

Schlussbericht

zum durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWE)

im Rahmen des Technologietransfer-Programms Leichtbau (TTP LB)

geförderten Projekt

BambusFAB – Fertigungsanlage für die Automatisierte Bambusrohrverarbeitung

mit Laufzeit vom 01.06.2022 bis 31.05.2025



Verbundpartner

Institut für angewandte Automation und Mechatronik, FH Aachen (Fkz. 03LB3073A)
Goethestraße 1, 52064 Aachen

Heinen Automation GmbH & Co. KG (Fkz. 03LB3073C)
Am Handwerkerzentrum 1, Innovationszentrum A10 (HIMO), 52156 Monschau

ILA_5150 GmbH (Fkz. 03LB3073E)
Rotter Bruch 26a, 52068 Aachen

Institut für werkzeuglose Fertigung GmbH (Fkz. 03LB3073B)
Campus Boulevard 79, 52074 Aachen

EnDePro GmbH (Fkz. 03LB3073D)
Redwitzer Str. 33, 96257 Redwitz

Assoziierte Partner

Clean-Lasersysteme GmbH
LaVa-X GmbH
my Boo GmbH

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Danksagung

Die Verbundpartner danken dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie sowie dem Projektträger Jülich für die Förderung und Betreuung des Vorhabens. Weiterhin danken die Verbundpartner den assoziierten Partnern Clean-Lasersysteme GmbH, LaVa-X GmbH und my Boo GmbH für das Einbringen Ihres Know-hows, das Bereitstellen ihrer Technika und das Durchführen von Stichversuchen.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	2
Abkürzungsverzeichnis	4
1 Kurzdarstellung	5
1.1 Aufgabenstellung	5
1.2 Voraussetzungen	6
1.3 Planung und Ablauf	8
1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand	11
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	13
2 Eingehende Darstellung	14
2.1 Erzielte Ergebnisse	14
2.1.1 Anforderungserhebung und Use Case Definition (AP 1)	14
2.1.2 100%-Prüfung von Bambusrohren (AP 2)	15
2.1.3 Leichtbaugerechte Klebmuffe (AP 3)	35
2.1.4 Universelle koppelbare Fertigungszellen (AP 4)	87
2.1.5 Test Use Case und Evaluierung (AP 5)	103
2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	110
2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	111
2.4 Verwertungsplan	112
2.5 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	113
2.6 Veröffentlichungen	114
Bildverzeichnis	116
Tabellenverzeichnis	119
Literaturverzeichnis	120
Anhang A1 - Berechnung des THG-Minderungspotenzials	122

Abkürzungsverzeichnis

AM	Additive Fertigung
AP	Arbeitspaket
cleanLASER	Clean-Lasersysteme GmbH
CO ₂ Äq	CO ₂ -Äquivalente
DLP	Digital Light Processing
EnDePro	EnDePro GmbH
Fkz.	Förderkennzeichen
FLM	Fused Layer Modeling
Heinen Automation	Heinen Automation GmbH & Co. KG
HMI	Human Machine Interface
IaAM	Institut für angewandte Automation und Mechatronik, FH Aachen
ID	Identifikation
ILA_5150	ILA_5150 GmbH
IPC	Industrie-PC
LaVa	Laserschweißen im Vakuum
LaVa-X	LaVa-X GmbH
LPBF	Laser Powder Bed Fusion
MJF	Multijetfusion
MJM	Multijet Modeling
MQTT	Message Queueing Telemetry Transport
my Boo	my Boo GmbH
NoSQL	Not only Structured Query Language
OBV	Oberflächenbehandlungsverfahren
SLA	Stereolithografie
SLS	Selective Laser Sintering
SNR	Signal-Rausch-Verhältnis
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
SQL	Structured Query Language
THG	Treibhausgas
TPC	Thermoplastischer Copolyester
TPU	Thermoplastisches Polyurethan
TRL	Technology Readiness Level

1 Kurzdarstellung

1.1 Aufgabenstellung

Ziel des Vorhabens ist es, Bambusrohr als nachwachsenden Leichtbauwerkstoff industriell nutzbar zu machen. Statt wie bisher in aufwendigen, manuellen Verfahren wird **Bambusrohr** im Projekt in einer **modularen Prozesskette** erstmals **automatisiert verarbeitet** (Bild 1). Eine durchgehende Qualitätsüberwachung hebt die Fertigung auf ein industrielles Niveau. Eine neuartige Verbindungstechnologie ermöglicht eine schnelle, kostengünstige Fertigung und erste Skaleneffekte.



