung 113: Schaumstruktur auf Valeo Baseplate; links nicht beschichtet; rechts vernickelt

Für den Vergleich wurde einen handelsüblichen Pin-Fin-Kühler herangezogen. Um die Meriten und Verbesserungspotentialen besser einschätzen zu können, wurde Wert auf eine gute Anbindung an die Bodenplatte mittels Galvanik gelegt. Ein offener Schaum wurde dazu an einer Bodenplatte galvanisiert. An dieser Bodenplatte ist wiederum durch die großflächige TIM-Anbindung die Leistungselektronik verbunden, die aus dem Halbleiter besteht, die auf einem Substrat aufgebracht sind, das Wärme spreizt. Die Galvanisierung an der Bodenplatte wurde deswegen während der Montage extra dick aufgetragen, um eine gute Umschließung und Integration des Schaums an der Bodenplatte zu gewährleisten.

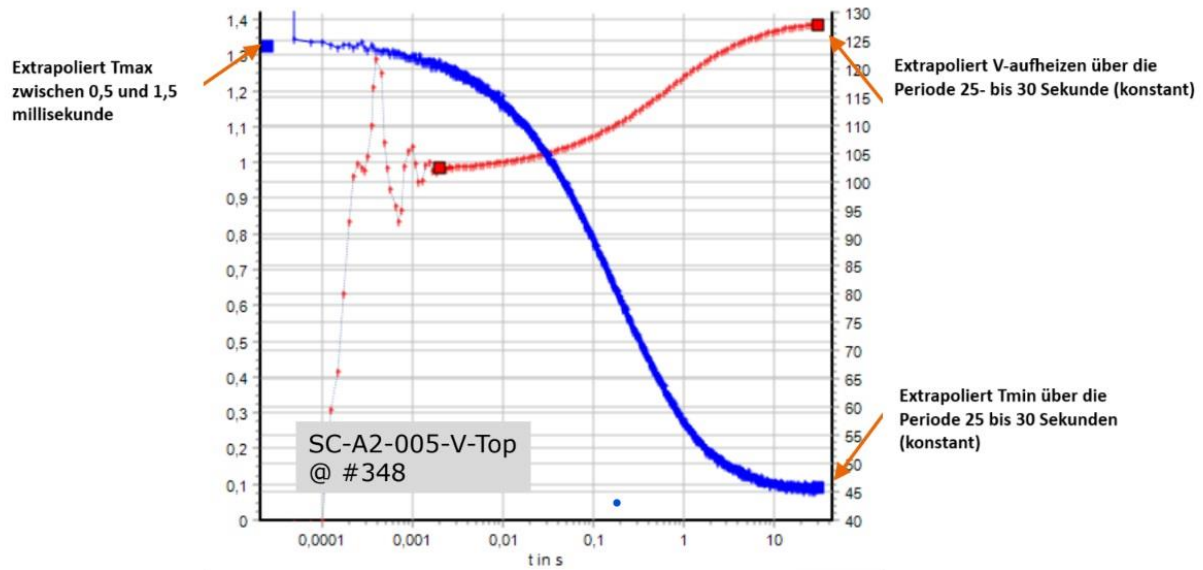


Abbildung 2-57b Berechnungsmethodik der Rth Werte

Abbildung 114: Berechnungsmethodik der Rth Werte

Mittels einer Kalibrierung des Power Moduls konnte ein Zusammenhang zwischen dem Temperaturverlauf des aktiven Halbleiters und der Temperatur abhängigen gemessenen Spannung zwischen Kollektor und Emitter hergestellt werden. Bei konstantem Strom wird die Verlustleistung aus der Multiplikation von Strom und Kollektor-Emitter Spannung während der Aufheizphase berechnet. Der Quotient des Temperaturunterschieds zwischen aktiver Chipoberfläche und Einlass Temperatur einerseits und die Verlustleistung andererseits ist dann wiederum die gesuchte Rth. Sein Temperaturverlauf beträgt die Zth.

