

Additive Manufacturing von 3D Verbindungselementen im Bauwesen

Sachbericht zum Verwendungsnachweis – Teil I und II

Akronym:	AddMamBa
Fördermittelgeber:	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
Förderkennzeichen (FKZ):	03LB3019A, 03LB3019B, 03LB3019D, 03LB3019E
Laufzeit des Vorhabens:	01.11.2022 – 31.10.2025
Berichtszeitraum:	01.11.2022 – 31.10.2025
Verbundpartner:	RSB Rudolstädter Systembau GmbH RWTH Aachen mit: Lehrstuhl Digital Additive Production DAP Lehr- und Forschungsgebiet Nachhaltigkeit im Metallleichtbau MLB Lehrstuhl für Stahlbau und Leichtmetallbau STB Paul Kamrath Ingenieurrückbau GmbH Laser Melting Innovations GmbH Autodesk GmbH (assoziiert) Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V. (assoziiert) Schüco International KG (assoziiert)
Autoren:	Mathias Bemm, Jan Bernsmann, Lisa Chaouat, Paul Kamrath, Marvin Lüdecke, Dominik Pyschny, Joana Schulte, Justus Voelkel, Dawid Ziebura

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter den Förderkennzeichen 03LB3019A, 03LB3019B, 03LB3019D, 03LB3019E gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

I Kurzbericht

Im ersten Arbeitspaket wurden die Anforderungen, an die im Projekt zu entwickelnden Bauteile, definiert sowie eine Bestandsaufnahme des recyclebaren Stahlschrotts aus dem Gebäuderückbau durchgeführt. Die im Projekt berücksichtigten Bauteile umfassten biegesteife Strukturknoten und Halterungen für vorgehängte hinterlüftete Fassaden (VHF).

Für die Fassadenhalter wurden Anforderungen hinsichtlich Tragfähigkeit, bauphysikalischer Eigenschaften und Dauerhaftigkeit festgelegt. Im Fokus standen insbesondere die sichere Aufnahme von Wind- und Eigenlasten sowie die Reduzierung von Wärmebrücken. Für die Strukturknoten wurden Anforderungen an die Übertragung von Kräften und Momenten sowie an eine ausreichende Steifigkeit definiert. Zudem wurde eine montagefreundliche, wiederlösbare Verbindung angestrebt, um eine einfache (De-) Montage und Wiederverwendung zu ermöglichen. Als wissenschaftlich-technische Grundlage dienten die einschlägigen Regelwerke des Stahlbaus, insbesondere EN 10025, EN 1090-2 und EN 1993-1-1 (Eurocode 3).

Parallel wurde der Gebäuderückbau hinsichtlich geeigneter Recyclingmaterialien analysiert. Dabei erwiesen sich insbesondere Bewehrungsstähle aus Betonbauteilen als geeignetes Ausgangsmaterial für die Aufbereitung zu Metallpulver und den anschließenden Einsatz im pulverbettbasierten Laserstrahlschmelzen im Hinblick auf die angestrebte Erhöhung des Recyclinganteils von Bauschrott.

Im zweiten Arbeitspaket wurde eine Ökobilanz (Life Cycle Assessment, LCA) durchgeführt, um die Umweltwirkungen der entwickelten Fassadenhalter über ihren gesamten Lebenszyklus zu bewerten. Grundlage bildeten die Normen EN 15804 und DIN EN 15978, die den Lebenszyklus von Bauprodukten in Herstellungs-, Nutzungs- und End-of-Life-Phasen gliedern.

Untersucht wurden additiv gefertigte, geometrisch optimierte Fassadenhalter aus recyceltem Bewehrungsstahl sowie aus Edelstahl. Diese wurden mit konventionellen Fassadenhaltern aus Edelstahl und Aluminium verglichen. Für die Herstellungsphase wurde die Prozesskette der additiven Fertigung modelliert, bestehend aus Materialbereitstellung, Transport, Pulverherstellung, additiver Fertigung und Nachbearbeitung.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Umweltwirkungen der additiven Fertigung in der Herstellungsphase stark vom eingesetzten Strommix abhängen. Bei additiv gefertigten Haltern entstehen zunächst höhere Emissionen als bei konventionell gefertigten Haltern. Gleichzeitig führt die optimierte Geometrie der additiv gefertigten Halter zu deutlich reduzierten Wärmebrücken während der Nutzung, wodurch die Transmissionswärmeverluste der Gebäudehülle sinken. Dadurch können über die Nutzungsphase Energieverbräuche und Emissionen reduziert werden. Auf Gebäudeebene zeigte sich, dass die höheren Emissionen der Herstellung durch Einsparungen während der Nutzung überkompensiert werden können. Ergänzend wurden methodische Ansätze zur Bewertung von Recycling- und Wiederverwendungspotenzialen analysiert.

Im dritten Arbeitspaket wurde der Materialkreislauf für die additive Fertigung aufgebaut. Ziel war es, Bauschrott aus dem Gebäuderückbau aufzubereiten und als Ausgangsmaterial für die Herstellung von Metallpulver zu nutzen. Auf einen ursprünglich vorgesehenen Legierungsschritt wurde verzichtet, da bei vielen anthropogene Stahlquellen die eingesetzten Stahlgüten nachvollzogen werden können. Stattdessen wurden verschiedene Schrottchargen analysiert und mit Referenzmaterial verglichen.

Der eingesetzte Stahlschrott stammte aus realen Rückbauprojekten und wurde zunächst mechanisch aufbereitet, gereinigt und chemisch analysiert. Anschließend erfolgte die Pulverherstellung durch Gasverdüsung in einer industriellen Anlage. Die Prozessparameter wurden schrittweise angepasst, um eine geeignete Partikelgrößenverteilung und eine hohe Pulverausbeute zu erreichen.

Die resultierenden Metallpulver wurden hinsichtlich Partikelgrößenverteilung, chemischer Zusammensetzung, Morphologie und Fließeigenschaften charakterisiert. Die Untersuchungen zeigten überwiegend sphärische Partikel und eine für pulverbettbasierte additive Fertigungsprozesse geeignete Partikelgrößenverteilung. Insgesamt konnte gezeigt werden, dass aus rückgewonnenem Baustahlschrott ein geeignetes Metallpulver für das pulverbettbasierte Laserstrahlschmelzen hergestellt werden kann, wobei eine kontinuierliche materialanalytische Kontrolle erforderlich bleibt.

In Arbeitspaket vier bestand die Aufgabe darin, eine kostengünstige, flexible und bedienerfreundliche PBF-LB/M-Maschine zu entwickeln. Ein zunächst verfolgtes Konzept mit kartesisch geführter Mehrfachoptik zur parallelen Kopierbelichtung erwies sich als wirtschaftlich, jedoch nicht als sinnvoll. Stattdessen wurde eine bestehende LMI-Maschine als modulare Plattform genutzt, um kostengünstige Scanner- und Lasersysteme sowie eine austauschbare Baukammer, eine adaptive Schutzgasführung, ein neues Pulverhandling und ein kartuschenbasiertes Filtersystem zu entwickeln und zu testen. Fachlich knüpfte LMI an den Stand der Technik im Bereich Laseroptiken, bekannte Kalibrierverfahren wie Skywriting und Polygonkorrektur, sowie interne Softwareentwicklungen an. Die Arbeiten erfolgten in enger Abstimmung mit den Verbundpartnern, insbesondere hinsichtlich der Anforderungen aus dem Bauwesen und dem Austausch von Prozessdaten.

Parallel wurden geeignete Prozessparameter für die Verarbeitung des aus Baustahlschrott hergestellten Pulvers im PBF-LB/M-Verfahren ermittelt. In einer Parameterstudie wurden Laserleistung, Scangeschwindigkeit und Spurabstand variiert, um deren Einfluss auf Bauteildichte, Mikrostruktur und Prozessstabilität zu untersuchen.

Die Ergebnisse zeigen, dass mehrere Parameterkombinationen sehr hohe relative Bauteildichten ermöglichen. Besonders geeignet erwiesen sich mittlere volumetrische Energiedichten. Auf dieser Grundlage wurde ein stabiler Prozessparametersatz identifiziert, der eine hohe Bauteildichte und eine vergleichsweise hohe Aufbaurate ermöglicht.

Im fünften Arbeitspaket wurden Bauteilgestaltung, Optimierung und Simulation der Verbindungselemente untersucht. Anstelle eines ursprünglich geplanten automatischen Bauteilgenerators wurde ein praxisorientierter webbasierter Konfigurator entwickelt, der auf Basis von Gebäude- und Fassadenparametern geeignete Halter aus einer Datenbank auswählt und einen statischen Nachweis bereitstellt.

Parallel wurden Fassadenhalter und reversible Strukturknoten strukturell optimiert. Für die Fassadenhalter erfolgte eine zweistufige Optimierung aus Topologieoptimierung und anschließender geometrischer Parameterstudie, um eine materialeffiziente Geometrie mit reduzierter Wärmebrückenwirkung zu entwickeln. Die Tragfähigkeit wurde mittels Finite-Elemente-Simulationen und experimenteller Prüfungen validiert. Für reversible Knotenverbindungen wurden verschiedene Konzepte, darunter Sigmaknoten und Schwalbenschwanzverbindungen, untersucht. Ergänzend wurde ein prädiktives Schadensmodell implementiert, um das Versagensverhalten additiv gefertigter Bauteile numerisch abzubilden.

Im sechsten Arbeitspaket erfolgte die experimentelle und numerische Materialcharakterisierung der additiv gefertigten Werkstoffe. Hierzu wurden Zugversuche und Kerbschlagbiegeversuche durchgeführt. Die schrottbasierten Pulver zeigten hohe Festigkeitsniveaus, jedoch begrenzte Duktilität und Zähigkeit. Eine Referenzcharge aus S700-Stahl wies ein ausgewogeneres Eigenschaftsprofil mit höherer Zähigkeit auf.

Zur Validierung der Fassadenhalter wurden zusätzlich Großprobenversuche durchgeführt. Tragfähigkeitsversuche bestätigten die mechanische Funktionsfähigkeit der topologieoptimierten Halter. Hotbox-Versuche (Heizkastenverfahren) zeigten zudem eine deutlich reduzierte Wärmebrückenwirkung im Vergleich zu konventionellen Haltern. Auf Basis der experimentellen Ergebnisse wurden Material- und Schädigungsmodelle kalibriert und in Finite-Elemente-Simulationen implementiert.

**Abschlussbericht AddMamBa (Teil I & II):
Additive Manufacturing von 3D Verbindungselementen
im Bauwesen**



Im siebten Arbeitspaket wurde die gesamte Prozesskette vom Bauschrottrecycling über die Pulverherstellung bis zur additiven Fertigung anhand eines Demonstratortragwerks validiert. Hierzu wurden optimierte Sigmaknoten additiv gefertigt. Die Geometrie wurde an die Anforderungen des PBF-LB/M-Prozesses angepasst, um eine möglichst stützenfreie Herstellung zu ermöglichen.

Nach Abschluss der Fertigung konnten die Demonstratorbauteile erfolgreich an die einzelnen Tragwerkselemente angeschweißt werden und die Elemente mithilfe der Sigmaknoten montiert und demontiert werden, wodurch die Funktionsfähigkeit der entwickelten Verbindungselemente sowie der gesamten Prozesskette bestätigt wurde.

II Eingehende Darstellung

Inhaltsverzeichnis

AP1 Anforderungsprofil und Bestandsaufnahme	6
AP1.1 Festlegung der Bauteilanforderungen.....	6
AP1.2 Identifizierung, Kategorisierung und Beschaffung recycelbarer Baustoffe.....	8
AP2 Life Cycle Assessment (LCA).....	9
AP2.1 Herstellungsphase der Verbindungselemente	11
AP2.2 Nutzungsphase	20
AP2.3 Rückbau / Recycling / Wiederverwendung	21
AP2.4 Life Cycle Assessment	22
AP3 Materialkreislauf & Materialherstellung	26
AP3.1 Recycling und Legierung Bauschrott aus AP1.....	26
AP3.2 Legierungsverdüsung und Analyse von Material und Pulver	27
AP4 System- und Prozessentwicklung	31
AP4.1 AM-Systemaufbau hinsichtlich neuer Werkstoffe & skaliertem Bauraum	31
AP4.2 Ermittlung AM-Prozessparameter und spezifischer Rahmenbedingungen	32
AP5 Bauteilgestaltung, -optimierung & -simulation	37
AP5.1 Konzeptentwicklung, Ableitung algorithmisches Designregelwerk	37
AP5.2 Implementierung web-basierter parametrischer Bauteilkonfigurator	41
AP5.3 Statische und bauphysikalische Bauteiloptimierung.....	56
AP5.4 Predictive Damage Modeling für AM Bauteile	72
AP6 Materialcharakterisierung und Analyse des Bauteilverhaltens.....	73
AP6.1 Kleinprobenversuche.....	73
AP6.2 Erstellung einer Materialkarte.....	76
AP6.3 Großprobenversuche.....	76
AP6.4 Modellvalidierung.....	77
AP7 Validierung und Demonstration	92
AP7.1 Fertigung des Bauteils unter Prozessüberwachung und Validierung der Prozesskette	92
AP7.2 Fertigung eines Demonstrators	97
Veröffentlichung der Ergebnisse.....	100
Literatur	102

AP1 Anforderungsprofil und Bestandsaufnahme

Im ersten Arbeitspaket wurden entsprechend der Vorhabensbeschreibung die Bauteilanforderungen definiert und eine Bestandsaufnahme des Bauschrottrecyclings aus dem Gebäuderückbau vorgenommen. Abweichend von der ursprünglichen Planung, bei der sowohl gelenkige und biegesteife Strukturknoten als auch Fassadenhalter (Fest- und Gleitpunkte) für vorgehängte hinterlüftete Fassaden (VHF) und Elementhalterungen bzw. Anschlussschuhe für Pfosten-Riegel-Konstruktionen im Rahmen des Projektes Berücksichtigung finden sollten, fand eine Fokussierung auf biegesteife Strukturknoten und Halter für VHF statt. Dies stellte sicher, dass die genannten Bauteiltypen in ausreichendem Umfang untersucht werden konnten. Die Vorgehensweise und die erzielten Ergebnisse aus dem ersten Arbeitspaket werden im Folgenden erläutert.

AP1.1 Festlegung der Bauteilanforderungen

Im Rahmen der Bestandsaufnahme wurden unter den prozessbedingten Restriktionen der additiven Fertigung (englisch *Additive Manufacturing*, AM) mittels Pulverbettbasiertem Laserstrahlschmelzen für Metalle (PBF-LB/M) Potentiale für Fassadenhalter für VHF und Steckverbindungen für Strukturknoten identifiziert.

Anforderungen an Fassadenhalter:

Der Abtrag von Lasten einer VHF erfolgt in der Regel über ein System von Fest- und Gleitpunkten, die diverse Anforderungen erfüllen müssen, um eine sichere und dauerhafte Befestigung der Fassadenbekleidung zu gewährleisten. In Bezug auf die Vermeidung von Wärmebrücken wird Ziel-Wert für den punktbezogenen Wärmedurchgangskoeffizient von $\chi_{FP} = 0,0040 \text{ W/K}$ für einen Festpunkt und $\chi_{GP} = 0,0025 \text{ W/K}$ für einen Gleitpunkt wird angestrebt.

Hinsichtlich der Tragfähigkeit müssen die Fassadenhalter die Windsog- und Druckkräfte für die Bemessung nach DIN EN 1991-1-4 (Windlasten) und DIN 1055-4 (Lastannahmen für Bauten) aufnehmen können.

Für den Referenzstandort Aachen wird im Folgenden eine Beispielbemessung aufgezeigt:

- Eigenlast aus Fassade: $g_k = 0,10 \text{ kN/m}^2$ (Aluminiumpaneele)
- Windlasten:
 - Festlegung der Gebäudeabmessungen: Länge: 45 m / Breite: 25 m / Höhe: 15 m
 - Windzone 2, Binnenland: vereinfachter Böengeschwindigkeitsdruck für Bauwerke bis 25 m Höhe
 - $q_p = 0,80 \text{ kN/m}^2$
 - Außendruckbeiwerte $c_{pe,10}$ (für eine luftdichte Außenwandbekleidung, Lasteinzugsflächen $> 10 \text{ m}^2$)
 - Windsog: ca. -0,4 (mittlere Wandbereiche) bis -1,2 (Randbereich)
 - Winddruck: ca. 0,75
 - maximale Windlasten:
 - Windsog: $w_{S,k} = -0,96 \text{ kN/m}^2$
 - Winddruck: $w_{D,k} = 0,60 \text{ kN/m}^2$
- Resultierende Bemessungslasten für einen maßgebenden Fassadenhalter:
- Annahme: 2 Halter pro m^2 (0,5 Festpunkte + 1,5 Gleitpunkte)
- statisches System der Außenbekleidung: Zweifeldträger
- Lastfaktor 1 Auflagerkraft: 1,25
- statisches System Unterkonstruktion: Dreifeldträger mit Kragarmen, maßgebende Laststellung
- Lastfaktor 2 Auflagerkraft: 1,25
- Vertikallast (nur Festpunkte):
 - $V_d = 270 \text{ N}$

- Horizontallast (alle Halter):
 - Windsog (Randbereich): $H_d^- = 1125 \text{ N}$
 - Winddruck (Randbereich): $H_d^+ = 703 \text{ N}$

Anforderungen an Steckverbindungen für Strukturknoten:

Es müssen alle auftretenden Lasten (z.B. Zug, Druck, Biegung, Moment) berücksichtigt und sicher übertragen werden. Die Normalkraft-, Querkraft- und Biegetragfähigkeit sollten in der gleichen Größenordnung liegen wie die des angeschlossenen Profils.

Für einen Anschluss sind im Folgenden beispielhafte Tragfähigkeitsanforderungen für den Anschluss eines IPE 200 Profils aus S235 angegeben:

- $N_{pl,Rd} = 670 \text{ kN}$
- $V_{pl,y,Rd} = 231 \text{ kN}$
- $V_{pl,z,Rd} = 190 \text{ kN}$
- $M_{pl,y,Rd} = 52 \text{ kNm}$
- $M_{pl,z,Rd} = 10,5 \text{ kNm}$

Darüber hinaus ist eine ausreichende Steifigkeit des Strukturknotens unter Berücksichtigung der auftretenden Verformungen notwendig, um unerwünschte Schwingungen und Durchbiegungen zu verhindern. Hinsichtlich der (De-) Montage auf der Baustelle wird ein einfacher und schneller Auf- und Abbau ohne Spezialwerkzeug durch eine passgenaue Verbindung und sichere und eindeutige Positionierung der einzelnen Bauteile angestrebt, um eine Wiederverwendung aller Komponenten zu ermöglichen.

Materialanforderungen

Der Einsatz von Stahlwerkstoffen im Bauwesen unterliegt klar definierten normativen Anforderungen, die sicherstellen sollen, dass tragende Bauteile über ausreichende Festigkeit, Duktilität und Zähigkeit verfügen. Maßgebend sind insbesondere die Produktnormen für Baustähle, die Ausführungsnormen für tragende Bauteile sowie die Bemessungsregeln des Eurocode 3.

Die grundlegenden mechanischen Anforderungen an Baustähle sind in der Normenreihe EN 10025 [1–4] festgelegt. Abhängig von der Stahlgüte und der Blechdicke werden Mindestwerte für die Streckgrenze von typischerweise 355 MPa (S355), 460 MPa (S460) bis hin zu 690–700 MPa (S690/S700) gefordert. Zusätzlich sind Mindestwerte für die Zugfestigkeit sowie für die Bruchdehnung vorgegeben, wobei für gängige Baustähle Bruchdehnungen von etwa 15–22% gefordert werden, abhängig von Güte und Abmessung.

Ein zentrales Kriterium für den Einsatz im Stahlbau stellt die Kerbschlagzähigkeit dar. Für weit verbreitete Güten wie S355J2 oder S460J2 fordert EN 10025 [1–4] eine Mindestkerbschlagarbeit von 27 J bei -20°C . Für höherfeste vergütete Baustähle wie S690QL werden ebenfalls 27 J, häufig jedoch bei tieferen Prüftemperaturen (z. B. -40°C), gefordert. Diese Grenzwerte dienen der Sicherstellung eines duktilen Bruchverhaltens und der Vermeidung spröder Versagensmechanismen, insbesondere unter Kältebeanspruchung. Eine Übersicht über im Stahlbau verwendete Güten mit entsprechenden Kennwerten ist in Tabelle 1 aufgelistet.

Die EN 1090-2 [5] für die Ausführung tragender Stahlbauteile setzt voraus, dass ausschließlich Werkstoffe verwendet werden, die diese produktnormativen Anforderungen erfüllen. Für geschweißte Bauteile ist ergänzend EN ISO 15614 relevant, die im Rahmen von Schweißverfahrensprüfungen ebenfalls Mindestanforderungen an die Kerbschlagarbeit des Grund- und Schweißmaterials vorgibt, wobei in der Regel dieselben Grenzwerte wie für das Ausgangsmaterial gelten.

Tabelle 1: Mechanischen Eigenschaften ausgewählter Stahlgüten

Stahlgüte	Norm	$f_{y,min}$ [MPa]	$f_{u,min}$ [MPa]	$A_{5,min}$ [%]	Kerbschlagarbeit (KV)
S355J2	EN 10025-2 [1]	355	470	22	27 J bei -20°C
S460N	EN 10025-3 [2]	460	540	17–18	27 J bei -20°C
S460M	EN 10025-4 [3]	460	540	18	27 J bei -20°C
S700M	EN 10025-4 [3]	700	750	14	27 J bei -20°C
S960Q	EN 10025-6 [4]	960	980	10	27 J bei -20°C

Die Bemessungsregeln des Eurocode 3 (EN 1993-1-1 [6]) basieren implizit auf der Annahme eines duktilen Werkstoffverhaltens. Für die Anwendung plastischer Bemessungskonzepte wird vorausgesetzt, dass der Werkstoff ausreichende Bruchdehnung und Zähigkeit aufweist und die in den Produktnormen definierten Mindestwerte erfüllt. Werkstoffe, die diese Grenzwerte unterschreiten, sind normativ nicht ohne Weiteres für tragende Bauteile zugelassen, da die Sicherheitsannahmen des Eurocode 3 dann nicht uneingeschränkt gelten.

Zusammenfassend lassen sich für den klassischen Stahlbau als maßgebende Grenzwerte insbesondere eine ausreichende Streckgrenze entsprechend der vorgesehenen Stahlgüte sowie eine Mindestkerbschlagarbeit von 27 J bei der relevanten Prüftemperatur hervorheben. Diese Anforderungen bilden die Grundlage für die sichere und normkonforme Anwendung von Stahlwerkstoffen im Bauwesen.

AP1.2 Identifizierung, Kategorisierung und Beschaffung recycelbarer Baustoffe

Die Bauwirtschaft, insbesondere der Rückbau von Gebäuden, ist einer der größten Abfallverursacher in Deutschland. Nachhaltige Verfahren und Methoden sollen das Abfallaufkommen reduzieren. In der Vergangenheit haben Recyclingverfahren Wege gefunden, Rohstoffe auf materieller Ebene so weit wie möglich wiederzuverwenden. Die abzureißende Bausubstanz wurde als Rohstofflager betrachtet.

Es wurde eine Analyse des aktuellen Abbruchprozesses durchgeführt, um festzustellen, welcher Bauabfall direkt recycelt und als Rohstoff für die additive Fertigung verarbeitet werden kann. Neben normalem Stahlschrott sollte auch Stahlschrott verwendet werden, der üblicherweise nicht recycelt wird. Dies ist beispielsweise bei Bewehrungsstahl aus kleineren Gebäuden der Fall, dessen Rückgewinnung normalerweise wirtschaftlich nicht rentabel ist. Dieser Stahlschrott weist eine der höchsten Verlustraten im Materialkreislauf auf, da er in Betonkonstruktionen eingebettet ist und es besonders schwierig ist, kleine Rückstände aus dem Bauabfall zu trennen.

Bei der Identifikation der möglichen Schrottsorten zur Verwendung für das 3D Druckverfahren stellte sich heraus, dass vorwiegend Bewehrungsstähle einsatzbar sind. Dabei stehen die Abmessungen des Ausgangsmaterials im Vordergrund. Insbesondere Träger sind nicht für die Pulverisierung geeignet, weil sie nur mit großem Aufwand für den Schmelztiegel vorbereitet werden können. Bewehrungsstähle hingegen haben kompakte Abmessungen, sind einfach zu kürzen und können dicht gelagert werden, so dass die Ausbeute im Pulverisierungsprozess am größten ist. In der Vorverarbeitung der unterschiedlich alten Stähle sind kaum Unterschiede erkennbar. Gerade Bewehrungsstähle sind von einer über die Jahrzehnte gleichbleibenden Qualität. Es finden durch die Einbettung in Beton auch kaum oder nur wenige Alterungsprozesse statt. Im Unterschied zur ursprünglichen These handelt es sich um ein homogenes Ausgangsmaterial. Dies wirkt sich positiv aus, weil dadurch die Reproduzierbarkeit von Ergebnissen sehr wahrscheinlich wird.

AP2 Life Cycle Assessment (LCA)

Die Ökobilanzierung (englisch *Life Cycle Assessment*, LCA) ist eine Methode zur Bewertung von Umweltauswirkungen und stellt so ein Instrument zur Messbarkeit ökologischer Nachhaltigkeit dar. Betrachtet werden je nach Ziel und Untersuchungsrahmen Abschnitte oder der gesamte Lebenszyklus eines Produkts, von der Rohstoffgewinnung bis zur Entsorgung. Ziel der LCA ist es, anhand wissenschaftlicher Methoden Umweltauswirkungen vergleichbar darzustellen und so umweltbezogene Entscheidungsprozesse zu unterstützen.

Das Europäische Komitee für Normung (französisch *Comité Européen de Normalisation*, CEN) führte 2005 das Technische Komitee CEN/TC 350 für die Entwicklung von Normen zur Bewertung der Nachhaltigkeit von Bauwerken ein. Eine Übersicht der wichtigsten Normen ist Abbildung 1 zu entnehmen.

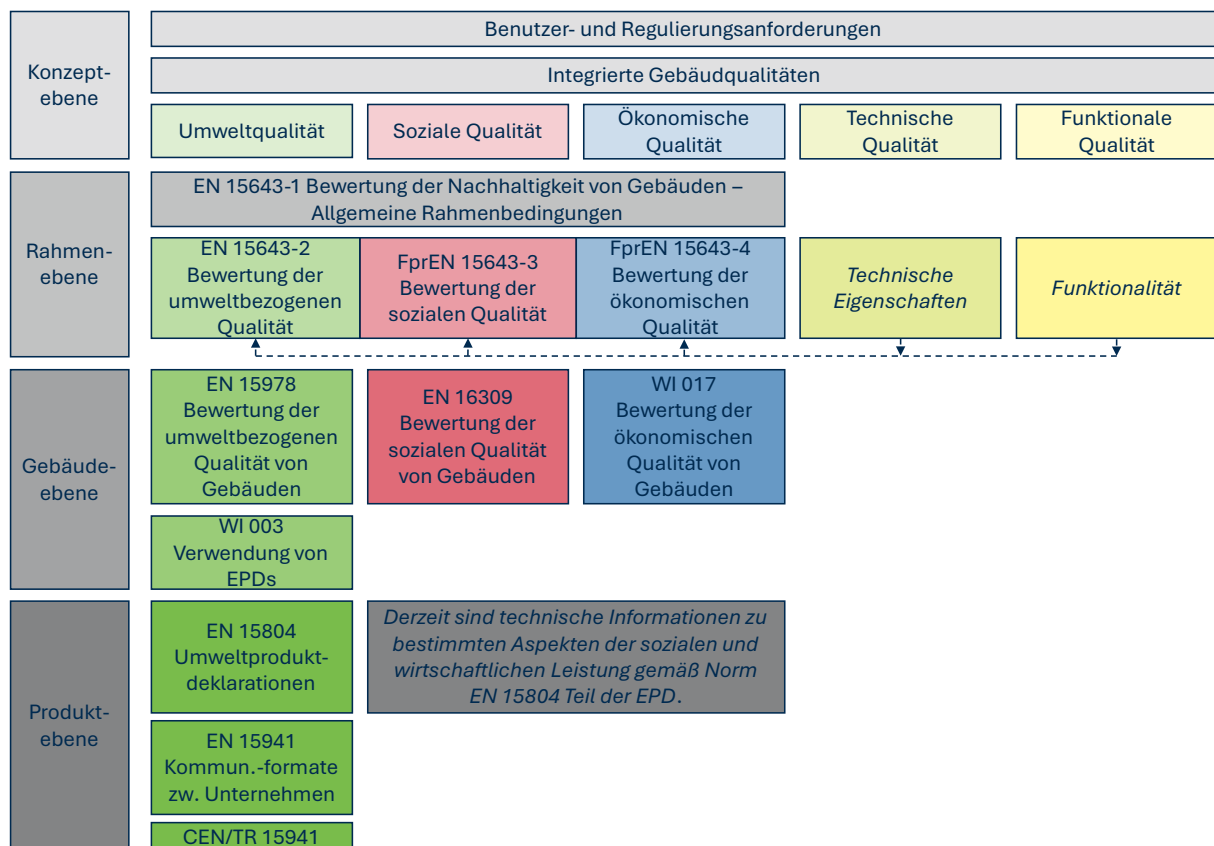


Abbildung 1: Übersicht über Normen der CEN/TC 35

Die Norm DIN EN 15978 regelt die Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden. Nach dieser ist der Lebenszyklus von Bauprodukten in die Module A bis D einzuteilen. Die Module A bis C, erfassen die Herstellungsphase (Modul A1-A3), die Bauphase (Modul A4-A5), die Nutzungsphase (Module B1-B7) und die Entsorgungsphase (Module C1-C4). Modul D erweitert den Lebenszyklus, um potenzielle Vorteile und Belastungen, die außerhalb der Systemgrenzen liegen, zu berücksichtigen. Dabei werden Wiederverwendung, Rückgewinnung und Recyclingpotenziale bewertet. Eine Übersicht über die Module ist Abbildung 2 zu entnehmen.

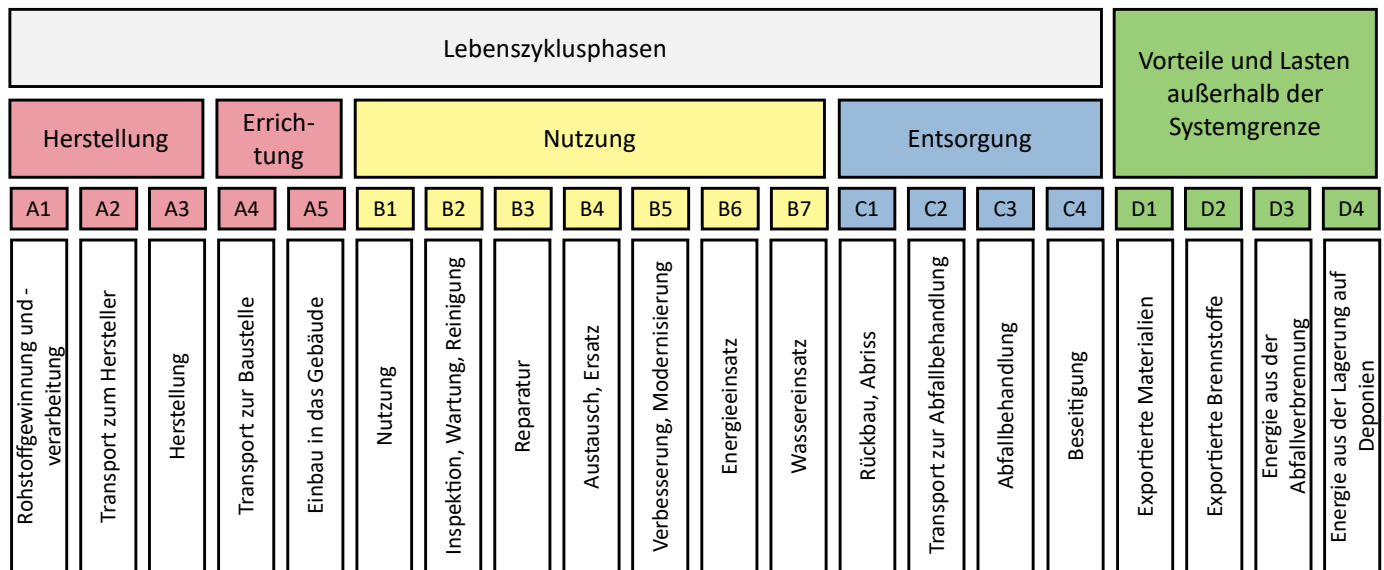


Abbildung 2: Lebenszyklusphasen nach DIN EN 15978

Die Einbeziehung von Modul D führt zu einer Erweiterung der Systemgrenze über den eigentlichen Lebenszyklus hinaus, indem potenzielle nachgelagerte Nutzen und Belastungen berücksichtigt werden. In der Praxis wird Modul D jedoch nicht einheitlich gehandhabt. Die DGNB (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen) berücksichtigt in ihrer Bewertungsmethodik beispielsweise ausschließlich die Module A-C. Die Bewertung der Umweltwirkungen erfolgt auf Basis der Summe der Umweltauswirkungen für diese Module und wird mit definierten Zielwerten verglichen. Modul D wird zwar ausgewiesen, jedoch nicht in die Bewertung einbezogen und hat keinen Einfluss auf das Bewertungsergebnis.

Untersuchungsgegenstand und Varianten

Ziel der vorliegenden Ökobilanz ist die Bewertung des additiv gefertigten Fassadenhalters mit optimierter Geometrie aus zurückgewonnen Bewehrungsstahl (V1a). Da die additive Fertigung mit Bewehrungsstahl derzeit nur eingeschränkt industriell verfügbar ist und Edelstahl als Werkstoff für das Verfahren etabliert ist, wurde zusätzlich eine Variante aus additiv gefertigtem Edelstahl (V1b) bilanziert. Für beide Varianten wird angenommen, dass sich das Bauteilgewicht vom eingesetzten Stahlprodukt (Bewehrungsstahl oder Edelstahl) nicht signifikant unterscheidet. Die Masse ergibt sich aus der Haltergeometrieoptimierung mit Volumen von $2,34 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$ für den Festpunkthalter und $1,60 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$ für den Lospunkthalter, sowie eine Dichte von 7850 kg/m^3 .

Zum Vergleich mit konventionellen Fassadenhalter werden:

- ein Standardhalter aus Edelstahl (V2a) und
- ein Standardhalter aus Aluminium (V2b) betrachtet.

Die Varianten unterscheiden sich sowohl hinsichtlich der eingesetzten Materialien als auch der Bauteilgeometrie und damit auch im Bauteilgewicht (siehe Tabelle 2).

Tabelle 2: Variantenübersicht und Bauteilgewichte

Variante	Beschreibung	Material	Herstellverfahren	Festpunkthalter [kg]	Lospunkthalter [kg]
V1a	Optimierter Halter (AM)	Bewehrungsstahl	Additiv gefertigt	0,212	0,126
V1b	Optimierter Halter (AM)	Edelstahl	Additiv gefertigt	0,212	0,126
V2a	Standardhalter	Edelstahl	Konventionell	1,829	1,215
V2b	Standardhalter	Aluminium	Konventionell	0,656	0,438

Die Unterschiede in Materialwahl und Gewicht beeinflussen nicht nur die Herstellungsphase (siehe AP 2.1), sondern wirken sich auch auf die Nutzungsphase aus (siehe AP 2.2), da reduzierte Wärmebrücken zu geringeren Transmissionswärmeverlusten führen. Darüber hinaus ergeben sich materialbedingte Unterschiede im Rückbau-, Recycling- und Wiederverwendungspotenzial (siehe AP 2.3). Diese Aspekte fließen anschließend in die ganzheitliche ökologische Bewertung im Rahmen der Lebenszyklus Betrachtung ein (siehe AP 2.4).

AP2.1 Herstellungsphase der Verbindungselemente

Modellierung

V1 – Optimierte Halter

Zur Abbildung der Herstellungsphase der additiv gefertigten Fassadenhalter (V1) wurden Ökobilanzmodelle der Fertigungsschritte aufgebaut. Ziel war es, die Prozesskette unter Verwendung verfügbarer Industrie- und Literaturdaten möglichst realitätsnah abzubilden.

Die Modellierung wurde mit der Software *LCA for Experts* von *sphera* durchgeführt. Die Prozessketten umfasst die Schritte Materialbereitstellung, Transport, Pulverherstellung, additive Fertigung sowie Nachbearbeitung.

Die Prozessparameter basieren auf einer Kombination aus Literaturdaten und projektspezifischen Annahmen. Insbesondere die eingesetzten Energiemengen sowie Argonverbräuche wurden auf Basis Veröffentlichungen zur additiven Fertigung metallischer Bauteile zusammengestellt [7–10].

Zu berücksichtigen ist, dass die Energiebedarfe aus der Literatur eine hohe Bandbreite aufweisen. Diese Bandbreite resultiert unter anderem aus unterschiedlichen Maschinenkonfigurationen, Auslastungsgraden oder aus der Bauteilgeometrien. Die festgelegten Werte stellen daher keine allgemeingültigen Werte dar, sondern repräsentieren literaturbasierte Größenordnungen.

Überblick der Herstellungsphase

Die modellierte Prozesskette für V1a umfasst:

- Schritt 1: Materialbereitstellung – Rückgewinnung von Bewehrungsstahl
- Schritt 2: Transport des rückgewonnenen Bewehrungsstahls
- Schritt 3: Pulverherstellung durch Gasverdüsung (englisch *atomization*)
- Schritt 4: Additive Fertigung mittels PBF-LB/M
- Schritt 5: Nachbearbeitung - Abtrennen von der Bauplattform (englisch Post-processing)

Für V1b unterscheidet sich die Prozesskette ausschließlich in den ersten beiden Schritten:

- Schritt 1: Materialbereitstellung – Edelstahl
- Schritt 2: Transport von Edelstahl

Die Schritte 3 - 5 wurden für V1a und V1b identisch modelliert. Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich die Energiemenge der Pulverherstellung theoretisch zwischen beiden Varianten unterscheiden könnten, da rückgewonnener Bewehrungsstahl hinsichtlich Oberflächenzustand, Reinheit oder Korrosionsanteilen von neu hergestelltem Edelstahl abweicht. Mangels verfügbarer Daten wird dieser Unterschied nicht abgebildet. Zur Veranschaulichung sind in Abbildung 3 und Abbildung 4 die Prozessketten für V1a und V1b dargestellt.

Abschlussbericht AddMamBa (Teil I & II): Additive Manufacturing von 3D Verbindungselementen im Bauwesen

Production of an Additively Manufactured Faade Bracket from Recovered Reinforcing Steel

Prozess-PlanReferenzgrossen
Es werden die Namen der Basis-Prozesse angezeigt.

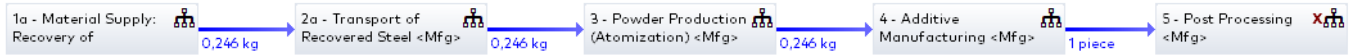


Abbildung 3: Herstellungsprozesskette V1a

Production of an Additively Manufactured Faade Bracket from Stainless Steel

Prozess-PlanReferenzgrossen
Es werden die Namen der Basis-Prozesse angezeigt.



Abbildung 4: Herstellungsprozesskette V1b

Nachfolgend werden die einzelnen Schritte genauer beschrieben.

Schritt 1: Materialbereitstellung

Die Materialbereitstellung von Bewehrungsstahl wird als Ruckgewinnungsprozess aus Stahlbeton abgebildet. Es wird angenommen, dass im Rahmen eines Stahlbetonabbruchs der überwiegende Anteil des Bewehrungsstahls direkt rückgewonnen wird (95 %). Der verbleibende Anteil (5 %) wird anschließend durch eine magnetische Separation aus dem aufgebrochenen Beton gewonnen.

Im ersten Schritt erfolgt eine mechanische Zerkleinerung des Betonabbruchs (Pulverisierung), wodurch ein Großteil des Bewehrungsstahls freigelegt wird. Unter Annahme üblicher Maschinenleistungen sowie eines spezifischen Brennstoffverbrauchs von etwa 0,18 kg/kWh [11] ergibt sich hierfür ein spezifischer Verbrauch in der Größenordnung von etwa 0,1 - 0,2 kg Diesel pro kg rückgewonnenem Stahl. Für die Modellierung wurde konservativ der obere Wert angesetzt.

Im zweiten Schritt erfolgt eine weitere Aufbereitung des Materials in einer Recyclinganlage mit magnetischer Separation. Für diesen Prozess ergibt sich ein zusätzlicher spezifischer Dieserverbrauch von etwa 0,03 kg / kg Stahl.

Der Dieserverbrauch wird im Modell über den Datensatz „DE: Diesel mix at filling station“ (*sphera*) berücksichtigt. Die Emissionen aus der Verbrennung werden mit einem Emissionsfaktors nach IPCC (2019 Refinement, Vol. 2, Chapter 2) modelliert [12]. Die modellierte Rückgewinnung des Bewehrungsstahls ist in Abbildung 5 dargestellt.

1a - Material Supply: Recovery of Reinforcing Steel

Prozess-PlanReferenzgrossen
Es werden die Namen der Basis-Prozesse angezeigt.

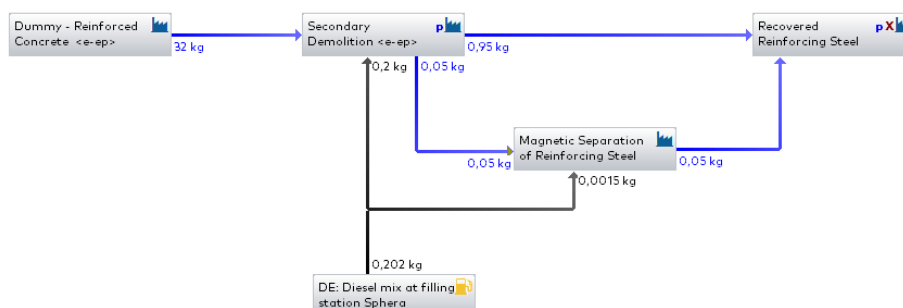


Abbildung 5: Rückgewinnung von Bewehrungsstahl (V1a - Schritt 1)

Tabelle 3 zeigt die Prozessinputs für V1a - Schritt 1.

Tabelle 3: Prozessinputs für V1a - Schritt 1

Parameter	Wert	Einheit
Input Stahlbeton	32	kg
Rückgewonnener Bewehrungsstahl	1,0	kg
Magnetisch separierter Stahl	0,05	kg
Dieserverbrauch Abbruch	0,2	kg / kg Stahl
Dieserverbrauch Magnetische Separation	0,03	kg / kg Stahl
Emissionsfaktor Diesel	3,2	kg CO ₂ e / kg Diesel

Für die Variante V1b aus martensitischem Edelstahl vom Typ 17-4 PH wird ein generischer Datensatz aus der *sphera*-Datenbank zur Herstellung von nichtrostendem Stahl in Form warmgewalzter Grobbleche (Quarto plates) verwendet („RER: Stainless steel Quarto plate (316)“). Dieser bildet die Produktion von der Wiege bis zum Werkstor unter durchschnittlichen europäischen Produktionsbedingungen ab. Der verwendete Datensatz basiert auf einer überwiegend schrottbasierten Herstellung von Edelstahl.

Der Prozess umfasst das Einschmelzen im Elektrolichtbogenofen, die Entkohlung im AOD-Konverter, die Sekundärmetallurgie im Pfannenofen sowie das Stranggießen zu Brammen. Durch Warmwalzen und nachfolgende Prozesse wie Glühen und Beizen entstehen die fertigen Quarto-Bleche.

Schritt 2: Transport

Für den Transport des eingesetzten Stahls zwischen Materialgewinnung und additiver Fertigung wurden unterschiedliche Transportdistanzen betrachtet. Ziel war es zu prüfen, ob und in welchem Umfang sich die Entfernung zwischen Materialquelle und Fertigungsstandort auf die Ergebnisse auswirkt.

Für Edelstahl wurde von einer vergleichsweise größeren Verfügbarkeit von Produktionsstandorten ausgegangen. Entsprechend wurden folgende Distanzen betrachtet:

- 100 km (regional)
- 300 km (überregional)
- 500 km (Worst case überregional)

Für Bewehrungsstahl wird aufgrund der derzeit geringeren Verbreitung von AM-Produktionsstandorten von größeren Transportdistanzen ausgegangen. Hier wurden folgende Szenarien angesetzt:

- 300 km (überregional, Baseline)
- 800 km (grenzüberschreitend / wenige Anbieter)
- 1.200 km (Worst Case innerhalb Europas).

Schritt 3: Pulverherstellung durch Gasverdüsung

Die Pulverherstellung wird für beide Materialvarianten identisch modelliert. Der Energiebedarf der Atomisierung sowie der Argoneinsatz basieren auf Literaturwerten nach Liu et al [7]. Für die Herstellung des Pulvers für einen Festpunkthalter werden 1,72 MJ elektrische Energie sowie $9,23 \times 10^{-5}$ kg Argon angesetzt (siehe Abbildung 6).

3 - Powder Production (Atomization)

Prozess-PlanReferenzgrößen
Es werden die Namen der Basis-Prozesse angezeigt.

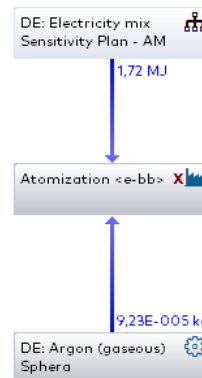


Abbildung 6: Plan für die Pulverherstellung durch Gasverdüsung (V1a und V1b - Schritt 3)

Schritt 4: Additive Fertigung mittels PBF-LB/M

Die additive Fertigung wird für beide Materialvarianten identisch modelliert, da derselbe Fertigungsprozess (PBF-LB/M) auf einer EOS M 290 Anlage (EOS GmbH) verwendet wurde.

Für die Herstellung von sechs Festpunkthaltern betrug die Gesamtprozessdauer 65 h 45 min. Bei einer durchschnittlichen Leistungsaufnahme der Anlage von 2,4 kW ergibt sich daraus ein Gesamtstromverbrauch von:

$$E = 2,4 \text{ kW} \cdot 65,75 \text{ h} = 158 \text{ kWh}.$$

Der Energieverbrauch wurde auf einen einzelnen Festpunkthalter normiert, woraus sich ein Strombedarf von 26,3 kWh (entspricht 94,6 MJ) pro Halter ergibt. Der im Modell angesetzte Strombedarf von 110 MJ berücksichtigt zusätzlich systembedingte Verluste.

Während des Fertigungsprozesses wird Argon als Schutzgas eingesetzt. Der Gesamtverbrauch für sechs Halter betrug 22,71 m³ (Spülung der Prozesskammer sowie kontinuierliche Gaszufuhr). Auch dieser Wert wurde auf einen einzelnen Halter normiert und in Kilogramm umgerechnet.

Der Plan für diesen Fertigungsschritt ist Abbildung 7 zu entnehmen.

4 - Additive Manufacturing

Prozess-PlanReferenzgrößen
Es werden die Namen der Basis-Prozesse angezeigt.

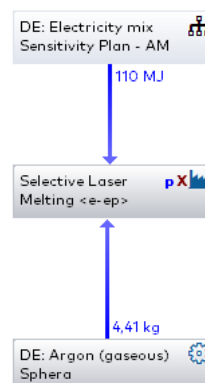


Abbildung 7: Plan für die Additive Fertigung (V1a und V1b - Schritt 4)

Schritt 5: Nachbearbeitung

Für die Nachbearbeitung der additiv gefertigten Halter wird ein konstanter Energiebedarf von 0,4 MJ pro Bauteil angesetzt (siehe Abbildung 8). Dieser Wert basiert auf Literaturangaben zur mechanischen Nachbearbeitung additiv gefertigter Metallbauteile (u.a. Jackson et al. [8]).

Die Nachbearbeitung umfasst insbesondere das Abtrennen des Halters von der Bauplattform, das Entfernen von Stützstrukturen sowie die Reinigung und Oberflächenbehandlung durch Strahlverfahren. Diese Prozessschritte erfolgen bauteilbezogen und sind unabhängig von der Masse des Halters, weshalb der Energiebedarf pro Stück und nicht massenbezogen modelliert wurde.

5 - Post Processing

Prozess-PlanReferenzgrößen
Es werden die Namen der Basis-Prozesse angezeigt.

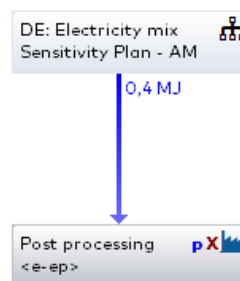


Abbildung 8: Plan für die a

dditive Fertigung (V1a und V1b - Schritt 5)

V2 – Standardhalter

Für die konventionellen Fassadenhalter aus Edelstahl (V2a) und Aluminium (V2b) liegen keine bauteilbezogenen Umweltproduktdeklarationen (EPDs) vor. Die Herstellungsphase wird daher über materialbasierte Datensätze angenähert. Die Annahme gilt als plausibel, da die Materialherstellung bei Metallen im Vergleich zur Formgebung den größten Anteil der Umweltauswirkungen ausmacht. Das Treibhauspotenzial für A1 - A3 wurde anhand von generischer europäischer Datensätze modelliert und mit der Bauteilmasse skaliert.

Die Herstellungsphase von V2a wurde über den generischen ÖKOBAUDAT-Datensatz „Edelstahlblech“ modelliert [13]. Dieser bildet die Produktion von Edelstahlblechen mit der Elektrolichtbogenofenroute ab. Das Treibhauspotenzial der Herstellung beträgt 3,658 kg CO₂e / kg Material.

Die Herstellungsphase von V2b wurde über den generischen ÖKOBAUDAT-Datensatz „Aluminium Profil“ modelliert [14]. Dieser bildet die Produktion von Aluminiumhalbzeugen unter Berücksichtigung von Primärproduktion, Weiterverarbeitung und Recycling ab. Das Treibhauspotenzial beträgt 10,9 kg CO₂e / kg Material. Die Emissionen wurden über die jeweilige Bauteilmasse skaliert.

Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse zur Herstellungsphase (Modul A1–A3) der additiv gefertigten Fassadenhalter dargestellt. Im Fokus stehen dabei:

- die Rolle der Strombereitstellung,
- der Einfluss der Materialwahl,

- die Bedeutung einzelner Prozessinputs,
- die Sensitivität gegenüber Transportannahmen sowie
- die Einordnung der additiv gefertigten Varianten im Vergleich zu konventionellen Standardhaltern.

Herstellungsphase unter unterschiedlichen Strommix-Szenarien

Abbildung 9 zeigt das Treibhauspotenzial (GWP) der in der Modellierung verwendeten Strommix-Szenarien. Dargestellt sind der aktuelle deutsche Strommix auf Niederspannungsebene (2023), der Mittelspannungsmix (2023), ein zukünftiger Strommix (2050) sowie ein photovoltaisch basierter Strommix (*sphera* Datenbank).