Bild 1: Kombination der Vorteile manueller und konventioneller Fertigungsverfahren für Bambusrohr

Konkrete **Anwendungen** sind ein Bambuskinderwagengestell und ein Bambusfahrradrahmen. Die erfolgreiche Umsetzung steht exemplarisch für viele weitere Anwendungen, die sich perspektivisch ökonomisch-ökologisch-technisch konkurrenzfähig aus Bambusrohr fertigen lassen, etwa Rollatoren, Lastenräder oder auch Möbel, Baugerüste und Kleinbauten.

Der material- und gewichtsminimierende Einsatz von Bambusrohr in langlebigen Produkten führt zur **Reduzierung von Treibhausgas (THG)-Emissionen**. Exemplarisch kann in Anlehnung an die Normenreihe ISO 14060, insbesondere ISO 14067, der partielle Carbon Footprint für einen in Deutschland produzierten Fahrradrahmen abgeschätzt werden (Bild 2). Unsichere Eingangsgrößen werden sehr konservativ angenommen, etwa wird Bambusrohr aus China, aber Metall aus Deutschland betrachtet. Zwischenergebnisse und detaillierte Erläuterungen sind in Anhang A1 aufgeführt.

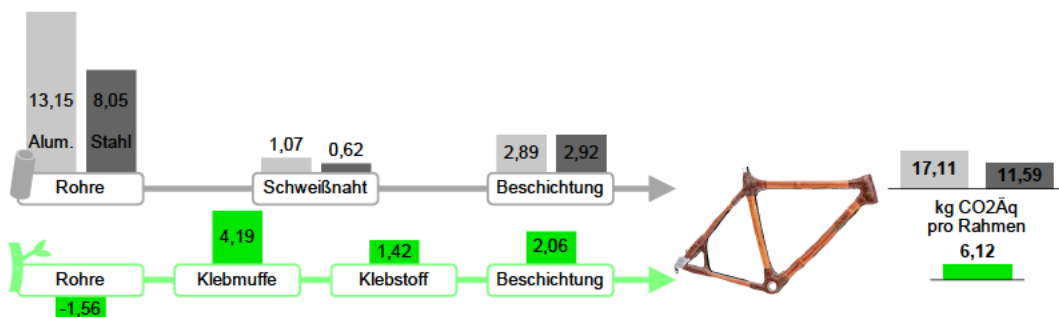


Bild 2: Partiieller Carbon Footprint von Aluminium-, Stahl- und Bambusrahmen

Durch die Substitution von Aluminium – dem häufigsten Rahmenwerkstoff von Fahrrädern – lassen sich die THG-Emissionen **um 64 % reduzieren**. Auf dem europäischen Markt erzeugt die Etablierung von Bambusfahrrädern und -kinderwagen, für die hier von einem vergleichbaren Herstellungsprozess ausgegangen wird, kurzfristig eine Einsparung von über zehntausend Tonnen CO₂-Äquivalenten (CO₂Äq) pro Jahr (Tabelle 1). Langfristig werden weitaus mehr Anwendungsgebiete für Bambusrohr erschlossen. Stellvertretend seien hier Metallrohre sowie -profile (Außendurchmesser bis 150 mm) betrachtet, für die sich THG-Emissionen in Millionenhöhe einsparen lassen.

Tabelle 1: Kurz- und langfristiges THG-Minderungspotenzial pro Jahr

kurzfristig		Fahrradrahmen	Kinderwagengestell
	THG-Einsparung je Stk (gegenüber Aluminium)	-10,99 kg CO ₂ Äq	-3,51 kg CO ₂ Äq
	Verkauft 2019 (Europa) [BEC-20]	20 Mio. Stk	4 Mio. Stk
	Jährliches THG-Einsparpotenzial (5 % Marktanteil)	-11.000 t CO₂Äq	-700 t CO₂Äq

langfristig		Rohre & Profile (Aluminium)	Rohre & Profile (Stahl)
	THG-Einsparung je t	-3,30 t CO ₂ Äq	-1,45 t CO ₂ Äq
	Produziert 2018 (Welt) [GDA-20], [GDA-21], [WSA-20]	9.600.000 t	180.000.000 t
	Jährliches THG-Einsparpotenzial (20 % Marktanteil)	-6.300.000 t CO₂Äq	-52.000.000 t CO₂Äq