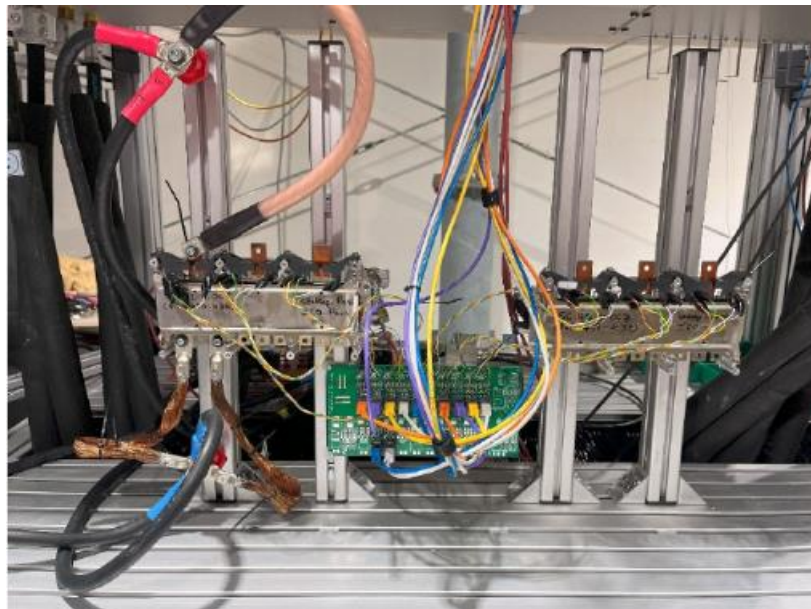


Abbildung 2.57c: Prüfstand

Aus den Messungen geht hervor, dass der Prüfstand repetitive Messergebnisse liefert. Dabei war der Wärmewiderstand (Rth) für den Schaum-Demonstrator um ungefähr 30% höher als bei der ausgefeilten Pin-Fin Struktur. Siehe dazu die untenstehende Übersicht. Verbesserungspotential wird darin gesehen die Schaumstruktur inhomogen zu gestalten, sodass diese vor allem zum Kühler hin mehr Querschnitt hat aber auch generell eine höhere Materialdichte aufweist, um die Große Wärmeintensität abtransportieren zu können.

Weitere Optimierungspotenziale werden in der Galvanisierung gesehen, die durch ein Lot mit anschließender Galvanisierung ersetzt werden könnte.

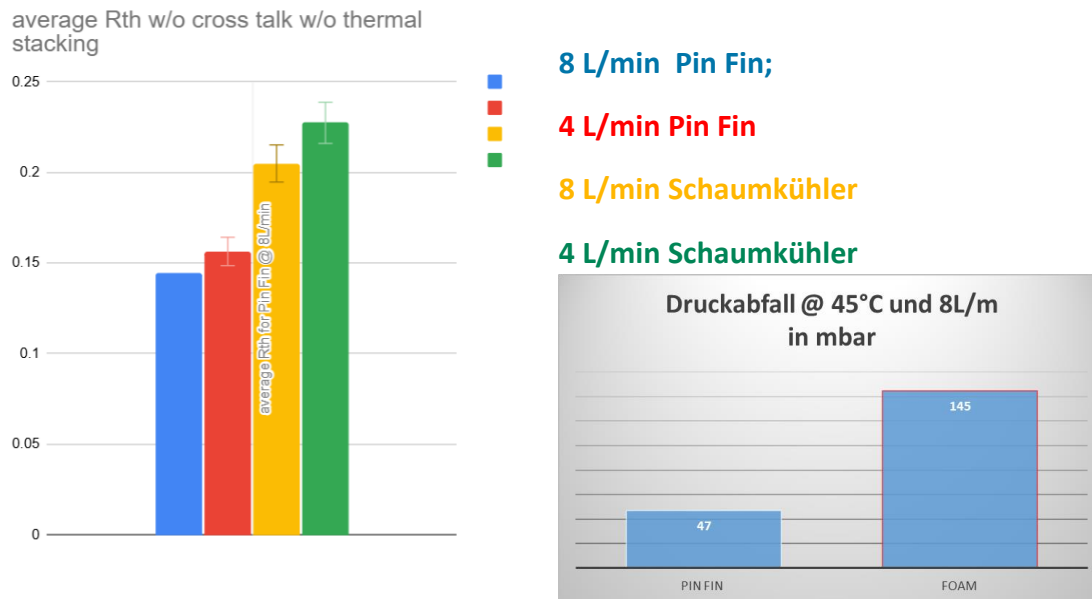


Abbildung 115: Ergebnisse: Rth in total von aktive Chipfläche zur Kühlwasser-Einlasstemperatur

Leider ist die Rth-Differenz noch negativ. Auch ist der Druckabfall in der gegebenen Zellstruktur höher. Das ist aber die filigrane Struktur und die nicht für diese Strömungsanwendung optimierte Zelle angehaftet. Durch eine optimierte Anbindung kann auch ein besseres Ergebnis erreicht werden. Der CO₂-Fußabdruck für die Herstellung dieses Schaums scheint aber schon positiv zu sein.

Messungen Bahntechnik

Im Rahmen des Projekts wurden die Schaumbasiskühler mit Sandwichstruktur am Zth-Messtand hinsichtlich ihrer thermischen Performance analysiert und direkt mit einem industriellen Aluminiumkühler (Cooling Plate mit integrierter Verrohrung) verglichen.

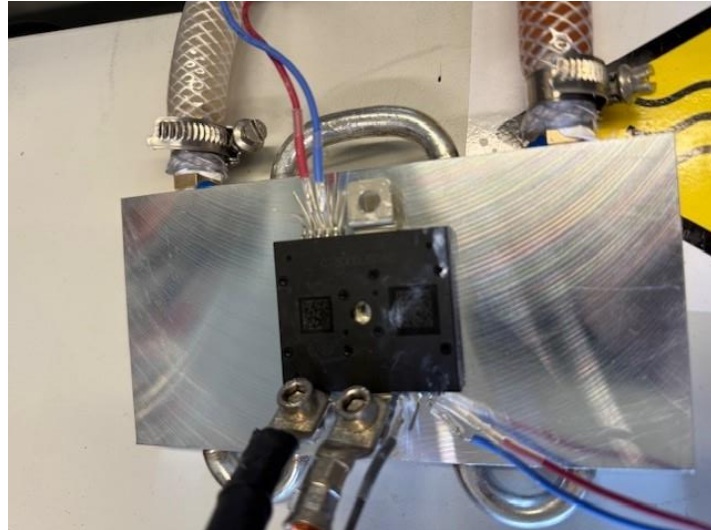


Abbildung 116: Austerlitz Kühler im Teststand

Weitere Variationen der Schaummodule werden nach Projektende vermessen, sobald die Problematik der Dichtigkeit gelöst ist. Erst nach Herstellung ausreichend dichter Schaummodule und abgeschlossener Messtechnik-Validierung ist eine aussagekräftige Benchmark mit den verschiedenen Varianten möglich.