Es zeigt sich, dass die GWP-Werte des heutigen Strommixes auf Nieder- und Mittelspannungsebene auf einem vergleichbaren Niveau von etwa 0,45 kg CO₂e / kWh liegen. Demgegenüber weist der zukünftige Strommix (2050) ein deutlich reduziertes Treibhauspotenzial von rund 0,13 kg CO₂e / kWh auf. Die niedrigsten Emissionsfaktoren ergeben sich für den photovoltaisch basierten Strommix mit etwa 0,03 kg CO₂e / kWh.

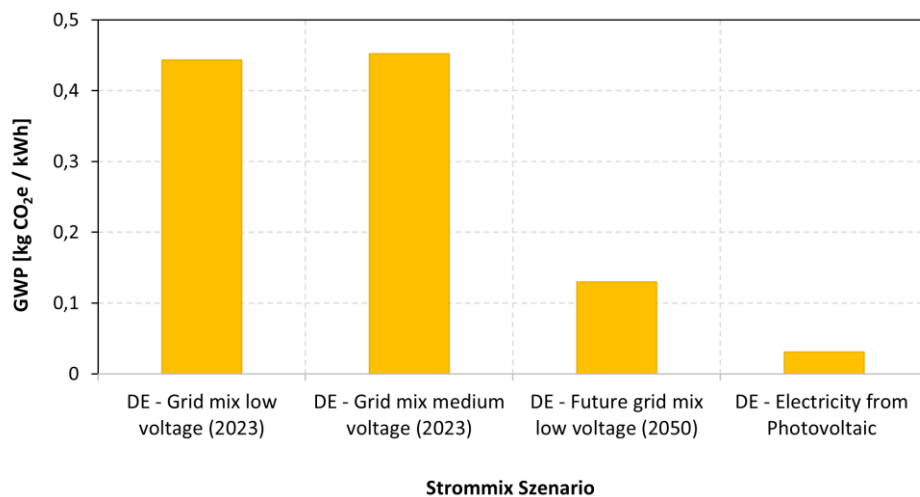


Abbildung 9: Treibhauspotenzial (GWP) der verwendeten Strommix-Szenarien

Vor diesem Hintergrund zeigt Abbildung 10 das Treibhauspotenzial der Herstellungsphase des additiv gefertigten Festpunktfassadenhalters aus Bewehrungsstahl und Edelstahl unter den jeweiligen Strommix-Szenarien.

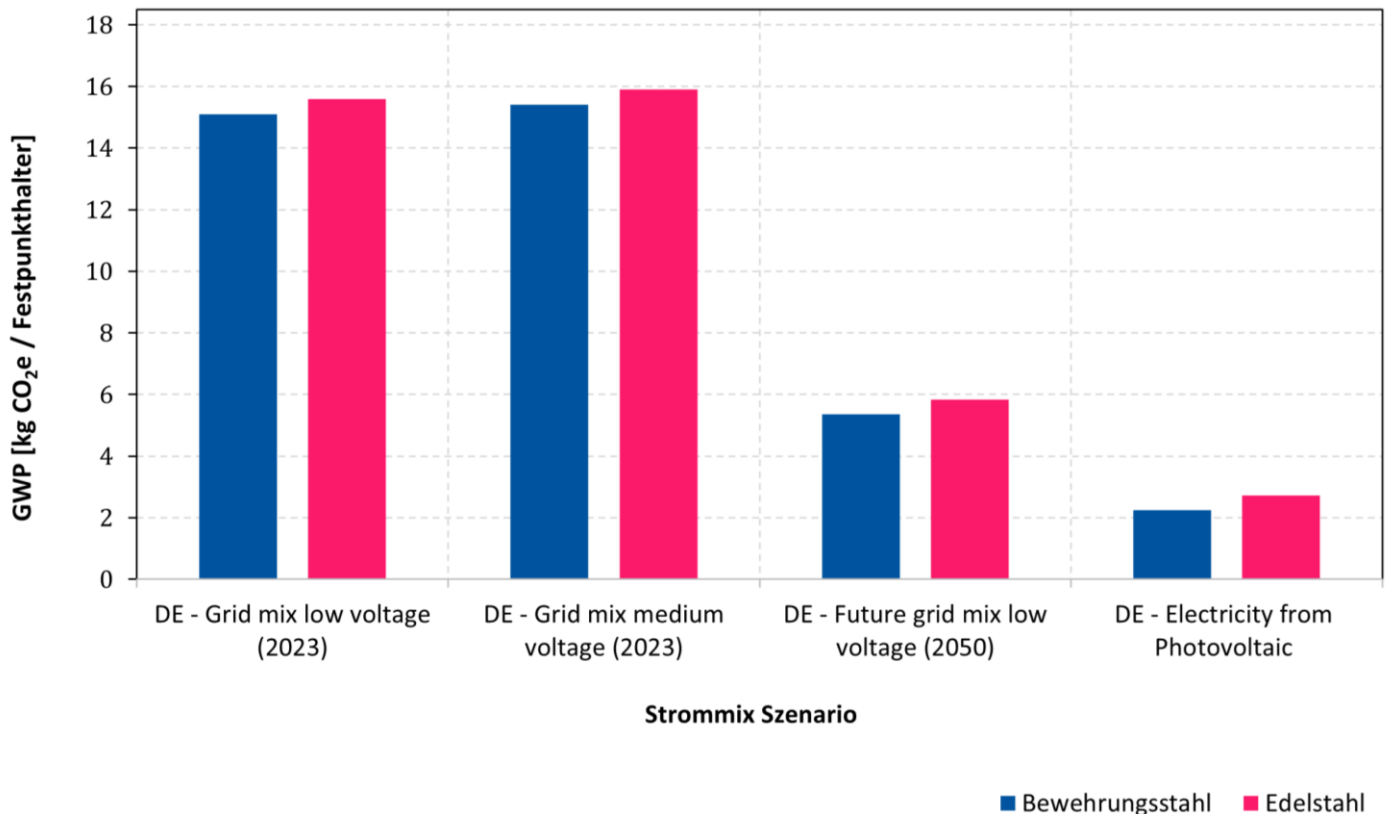


Abbildung 10: Treibhauspotenzial (GWP) der Herstellungsphase des AM-Festpunktfassadenhalter aus Bewehrungsstahl und aus Edelstahl bei unterschiedlichem Strommix

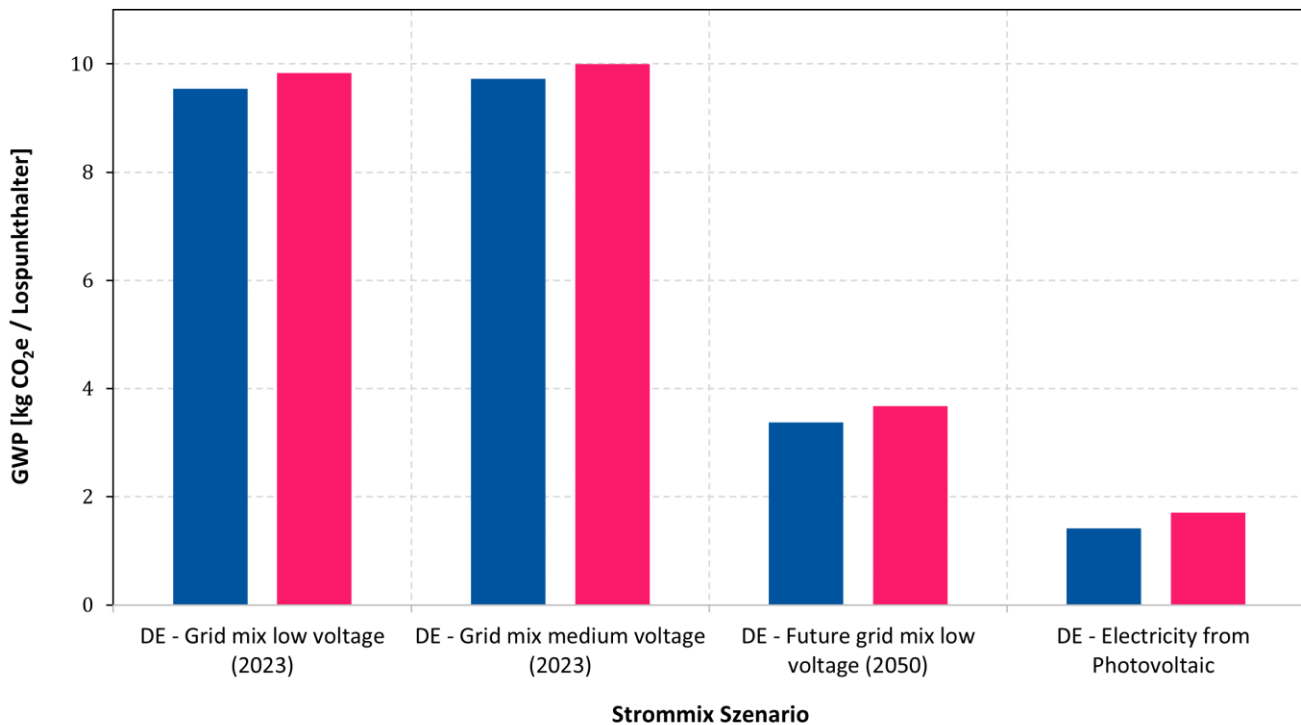
Für beide Materialvarianten ergibt sich beim Einsatz des aktuellen deutschen Strommixes (Niederspannung oder Mittelspannung) ein vergleichbares Treibhauspotenzial. Der Festpunkthalter aus Bewehrungsstahl weist ein GWP von 15,1 - 15,4 kg CO₂e auf, während für den Edelstahlhalter Werte von etwa 15,5 - 15,9 kg CO₂e erreicht werden.

Mit einem prognostischen Strommix für 2050 reduziert sich das Treibhauspotenzial deutlich: die Emissionen sinken auf 5,3 kg CO₂e (Bewehrungsstahl) bzw. 5,8 kg CO₂e (Edelstahl). Beim Einsatz photovoltaischer Elektrizität reduziert sich das GWP weiter auf 2,2 kg CO₂e bzw. 2,7 kg CO₂e.

In allen Szenarien liegt das Treibhauspotenzial des Edelstahlhalters leicht über dem des Halters aus Bewehrungsstahl. Gleichzeitig zeigt sich, dass die Wahl des Strommixes einen deutlich größeren Einfluss auf die Herstellungsphase hat als die Wahl des eingesetzten Stahls.

Einordnung des Lospunkthalters

Neben dem Festpunkthalter wurde ergänzend auch der Lospunkthalter betrachtet. Aufgrund seiner geringeren Masse von 0,155 kg ergeben sich entsprechend reduzierte Treibhausgasemissionen in der Herstellungsphase (siehe Abbildung 11).



■ Bewehrungsstahl ■ Edelstahl

Abbildung 11: Treibhauspotenzial (GWP) der Herstellungsphase des AM-Lospunktfassadenhalter aus Bewehrungsstahl und aus Edelstahl bei unterschiedlichem Strommix

Beitrag verschiedener Prozessinputs

Abbildung 12 zeigt die Ergebnisse der untersuchten Prozessschritte und deren Beiträge zum gesamten Treibhauspotenzial. Dabei werden zwei Szenarien für die Strombereitstellung gegenübergestellt: der deutsche Strommix sowie eine Versorgung durch Photovoltaik.

Im aktuellen Strommix wird das Gesamtergebnis hauptsächlich durch die Elektrizitätsbereitstellung bestimmt (13,8 kg CO₂e). Im Vergleich fallen die Beiträge der Argonherstellung (1,0 kg CO₂e) sowie der Stahlschrott-Rückgewinnung (0,2 kg CO₂e) deutlich geringer aus.

Mit der Umstellung auf einen photovoltaisch geprägten Strommix reduziert sich der Beitrag der Elektrizität signifikant (auf 1,0 kg CO₂e). In diesem Szenario gewinnt die Argonherstellung relativ an Bedeutung (1,8 kg CO₂e), während die absoluten Gesamtemissionen deutlich sinken.

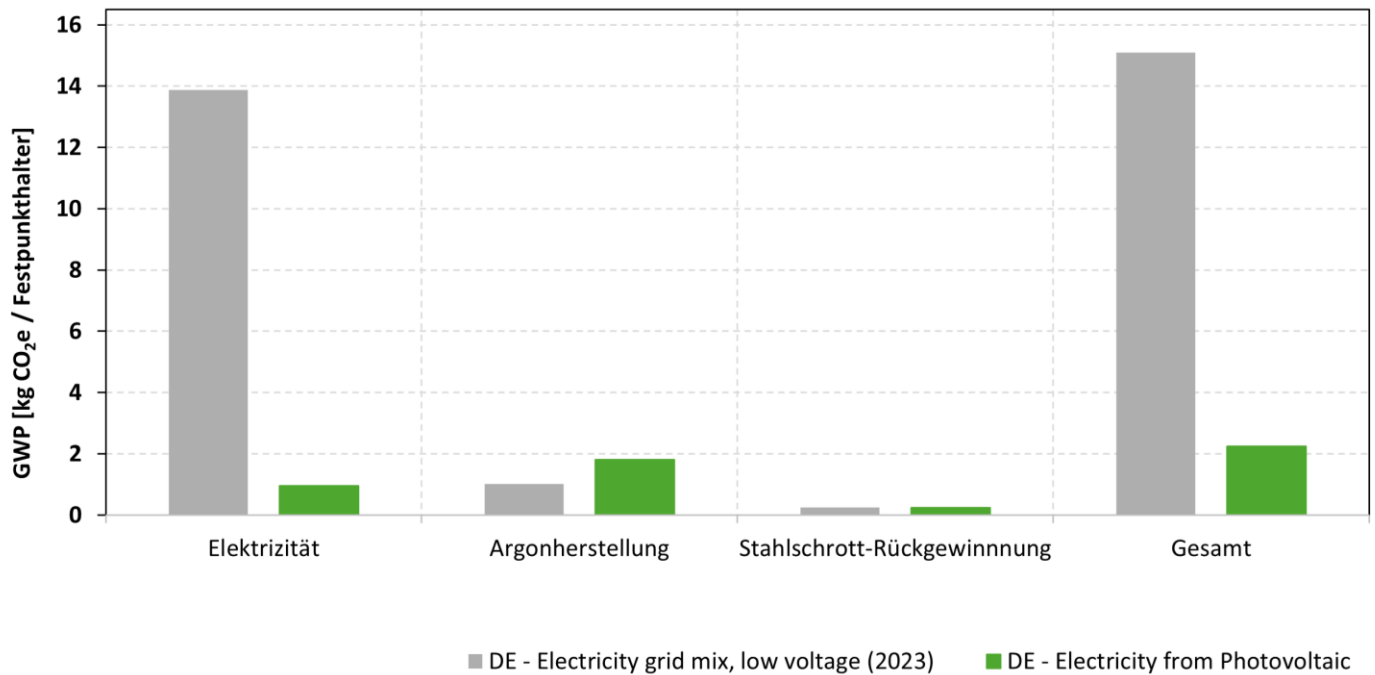


Abbildung 12: Beitrag ausgewählter Prozessinputs zum Treibhauspotenzial des AM-Festpunktfassadenhalter aus Bewehrungsstahl (V1a) unter verschiedenen Strommix-Szenarien

Sensitivität gegenüber Transportdistanz

Die Variation der Transportdistanz des Bewehrungsstahls (300 - 1200 km) zeigt keinen nennenswerten Einfluss auf das Treibhauspotenzial.

Zentrale Erkenntnisse:

- Die Recyclingroute für Bewehrungsstahl reduziert materialbedingte Emissionen.
- Bei fossilbasiertem Strommix dominiert die Prozessenergie.
- Bei zunehmendem Anteil erneuerbarer Energie werden materialbezogene Unterschiede sichtbar.
- Argon stellt einen nicht zu vernachlässigenden Beitrag dar.
- Transportannahmen zeigen keine Sensitivität.

Vergleich mit Standardhalter

Tabelle 4 fasst die Treibhauspotenzial für Standardhalter aus Edelstahl und Aluminium zusammen, unterschieden nach Festpunkt- und Lospunkthalter.

Tabelle 4: Treibhauspotenzial der Herstellung (A1-A3) der Standardhalter

Standardhalter	Haltertyp	Masse [kg]	GWP [kg CO ₂ e/kg]	GWP [kg CO ₂ e / Halter]
V2a (Edelstahl)	Festpunkt	1,829	3,658	6,69
	Lospunkt	1,213	3,658	4,44
V2b (Aluminium)	Festpunkt	0,656	10,9	7,15
	Lospunkt	0,438	10,9	4,77

Unter Einsatz des aktuellen deutschen Strommixes weisen die Standardhalter in der Herstellungsphase ein deutlich geringeres Treibhauspotenzial auf als die additiv gefertigten Varianten, trotz deutlich höheren Materialeinsatz. Für den Standardhalter ergeben sich für Edelstahl 6,69 kg CO₂e und für Aluminium 7,15 kg CO₂e. Demgegenüber liegt der

additiv gefertigte Festpunkthalter beim aktuellen deutschen Strommix (2023) bei 15,1 - 15,9 kg CO₂e und damit deutlich höher. Beim zukünftigen Strommix (2050) sinkt das Treibhauspotenzial auf 5,3 - 5,8 kg CO₂e und liegt damit in einer ähnlichen Größenordnung wie die Standardhalter. Erst bei einem photovoltaisch geprägten Strommix reduziert sich das GWP des additiv gefertigten Festpunkthalters auf 2,2 - 2,7 kg CO₂e und fällt damit klar unter die Werte der Standardvarianten.

Die ökologischen Vorteile der additiven Variante liegen jedoch primär nicht in der Herstellungsphase, sondern in den funktionalen Eigenschaften des Bauteils; insbesondere der reduzierten Wärmebrückenwirkung. Dieser Effekt wird in im folgenden Abschnitt (AP 2.2) untersucht.

Für die weiteren ökobilanziellen Untersuchungen wird der Wert 15,4 kg CO₂e für den Festpunkthalter aus Bewehrungsstahl und 9,7 kg CO₂e für den Lospunkthalter verwendet.

AP2.2 Nutzungsphase

Um die positiven Effekte der Wärmebrückenreduzierung auf die CO₂-Emissionen während der Nutzungsphase eines Gebäudes aufzuzeigen, wird eine VHF-Konstruktion nach DIN 18516-1 in zwei Varianten geplant:

- Variante 1: konventioneller Aluminium-Halter für vorgehängte hinterlüftete Fassaden
- Variante 2: AddMamBa-Halter

Insgesamt wurden für die beiden Haltervarianten je ein Los- und ein Festpunkthalter betrachtet. Zur Berechnung eines punktförmigen Wärmedurchgangskoeffizienten liegt ein allgemeiner Wandaufbau für ein Referenzgebäude vor. Dieser besteht aus 200 mm starkem Stahlbeton mit einer Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_B = 2,5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, einer Mineralwollgedämmschicht von 180 mm mit $\lambda_{MW} = 0,035 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ sowie einem lokal angeordneten Thermostop mit 5 mm Materialstärke und $\lambda_{TS} = 0,035 \text{ W/m}\cdot\text{K}$. Für den ungestörten Wandaufbau ergibt sich ein U-Wert von $0,182 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$. Unter Berücksichtigung einer vorgehängten hinterlüfteten Fassade ergeben sich Wärmeübergangswiderstände von $R_{si} = R_{se} = 0,13 \text{ W/m}\cdot\text{K}$. Für die Halterkonfigurationen wurden folgende χ -Werte numerisch ermittelt (siehe Abbildung 13):

- Festpunkthalter AddMamBa: 0,0067 W/K
- Lospunkthalter AddMamBa: 0,0048 W/K
- Festpunkthalter U-Aluminium: 0,0850 W/K
- Lospunkthalter U-Aluminium: 0,0578 W/K

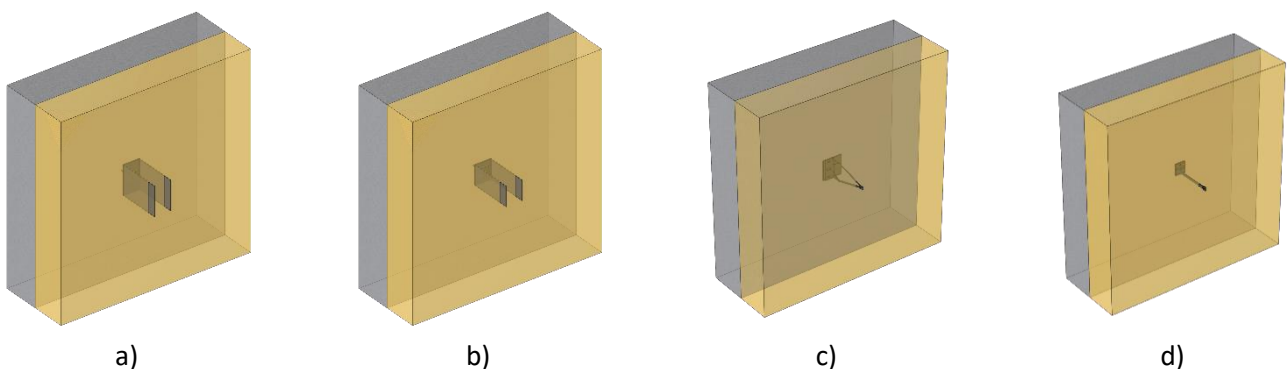


Abbildung 13: FE-Modelle der verglichenen VHF-Halter. a) Festpunkthalter U-Aluminium, b) Lospunkthalter U-Aluminium, c) Festpunkthalter AddMamBa, d) Lospunkthalter AddMamBa.

Aus den statischen Untersuchungen der AddMamBa-Halter (siehe AP 5), vergleichbaren Referenzprojekten mit Aluminium-U-Haltern und konstruktiven Anforderungen an die Befestigungen wird für die Ausführung beider Varianten eine Halterdichte von 0,5 Stk./m² zu Grunde gelegt. Die topologieoptimierten Querschnitte führen zu

verbesserten Wärmedurchgangskoeffizienten der Außenwände und damit zu geringeren Transmissionswärmeverlusten und damit zu einem geringeren Heizbedarf und geringeren CO₂-Emissionen in der Nutzungsphase des Gebäudes. Es soll gezeigt werden, dass die höheren Auswirkungen bei der Produktion durch Einsparungen während der Nutzung ausgeglichen werden können. Für die Referenzaußenwand resultieren U-Werte für Variante 1 von 0,254 W/(m²·K) und Variante 2 von 0,188 W/(m²·K).

Für die Berücksichtigung der positiven Effekte während der Nutzungsphase wird zunächst 1m² Außenwand betrachtet. Die Transmissionswärmeverluste, die über 50 Jahre durch 1 m² Außenwand verloren gehen, werden entweder durch eine Wärmepumpe oder eine Gastherme ausgeglichen. Der AddMamBa-Halter verursacht zwar mehr Treibhausgasemissionen bei der Herstellung, verbessert aber den Wärmedurchgangskoeffizienten und führt somit zu geringeren Transmissionswärmeverlusten in der Nutzungsphase als der konventionelle Halter. In Abbildung 14 sind die Treibhausgasemissionen der Produktions- und Nutzungsphase der beiden Halter in kg CO₂-Äq./m² dargestellt. Nach DIN EN 15804 beschreiben A1-A3 die Herstellungsphase und B6 die Nutzungsphase des Halters. Die Ergebnisse zeigen, dass der AddMamBa-Halter über einen Zeitraum von 50 Jahren zu geringeren CO₂-Emissionen führt.

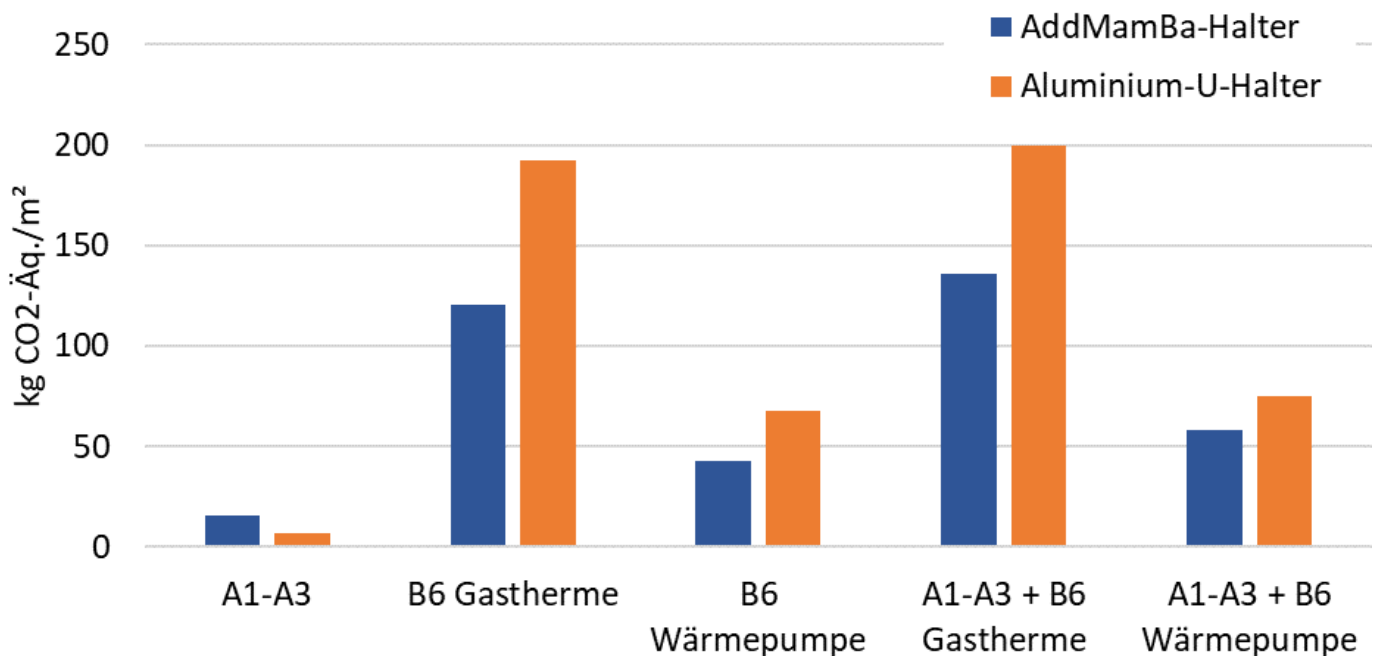


Abbildung 14: Vergleich der CO₂-Emissionen der VHF-Halter für Herstellung und Nutzungsphase für 1 m² Außenwand

AP2.3 Rückbau / Recycling / Wiederverwendung

Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurden vier Methoden, welche die Auswirkungen kreislaufwirtschaftlicher Maßnahmen (Modul D) berechnen, analysiert: Die Berechnung von LCA gemäß DIN EN 15804 sowie einer Erweiterung dieser gemäß des Forschungsprojekts PROGRESS. Außerdem werden die Lebenszyklusinventur nach *World Steel Association* (worldsteel) und der *Product Environmental Footprint* (PEF) der Europäischen Kommission untersucht. Diese Methoden werden hinsichtlich ihrer Systemgrenze, Allokationsansätze und Berücksichtigung von mehreren kreislaufwirtschaftlichen Prozessen erörtert.

Insgesamt zeigt sich, dass Modul D nach DIN EN 15804 eine Aussage über die Differenz der Umweltauswirkungen der Herstellungsphase und des Endes der Nutzungsphase (End of Life, EoL) darstellt. Diese Differenz ist höher, wenn sich die Massenquoten zwischen diesen betrachteten Punkten ändert oder die Emissionen der kreislaufwirtschaftlichen Prozesse eine Änderung erfährt. Dies kann zum Beispiel durch eine Steigerung der Effizienz von Technologien gegeben sein. Ökologisch günstig ist hier eine Erhöhung der kreislaufwirtschaftlichen Maßnahmen am EoL gegenüber der

Herstellungsphase. Hierdurch verringert sich die Primärproduktion in der Zukunft. Eine Verringerung von kreislaufwirtschaftlichen Maßnahmen in der Herstellungsphase führt ebenfalls zu einem günstigen Modul D, jedoch nimmt die Belastung aus Modul A1-A3 hier um denselben Effekt zu. Auf die Gesamtrechnung LCA hat diese Verringerung der kreislaufwirtschaftlichen Maßnahme also keinen Effekt. Die Belastung hier innerhalb der Systemgrenze und wird in Bewertungsverfahren wie beispielsweise der DGNB berücksichtigt.

Der Vergleich der LCA-Ansätze macht deutlich, dass durch die Einführung von Allokation in Modul D die Investitionen in effiziente kreislaufwirtschaftliche Prozesse beeinflusst werden. Die Berechnung nach PEF ergibt Umweltauswirkungen, welche dem 0,8-fachen der DIN EN 15804 Methodik entspricht. Diese Prozesse haben somit weniger Einfluss auf das Gesamtergebnis der LCA. Aktuell vermiedene Primärproduktion innerhalb der Herstellungsphase geht hier stärker in die Gewichtung ein. Die Einbindung eines Ausnutzungsgrads gemäß worldsteel zeigt eine Fokussierung auf kreislaufwirtschaftliche Prozesse ohne Mengenverlust. Dieser wird für Recycling mittels EAF zu 0,916 angesetzt.

Hieraus folgt, dass es klarer Regelungen bedarf, um die Rechenverfahren zu vereinheitlichen und so eine Vergleichbarkeit sicherzustellen. Aus den Ergebnissen der LCA zeigt sich, dass neben den Allokationsverfahren hierbei ein besonderer Wert auf die einheitliche Datengrundlage zu legen ist.

AP2.4 Life Cycle Assessment

Im finalen Schritt werden die Effekte der Wärmebrückenreduzierung auf Gebäudeebene über den gesamten Lebensweg anhand eines Referenzgebäudes aufgezeigt, siehe Abbildung 15. Es handelt sich um ein zweigeschossiges Bürogebäude mit einer Länge von 12,5 m, einer Breite von 20 m und einer Fläche von 235 m².



Abbildung 15: Referenzgebäude

Für die Außenwandfläche von 308,53 m² dienen je 155 Los- und Festpunkthalter als Befestigungsgrundlage. In Abbildung 16 ist die Massenverteilung der einzelnen Komponenten des Referenzgebäudes für den AddMamBa-Halter dargestellt. Die Gesamtmasse des Gebäudes beträgt 880 Tonnen. Die Gesamtmasse der AddMamBa-Halter liegt bei 53 kg (Aluminium-U-Halter bei 170 kg), was einem Massenanteil von 0,006% (Aluminium-U-Halter 0,02%) der Fassadenhalter am Gesamtgebäude entspricht.

Abschlussbericht AddMamBa (Teil I & II): Additive Manufacturing von 3D Verbindungselementen im Bauwesen



Massenermittlung Referenzgebäude [kg]

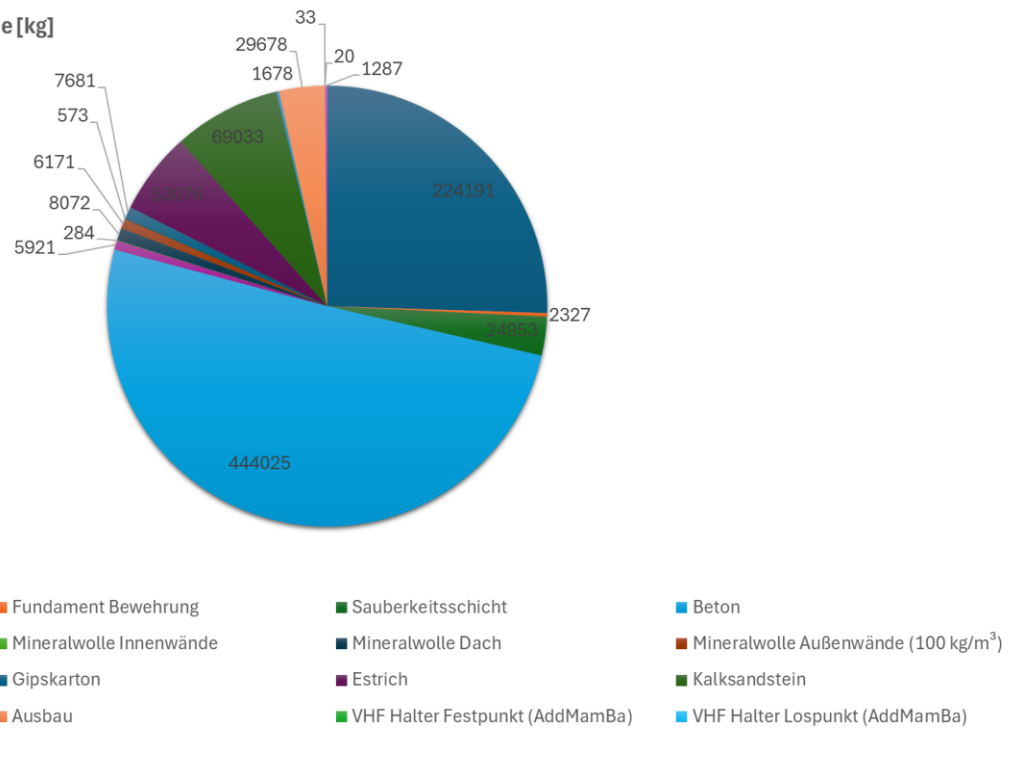


Abbildung 16: Massenermittlung Referenzgebäude

Abbildung 17 zeigt die Verteilung der CO₂-Emissionen, die bei der Herstellung und der Entsorgung der entsprechenden Komponenten des Referenzgebäudes freiwerden. Die gesamten grauen CO₂-Emissionen des Gebäudes betragen 157 Tonnen CO₂e. Der Anteil der AddMamBa-Halter liegt dabei ca. 2,5% (3891 kg), der Anteil der Aluminium-U-Halter bei 1,2% (1847 kg).

Abschlussbericht AddMamBa (Teil I & II): Additive Manufacturing von 3D Verbindungselementen im Bauwesen



GWP Referenzgebäude (A1-A3, C3, C4) [t CO₂e]

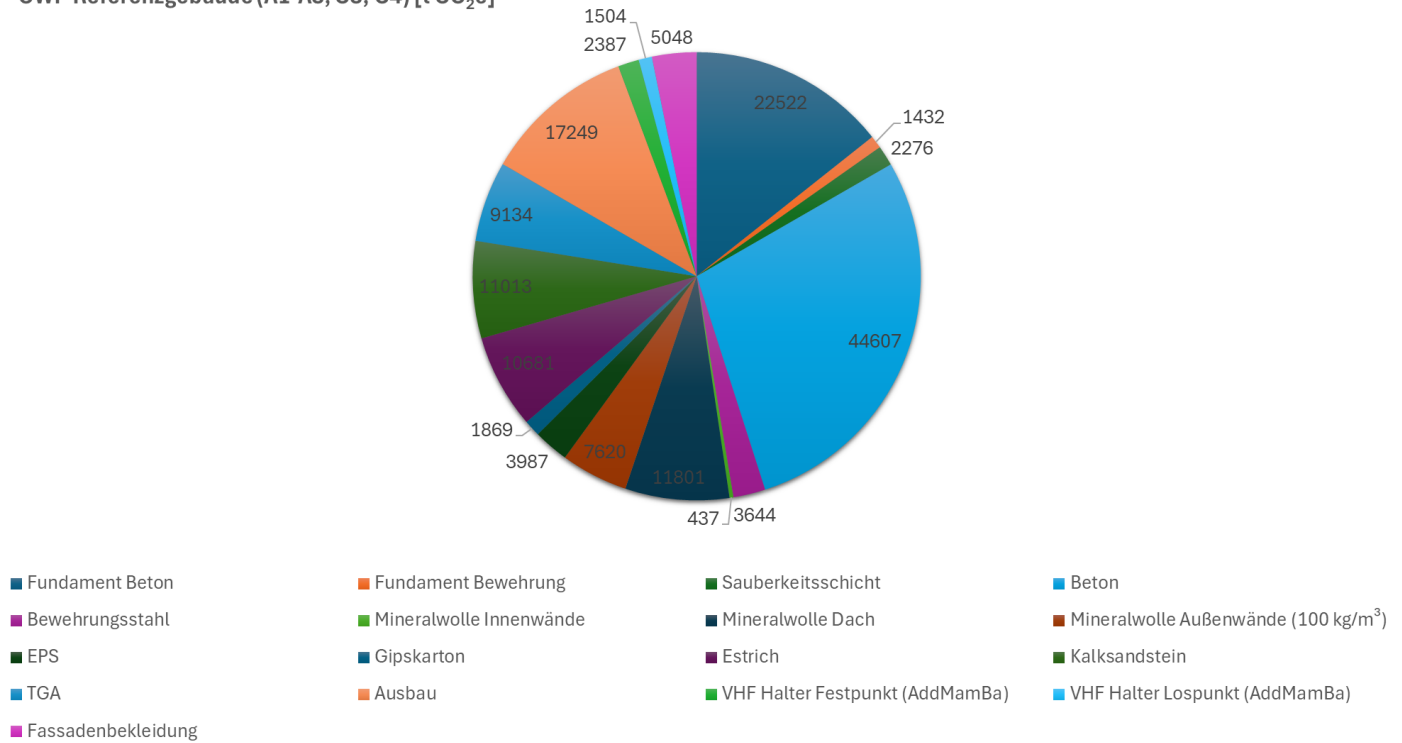
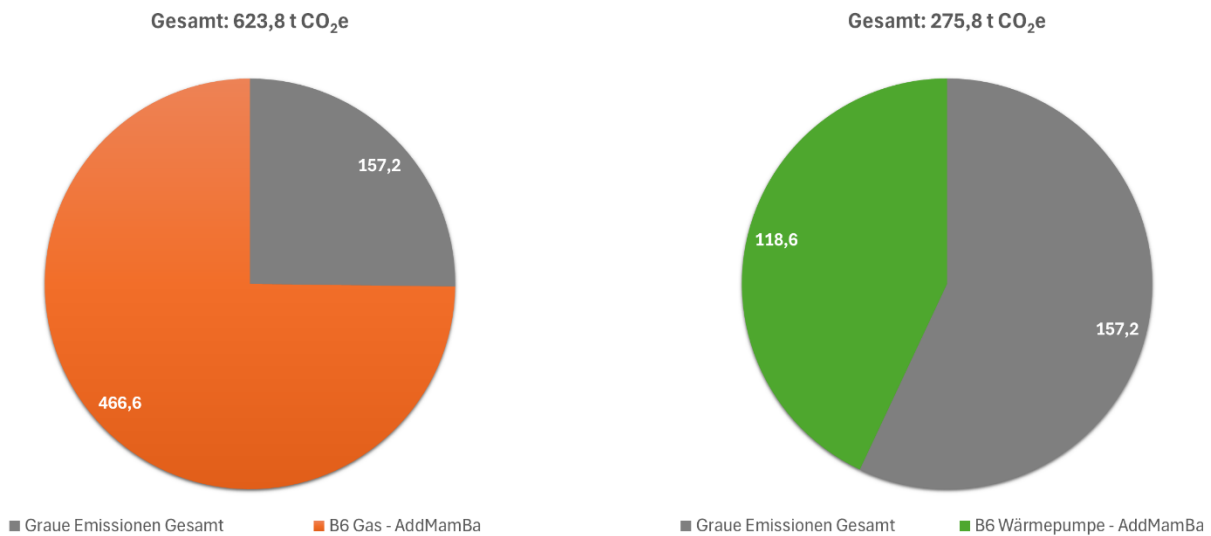


Abbildung 17: GWP Referenzgebäude

Abbildung 18 zeigt die Zusammenführung der bisherigen Berechnungen auf Gebäudeebene über den Lebenszyklus getrennt für die folgenden vier Fälle:

- 1) AddMamBa-Halter, Gasheizung
- 2) AddMamBa-Halter, Wärmepumpe
- 3) Aluminium-U-Halter, Gasheizung
- 4) Aluminium-U-Halter, Wärmepumpe



**Abschlussbericht AddMamBa (Teil I & II):
Additive Manufacturing von 3D Verbindungselementen
im Bauwesen**

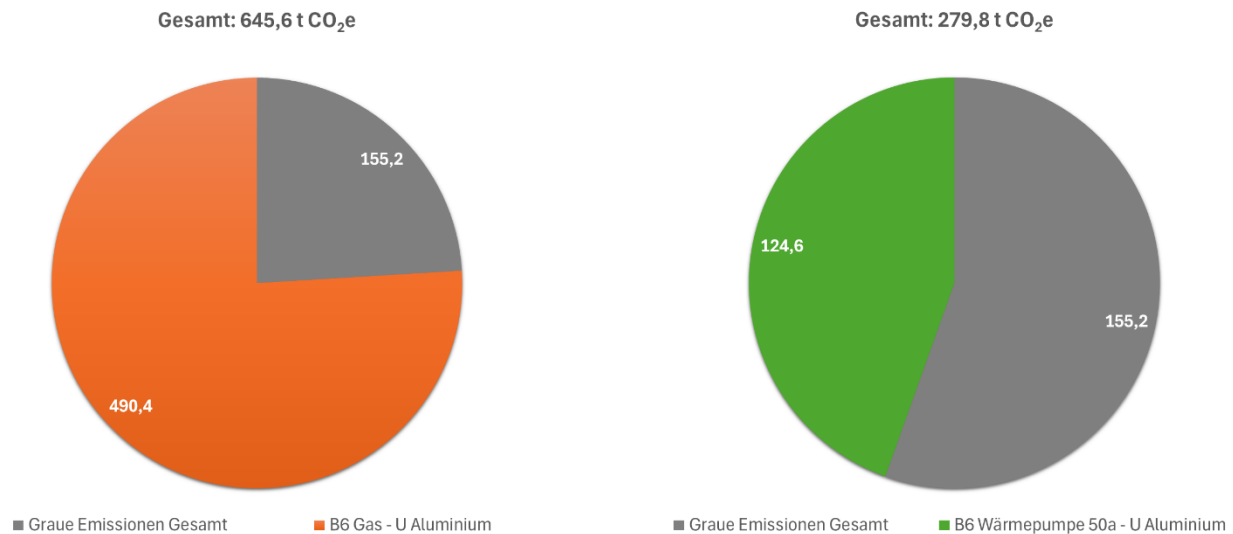


Abbildung 18: GWP Lebenszyklus 50 Jahre nur Heizen (A1-A3, B6, C3, C4) in t CO₂e

Die Ergebnisse zeigen, dass durch die Verwendung der AddMamBa-Halter nur geringfügig mehr CO₂-Emissionen für die Herstellung und Entsorgung auf Gebäudeebene entstehen. Die möglichen Einsparungen während einer Nutzungsphase von 50 Jahren betragen für den AddMamBa-Halter bei der Verwendung einer Gasheizung 21,8 t CO₂e und bei der Verwendung einer Wärmepumpe 4 t CO₂e.

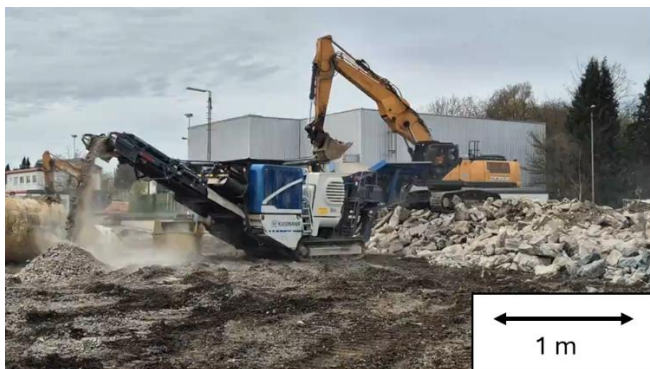
AP3 Materialkreislauf & Materialherstellung

Im dritten Arbeitspaket wurde entsprechend der Vorhabensbeschreibung das Recycling des Bauschrotts vorgenommen. Dies bestand wie geplant aus der Beschaffung des Schrotts sowie aus der Aufbereitung für die weitere Verarbeitung. Auf einen ursprünglich geplanten Legierungsschritt wurde bewusst verzichtet. Hintergrund ist, dass anthropogene Materialquellen – insbesondere Bauschrotte – in der Praxis häufig eine vergleichsweise hohe Homogenität aufweisen. Zwar sind nicht zwingend alle gewünschten Legierungselemente im anfallenden Schrott enthalten, gleichzeitig stammen viele der Materialien aus normierten Baustahlprodukten. Typische Beispiele sind Bewehrungsstähle oder andere Baustähle, deren chemische Zusammensetzungen bereits durch Baustahlnormen definiert und entsprechend nur in einem engen Bereich variieren. Stattdessen verschiedene Batches aus unterschiedlichem Schrott und einem neuwertigen S700-Stahl verglichen. Nach der Aufbereitung wurden die verschiedenen Batches verdüst und die Pulvereigenschaften entsprechend der Vorhabensbeschreibung untersucht. Die Vorgehensweise und die erzielten Ergebnisse werden im Folgenden erläutert.

AP3.1 Recycling und Legierung Bauschrott aus AP1

Als Ausgangsmaterial für die im Projekt hergestellten Proben und Bauteile wurde Baustahlschrott, der aus Bauschutt extrahiert wird, verwendet, um eine Kreislaufwirtschaft zu gewährleisten und das globale Erwärmungspotenzial innerhalb des Bauwesens zu reduzieren. Es wurde eine Analyse des derzeitigen Abbruchprozesses in Deutschland durchgeführt, um festzustellen, welche Schrottarten direkt recycelt werden, als Rohmaterial für den Gasverdüngungsprozess dienen (siehe AP 3.2) und anschließend in AM verarbeitet werden können. Neben direkt zugänglichem Baustahlschrott wurde ebenfalls Baustahlschrott verwendet, der i. d. R. bisher nicht recycelt wird. Dies ist z. B. bei Betonstahl aus kleineren Gebäuden der Fall, dessen Rückgewinnung bislang nicht wirtschaftlich ist. Dieser zählt zu den Stahlschrotten mit den höchsten Verlustquoten im Stoffkreislauf, da er in Betonkonstruktionen eingebettet ist und somit nur mit erheblichem Aufwand von anderen Baureststoffen getrennt werden kann. Selbst moderne Aufbereitungsanlagen, die mit Magnetabscheidern ausgestattet sind, erreichen keine vollständige Rückgewinnung des Bewehrungsstahls. Der Verlustanteil liegt bei etwa 3 % bis 5 % des im Beton enthaltenen Stahls. In diesem Projekt wurden über hydraulische Magnetabscheider hinweg, Maschinen eingesetzt, mit denen eine Verbesserung des Trennungsprozesses und damit eine Erhöhung der Recyclingquote von 99% erreicht werden konnte.

Um den Baustahlschrott aus dem Betonabbruch zu gewinnen, müssen die Bauteile stark zerkleinert werden. Im ersten Schritt müssen das Betonabbruchmaterial zerkleinert und der Bewehrungsstahl von anderen Materialien getrennt werden. Ziel ist es, den abgebrochenen Beton auf eine Kantenlänge von ca. 40 cm zu zerkleinern, damit dieser anschließend recycelt werden kann. Bei der Zerkleinerung kann Bewehrungsstahl bis zu einem Durchmesser von 20 mm vom Beton getrennt werden. Im zweiten Schritt wird mithilfe von Magnetabscheidern zusätzlicher Bewehrungsstahl aus dem Material abgetrennt (Abbildung 19).



a)



b)

Abbildung 19: a) Aufbereitung von Betonschutt in einer Recyclinganlage; b) Sammlung von Stahlschrott mit einem Hydraulikmagneten.

AP3.2 Legierungsverdüsung und Analyse von Material und Pulver

Die Materialien wurden von der Paul Kamrath Ingenieurückbau GmbH, Dortmund, Deutschland, geliefert und stammten aus Rückbauprojekten. Der Stahlschrott wurde zunächst in kleinere Stücke von etwa 10–15 cm zerkleinert. Anschließend wurden diese sandgestrahlt, um Mineralien, Oxidschichten, Lack, Betonreste und andere Rückstände von Baumaterialien zu entfernen (Abbildung 20).

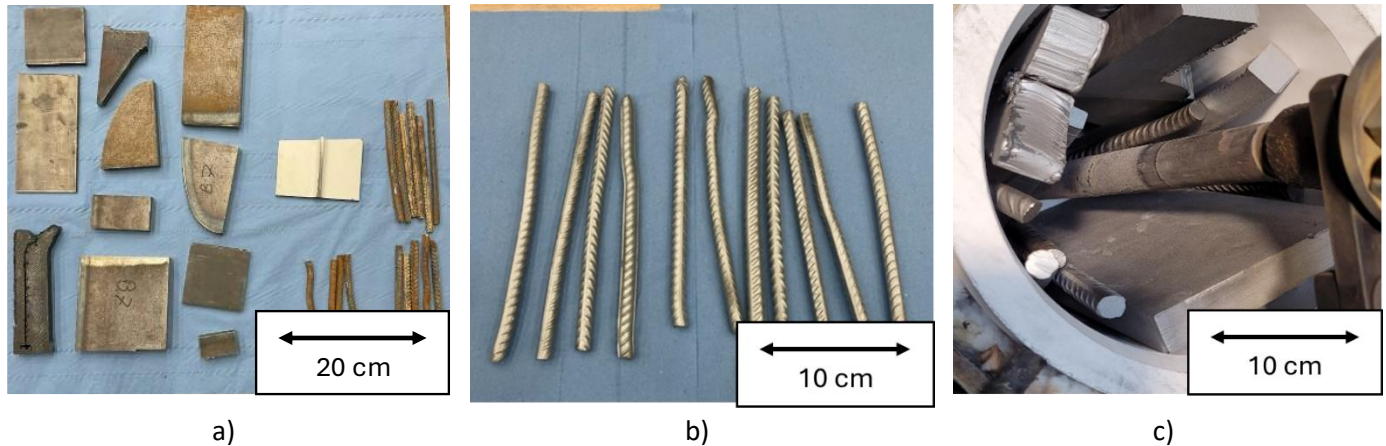


Abbildung 20: Beispiele für aus der Bauindustrie gewonnene Stahlschrottteile wie T-Träger, Bewehrungsstahl, Knotenbleche und Fassadenhalterungen; b): Von Verunreinigungen befreite Bewehrungsstahlstücke; c): Beispiel für das Stapeln einzelner Stahlschrott-komponenten im Keramiktiegel. Grau dargestellt ist das Verdrängungsvolumen der Stopfenstange zur Betätigung des Stopfens im Zerstäubungsprozess.

Danach wurden Materialprüfungen wie einer XRF/RFA-Spektrometrie (CTX, Bruker Billerica, MA) durchgeführt (siehe Tabelle 5), um festzustellen, ob die für die Verdüsung geeigneten Proben, in Hinblick auf Form und Menge, auch die werkstofftechnischen Anforderungen (siehe AP1.2) erfüllten.

Tabelle 5: CTX Analyse von Stahlschrottfragmenten, Alle gemessenen Elemente sind hier aufgeführt, mit Ausnahme von Eisen, dessen kumulativer Gewichtsanteil 100 % beträgt.