1.2 Voraussetzungen

Für das Vorhaben kann am **IaAM** auf die Ergebnisse abgeschlossener Forschungsprojekte zurückgegriffen. Hier wurden wichtige Vorarbeiten zur Prüfung und Verbindung von Bambusrohren sowie zur Einbindung adaptiver Robotersysteme in die industrielle Produktion entwickelt. Zum Prüfen jedes Bambusrohrs wird das individuelle Verformungsverhalten in einem zerstörungsfreien 4-Punkt-Biegeversuch abgebildet. Die Biegelinie wird berührungslos durch optische Messtechnik ausgewertet. Aus der Differenz wird mit dem elastischen Stoffgesetz, lokal aufgelöst, die Biegesteifigkeit des Bambusrohrs bestimmt, eine essenzielle Kenngröße bei der Konstruktion von Rahmen- und Fachwerken. Zusätzlich wird ein digitales 3D-Modell der Außenkontur im unbelasteten Zustand erstellt (Bild 3).

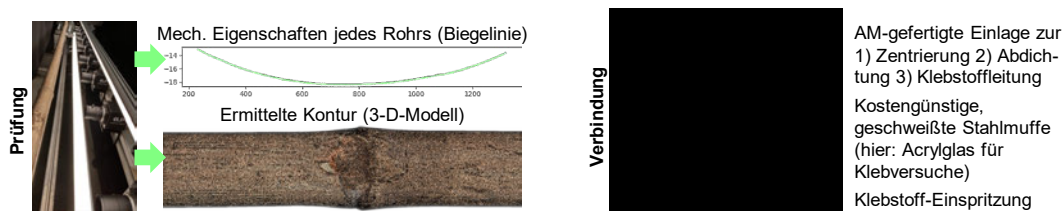


Bild 3: Vorarbeiten bei den Schlüsselinnovationen Prüfung, Verbindung und adaptive Manipulation

Die Verbindung der Bambusrohre soll leicht und klein sein sowie eine hohe Belastbarkeit und Steifigkeit aufweisen. Auf Basis einer umfangreichen Literatur-, Patent- und Marktrecherche wurden in [WIN-19] 21 neue Verbindungslösungen erarbeitet, prototypisch umgesetzt und in über 90 Versuchsvarianten analysiert. Hierbei zeigten sich für eine klebschlüssige Kraftübertragung auf die hochfesten Außenfasern sehr gute Ergebnisse. Das Bambusrohr wird dazu in eine Muffe

eingesetzt und der entstehende Spalt mit Klebstoff gefüllt. [REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED] Übliche Rundheitsabweichungen im Durchmesser liegen bei den verwendeten Bambusrohren lediglich bei $\pm 1 \%$ bis $\pm 6 \%$.

Heinen Automation ist seit über 25 Jahren in der Industrieautomation tätig. Die Kernkompetenzen liegen in der Automatisierungstechnik sowie der Konstruktion und Fertigung von Sondermaschinen. Das Know-how von Heinen Automation reicht von der Idee über Prototypen, der Konstruktion und Fertigung bis hin zur Inbetriebnahme. Zudem hat Heinen Automation bereits Erfahrung im Bereich der Automatisierung in der Holzindustrie gesammelt. Hier werden Anlagen zum Handling von Holz programmiert und in Betrieb genommen. Konkrete Anwendungen erstrecken sich von der Rundholzplatzmechanisierung über die Brennholzverarbeitung bis zur Sägewerkstechnologie, welche sich zum Teil auf die Verarbeitung von Bambusrohr übertragen lassen.

Die **ILA_5150** GmbH – zusammen mit der ILA GmbH – besitzt über 25 Jahre Erfahrung in der Entwicklung, dem Einsatz und dem Vertrieb laseroptischer Messtechnik. Die Bildverarbeitung von hochauflösenden Kamerasystemen in Verbindung mit der Korrelationsanalyse [NAK-16] ist Schwerpunkt der Entwicklungstätigkeiten und Kernkompetenz der ILA_5150 GmbH. Weiterhin hat die ILA_5150 in den letzten fünf Jahren durch den Einsatz von kollaborativer Industrierobotik bei der Automatisierung von lasermesstechnischen Anlagen [MIC-18] erheblich zur einfachen, benutzerorientierten Anwendung von komplexen lasermesstechnischen Aufgabenstellungen beigetragen. Anlagen, die sonst nur von ausgewiesenen Experten bedient werden konnten, sind jetzt durch weitgehend automatisierte Routinen – auch durch Unterstützung von maschinellen Lernverfahren – nach relativ geringer Einarbeitungszeit nutzbar.