Als Heizquelle dient auch hier das Leitungsmodul von Mitsubishi. Die Messungen wurden bei 24 °C Kühlwassertemperatur, einem Volumenstrom von 5 l/min und 60 Ampere Laststrom durchgeführt.

	Austerlitz	Schaumkühler
DT_max [K]	20,1	40,3

Die bislang gemessene, vergleichsweise schlechte Performance der Schaumsandwichkühler ist vor allem auf die unzureichende Anbindung der eingesetzten Rohre an die Zellstruktur zurückzuführen. Die Ergebnisse zeigen, dass die aktuell verwendete einfache Verpressung der Rohre nicht ausreicht, um einen effektiven thermischen Kontakt zu gewährleisten. Wie bereits im Projektteam diskutiert, ist für eine signifikante Verbesserung der Wärmeübertragung eine inkrementelle Vorverdichtung der Kontaktstelle mit nachfolgender Lötung unverzichtbar. Sobald das bestehende Dichtigkeitsproblem bei den Schaummodulen gelöst ist, werden weiterführende Messungen am optimierten Konzept durchgeführt, um dessen Leistungsfähigkeit valide zu erfassen und mit alternativen Kühlerstrukturen zu vergleichen.

Batteriedemonstrator Aerospace

zeigt den aufgebauten Batterie-Versuchsdemonstrator, bei dem in die Öffnungen des Metallschaumblocks eine Triggerzelle sowie mehrere Dummyzellen eingesetzt wurden. Die Triggerzelle wird mit einer Konstantstromquelle gezielt erhitzt, um thermische Lasten zu simulieren. Die Dummyzellen dienen der Temperaturmessung und sind jeweils mit Thermoelementen zur Erfassung des Temperaturverlaufs ausgestattet. Die Dummyzellen bestehen aus leeren Lithium-Ionen-Zellen, die mit

Zement und einem zentral eingebrachten Kupferstab verfüllt wurden. Zement wurde gewählt, da dessen thermische Eigenschaften in radialer Richtung denen einer Originalzelle sehr ähnlich sind. Da die axiale Wärmeleitung realer Zellen deutlich höher ist als die des reinen Zements, wird der Wärmefluss axial durch den eingebrachten Kupferstab unterstützt. Der Durchmesser des Kupferstabes wurde rechnerisch so bestimmt, dass die gesamte Dummyzelle eine isotrope Wärmeleitfähigkeit besitzt, die der Wärmeleitfähigkeit einer echten Zelle bestmöglich entspricht. So wird eine realistische Simulation der thermischen Eigenschaften unter experimentellen Bedingungen erreicht.

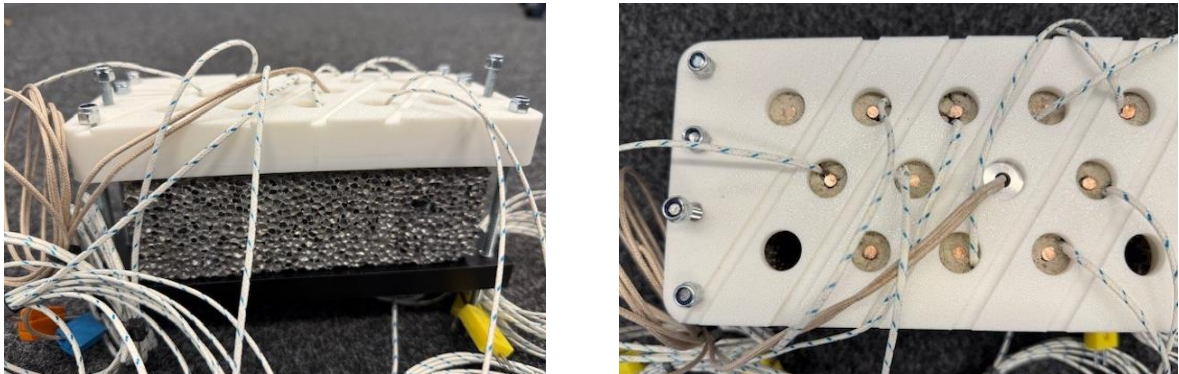


Abbildung 117: Demonstrator Batteriemodul mit Aluminiumschaum, Triggerzelle: mittlere reihe, zweite von rechts

Neben der Einhaltung einer maximalen Betriebstemperatur ist insbesondere die Temperaturhomogenität zwischen den Lithium-Ionen-Zellen maßgeblich für die Leistungsfähigkeit und Lebensdauer der Batterie. Für einen optimalen Betrieb sollte die Temperaturdifferenz dT zwischen den einzelnen Zellen 5 K nicht überschreiten. Zur Bewertung der Temperaturverteilung wurde die transiente Wärmeleitung innerhalb des Zellverbunds und die resultierende Temperaturdifferenz im quasi-stationären Zustand untersucht. Ziel war es, nicht nur Hotspots frühzeitig zu erkennen, sondern auch die Wirksamkeit der Kühlstruktur hinsichtlich einer ausgeglichenen Wärmeabfuhr zwischen den Zellen experimentell zu belegen.