Probe	Al	Si	P	S	Ti	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	As	Nb	Mo	W	Pb
Traeger1	0,004	0,15	0,02	0,02	0,00	0,04	0,09	0,73		0,10	0,47			0,03		
Traeger2	0,004	0,17	0,03	0,03		0,04	0,08	0,75		0,14	0,43			0,03		
Traeger3	0,003	0,16	0,02	0,02	0,01	0,04	0,09	0,72		0,10	0,43			0,04		
Traeger4	0,006	0,15	0,03	0,03		0,04	0,09	0,70		0,16	0,43			0,03		0,04
Bewehrung1	0,000	0,10	0,01			0,01	0,13	1,20	0,12	0,20	0,46	0,01		0,05		
Bewehrung2	0,000	0,18	0,01			0,01	0,13	1,20	0,16	0,15	0,47	0,01		0,05	0,02	
Bewehrung3	0,000	0,04	0,02	0,03		0,04	0,09	0,46		0,10	0,29			0,02		
Bewehrung4	0,000	0,04	0,03	0,02	0,00	0,04	0,09	0,42		0,11	0,30		0,01	0,03		
Durchschnitt	0,002	0,124	0,019	0,025	0,005	0,033	0,099	0,771	0,136	0,133	0,412	0,011	0,008	0,035	0,024	0,040

Die im Projekt durchgeführten Verdüsungen wurden als Unteraufträge durch das ŁUKASIEWICZ RESEARCH NETWORK – Institute of Non-Ferrous Metals (Gliwice, Polen) ausgeführt. Das DAP stellte z.T. die dafür notwendigen Stopfenstangen (HeBoSint® SL-Z 100) und Schmelztiegel zur Verfügung. Die Verdüsungen erfolgten mit einer ALD VIGA 2B (ALD Vacuum Technologies GmbH, Hanau) unter Verwendung der in Tabelle 6 dargestellten Parameter. Da das Fassungsvermögen des Tiegels lediglich eine maximale Materialmenge von etwa 14,5 kg pro Verdüsung zuließ, wurden mehrere Chargen verdüst und anschließend zusammengeführt. Die verschiedenen Schrottstücke wurden je nach ihrer Stapelbarkeit im Tiegel gemischt und verdüst, da der Gebäuderückbau die Bewehrungsstähle und T-Träger stark deformiert hatte und somit die Stapelbarkeit des Stahlschrotts im verfügbaren Tiegelvolumen eingeschränkt war. Nach der ersten Verdüsungscharge wurde der Verdüsungsprozess angepasst.

Tabelle 6: Verwendete VIGA Prozessparameter

VIGA- Prozessparameter	
Gasdruck	32 bar
Düsenpalteinstellung	0.6mm
Durchmesser der Öffnung im Düsenstein	5.7mm
Überhitzte Schmelztemperatur	1540°C-1581°C
Gas Verbrauch (Argon)	Approx. 30-35kg 1

Alle nachfolgenden Verdünnungen wurden mit diesen angepassten Prozessparametern durchgeführt. Zu Beginn wurde eine erhebliche Abweichung zwischen der Zielpartikelgrößenverteilung und der tatsächlichen Partikelgrößenverteilung (particle size distribution, PSD) festgestellt. Infolgedessen wurden die Prozessparameter und ihr Einfluss auf die Pulverqualität in einer separaten Studie systematisch untersucht, auf die an dieser Stelle nicht im Detail eingegangen wird. Diese Studie umfasste die Variation verschiedener Parameter wie Schmelztemperatur, Gasdüsenpalt, Gasdruck und Düsensteindurchmesser, um die Pulverausbringung zu erhöhen und die gewünschte PSD zu erreichen. Während sämtlicher Anpassungen blieb die Gasvorwärmung durchgehend ausgeschaltet. Die endgültigen Parameter, die für die erste sowie alle folgenden 16 Verdünnungen verwendet wurden, sind in Tabelle 6 angegeben. Nach dem Verdünnungsprozess wurde das resultierende Metallpulver luftklassiert, um ultrafeine Partikel unter 10 μm abzutrennen. Das verbleibende Pulver wurde zweimal gesiebt: In der ersten Stufe wurden Partikel über 315 μm entfernt, in der zweiten Stufe solche über 90 μm . Mithilfe dieser Prozessparameter-anpassung war es möglich die Ausbringung von Anfangs 60% auf 83% zu steigern. Nach diesen vorbereitenden Schritten wurde das Pulver mittels mehrerer Analysen qualitätsgeprüft, darunter Untersuchungen der Partikelgrößenverteilung, der chemischen Zusammensetzung sowie der Fließfähigkeit. Abschließend wurden die einzelnen Pulverchargen aus jeder Verdünnung zu einer einzigen Charge vermischt, erneut gesiebt und anschließend wie oben beschrieben analysiert. Oberflächenanalysen von in Bakelit eingebetteten Pulvern zeigten überwiegend sphärische Partikel ohne Porosität oder Einschlüsse. Insgesamt wurden etwa 50 kg Stahlschrott verdüst, woraus 27,8 kg Partikel mit einer Größe unter 90 μm , 14,1 kg Partikel im Bereich von 90 μm bis 315 μm sowie 1,8 kg Partikel größer als 315 μm resultierten. Zusätzlich bestanden 3,1 kg des Outputs aus Flocken anstelle sphärischer Partikel, was auf Variationen im Verdünnungsprozess hinweist [15].

Die Partikelgrößenverteilung (PSD) von Metallpulvern, die durch die Parameter des Verdünnungsprozesses bestimmt wird, ist entscheidend für die effiziente Materialnutzung und die Sicherstellung einer hohen Bauteilqualität (Porosität, Oberflächenbeschaffenheit, mechanische Kennwerte sowie deren Reproduzierbarkeit) in additiven Fertigungsprozessen. In Anwendungen wie PBF-LB/M sind Partikel mit Größen unter 10 μm sowie über 90 μm ungünstig, da sie zu Ineffizienzen und potenziellen Defekten im Endbauteil führen können [16, 17]. Daher ist eine präzise Kontrolle der PSD durch eine sorgfältige Optimierung der Verdünnungsparameter erforderlich, wobei eine nachgeschaltete Siebung notwendig ist, um die gewünschte PSD zu erzielen. Die in Abbildung 21 ist die Häufigkeitsverteilung $q_3(x)$ der Partikelgrößen als Balkendiagramm und stellt den Anteil der Partikel einer bestimmten Partikelgröße (jeweils in μm) dargestellt. Der Großteil der Partikel weist Größen zwischen etwa 5 und 40 μm auf. Zusätzlich ist die anzahlbasierte Verteilung $p_3(x)$ dargestellt. Innerhalb der Charge sind mehr als 50 % der Partikel kleiner als 39,5 μm (d_{50}) und mehr als 90 % kleiner als 77,5 μm (d_{90}) (siehe Abbildung 21). Darüber hinaus wurde die volumenbezogene Sphärizität (SPHT) bestimmt, die beschreibt, wie gleichmäßig die Oberflächenstruktur und Form eines Partikels ist. Perfekte Kugeln besitzen eine Sphärizität von 1. Die erreichbaren relativen Dichten und mechanischen Eigenschaften der Bauteile steigen mit zunehmender Sphärizität des verwendeten Pulvers. Der optimale Wert der Sphärizität liegt bei $SPHT = 0,9$ [18]. Der gemessene mittlere Sphärizitätswert des eingesetzten Pulvers betrug $SPHT = 0,806$. Für die im Projekt betrachteten Anwendungsbereiche, insbesondere tragende Fassadenhalter und Knotenverbindungen, bedeuten diese Ergebnisse, dass das eingesetzte Pulver grundsätzlich für den stabilen PBF-LB/M-Prozess geeignet ist, jedoch Optimierungspotenzial hinsichtlich Fließfähigkeit und

Packungsdichte besteht. Die leicht reduzierte Sphärizität kann zu einer geringeren Pulverfließfähigkeit sowie zu lokalen Inhomogenitäten im Pulverbett führen, was sich unmittelbar auf die Bauteildichte und damit auf die mechanischen Eigenschaften auswirken kann. Gleichzeitig zeigt die PSD, dass nur ein geringer Anteil kritischer Fein- und Grobfraktionen vorliegt, wodurch eine ausreichende Prozessstabilität und Bauteilqualität erreicht werden konnte. Für strukturelle Anwendungen bedeutet dies, dass die hergestellten Bauteile bereits die notwendigen Anforderungen an Dichte und mechanische Leistungsfähigkeit erfüllen können, jedoch durch eine weitere Optimierung der Pulvermorphologie und Siebstrategie eine höhere Reproduzierbarkeit und verbesserte Bauteilperformance erzielt werden kann.

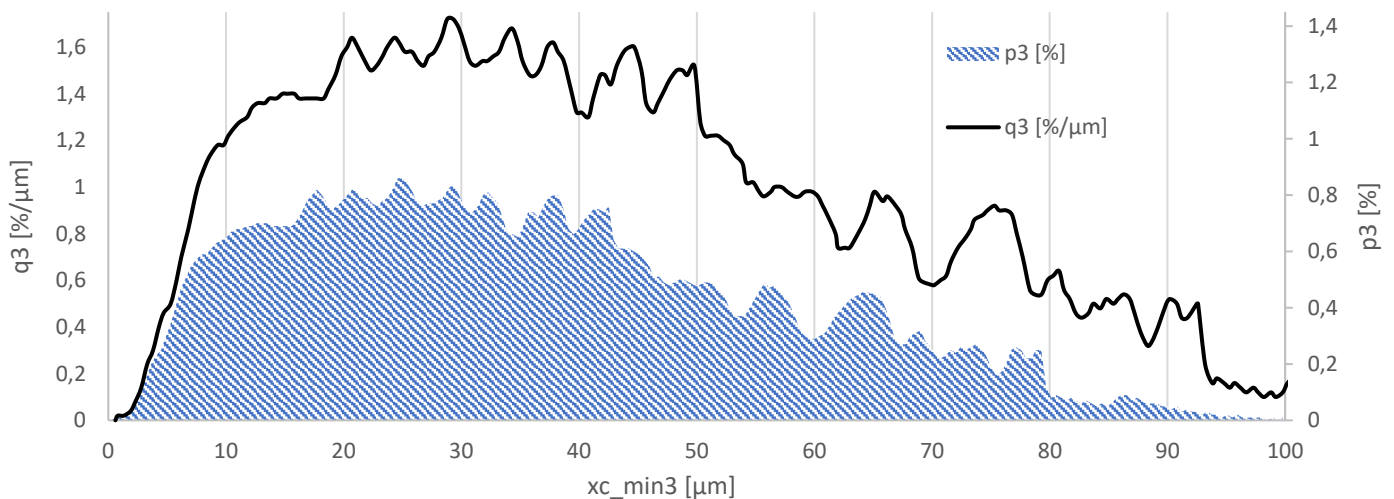


Abbildung 21: PSD < 90 µm von verdüstem Stahlschrott

In Tabelle 7 werden einige chemische Zusammensetzungen ausgewählter Baustähle (#1 - #4) mit der Zielzusammensetzung verglichen, die durch das Vermischen der einzelnen Pulver aus jeder einzelnen Verdüsung erzielt wurde. Die endgültige Pulverzusammensetzung weist im Vergleich zu den ursprünglichen Schrottmaterialien einen erhöhten Nickel-(Ni)-Gehalt sowie einen verringerten Kupfer-(Cu)-Gehalt auf. Die beobachteten Abweichungen zwischen der Pulverzusammensetzung und den Messungen am Schrott können auf mehrere Ursachen zurückgeführt werden. Erstens kann die Heterogenität von Stahlschrott zu einer nicht gleichmäßigen Zusammensetzung führen; selbst bei umfassenden chemischen Analysen kann der untersuchte Probenbereich nicht repräsentativ für das gesamte Volumenmaterial sein, was zu Variationen im Endpulver führt. Dies gilt insbesondere dann, wenn sich die Oberflächenzusammensetzung deutlich vom Kernmaterial unterscheidet, etwa infolge unterschiedlicher Umwelteinflüsse oder vorheriger Prozessschritte. Zweitens können Messunsicherheiten, beispielsweise bei XRF- oder CTX-Analysen, je nach Messort unterschiedliche Ergebnisse liefern. Dies ist besonders relevant bei heterogenen Materialien wie Stahlschrott, bei denen Oberflächenoxidation oder Verunreinigungen die Messergebnisse beeinflussen können.

Tabelle 7: Mittels RFA ermittelte chemische Zusammensetzung ausgewählter Proben von festem Stahlschrott: Nr. 1: Trägerstahl Nr. 1 (Durchschnitt), Nr. 2: Trägerstahl (Durchschnitt), Nr. 3: Bewehrungsstahl (Durchschnitt), Nr. 4: Bewehrungsstahl Nr. (Durchschnitt); chemische Zusammensetzung ausgewählter standardisierter Baustähle; sowie mittels RFA ermittelte chemische Zusammensetzung der Pulverbatches im Durchschnitt. Hier sind alle Elemente aufgeführt, mit Ausnahme von Eisen, dessen kumulativer Gewichtsanteil 100 % beträgt.

Probe / Stahl	C	Si	Mn	P	S	N	Cu	Ni
#1	-	0.16	0.74	0.02	0.02		0.45	0.12
#2	-	0.16	0.71	0.02	0.02		0.43	0.13
#3	-	0.14	1.20	0.01			0.46	0.18
#4	-	0.04	0.44	0.02	0.03		0.30	0.10
S235J	1.0037	0.170		1.400	0.035	0.035	0.012	0.550
S275J0	1.0044	0.210		1.500	0.035	0.035	0.012	0.550
S355JR	1.0045	0.240	0.550	1.600	0.035	0.035	0.012	0.550
E295	1.0050				0.045	0.045		
Pulverbatch #1-#2 im Mittelwert		0.222	0.835	0.016			0.093	2.347

Schließlich können während des Schmelz- und Verdünnungsprozesses im VIGA-System bestimmte Elemente segregieren oder bevorzugt oxidieren, was zu einer Anreicherung oder Abreicherung dieser Elemente im Endpulver führt. Elemente mit einer höheren Sauerstoffaffinität können Oxide bilden und als Schlacke verloren gehen, wodurch sich die finale chemische Zusammensetzung verändert [19, 20]. Die in Tabelle 7 dargestellten Ergebnisse zeigen, dass die finale Pulverzusammensetzung im Vergleich zu den eingesetzten Schrottmaterialien einen erhöhten Ni-Gehalt sowie einen reduzierten Cu-Gehalt aufweist. Die beobachteten Abweichungen lassen sich auf die Heterogenität des Ausgangsschrotts, Messunsicherheiten sowie auf stoffliche Veränderungen während des Schmelz- und Verdünnungsprozesses zurückführen. Insbesondere Segregations- und Oxidationseffekte im VIGA-Prozess können zu einer gezielten An- bzw. Abreicherung einzelner Elemente führen.

Für die im Projekt adressierten Anwendungsbereiche, insbesondere tragende Fassadenhalter und Verbindungselemente, ergeben sich daraus mehrere relevante Schlussfolgerungen. Das Vorhandensein von Ni und Mn im Stahlpulver beeinflusst dessen Eigenschaften erheblich, insbesondere im Bereich der additiven Fertigung. Nickel erhöht die Zähigkeit und Duktilität, insbesondere bei niedrigen Temperaturen, und verbessert die Verarbeitbarkeit des Pulvers, wodurch das Risiko von Rissbildung während des Prozesses verringert wird. Dies ist besonders wichtig für hochfeste Anwendungen. Mangan wirkt als Desoxidationsmittel und erhöht die Festigkeit und Härte des Stahls, wodurch es zur strukturellen Integrität der gedruckten Bauteile beiträgt. Allerdings können zu hohe Mangangehalte die Anfälligkeit für Heißrisse während der Erstarrung erhöhen, wenn sie nicht gezielt kontrolliert werden. Eine ausgewogene Zusammensetzung von Ni und Mn ist daher entscheidend, um optimale Festigkeit, Duktilität und Prozessstabilität zu erreichen und Defekte wie Risse oder Porosität zu minimieren [21–24]. Die Abweichungen zur Zielzusammensetzung verdeutlichen auch, dass bei der Verarbeitung von recyceltem Stahlschrott eine enge Kontrolle der chemischen Zusammensetzung erforderlich ist, um eine gleichbleibende Bauteilqualität sicherzustellen. Insbesondere für bauaufsichtlich relevante Anwendungen ist die Reproduzierbarkeit der mechanischen Eigenschaften entscheidend. Die Ergebnisse zeigen daher, dass die Nutzung von Sekundärmaterial grundsätzlich möglich ist, jedoch eine prozessbegleitende Materialcharakterisierung sowie eine gezielte Steuerung der Legierungselemente notwendig sind, um unerwünschte Effekte wie Heißrissbildung oder Eigenschaftsschwankungen zu vermeiden.

Die Nutzung recycelter Materialien zur Herstellung von Metallpulvern mittels Verdünnung stellt eine nachhaltige Alternative zu konventionellen Recyclingmethoden dar und entspricht den Prinzipien geschlossener Stoffkreisläufe sowie industrieller

AP4 System- und Prozessentwicklung

Arbeitspaket 4 umfasste entsprechend der Vorhabensbeschreibung die Weiterentwicklung eines PBF-LB/M-Anlagensystems und der Prozessparameter zur Verarbeitung des aus Arbeitspaket 3 generierten Pulverwerkstoffs. Die Prozessparameterentwicklung hat im engen Austausch zwischen dem DAP und LMI auf einer M290 (EOS GmbH, München, Deutschland) stattgefunden. Das Vorgehen und die erzielten Ergebnisse werden im Folgenden erläutert.

AP4.1 AM-Systemaufbau hinsichtlich neuer Werkstoffe & skaliertem Bauraum

Das ursprünglich geplante Konzept zur Mehrfachoptik zur Kopierbelichtung wurde technisch umgesetzt und untersucht, aber wirtschaftlich verworfen, da mit steigender Anzahl der Laser-Systeme auch die Kosten und die Systemanforderungen an Gestellsteifigkeit und Motor- und Steuerungsperformance steigen. Somit konnte kein nennenswerter wirtschaftlicher Vorteil umgesetzt werden.

Für die technologische Vergleichbarkeit eine Low-Cost-Scanner-Systems wurde ein solches System mit entsprechender F-Theta-Optik getestet. Dieses konnte, mit eigenen Kompensationsverfahren für thermische Stabilität und einer entsprechend genauen Parametrisierung der Laser-Delays, qualifiziert werden. Verglichen mit hochpreisigen Scannersystemen, konnten insgesamt vergleichbare und reproduzierbare Ergebnisse erzielen werden. Die Langzeitstabilität muss noch verifiziert werden.

Für die technologische Vergleichbarkeit eines Low-Cost-Laser-Systems wurde ein Low-Cost-Faserlaser mit 200 W und Luftkühlung getestet. Dieser zeigt in der Laserleistung einen nicht linearen Verlauf, der mit einer hinterlegten Korrekturtabelle ausgeglichen werden konnte. Das Ansprechverhalten ist über die Testlaufzeit stabil geblieben. Die Langzeitstabilität, muss noch verifiziert werden. Die maximal erzielbare Laserleistung scheint untypischerweise um 40 W gestiegen zu sein. Das müsste nochmals genauer untersucht werden.

Mit dem Ziel einer modularen und kostengünstigen PBF-LB/M Maschine wurden neben dem Test des Laser-Scanner-Systems, ein Maschinenkonzept entwickelt, das aus verschiedenen Modulen besteht und entsprechend den Anforderungen zusammengestellt werden kann. Ferner kann das Konzept mit kleinen Bauräumen verschiedener Größe bis max. 250x150x280 mm³ ausgestattet werden. Es bietet Platz für 2 Laser-Scanner-Systeme bis etwa 1000 W Leistung. Darüber hinaus wurde unter anderem ein Pulverabsaugsystem entwickelt, ein erweiterbares Filterkartuschensystem und ein Schutzgaskonzept, das je nach Baukammergröße erweitert werden kann.

Für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wurde ein definierter Demonstrator herangezogen und unter verschiedenen Aspekten kalkuliert. Dazu wurden verschiedene Maschinenkonfigurationen des entwickelten Low-Cost-PBF-LB/M-Systems mit einer auf dem Markt erhältlichen Standard-Maschine verglichen, die speziell für die „Serienfertigung“ konzipiert wurde. Die besten Ergebnisse liefert eine Konfiguration eines Low-Cost-PBF-LB/M-Systems mit maximaler Bauraumgröße und 2 Laser-Scanner-Systemen. Im Vergleich können die Kosten pro Bauteil, um etwa 30 % reduziert werden.

Während der Projektlaufzeit entstanden zusätzliche Personal- und Entwicklungsaufwände, insbesondere durch:

- Konzeptänderung von Mehrfachoptik zu Low-Cost-Laser-Scanner-System
- Integration des des Low Cost Scanners und -Lasers und die Entwicklung von Kompensationsstrategien zur thermischen Stabilisierung
- Umbau und laufende Erweiterung der LMI-Bestandsmaschine für Versuchszwecke der einzelnen Module

Der zusätzliche Aufwand wurde größtenteils durch interne Mittel getragen.

Die Konzeptänderung war notwendig, da das ursprüngliche Mehrfach Optik Konzept nicht wirtschaftlich realisierbar war. Der Fokuswechsel auf Low Cost Scanner und-Laser ist technologisch und industriepolitisch sinnvoll, da er neue

Wege zur Kostensenkung im PBF-LB/M eröffnet. Die Arbeiten wurden in angemessenem Umfang und mit klarer Ergebnisorientierung durchgeführt.

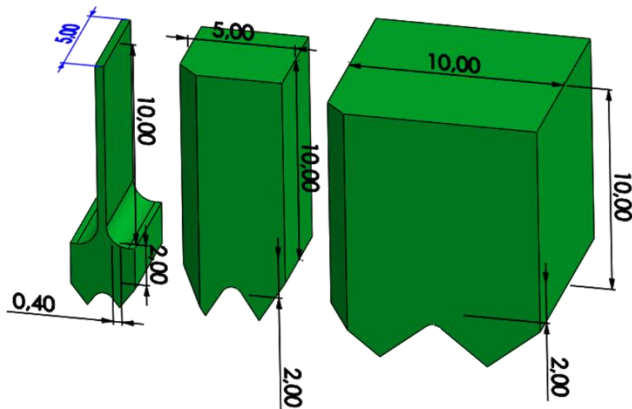
Das entwickelte Maschinenkonzept ist hochgradig verwertbar:

- Low Cost PBF-LB/M Systeme können künftig wirtschaftlicher gebaut werden.
- Das Konzept eignet sich sowohl als modulare Forschungs- und Ausbildungsplattform, als auch als Einstiegs- oder Produktionsmaschine mit geringeren Anforderungen, als sie aktuell in der Medizintechnik oder Luft- und Raumfahrt herrschen.
- Die Kalibrier- und Kompensationsmethoden für Low Cost Scanner ermöglichen neue Produktvarianten. Beispielhaft wäre eine Kombination aus Scanner-System auf kartesischem Achssystem eine Möglichkeit ein voll ausgelastetes Laser-Scanner-System in einer XXL-PBF-LB/M-Maschinen einzusetzen.
- Schutzgas-, Filter- und Baukammerkonzepte können in bestehende Maschinenlinien übertragen werden und flexibel nach Anforderung erweitert werden.
- Langfristig ist ein produktives Low Cost PBF-LB/M System möglich.

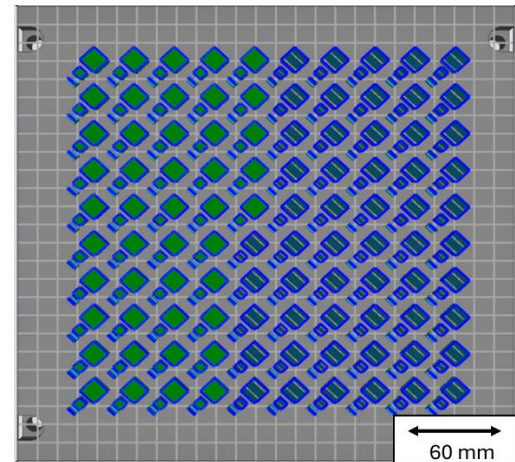
Während der Projektlaufzeit wurden ebenfalls internationale Low Cost PBF-LB/M-Lösungen verfügbar, jedoch ohne die Modularität. Die meisten industriellen Hersteller setzen weiterhin auf High End Scanner, weshalb die Kombination von Low Cost Hardware und Kompensationssoftware weiterhin einen technologischen Sonderweg darstellt.

AP4.2 Ermittlung AM-Prozessparameter und spezifischer Rahmenbedingungen

Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurden geeignete Prozessparameter zur Verarbeitung des in AP 3.2 aus Baustahlschrott hergestellten Pulvers ermittelt. Die PBF-LB/M-Bauversuche hierfür wurden auf einer M290 (EOS GmbH, München, Deutschland) durchgeführt, die mit einem 400-W-Faserlaser ausgestattet ist. Um den Einfluss variierender Prozessparameter auf die relative Dichte und die Mikrostruktur der hergestellten Bauteile zu untersuchen, wurde eine Variation der Prozessparameter durchgeführt. Für die Parameterstudie wurde ein definierter Parameterbereich festgelegt, innerhalb dessen die maßgeblichen Prozessgrößen variiert wurden. Als untere Ausgangsparameter wurden eine Laserleistung P_L von 285 W, eine Scangeschwindigkeit v_s von 960 mm/s sowie ein Spurabstand y_s von 0,11 mm gewählt. Die Schichtdicke d_s betrug 20 μm oder 40 μm , während der Laserfokussdurchmesser D_s begrenzt, auf 78 μm eingestellt war. Auf Basis dieser Startparameter wurde der Parameterraum bis zu oberen Grenzwerten von 330 W Laserleistung, 1850 mm/s Scangeschwindigkeit und einem reduzierten Spurabstand von 0,07 mm erweitert, während Schichtdicke und Strahldurchmesser konstant bei 40 μm bzw. 78 μm gehalten wurden. Die allgemeinen Maschinenbedingungen blieben während der gesamten Versuchsreihe unverändert und umfassten einen reduzierten Umgebungsdruck von 0,79 bar sowie eine Bauplattenvorheizung von 80 °C. Durch diese systematische Variation der Prozessparameter innerhalb eines definierten Parameterfensters konnte der Einfluss der Energiedichte auf Bauteildichte und Prozessstabilität untersucht und geeignete Parameterkombinationen für die Verarbeitung des Pulvers identifiziert werden. Zur Eingrenzung des Prozessfensters und zur Identifikation der maßgeblichen Haupteinflussfaktoren sowie geeigneter Prozessparameter wurde eine systematische Parameterstudie auf einer EOS M290 durchgeführt. Dabei wurde die Bauplatte vollständig mit Probenkörpern belegt, sodass pro Iteration insgesamt 100 unterschiedliche Parametersätze untersucht werden konnten (siehe Abbildung 22).



a)



b)

Abbildung 22: a) Darstellung Probekörper pro Parameterset; b) Anordnung der Prozessparameter-Studie der Probekörper in EOS Print (Slicingsoftware) – Maschine EOS M290.

Zur Bewertung der Prozessstabilität und insbesondere der entstehenden Porosität wurden verschiedene Geometrien eingesetzt: massive Quader mit den Abmessungen $10 \times 10 \times 12 \text{ mm}^3$, kleinere Quader mit $5 \times 5 \times 12 \text{ mm}^3$ sowie dünnwandige Strukturen mit $0,4 \times 5 \times 12 \text{ mm}^3$.

Durch diese Kombination aus Volumenkörpern und dünnen Wandstrukturen konnten sowohl volumetrische Defekte als auch grenzflächennahe Prozessinstabilitäten analysiert werden. Die systematische Variation der Prozessparameter innerhalb der Parameterstudie ermöglichte es, den Einfluss zentraler Größen auf die Bauteildichte und die Prozessqualität zu bewerten und damit ein geeignetes Prozessfenster für die Verarbeitung der untersuchten Pulver zu bestimmen. Die in Tabelle 8 dargestellten Ergebnisse der Parameterstudie zeigen den Einfluss verschiedener Prozessparameterkombinationen auf die resultierende Bauteildichte bzw. Porosität der im PBF-LB/M-Verfahren gefertigten Proben.

Tabelle 8: Auszugprozessparametersets der Prozessparameterstudie, $D_s = \text{const} = 40 \mu\text{m}$.

#	P (W)	v_s (mm/s)	h_s (μm)	h_s (mm)	D_s (mm)	D_s (μm)	d_s (μm)	E_D (J/mm ³)	Porosität (%)
1	330	1500	0,095	95	0,04	40	78	57,894	99,5
2	310	1350	0,115	115	0,04	40	78	49,919	99,33
3	340	1800	0,095	95	0,04	40	78	49,707	99,25
4	320	1650	0,095	95	0,04	40	78	51,036	98,94
5	270	1800	0,075	75	0,04	40	78	50	99,97
6	290	1200	0,065	65	0,04	40	78	92,948	99,98
7	280	1800	0,075	75	0,04	40	78	51,851	99,85
8	340	1650	0,085	85	0,04	40	78	60,606	99,95
9	310	1950	0,115	115	0,04	40	78	34,559	100
10	300	1800	0,075	75	0,04	40	78	55,555	99,99
11	310	1950	0,085	85	0,04	40	78	46,757	100
12	300	1950	0,095	95	0,04	40	78	40,485	99,99
13	280	1950	0,105	105	0,04	40	78	34,188	99,97
14	340	1800	0,085	85	0,04	40	78	55,555	99,98
15	280	1800	0,085	85	0,04	40	78	45,751	99,99
16	320	1950	0,105	105	0,04	40	78	39,072	100
17	290	1200	0,115	115	0,04	40	78	52,536	99,58
18	290	1500	0,115	115	0,04	40	78	42,028	99,26
19	300	1650	0,085	85	0,04	40	78	53,475	99,58
20	310	1650	0,105	105	0,04	40	78	44,733	99,59
21	330	1800	0,095	95	0,04	40	78	48,245	99,95
22	300	1800	0,065	65	0,04	40	78	64,102	99,97
23	320	1800	0,085	85	0,04	40	78	52,287	99,88
24	330	1350	0,105	105	0,04	40	78	58,201	99,85

Aus den Parametern wurde zusätzlich die volumetrische Energiedichte berechnet, die im untersuchten Datensatz Werte zwischen etwa 34 und 93 J/mm³ annimmt. Die Ergebnisse zeigen, dass mehrere Parameterkombinationen zu sehr hohen relativen Dichten von über 99,9 % führen. Die höchste rel. Dichte von 100% wurde mit den Parametersatz #9 und #16, vgl. Tabelle 8.

In Abbildung 23 sind die Laserenergiedichtebereiche über die relative Dichte des Bauteils innerhalb dieser Studie und darüber hinaus gesammelte Werte aus verschiedenen Literaturquellen und deren resultierende Verdichtungen im PBF-LB/M-Prozess unter Verwendung einer SS316L-Legierung veranschaulicht. Die Kombinationen der oben genannten variierten Parametersätze ergaben einen ED-Bereich von 34,19 bis 92,95 J/mm³. Für eine höhere Verdichtung (über 99 %) liegen die optimalen Energiedichtewerte verstreut in den Bereichen zwischen 45 J/mm³ und 65 J/mm³.

In Abbildung 23 sind weitere Literaturwerte zusammengefasst, für aus 316L gefertigte Probekörper, die mit unterschiedlichen volumetrischen Energiedichten von bis zu 150 J/mm³ hergestellt worden sind sowie der Einfluss auf die rel. Dichte. In dieser Arbeit konnten trotz vergleichsweise geringen volumetrischen Energiedichten hohe rel. Dichte Proben erzielt werden und ist auf die niedriglegierte chemische Zusammensetzung der verwendeten Batches zurückzuführen sein, die im Vergleich zu den Ergebnissen anderer Studien erhebliche Unterschiede aufweist. [25, 26]

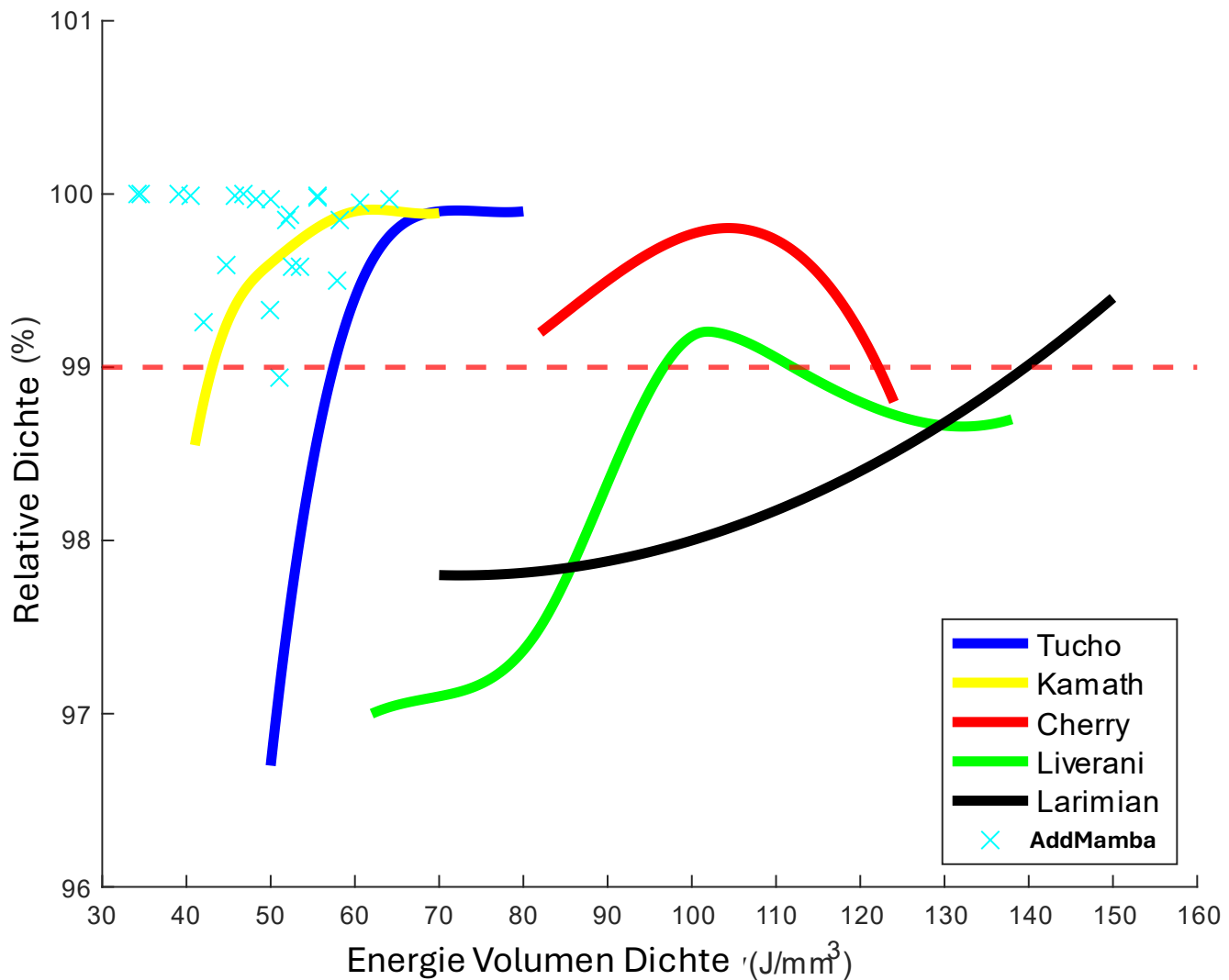


Abbildung 23: Energie-Dichtebereiche gemäß [27] und entsprechende Verdichtungswerte, die aus verschiedenen Literaturquellen für SS316L-Proben zusammengetragen wurden; Tucho [28], Kamath [29], Cherry [30], Liverani [31], Larimian [32].

Darüber hinaus unterstreichen die Ergebnisse die Wechselwirkungen zwischen kritischen Parametern wie Laserleistung, Scangeschwindigkeit, Scanabstand und Schichthöhe. Die Untersuchung dieser Zusammenhänge ist für die Bewertung der Zuverlässigkeit der Volumenenergiedichte als Optimierungskennzahl für den Prozess von entscheidender Bedeutung, da unterschiedliche Parameterkombinationen zu unterschiedlichen thermischen Verhaltensweisen führen können, die sich anschließend auf die Mikrostruktur und die Leistung der Endprodukte auswirken. Darüber hinaus ist die Standardisierung der Pulvereigenschaften von entscheidender Bedeutung, bevor ein strukturiertes Verarbeitungsfenster für die Teile festgelegt werden kann. Die Abhängigkeit von maschinenspezifischen Pulvern führt aufgrund unterschiedlicher Pulvereigenschaften zu Uneinheitlichkeit in der Leistung der gefertigten

Teile, was darauf hindeutet, dass optimierte Prozessparameter möglicherweise nicht universell auf verschiedene Maschinenmodelle anwendbar sind. Eine weitere Untersuchung dieser Faktoren könnte tiefere Einblicke in die Verbesserung der Materialleistung unter verschiedenen Verarbeitungsbedingungen liefern.

Es wurde ein endgültiger Satz von Prozessparametern definiert, um die nachfolgenden Zugproben herzustellen. Die PBF-LB/M-Prozesse der Proben 9, 11 und 16 zeichneten sich durch stabile Schmelzbäder, geringe Temperaturgradienten und einen reibungslosen Ablauf aus. Der Prozessparametersatz 9 wies jedoch mit 8,97 mm³/s die höchste theoretische Aufbaurrate auf. Da dies einen entscheidenden Vorteil hinsichtlich der in der Bauindustrie üblichen Bauteilgrößen bieten kann, wurde der Parametersatz 9 für die Herstellung der Proben für die Zugprüfung ausgewählt.

AP5 Bauteilgestaltung, -optimierung & -simulation

In Arbeitspaket 5 war zu Projektbeginn entsprechend der Vorhabensbeschreibung die Entwicklung eines Softwaretools zur automatischen/parametrischen Generierung statisch und bauphysikalisch optimierter sowie nachhaltiger 3D-Verbindungselemente (Fassadenhalter) unter Berücksichtigung duktiler Versagensmechanismen zur Bestimmung der Grenzkrafttragfähigkeit vorgesehen. Dies umfasste eine iterative Konzeptentwicklung (AP5.1), die Entwicklung eines web-basierten Konfigurators (AP5.2), eine Optimierung der Bauteile hinsichtlich statischer und bauphysikalischer Anforderungen mit Berücksichtigung von der Minimierung der Wärmebrückenwirkung bzw. Traglasterhöhung und die Entwicklung der Möglichkeit zur automatisierten Bauteilauslegung (AP5.3) sowie die Entwicklung eines Predictive Damage Modelings (AP5.4).

Die Arbeitspakete 5.1 und 5.2 wurden im Unterauftrag durch die trinckle 3D GmbH in enger Zusammenarbeit mit den beteiligten Projektpartnern durchgeführt. Diese Arbeitspakete wurden mit einem Fokus auf Fassadenhalter für vorgehängte hinterlüftete Fassaden (VHF) durchgeführt. Zunächst wurde mit der Umsetzung des entsprechend der Vorhabensbeschreibung geplanten Ansatzes begonnen (siehe Konzept 1). Im Projektverlauf wurde das Konzept im Hinblick auf die Praxisrelevanz für Fassadenplaner angepasst (Konzept 2). Die meisten Anwendungsfälle in der Fassadenplanung können mit einer begrenzten Anzahl an unterschiedlichen Haltern gelöst werden. Eine Designfreiheit, die die individuelle Neugenerierung eines jeden verbauten Halters mittels eines Konfigurators erfordert, ist in der Praxis daher nicht erforderlich. Die Anwenderfreundlichkeit für Nicht-Experten ist bei der Neugenerierung der Bauteile sehr herausfordernd, da eine abschließende Bewertung und Plausibilitätsüberprüfung der Ergebnisse der generierten Bauteile aufgrund ihrer lasttragenden Funktion immer durchgeführt werden muss, dies jedoch spezifisches Wissen erfordert. Konzept 2 ist daher als Tool mit besonderem Fokus aus Praxisrelevanz und Anwenderfreundlichkeit konzipiert worden. Basierend auf einer erweiterbaren Datenbank werden für den jeweiligen Anwendungsfall die passendsten Halter identifiziert und ein entsprechender Statischer Nachweis erstellt. Die statischen und bauphysikalischen Anforderungen können hierbei adäquat abgebildet werden. Im Tool können bei der Fassadenplanung auf diese Weise sowohl konventionelle Halter, aber auch bei besonders anspruchsvollen Anforderungen individuelle, additiv gefertigte Halter (z.B. topologieoptimiert) berücksichtigt und entsprechend den Anforderungen optimal ausgewählt werden. Dies stellt eine gut geeignete Lösung für den späteren Transfer in die Praxis dar.

In Arbeitspaket 5.3 lag der Fokus, neben der Entwicklung optimierter, additiv fertiger Fassadenhalter, auf der Weiterentwicklung und Optimierung des reversibler Verbindungselemente/Strukturknoten. Es umfasst, wie geplant die Optimierung der im Projekt behandelten Bauteile (Fassadenhalter und Strukturknoten), wobei die automatisierte Bauteilauslegung aufgrund des überarbeiteten Konfiguratorkonzepts nicht weiter berücksichtigt wurde.

In AP5.4 wurde das geplante Predictive Damage Modeling für AM Bauteile ebenfalls umgesetzt. Eine Implementierung in den Konfigurator war jedoch nicht notwendig.

Die konkrete Vorgehensweise und die erzielten Ergebnisse werden im Folgenden erläutert.

AP5.1 Konzeptentwicklung, Ableitung algorithmisches Designregelwerk

Die Konzeptentwicklung und die daraus entwickelte Ableitung des algorithmischen Designregelwerks sowie die Umsetzung durch Implementierung im web-basierten Bauteilkonfigurator erfolgte iterativ in agiler Arbeitsweise. D.h. wurden neue und ggf. zu vorherigen Anforderungen abweichende Anforderungen identifiziert, wurde dies entsprechend im Konzept und Designregelwerk sowie in der Implementierung berücksichtigt. Im Folgenden wird auf das initiale Konfiguratorkonzept sowie relevante Änderungen im Entwicklungsprozess im Hinblick auf das finale Konfiguratorkonzept eingegangen.

Konfiguratorkonzept 1

Das initiale Konfiguratorkonzept ist aufbauend auf den Ergebnissen eines gemeinsamen Workshops der beteiligten Projektpartner mit der trinckle 3D GmbH entstanden. Hierfür erfolgte zunächst eine Unterteilung in Konfigurator-Input, Konfigurator (inkl. Berechnungen und entsprechender Logik) und Konfigurator-Output. Die Inputgrößen basieren grundsätzlich auf den Anforderungen an die Tragfähigkeit von Fassadenhaltern (Windsog- und Druckkräfte für die Bemessung nach DIN EN 1991-1-4 (Windlasten) und DIN 1055-4 (Lastannahmen für Bauten)) und können in geometrische, mechanische und bauphysikalische Anforderungen bzw. Randbedingungen unterteilt werden.

Wichtige geometrische Größen sind der Abstand von Wand zu Fassadenunterkonstruktion, welche durch die Dicke der Wärmedämmschicht sowie der Größe des Hinterlüftungsraums abhängt (vgl. Abbildung 24a)), sowie der Abstand beider Fixierungen (Bohrungen) an der Wand. Diese Größen grenzen den verfügbaren Designraum ein, in welchem die Haltergeometrie erstellt werden kann. Schematisch ist dies am Beispiel eines Festpunkthalters in Abbildung 24b) dargestellt.

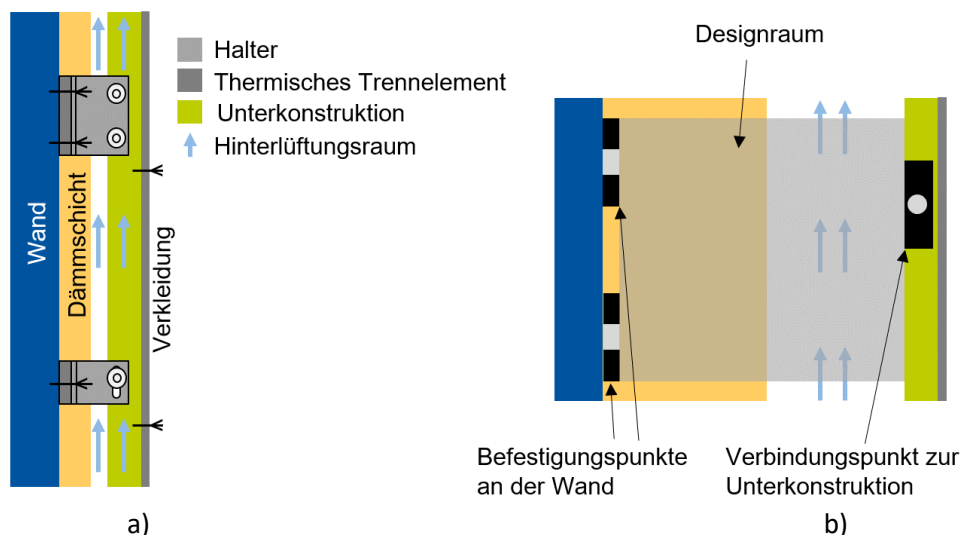


Abbildung 24: a) Schematische Darstellung des Wandaufbaus einer VHF. b) Schematische Darstellung eines Fassadenhalters für VHF (Festpunkt) mit dem möglichen Designraum (grau), den Befestigungspunkten an der Wand sowie dem Verbindungspunkt zur Fassadenunterkonstruktion.

Die Mechanischen Randbedingungen können in Lagereigenschaften und wirkende Kräfte zusammengefasst werden. Festpunkte können sowohl horizontale als auch vertikale Kräfte aufnehmen, Gleitpunkte nur vertikale. Die auf die Halter wirkenden Kräfte sind abhängig von der Konfiguration der Unterkonstruktion, d.h. sie unterscheiden sich aufgrund der vorliegenden Festpunkt-/Gleitpunkt-Konfiguration, der Anzahl von Festpunkten pro Quadratmeter, der Anzahl an Gleitpunkten je Festpunkt und dem gewählten statischen System. Die Vertikallasten ergeben sich aus der Eigenlast der Fassadenkonstruktion und dem Verkleidungsmaterial. Die Horizontallasten entsprechen dem erwarteten Winddruck und -sog. Diese berechnen sich auf der Basis der Gebäudeabmessungen und des Gebäudestandortes (Geländekategorie, Windzone).

Die bauphysikalischen Berechnungen zur Ermittlung des U-Wertes umfassen regulär den vollständigen Wandaufbau sowie die vorliegenden Temperaturen.

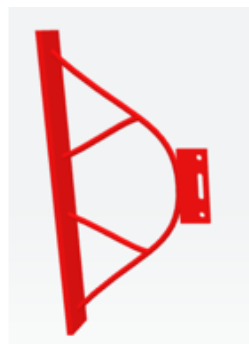
Das initiale Konzept sieht vor, dass zu Projektende die mechanischen Randbedingungen anhand der Gebäude- und Fassadeneigenschaften sowie der Halter- bzw. Unterkonstruktionskonfiguration innerhalb des Konfigurators berechnet werden und somit dem Anwender eine einfachere Bedienung ermöglicht wird. Die Erzeugung der Haltergeometrie soll dann aufgrund der ermittelten Randbedingungen erfolgen.

In den ersten Versionen des Konfigurators wird der Schwerpunkt zunächst auf die Erzeugung der Geometrie gelegt, welche zunächst durch direktere geometriestimmende Parameter gesteuert werden soll. Die erzeugte Geometrie soll als Ergebnis des Konfigurators in der Benutzeroberfläche visualisiert und als downloadbare .stl-Datei zur Verfügung gestellt werden.

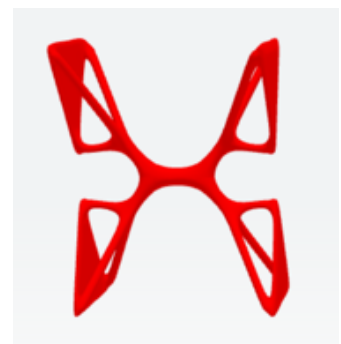
Für die Erzeugung der Geometrie verfolgt das initiale Konzept drei verschiedene Designansätze (siehe Abbildung 25). Die Designansätze verfolgen das grundsätzliche Ziel die für den Wärmedurchgang entscheidende Querschnittsfläche bei gleichbleibender Tragfähigkeit zu reduzieren oder die effektive Länge der wärmeleitenden Struktur zu erhöhen. Die drei Designansätze basieren auf der Weiterentwicklung konventioneller L-Halter durch das Einbringen von Perforierungen (Konzept a)), Designfindung durch eine zugrundeliegende Topologieoptimierung (Konzept b)) und bionischen Designprinzipien (Konzept c)). Topologieoptimierung als Werkzeug in der Halterentwicklung wird in Arbeitspaket 5.3 näher erläutert.



a)



b)



c)

Abbildung 25: a) L-förmige, b) röhrenförmige und c) baumförmig verzweigte Geometrie.

Biologische Prinzipien für eine reduzierte Wärmeleitfähigkeit, die auf geometrischen Eigenschaften beruhen, können anhand der effektiven Wärmeleitung klassifiziert werden. In fraktalen, baumartig verzweigten Netzwerken ist die effektive Wärmeleitung immer geringer als die eines einzelnen Kanals [33]. Dies legt nahe, dass filigrane Strukturen von Natur aus für Konstruktionen geeignet sind, die eine geringe Wärmeleitung zum Ziel haben. Als vielversprechendes Konstruktionsprinzip gehören hierzu filigrane Gitter- oder zellbasierte sowie verzweigte Strukturen, die ebenfalls bionische Leichtbauprinzipien darstellen. Solche Designprinzipien sind daher potenziell geeignet, um im Halterdesign Anwendung zu finden und so den Wärmebrückeneffekt dieser Verbindungskomponenten wirksam zu reduzieren. Weitere Informationen hierzu können der im Projekt entstandenen Veröffentlichung entnommen werden [34]. Für den Konfigurator wurde zunächst das Designprinzip mit baumförmigen Verzweigungen ausgewählt. Im weiteren Verlauf wurde der Fokus auf das röhrenförmige Konzept gelegt und weiter ausgearbeitet.

Der Fokus der frühen Entwicklungsphase des Konfigurators lag auf der parametrischen Generierung der Halter auf Basis des Nutzerinputs. Die Ermittlung der statischen Tragfähigkeit und der effektiven Wärmeleitfähigkeit der generierten Halter mussten vom Anwender im Anschluss ermittelt und mit den Anforderungen abgeglichen werden. Die Ermittlung der Tragfähigkeit und der effektiven Wärmeleitfähigkeit und erneute Überprüfung nach ggf. erforderlicher geometrischer Anpassung der Halter (iterative Vorgehensweise bis zur Erreichung der Anforderungen) erfordert sowohl bei der Durchführung der Analysen als auch bei der Bewertung der Ergebnisse Expertenwissen. Erschwert wurde diese Vorgehensweise aufgrund der meshbasierten Geometrieerzeugung mithilfe des Konfigurators, welche eine Konvertierung in ein volumenbasiertes CAD-Dateiformat in Vorbereitung auf die Simulation notwendig machte. Der Konfigurator sollte als Hilfsmittel zur einfacheren Planung und Auslegung von Fassaden durch Nicht-Experten dienen. Dies war mit dem oben vorgestellten Konzept nicht innerhalb des Projektrahmens zielführend umsetzbar, weshalb in Rücksprache mit Branchenexperten das initiale Konzept weiterentwickelt wurde.