Die **IwF** GmbH unterstützt Kunden seit 2010 bei allen Fragen im Bereich der additiven Fertigung (AM). Dies umfasst sowohl Konstruktionsoptimierungen, Neu-Konzeptionierungen bis hin zu fertigen Produkten als auch die Integration von AM-Anlagen in bestehende Prozessketten. Typische Anwendungsbranchen erstrecken sich von der Medizintechnik, über die Luft- und Raumfahrt und Lebensmittelindustrie bis hin zur Automobilindustrie. Die IwF GmbH verfügt über FuE-Expertise im Kunststoff- und Metallbereich, wobei die bisherigen Arbeiten überwiegend das Fügen von artgleichen, metallischen Komponenten fokussiert haben. Dennoch können die vorhandenen Erkenntnisse auch auf das vorliegende Projekt übertragen werden. Wichtig für die erfolgreiche Durchführung des Vorhabens ist außerdem die ausgeprägte Konstruktionserfahrung für AM-gerechte Bauteile der IwF GmbH.

Die **EnDePro** GmbH entwickelt seit ihrer Gründung im Jahr 2005 innovative Kinderwagen. Durch die langjährige Partnerschaft mit der Firma Gesslein ist EnDePro sehr gut mit dem Kinderwagenmarkt sowie mit aktuellen Trends, zielführenden Marketingstrategien, Sicherheitsanforderungen, Fertigungsverfahren und Werkstoffen für Kinderwagen vertraut. EnDePro bringt ein breites

Know-how für die Konstruktion des Bambuskinderwagens in das Vorhaben ein. Wesentliche Funktionen und Gestaltungsmöglichkeiten von modernen Kinderwagen werden im Bambuskinderwagen gezielt eingesetzt.

1.3 Planung und Ablauf

Um das Potenzial von Bambusrohr in der Industrie zu nutzen, müssen die Probleme der zeitintensiven Füge- und Verarbeitungsprozesse sowie der unzureichenden Qualitätssicherung überwunden werden. So können Bambusbauweisen wesentlich schlanker und kostengünstiger umgesetzt werden. Vor allem aber werden herkömmliche Materialien weitreichend substituiert und hochbeanspruchte Konsumgüter mit stark verringerter CO₂-Bilanz wettbewerbsfähig hergestellt. Dazu sind drei wesentliche **Schlüsselinnovationen** nötig (Bild 4):

1. Eine **zerstörungsfreie, 100%ige Eingangsprüfung** jedes Bambusrohrs zur schnellen, automatisierten Ermittlung der individuellen geometrischen und mechanischen Eigenschaften,
2. eine **leichtbaugerechte Verbindung**, welche die unregelmäßige Außenkontur toleriert und einen schnellen, einfachen, automatisierten Fügevorgang ermöglicht,
3. eine **adaptive Manipulation** der individuellen Bambusrohre mittels Industrierobotik zur Integration in eine **modulare, koppelbare automatisierte Fertigungskette**.