Abbildung 118 zeigt den Temperaturverlauf der Zellen nach Einschalten der Trigger Zelle mit 100W mit den Zeitschritten 0,10,120, 300 und 420 [sec] für Kupfer und Aluminiumschaum Strukturen. Bei den geschlossenen Aluminiumschaum wird zum einen eine geringere Maximaltemperatur als auch eine geringere dT der Zellen untereinander gemessen. Die Messungen erfolgten bei freier Konvektion. Im realen Einsatz herrscht i.d.R. durch den Flug, sowie durch die Rotoren eine erzwungene Konvektion. Dies führt zu einer deutlichen Verringerung der Temperaturen.

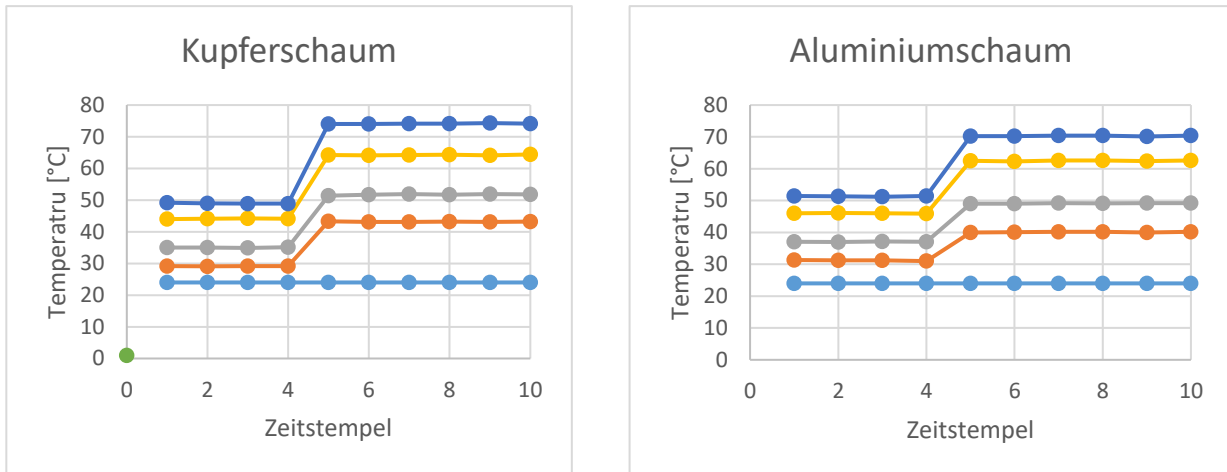


Abbildung 118: transienter Temperaturverlauf der Zellen; Kupferschaum links, Aluminiumschaum rechts

Ein realer Test auf die Ruptur von Lithium-Ionen-Zellen und die Auswirkungen einer Thermal Propagation konnte aus Sicherheitsgründen im Rahmen des Projekts nicht durchgeführt werden. Für eine umfassende Bewertung des Sicherheitsverhaltens ist dieser Versuch jedoch essenziell. Deshalb ist vorgesehen, solche Tests im Projektanschluss in Kooperation mit entsprechend qualifizierten Einrichtungen und Sicherheitslaboren durchzuführen, um die Performance und Sicherheit der entwickelten Kühlstrukturen unter extremen Bedingungen validieren zu können.

Die ersten Ergebnisse aus den Versuchen sind sehr vielversprechend und bestätigen die theoretischen Annahmen hinsichtlich einer deutlichen Verbesserung der Kühlperformance durch die eingesetzten Schaumstrukturen. Darüber hinaus zeigt die hohe mechanische Stabilität der Schaumstruktur, dass im Fall eines Zelldefekts eine Durchdringung der Zellwand (Zellruptur) signifikant eingedämmt werden kann. Dies spricht dafür, dass die Schaumstruktur einen maßgeblichen Beitrag zur Prävention einer Thermal Propagation leisten und somit die Sicherheit von Batteriesystemen deutlich erhöhen kann.

Validierung der Vorbehandlungsmethoden

Wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, wurde die Vorbehandlung lediglich mit ausgewählten Parameter- und Maschinenkombinationen durchgeführt. Da die Hammermühle in den Vorversuchen bereits mit den bestmöglichen Parametern betrieben wurde, konnten die Ergebnisse hier lediglich bestätigt werden. Es wurde ein Entschichtungsgrad von ca. 46 % erreicht. Abschließend lässt sich festhalten, dass die Hammermühle in der aktuell eingesetzten Ausführung der Austragsroste nicht für die Entschichtung der Schäume geeignet ist. Die Versuche haben jedoch gezeigt, dass die Hammermühle als solche sehr gut für die Entschichtung geeignet ist: Wird das Material im Kreislauf so lange zerkleinert, bis die Partikelgrößen unter 1 mm bzw. 0,5 mm liegen, können Entschichtungsgrade von 71 % bzw. 88 % erzielt werden. Zukünftig sollte daher ein Rost mit einer Austragsweite von < 1 mm oder mit runden Austragslöchern eingesetzt werden, um die Eignung der Hammermühle weiter zu verbessern.