Konfiguratorkonzept 2

Für die Weiterentwicklung von Konzept 1 wurden drei unterschiedliche Ansätze erarbeitet und bewertet. Eine Übersicht mit Kurzbeschreibungen und Bewertung dieser ist in Tabelle 9 aufgeführt.

Tabelle 9: Übersicht und Bewertung der verschiedenen Ansätze für die Weiterentwicklung des initialen Konfiguratorkonzepts.

Ansatz	Kurzbeschreibung	Bewertung
1	Geometrieerzeugung nach initialem Konfiguratorkonzept und iterative, manuelle Auslegung: Generierung des Halters im Konfigurator, Download der Geometrie im .stl-Format, Konvertierung in geeignetes Dateiformat für Simulation, Simulation zur Ermittlung der Tragfähigkeit und Wärmeübertragung, ggf. iterative Anpassung der Geometrie bis zur Erreichung der Anforderungen.	Einfache Geometrieerzeugung und komplexe, aufwendige Auslegung und Validierung, welche Expertenwissen erfordert. Nicht zur Planung und Auslegung von Fassaden durch Nicht-Experten geeignet. Die Vorteile für die vorgesehene Zielgruppe sind als gering einzustufen.
2	Integration der Simulation in den Konfigurator mit Parameteranpassung bis zum Erreichen der Anforderungen. Für die Integration der Simulation wurden verschiedene integrierbare Softwarepakete (sowohl kommerziell verfügbare als auch Open-Source-Lösungen) in Betracht gezogen.	Der Aufwand für die Umsetzung dieser Lösung ist sehr hoch und risikoreich. Die Fähigkeit zur Beurteilung der erzielten Simulationsergebnisse durch den Anwender ist Voraussetzung für eine erfolgreiche Nutzung des Konfigurators und erfordert Expertenwissen. Die Vorteile für die vorgesehene Zielgruppe sind als eher gering einzustufen.
3	Analytische statische und wärmetechnische Auslegung mithilfe ergänzender Datensätze: Konfigurator zur vereinfachten Berechnung der Anforderungen an einzelne Fassadenhalter auf Grundlage von Gebäudespezifikationen wie Lage, Dimensionen, Konfiguration der Unterkonstruktion und Ziel-U-Wert. Assistierte Auswahl eines optimalen Halters auf Basis der Anforderungen aus einer vorhandenen Auswahl an Haltern.	Die meisten Anwendungsfälle in der Fassadenplanung können mit einer begrenzten Anzahl an unterschiedlichen Haltern gelöst werden. Eine Designfreiheit, die die individuelle Neugenerierung eines jeden verbauten Halters mittels eines Konfigurators erfordert, ist in der Praxis nicht erforderlich. Die Anwenderfreundlichkeit für Nicht-Experten ist gegeben und die statischen und bauphysikalischen Anforderungen können adäquat abgebildet werden. Auf diese Weise können bei der Fassadenplanung sowohl konventionelle Halter, aber auch bei besonders anspruchsvollen Anforderungen additiv gefertigte Halter entsprechend der Anforderungen optimal ausgewählt werden. Dies stellt eine gut geeignete Lösung für den späteren Transfer in die Praxis dar.

Aufgrund der erwarteten höheren Praxisrelevanz wurde in der Weiterentwicklung des initialen Konzepts der dritte Ansatz weiterverfolgt. Hierzu wurden zunächst erneut die für die Zielgruppe relevanten Inputparameter identifiziert, sowie die Konfiguratorfunktionen und die anvisierten Outputdaten definiert. Die Inputparameter sind den Kategorien Gebäudegeometrie, Windparameter, Fassaden- und Haltereigenschaften zuzuordnen. Die im Konfigurator zu implementierenden Funktionen und Berechnungen orientieren sich an relevanten Standards, insbesondere DIN EN 1991-1-4/NA, sowie Experteninput aus dem Projektkonsortium. Die Outputdaten sind im Austausch mit Experten aus dem Konsortium festgelegt worden und beinhalten sowohl Visualisierungen der ausgewählten Halter als auch technische Daten, die für den in der Fassadenplanung geforderten statischen Nachweis notwendig sind. Die Inputparameter, die Konfiguratorfunktionen und die Outputdaten sind zu Beginn der Ausarbeitung des weiterentwickelten Konzeptes festgelegt und durch die agile Arbeitsweise während der Ausarbeitung ggf. ergänzt oder

angepasst worden (vgl. Abbildung 26). Das Konzept sieht darüber hinaus eine einfache Erweiterbarkeit des Konfigurators durch die Möglichkeit auch zu späteren Zeitpunkten weitere Materialien, Halter etc. hinzuzufügen, vor.

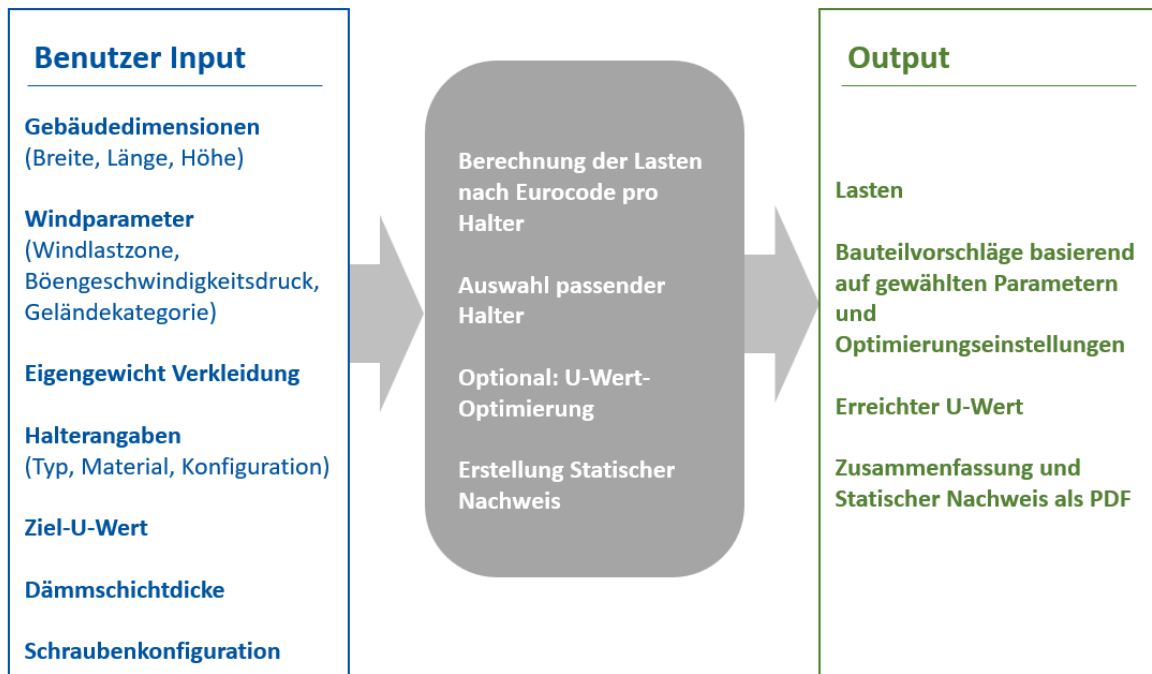


Abbildung 26: Schematische Darstellung des Konzepts mit Benutzer-Input, Konfiguratorfunktionen und Output.

AP5.2 Implementierung web-basierter parametrischer Bauteilkonfigurator

Implementierung Konfiguratorkonzept 1

Für die Implementierung des initialen Bauteilkonfigurators wurde das Softwaresystem paramate von der trinckle 3D GmbH als parametrische Software-Basis verwendet. Die Implementierung der Funktionen des Konfigurators erfolgte iterativ. Zunächst wurde die Implementierung eines grundlegenden parametrischen Setups der Fassadenhalter und der Anordnung dieser an der Hauswand umgesetzt. Die Anordnung der Halter an der Wand kann durch die Anzahl an Reihen und Spalten, in denen die einzelnen Halter platziert werden sollen, vom Nutzer durch entsprechende Variation der Inputparameter verändert werden. Bei der Erzeugung der Haltergeometrien liegt der Fokus zunächst auf den Festpunkthaltern, da diese aufgrund der erweiterten Anforderungen komplexere Geometrien aufweisen. Wie in Arbeitspaket 5.1 beschrieben, wurden zunächst drei grundsätzliche Designprinzipien in der Umsetzung verfolgt, die sowohl Materialersparnis, Anpassbarkeit als auch eine reduzierte Wärmeübertragung adressieren sollten: L-förmige, röhrenförmige und baumförmig verzweigte Geometrien. Diese Geometrien sind parametrisch im Konfigurator implementiert worden, sodass die jeweiligen Bauteildimensionen vom Nutzer entsprechend den Inputparametern verändert werden können. Zu den implementierten Parametern zählen u.a. der Abstand zwischen Wand und Unterkonstruktion, die Materialstärke beim L-förmigen Halter, die Röhrendurchmesser beim röhrenförmigen Halter und der Bohrlochdurchmesser. Die generierten Halter können als CAD-Dateien im .stl-Dateiformat heruntergeladen werden. Darüber hinaus kann die Anordnung der Halter an der Wand inkl. des Fassadenaufbaus mit Unterkonstruktion, Dämmschicht und Verkleidung entsprechend des Benutzerinputs (Anzahl Reihen, Anzahl Spalten, x- und y-Abstände der Halter) visualisiert werden. Das User-Interface dieser frühen Version des Konfigurators ist in Abbildung 27 (Visualisierung eines einzelnen Brackets) und Abbildung 28 (Visualisierung des Fassadenaufbaus inkl. angeordneter Halter) dargestellt. Die im oberen Teil angeordneten Inputparameter bestimmen dabei die Haltergeometrie, die im unteren Bereich die Anordnung an der Wand.

Abschlussbericht AddMamBa (Teil I & II): Additive Manufacturing von 3D Verbindungselementen im Bauwesen

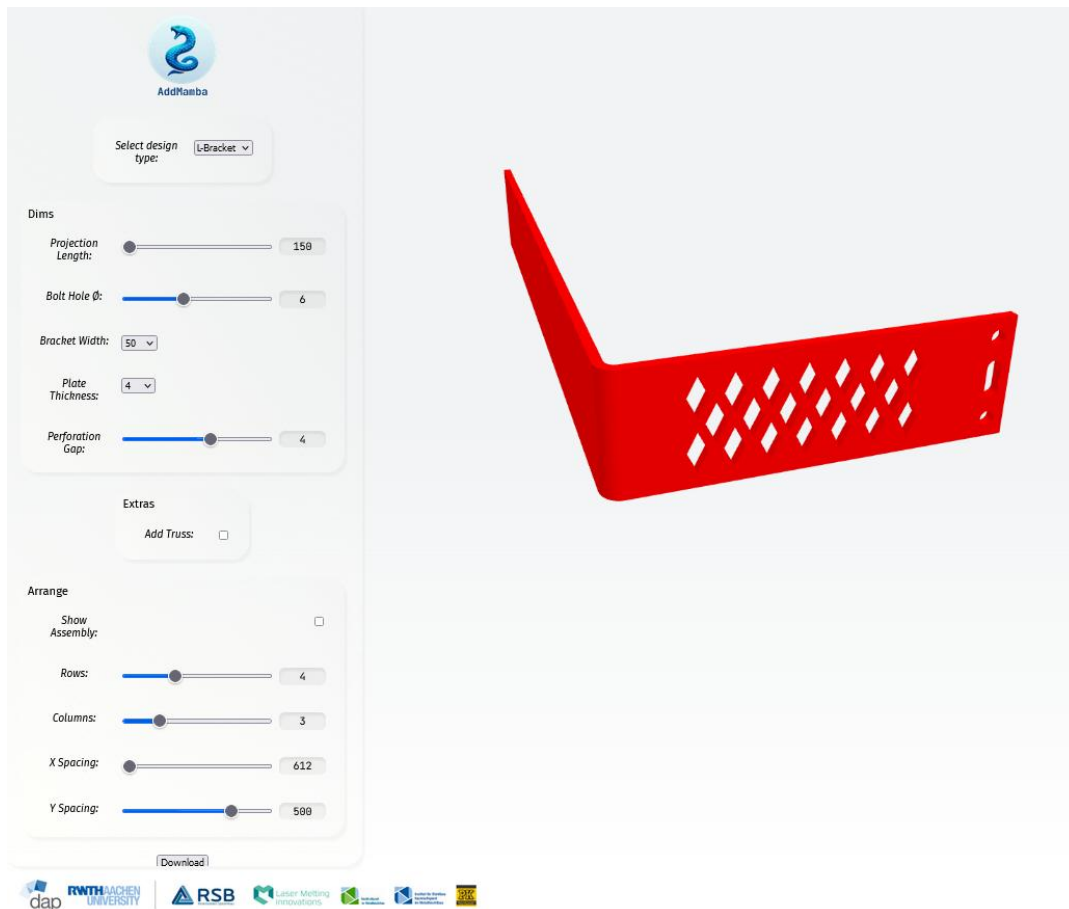


Abbildung 27: User-Interface einer frühen Version des Konfigurators mit Visualisierung eines einzelnen Halters (hier: L-förmiger Halter).

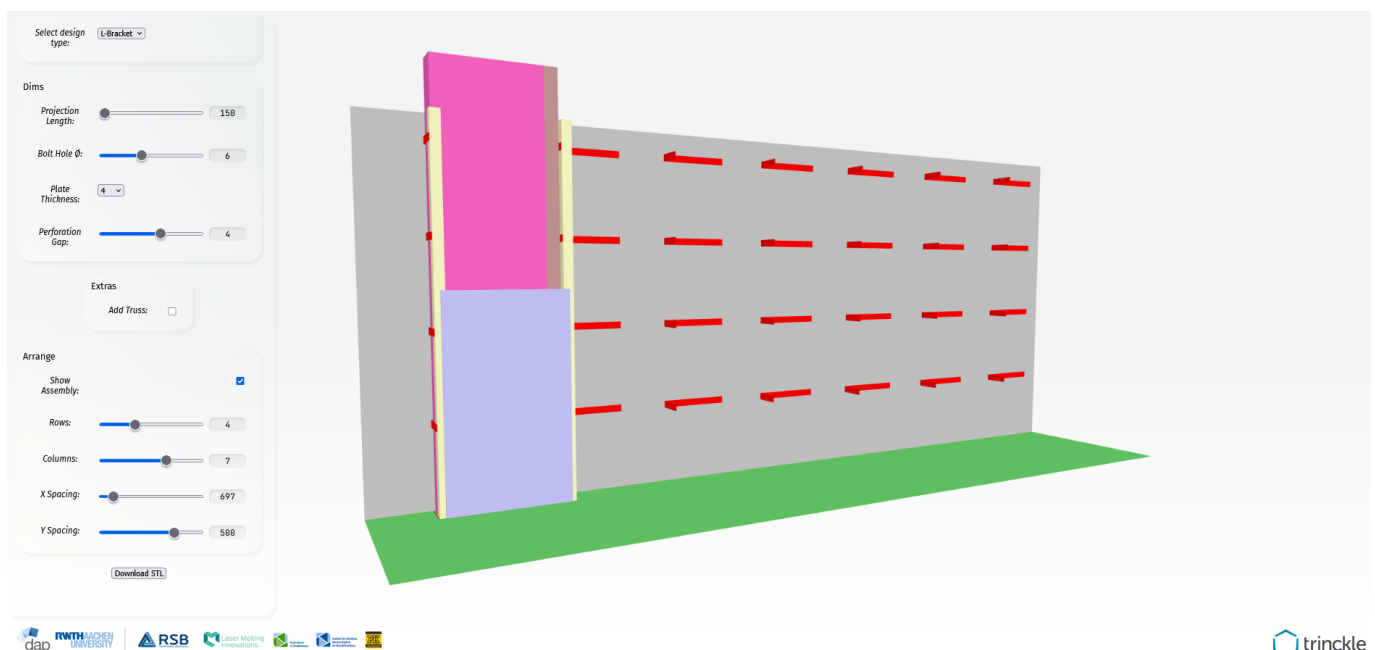


Abbildung 28: User-Interface einer frühen Version des Konfigurators mit der Assembly-Ansicht des Fassadenaufbaus.

Abschlussbericht AddMamBa (Teil I & II): Additive Manufacturing von 3D Verbindungselementen im Bauwesen

Die Weiterentwicklung des Konfigurators fokussierte sich auf die Ausarbeitung des Designprinzips des röhrenförmigen Halters, z.T. basierend auf den Erkenntnissen aus der Entwicklung des mithilfe von Topologieoptimierung entwickelten und im Projekt bereits additiv gefertigten Fassadenhalters (weitere Informationen siehe AP 5.3). Der parametrisch aufgebaute Halter wurde um optionale Querverstreben zur zusätzlichen Versteifung erweitert. Aufgrund der Filigranität und des geringen Materialanteils, welcher beide Anschlusspunkte (an das Mauerwerk und an die Unterkonstruktion) auf direktem Wege verbindet, kann davon ausgegangen werden, dass diese Vorgehensweise zu einer geringeren effektiven Wärmeleitung zwischen den beiden Anschlusspunkten führt als Konstruktionen mit direkteren Verbindungen und größeren Einzelquerschnitten. Mögliche parametrische Anpassungen sind in Abbildung 29 exemplarisch dargestellt.

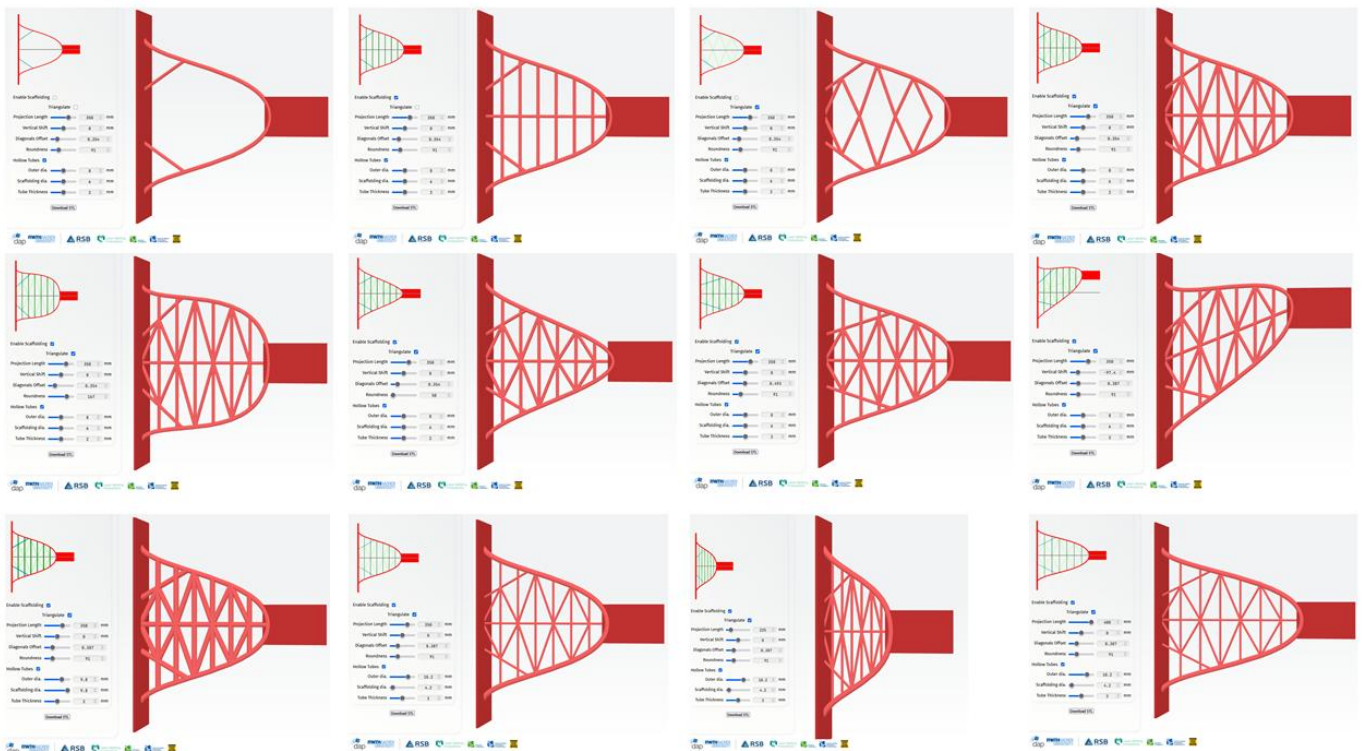


Abbildung 29: Exemplarische parametrisch vorgenommene Designänderungen in der zweiten Version des Konfigurators.

Implementierung Konfiguratorkonzept 2

Der Konfigurator wurde als browserbasierte Software entwickelt. Das Frontend ist dabei mit Mithril.js mit TypeScript implementiert. Als Build-System wird Vite verwendet. Halter- und Materialdaten werden in einer Datenbank gespeichert. Hierfür wurde PGLite als integrierte Datenbanklösung verwendet. PGLite ist eine Variante von PostgreSQL, die mittels WebAssembly direkt im Browser ausgeführt wird (siehe Abschnitt Datenbankstruktur des Konfigurators). Um die Performance der Konfiguratorsoftware zu verbessern, wurden für aufwendige Optimierungsberechnungen Web Worker implementiert, die im Hintergrund ablaufen (siehe Abschnitt U-Wert-Optimierung). Für die Generierung des Statischen Nachweises im PDF-Format wurde JS PDF libs verwendet. Der grundsätzliche Funktionsablauf ist vereinfacht in Abbildung 30 dargestellt. Im Folgenden wird auf die einzelnen Elemente der Software näher eingegangen.

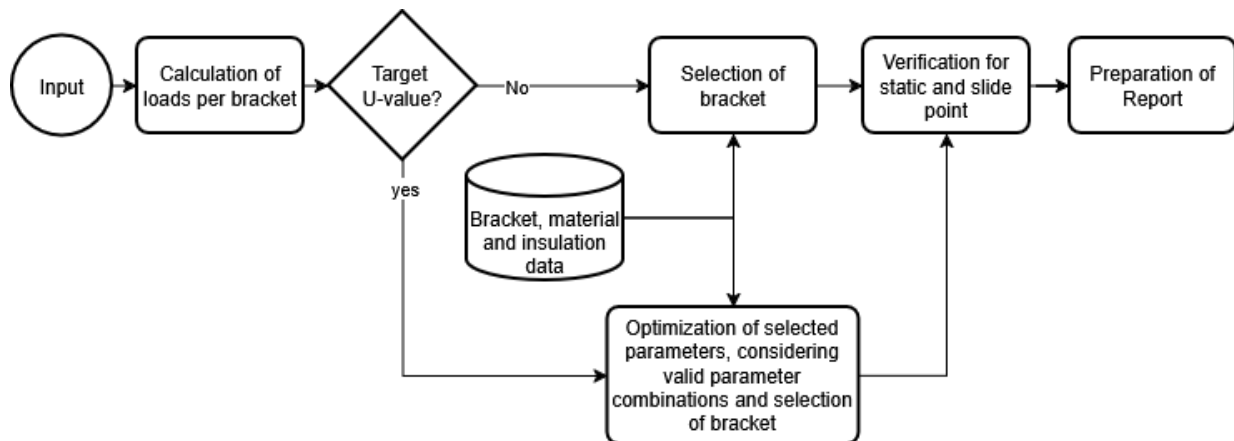


Abbildung 30: Vereinfachte schematische Darstellung der Funktionsweise des Konfigurators.

Benutzeroberfläche (GUI)

Der Konfigurator ist aus Anwendersicht in drei Bereiche unterteilt: Die erste Seite der Benutzeroberfläche dient zur Eingabe der individuellen Inputs zur Planung der Fassade (vgl. Abbildung 31) und enthält die entscheidenden Parameter zur Planung der Halterkonfiguration und -auswahl. Hierzu gehören u.a. die Gebäudegeometrie, Windparameter, Daten zu den Brackets, dem Wandaufbau und Angaben zum Ziel-U-Wert. Die detaillierten Eingabemöglichkeiten sind in Tabelle 10 aufgelistet. Dieser Bereich der Benutzeroberfläche stellt auch die zusammengefassten Outputdaten zum ausgewählten Halter und den berechneten Lastdaten bereit. Dies sind der kombinierte erreichte U-Wert, Geometriedaten sowie eine Abbildung zum ausgewählten Halter, die resultierenden Lasten aus den angegebenen Inputdaten, der U-Wert eines einzelnen Halters, sowie der kombinierte Wert pro m².

Der zweite Bereich enthält alle wichtigen Informationen zum statischen Nachweis sowie die Möglichkeit einen Report des Nachweises im PDF-Format zu erstellen und herunterzuladen (vgl. Abbildung 32). Der Report enthält eine Zusammenfassung der Inputparameter sowie die statischen Nachweise jeweils für den Festpunkt sowie den Gleitpunkt. Ein Beispiel eines solchen Reports ist in Kapitel Beispielreport(Seite 52) zu finden.

Der dritte Bereich ist der Admin-Bereich, in welchem die für die Berechnungen benötigten Daten gemanagt werden können. Hier können weitere Materialdaten, Halterdaten etc. eingetragen werden, wodurch die sich die Auswahlmöglichkeiten und damit der Lösungsraum für den Konfigurator erhöhen. Ein Ausschnitt des Admin-Bereichs ist in Abbildung 33 dargestellt. Die Daten werden in einer Datenbankstruktur gespeichert (siehe Abschnitt Datenbankstruktur des Konfigurators).

**Abschlussbericht AddMamBa (Teil I & II):
Additive Manufacturing von 3D Verbindungselementen
im Bauwesen**

AddMamba

Key IO

Analysis

Admin

Key IO

Inputs

Building Geometry

Width

30

m

Length

45

m

Height

15

m

Wind Parameters

Wind Load Type

Inland A

Gust Speed Pressure

Simplified (U

Terrain Category

Category I

Facade/Brackets

Bracket Type

L-bracket

Self Weight

20

kg/m²

Horiz. Console Distance

0,5

m

Use target U-value?

☒

Optimization Mode

Fix:

One

Many

Keep one parameter fixed, vary all others to find optimal U-value

Material

Aluminium

Grade

default

Insulation Thickness

140

mm

Fixed Points

0,87

/m²

Slide Points / Static

2

Fixed

Target U Value

1

W/(m²·K)

Found U Value

0,999

W/(m²·K)

Recalculate

Screw Configuration

Number of Screws

1

Screw Diameter

5,5

mm

Bracket Holes

Hole Diameter

6

mm

Hole Edge Dist. (Force Dir.)

20

mm

Hole Edge Dist. (Transverse)

75

mm

Key Outputs

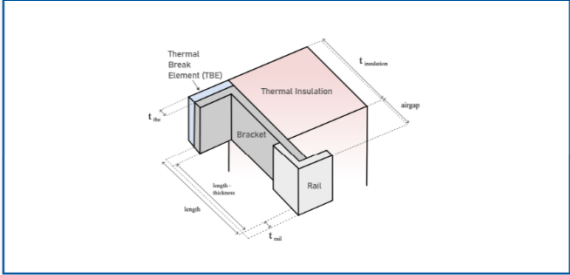
Output Preview

U_d (combined)

0,999

W/(m²·K)

Visualisation



Bracket Geometry

Thickness

3

mm

Length

188

mm

Slide

Height

80

mm

Width

60

mm

Static

Height

150

mm

Width

60

mm

Loads

Self Weight

0,27

kg/m²

Load Case

Pressure

-1,17

kN/m²

Suction

0,728

kN/m²

Linear Rail

Pressure

-5,85

kN/m

Suction

3,64

kN/m

Bracket Max

Pressure

-4,875

kN

Suction

3,033

kN

Heat Transfer Coefficients

U_n

0,23

W/(m²·K)

U_d (combined)

0,999

W/(m²·K)

χ (combined)

0,167

W/K

Abbildung 31: Benutzeroberfläche für die Eingabe der Input-Parameter zur Gebäude- und Fassadenspezifikation sowie zur Konfiguration der Halter.

Tabelle 10: Inputparameter des Konfigurators

Kategorie	Input-Parameter	Auswahlmöglichkeiten / erf. Eingabe
Building Geometry	Width	Width in m
	Length	Length in m
	Height	Height in m
Wind Parameters	Wind Load Type	Inland A
		Inland B / Ostsee Coast & Islands A
		Inland C / Ostsee Coast & Islands B
		Inland D / Nord- & Ostsee Coast / Nordsee Islands
	Gust Speed Pressure	Simplified (Under 25 m)
		Standard Case
		Accurate (Ground Roughness)
	Terrain Category	Category I
		Category I & II
		Category II & III
		Recorded Min 2
		Recorded Min 4
		Recorded Min 8
		Recorded Min 16
Façade / Brackets	Bracket Type	L-bracket
		U-bracket
		Extendable, depending on available data base entries. The data base entries indicate, if the respective brackets needs additional cross sectional data.
	Self Weight	Self Weight in kg/m ²
	Horizontal Console Distance	Distance in m
	Use target U-value	Yes / no; if yes: optimization mode is activated
	Material and Grade	All Materials added and available in Data Base
	Insulation Thickness	Insulation Thickness in mm
Screw Configuration	Fixed Points	Number of fixed points/m ²
	Slidepoints/Static	Number of Slide Points/Fixed Point
Bracket Holes	Number of Screws	fixed
	Screw diameter	fixed
	Hole Diameter	fixed
Bracket Holes	Hole Edge Distance (Force direction)	fixed
	Hole Edge Distance (Transverse)	fixed

AddMamba

Key IO

Analysis

Admin

Analysis

Buckling Verification (EN 1993-1-1 §6.3.3)

Static

Slide

Bracket Distribution

Static pts/m² 0.872 /m²

Slide/Static 2 [-]

Slide pts/m² 0.436 /m²

Vert FP dist 2 m

Vert console 0.667 m

Load ratio 1.25 [-]

Applied Loads

N_Ed 0.78 kN

M_Ed 4.455 kNcm

V_Ed 0.27 kN

N_tEd 0.485 kN

N_cEd 0.78 kN

Y-Axis (weak)

N_cr,y 33418.47 / 2484.156 kN

λ_y 0.04 / 0.108 [-]

Φ_y 0.462 / 0.483 [-]

χ_y 1 / 1 [-]

N_b,Rd,y 49.091 / 26.182 kN

k_yy 0.6 / — [-]

Z-Axis (strong)

N_cr,z 13.367 / 3.493 kN

λ_z 2.01 / 2.871 [-]

Φ_z 2.963 / 5.277 [-]

χ_z 0.195 / 0.103 [-]

N_b,Rd,z 9.549 / 2.698 kN

k_zy 0.987 / — [-]

Thermal Combining

U_n (base) 0.23 W/(m²·K)

U_d,static 0.317 W/(m²·K)

U_d,slide 0.282 W/(m²·K)

Formula 0.23 + 0.872 × 0.317 + 0.436 × 0.282

= U_d,combined 0.999 W/(m²·K)

χ_combined 0.167 W/K

Load Path Check

Wind → Rail 0.485 kN/m² → 3.64 kN/m

Rail → Bracket 3.64 kN/m → 3.033 kN

Formula 1.25 × 3.64 × 0.667

Material

f_y 12 kN/cm²

E 6950 kN/cm²

Geometry

A 4.5 / 2.4 cm²

I_y 84.375 / 12.8 cm⁴

I_z 0.034 / 0.018 cm⁴

W_y 11.25 / 3.2 cm³

Buckling Length

β 0.7 / 1 [-]

L_cr 13.16 / 18.8 cm

α 0.49 / 0.49 [-]

✓ PASSED

η_y = 0.038

| η_z = 0.118

(must be ≤ 1.0)

Regenerate PDF

Download PDF

1 von 4

Automatischer Zoom

Bracket Analysis Report

23 February 2026

Configuration Summary

Parameter	Value	Unit
Building Geometry		
Width	30	m
Length	45	m
Height	15	m
Wind Loads		
Location Type	Below 25m	
Terrain Category	0	
Gust-Speed Pressure	Not considered	
Self Weight	20	kg/m ²
Bracket Configuration		

Abbildung 32: Analysebereich des Konfigurators mit der Übersicht der Kennwerte für die statischen Nachweise des Fest- und Gleitpunkts sowie Ansicht- und Downloadbereich für den PDF-Report mit einer Zusammenfassung der Inputdaten und dem zusammengefassten statischen Nachweis für Fest- und Gleitpunkt.

AddMamba [Key IO] [Analysis] [Admin]

Admin

Configuration Management

[Export] [Import]

Material Types
Available material types for configuration

ID	Name	Display Name	Actions
1	aluminium	Aluminium	[Delete]
2	steel	Steel	[Delete]

CSV: # Name, Display Name [Enter]

Material Configs
Material properties for thermal and structural calculations

ID	Name	Material	Grade	Conductivity [W/m-K]	Yield Strength [N/mm²]	Tensile Strength [N/mm²]	Young's Modulus [N/mm²]	Actions
1	aluminium_default	Aluminium	default	160.0000	12.0000	16.0000	6950.0000	[Delete]
2	steel_default	Steel	default	50.0000	23.5000	36.0000	21000.0000	[Delete]
3	steel_stainless	Steel	stainless	17.0000	21.0000	50.0000	20000.0000	[Delete]

Abbildung 33: Ausschnitt des Admin-Bereichs der Benutzeroberfläche des Konfigurators.

Datenbankstruktur des Konfigurators

Die für den Konfigurator relevanten Daten wie beispielsweise Bracketvarianten, Dämmschichtdicken, Material- und Wärmeübergangsdaten sind in einer Datenbank hinterlegt. Hierfür wird PGLite als integrierte Datenbanklösung verwendet. PGLite ist eine Variante von PostgreSQL, die mittels WebAssembly direkt im Browser ausgeführt wird. Die verwendete Datenbankstruktur ist in Abbildung 34 dargestellt. Neue Daten können durch den Anwender im Admin-Bereich durch die Eingabe der erforderlichen Werte in einer CSV formatierten Struktur ergänzt werden. Die erstellten Datensätze können ebenfalls exportiert werden, falls erforderlich. Nicht mehr benötigte Daten können über einen „Löschen“-Button entfernt werden.

Die Daten zu den *Bracket Configurations* unterscheiden sich zwischen Standard- und Custom-Brackets. Custom-Brackets erfordern die zusätzliche Angabe der *Cross Sectional Area*, der *Shear Cross Sectional Area*, *Moment of Inertia Y*, *Moment of Inertia Z* und *Moment of Resistance Y*. Bei Standardbrackets werden diese Größen aus den angegebenen Dimensionen berechnet.

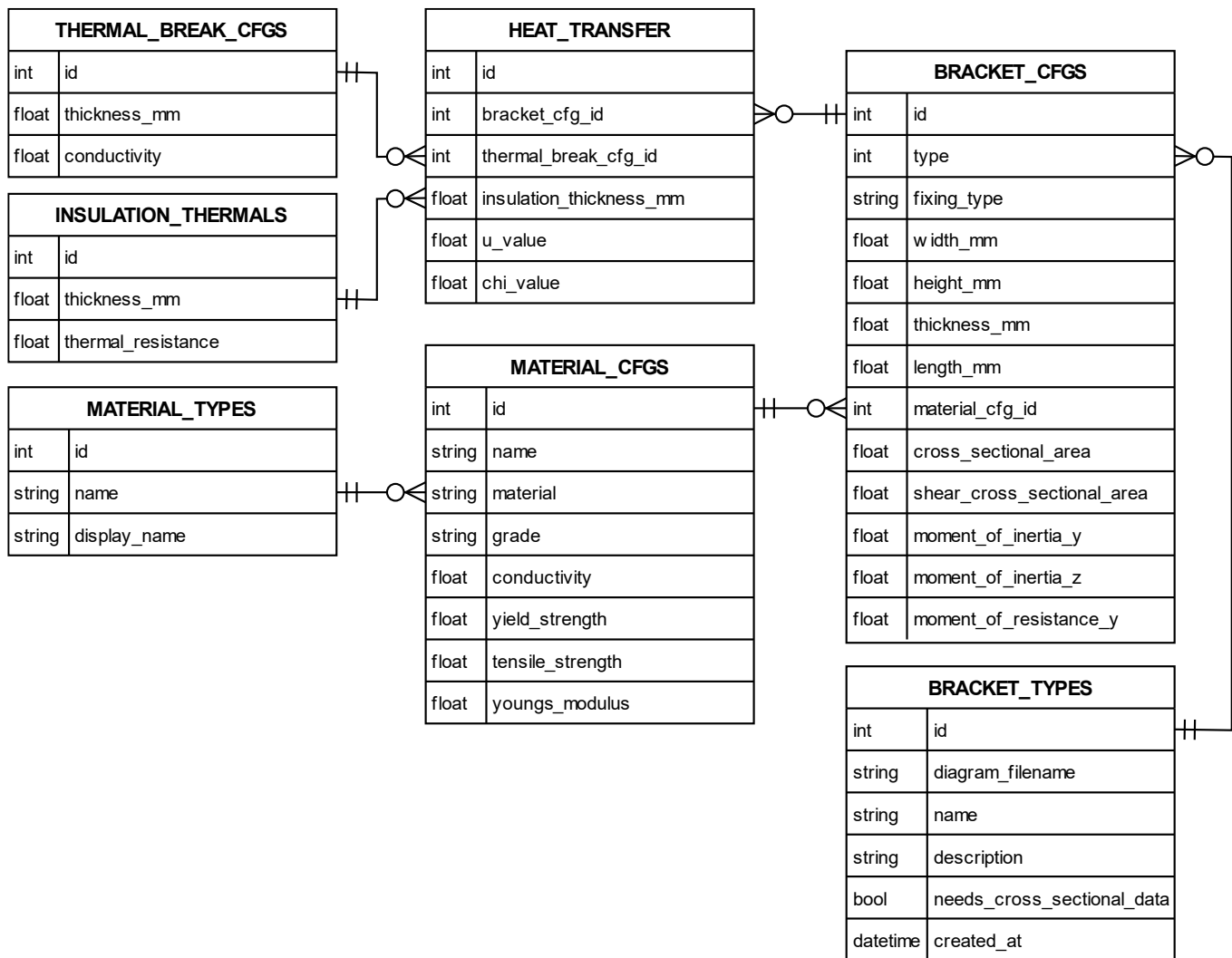


Abbildung 34: Datenbankstruktur des Konfigurators

Berechnung der Lasten, Structural Buckling Analysis (nach Eurocode EN 1993)

Die Lasten, die auf einen einzelnen Halter wirken, werden anhand der jeweiligen Inputparameter berechnet. Diese sind abhängig von den Gebäudedimensionen, den Windparametern, dem Eigengewicht, dem horizontalen Halterabstand, der Anzahl an Festpunkten pro m² sowie der Anzahl an Gleitpunkten je Festpunkt. Aus dem horizontalen Abstand der Halter, der Anzahl an Festpunkte pro m² und der Anzahl an Gleitpunkten je Festpunkt kann das statische System bestimmt werden und zusammen mit den übrigen Inputgrößen die resultierende Linienlast und die Last pro Halter. Mit diesen Informationen und ggf. zusätzlichen Angaben zum Ziel-U-Wert (siehe Kapitel U-Wert-Optimierung) kann ein passender Halter aus der Datenbank ausgewählt werden. Für diesen wird ein Nachweis nach Norm gegen Stabilitätsversagen auf Druck sowie ein Querschnittsnachweis für Zuglasten erstellt. Zusätzlich erfolgt ein Nachweis für die Lochleibung der Schrauben am vorderen Ende des Halters.

Damit auch Custom Fassadenhalter in dem Konfigurator berücksichtigt werden können, wird im Berechnungsablauf geprüft, ob es sich beim gewünschten Halter um einen Standard- oder einen Custom-Halter handelt. Bei Standardhaltern werden alle Berechnungen mit Bezug zur Querschnittsfläche mithilfe der jeweils angegebenen Halterdimensionen berechnet. Bei Custom-Haltern müssen beim Hinterlegen der Halterdaten die relevante Querschnittsfläche sowie die relevanten Flächenträgheits- und Widerstandsmomente mit angegeben werden. Die darauf aufbauenden Berechnungen verwenden bei den Custom-Haltern dementsprechend die direkt angegebenen Werte (vgl. Abbildung 35).

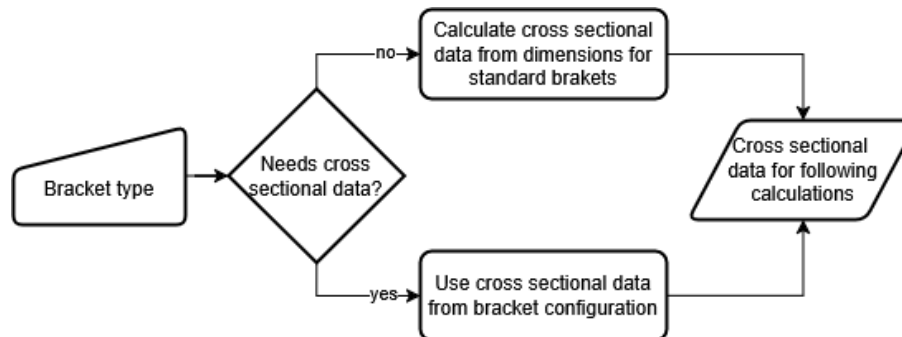


Abbildung 35: Schematische Darstellung des Unterschieds im Berechnungsworkflow von Standardhaltern und Custom-Haltern.

U-Wert-Optimierung

Der Konfigurator kann bei vorgegebenem Ziel-U-Wert Halter mittels Optimierung möglichst passende Halter zu den jeweiligen Anforderungen ausgeben. Die Optimierung ist mithilfe eines Optimization Manager umgesetzt, der über Web Worker eine Gradient Descent Optimierung verwaltet. Dies ermöglicht eine flüssige Nutzungserfahrung für den Anwender. Der Optimization Manager steuert den Web Worker sowie die Optimierungsanfragen an diesen. Bevor der Web Worker die Optimierung starten kann, müssen die aktuellen Inputdaten dafür vorbereitet werden (Haltermaterial und -güte, Isolierungsdicke, Anzahl Festpunkte pro m², Anzahl Gleitpunkte pro Festpunkt, Haltertyp). Diese werden dann an den Web Worker gesendet. Sobald dieser bereit ist, beginnt die Optimierung in Abhängigkeit von den gewählten Einstellungen. Ein vereinfachtes Schema des Optimierungsablaufs ist in Abbildung 36 dargestellt. Bei der Optimierung kann unterschieden werden, wie viele (einer oder mehrere) und welche Parameter verändert werden dürfen und welche als feste Werte in den Optimierungsprozess übernommen werden. Im Falle, dass nur die Anzahl an Festpunkten verändert werden darf, um den Ziel-U-Wert zu erreichen, wird die Anzahl aus Performancegründen direkt mit der Gradient Descent Methode optimiert. Beim Gradient Descent Verfahren wird der Fehler iterativ minimiert, indem in kleinen Schritten in die Richtung der größten Abnahme des Fehlergradienten gegangen wird. In den anderen Fällen werden, abhängig davon, ob ein einzelner oder mehrere Parameter optimiert werden sollen, gültige Parameterkombinationen erstellt, in Batches gespeichert und nacheinander abgearbeitet. Dabei wird der die Differenz des jeweils erreichten U-Werts und dem Ziel-U-Wert berechnet. Ist diese Differenz kleiner als bei dem bisher besten Ergebnis, wird dieses mit dem neuen Ergebnis aktualisiert. Falls die Anzahl der Festpunkte ein variabler Parameter ist, wird auch hier die Gradient Descent Optimierung angewendet, um die beste Parameterkombination zu finden. Nach erfolgreicher Optimierung wird die beste Parameterkombination vom Web Worker an den Optimization Manager zurückgegeben, der die Inputparameter mit den optimierten Parametern aktualisiert.

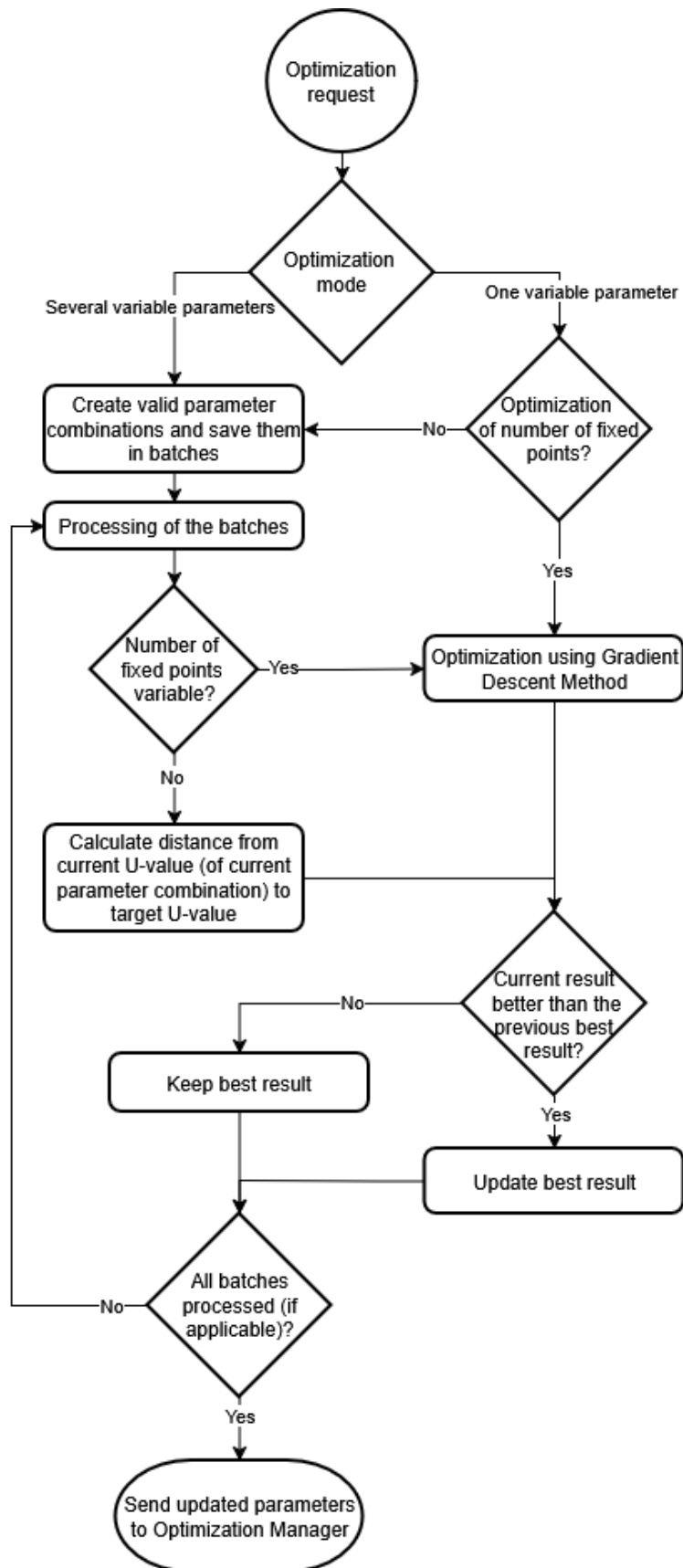


Abbildung 36: Vereinfachter schematischer Ablauf der U-Wert-Optimierung

Beispielreport

Bracket Analysis Report

23 February 2026

Configuration Summary

Parameter	Value	Unit
Building Geometry		
Width	30	m
Length	45	m
Height	15	m
Wind Loads		
Location Type	Below 25m	
Terrain Category	0	
Gust-Speed Pressure	Not considered	
Self Weight	20	kg/m ²
Bracket Configuration		
Bracket Type	L-bracket	
Material	Aluminium	
Grade	default	
Horiz. Console Distance	0.5	m
Fixed Points	0.87	/m ²
Slide Points / Static	2	
Material Properties		
Conductivity	160	W/(m·K)
Yield Strength	12	kN/cm ²
Tensile Strength	16	kN/cm ²
Young's Modulus	6950	kN/cm ²
Insulation & Thermal Break		
Insulation Thickness	140	mm
Insulation Thermal Resistance	0.23	m ² ·K/W
Thermal Break Thickness	10	mm
Thermal Break Conductivity	0.2	W/(m·K)
Screw Configuration		
Screw Hole Diameter	6	mm

Abschlussbericht AddMamBa (Teil I & II):
Additive Manufacturing von 3D Verbindungselementen
im Bauwesen



Screw Diameter	5.5	mm
Hole-Edge Dist. (Force Dir.)	20	mm
Hole-Edge Dist. (Transverse)	75	mm
Target U-value	1	W/(m ² ·K)
Achieved U-value	0.999	W/(m ² ·K)

Verification for static point

Euler's case 3

Buckling Verification		
Parameter	Value	Unit
β	0.7	[-]
l_{cr}	13.16	cm
Checks		
N/A		

Buckling in y-direction		
Parameter	Value	Unit
I_y	84.375	cm ⁴
N_{cr}	33418.47	kN
λ	0.04	[-]
Buckling curve	c	
α	0.49	[-]
Φ	0.462	[-]
χ	1	[-]
$N_{b,Rd}$	49.091	kN
Checks		
$N_{Ed} \leq N_{b,Rd}$: $0.78 \leq 49.091$ kN [OK]		
Buckling Interaction (y) ≤ 1.0 : $0.038 \leq 1.0$ [-] [OK]		

Buckling in z-direction		
Parameter	Value	Unit
I_z	0.034	cm ⁴
N_{cr}	13.367	kN
λ	2.01	[-]
Buckling curve	c	
α	0.49	[-]
Φ	2.963	[-]
χ	0.195	[-]
$N_{b,Rd}$	9.549	kN
Checks		
Buckling Interaction (z) ≤ 1.0 : $0.118 \leq 1.0$ [-] [OK]		

Verification for slide point

Euler's case 2

Buckling Verification		
Parameter	Value	Unit
β	1	[-]
l_{cr}	18.8	cm
Checks		
N/A		

Buckling in y-direction		
Parameter	Value	Unit
I_y	12.8	cm ⁴
N_{cr}	2484.156	kN
λ	0.108	[-]
Buckling curve	c	
α	0.49	[-]
Φ	0.483	[-]
χ	1	[-]
$N_{b,Rd}$	26.182	kN
Checks		
$N_{Ed} \leq N_{b,Rd}$: $0.78 \leq 26.182$ kN [OK]		

Buckling in z-direction		
Parameter	Value	Unit
I_z	0.018	cm ⁴
N_{cr}	3.493	kN
λ	2.871	[-]
Buckling curve	c	
α	0.49	[-]
Φ	5.277	[-]
χ	0.103	[-]
$N_{b,Rd}$	2.698	kN
Checks		
$N_{Ed} \leq N_{b,Rd}$: $0.78 \leq 2.698$ kN [OK]		

**Abschlussbericht AddMamBa (Teil I & II):
Additive Manufacturing von 3D Verbindungselementen
im Bauwesen**



Cross-sectional verifications		
Parameter	Value	Unit
η_N	0.016	[-]
η_V	0.009	[-]
η_M	0.033	[-]
Checks		
$N_{Ed} \leq N_{t,Rd}: 0.78 \leq 49.766 \text{ kN [OK]}$		
$V_{Ed} \leq V_{c,Rd}: 0.27 \leq 31.177 \text{ kN [OK]}$		
$M_{Ed} \leq M_{el,Rd}: 4.455 \leq 135 \text{ kNcm [OK]}$		
$M-N \text{ Interaction} \leq f_{ty}/\gamma_{m0}: 0.569 \leq 12 \text{ kN/cm}^2 \text{ [OK]}$		

Bearing resistance		
Parameter	Value	Unit
η_S	0.135	[-]
Checks		
$N_{Ed} \leq F_{b,Rd}: 0.78 \leq 5.76 \text{ kN [OK]}$		

Cross-sectional verifications		
Parameter	Value	Unit
η_N	0.016	[-]
Checks		
N/A		

Bearing resistance		
Parameter	Value	Unit
η_S	0.135	[-]
Checks		
$N_{Ed} \leq F_{b,Rd}: 0.78 \leq 5.76 \text{ kN [OK]}$		

AP5.3 Statische und bauphysikalische Bauteiloptimierung

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden sowohl Strukturknoten als auch Fassadenhalter einer strukturellen Optimierung unterzogen. Ziel war es, die fertigungstechnischen Freiheitsgrade der additiven Fertigung zu nutzen, um einerseits ressourcenschonender zu produzieren (Materialeinsparung, Prozessverkürzung) und andererseits bauphysikalisch (Fassadenhalter) beziehungsweise montagefreundlich (Steckverbindungen) optimierte Strukturen zu entwickeln.