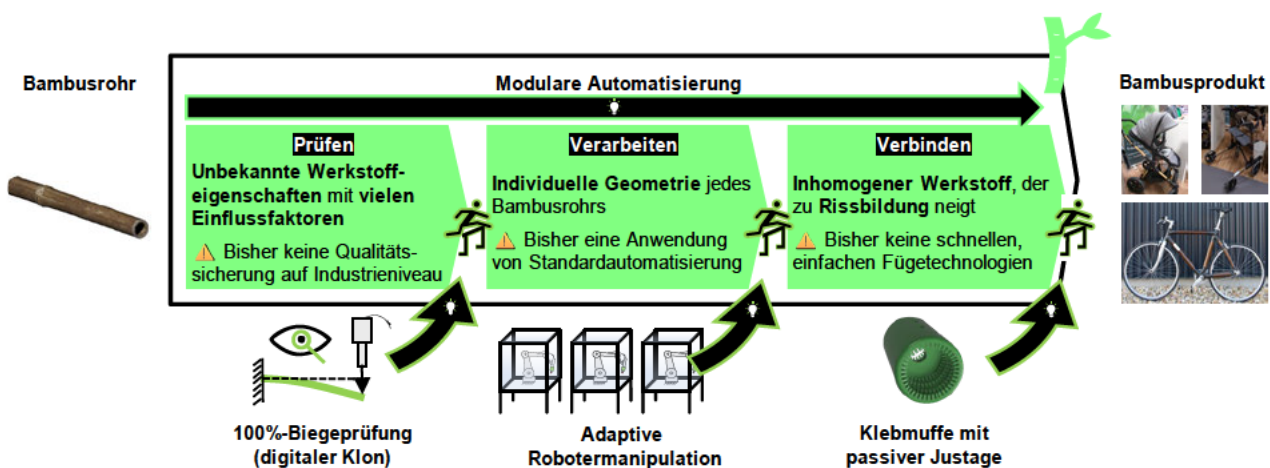


Bild 4: Erforderliche Innovationen zur Übertragung von Automatisierungslösungen auf Bambusrohr

Die einzelnen Schlüsselinnovationen werden in ein koppelbares **modulares Automatisierungskonzept** eingebettet. Hierzu wird je eine Fertigungszelle zum Prüfen, Verarbeiten und Fügen entwickelt und aufgebaut. Die modularen Fertigungszellen lassen sich mit Hilfe universeller Handlingsysteme (Vorrat, Transport) leicht zu einer Fertigungsanlage konfigurieren, können aber ebenso gut unabhängig voneinander eingesetzt werden (Bild 5). Auch die Kommunikation

räumlich entfernter Module ist möglich, was den Aufbau dezentraler Fertigungsketten begünstigt. Das Konzept ist einfach skalierbar und sehr flexibel. Das ermöglicht eine Kombination aus automatisierter und manueller Fertigung.

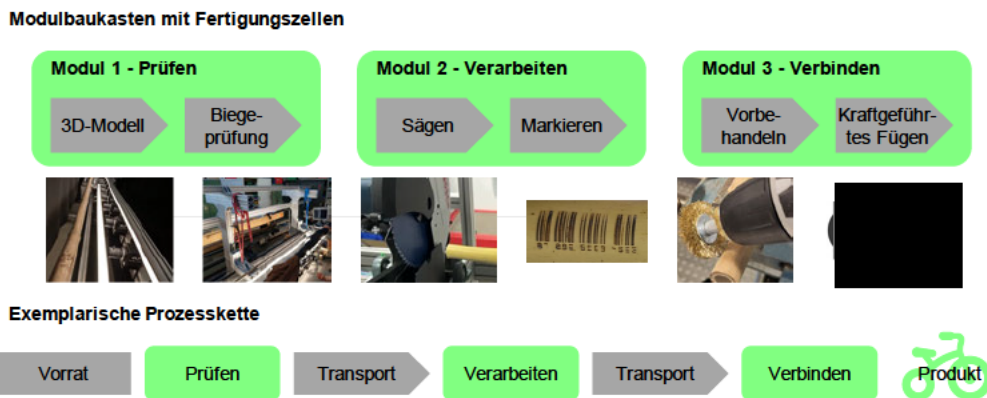


Bild 5: Fertigungszellen und Zusammenstellung zu einer Prozesskette (Fertigungsebene)

Parallel zur **Fertigungsebene** der Prozesskette werden im Hintergrund die Informationen aus der Bambusrohrprüfung gesammelt, aufbereitet und ausgewertet. Dies geschieht auf der **Datenebene**. Hier werden für jedes Bambusrohr die Steifigkeitsinformationen aus dem Biegeversuch mit dem 3D-Modell verknüpft (digitaler Klon). Die digitalen Klone werden kategorisiert, um dann von Modul 2 weiterverarbeitet zu werden (Bild 6).



Bild 6: Modul 1 - Prüfen

Die digitalen Klone werden einem geeigneten Einbauort im Endprodukt zugewiesen und mit einer effizienten Schnittplanung versehen. Entsprechend der Schnittplanung werden Rohrstücke aus den Bambusrohren gesägt, für die eine individuelle Bewegungsplanung durchgeführt wird (Bild 7).