Bei der Universalmaschine konnte die Entschichtung analog zu den Vorversuchen gesteigert werden. In der folgenden Tabelle sind die Ergebnisse der drei besten Kombinationen zu finden und jeweils die Steigerung nach der Vorbehandlung und diese in Verbindung mit den Parametern gesetzt.

Tabelle 19: Entschichtungsgrade vor und nach der Vorbehandlung (VB) und der Zerkleinerung mit der Universalmühle

Parameterkombination	Porendichte	Entschichtung vor der VB	Entschichtung nach der VB (Steigerung in %)
50 m/s und 0,5 mm	20 PPI	66 %	78 % (12 %)
82 m/s und 1 mm	20 PPI	59 %	65 % (6 %)
82 m/s und 0,5 mm	20 PPI	69 %	83 % (14 %)

Wie in Tabelle 19 dargestellt, konnten die Ergebnisse analog zu den Vorversuchen weiter gesteigert werden. Die maximal erzielte Entschichtung lag bei rund 83 % bei einer Einstellung von 82 m/s und einem Rost mit 0,5 mm Öffnung. Damit konnte die Entschichtung um mehr als 10 % verbessert und gleichzeitig eine hochreine Kupferfraktion gewonnen werden, die im Anschluss direkt zu Testzwecken in einen Sinterprozess überführt werden konnte.

Verwertbarkeit der entstehenden Produkte

Für die Bewertung der Demonstratoren hinsichtlich der Verwertbarkeit der gewonnenen Rezyklate wurden verschiedene potenzielle Verwertungswege betrachtet. Ein Ansatz ist die Herstellung von Hybridfilamenten, die anschließend im Rahmen eines experimentellen Verfahrens an der TU Ilmenau gesintert werden können. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, besonders reines Kupfer für Beschichtungsverfahren wie die PVD-Technologie einzusetzen. Auch das Sintern der aufbereiteten Werkstoffe selbst oder deren Nutzung im Bereich des 3D-Drucks sind denkbare Optionen. Im Prinzip basieren alle untersuchten Ansätze auf der Weiterverarbeitung der gewonnenen Materialien in Form von Pulverwerkstoffen, wodurch vielfältige Anwendungsmöglichkeiten eröffnet werden.

Die verbleibenden PUR-Reststoffe könnten beispielsweise durch Heißpressen zu Platten oder Formteilen verpresst und damit einem Downcycling zugeführt werden. Alternativ besteht die Möglichkeit, PUR über lösungsmittelbasierte Verfahren wieder in seine chemischen Bestandteile zu zerlegen und so für eine hochwertigere Kreislaufführung aufzubereiten. Die Mischfraktionen aus Kupfer und PUR wiederum können über etablierte metallurgische Verfahren weiter entschichtet werden, sodass die Materialien sortenrein nutzbar sind.

IPOINT AP 5.5 Weiterentwicklung von Umberto und Product Sustainability

Die Weiterentwicklung der Softwarelösung Umberto 11 und Product Sustainability war von Interesse, da die Erstellung von LCAs mit erheblichen Herausforderungen verbunden ist. Dies begründet sich dadurch, dass die Zahl an LCA-Experten begrenzt ist. Zusätzlich ist eine Modellierung zeitaufwendig, da umfangreiche Daten gesammelt und oft komplexe Modelle entwickelt werden müssen. Zudem erfordert sie spezialisiertes Fachwissen in Umweltwissenschaften, Material- und Energiebilanzen sowie in Normen wie ISO 14040/14044. Die Analyse selbst ist durch den Einsatz verschiedener Modellierungstechniken, Datenbanken und Softwarelösungen zusätzlich komplex. Des Weiteren sollen nicht LCA-Experten, wie bspw. Nachhaltigkeitsmanager, Entwickler oder Ingenieure Ökobilanz Modelle leicht nutzen können.

Da im Forschungsprojekt KoLibri eine Vielzahl unterschiedlicher LCA-Modelle entwickelt wurde (siehe AP 2), hat iPoint ein Konzept erarbeitet, das eine effiziente und strukturierte Zusammenführung dieser Modelle ermöglicht. Ziel war es, die Kompatibilität und Wiederverwendbarkeit der Modelle zu verbessern und eine konsistente Bewertung über verschiedene Systemgrenzen hinweg zu gewährleisten. Ausgangspunkt ist der Aufbau von Umberto-Modellen, die spezifische Prozesse, Produkte oder Komponenten abbilden. Diese Modelle dienen als strukturierte Datensätze und können flexibel weiterverwendet werden. Ein zentrales Merkmal dieses Features ist die Möglichkeit, die erstellten Modelle in Product Sustainability hochzuladen. Dort können sie entweder direkt für die Umweltbewertung genutzt als ein Datensatz im Hintergrund, als eigenständiges Modell genutzt werden oder zur weiteren Bearbeitung wieder in Umberto exportiert werden um dort als Hintergrunddatensatz für Komponenten genutzt zu werden. Ein Prototyp wurde getestet und innerhalb des Projektes genutzt. Diese bidirektionale Schnittstelle soll eine nahtlose Verbindung zwischen Modellierung und Bewertung ermöglichen. Das Nutzen eines Modells als einen Datensatz fällt auch unter das sogenannte Mapping. Dabei wird ein Eintrag – beispielsweise ein Material oder eine Komponente – mit einem entsprechenden Datensatz aus einer Umweltwirkungsdatenbank wie ecoinvent verknüpft. Durch diese Zuordnung wird die Umweltwirkung des jeweiligen Elements transparent und nachvollziehbar dargestellt. In dieser Weiterentwicklung ist dann anstatt eines Sekundärdatensatzes von ecoinvent das erstellte Umberto Modell angedacht. Somit wird eine konsistente, modulare und wiederverwendbare Bewertung von Umweltwirkungen über verschiedene Tools hinweg sichergestellt und unterstützt die ganzheitliche Analyse komplexer Produktstrukturen.