Für Halter zur Befestigung vorgehängter hinterlüfteter Fassaden lassen sich aus den Nutzungsanforderungen klare Randbedingungen ableiten (statisches System, Belastung, Produktabmessungen). Diese wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens genutzt, um einen bauphysikalisch optimierten Fassadenhalter mit reduzierter Wärmebrückenwirkung zu entwickeln, der gleichzeitig die funktionalen und marktüblichen Anforderungen erfüllt. Die methodische Vorgehensweise wird in diesem Kapitel detailliert beschrieben.

Im Gegensatz dazu lassen sich die Anforderungen an einen Strukturknoten nicht allein aus den Nutzungsanforderungen eindeutig definieren. Strukturknoten können eine Vielzahl an geometrischen und konstruktiven Variationen aufweisen, beispielsweise hinsichtlich der Anzahl zusammenlaufender Streben, der Profilabmessungen, der Knotenabmessungen oder der Ausführung als gelenkige beziehungsweise steife Verbindung. Vor diesem Hintergrund wurde der Fokus auf Steckverbindungen gelegt. Im Rahmen einer Machbarkeitsstudie wurde zunächst die Optimierung rechteckiger Knoten für die Anbindung von I-Profilen und rechteckigen Hohlprofilen sowie quadratischer Knoten für die Anbindung quadratischer Hohlprofile untersucht. Als geometrische Referenz- und Optimierungsgrundlage dienten der Sigmaknoten sowie die aus dem Holzbau bekannte Schwalbenschwanzverbindung, die hinsichtlich ihrer Übertragbarkeit auf additiv gefertigte Stahlknoten untersucht wurden.

Fassadenhalter

Im Projekt wurden thermisch und statisch optimierte Fassadenhalter (Fest-/ und Gleitpunkt) entwickelt. Bei der Entwicklung fanden sowohl die erweiterte Designfreiheit als auch Fertigungsrestriktionen des additiven Fertigungsverfahrens PBF-LB/M Berücksichtigung. Die verwendete zweistufige Optimierung setzte sich aus einer Topologieoptimierung zur Entwicklung der grundsätzlichen Geometrie des Halters und einer Parameterstudie zur Optimierung der Querschnitte für einen möglichst geringen Wärmedurchgang zusammen.

Die Topologieoptimierung ist ein computergestütztes Verfahren zur strukturellen Optimierung von Bauteilen. Mithilfe von vorgegebenen Lasten und weiteren Randbedingungen wird innerhalb eines definierten Designraums eine günstige Materialverteilung berechnet. Materialbereiche, die wenig belastet werden und somit für die Funktion des Bauteils nicht relevant sind, werden während der Optimierung entfernt. Das Verfahren wird daher häufig für die initiale Formfindung für ein Bauteil verwendet. Das Ziel hierbei ist die Materialeffizienz im Hinblick auf Bauteilgewicht und Materialkosten zu erhöhen bei z.B. gleicher Bauteilsteifigkeit. Die grundsätzliche Vorgehensweise gliedert sich in die drei sich ergänzenden Phasen (1) Konzeptphase, (2) Definitionsphase und (3) Detaillierungsphase, welche in

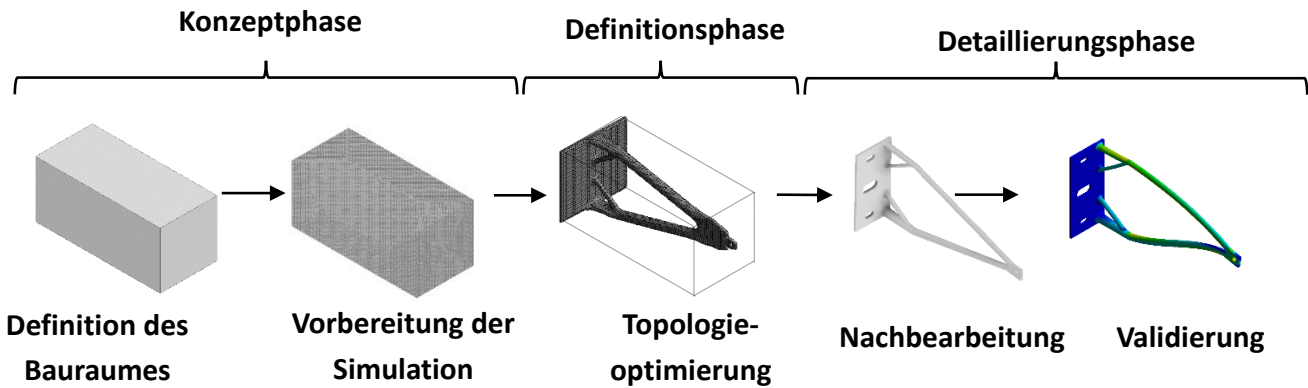


Abbildung 37 dargestellt sind.

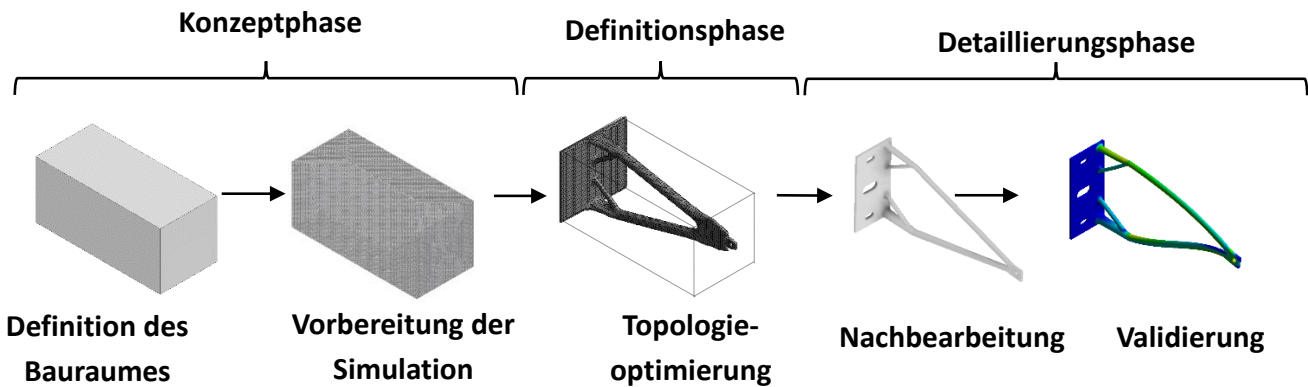


Abbildung 37: Topologieoptimierung von der Konzeptphase über die Definitionsphase bis zur Detaillierungsphase.

Vorgehen bei der Optimierung des Fassadenhalters

Zu Beginn der Optimierung der Fassadenhalter erfolgte die grundsätzliche Formgebung mittels Topologieoptimierung.

In der Konzeptphase sind grundsätzliche geometrische Randbedingungen und Lastfälle für den Fest- und Gleitpunkt definiert worden. Dies umfasst die Berücksichtigung der Windlasten, Eigengewichte und deren Kombinationen gemäß einschlägiger Normen, insbesondere DIN EN 1991 1 4/NA. Da Kollisionen mit angrenzenden Bauteilen weitgehend ausgeschlossen werden können, wurde der Bauraum unter Berücksichtigung angrenzender Bauteile großzügig dimensioniert, um möglichst wenig Einschränkungen für die spätere Formgebung zu setzen.

Die Definitionsphase ist der zentrale Schritt der Optimierung. Ausgehend von dem zuvor definierten Designraum und unter Berücksichtigung der gewählten Lasten und Randbedingungen wird in dieser Phase numerisch die optimale Materialverteilung ermittelt, um für die angenommene Belastung möglichst materialeffiziente Strukturen zu generieren. Im Fokus stehen zwei alternative Optimierungsansätze. Der erste Ansatz, die Minimierung der Nachgiebigkeit bei Volumenrestriktion, zielt auf eine maximale Steifigkeit durch Minimierung der Verformungsenergie unter Verwendung der Methode Solid Isotropic Material with Penalization (SIMP) ab. Der zweite Ansatz, die Minimierung des Volumens bei Spannungsrestriktion, optimiert den Materialeinsatz unter Einhaltung zulässiger Spannungsgrenzen und liefert trotz höherem Rechenaufwand detailliertere Informationen über lokale Spannungsverteilungen.

Die TO erfolgt iterativ, wobei nach jeder Iteration Elemente entfernt oder behalten werden, um das Optimierungsziel unter Einhaltung der Restriktionen zu erfüllen. Die Wahl eines geeigneten Straffaktors im SIMP-Modell gewährleistet eine klare Unterteilung in strukturell notwendige und vernachlässigbare Elemente und fördert somit deutliche geometrische Konturen der generierten Strukturen.

Ein weiterer wesentlicher Bestandteil ist die Durchführung von Mehrzieloptimierungen zur gleichzeitigen Berücksichtigung verschiedener Lastfälle (z. B. Winddruck, Windsog und Eigengewicht). Hierbei wird die sogenannte Gewichtete-Summen-Methode genutzt, bei der die Einzelziele gewichtet und zu einer aggregierten Zielfunktion kombiniert werden. Die Gewichtungen resultieren aus dem Lastfallschweregrad (Load Case Severity Degree, LCSD), der die kritischen Lastfälle stärker berücksichtigt und so eine robustere, realitätsnähere Struktur ermöglicht. Das Ergebnis ist eine Geometrie, die für alle wesentlichen Belastungen optimiert ist.

Für die Gleitpunkthalter zeigte sich, dass aufgrund der ausschließlich horizontalen Belastung und der orthogonalen Wirkungslinie zur Einspannung die Topologie einer direkten Verbindung zwischen Lastangriffspunkt und Lagerungsbereich entspricht. Veränderungen des Designraums und der Randbedingungen zeigten keinen signifikanten Einfluss auf das Ergebnis. Die generierte Struktur wurde konstruktiv nachbearbeitet und basierend auf Parameterstudien zur thermischen Trennung, Querschnittsform und Hohlraumgestaltung weiter optimiert.

Bei den Festpunkthaltern wirken neben den Windlasten zusätzlich das Eigengewicht der Fassade, was zu tragwerksähnlichen, fachwerkartigen Strukturen mit diagonalen Stäben und aufwendigen Lastpfaden führte. Die durchgeführten Parameterstudien untersuchten systematisch die Einflüsse von Designraumabmessungen, Lastangriffspunkten und Lastverhältnissen. Dies resultierte in einer hohen Variation der erzeugten Geometrien, weshalb die Mehrzieloptimierung mittels gewichteter Lastfälle Anwendung fand, um eine Geometrie für alle Lastfälle abzuleiten. Die unterschiedlichen Varianten sind in Abbildung 38 dargestellt. In Abbildung 39 ist das Ergebnis der Gewichtete-Summen-Methode für einen Halter mit einer Länge von 220 mm dargestellt.

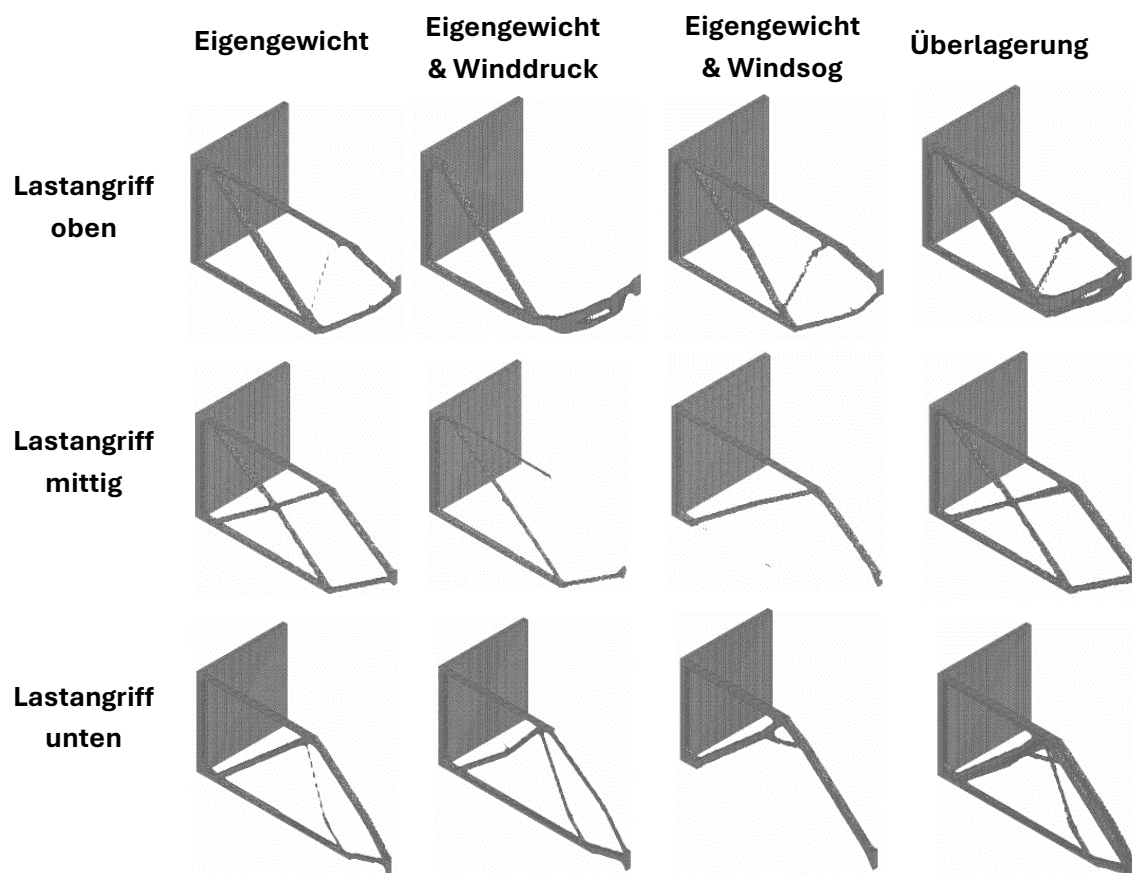


Abbildung 38: Erzeugte Geometrievariante des Festpunkthalters unter Berücksichtigung der drei Lastfälle Eigengewicht, Eigengewicht + Winddruck und Eigengewicht + Windsog und deren Überlagerung (v. l. n. r.) mit der Lastangriffsfläche oben, mittig und unten (v. o. n. u.).

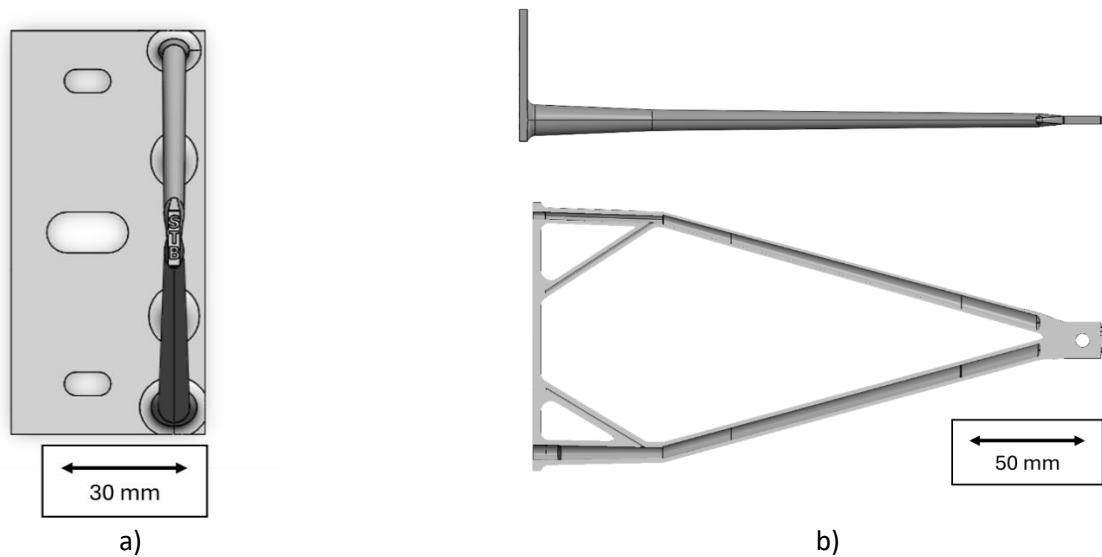


Abbildung 39: Halter nach der Gewichtete-Summen-Methode für eine Halterlänge von 220 mm a) Draufsicht b) Vorderansicht und Seitenansicht im Schnitt.

Auf Basis der vorgestellten Ergebnisse und unter Berücksichtigung allgemeiner Designrichtlinien für die additive Fertigung mittels PBF-LB/M-Verfahren wurden die finalen Halter konstruiert. Dabei wurden fließende Übergänge vorgesehen, um Wandstärkensprünge, ungünstige Überhänge und Stützstrukturen sowie Öffnungen in Hohlräumen zur Pulverentfernung zu vermeiden.

Validierung der Tragfähigkeit

Die Validierung der entwickelten Fassadenhalter erfolgte durch Finite-Elemente-Analysen (FEA) sowie experimentelle Prüfungen (Großprobenversuche, AP 6.3), um die Tragfähigkeit und Stabilität der Bauteile sicherzustellen. Bei den Gleitpunkthaltern wurden Spannungsanalysen für die maßgebenden Lastfälle Winddruck (3,0 kN) und Windsog (1,8 kN) durchgeführt. Die Vergleichsspannungen nach von Mises (Abbildung 40) wiesen gleichmäßige Verläufe auf, wobei lokale Spannungsspitzen an Bohrlöchern als Singularitäten erkannt und bei der Auswertung ausgeschlossen wurden. Ergänzend dazu wurde eine Stabilitätsanalyse in Form linearer und nichtlinearer Beulanalysen durchgeführt, die materielle und geometrische Nichtlinearitäten berücksichtigt. Die Fassadenhalter nehmen die erwarteten Lasten sicher auf.



Abbildung 40: Vergleichsspannungsverteilung nach von Mises des Gleitpunkthalters für den maßgebenden Lastfall Winddruck (3,0 kN): Draufsicht und Seitenansicht.

Entsprechend erfolgte die Validierung der Festpunkthalter analog mit Spannungsnachweisen und Beulanalysen auf Basis der gewichteten Lastfälle. Auch hier zeigten die linearen und nichtlinearen Stabilitätsanalysen, dass die Fassadenhalter die geforderten Belastungen aus Eigengewicht, Winddruck und Windsog tragen können. Die

vorverformten Eigenformen (Abbildung 41) aus der linearen Analyse dienten als Grundlage für die nichtlineare Analyse, wobei die zulässigen Lasten zwar unterschätzt, aber damit konservativ bewertet wurden.

Insgesamt bestätigten die Simulationen die mechanische Sicherheit, der unter Berücksichtigung der additiven Fertigung entwickelten, topologieoptimierten Fassadenhalter.

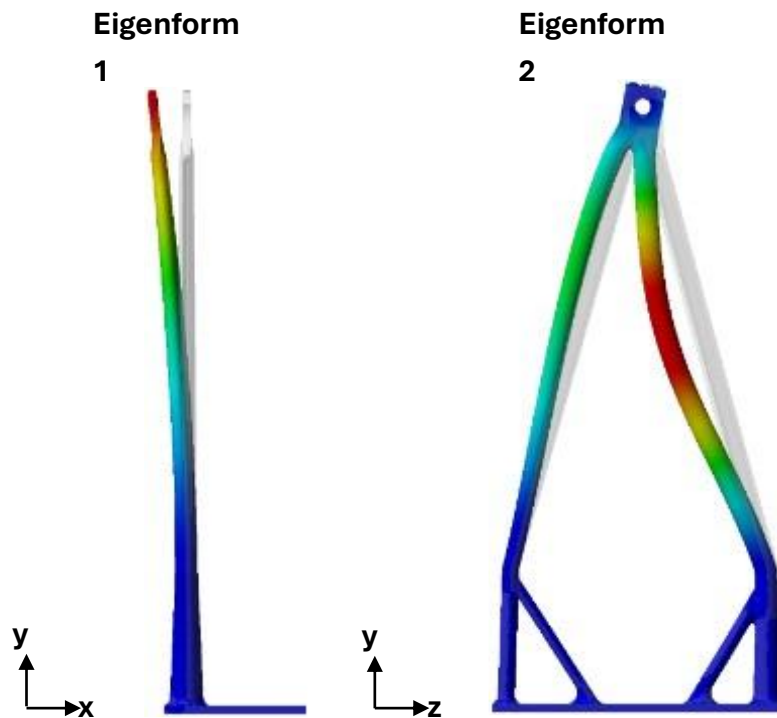


Abbildung 41: Maßgebende Eigenformen des Festpunkthalters bei den Eigenfrequenzen a) 154 Hz und b) 744 Hz

Reversible Steckverbindungen

Reversible Steckverbindungen im Bauwesen stellen als hochbeanspruchte Verbindungselemente eine zentrale Komponente für die Kraftübertragung in räumlichen Tragstrukturen dar. Aufgrund der komplexen Geometrie und der mehrdimensionalen Lastabtragung treten lokal erhöhte Spannungen sowie ausgeprägte Spannungsmehrachsigkeit auf, die das Versagensverhalten maßgeblich beeinflussen. Insbesondere bei additiv gefertigten Knoten besteht zugleich das Potenzial, durch gezielte geometrische Anpassungen Material effizient einzusetzen und gleichzeitig die mechanische Leistungsfähigkeit zu erhalten. Die nachfolgenden Untersuchungen betrachten Steckverbindungen daher als montageorientierte Erweiterung additiv gefertigter Knotenstrukturen. Ziel ist es, das Tragverhalten, die strukturelle Effizienz und das Potenzial zur Wiederverwendbarkeit dieser Verbindungskonzepte zu bewerten und mit geschweißten additiv gefertigten Knoten, insbesondere dem Sigmaknoten, systematisch zu vergleichen.

Vor diesem Hintergrund wurde untersucht, inwieweit sich verschiedene reversible Verbindungsstrukturen für die Kraftübertragung eignen. Ziel der Untersuchungen ist es, das Trag- und Verformungsverhalten unterschiedlicher Knotenvarianten systematisch zu vergleichen und das Potenzial hohler bzw. teilgefullter Strukturen hinsichtlich Tragfähigkeit, Steifigkeit und Versagensmechanismen zu bewerten. Neben einem Vergleich von verschiedenen Varianten des Sigmaknotens und Schwalbenschwanzverbindung (topologieoptimiert und infilloptimiert), wurden weitere Varianten des Sigmaknotens (Vergleich von einer massiven Referenzgeometrie mit sowohl vollständig hohlen Knotenvarianten mit variierenden Wandstärken als auch hohle Knoten mit innenliegenden Gitterstrukturen) betrachtet.

Vergleich von Sigmaknoten und Schwalbenschwanzverbindung

Der Sigmaknoten ist eine zweiteilige Steckverbindung, die zweiachsige Biegung sowie Normalkräfte und Querkkräfte übertragen kann. Sie bietet eine Alternative zu konventionellen geschraubten oder geschweißten Montageverbindungen und lässt sich mit den üblichen Profilen verbinden [35].

Die Schwalbenschwanzverbindung ist als Steckverbindung für Stahlkonstruktionen konzipiert und soll traditionelle Methoden wie Schweißen oder Verschrauben durch eine effizientere, leicht zu montierende Alternative ersetzen.

Die im Folgenden beschriebenen Optimierungen der Verbindungen konzentrierte sich auf die Reduzierung des Materialverbrauchs bei gleichzeitiger Gewährleistung, dass die Verbindungen typischen Belastungsszenarien, einschließlich Axialkräften, Scherkräften und Momenten, standhält. Der beide Verbindungen wurde durch einen systematischen Prozess optimiert, der Lastanalyse, Topologieoptimierung und Infill-Musterung kombinierte.

Der Optimierungsprozess begann mit einer detaillierten Lastanalyse unter Verwendung der FE-Analyse in ABAQUS. Beide Verbindungselemente wurden modelliert, um die Kräfte und Momente zu simulieren, die unter typischen Belastungsbedingungen in Stahlkonstruktionen auftreten. Die primären Lastfälle Zugkraft (N), Scherkräfte in z -Richtung (V_z), Moment um die y -Achse (M_y) und Moment um die z -Achse (M_z) wurden berücksichtigt, siehe Abbildung 42 und Abbildung 43.

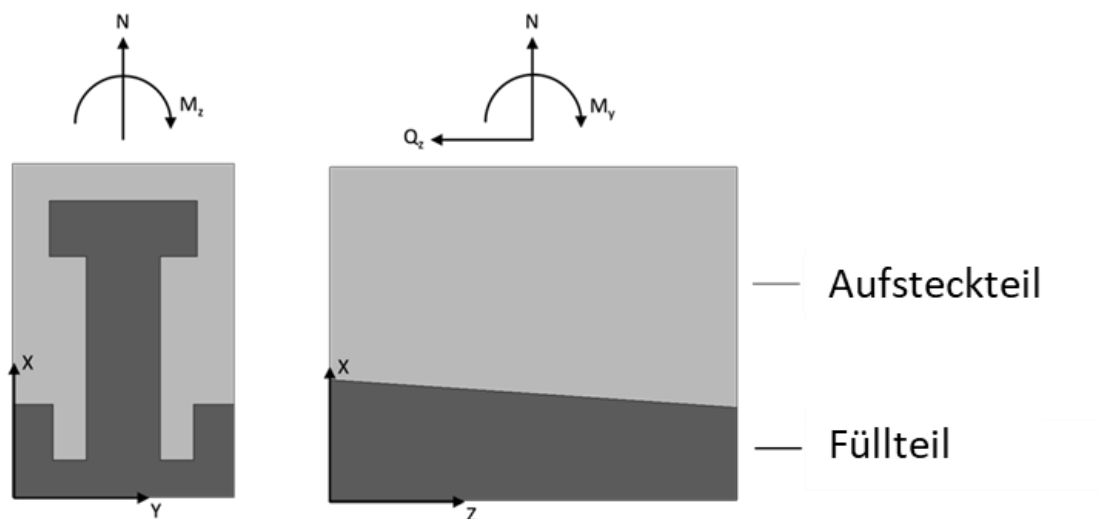


Abbildung 42: Verschiedene Belastungssituationen des Sigmaknoten.

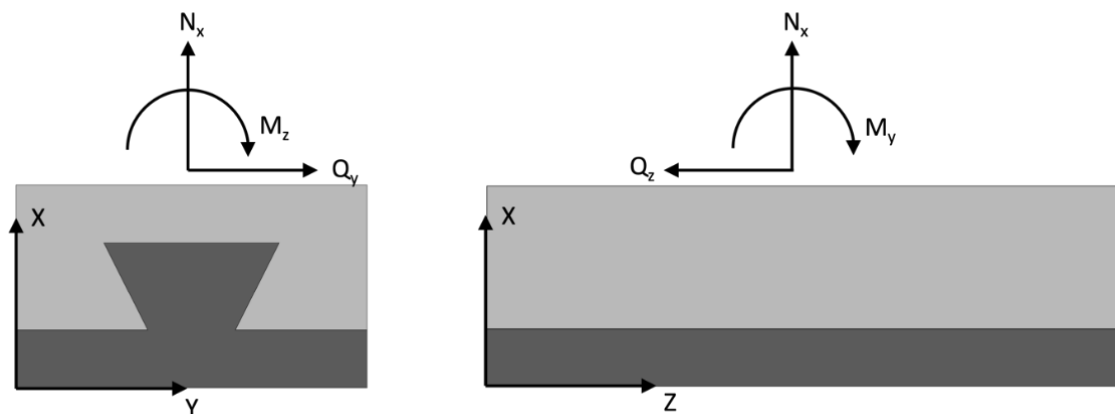


Abbildung 43: Verschiedene Belastungssituationen der Schwalbenschwanzverbindung.

Die Belastungsanalyse lieferte wichtige Erkenntnisse über das mechanische Verhalten der Verbindungen und zeigte Bereiche auf, in denen die Spannungen deutlich unter der Streckgrenze des Materials lagen. Diese Bereiche mit geringer Spannung standen im Mittelpunkt der anschließenden Topologieoptimierung. Bevor der Topologieoptimierungsprozess gestartet wurde, wurden zunächst manuell geeignete Ausgangsgeometrien ermittelt. Die Ergebnisse dieses Prozesses, die Eingabegeometrien für den Optimierungsprozess, ist in Abbildung 44 und Abbildung 45 dargestellt.

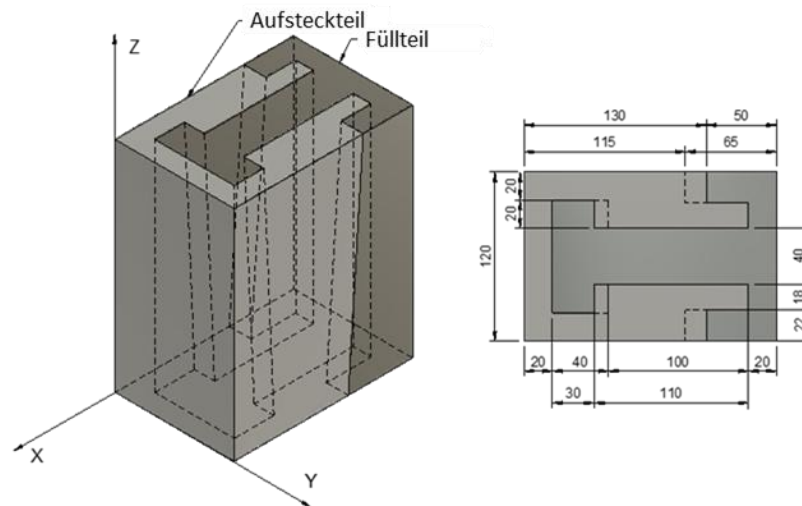


Abbildung 44: Abmessungen des Sigmaknotens zu Beginn des Optimierungsprozesses [mm]

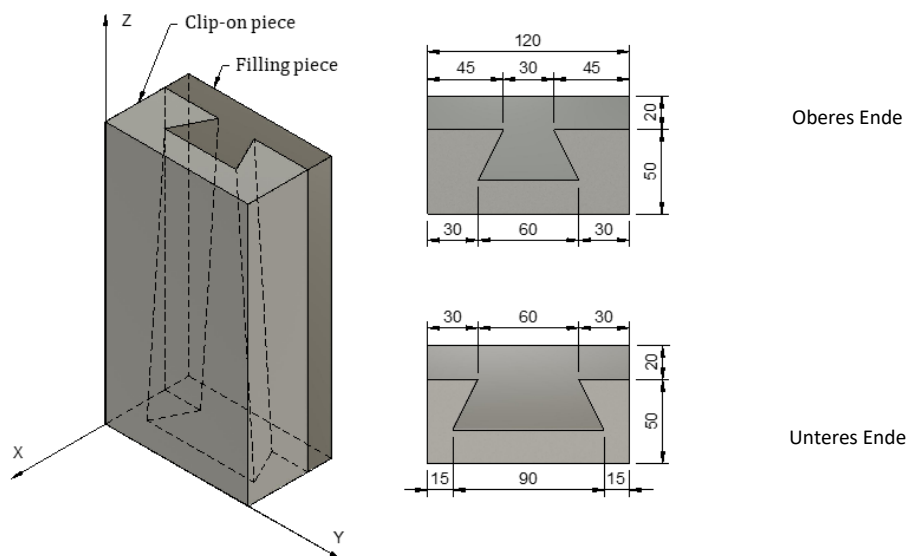


Abbildung 45: Abmessungen der Schwalbenschwanzverbindung zu Beginn des Optimierungsprozesses [mm]

Die Tragfähigkeit der ursprünglichen Modelle des Sigmaknotens und der Schwalbenschwanzverbindung ist für alle vier Lastbedingungen in Tabelle 11 und Tabelle 12 zusammengefasst.

Topologieoptimierung

Auf der Grundlage der Ergebnisse der Belastungsanalysen beider Verbindungsvarianten wurden Topologieoptimierungen durchgeführt, um für die strukturelle Leistungsfähigkeit nicht benötigtes Material zu entfernen. Die Topologieoptimierung ist ein iterativer Prozess, bei dem Material schrittweise aus Bereichen entfernt wird, die nur wenig zur Gesamtbelastbarkeit beitragen. Hierfür wurde das ABAQUS-Add-in TOSCA verwendet. Das Ziel

bestand darin, die mechanischen Eigenschaften der Verbindung zu erhalten oder zu verbessern und gleichzeitig das Materialvolumen zu minimieren, was durch die Maximierung des Verhältnisses von Festigkeit zu Gewicht definiert wurde. Die Optimierung zielte auf eine deutliche Gewichtsreduzierung ab, ohne die Belastungsgrenzen unter den aufgetragenen Lasten zu überschreiten. Die angestrebte Materialreduzierung wurde auf 10 % festgelegt. Der Optimierungsprozess stellte sicher, dass Bereiche mit hoher Spannung erhalten blieben, während in Bereichen mit geringer Spannung Material entfernt wurde, um die Gesamtmasse zu reduzieren. Das Ergebnis der Topologieoptimierung des Sigmaknotens unter Berücksichtigung der verschiedenen Lastfälle führte zu einer Gesamtvolumenreduzierung von 9 %, wobei die Fähigkeit den erforderlichen Zugkräften, Scherkräften und Momenten standzuhalten, erhalten blieb. Das Optimierungsergebnis ist in Abbildung 46 dargestellt.

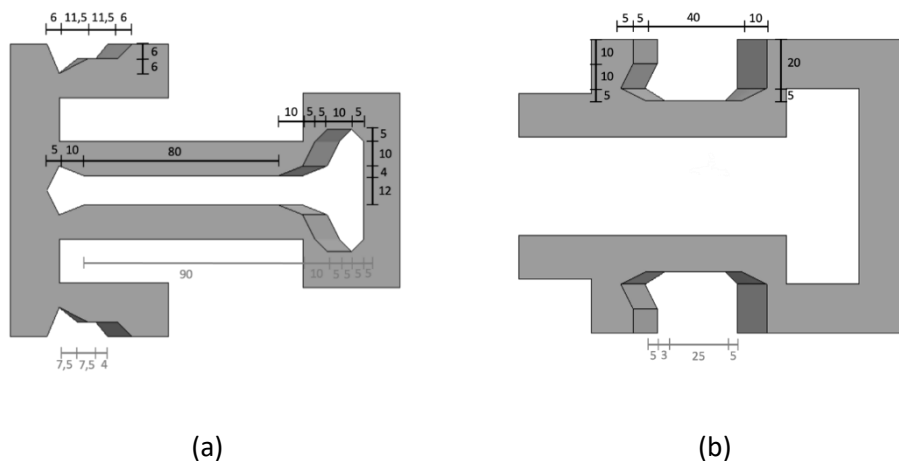


Abbildung 46: Kombinationsmodell des Sigmaknotens auf Basis der Topologieoptimierung a) Füllstück b) Aufsteckstück

Bei der Topologieoptimierung der Schwalbenschwanzverbindung konnte unter Berücksichtigung aller Belastungsarten eine Materialreduzierung von 28 % erreicht werden. Die strukturelle Tragfähigkeit blieb im Rahmen der Vorgaben erhalten. Das Ergebnis der topologieoptimierten Schwalbenschwanzverbindung ist in Abbildung 47 dargestellt.

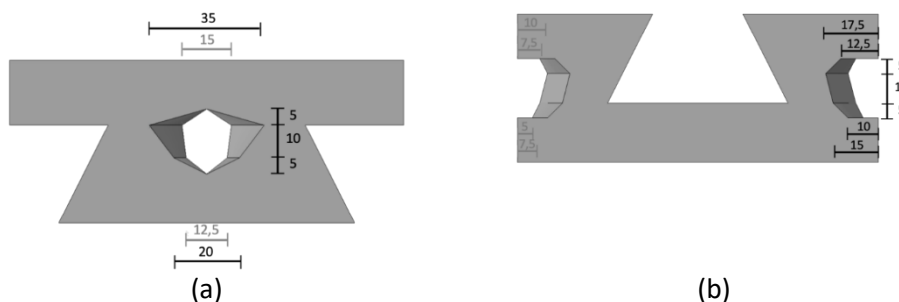
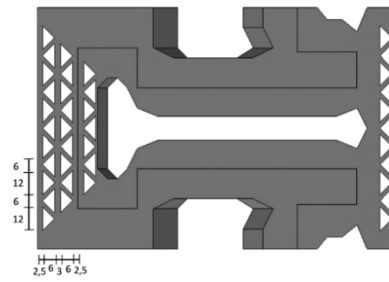


Abbildung 47: Kombinationsmodell der Schwalbenschwanzverbindung auf Basis der Topologieoptimierung a) Füllstück b) Aufsteckstück

Die Tragfähigkeit in Abhängigkeit von der Belastung kann Tabelle 11 und Tabelle 12 entnommen werden. Die Tragfähigkeit der topologieoptimierten Varianten ist deutlich geringer als die der ursprünglichen Modelle.

Infill-Optimierung

Um die Materialeffizienz weiter zu verbessern, wurden die optimierten Designs einer zusätzlichen Optimierungsphase unterzogen, die die Integration interner Füllmuster umfasste. Für den Sigmaknoten und die Schwalbenschwanzverbindung wurden verschiedene Füllmuster bewertet, um zu ermitteln, welches den besten Kompromiss zwischen Materialeinsparung und Tragfähigkeit bietet. Es wurden jeweils zwei primäre Füllmuster verwendet: quadratisch und dreieckig. Die jeweiligen Geometrien sind in



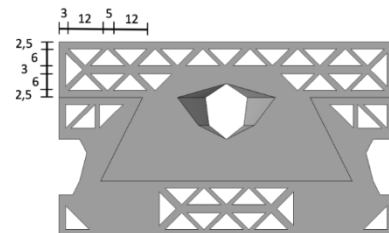
(b)

Technical drawing of a mechanical part, likely a bracket or support structure, showing dimensions in millimeters (mm). The drawing includes a side view and a top view.

Dimensions:

- Overall width: 100 mm
- Overall height: 100 mm
- Top flange thickness: 10 mm
- Bottom flange thickness: 10 mm
- Central cutout width: 40 mm
- Central cutout height: 40 mm
- Left side flange width: 25 mm
- Right side flange width: 25 mm
- Top flange width: 25 mm
- Bottom flange width: 25 mm
- Central cutout radius: R10
- Top flange radius: R10
- Bottom flange radius: R10
- Left side flange radius: R10
- Right side flange radius: R10

(b)



(b)

Durch die Integration dieser Füllstrukturen in den optimierten Sigmaknoten konnten weitere Materialeinsparungen erzielt werden. Der kombinierte Topologie- und Fülloptimierungsprozess führte zu einer Gesamtgewichtsreduzierung von etwa 12 %, während die strukturelle Leistungsfähigkeit der Verbindung den Konstruktionsspezifikationen weiterhin entsprach. Die Verwendung von Füllmustern reduziert nicht nur den Materialverbrauch, sondern verkürzt auch die additive Fertigungszeit und senkt den Energieverbrauch, was zur Nachhaltigkeit des Prozesses beiträgt. Die Tragfähigkeit der jeweiligen Modelle ist in Tabelle 11 und Tabelle 12 zusammengefasst.

Tabelle 11: Tragfähigkeit des Ausgangsmodells, des topologieoptimierten Modells und der Füllung des Sigmaknotens aus S355

	$F_{N,max}$ [kN]	$F_{Q,max}$ [kN]	$M_{y,max}$ [kNm]	$M_{z,max}$ [kNm]
Ausgangsmodell	2110	795	126	84
Topologie optimiertes Modell	545	387	32	18
Infill 1	559	246	31	24
Infill 2	546	277	30	18

Tabelle 12: Tragfähigkeit des Ausgangsmodells, des topologieoptimierten Modells und der Füllmodelle der Schwalbenschwanzverbindung aus S355

	$F_{N,max}$ [kN]	$F_{Q,max}$ [kN]	$M_{y,max}$ [kNm]	$M_{z,max}$ [kNm]
Ausgangsmodell	963	816	66	84
Topologie optimiertes Modell	515	461	36	23
Infill 1	591	448	26	23
Infill 2	516	369	16	12

Die Untersuchungen an rechteckigen Steckverbindungen bestätigen, dass durch gezielte Aushöhlung und geometrische Anpassung der Knotenstruktur erhebliche Materialeinsparungen realisierbar sind. Diese gehen jedoch mit einer Reduktion der maximal übertragbaren Lasten gegenüber massiven Referenzknoten einher. Steckverbindungen bieten daher vor allem dort Vorteile, wo montage- und demontagefreundliche Verbindungskonzepte im Vordergrund stehen und die Tragreserven entsprechend berücksichtigt werden können. Insgesamt verdeutlichen die Ergebnisse, dass die Optimierung additiv gefertigter Knotenstrukturen stets lastfallorientiert erfolgen muss. Die Tragfähigkeit des Gesamtknotens ergibt sich aus dem Zusammenspiel von Knotenstruktur und angeschlossenen Profilen. Eine generische Überlegenheit einzelner Geometrie-konzepte lässt sich nicht feststellen. Vielmehr ermöglicht die additive Fertigung eine gezielte Anpassung der Knotengeometrie an die dominierenden Beanspruchungen und eröffnet damit neue Freiheitsgrade für eine effiziente und funktionale Gestaltung von Knotenpunkten im Stahlbau.

Weitere Untersuchungen am Sigmaknoten

Ausgehend von der Grundgeometrie des Sigmaknotens wurden weitere Untersuchungen zur möglichen Materialreduktion vorgenommen. Hierzu gehörten hohle Knotenvarianten mit unterschiedlichen Wandstärken sowie Varianten mit unterschiedlichen Gitterstrukturen als Füllstrukturen. Als Referenzstruktur diente ein Knoten aus Vollmaterial. Die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf Knoten mit größeren Abmessungen wurde für hohle Knotenvarianten untersucht.

Die äußeren Abmessungen der Knoten sowie die untersuchten Wandstärken und Gitterstrukturen sind in Tabelle 13 zusammengefasst und eine exemplarische Auswahl in Abbildung 50 dargestellt.

Tabelle 13 Untersuchte Knotenstrukturen

Knotenabmessungen mm²	40 x 40					80 x 80		
Wandstärke mm	Vollmaterial	30			40	30	40	50
Gitterstruktur	-	-	BCC	F2CCZ	-	-	-	-

Alle Varianten wurden mithilfe von Rhinoceros 8 (Robert McNeel & Associates, Seattle/USA) und dem integrierten Plug-In Grasshopper mit identischen äußeren Abmessungen, Anschlussgeometrien und Lastangriffspunkten modelliert, um eine direkte Vergleichbarkeit der mechanischen Kennwerte sicherzustellen. Die innenliegenden

Gitterstrukturen wurden ausschließlich innerhalb der Hohlräume platziert und beeinflussen die äußere Geometrie des Knotens nicht.

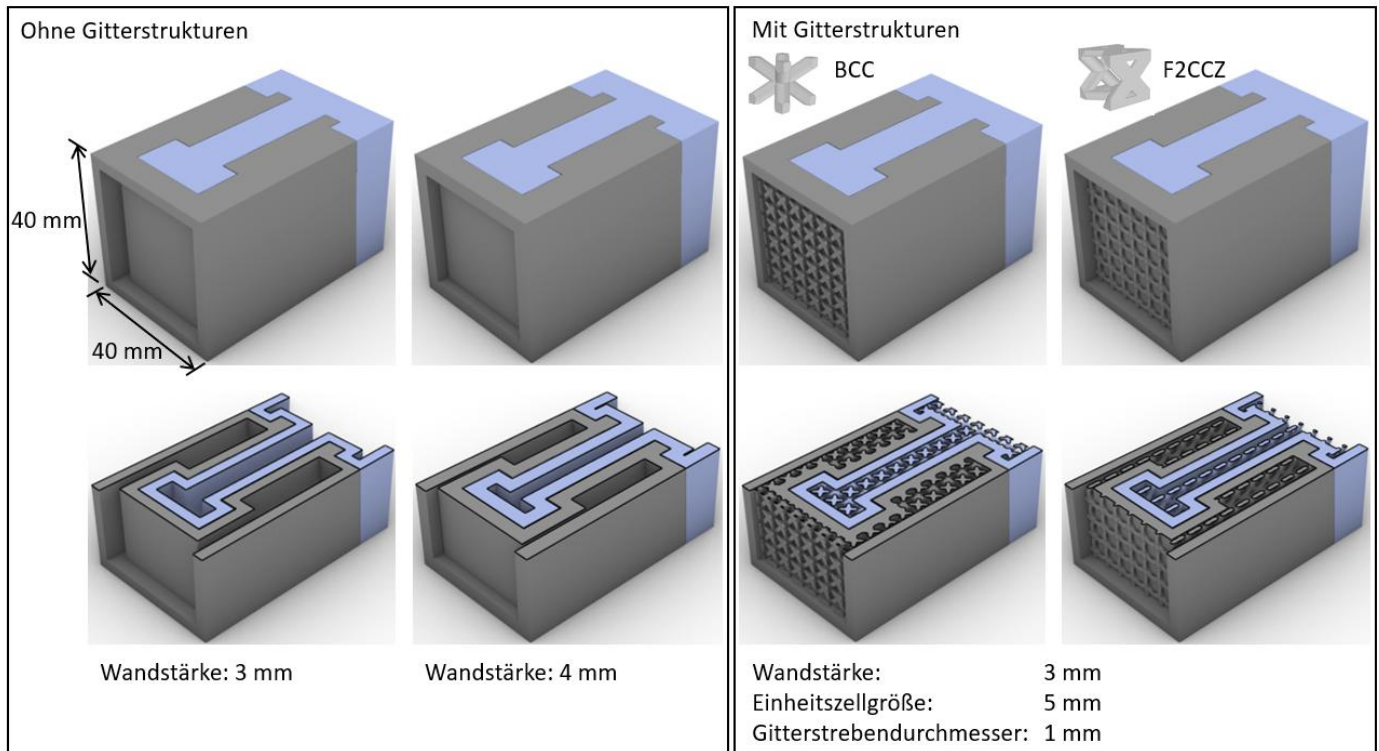


Abbildung 50: Exemplarische Auswahl der untersuchten 40x40 mm Sigmaknoten. Von links nach rechts: Sigmaknoten mit 3 mm Wandstärke, Sigmaknoten mit 4 mm Wandstärke, Sigmaknoten mit 3 mm Wandstärke und BCC-Gitterstruktur, Sigmaknoten mit 3 mm Wandstärke und F2CCZ-Gitterstruktur.

Materialmodell und Randbedingungen des FE-Modells

Für die numerischen Untersuchungen des Sigmaknotens wurde ein vereinfachtes elastisch-idealplastisches Materialmodell verwendet, um den Einfluss der Geometrie und der inneren Strukturierung isoliert bewerten zu können. Das verwendete Spannungs-Dehnungs-Verhalten ist in Abbildung 51 dargestellt. Es basiert auf einem Elastizitätsmodul von $E=210.000 \text{ MPa}$ sowie einer Fließ- und Zugfestigkeit von $f_y=f_u=355 \text{ MPa}$. Nach Erreichen der Fließgrenze wird ein idealplastisches Verhalten ohne weitere Verfestigung angenommen.

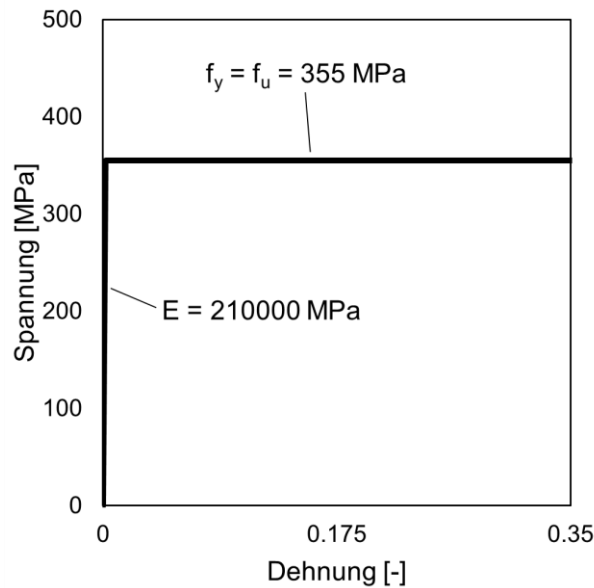


Abbildung 51: Ideal-plastisches Materialmodell

Durch diese Modellierung wird sichergestellt, dass Unterschiede im Trag- und Verformungsverhalten der untersuchten Knotenvarianten primär auf geometrische Effekte und nicht auf unterschiedliche Materialverfestigung zurückzuführen sind.

FE-Modell und Randbedingungen

Die Randbedingungen des Finite-Elemente-Modells sind in Abbildung 52 schematisch dargestellt. Der Sigmaknoten ist an der unteren Stirnfläche vollständig eingespannt, sodass alle translatorischen und rotatorischen Freiheitsgrade unterdrückt werden. Die Last wird an der oberen Anschlussfläche über einen Referenzpunkt eingeleitet und gleichmäßig auf die Fläche verteilt. Dadurch wird eine realitätsnahe, Kraftübertragung in den Knoten sichergestellt.

Die Belastung erfolgt verschiebungs- und rotationsgesteuert. Diese Vorgehensweise ermöglicht eine stabile numerische Berechnung auch über den Traglastpunkt hinaus und erlaubt die Auswertung des postmaximalen Strukturverhaltens. Die verwendeten Randbedingungen sind für alle untersuchten Knotenvarianten identisch, um eine direkte Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten.