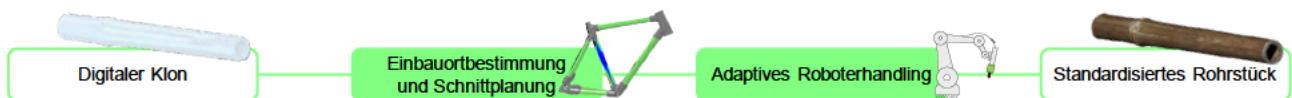


Bild 7: Modul 2 - Verarbeiten

Die aus dem digitalen Klon gewonnenen Geometriedaten werden zur individuellen Beurteilung der Fügestelle des Bambusrohrs verwendet. Dementsprechend erfolgt die Auswahl einer passenden Klebmuffe (Bild 8). Alternativ kann für jede Fügestelle eine individuelle Klebmuffe gefertigt werden.

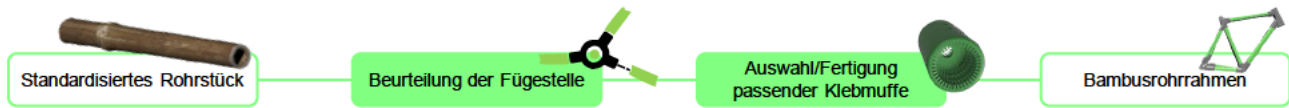


Bild 8: Modul 3 - Verbinden

Das Prüfen der Bambusrohre wird im Projektverlauf vom **Technologiereifegrad** (TRL, für engl. Technology Readiness Level) 4 auf TRL 5 (4 → 5) angehoben. Die Verbindung erreicht TRL 6 (4 → 6) und wird unter realen Bedingungen im Fahrradrahmen und Kinderwagengestell eingesetzt. Die robotergestützte adaptive Manipulation erreicht TRL 6 (4 → 6).

Die geplanten **Arbeitsschwerpunkte und Aufgabenverteilung** im Transferprojekt beruhen auf der Expertise der beteiligten Partner und lassen sich in drei Hauptphasen gliedern (Bild 9).