2.7.4. Hauptarbeitspaket 6 Fertigungsprozess Transfer

AP 6.1 Technologietransfer

Eine vollständige Aufstellung der Publikationen im Rahmen des Projektes

- METFOAM 07/2023 + Tagungsband
- Landshuter Leichtbaukolloquium (LLC) 02/2025
- Leichtbauatlas
- Münchner Leichtbausymposium inkl. Tagungsband
- DECHEMA/VDI Fachgruppen Jahresversammlung „Zerkleinern und Klassieren“ 2024
- Composite 2024
- DECHEMA/VDI Fachgruppen Jahresversammlung „Zerkleinern und Klassieren“ 2025
- Aktuelle Forschung am Institut für Aufbereitungsmaschinen
- Recycling (MDPI)
- Metals (MDPI - ausstehend)
- Poster für das LCA Symposium der Society of Environmental Toxicology and Chemistry 2024: Langbehn, P., Eik Grimmstein, J., Mol, K., Dos Santos, M. (2024): Examination of recycling processes for metallized polymer foams using Life Cycle Assessment

AP 6.2 Ökobilanzierung und Software

Zur Verbesserung der Lesbarkeit und zur Vermeidung einer fragmentierten Darstellung zusammenhängender Inhalte wurden die Ergebnisse des AP6 gemeinsam mit den Ergebnissen aus AP2 dokumentiert. Diese Zusammenführung ermöglicht eine ganzheitliche Betrachtung der Resultate und unterstützt ein konsistentes Verständnis der inhaltlichen Zusammenhänge.

2.8. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten

Das Projektkonsortium des Verbundvorhabens KoLibri hält die geleisteten Projektarbeiten zum Erreichen der Projektzielstellung für angemessen und notwendig. Im Verlauf des Projektes konnten zentrale Ziele trotz hoher technischer und wissenschaftlicher Risiken erfolgreich erreicht werden. Insbesondere wurden neue Kühlkonzepte und Fertigungstechnologien realisiert und umfassend validiert, die den Stand der Technik im Bereich Effizienz, Nachhaltigkeit und Flexibilität deutlich erweitern. So wurde unter realen Einsatzbedingungen nachgewiesen, dass innovative Metallschaumstrukturen und direkte additiv gefertigte Kupferkühlkörper zuverlässig gefertigt und mechanisch wie thermisch belastet werden können. Die Machbarkeit der direkten und stoffschlüssigen Metall-Metall-Verbindungen durch galvanische Prozesse wurde experimentell bestätigt, ebenso wie die Integration dieser Ansätze auf unterschiedlichen Demonstrator Größen und für verschiedene Anwendungsprofile. Ein besonderer Erfolg ist die frühzeitige und umfassende Integration von LCA-Modellen in den Entwicklungsprozess. Dadurch konnten die Auswirkungen verschiedener Fertigungstechnologien, Materialien und Designvarianten bereits im Prototypenstadium auf ihre ökologische Nachhaltigkeit bewertet werden. Erste konkrete Optimierungsvorschläge und Wertschöpfungspotenziale für die Siemens Produktentwicklung wurden abgeleitet. Die Softwarelösungen zur LCA-Parametrisierung können künftig direkt in den Siemens Designprozess übernommen werden. Abschließend lässt sich festhalten, dass die im Projekt geleisteten Arbeiten nicht nur notwendig, sondern im Hinblick auf die erzielten Ergebnisse äußerst angemessen waren. Es wurden funktionsfähige Demonstratoren entwickelt, getestet und messtechnisch charakterisiert. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse – etwa zur Identifizierung thermischer Engpässe, zur Optimierung schaumartiger Kühlstrukturen und zur Umsetzung einer ganzheitlichen Ökobilanzierung stellen einen nachhaltigen Mehrwert für die weitere Forschung, Produktentwicklung und Markteinführung neuartiger thermischer Managementlösungen dar.

2.9. Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Siemens AG

Die Ergebnisse des Projekts leisten einen wesentlichen Beitrag zur thermischen Optimierung im Siemens-Produktportfolio, da sie die Aspekte Effizienz, Zuverlässigkeit und Ökobilanz gleichermaßen berücksichtigen. Die Möglichkeit, LCA-Modelle direkt in die Software und somit in den Designprozess zu integrieren, stellt einen erheblichen Mehrwert für die Softwarelösung von Siemens dar. Weiterhin wurde im Projekt umfangreiches neues Fachwissen in den Bereichen Fertigungstechnologien, Simulation, Surrogatmodelle, Prototyping (u. a. Laser Melting und Mikrofeinguss), Ökobilanzierung und Leichtbau aufgebaut. Dieses Wissen findet breite Anwendung in der Forschung und Vorentwicklung in der Siemens AG. Die Projektarbeiten haben die grundsätzliche Machbarkeit der untersuchten Kühlkonzepte und -technologien bestätigt. Zwar erreicht die Kühlperformance der getesteten Schaumstrukturen aktuell noch nicht das Niveau optimierter Pin-Fin-Strukturen, jedoch konnten zentrale theoretische Annahmen im Bereich der thermischen Engpässe („Flaschenhälse“) experimentell belegt werden. Die gewonnenen Erkenntnisse zur Optimierung schaumartiger Kühlstrukturen fließen direkt in die künftige Entwicklung thermisch relevanter Komponenten ein. Notwendige Weiterentwicklungen, insbesondere zur Steigerung