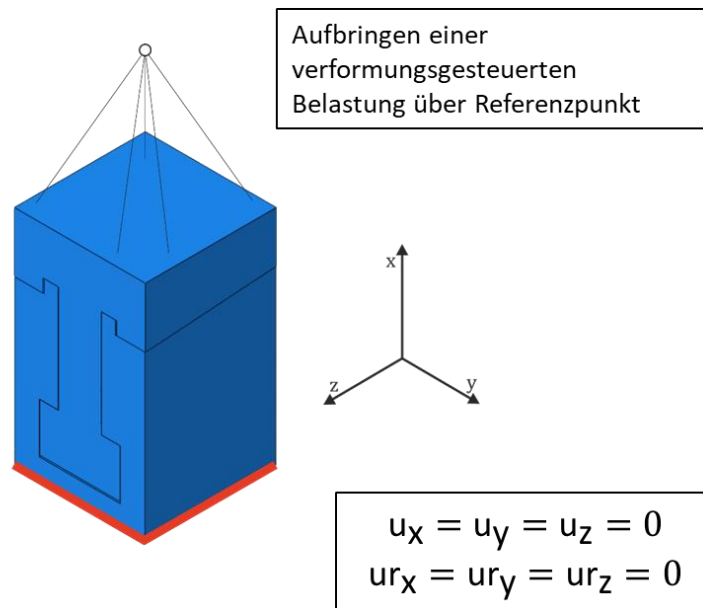


Abbildung 52: Randbedingungen FE-Modell Sigmaknoten quadratisch

Schematisches Vorgehen zur Auswertung

Die Auswertung der numerischen Ergebnisse erfolgt auf Basis der globalen Kraft-Weg-Beziehung des Sigmaknotens, wie exemplarisch in Abbildung 53 dargestellt. Die Kraft wird aus der Reaktionskraft am Referenzpunkt ermittelt, während der Weg der aufgeprägten Verschiebung entspricht. Die maximale Kraft definiert die Traglast des Knotens.

Zusätzlich zur globalen Traglast werden lokale Spannungszustände und Verformungen ausgewertet, um kritische Bereiche und mögliche Versagensmechanismen zu identifizieren. Die Kombination aus globaler Kraft-Weg-Auswertung und lokaler Spannungsanalyse erlaubt eine umfassende Beurteilung des Einflusses von Wandstärke und innerer Strukturierung auf das mechanische Verhalten des Sigmaknotens.

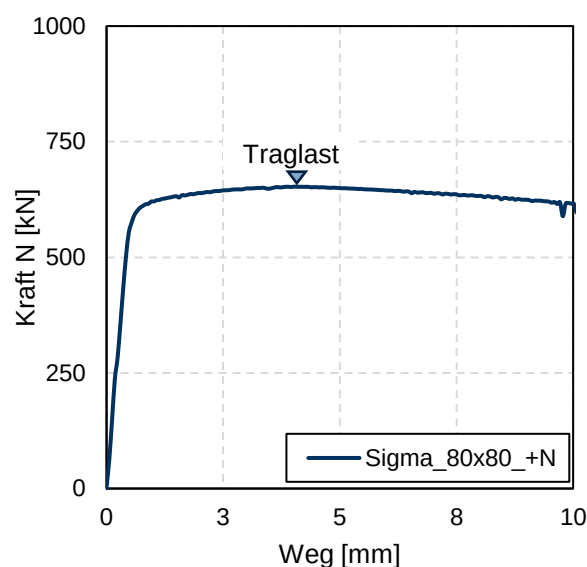


Abbildung 53: Beispielhafte Kraft-Verformungskurve mit Traglast

Ergebnisse 40 x 40 Sigmaknoten

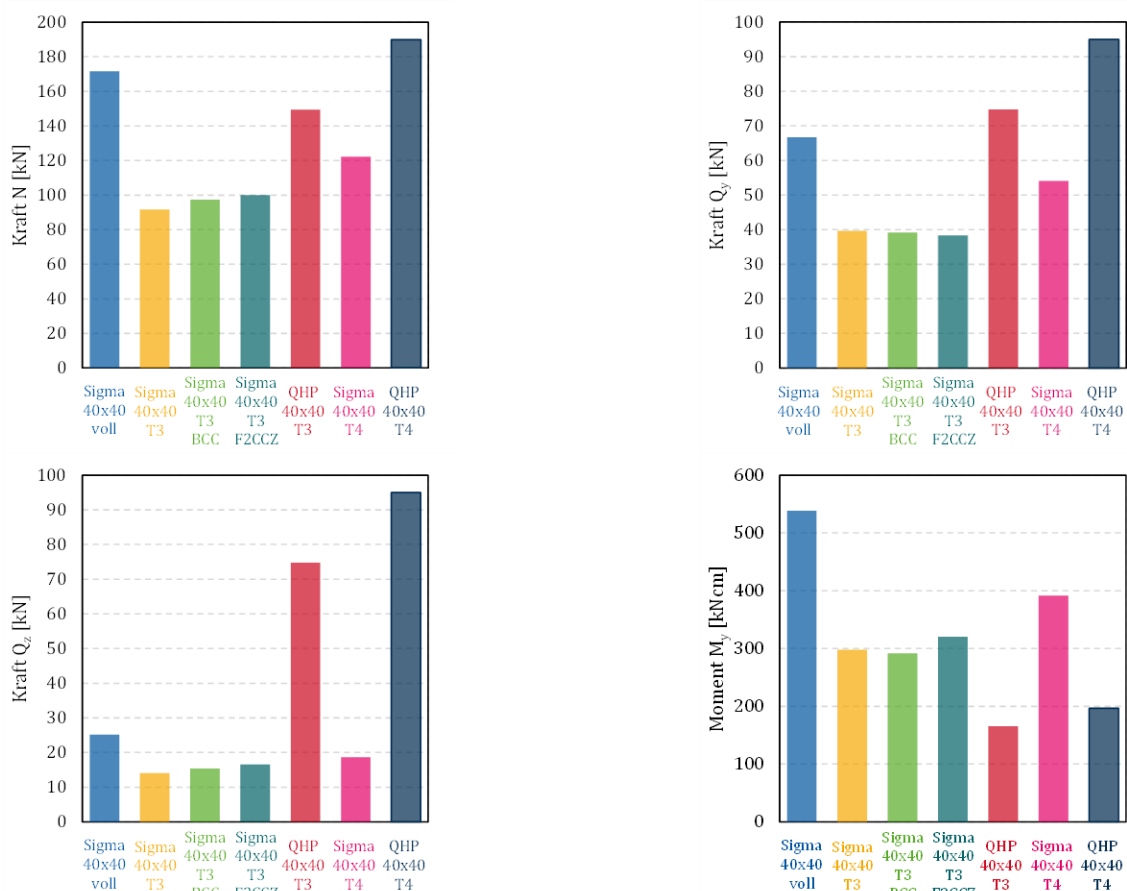
Für den 40x40-Sigmaknoten wurden die Varianten Vollmaterial (voll), Wandstärke 3 mm ohne innere Struktur (T3 hohl), Wandstärke 3 mm mit BCC-Gitterstruktur (T3 BCC), Wandstärke 3 mm mit F2CCZ-Gitterstruktur (T3 F2CCZ) und Wandstärke 4 mm ohne innere Struktur (T4 hohl) untersucht. Bewertet wurden die Widerstände in Normalkraft N , den Querkräften Q_y und Q_z sowie den Biegemomenten M_y und M_z . Die Ergebnisse sind in Abbildung 54 dargestellt.

Der Vergleich der Varianten T3 hohl, T3 BCC und T3 F2CCZ zeigt, dass die innenliegenden Gitterstrukturen keinen nennenswerten Einfluss auf die Tragfähigkeiten in N , Q_y , Q_z , M_y und M_z haben, vgl. Abbildung 54. Die Unterschiede zwischen BCC und F2CCZ sind gering. Das mechanische Verhalten des Knotens wird somit primär durch die äußere Geometrie und die Wandstärke bestimmt.

In Normalkraft N sowie in den Querkräften Q_y und Q_z erreichen die hohlen Sigmaknoten QHP-Varianten bei gleicher Wandstärke (T3 bzw. T4) nicht die Widerstände der entsprechenden QHP-Varianten. Dieser Effekt ist sowohl für T3 als auch für T4 ausgeprägt und zeigt, dass die geschlossene Profilform der QHPs für axiale und schubdominierte Lastfälle vorteilhaft ist.

Für die Biegemomente M_y und M_z ergibt sich ein gegensätzliches Bild. Hier zeigen die hohlen Sigmaknoten bei gleicher Wandstärke höhere Momententragfähigkeiten als die entsprechenden QHP-Varianten. Dieser Vorteil ist sowohl für T3 als auch für T4 vorhanden und deutet auf eine günstigere Momentenabtragung durch die Knotengeometrie hin.

Der Vollknoten stellt über alle Lastkomponenten hinweg die obere Referenz dar. Die Erhöhung der Wandstärke von T3 (3 mm) auf T4 (4 mm) führt erwartungsgemäß zu einer Steigerung der Widerstände in allen betrachteten Lastgrößen. Dieser Wandstärkeneffekt ist deutlich ausgeprägter als der Einfluss der Gitterstrukturen.



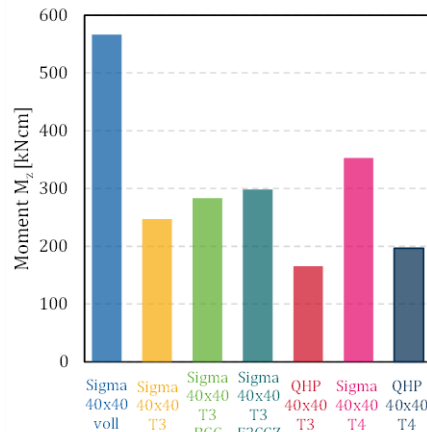


Abbildung 54: Traglastauswertung der 40x40 Sigmaknoten a) Normalkraft, b) Querkraft in z-Richtung, c) Querkraft in y-Richtung, d) Moment um die y-Achse und e) Moment um die z-Achse

Ergebnisse 80 x80 Sigmaknoten

Nach der detaillierten Auswertung des 40x40-Sigmaknotens wird im Folgenden der Einfluss einer vergrößerten Knotengeometrie anhand des 80x80-Sigmaknotens untersucht. Ziel ist es, zu überprüfen, ob die für den kleineren Knoten identifizierten Zusammenhänge zwischen Knotentyp, Wandstärke und Lastart auf größere Abmessungen übertragbar sind. Durch den direkten Vergleich beider Knotengrößen lassen sich skalierungsbedingte Effekte identifizieren und allgemeingültige Aussagen zur Tragwirkung hohler Sigmaknoten im Verhältnis zu Vollknoten und quadratischen Hohlprofilen ableiten.

Für den 80x80-Sigmaknoten wurden die Varianten Vollmaterial, hohl (T3, T4, T5) untersucht und vor dem Hintergrund der Tragfähigkeit quadratischen Hohlprofile (QHP) mit identischer Wandstärke analysiert. Auch hier wurden die maximalen Widerstände in Normalkraft N , den Querkraften Q_y und Q_z sowie den Biegemomenten M_y und M_z betrachtet, vgl. Abbildung 55.

In Normalkraft zeigt sich ein klarer Vorteil der QHP-Varianten gegenüber den hohlen Sigmaknoten bei gleicher Wandstärke. Dieser Trend ist für T3, T4 und T5 konsistent ausgeprägt. Während der Sigmaknoten aus Vollmaterial erwartungsgemäß die höchsten Tragfähigkeiten erreicht, liegen die hohlen Sigmaknoten deutlich unter den QHP-Profilen. Mit zunehmender Wandstärke steigt die Normalkrafttragfähigkeit aller Varianten an, der relative Abstand zwischen Sigmaknoten und QHP bleibt jedoch bestehen.

Ein vergleichbares Bild ergibt sich für die Querkraften Q_y und Q_z . Auch hier weisen die QHP-Profile bei gleicher Wandstärke höhere Widerstände auf als die hohlen Sigmaknoten. Der Unterschied ist insbesondere bei Q_z deutlich ausgeprägt. Die Ergebnisse bestätigen, dass die geschlossene Querschnittsform der QHP-Profile für schubdominierte Lastfälle günstiger ist. Der Sigmaknoten aus Vollmaterial zeigt zwar hohe absolute Werte, stellt jedoch eine materialintensive Referenz dar.

Für die Biegemomente M_y und M_z kehrt sich der Trend um. Die hohlen Sigmaknoten erreichen bei gleicher Wandstärke höhere Momententragfähigkeiten als die entsprechenden QHP-Profile. Dieser Vorteil ist für M_y wie auch für M_z klar erkennbar und nimmt mit steigender Wandstärke zu. Insbesondere die Varianten T4 und T5 zeigen eine deutlich verbesserte Momentenabtragung gegenüber den QHP-Profilen.

Die Erhöhung der Wandstärke von T3 über T4 zu T5 führt für alle Lastkomponenten zu einer signifikanten Steigerung der Tragfähigkeiten. Dieser Effekt ist bei den Momenten stärker ausgeprägt als bei Normalkraft und Querkraften. Die Wandstärke stellt somit den dominierenden Gestaltungsparameter für die Tragfähigkeit des Sigmaknotens dar.

Zusammenfassend zeigt der 80×80-Sigmaknoten ein lastfallabhängiges Tragverhalten, das dem des 40×40-Knotens entspricht. QHP-Profile sind bei Normalkraft N sowie Querkraften Q_y und Q_z überlegen, während Sigmaknoten bei Biegemomenten M_y und M_z höhere Widerstände erreichen. Der Vollknoten bildet die obere Referenz, ist jedoch materialineffizient. Für praxisnahe Anwendungen bieten hohle Sigmaknoten insbesondere bei momentendominierten Beanspruchungen ein hohes Potenzial zur materialeffizienten Kraftübertragung.

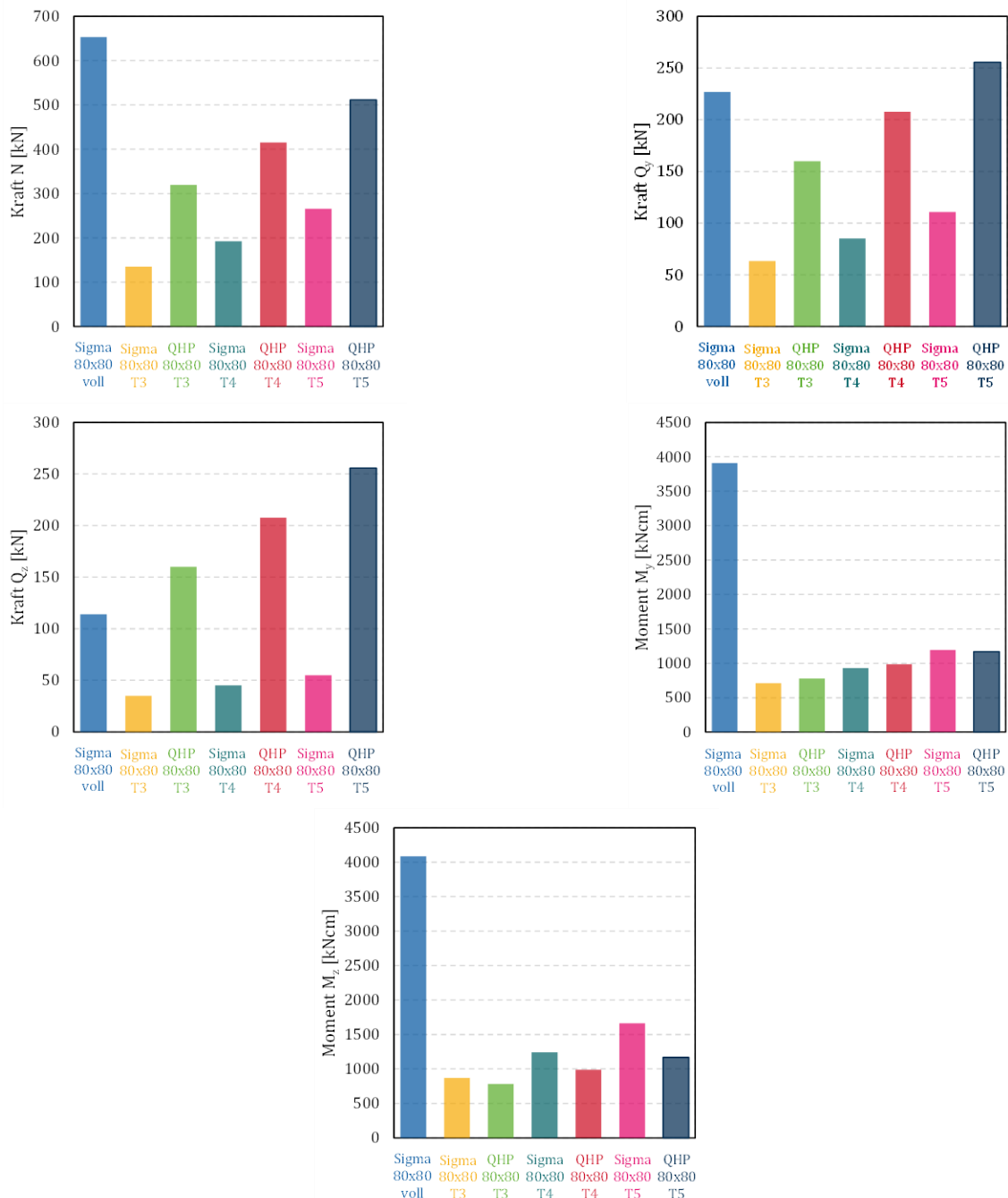


Abbildung 55: Traglastauswertung der 80x80 Sigmaknoten a) Normalkraft, b) Querkraft in z-Richtung, c) Querkraft in y-Richtung, d) Moment um die y-Achse und e) Moment um die z-Achse

Die durchgeführten numerischen Untersuchungen zeigen, dass der Sigmaknoten grundsätzlich auch als hohle Struktur für die Kraftübertragung geeignet ist. Der Vergleich unterschiedlicher Ausführungsvarianten verdeutlicht, dass die Tragfähigkeit maßgeblich durch die äußere Geometrie und die Wandstärke bestimmt wird, während innenliegende

Gitterstrukturen nur einen untergeordneten Einfluss auf die globalen Traglasten haben. Aus mechanischer Sicht liefern diese Gitterstrukturen keinen signifikanten Mehrwert für die betrachteten Lastfälle.

Sowohl für den 40×40- als auch für den 80×80-Knoten zeigt sich ein konsistentes, lastabhängiges Tragverhalten. Die hohlen Sigmaknoten erreichen bei reiner Normalkraft N sowie Querkräften Q_y oder Q_z nicht die Widerstände Quadratische Hohlprofile (QHP) gleicher Wandstärke. Demgegenüber weisen die Sigmaknoten bei Biegemomenten M_y und M_z systematisch höhere Tragfähigkeiten auf. Dies ist auf die günstigere Momenteneinleitung und Spannungsverteilung innerhalb der Knotengeometrie zurückzuführen.

Der Vollknoten stellt in allen untersuchten Fällen die obere Referenz hinsichtlich der Tragfähigkeit dar, ist jedoch mit einem deutlich erhöhten Materialeinsatz verbunden. Vor diesem Hintergrund zeigen die hohlen Sigmaknoten ein erhebliches Potenzial zur Materialeinsparung bei gleichzeitig hoher Tragfähigkeit, insbesondere für momentendominiert beanspruchte Knotenpunkte.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass der Sigmaknoten eine leistungsfähige und materialeffiziente Alternative zu konventionellen geschweißten Hohlprofilknoten darstellt, sofern die Auslegung gezielt auf den dominierenden Lastfall abgestimmt wird. Für die praktische Anwendung ergibt sich daraus, dass hohle Sigmaknoten insbesondere für Biegebeanspruchungen vorteilhaft sind.

AP5.4 Predictive Damage Modeling für AM Bauteile

Zur realitätsnahen Abbildung des Trag- und Versagensverhaltens additiv gefertigter Bauteile wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens ein prädiktiver schädigungsmechanischer Modellansatz implementiert. Ziel war es, nicht nur die elastisch-plastische Materialantwort, sondern auch den Versagensbeginn und die nachfolgende Entfestigung numerisch erfassen zu können. Dies ist insbesondere bei komplex beanspruchten Knotenstrukturen mit ausgeprägter Spannungsmehrachsigkeit von zentraler Bedeutung.

Als Schädigungsmodell wurde das Modell nach Johnson-Cook verwendet. Dieses phänomenologische Modell beschreibt die Versagensdehnung in Abhängigkeit von der Spannungsmehrachsigkeit sowie weiterer Zustandsgrößen und eignet sich aufgrund seiner vergleichsweise robusten Parametrisierung besonders für duktil versagende metallische Werkstoffe. In aktuellen Versionen von ABAQUS ist das Johnson-Cook-Modell vollständig implementiert, wodurch eine direkte Integration in die Finite-Elemente-Modelle ohne zusätzliche benutzerdefinierte Materialroutinen möglich ist.

Die Kalibrierung der Modellparameter erfolgte auf Basis der in Kapitel 6.1 dargestellten experimentellen Zugversuche an ungekerbten und gekerbten Proben sowie ergänzender Kerbschlagbiegeversuche. Die Ableitung der Fließkurven sowie die Identifikation der Schädigungsparameter werden in Kapitel 6.4 detailliert beschrieben. Die numerische Umsetzung und Validierung des Schädigungsmodells anhand der Rundzugproben ist Gegenstand von Kapitel 6.4. Die Integration des Modells in die FE-Simulation der Knotenstrukturen wird ebenfalls in Kapitel 6.4 dargestellt.

AP6 Materialcharakterisierung und Analyse des Bauteilverhaltens

Im sechsten Arbeitspaket wurden entsprechend der Vorhabensbeschreibung Materialcharakterisierungen zur Erstellung einer Materialkarte vorgenommen. Dies umfasste Kleinprobenversuche zur Charakterisierung der Materialeigenschaften, das Erstellen der Materialkarte, Großprobenversuche mit den entwickelten Bauteilen und die Validierung des numerischen Modells. Abweichend von der ursprünglichen Planung, wurde auf den Vergleich von recyceltem und sogenanntem „virgin“ Metallpulver verzichtet, da bei Metallen im Gegensatz zu z.B. Polymermaterialien durch das Recycling keine relevanten Eigenschaftseinbußen zu erwarten sind. Stattdessen wurden verschiedene Pulverbatches aus Bauschrott sowie aus einem neuwertigen S700 verglichen. Bei den Großprobenversuchen wurden zusätzlich Hotboxversuche vorgenommen, um die thermischen Eigenschaften der entwickelten Fassadenhalter zu validieren. Die Vorgehensweise und die erzielten Ergebnisse werden im Folgenden erläutert.

AP6.1 Kleinprobenversuche

Zur Bewertung der mechanischen Eigenschaften der aus stahlschrottbasierten Pulvern hergestellten Proben wurden Zugversuche an PBF-LB/M-gefertigten Rundzugproben (B6×30) durchgeführt. Insgesamt wurden Proben untersucht, die aus drei unterschiedlichen Pulverchargen hergestellt wurden, von denen zwei aus unterschiedlich zusammengesetztem gemischtem Stahlschrott erzeugt wurden (Batch 1 und Batch 2). Die Durchführung der Zugversuche erfolgte auf einer ZwickRoell Universalprüfmaschine, mit der die mechanischen Kennwerte wie Zugfestigkeit, Streckgrenze und Bruchdehnung der additiv gefertigten Proben ermittelt wurden. Während eine Charge aus Stahlblech der Güte S700 bestand (Batch 3). Für jede Charge wurden drei Proben geprüft.

Die Ergebnisse der Zugversuche zeigen Unterschiede zwischen den einzelnen Chargen, sowohl hinsichtlich der Mittelwerte als auch der Streuung der erreichten Festigkeitskennwerte und der Duktilität, vgl. Abbildung 56 und Tabelle 14. Batch 1 weist mittlere Streckgrenzen von etwa 760 MPa und Zugfestigkeiten von rund 800 MPa auf. Die Bruchdehnung liegt mit durchschnittlich etwa 2 % auf einem niedrigen Niveau und zeigt eine vergleichsweise hohe Streuung. Auch der E-Modul fällt im Mittel geringer aus als bei den übrigen Chargen, was auf eine inhomogene Mikrostruktur oder prozessbedingte Einflüsse hinweisen kann.

Batch 2 erreicht höhere und zugleich homogener ausgeprägte Festigkeitskennwerte. Die mittlere Streckgrenze liegt bei rund 828 MPa, die Zugfestigkeit bei etwa 852 MPa. Die Bruchdehnung ist mit durchschnittlich rund 2,2 % geringfügig höher als bei Batch 1, bei gleichzeitig deutlich reduzierter Streuung. Dies deutet auf eine verbesserte Reproduzierbarkeit der mechanischen Eigenschaften hin.

Die aus S700-Stahlblechen hergestellte Charge (Batch 1_S700) zeigt die höchsten Festigkeiten mit mittleren Streckgrenzen von etwa 901 MPa und Zugfestigkeiten von rund 914 MPa. Gleichzeitig wird eine signifikant höhere Bruchdehnung von im Mittel etwa 8,7 % erreicht, wenngleich mit einer erhöhten Streuung. Der vergleichsweise hohe E-Modul deutet auf ein steiferes Materialverhalten hin.

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse, dass mittels PBF-LB/M aus schrottbasierten Pulvern Proben bzw. Bauteile mit hohen Festigkeitsniveaus hergestellt werden können. Während die beiden Schrottchargen bereits Festigkeiten erreichen, die für Anwendungen im Bauwesen grundsätzlich relevant sind, weist die Charge aus S700-Ausgangsmaterial die günstigste Kombination aus Festigkeit und Duktilität auf. Die beobachtete Streuung der Kennwerte unterstreicht jedoch die Bedeutung einer gezielten Pulveraufbereitung und Prozesskontrolle, um reproduzierbare Materialeigenschaften sicherzustellen.

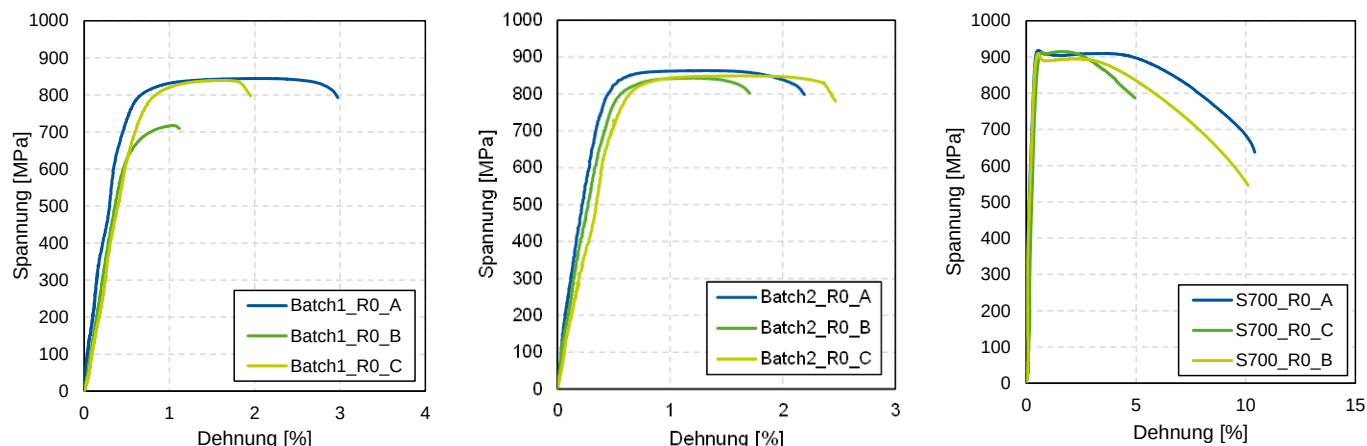


Abbildung 56: Spannungs-Dehnungsbeziehung für a) Batch 1, b) Batch 2 und c) Batch S700

Tabelle 14: Ergebnisse der Zugversuche an verschiedenen Batches

Probennummer	E-Modul MPa	R _{p,0.2} MPa	R _m Mpa	Bruchdehnung %
B1_R0_A	159853	806,0	844,5	2,98
B1_R0_B	144417	682,5	717,0	1,15
B1_R0_C	132170	792,5	838,8	2,06
Mittelwert	145480	760,3	800,1	2,06
Standardabweichung	13872	67,7	72,0	0,92
B2_R0_A	206254	846,5	863,4	2,29
B2_R0_B	160022	808,5	842,9	1,77
B2_R0_C	144534	828,0	849,3	2,49
Mittelwert	170270	827,7	851,9	2,18
Standardabweichung	32111	19,0	10,5	0,37
BS700_R0_A	178279	911,0	918,0	10,46
BS700_R0_B	252684	889,5	914,6	4,96
BS700_R0_C	228416	903,0	909,4	10,68
Mittelwert	219793	901,2	914,0	8,70
Standardabweichung	37945	10,9	4,3	3,24

Zur Beurteilung der Zähigkeit des mittels PBF-LB/M verarbeiteten Materials wurden Kerbschlagbiege- und 3-Punkt-Biegeversuche durchgeführt. Die Prüfungen erfolgten an Proben aus allen drei Pulverchargen sowohl bei Raumtemperatur als auch bei -20 °C. Die gemessenen Kerbschlagarbeiten sind in Tabelle 15 aufgelistet und dienen der Bewertung des Verformungs- und Bruchverhaltens unter schlagartiger Beanspruchung und ergänzen die Ergebnisse der quasistatischen Zugversuche.

Die beiden schrottbasierten Chargen (Batch 1 und Batch 2) zeigen bei Raumtemperatur vergleichbare Kerbschlagarbeiten von jeweils etwa 16 J. Auch bei -20 °C bleiben die Mittelwerte mit rund 16 J für Batch 1 und etwa 14 J für Batch 2 auf einem ähnlichen Niveau. Insgesamt ist nur eine geringe Abnahme der Kerbschlagarbeit bei niedriger Temperatur zu beobachten. Die Streuung der Einzelwerte ist moderat, die absoluten Energien liegen jedoch auf einem insgesamt niedrigen Niveau, was auf eine ausgeprägte Sprödigkeit des Materials hinweist.

Demgegenüber weist die aus S700-Stahlblechen hergestellte Charge eine deutlich höhere Zähigkeit auf. Bereits bei Raumtemperatur wird eine Kerbschlagarbeit von etwa 133 J erreicht. Bei -20 °C steigen die gemessenen Werte weiter

an, mit einem Mittelwert von rund 166 J. Damit unterscheidet sich das Zähigkeitsniveau dieser Charge signifikant von den schrottbasierten Pulvern. Trotz einer gewissen Streuung der Einzelwerte verbleiben die Kerbschlagarbeiten auf einem hohen Niveau, was auf ein deutlich duktileres Bruchverhalten schließen lässt.

In Kombination mit den Ergebnissen der Zugversuche zeigt sich, dass die schrottbasierten Pulver zwar hohe Festigkeiten erreichen, jedoch nur eine begrenzte Zähigkeit aufweisen. Die Charge aus S700-Ausgangsmaterial hingegen verbindet hohe Festigkeit mit einer deutlich erhöhten Energieaufnahme im Kerbschlagbiegeversuch. Für Anwendungen im Bauwesen, insbesondere unter Berücksichtigung möglicher tiefer Temperaturen, stellt die Zähigkeit somit ein entscheidendes Unterscheidungsmerkmal zwischen den untersuchten Pulverchargen dar.

Tabelle 15: Ergebnisse Kerbschlagbiegeversuche an verschiedenen Batches

Probe	Temperatur °C	KV J	Mittelwert J
B1_A	RT	17	16
B1_B	RT	15	
B1_C	RT	16	
B1_D	-20	17	16
B1_E	-20	15	
B1_F	-20	16	
B2_A	RT	16	16
B2_B	RT	17	
B2_C	RT	15	
B2_D	-20	13	13.7
B2_E	-20	14	
B2_F	-20	14	
S700_A	RT	133	133
S700_B	-20	169	166.3
S700_C	-20	158	
S700_D	-20	172	

Die Einordnung der Eigenschaften der mittels PBF-LB/M gefertigten Proben/Bauteile in den normativen Kontext des Stahlbaus erfordert eine gleichzeitige Betrachtung von Festigkeit, Duktilität und Zähigkeit, da diese Eigenschaften gemeinsam die Anwendbarkeit gemäß den einschlägigen Produkt- und Bemessungsnormen bestimmen.

Die beiden schrottbasierten Pulverchargen (Batch 1 und Batch 2) erreichen mit Streckgrenzen zwischen etwa 760 MPa und 830 MPa sowie Zugfestigkeiten bis rund 850 MPa Festigkeitsniveaus, die oberhalb der Anforderungen gängiger Feinkornbaustähle wie S460M liegen und teilweise in den Bereich hochfester Baustähle nach EN 10025-4 [3] (z. B. S700M) hineinreichen. Allerdings weisen beide Chargen eine sehr geringe Bruchdehnung von etwa 2 % sowie niedrige Kerbschlagarbeiten von rund 14-16 J bei -20 °C auf. Damit werden weder die normativen Mindestanforderungen an die Duktilität noch die geforderte Kerbschlagzähigkeit von 27 J bei der relevanten Prüftemperatur erfüllt. Aus normativer Sicht sind diese Werkstoffe daher derzeit nicht ohne Weiteres für tragende Bauteile im Stahlbau geeignet, da die grundlegenden Annahmen eines duktilen Werkstoffverhaltens gemäß EN 1993-1-1 [6] und EN 1993-1-10 [36] nicht eingehalten werden.

Die aus S700-Stahlblechen hergestellte Charge (Batch 3) zeigt demgegenüber ein deutlich ausgewogeneres Eigenschaftsprofil. Mit mittleren Streckgrenzen von etwa 900 MPa und Zugfestigkeiten um 914 MPa liegt sie im Bereich sehr hochfester Baustähle. Gleichzeitig wird eine Bruchdehnung von im Mittel rund 8,7 % erreicht, die zwar unterhalb

klassischer Walzstähle liegt, jedoch deutlich über den Werten der schrottbasierten Chargen. Besonders hervorzuheben ist die hohe Kerbschlagzähigkeit mit Werten von über 130 J bei Raumtemperatur und etwa 166 J bei -20°C , womit die normativen Mindestanforderungen deutlich überschritten werden.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die aus schrottbasierten Pulvern mittels PBF-LB/M hergestellten Proben/Bauteile derzeit primär durch ihre begrenzte Duktilität und Zähigkeit eingeschränkt sind, obwohl hohe Festigkeitsniveaus erzielt werden. Die Charge aus S700-Ausgangsmaterial hingegen erreicht ein Eigenschaftsniveau, das hinsichtlich Festigkeit und Zähigkeit mit hochfesten Baustählen vergleichbar ist und grundsätzlich eine normative Einordnung im Bereich sehr hochfester Stahlgüten erlaubt. Für eine Anwendung im Bauwesen bleibt jedoch insbesondere die Sicherstellung ausreichender Duktilität sowie einer reproduzierbaren Zähigkeit maßgebend.

AP6.2 Erstellung einer Materialkarte

Die Erstellung der Materialkarte ist eng mit der Materialkalibrierung sowie der anschließenden Modellvalidierung verknüpft. Aus diesem Grund wird sie gemeinsam mit diesen Arbeitsschritten in AP6.4 vorgestellt.

AP6.3 Großprobenversuche

Die Großprobenversuche wurden mit additiv gefertigten Festpunkthaltern durchgeführt. Aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit des im Projekt aus Baustahlschrott hergestellten Pulvermaterials wurden die Tragfähigkeitsversuche (zerstörende Prüfung) mit Haltern aus kommerziell verfügbarem 17-4 PH und die experimentellen Untersuchungen zur Wärmebrückenwirkung (zerstörungsfreie Prüfung) mit Haltern aus 17-4 PH und aus dem im Projekt hergestelltem Material durchgeführt. Hierzu waren zunächst verschiedene Bauversuche und Probeteile notwendig, wofür das im Projekt beschaffte 17-4PH-Pulver eingesetzt wurde. Diese Bauversuche dienten der Identifizierung passender Prozessparameter sowie einer günstigen Orientierung der Bauteile auf der Bauplattform. Im Anschluss konnten fünf Halter erfolgreich aus 17-4 PH und jeweils zwei Fassadenhalter (Gleit- und Festpunkt) aus dem Pulver aus Baustahlschrott hergestellt werden. Die Halter wurden mittels PBF-LB/M auf einer EOS M 290 (EOS GmbH, Krailling) mit den im Projekt entwickelten Prozessparametern gefertigt. Anschließend wurden diese entpulvert und die Stützstrukturen entfernt.

Tragfähigkeitsversuche

Für die Tragfähigkeitsversuche wurden drei der Halter aus 17-4 PH verwendet. Die experimentellen Versuche (Druckbeanspruchung) (Abbildung 57) zeigen die Funktionsfähigkeit der optimierten Halter. Die Validierung unterstreicht das Potenzial der Kombination aus Topologieoptimierung und additiver Fertigung für den Bau leistungsfähiger und thermisch optimierter Fassadenhalter.

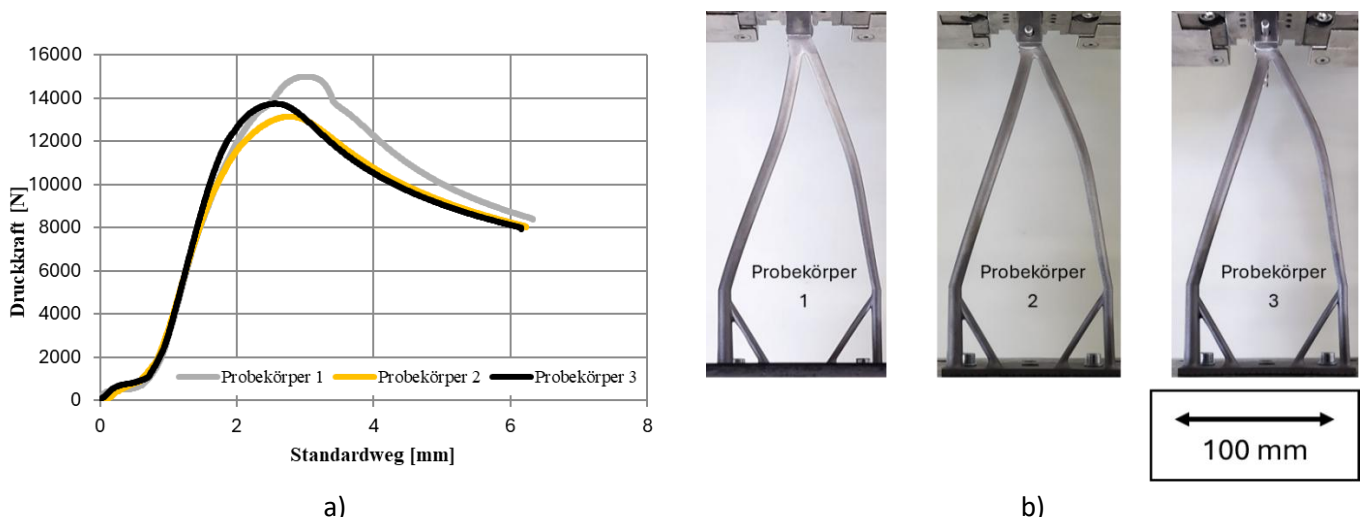


Abbildung 57: a) Last-Verformungskurve Lastfall Druck, b) Stabilitätsversagen der drei getesteten Festpunkthalter

Experimentelle Untersuchungen zur Wärmebrückenwirkung

Zur Demonstration der reduzierten Wärmebrückenwirkung wurden die hergestellten Fassadenhalter aus 17-4PH sowie Baustahlschrott in die am Institut für Stahlbau vorhandene HotBox eingebaut (Abbildung 58a). Entsprechend der gefertigten Halterhöhe von 220 mm wird ein Wandaufbau mit einer Dämmstärke von 200 mm, ausgeführt in Steinwolle WLS 035, gewählt. Zum Vergleich sind neben den beiden additiv gefertigten Fassadenhaltern (SP1: 17-4PH und SP2: Baustahlschrott) auch drei in der Praxis üblicherweise eingesetzte U-Halter aus Aluminium und Edelstahl (SP3 bis SP5) in den Außenwandaufbau integriert. Für die Versuchsdurchführung wird auf der Warmseite eine Temperatur von ca. 35 °C und auf der kalten Seite von 5 °C eingestellt. Zur Visualisierung der unterschiedlichen Temperaturen an den Positionen der Halter, und damit der unterschiedlichen Wärmebrückenwirkung, werden zusätzlich Wärmebildaufnahmen mit einer Infrarotkamera erstellt (Abbildung 58b).

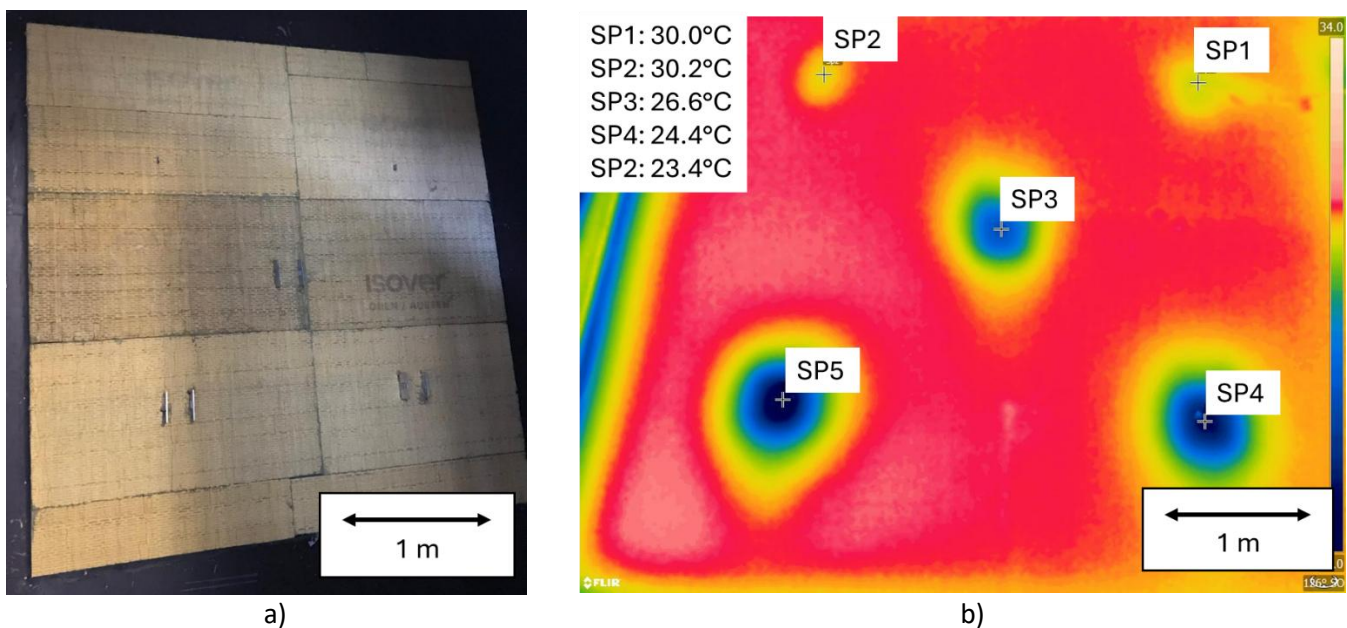


Abbildung 58: Einbau des Fassadenhalters im Wandaufbau: a) Kaltseite, b) Infrarotaufnahme der Warmseite

Der Temperaturunterschied an der Wandoberfläche im Bereich der Halter ist deutlich sichtbar. Die Aluminium- und Edelstahhalter in U-Form befinden sich in der Mitte und im unteren Bereich der Infrarotaufnahmen. Die beiden im oberen Bereich eingebauten additiv gefertigten Fassadenhalter weisen eine deutliche Reduktion der Wärmebrückenwirkung auf.

AP6.4 Modellvalidierung

Zur simulationsgestützten Berechnung der in AP5 entwickelten Bauteile muss das verwendete Material- und Schädigungsmodell zunächst anhand von Kleinproben kalibriert werden. Die aus Zug- und Korbversuchen abgeleiteten Parameter bilden die Grundlage für die numerische Nachrechnung komplexer Knotenstrukturen.

Die Rundzugproben werden in Abaqus nachmodelliert. Um Rechenzeit zu reduzieren und gleichzeitig die lokale Beanspruchung im Korbbereich fein auflösen zu können, wird die Symmetrie der Geometrie genutzt; es wird, wie in Abbildung 59 dargestellt, ein Achtelmodell verwendet. Die Symmetrieebenen (XSYMM, YSYMM, ZSYMM) werden entsprechend definiert.

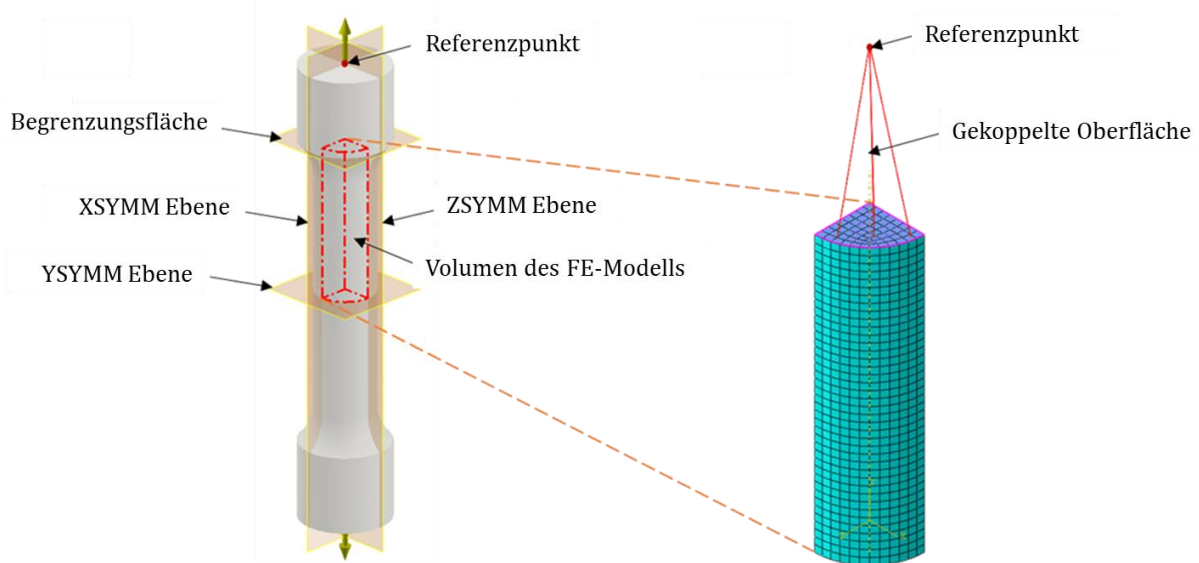


Abbildung 59: Aufbau des numerischen Modells der Rundzugprobe (Achtelmodell, Symmetrieebenen)

Für den elastischen Bereich werden $E=210,000 \text{ N/mm}^2$ und $\nu=0,3$ angesetzt. Die plastische Eingabe erfolgt über die zu kalibrierende Fließkurve. Die Vernetzung erfolgt mit volumetrischen Hexaederelementen erster Ordnung; im Kerb- bzw. Schädigungsbereich wird eine Netzgröße von $0,15 \text{ mm}$ verwendet, um Gradienten der plastischen Dehnung und eine stabile Schädigungsinitiierung abzubilden.

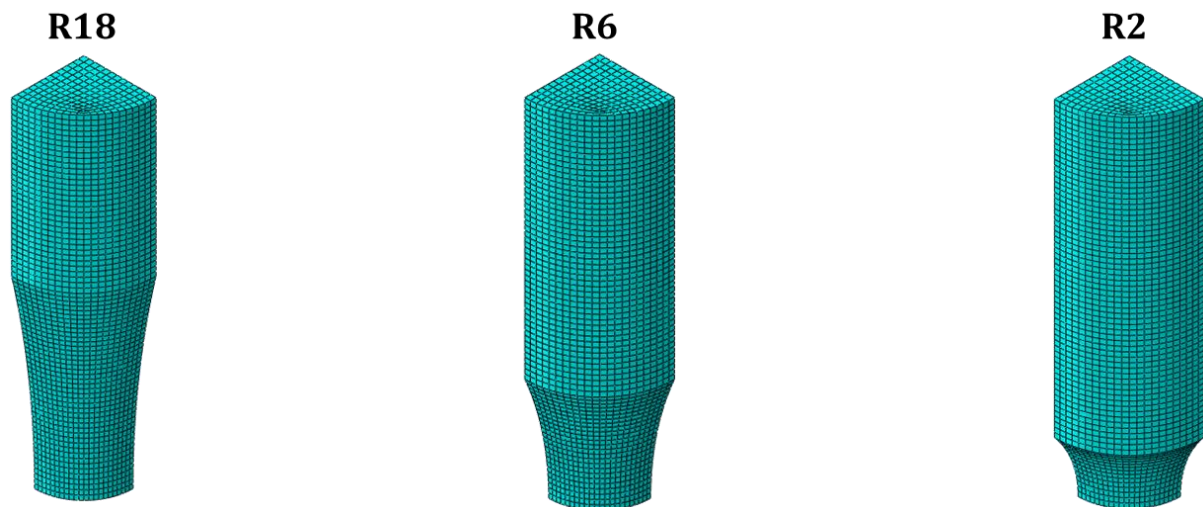


Abbildung 60: FE-Modelle der gekerbten Proben mit Vernetzung

Die Fließkurvenparameter werden anhand der ungekerbten Probe (R0) bestimmt. Die Johnson-Cook-Schädigungsparameter D1, D2 und D3 werden unter Einbezug aller Kerbradien identifiziert. Die Einordnung des Kerbradius im Verhältnis zur Spannungsmehrachsigkeit zeigt Abbildung 61. Zusätzlich wird die Energiedissipation G_f kalibriert.

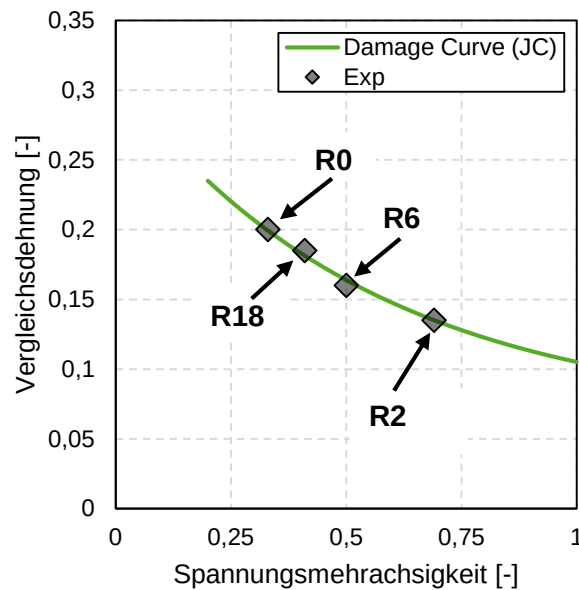


Abbildung 61: Ableitung der Schädigungskurve anhand von gekerbten Rundzugproben

Zur Validierung werden Charpy-Kerbschlagbiegeversuche (V-Kerb-Probe (55×10×10 mm)) nach DIN EN ISO 148-1 [37] durchgeführt.