der Performance und Reife der neuen Kühlstrukturen, werden durch die im Projekt gesammelten Erfahrungen unterstützt. Die Arbeiten an LCA-Modellen liefern Siemens zudem wertvolle Erkenntnisse und Kompetenzen, die auch für zukünftige Produktentwicklungen außerhalb der im Projekt adressierten Technologien nutzbar sind.

Fraunhofer ENAS

Der Fortschritt von Fraunhofer ENAS im Projekt KoLibri besteht in der Entwicklung einer ganzheitlichen Methodik zur Bewertung des elektro-thermischen Verhaltens von Powermodulen. Wesentliche Neuerung ist dabei die Schaffung numerischer Ersatzmodelle (Surrogates), welche nicht nur die Möglichkeit bieten, Simulationsergebnisse unter Nutzung des gebündelten Fachwissens zuverlässig und schnell zu ermitteln, sondern auch diese Ergebnisse potenziellen Anwendern und Kunden unter Wahrung der eigenen IP zur Verfügung zu stellen. ENAS sieht dies als wesentlichen Baustein im Rahmen gegenwärtigen und zukünftigen FE-Aktivitäten. Die entwickelte Methodik konnte bereits während der Projektlaufzeit in Form von Industrieaufträgen verwertet werden.

Fraunhofer IWU

Das Fraunhofer IWU erwarb und erweiterte mit dem Projekt KoLibri Kenntnisse auf dem Gebiet Thermo- und Strömungsdynamik, geometrische Einflüsse auf Kühlungssysteme und Thermomanagement in der Mobilität. Zudem wurde in Kooperation mit dem Partner NRU der Gießprozess von feinen Cu-Strukturen vorangetrieben. Für das Fraunhofer IWU steht die Verwertung dieser Ergebnisse in Form von Wissens- und Technologietransfer, die Weiterentwicklung der Ergebnisse im Rahmen von Forschungsprojekten sowie die Publikation der Ergebnisse im Vordergrund. Zudem ist eine weitere Zusammenarbeit zum Thema mit den Projektpartnern insbesondere Valeo sowie eine zukünftige Kooperation mit Austerlitz geplant.

TUD-ILK

Die Erkenntnisse aus der im Rahmen des Vorhabens beim Aufbau und der Durchführung umfangreicher gekoppelter Thermo-Strömungs-Simulationsrechnungen mit offenporigen Schaumstoffen führen bei TUD-ILK zu einer Vertiefung auf dem Felder der Forschung und Entwicklung im Bereich von Schaumstoffen. Insbesondere der zu Projektende verfolgte Ansatz des Einsatzes homogenisierter Ersatzwerkstoffe für den durchströmten Schaumstoff soll Rahmen der akademischen Grundlagenforschung weiterverfolgt werden. Die Ergebnisse fließen bei TUD-ILK synergetisch in die Lehre sowie in neue grundlagen- und anwendungsorientierte FuE-Projekte ein. Sie sichern bzw. schaffen somit auf Basis des Wissenszuwachses Arbeitsplätze für junge Akademiker bei TUD-ILK und tragen gleichzeitig zu einer Stärkung des Wissenschaftsstandortes Deutschland bei.

TU BAF - IART

Im Rahmen des Vorhabens konnten wertvolle Erkenntnisse im Bereich der Entschichtung und des werkstoffgerechten Recyclings von beschichteten Kunststoffen und Schäumen gewonnen werden. Diese Ergebnisse tragen nicht nur zur Erweiterung der wissenschaftlichen Grundlagen bei, sondern werden auch unmittelbar in die akademische Lehre integriert und Studierenden in Forschungspraktika sowie

Abschlussarbeiten zugänglich gemacht. Darüber hinaus lassen sich die erarbeiteten Inhalte und Methoden bereits in laufenden Projekten weiterverwenden und eröffnen Perspektiven für die Anwendung in einem aktuell laufenden Ausgründungsprojekt. Auf die wirtschaftlichen Erfolgsaussichten am IART wird detailliert im Erfolgskontrollbericht eingegangen. Durch die TU Bergakademie Freiberg wird – abgesehen von der angestrebten Akquise neuer Fördermittel basierend auf dem im Vorhaben erarbeiteten Wissen – keine unmittelbare wirtschaftliche Verwertung der Ergebnisse des Vorhabens geplant. Somit wird der im Projekt generierte Wissenszuwachs vor allem in der Lehre, in zukünftigen Forschungsprojekten sowie in der akademischen Nachwuchsförderung wirksam und trägt gleichzeitig zur Stärkung des Wissenschafts- und Innovationsstandorts bei.