Für die numerische Abbildung wird ein FE-Modell bestehend aus Prüfkörper, Auflagern und Hammer erstellt. Auflager und Hammer werden als Schalen modelliert, der Prüfkörper als Volumenmodell mit C3D8R-Elementen. Der Kerbbereich wird ebenfalls mit einer Netzgröße von 0,15 mm vernetzt.

Die nachfolgenden Abbildung 62 zeigen Kraft-Weg-Verläufe aus Zugversuchen an ungekerbten (R0) und gekerbten (R18, R6, R2) Rundzugproben aus den Batches 1 sowie die zugehörigen FE-Nachrechnungen. Pro Kerbradius sind drei experimentelle Einzelversuche dargestellt. Zusätzlich werden zwei numerische Modellansätze gegenübergestellt:

- rein plastische FE-Nachrechnung ohne Schädigung (oranger Graph)
- FE mit Johnson-Cook-Schädigung (blauer Graph)

Die Gegenüberstellung erlaubt die Bewertung, inwieweit der Versagensbeginn und der postmaximale Verlauf durch das Schädigungsmodell reproduziert werden und die Einordnung der Streuung der experimentellen Einzelversuche.

Für Batch 1 zeigt sich bei R0 insgesamt eine gute Übereinstimmung zwischen Experiment und FE-Nachrechnung mit Schädigung bis zum Kraftmaximum, vgl. Ergebnisse in Abbildung 62; die rein plastische Rechnung bildet den Kraftanstieg ebenfalls ab, zeigt jedoch erwartungsgemäß keinen ausgeprägten Abfall der Tragfähigkeit im postmaximalen Bereich. Mit zunehmender Kerbwirkung (R18 → R6 → R2) sinken Kraftmaximum und Versagensweg; dieser Trend ist in den Experimenten klar erkennbar. Die Schädigungsrechnung bildet den Versagensbeginn und den Abfall grundsätzlich qualitativ ab, überschreitet jedoch – abhängig vom Kerbradius – stellenweise das Kraftmaximum. Insgesamt liegen die Simulationen bei Batch 1 näher an der experimentellen Streuung; die Abweichungen nehmen bei kleiner werdendem Kerbradius zu (hohe Mehrachsigkeit, stärker lokalisierte Schädigung).

**Abschlussbericht AddMamBa (Teil I & II):
Additive Manufacturing von 3D Verbindungselementen
im Bauwesen**

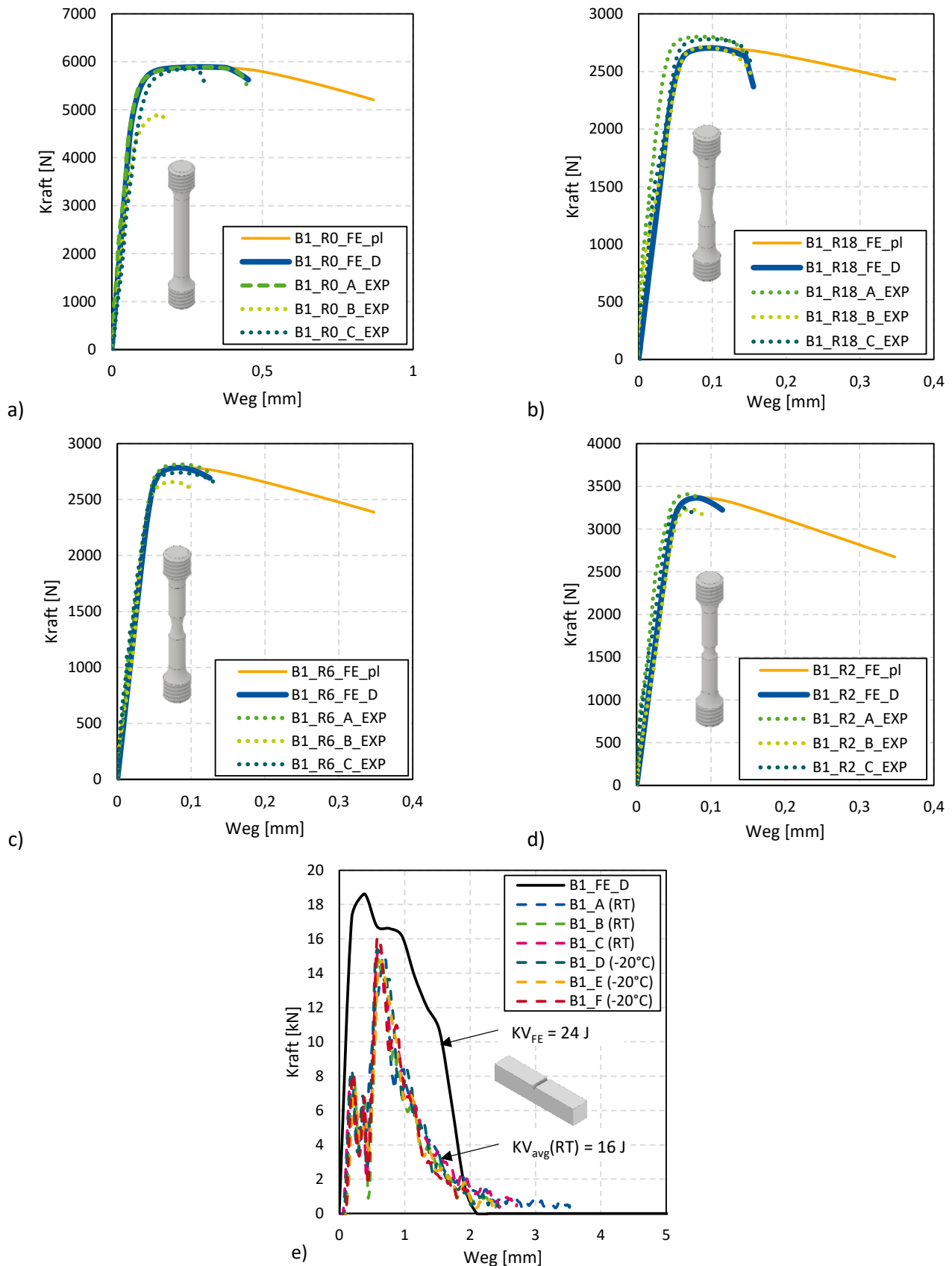


Abbildung 62: Übersicht Materialkalibrierung Batch 1 a) Rundzugprobe R0, b) Rundzugprobe R18, c) Rundzugprobe R6, d) Rundzugprobe R2 und e) Charpy-Probe

Für Batch 2 ist der Trend über die Kerbradien ebenfalls vorhanden, siehe Abbildung 63; allerdings zeigen sich in der Übereinstimmung deutlichere Unterschiede als bei Batch 1. Insbesondere bei R2 zeigt sich eine deutliche Fehlabschätzung des Kraft-Weg-Verlaufs. Das numerische Modell reproduziert den Versagensbeginn und das Kraftmaximum unter hoher Spannungsmehrachsigkeit nur eingeschränkt, sodass die Übertragbarkeit der Parameter für stark gekerbte Zustände mit erhöhter Unsicherheit zu bewerten ist. In den übrigen Kerbradien kann der generelle Verlauf zwar plausibel eingefangen werden, die Abweichung bei R2 ist jedoch für die Bewertung der Schädigungsparameter wesentlich, da gerade die triaxiale Situation maßgeblich für die Identifikation der Schädigungskurve ist.

Batch S700 zeigt gegenüber den schrottbasierten Chargen ein deutlich duktileres Verhalten mit größeren erreichbaren Wegen und einem ausgeprägten postmaximalen Verlauf bereits bei R0, Abbildung 64. Die FE-Nachrechnung mit Schädigung folgt den experimentellen Kurven über weite Bereiche gut; die rein plastische Rechnung kann den Abfall erwartungsgemäß nicht abbilden. Bei den gekerbten Proben (R18, R6, R2) wird der Versagensbeginn insgesamt plausibel reproduziert, wobei auch hier eine Tendenz bestehen kann, das Kraftmaximum bei kleinen Kerbradien leicht zu überschreiten. Insgesamt ist die Kombination aus hoher plastischer Verformbarkeit und dennoch reproduzierbarem Versagensverhalten charakteristisch für Batch S700.

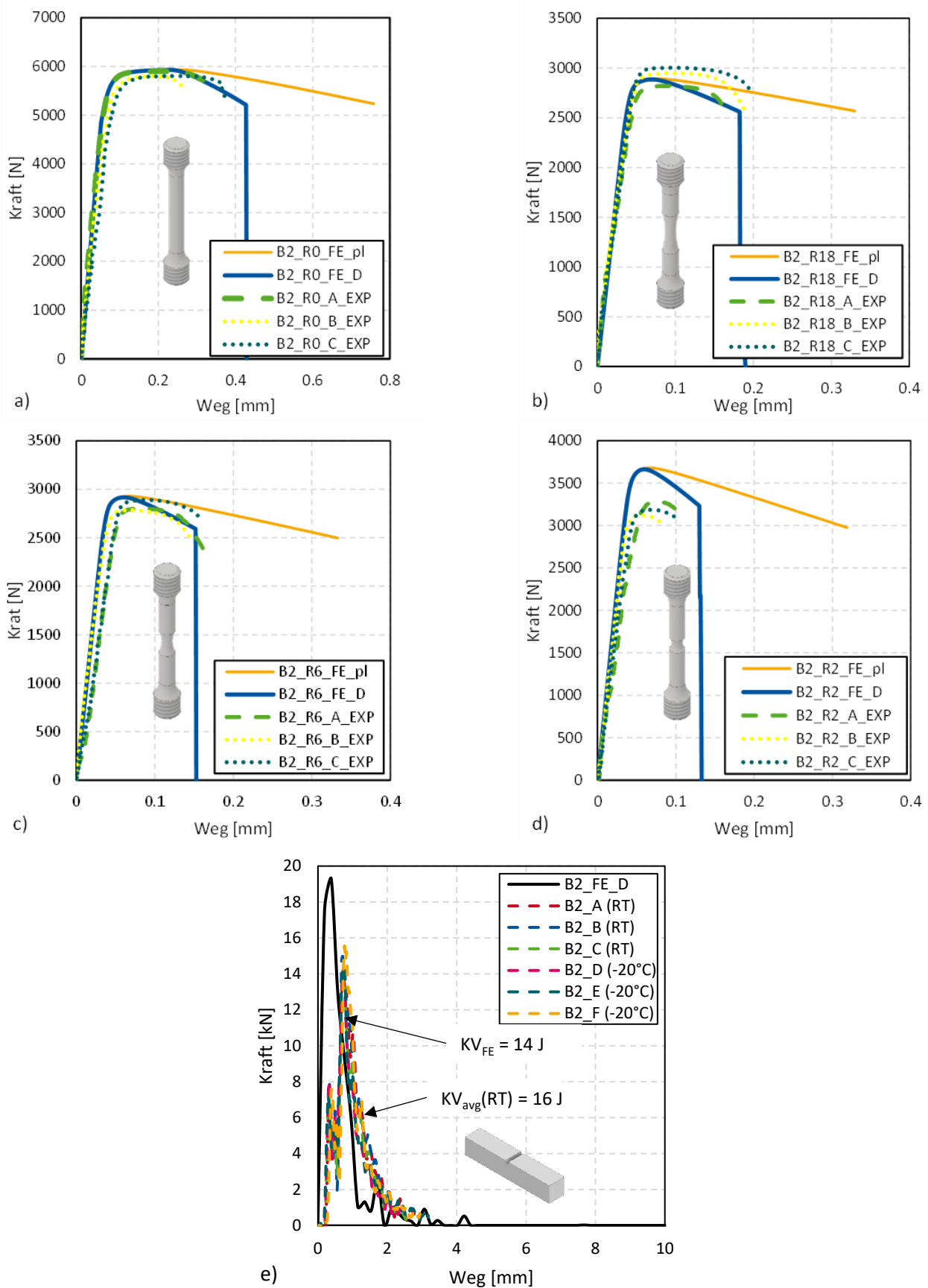


Abbildung 63: Übersicht Materialkalibrierung Batch 2 a) Rundzugprobe R0, b) Rundzugprobe R18, c) Rundzugprobe R6, d) Rundzugprobe R2 und e) Charpy-Probe

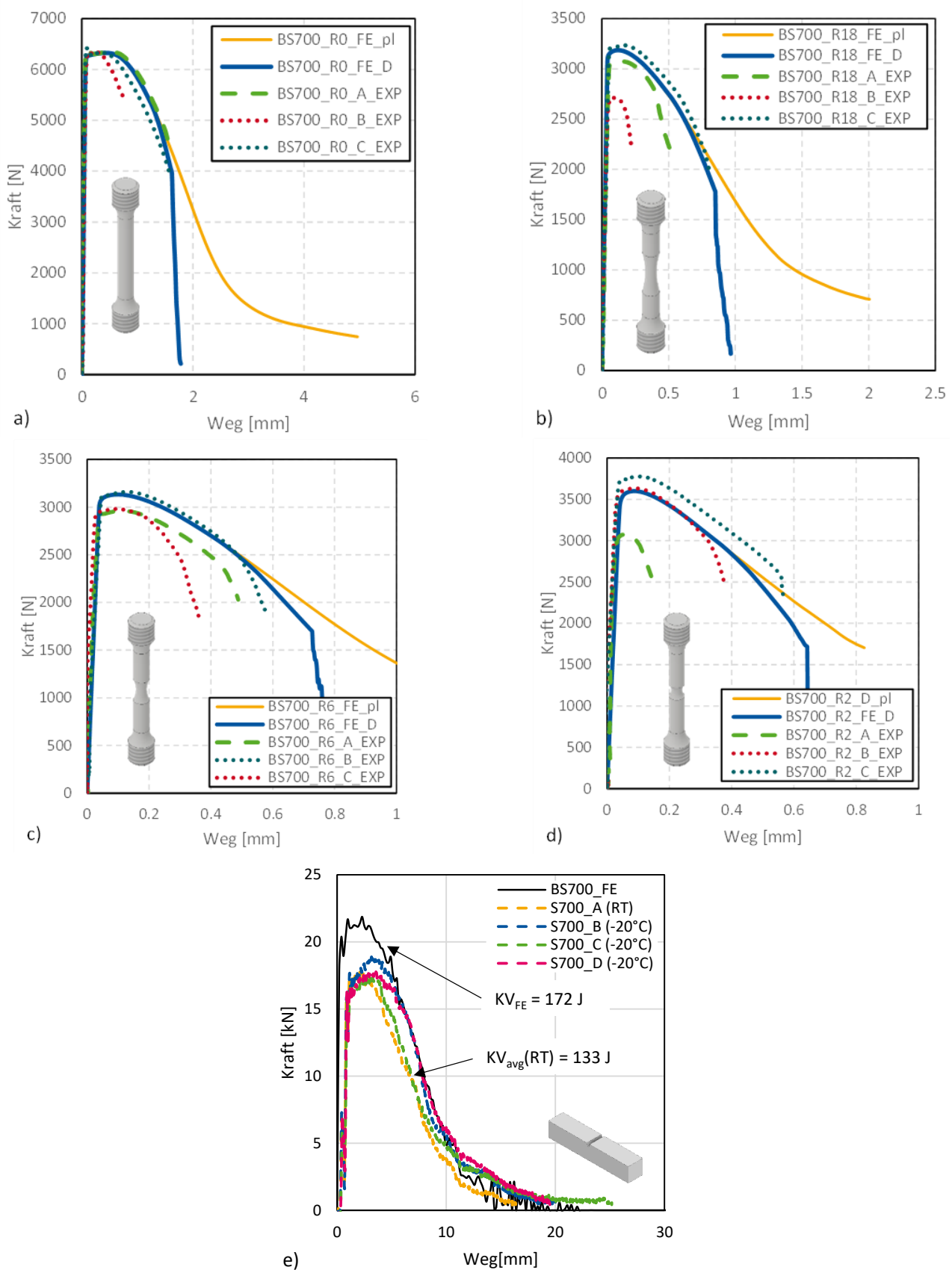


Abbildung 64: Übersicht Materialkalibrierung Batch S700 a) Rundzugprobe R0, b) Rundzugprobe R18, c) Rundzugprobe R6, d) Rundzugprobe R2 und e) Charpy-Probe

Im direkten Vergleich zeigen Batch 1 und Batch 2 qualitativ ähnliche, jedoch insgesamt sprödere Kraft-Weg-Verläufe mit frühem Versagensbeginn und begrenzter Duktilität. Batch 1 weist dabei die deutlich bessere Übereinstimmung zwischen Experiment und Schädigungsnachrechnung auf. Batch 2 fällt insbesondere bei R2 durch eine erhebliche Abweichung auf, wodurch die Robustheit der identifizierten Schädigungsparameter für hochtriaxiale Spannungszustände eingeschränkt erscheint. Batch S700 unterscheidet sich klar durch größere Verformungsfähigkeit und einen ausgeprägteren postmaximalen Verlauf; das Schädigungsmodell bildet den Versagensbeginn über die Kerbradien grundsätzlich plausibel ab, wobei lokale Überschätzungen des Kraftmaximums bei kleinen Kerbradien als systematische Tendenz auftreten können. Batch S700 unterscheidet sich deutlich durch ein ausgeprägteres duktiles Verhalten und größere erreichbare Verformungen sowohl bei ungekerbten als auch bei gekerbten Proben. Die Übertragbarkeit der Schädigungsparameter ist für alle drei Batches gegeben. Es ist davon auszugehen, dass Batch 1 und Batch 2 auf Bauteilebene zu frühem spröden Versagen führen, wohingegen das Batch S700 Spannungsumlagerungen zulässt.

Untersuchungen zur Netzgrößenabhängigkeit

Die Parameter schädigungsmechanischer Materialmodelle sind netzabhängig, da der Schädigungsbeginn und die Schädigungsevolution von der lokalen Dehnungsentwicklung innerhalb der Finite-Elemente beeinflusst werden. Eine Übertragung kalibrierter Parameter auf abweichende Netzgrößen führt daher in der Regel zu Veränderungen im Versagensbeginn und im postmaximalen Verlauf.

Während Kleinproben wie B3×15-Rundzugproben oder Kerbschlagbiegeproben mit sehr feinen Netzen diskretisiert werden können, ist dies bei Großbauteilen aus Rechenkapazitätsgründen nicht möglich. Zur Anwendung der Materialmodelle in Bauteilmodellen ist daher eine Überführung der an feinen Netzen kalibrierten Parameter auf größere Netze erforderlich.

Im Folgenden wird die Übertragung der an einem 0,15 mm Hexaeder-Netz kalibrierten Materialparameter auf ein 1,0 mm Hexaeder-Netz sowie ein 1,5 mm Tetraeder-Netz dargestellt (vgl. Abbildung 65). Als Transfergeometrie wurde eine B30×150-Rundzugprobe verwendet. Die Ergebnisse der B3×15-Probe wurden über das Verhältnis der Querschnittsflächen ($A_{B3 \times 15} / A_{B30 \times 150}$) skaliert.

Der Vergleich der Kraft-Weg-Verläufe zeigt den Einfluss der Netzgröße auf Traglast, Schädigungsbeginn und Entfestigungsverhalten sowie die Anpassung der Parameter zur konsistenten Abbildung des Versagens

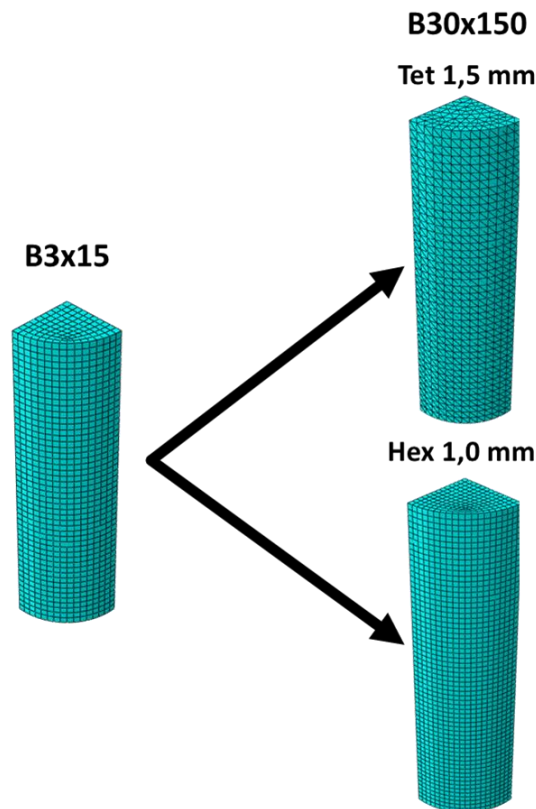
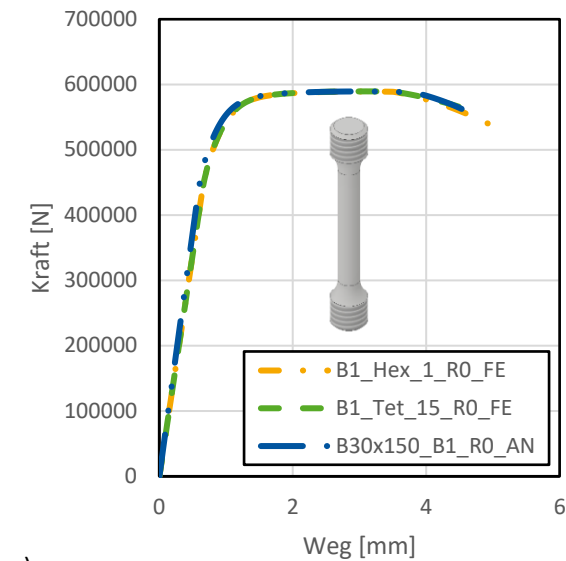
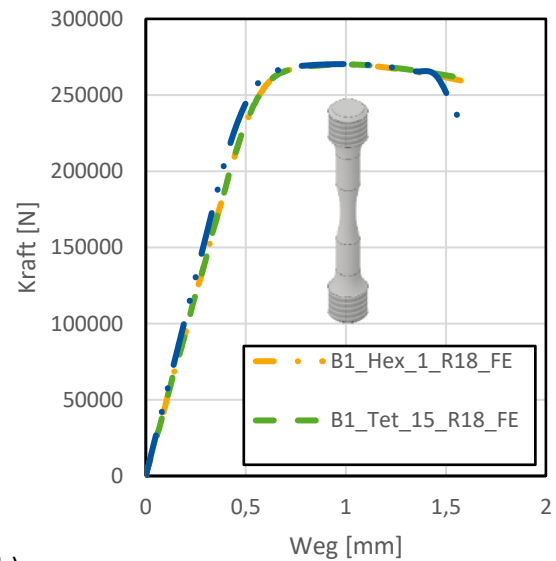


Abbildung 65: Übertragung der an 0,15 mm Hexaeder-Elementen kalibrierten Materialparameter auf ein 1,0 mm Hexaeder-Netz und ein 1,5 mm Tetraeder-Netz

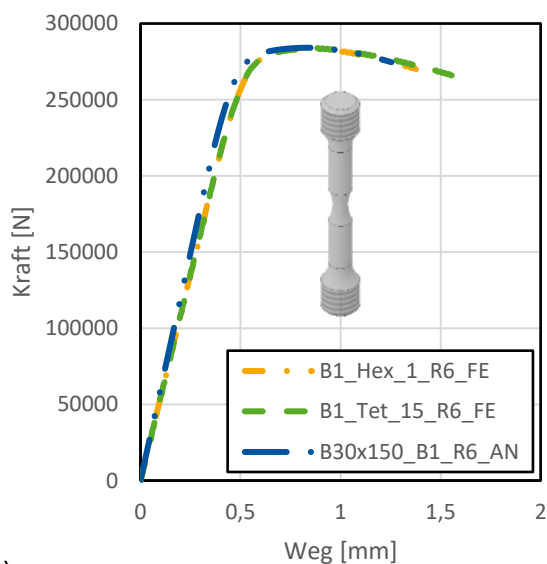
Für Batch 1, dargestellt in Abbildung 66, zeigt der Vergleich der Kraft-Weg-Verläufe der B30×150-Transferprobe, dass die Überführung der an 0,15 mm Hex-Elementen kalibrierten Parameter auf ein 1,0 mm Hex-Netz sowie ein 1,5 mm Tet-Netz grundsätzlich zu einer vergleichbaren Abbildung der globalen Traglast führt. Mit zunehmender Kerbwirkung (R18 bis R2) wird eine höhere Sensitivität gegenüber der Netzgröße sichtbar, insbesondere im Bereich des Schädigungsbeginns und im postmaximalen Verlauf. Durch die angepasste Parametrisierung kann jedoch eine konsistente Beschreibung des Versagens über die unterschiedlichen Diskretisierungen hinweg erreicht werden.



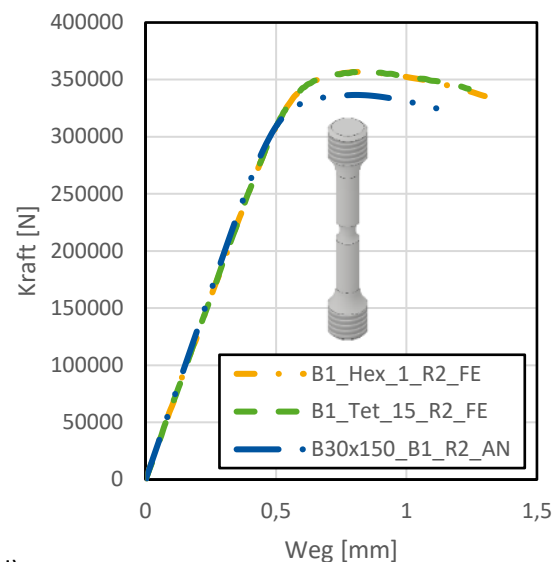
a)



b)



c)



d)

Abbildung 66: Übertragung der an 0,15 mm Hex-Elementen kalibrierten Materialparameter auf ein 1,0 mm Hex-Netz und ein 1,5 mm Tet-Netz für Batch 1. a) R0, b) R18, c) R6, d) R2.

Auch für Batch 2, Abbildung 67, bestätigt der Netzvergleich die grundsätzliche Übertragbarkeit der kalibrierten Materialparameter auf größere Diskretisierungen. Die Traglasten werden für alle Kerbradien in vergleichbarer Größenordnung wiedergegeben. Abweichungen zeigen sich vor allem im Entfestungsverhalten, wobei das Tetraeder-Netz tendenziell eine leicht verzögerte Schädigungsentwicklung aufweist. Insgesamt bleibt die globale Tragreaktion über die untersuchten Netzgrößen hinweg konsistent.

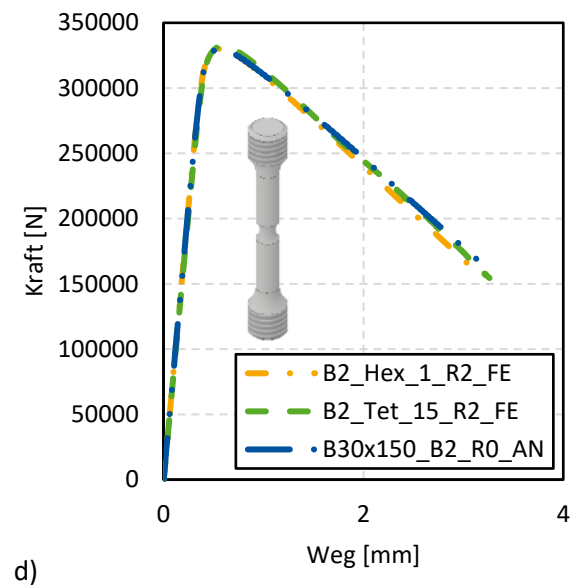
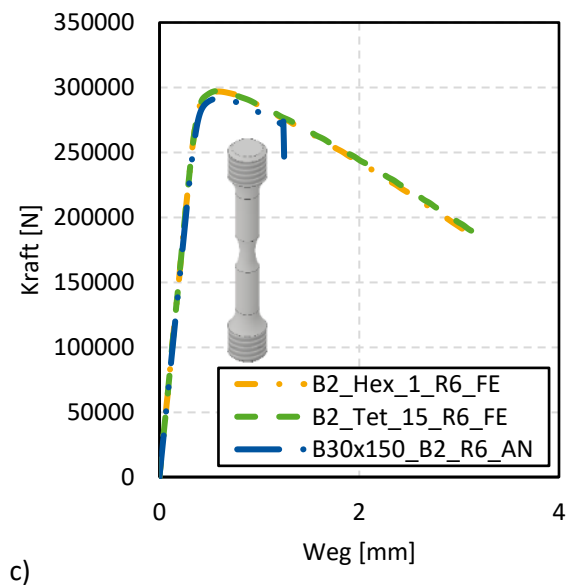
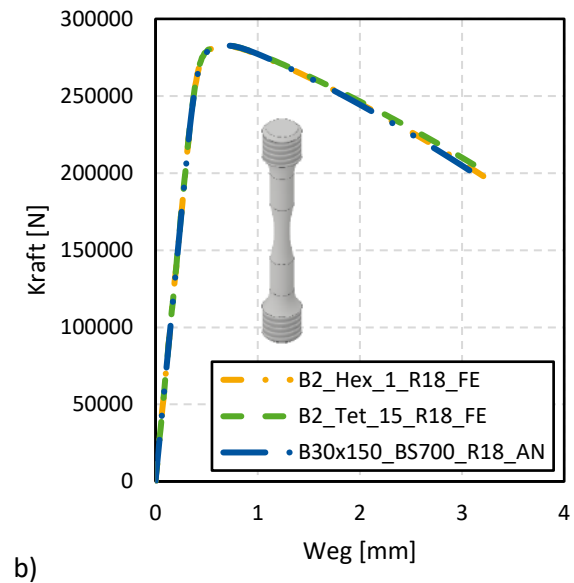
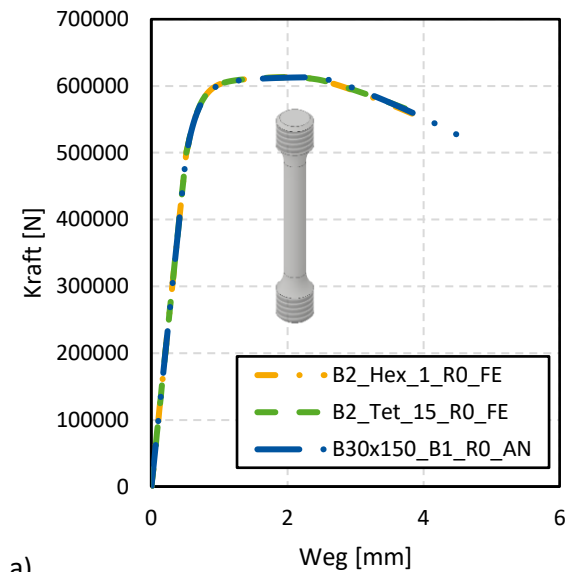


Abbildung 67: Übertragung der kalibrierten Materialparameter auf größere Diskretisierungen für Batch 2.

Für die Charge S700 zeigt sich eine ähnliche Tendenz, vgl. Abbildung 68. Die Netzübertragung führt zu einer weitgehend übereinstimmenden Darstellung der maximalen Traglast sowohl bei ungekerbten als auch bei gekerbten Proben. Unterschiede treten primär im postmaximalen Bereich auf, insbesondere bei hohen Kerbwirkungen. Die Ergebnisse bestätigen, dass die an feinen Netzen identifizierten Parameter auch bei größeren Bauteilnetzen eine realitätsnahe Abbildung des Trag- und Versagensverhaltens ermöglichen.

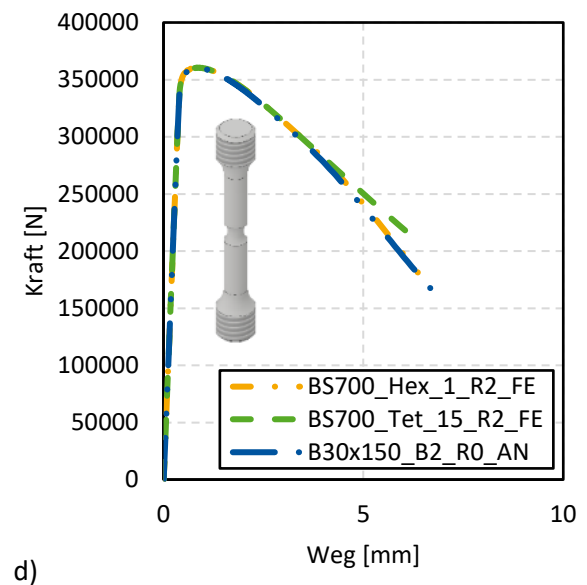
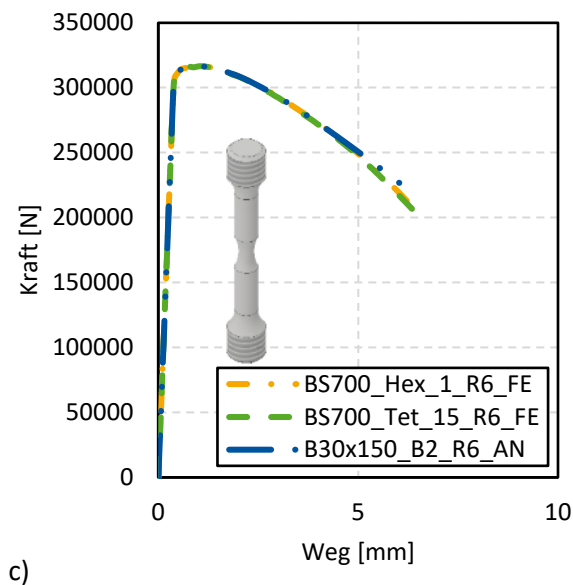
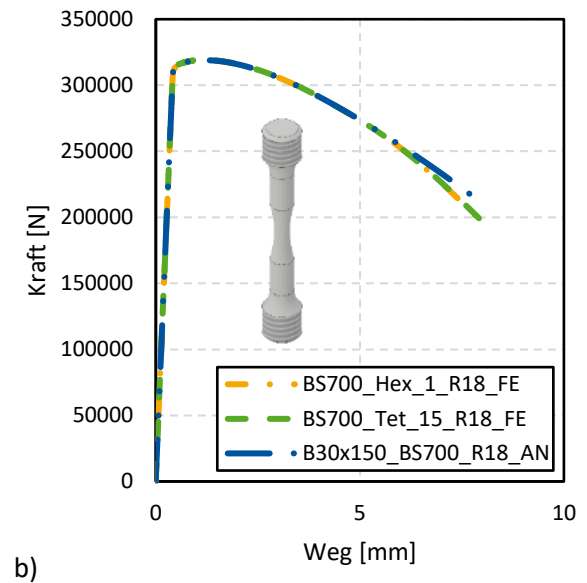
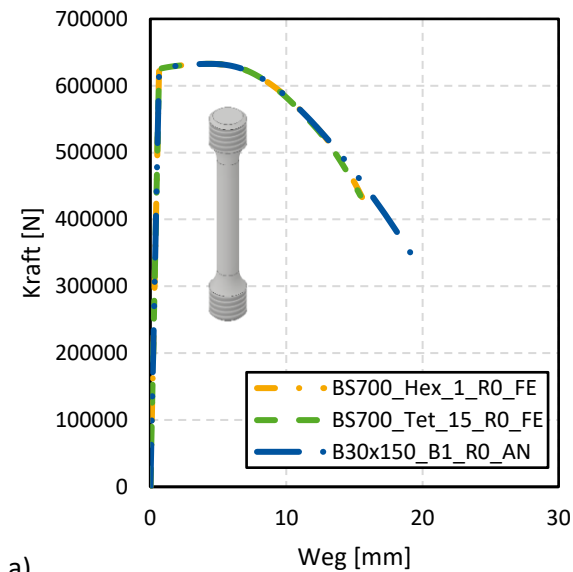


Abbildung 68: Netzübertragung der Materialparameter für die Charge S700.

Zur Bewertung der Trag- und Versagensmechanismen der in AP 5.3 entwickelten quadratischen Steckknoten wurden numerische Nachrechnungen unter Verwendung der zuvor kalibrierten Material- und Schädigungsparameter für ein 1,5 mm Tetraeder-Netz durchgeführt. Damit liegt eine geschlossene Methodenkette von der Kleinprobenkalibrierung über die netzabhängige Parameterüberführung bis zur Bauteilsimulation vor. Untersucht wurden hohle Knoten mit einer Wandstärke von 3 mm (T3) und 4 mm (T4).

Zunächst wurde das Verhalten unter reiner Normalkraftbeanspruchung untersucht. Die Spannungsverteilungen zeigen eine deutliche Lokalisierung plastischer Deformationen im Bereich der inneren Steckgeometrie sowie in den Übergangszonen zwischen Knotenwand und angeschlossenen Profil. Die numerischen Kraft-Weg-Verläufe verdeutlichen deutliche Unterschiede zwischen den Materialchargen: Während die Charge S700 das höchste Traglastniveau und eine ausgeprägte postmaximale Verformungsfähigkeit erreicht, zeigen die schrottbasierten Chargen B1 und B2 einen früheren Schädigungsbeginn und einen steileren Traglastabfall. Die Ergebnisse sind in Abbildung 69 dargestellt. Es wird zudem deutlich, dass eine größere Wandstärke zu einer deutlichen Steigerung der Normalkrafttragfähigkeit führt.

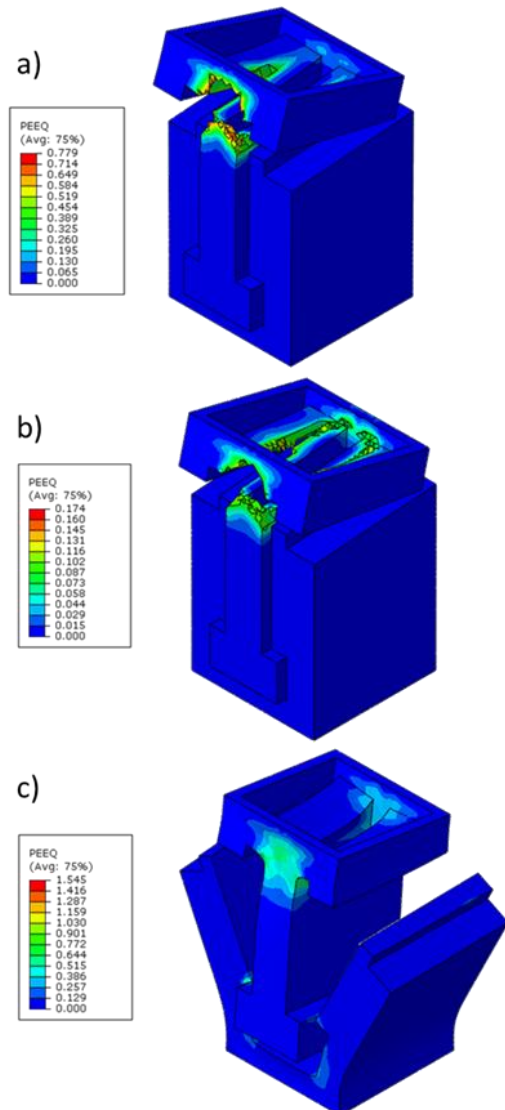
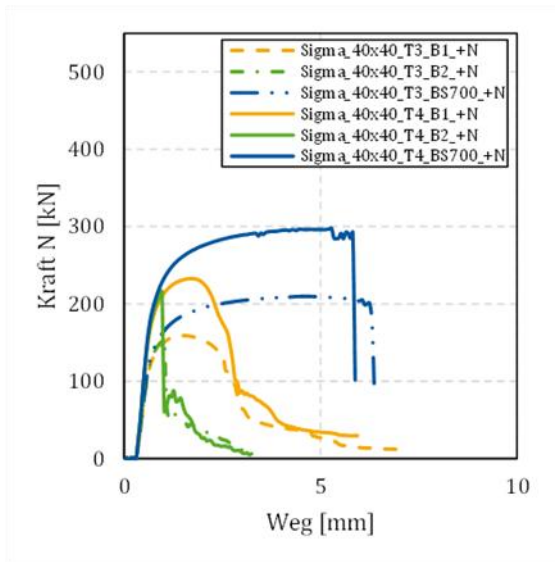


Abbildung 69: Numerische Nachrechnung des quadratischen Steckknotens unter Normalkraftbeanspruchung, Kraft-Weg-Verlauf unter Normalkraft N sowie Darstellung der Versagensform a) Batch B1, b) Batch B2 und c) Batch S700

Ergänzend wurde das Tragverhalten unter Biegung um die starke Achse M_y sowie unter der zugehörigen Querkraft Q_z analysiert. Auch unter diesen Beanspruchungen zeigt sich eine vergleichbare Lokalisierung der plastischen Deformation in den geometrisch kritischen Bereichen der Steckverbindung, vgl. Abbildung 70. Die globalen Momenten- beziehungsweise Kraft-Verformungsverläufe bestätigen die bereits unter Normalkraft beobachteten materialabhängigen Unterschiede. Insbesondere das sprödere Verhalten der Chargen B1 und B2 wird im direkten Vergleich zur duktileren S700-Charge, wie Abbildung 71 zeigt, deutlich sichtbar. Auch für die Querkraft- und Rotationsbelastung zeigt sich eine deutliche Tragfähigkeitssteigerung bei größerer Wandstärke. Das Versagen sowie die Duktilitätsunterschiede ist jedoch von der Wandstärke unbeeinflusst.

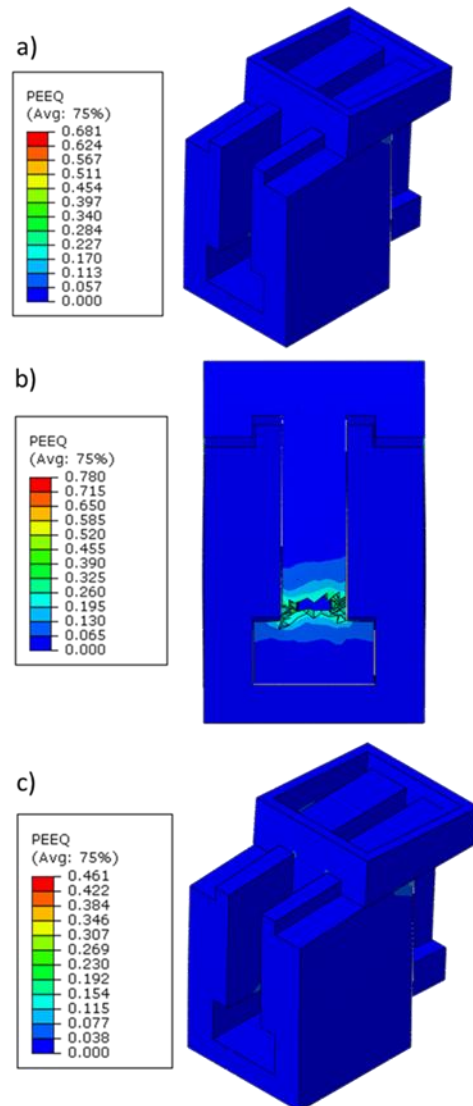
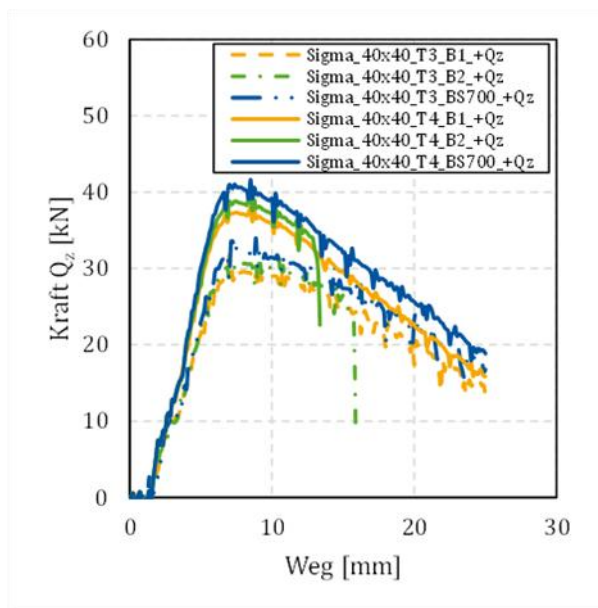


Abbildung 70: Numerische Nachrechnung des quadratischen Steckknotens unter Querkraftbeanspruchung, Kraft-Weg-Verlauf unter Querkraft sowie Darstellung der Versagensform a) Batch B1, b) Batch B2 und c) Batch S700

Die Nachrechnung belegt damit, dass die auf Kleinproben basierende Materialkalibrierung in Kombination mit der Netzübertragung auf 1,5 mm Tetraeder-Elemente eine konsistente prädiktive Beschreibung des Bauteilverhaltens ermöglicht. Gleichzeitig wird deutlich, dass die Werkstoffduktilität einen entscheidenden Einfluss auf Tragfähigkeit, Umlagerungsfähigkeit und Versagenscharakter der additiv gefertigten Steckknoten besitzt.

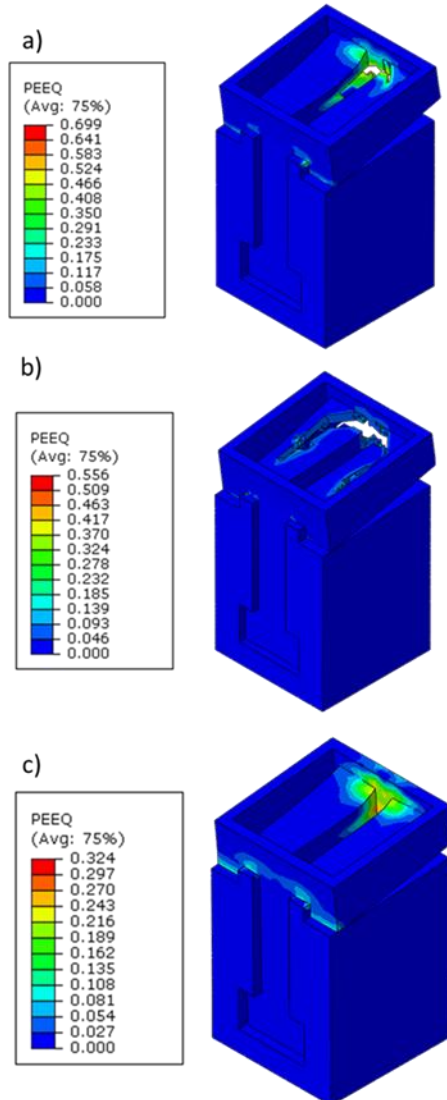
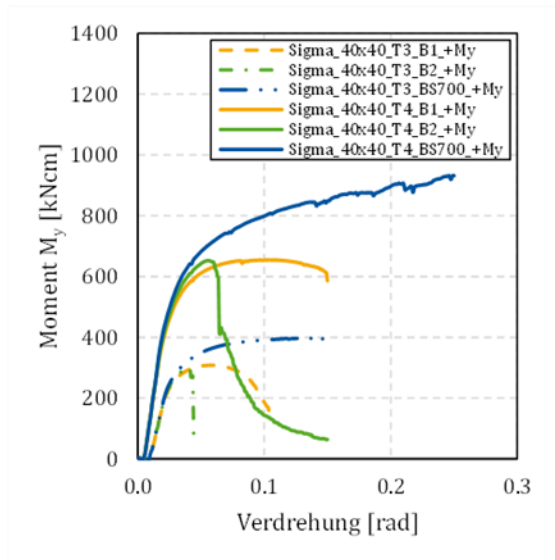


Abbildung 71: Numerische Nachrechnung des quadratischen Steckknotens unter Momentenbeanspruchung, Momenten-Rotationskurve sowie Darstellung der Versagensform a) Batch B1, b) Batch B2 und c) Batch S700

Die Ergebnisse zeigen, dass die kalibrierten Material- und Schädigungsparameter das Trag- und Versagensverhalten der untersuchten Geometrien im Rahmen der gewählten Modellierungsannahmen reproduzieren können. Damit ist die prädiktive Anwendung des Johnson-Cook-Ansatzes für die nachfolgenden Bauteilnachrechnungen im betrachteten Parameterbereich grundsätzlich gegeben

AP7 Validierung und Demonstration

AP7.1 Fertigung des Bauteils unter Prozessüberwachung und Validierung der Prozesskette

Im siebten Arbeitspaket wurden entsprechend der Vorhabensbeschreibung die Prozesskette von Bauschrottrecycling zu Pulverherstellung und Bauteilfertigung zu Aufbau eines Demonstratortragwerks validiert. Die Demonstratorbauteile wurden aus dem im Projekt hergestellten Material gefertigt. Der Fokus dieses Arbeitspakets lag auf der Demonstration und Validierung des Strukturknoten, da die Fertigung und Montage der Fassadenhalter bereits in AP6 im Rahmen des Hotboxversuchs validiert werden konnte. Hierfür wurde ein Demonstrator konstruiert, welcher zwei der Strukturknoten beinhaltet. Die Vorgehensweise und die erzielten Ergebnisse werden im Folgenden erläutert.

Für die Fertigung wurde der ausgewählte Sigmaknoten fertigungsgerecht angepasst und überhängende Bauteilbereiche so abgerundet, dass diese stützenfrei gefertigt werden konnten (vgl. Abbildung 72). Die Wandstärke des Bauteils wurde entsprechend des anschließenden Hohlprofils gewählt.