NRU

Die im Rahmen dieses Forschungsprojektes gemachten Erkenntnisse hinsichtlich des Additiven 3D-Wachsdrukverfahrens und dem Mikrofeingussprozess zur Herstellung von komplexen Gitterzellstrukturen liefern einen wesentlichen Beitrag zur Verbesserung der Fähigkeiten und Wettbewerbsfähigkeit von NRU.

Es zeigt das hohe Potential des Stands der Technik und der Möglichkeiten einer Verfahrenskombination insbesondere im Hinblick auf Aktivitäten zur Ausweitung der On-Demand-Produktion im Sinne nachhaltiger und ressourceneffizienter industrieller Fertigungsverfahren auf.

Aufgrund der rasanten Geschwindigkeit technologischer Weiterentwicklungen bietet es die Bedingung zur Abgrenzung zum relevanten Wettbewerb und hilft bei der Akquirierung von Aufträgen entsprechender Anwendungsgebiete, welche zunehmend an Bedeutung gewinnen.

Die Nutzung der Erkenntnisse für weiterführende nationale und internationale F&E Aktivitäten ist angestrebt.

IPOINT

Das Forschungsprojekt erwies sich auch aus Unternehmensperspektive als äußerst wertvoll, da es neben wissenschaftlichen Ergebnissen vor allem praxisrelevante Erkenntnisse für die weitere Verwertbarkeit lieferte. Besonders hervorzuheben ist die erfolgreiche Anbindung an eine GUI, die als Prototyp umgesetzt wurde und wichtige Chancen für eine mögliche Anwendung im größeren Maßstab eröffnet. Damit konnte nicht nur die Weiterentwicklungspotenziale der Software Umberto in Kombination mit Product Sustainability aufgezeigt, sondern ein solches Konzept getestet werden.

Auch der weitere Aufbau und erstmaliges Testen des Konzeptes, dass Modelle als ein Datensatz für Komponenten agieren ist von großem Wert für IPOINT. Dies bietet sinnvolles Weiterentwicklungspotential und kann in Zukunft auch im Kundenkontext angewendet werden.

Darüber hinaus führte das Projekt zu einem gezielten Wissensaufbau im Bereich metallischer Werkstoffe, insbesondere hinsichtlich der Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten von Kupfer und Aluminium. Dieses Know-how kann zukünftig in Kundenprojekten eingesetzt werden und bietet damit einen unmittelbaren Mehrwert für das Unternehmen. Insgesamt trägt das Projekt dazu bei, technologische Innovationsfelder

frühzeitig zu erschließen und die Grundlage für eine nachhaltige Weiterentwicklung sowohl der Softwarelösungen als auch der werkstoffspezifischen Beratungskompetenzen zu legen.

2.10. Bekanntgewordene Konkurrenzprodukte und -verfahren im Bewilligungszeitraum

Siemens AG

Im Projektverlauf wurden keine weiteren Konkurrenzprodukte und -verfahren bekannt.

Fraunhofer ENAS

Im Projektverlauf wurden keine weiteren Konkurrenzprodukte und -verfahren bekannt.

Fraunhofer IWU

Im Projektverlauf wurden keine weiteren Konkurrenzprodukte und -verfahren bekannt.

TUD-ILK

Im Projektverlauf wurden keine Fortschritte Dritter identifiziert werden, die einen entscheidenden Einfluss für Änderungsbedarf in der Entwicklungsarbeit oder Zielsetzung von TUD-ILK hatten.

TU BAF - IART

Im Projektverlauf wurden keine Fortschritte Dritter identifiziert werden, die einen entscheidenden Einfluss für Änderungsbedarf in der Entwicklungsarbeit oder Zielsetzung von TU BAF - IART hatten.

NRU

Im Projektverlauf wurden keine weiteren Konkurrenzprodukte und -verfahren bekannt.

I Point

Im Projektverlauf wurden keine weiteren Konkurrenzprodukte und -verfahren bekannt.

2.11. Veröffentlichungen

Folgende Veröffentlichungen sind während der Projektlaufzeit erfolgt oder sind gegenwärtig in Vorbereitung:

Tabelle 20:Veröffentlichungen

Datum	Plattform, Titel	Art der Veröffentlichung	Status
06.07.2023	MetFoam 2023	Vortrag und Artikel im Tagungsband	abgeschlossen
25.10.2025	20. Münchner Leichtbausymposium	Vortrag und Artikel im Tagungsband	abgeschlossen
21.02.2024	Jahrestreffen Fachgruppe DECHEMA/VDI Zerkleinern und Klassieren	Vortrag	abgeschlossen
08.03.2024	Composite 2024	Vortrag	abgeschlossen
10. - 12. Juni 2024	NAFEMS DACH Regionalkonferenz 2024: Berechnung & Simulation im Engineering	Vortrag und Artikel im Tagungsband	abgeschlossen
10/2024	Aktuelle Forschung am Institut für Aufbereitungsmaschinen (ISBN: 978-3-031-64668-3)	Beitrag in Sammelband	abgeschlossen
11/2024	Recycling (Verlag: MDPI)	Peer reviewed Paper	
26.02.2025	Landshuter Leichtbau Colloquium,	Vortrag, Messeauftritt (Poster- und Demonstratorausstellung),	abgeschlossen
26.03.2025	Jahrestreffen Fachgruppe DECHEMA/VDI Zerkleinern und Klassieren	Vortrag	abgeschlossen
11/2025	Metals (Verlag: MDPI)	Peer reviewed Paper	Schreibprozess