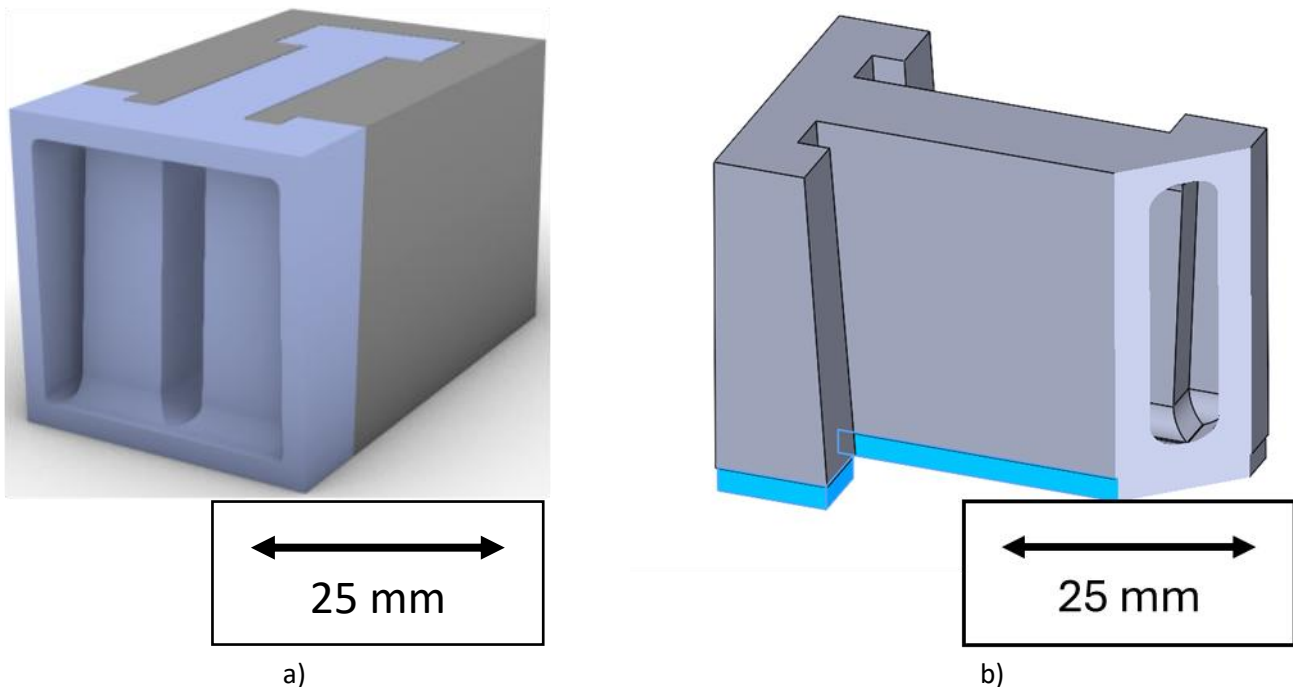


Abbildung 72: a) Fertigungsgerecht angepasstes Modell des Sigmaknotens; b) Schnittansicht des Sigmaknotens (Füllteil) mit Stützstrukturen (hellblau).

Der Prozessparameter #9 (siehe Tabelle 16) zeigte über alle Bausstahlschrott-Batches die beste Performance in Hinblick auf die rel. Dichte der Bauteile. Diese Prozessparameter im PBF-LB/M umfassen eine Laserleistung von 310 W und eine Scangeschwindigkeit von 1950 mm/s. Der Hatch-Abstand beträgt 115 μm , während die Schichtdicke auf 40 μm eingestellt ist. Der effektive Schmelzspurdurchmesser liegt bei etwa 78 μm . Aus diesen Parametern ergibt sich eine volumetrische Energiedichte von 34,56 J/mm³, die den Energieeintrag pro Volumeneinheit während des Prozesses beschreibt. Diese Kombination aus hoher Scangeschwindigkeit und moderater Laserleistung führt zu einem kontrollierten Energieeintrag in das Pulverbett, wodurch eine stabile Schmelzbadbildung ermöglicht wird. Die gewählten Parameter resultieren in einer Bauteildichte von 100 %, was auf eine nahezu vollständige Verschmelzung der Pulverpartikel und eine sehr geringe Porosität hinweist. Insgesamt zeigen die Parameter eine prozessoptimierte Einstellung, bei der ein Gleichgewicht zwischen Produktivität und hoher Bauteilqualität erreicht wird.

Abschlussbericht AddMamBa (Teil I & II): Additive Manufacturing von 3D Verbindungselementen im Bauwesen



Tabelle 16: Ergebnisse Kerbschlagbiegeversuche an verschiedenen Batches

Prozessparameter	Baustrahlschrott (#9)
P (W)	310
vs (mm/s)	1950
hs (µm)	0,115
hs (mm)	115
DS (mm)	0,04
DS (µm)	40
T _{vorheiz} (°C)	100

Das Slicing der Bauteile erfolgte mit der Software EOSPRINT in der Version 2.15 (Abbildung 73). Innerhalb der Baujobvorbereitung wurden die CAD-Modelle zunächst importiert, orientiert und anschließend mit den definierten Prozessparametern für das PBF-LB/M-Verfahren versehen. Pro Baujob wurden insgesamt sechs Bauteilpaare, bestehend aus jeweils einem Aussteckteil und einem Füllteil, auf der Bauplattform angeordnet und für die Fertigung aufbereitet. Dabei wurden die Bauteile so positioniert, dass eine effiziente Nutzung der verfügbaren Baufläche sowie eine gleichmäßige thermische Belastung während des Bauprozesses erreicht werden konnten. Nach der Festlegung der Orientierung und der Bauteilplatzierung erfolgte das eigentliche Slicing, bei dem die Geometrien entsprechend der definierten Schichtdicke in einzelne Fertigungsschichten zerlegt und die zugehörigen Belichtungs- bzw. Scanstrategien generiert wurden. Die so erzeugten Schichtdaten bilden die Grundlage für die anschließende additive Fertigung im PBF-LB/M-Prozess.

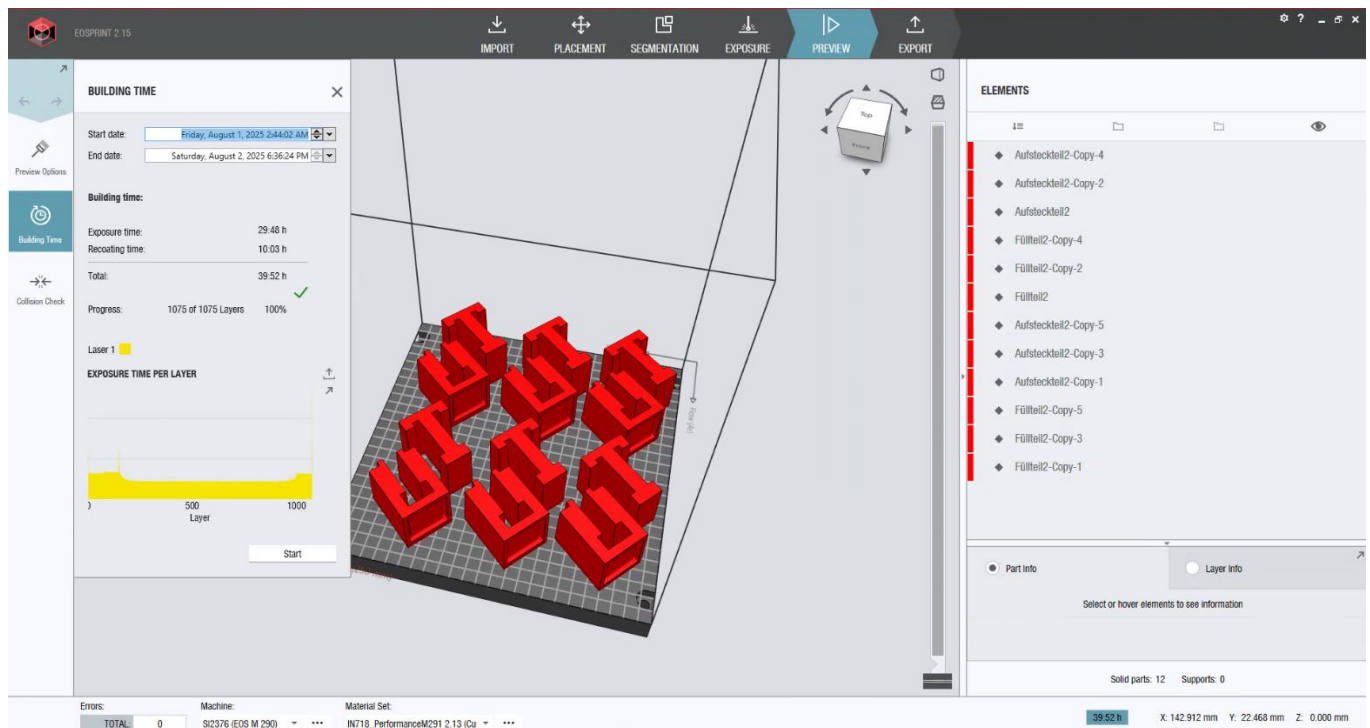


Abbildung 73: Darstellung Ausrichtung der Sigmaknoten (Füll- und Aufsteckteil) sowie Bauzeit Simulation in der Slicing Software EOS-Print 2.15

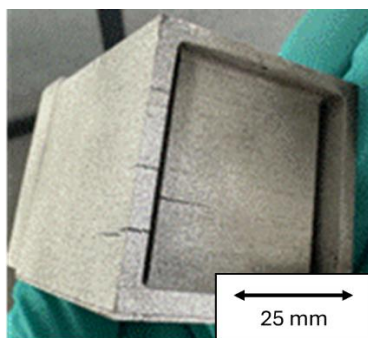
Das Belichtungsschema (Hatching) der Bauteile wurde in EOSPRINT so definiert, dass zunächst die Infill-Belichtung des Bauteilinneren erfolgt und anschließend mehrere Konturbelichtungen zur Definition der Bauteilränder durchgeführt werden. Konkret wurde zuerst das Infill zur flächigen Aufschmelzung des Pulvermaterials im Inneren der Geometrie belichtet. Darauf folgte eine erste Kontur, die die äußere Geometrie präzise abgrenzt, sowie eine zweite Kontur,

welche die Randbereiche zusätzlich stabilisiert und die Oberflächenqualität verbessert. Abschließend wurden Edge-Parameter angewendet, um die Randzonen weiter zu optimieren und eine saubere Bauteilkante zu gewährleisten.

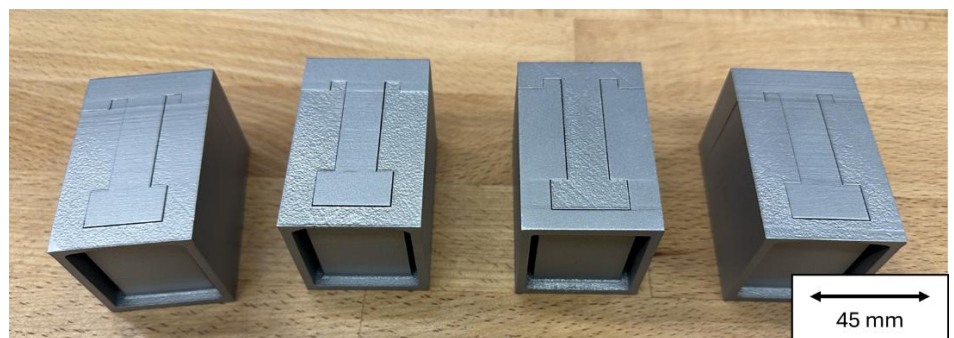
Für das Infill wurde ein Stripe-basiertes Belichtungsmuster verwendet. Dabei beträgt die Stripe-Breite 10 mm mit einer Überlappung von 0,12 mm zwischen den einzelnen Streifen. Zusätzlich wurde die Funktion Skywriting aktiviert, um die Laserbewegung an den Vektorenden zu stabilisieren und Energieeinträge gleichmäßiger zu gestalten. Die Vektorreihenfolge erfolgte flussoptimiert, wodurch unnötige Richtungswechsel reduziert und thermische Belastungen gleichmäßiger verteilt werden. Weiterhin wurde ein Shifted Pattern eingesetzt, wodurch die Belichtungsstreifen zwischen den Schichten versetzt werden, um eine homogenere Mikrostruktur und eine gleichmäßigere Energieverteilung im Bauteil zu erreichen. Optionen wie Double Exposure, Defocused Exposure sowie zusätzliche Maßnahmen zur Energy Input Homogenization wurden in diesem Fall nicht aktiviert. Insgesamt ermöglicht diese Strategie eine stabile Schmelzbadbildung und trägt zu einer gleichmäßigen Bauteilqualität im gesamten Bauraum bei.

Für die Belichtung der Hatch-, Up-Skin- und Down-Skin-Bereiche wurden die im Projekt AP4 entwickelten und optimierten Prozessparameter verwendet. Diese Parameter wurden zuvor hinsichtlich Energieeintrag, Schmelzbadstabilität und Oberflächenqualität untersucht und anschließend unverändert in den vorliegenden Baujobs übernommen. Der Up-Skin-Bereich wurde über eine Schichtdicke von drei Layern definiert und mit einer Laserleistung von 153 W, einer Scangeschwindigkeit von 600 mm/s sowie einem Hatch-Abstand von 0,09 mm belichtet, was einer volumetrischen Energiedichte von etwa 141,67 J/mm³ entspricht. Zusätzlich wurde im Up-Skin eine Double-Exposure-Strategie eingesetzt, um eine verbesserte Oberflächenqualität an nach oben gerichteten Flächen zu erzielen.

Für den Down-Skin-Bereich, der ebenfalls über drei Schichten definiert wurde, kamen reduzierte Energieeinträge zum Einsatz, um Überhitzung und mögliche Anhaftungen an nicht gestütztem Pulver zu vermeiden. Hierfür wurden eine Laserleistung von 95 W, eine Scangeschwindigkeit von 785 mm/s sowie ein Hatch-Abstand von 0,1 mm verwendet, was einer Energiedichte von etwa 30,25 J/mm³ entspricht. Sowohl für Up-Skin als auch Down-Skin wurde Skywriting aktiviert und eine Straight-Lined Hatch-Sortierung verwendet, um stabile Scanbewegungen und reproduzierbare Belichtungsbedingungen sicherzustellen. Durch die Verwendung der in AP4 validierten Parameter konnte eine konsistente Prozessführung und eine vergleichbare Bauteilqualität zwischen den verschiedenen Baujobs gewährleistet werden. Während der Durchführung der additiven Fertigungsversuche wurde zudem festgestellt, dass es im Verlauf der Baujobs zu einer deutlichen Alterung des verwendeten Metallpulvers kam. Diese Pulveralterung äußerte sich insbesondere durch eine zunehmende Oxidbildung auf den Pulverpartikeln, was das Verarbeitungsverhalten innerhalb des Baujobs merklich beeinträchtigte, vgl. Abbildung 74.



a)



b)

Abbildung 74: a) Rissbildung induziert durch oxidiertes Stahlschrottpulver, sowie oxidierte Oberfläche. b) Mittels PBF-LB/M gefertigte Demonstratoren, abgetrennt von Substratplatte sowie Sicherstellung der Montier- und Demontierbarkeit.

Oxidierte Pulverpartikel können die Benetzbarkeit und das Aufschmelzverhalten im Schmelzbad negativ beeinflussen, wodurch eine stabile Schmelzbadbildung erschwert wird. In der Folge wurden Unregelmäßigkeiten im Druckbild sowie eine lokal auftretende Rissbildung an einigen Bauteilen beobachtet. Solche Effekte stehen häufig im Zusammenhang

mit veränderten thermischen Bedingungen im Schmelzbad sowie mit einer reduzierten metallurgischen Bindung zwischen den aufgeschmolzenen Schichten.

Um diese Einflüsse zu minimieren und eine reproduzierbare sowie qualitativ hochwertige Fertigung sicherzustellen, wurde entschieden, den weiteren Prozess mit einer frischen Pulvercharge fortzuführen. Durch den Einsatz von neuem, wenig oxidiertem Pulver konnten die Fließeigenschaften, die Energieaufnahme sowie die Schmelzbadstabilität wieder verbessert werden. Dies trug maßgeblich dazu bei, ein gleichmäßiges und konsistentes Druckbild zu erreichen und gleichzeitig das Risiko von Rissbildung und prozessbedingten Defekten in den gefertigten Bauteilen zu reduzieren. Der Wechsel auf eine frische Pulvercharge stellte somit eine wichtige Maßnahme dar, um eine möglichst hohe Bauteilqualität und Prozessstabilität während der weiteren Fertigung sicherzustellen.

Die Optimierung der Konturparameter erfolgte auf Grundlage von Rauheitsmessungen, die mit einem Messgerät der Firma Mahr durchgeführt wurden. Ziel dieser Untersuchung war es insbesondere, die Oberflächenqualität der Formschlussflächen zwischen Füllteil und Aufsteckteil des Sigma-Knotens so einzustellen, dass ein möglichst reibungsarmes Aufeinanderabgleiten der Bauteile gewährleistet werden kann. Hierfür wurden mehrere Konturparametervarianten untersucht und die resultierenden Rz-Rauheitswerte miteinander verglichen. Eine Gegenüberstellung eines Probekörpers mit und ohne Kontur ist in Abbildung 75 dargestellt. Dabei zeigen die Proben deutliche Unterschiede in der Oberflächenrauheit: Die niedrigsten Rauheitswerte wurden für die Parameterkombinationen 11 ($R_z = 0,00482 \mu\text{m}$), 36 ($R_z = 0,00545 \mu\text{m}$) und 33 ($R_z = 0,00573 \mu\text{m}$) gemessen, während höhere Rauheiten beispielsweise bei 19 ($R_z = 0,01652 \mu\text{m}$) und 53 ($R_z = 0,01549 \mu\text{m}$) auftraten. Weitere untersuchte Parameterkombinationen lagen im mittleren Bereich, etwa 22 ($S_a = 0,00860$), 23 ($S_a = 0,01262$), 24 ($R_z = 0,00617$), 41 ($R_z = 0,00632 \mu\text{m}$) und 73 ($R_z = 0,00657 \mu\text{m}$). Auf Basis dieser Ergebnisse konnten diejenigen Konturparameter identifiziert werden, die eine möglichst geringe Oberflächenrauheit und damit günstige tribologische Eigenschaften der Kontaktflächen zwischen Füll- und Aufsteckteil gewährleisten.

Für die Randbelichtung der Bauteile wurden in EOSPRINT zwei aufeinanderfolgende Konturstrategien (Contour 1 und Contour 2) eingesetzt, um sowohl eine präzise geometrische Abbildung der Bauteilkontur als auch eine hohe Oberflächenqualität zu gewährleisten.

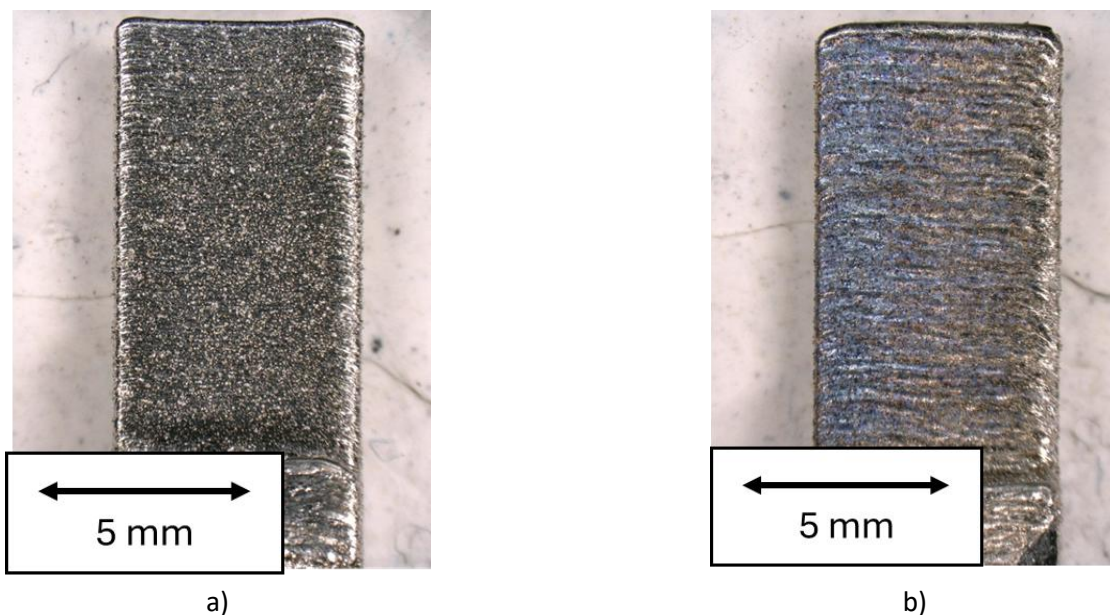


Abbildung 75: a) mit Contour. b) ohne Contour.

Die erste Kontur (Contour 1) wurde mit einem Contour Offset von 0,012 mm und einer Schichtanzahl von einer Lage definiert. Der zugehörige Corridor betrug 0,07 mm. Für die Belichtung dieser äußeren Kontur wurde eine Laserleistung

von 138 W bei einer Scangeschwindigkeit von 390 mm/s verwendet, was einem Energieeintrag von etwa 8,85 J/mm² entspricht. Die Down-Contour wurde in diesem Fall deaktiviert (Laserleistung 0 W), während die On-Part-Contour mit identischen Parametern wie die Standardkontur belichtet wurde. Diese erste Kontur dient primär der präzisen Ausbildung der Bauteilgeometrie und der Stabilisierung der Randbereiche des Schmelzbades.

Darauffolgend wurde eine zweite Kontur (Contour 2) mit leicht angepassten Parametern eingesetzt, um die Randbereiche weiter zu definieren und thermische Spannungen zu reduzieren. Diese Kontur wurde ohne zusätzlichen Contour Offset (0 mm) und ebenfalls mit einer Schichtdicke von einer Lage sowie einem Corridor von 0,07 mm ausgeführt. Die Belichtung erfolgte mit einer reduzierten Laserleistung von 80 W und einer Scangeschwindigkeit von 800 mm/s, was einem Energieeintrag von etwa 2,50 J/mm² entspricht. Zusätzlich wurde für diese Kontur eine Down-Contour mit 35 W und 2000 mm/s verwendet, wodurch ein sehr niedriger Energieeintrag von etwa 0,44 J/mm² erzielt wurde. Diese Strategie unterstützt insbesondere die Stabilität der Randbereiche in Bereichen mit angrenzendem Pulverbett und reduziert das Risiko von Überhitzung oder unerwünschtem Materialauftrag. Durch die Kombination beider Konturstrategien konnte eine präzise Bauteilgeometrie, stabile Randverschmelzung und verbesserte Oberflächenqualität erzielt werden.

Während der Fertigung wurde zusätzlich das Prozessüberwachungssystem EOS optischen Tomographie (OT) eingesetzt, um den Belichtungsprozess schichtweise zu erfassen, auszuwerten und Bauteil-Defekte rückverfolgbar zu machen. Die optische Tomographie registriert dabei die während des Laserschmelzens emittierte Strahlung aus dem Schmelzbad und stellt diese in Form von Intensitätsverteilungen dar. Die Auswertung der aufgezeichneten Daten zeigte über den Großteil des Bauprozesses ein gleichmäßiges und homogenes Belichtungsmuster, was auf eine stabile Prozessführung und einen konsistenten Energieeintrag schließen lässt. Lokale Intensitätsschwankungen konnten vereinzelt beobachtet werden, lagen jedoch im erwartbaren Bereich des Prozesses und führten zu keinen systematischen Auffälligkeiten im Bauablauf. Eine beispielhafte Darstellung der durch die optische Tomographie erfassten Schichtintensität ist in Abbildung 76 dargestellt.

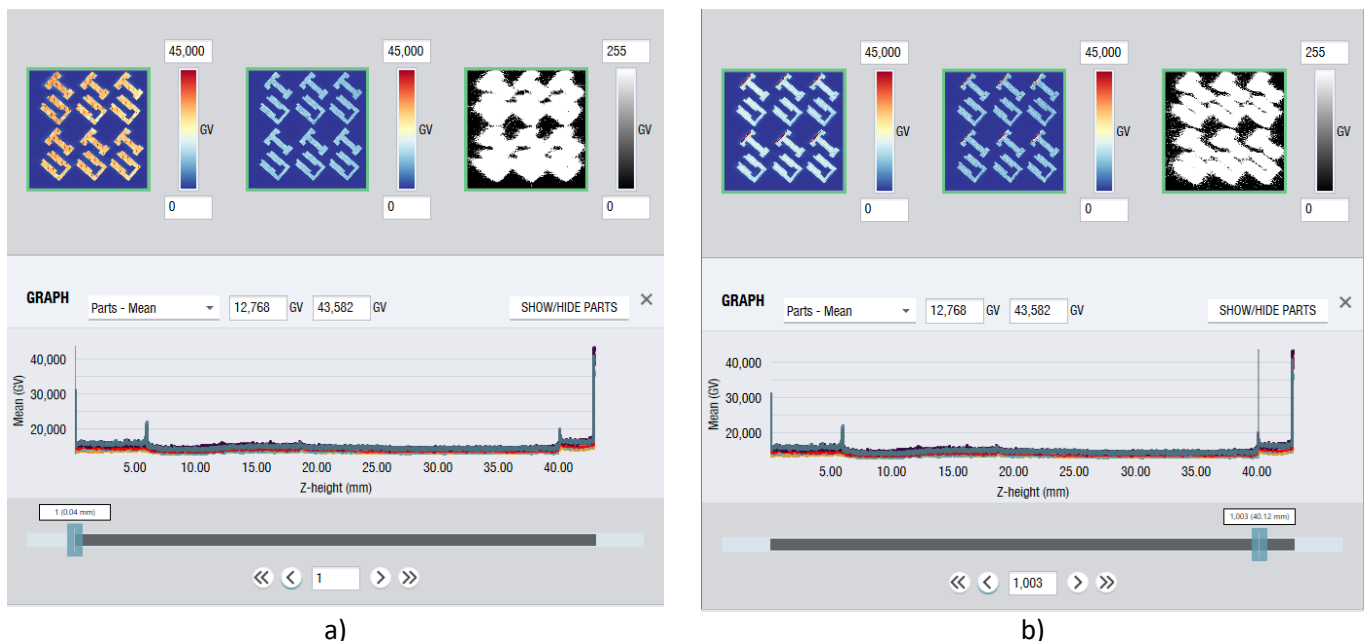


Abbildung 76: EOSTATE Exposure OT Daten der Demonstrator Sigmaknoten gefertigt aus Baustahlschrott a) Schicht 1 - Prozessstart. b) Schicht 1003.

Abbildung 76 zeigt die mit EOSTATE Exposure OT Daten aufgenommenen Prozessdaten des Sigma-Knotens und ermöglicht einen Vergleich zwischen zwei charakteristischen Schichten des Bauprozesses. Dargestellt sind zum einen Schicht 1 (Abbildung 76 a)) zu Beginn des Prozesses sowie Schicht 1003 (Abbildung 76 b)) als kritische Schicht im

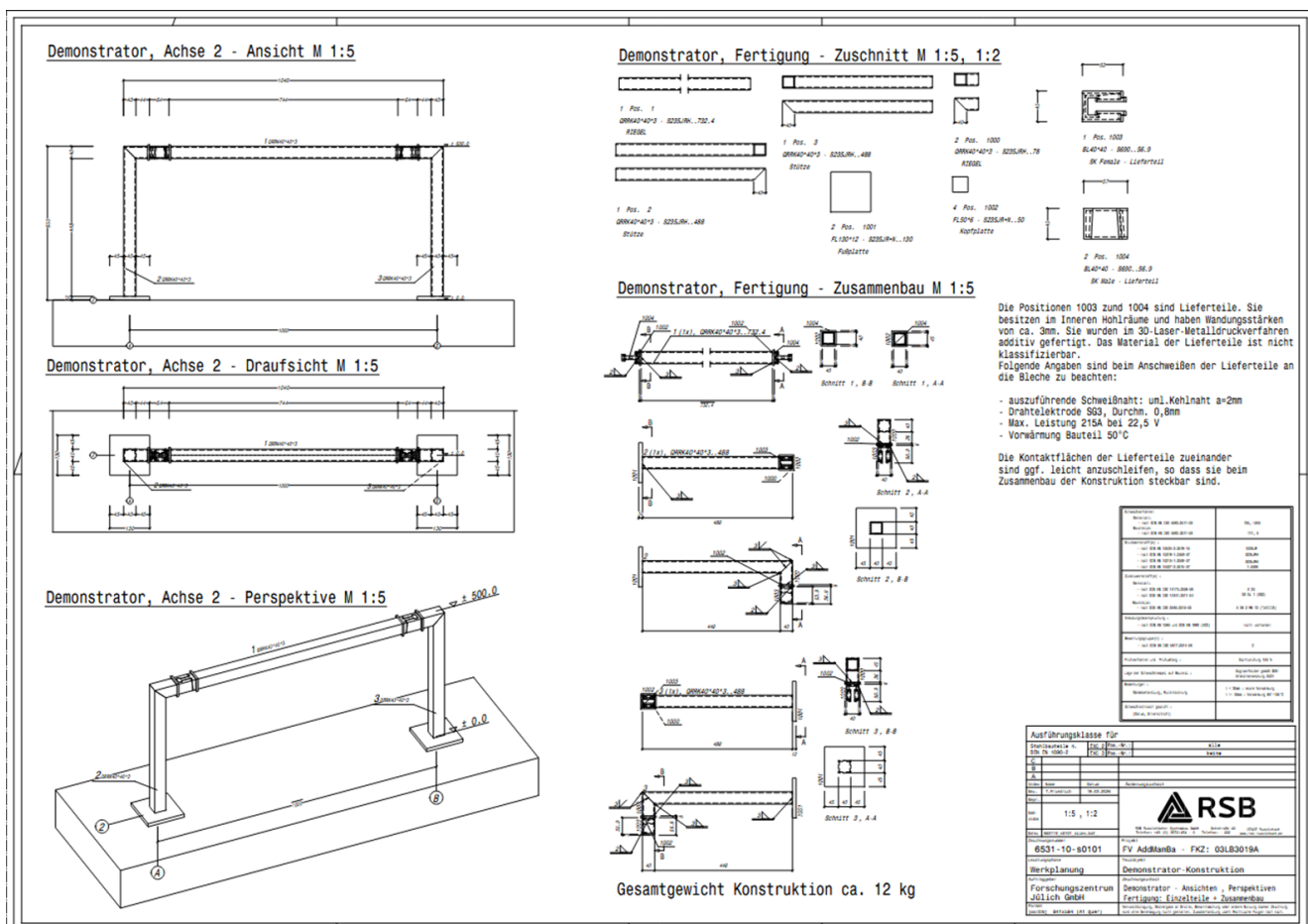
fortgeschrittenen Aufbau. Während in der ersten Schicht ein weitgehend homogener Energieeintrag unter initial stabilen thermischen Bedingungen zu beobachten war, zeigte sich in Schicht 1003 ein deutlich verändertes Verhalten. Diese Schicht ist dadurch gekennzeichnet, dass sich geometriebedingt kurze Hatch-Vektoren zu längeren Scanbahnen vereinen, wodurch lokal veränderte thermische Randbedingungen entstehen. Die resultierenden Unterschiede in der Intensitätsverteilung der OT weisen auf eine veränderte Wärmeakkumulation und ein angepasstes Abkühlverhalten hin und erlauben somit Rückschlüsse auf potenzielle Prozessinstabilitäten in geometrisch kritischen Bereichen.

Die dort gezeigte Verteilung bestätigt die gleichmäßige Belichtung innerhalb der Bauteilgeometrien und unterstützt die Annahme einer stabilen Schmelzbadbildung während des gesamten Fertigungsprozesses.

AP7.2 Fertigung eines Demonstrators

Zur anschaulichen Demonstration der im Projekt entwickelten Verbindungskonzepte wurde ein Demonstratorbauteil konstruiert, gefertigt und montiert. Der Demonstrator ist als kleiner Portalrahmen ausgebildet und besteht aus zwei vertikalen Pfosten und einem horizontalen Riegel aus quadratischen Hohlprofilen (40 × 40 mm). Die biegesteifen Eckverbindungen zwischen Pfosten und Riegel wurden über additiv gefertigte SIGMA-Knoten realisiert, welche als Verbindungselemente zwischen den Profilen dienen. Die konstruktive Ausführung des Demonstrators sowie die einzelnen Bauteile sind in der technischen Zeichnung dargestellt (vgl. Abbildung 77).

Der Demonstrator wurde im Kontext des Stahlbaus bewusst im verkleinerten Maßstab ausgeführt. Grundsätzlich lassen sich die im Projekt entwickelten Knoten- und Verbindungskonzepte jedoch – wie in Kapitel 5 beschrieben – auf größere Bauteilabmessungen übertragen und entsprechend skalieren. Für den Demonstrator wurde hierbei der im Projekt untersuchte quadratische Knoten für 40 × 40 mm Hohlprofile verwendet.



Die Fertigung der Demonstratoren erfolgte in Rudolstadt bei der RSB Rudolstädter Systembau GmbH. Hier wurden aus den Vorprodukten (Sigmaknoten und Hohlprofile) in einer konventionellen Stahlbaufertigung ein montagefreundliches Rahmentragwerk gefertigt. Einblicke in die Fertigung gibt Abbildung 78.



a)



b)

Abbildung 78: a) Detailaufnahmen des Sigmaknotens und b) Fertigung der Demonstratoren in Rudolstadt.

Die Montage des Demonstrators erfolgte durch das Einstecken der Profilbauteile in die additiv gefertigten Verbindungselemente sowie durch die anschließende Fixierung der Bauteile. Der Montageprozess ist exemplarisch in Abbildung 79 dargestellt und verdeutlicht die prinzipielle Umsetzbarkeit sowie die montagefreundliche Handhabung des Verbindungskonzepts.

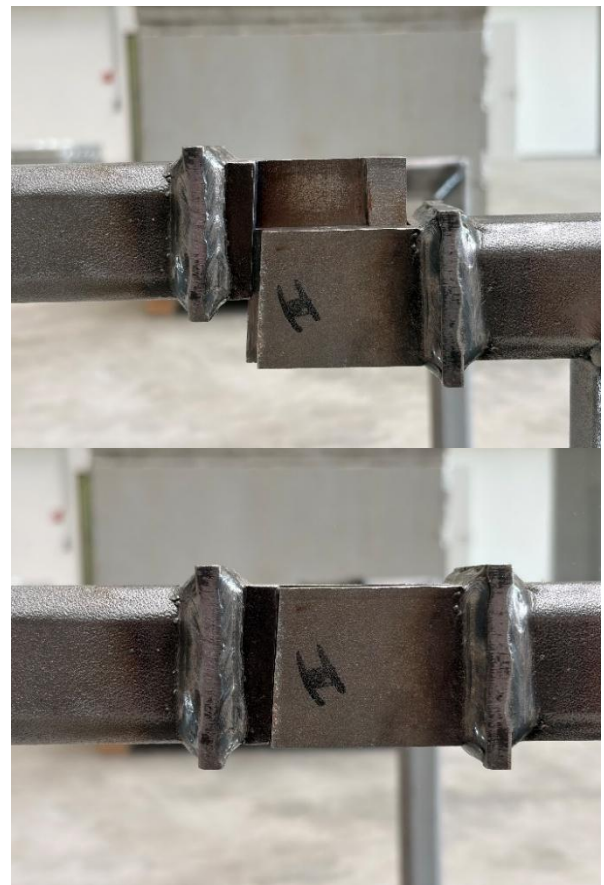
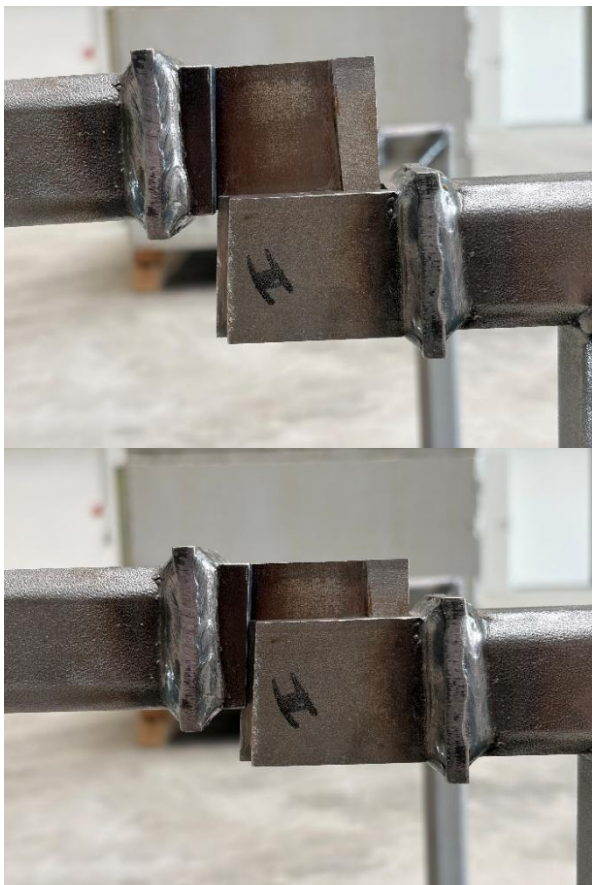


Abbildung 79: Montageprozess des Demonstrators

Zur qualitativen Demonstration der Tragfähigkeit wurde der montierte Demonstrator abschließend unter einer Last von 120 kg belastet (Abbildung 80). Die Konstruktion konnte die Last ohne sichtbare Schäden aufnehmen und bestätigt damit die grundsätzliche Funktionsfähigkeit der entwickelten Verbindungselemente im Zusammenspiel mit konventionellen Profilbauteilen. Der Demonstrator dient somit als anschauliches Beispiel für die praktische Umsetzung additiv gefertigter Knoten im Stahlbau.



Abbildung 80: Demonstrator unter 120 kg Last.

Der Demonstrator verdeutlicht darüber hinaus das Potenzial der entwickelten Verbindungsknoten für montagefreundliche Tragwerkskonzepte. Durch die steckbare Ausbildung der Verbindungselemente lassen sich Rahmentragwerke mit vergleichsweise geringem Montageaufwand zusammenfügen und bei Bedarf ebenso einfach wieder demontieren. Damit wird exemplarisch gezeigt, wie additiv gefertigte Knoten dazu beitragen können, Konstruktionen im Stahlbau nicht nur tragfähig, sondern auch montage- und rückbaufreundlich auszubilden.

Veröffentlichung der Ergebnisse

Während des Projektzeitraums wurden folgende Veröffentlichungen, Konferenzbesuche und Messebeiträge durchgeführt:

Veröffentlichungen:

- (a) Schulte, Joana und Schleifenbaum; Johannes Henrich (2023): Improving Sustainability in the Building Industry using Biomimetics and Additive Manufacturing, in: Bionik: Patente aus der Natur: Innovations- und Nachhaltigkeitspotenziale für Technologieanwendungen : Tagungsbeiträge : 10. Bremer Bionik-Kongress, Seiten 44-53, DOI: doi.org/10.18154/RWTH-2023-11024.
- (b) Lüdecke, Marvin Peter; Kuhnhenne, Markus; Bernsmann, Jan-Simeon Ludger; Schulte, Joana Lucie; Schleifenbaum, Johannes Henrich; Kamrath, Paul (2024): Additive Manufacturing of 3D Connecting Elements in the Building Industry, in: NORDIC STEEL 2024 : the 15th Nordic Steel Construction Conference, June 26-28, 2024, Luleå, Sweden, Seiten/Artikel-Nr: 1-11, DOI: 10.5281/zenodo.12170801 bzw. 10.18154/RWTH-2024-09983
- (c) Bernsmann, Jan-Simeon; Schleifenbaum, Johannes Henrich (2025): From construction for construction: Additive Manufacturing with gas-atomized recycled steel scrap. Circular Economy 4 (3), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cec.2025.100157>
- (d) Kuhnhenne, Markus; Vontein, Marius; Lüdecke, Marvin; Feldmann, Markus; Voelkel, Justus; Bernsmann, Jan; Schulte, Joana; Schleifenbaum, Johannes Henrich; Bemm, Mathias; Kamrath, Paul (2025): Additiv gefertigte Fassadenhalter für Gebäudehüllen aus Metall. Stahlbau 94, H. 12, S. 771-783, DOI: <https://doi.org/10.1002/stab.70065>

Vorträge:

- (a) Schulte, Joana (2023): Mit additiver Fertigung und Bionik zu mehr Nachhaltigkeit im Bauwesen, bei: 10. Bionik-Kongress "Patente aus der Natur", Bremen, 12.05.2023-13.05.2023, DOI: doi.org/10.18154/RWTH-2023-11010.
- (b) Lüdecke, Marvin Peter (2024): Additive Manufacturing of 3D Connecting Elements in the Building Industry, bei: NORDIC STEEL 2024 : the 15th Nordic Steel Construction Conference
- (c) Laser Melting Innovations GmbH: Vortrag zur Projektvorstellung im Rahmen des "Netzwerk Strahlschmelzen"

Konferenzbesuche:

- (a) 10. Bionik-Kongress "Patente aus der Natur", Bremen, 12.05.2023-13.05.2023. Konferenzveröffentlichung und Vortrag.
- (b) NORDIC STEEL 2024 : the 15th Nordic Steel Construction Conference, Luleå, Sweden, 26.06.2024-28.06.2024. Konferenzveröffentlichung und Vortrag.

Messebesuche:

- (a) Formnext 2023, Internationale Leitmesse für additive Fertigungstechnologien und Meeting Point der Experten für industriellen 3D-Druck und Produktionsprofis einer Vielzahl von Anwendungsbranchen, Messe Frankfurt, 10.11.2023: Messebesuch zum Vernetzen (DAP)
- (b) BAU-Messe 2023, Weltleitmesse für Architektur, Materialien, Systeme, Messe München, 17. bis 22. April 2023: Ausstellung eines Demonstrators zur Veranschaulichung des Recyclings von Baustahl zu Pulver zu neuem additiv gefertigtem Bauteil für die Bauindustrie auf dem Stand des Internationalen Verbands für den Metallleichtbau, IFBS (STB, MLB)

- (c) Formnext 2024, Internationale Leitmesse für additive Fertigungstechnologien und Meeting Point der Experten für industriellen 3D-Druck und Produktionsprofis einer Vielzahl von Anwendungsbranchen, Messe Frankfurt, 19.-22.11.2024: Ausstellung eines Demonstrators zur Veranschaulichung des Recyclings von Baustahl zu Pulver zu neuem additiv gefertigtem Bauteil für die Bauindustrie. (DAP)
- (d) BAU-Messe 2025, Weltleitmesse für Architektur, Materialien, Systeme, Messe München, 13. bis 17. Januar 2025: Ausstellung eines Demonstrators zur Veranschaulichung des Recyclings von Baustahl zu Pulver zu neuem additiv gefertigtem Bauteil für die Bauindustrie auf dem Stand des Internationalen Verbands für den Metallleichtbau, IFBS (STB, MLB)
- (e) Formnext 2025, Internationale Leitmesse für additive Fertigungstechnologien und Meeting Point der Experten für industriellen 3D-Druck und Produktionsprofis einer Vielzahl von Anwendungsbranchen, Messe Frankfurt, 18.-21.11.2025: Ausstellung eines Demonstrators zur Veranschaulichung des Recyclings von Baustahl zu Pulver zu neuem additiv gefertigtem Bauteil für die Bauindustrie. (DAP und LMI)

Seitens LMI ist eine Veröffentlichung der technischen Ergebnisse geplant, sobald weitergeführte belastbare Langzeitergebnisse vorhanden sind.

Literatur

- [1] DIN EN 10025-2:2019-10, Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen_ - Teil_2: Technische Lieferbedingungen für unlegierte Baustähle; Deutsche Fassung EN_10025-2:2019.
- [2] DIN EN 10025-3:2019-10, Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen_ - Teil_3: Technische Lieferbedingungen für normalgeglühte/normalisierend gewalzte schweißgeeignete Feinkornbaustähle; Deutsche Fassung EN_10025-3:2019.
- [3] DIN EN 10025-4:2023-02, Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen_ - Teil_4: Technische Lieferbedingungen für thermomechanisch gewalzte schweißgeeignete Feinkornbaustähle; Deutsche Fassung EN_10025-4:2019+A1:2022.
- [4] DIN EN 10025-6:2020-02, Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen_ - Teil_6: Technische Lieferbedingungen für Flacherzeugnisse aus Stählen mit höherer Streckgrenze im vergüteten Zustand; Deutsche Fassung EN_10025-6:2019.
- [5] DIN EN 1090-2:2024-09, Ausführung von Stahltragwerken und Aluminiumtragwerken_ - Teil_2: Technische Regeln für die Ausführung von Stahltragwerken; Deutsche Fassung EN_1090-2:2018+A1:2024.
- [6] DIN EN 1993-1-1:2025-04, Eurocode_3_ - Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten_ - Teil_1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN_1993-1-1:2022.
- [7] Liu, Z.Y.; Li, C.; Fang, X.Y. et al.: Energy Consumption in Additive Manufacturing of Metal Parts. *In: Procedia Manufacturing* 26 (2018), S. 834-845. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.104>.
- [8] Jackson, M.A.; van Asten, A.; Morrow, J.D. et al.: A Comparison of Energy Consumption in Wire-based and Powder-based Additive-subtractive Manufacturing. *In: Procedia Manufacturing* 5 (2016), S. 989-1005. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2016.08.087>.
- [9] Priarone, P.C.; Ingarao, G.; Di Lorenzo, R. et al.: Influence of Material-Related Aspects of Additive and Subtractive Ti-6Al-4V Manufacturing on Energy Demand and Carbon Dioxide Emissions. *In: Journal of Industrial Ecology* 21 (2017), S1. <https://doi.org/10.1111/jiec.12523>.
- [10] Huang, R.; Riddle, M.; Graziano, D. et al.: Energy and emissions saving potential of additive manufacturing: the case of lightweight aircraft components. *In: Journal of Cleaner Production* 135 (2016), S. 1559-1570. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.04.109>.
- [11] Hauptverband der Deutschen Bauindustrie und WKO Wirtschaftskammer Österreich: BGL Baugeräteliste 2020 – Technisch-wirtschaftliche Baumaschinendaten, Ausgabe 2020. Bauverlag BV GmbH.
- [12] IPCC: 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, 2019 [Zugriff am: 22.02.2026].
- [13] ÖKOBAUDAT: Edelstahlblech, <https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?lang=de&uuid=deae7522-47b9-47a8-b9a3-176db7c250ae&version=20.24.070> [Zugriff am: 27.02.2026].
- [14] ÖKOBAUDAT: Aluminium Profil, https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=3feca796-791b-46d3-8160-95ef243ffb9d&version=20.24.070&stock=OBD_2024_I&lang=en%C2%B0 [Zugriff am: 27.02.2026].
- [15] Lüdecke, M.; Kuhnhenne, M.; Bernsmann, J. et al.: Additive Manufacturing of 3D Connecting Elements in the Building Industry (2024). <https://doi.org/10.5281/zenodo.12170802>.
- [16] Haferkamp, L.; Haudenschild, L.; Spierings, A. et al.: The Influence of Particle Shape, Powder Flowability, and Powder Layer Density on Part Density in Laser Powder Bed Fusion. *In: Metals* 11 (2021), Heft 3, S. 418. <https://doi.org/10.3390/met11030418>.
- [17] Habibnejad-korayem, M.; Zhang, J.; Zou, Y.: Effect of particle size distribution on the flowability of plasma atomized Ti-6Al-4V powders. *In: Powder Technology* 392 (2021), S. 536-543. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.07.026>.

- [18] Klee, L.; Bergs, T.; Brimmers, J. et al.: Pulvercharakterisierung und Parameteroptimierung zur additiven Verzahnungsfertigung mittels LPBF (2022). https://doi.org/10.58134/fh-aachen-rte_2022_003.
- [19] Bartzsch, G.; Scherbring, S.; Richter, J. et al.: Gas atomization of Al-steels. In: Materials Today Communications 34 (2023), S. 105388. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.105388>.
- [20] Karlsson, H.; Nyborg, L.; Berg, S.: Surface chemical analysis of prealloyed water atomised steel powder. In: Powder Metallurgy 48 (2005), Heft 1, S. 51-58. <https://doi.org/10.1179/0032589005X37675>.
- [21] Zhang, Z.; Farrar, R.A.: Influence of Mn and Ni on the microstructure and toughness of C-Mn-Ni weld metals. In: Welding Journal 76 (1997), Heft 5, S. 183.
- [22] Haase, C.; Barrales-Mora, L.A.: From High-Manganese Steels to Advanced High-Entropy Alloys. In: Metals 9 (2019), Heft 7, S. 726. <https://doi.org/10.3390/met9070726>.
- [23] Song, S.; Li, G.; Wu, B. et al.: Effect of Mn Content on the Microstructure and Corrosion Resistance of Duplex Stainless Steels Fabricated by Wire Arc Additive Manufacturing. In: Metals and Materials International (2024). <https://doi.org/10.1007/s12540-024-01842-2>.
- [24] Influence of Mn and Ni on the microstructure and toughness of C-Mn-Ni weld metals, 1997.
- [25] William Hearn: Laser Based Powder Bed Fusion of Plain Carbon and Low-Alloy Steels: Microstructure and Processability – Licentiate thesis, 2021.
- [26] Zhang, Z.; Farrar, R.A.: Influence of Mn and Ni on the microstructure and toughness of C-Mn-Ni weld metals. In: Welding Journal 76 (1997), Heft 5, S. 183.
- [27] Ahmed, N.; Barsoum, I.; Haidemenopoulos, G. et al.: Process parameter selection and optimization of laser powder bed fusion for 316L stainless steel: A review. In: Journal of Manufacturing Processes 75 (2022), S. 415-434. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.12.064>.
- [28] Tucho, W.M.; Lysne, V.H.; Austbø, H. et al.: Investigation of effects of process parameters on microstructure and hardness of SLM manufactured SS316L. In: Journal of Alloys and Compounds 740 (2018), S. 910-925. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.01.098>.
- [29] Kamath, C.; El-dasher, B.; Gallegos, G.F. et al.: Density of additively-manufactured, 316L SS parts using laser powder-bed fusion at powers up to 400 W. In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 74 (2014), 1-4, S. 65-78. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-5954-9>.
- [30] Cherry, J.A.; Davies, H.M.; Mehmood, S. et al.: Investigation into the effect of process parameters on microstructural and physical properties of 316L stainless steel parts by selective laser melting. In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 76 (2015), 5-8, S. 869-879. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6297-2>.
- [31] Liverani, E.; Toschi, S.; Ceschini, L. et al.: Effect of selective laser melting (SLM) process parameters on microstructure and mechanical properties of 316L austenitic stainless steel. In: Journal of Materials Processing Technology 249 (2017), S. 255-263. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.05.042>.
- [32] Larimian, T.; Kannan, M.; Grzesiak, D. et al.: Effect of energy density and scanning strategy on densification, microstructure and mechanical properties of 316L stainless steel processed via selective laser melting. In: Materials Science and Engineering: A 770 (2020), S. 138455. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138455>.
- [33] Xu, P.; Yu, B.; Yun, M. et al.: Heat conduction in fractal tree-like branched networks. In: International Journal of Heat and Mass Transfer 49 (2006), 19-20, S. 3746-3751. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.01.033>.
- [34] Schulte, J.L.; Schleifenbaum, J.H.: Improving Sustainability in the Building Industry using Biomimetics and Additive Manufacturing. In: : Bionik: Patente aus der Natur: Innovations- und Nachhaltigkeitspotenziale für Technologieanwendungen : Tagungsbeiträge : 10. Bremer Bionik-Kongress, 2023, S. 44-53.
- [35] Grube, R.; Landskröner, S.: Der SIGMA-Knoten - eine biegesteife Steckverbindung. In: Stahlbau 70 (2001), Heft 3, S. 165-170. <https://doi.org/10.1002/stab.200100630>.

- [36] DIN EN 1993-1-10:2010-12, Eurocode_3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten_ - Teil_1-10:
Stahlsortenauswahl im Hinblick auf Bruchzähigkeit und Eigenschaften in Dickenrichtung; Deutsche Fassung
EN_1993-1-10:2005_+ AC:2009.
- [37] DIN EN ISO 148-1:2017-05, Metallische Werkstoffe_ - Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy_ - Teil_1:
Prüfverfahren (ISO_148-1:2016); Deutsche Fassung EN_ISO_148-1:2016.