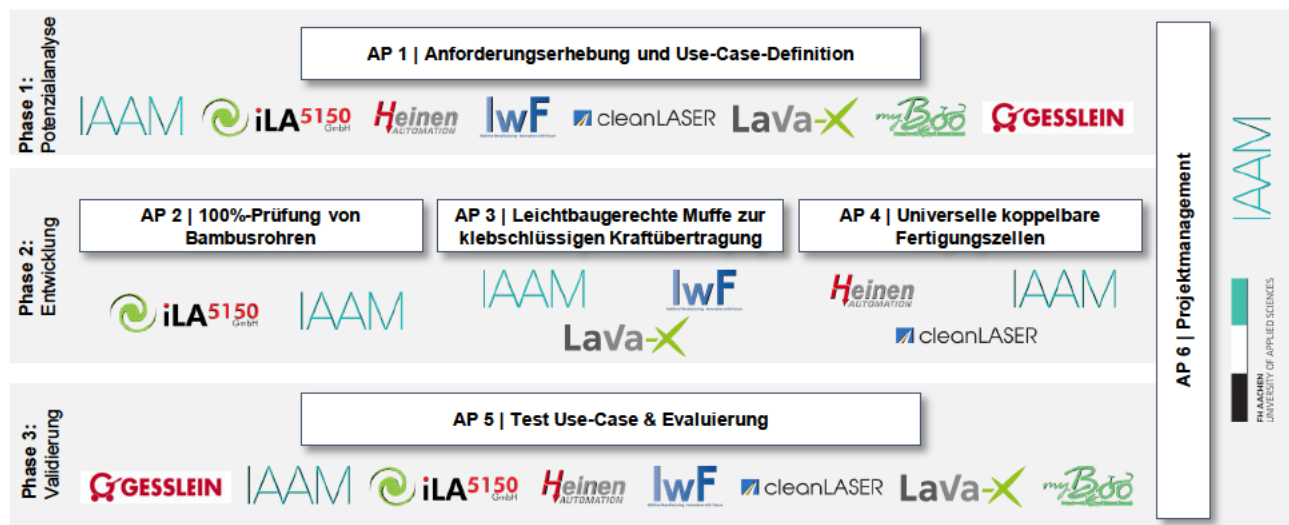


Bild 9: Entwicklungsprozess und Arbeitsgruppen im Vorhaben

Das **IaAM** entwickelt in enger Abstimmung mit den Partnern Prozesse zum Digitalisieren, Fügen und Manipulieren der Bambusrohre. Beim Digitalisieren werden die Geometrie und die Steifigkeitsinformationen des individuellen Bambusrohrs für die Einbauort- und Schnittplanung des Bambusrohrs genutzt. Zum Fügen führt das IaAM die konstruktive Optimierung sowie die Evaluierung entsprechender Klebstoffe und Vorbehandlungsmethoden zur Maximierung des Stoffschlusses durch. Für die Prozessschritte Verarbeiten und Verbinden wird je ein Prototypmodul mit Hilfe eines Knickarmroboters umgesetzt, welcher die Bambusrohre manipuliert. Das automatisierte Fügen der Bambusrohre mit der entwickelten Fügemethode (Klebmuffe) erfolgt unter Einbeziehung der Krafrückkopplung des Roboters in der Fertigungszelle „Fügen“ (Fügezelle).

Heinen Automation entwickelt im Rahmen des Vorhabens ein modulares Automatisierungskonzept auf Basis einer konvertierbaren universellen Fertigungszelle (TRL 6). Durch die angestrebte Modularität lässt sich ein flexibles Zellenkonzept realisieren, welches auf die kundenspezifischen Anforderungen hinsichtlich Platzbedarf und Variabilität angepasst werden kann. Neben

der dezentralen Steuerungsarchitektur gehört hierzu ein Mensch-Maschine-Interface in Form einer flexiblen skalierbaren Bedienoberfläche. Entsprechende Schnittstellen ermöglichen eine ortsunabhängige Kommunikation der einzelnen Fertigungszellen untereinander über eine zentrale Datenbank. Außerdem entwickelt die Firma Heinen Automation die Fertigungszellen „Verarbeiten“ (Sägezelle).

Die **ILA_5150** entwickelt ein umfangreiches Prüfsystem, welches aus speziell aufeinander abgestimmten Aktuatoren- und Optikkomponenten besteht und die Erfassung der Biegelinie sowie der Außenkontur von Bambusrohren mit geringen Unsicherheiten ermöglicht. Hierbei dienen spezielle Beleuchtungsmethoden, wie die Nutzung von strukturiertem Licht, hochauflösende Kamerasysteme (26MP), präzise Korrelationsverfahren und spezifische Lasersensorik zur Generierung der Berechnungsdaten. Hierbei soll eine 100%-Prüfung aller Bambusrohre einer Charge erfolgen, das heißt jedes Bambusrohrs wird messtechnisch erfasst. Das Ergebnis ist das erste automatisierte Prüfsystem für die Bambusrohrverarbeitung.

Das **IwF** entwickelt geeignet Fertigungsprozesse für die Serienproduktion von Bambusrohrverbindern. Zusätzlich untersucht das IwF gemeinsam mit dem IaAM die Fertigung individueller, rohrspezifischer Bambusrohrverbinder. Das Konstruktionsmodell wird entsprechend parametrisiert und für die konkreten Belastungen im Anwendungsgebiet angepasst, bei minimiertem Materialeinsatz. Für die individuelle Fertigung kommen, in Abhängigkeit der mechanisch-technologischen Anforderungen an das Bauteil, unterschiedliche additive Fertigungstechnologien zum Einsatz, um eine flexible Einzelteilerfertigung zu ermöglichen. So werden innovative Möglichkeiten hinsichtlich Ressourceneffizienz und Passform realisiert. Der geringere Materialeinsatz sowie die Produktion direkt beim Endverbraucher senken direkte Treibhausgasemissionen.

EnDePro entwickelt im Vorhaben erstmals einen Kinderwagen, der auf einem automatisiert gefertigten Gestell aus Bambusrohr basiert und modernen Designansprüchen gerecht wird. Gegenüber Kinderwagen mit Aluminiumgestell entsteht so ein ökologisch weitaus nachhaltigerer, marktfähiger Kinderwagen. Ausgehend von den am IaAM gestalteten Bambusrohrverbindern entwickelt EnDePro ein leichtes, bambusgerechtes Gestell, das über alle gängigen Funktionen von Kinderwagen verfügt und den europäischen Normvorgaben entspricht. Es entstehen mehrere Prototypen des Bambuskinderwagens, der sich am Ende des Vorhabens mit Hilfe der automatisierten Fertigungsanlage herstellen lässt.

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Bambusrohr bietet herausragende mechanische Eigenschaften, wie sehr große Zug- und Biegefestigkeiten sowie eine hohe Steifigkeit, bei einem geringen Gewicht. Neben seiner durch Knoten verstärkten Rohrgeometrie besitzt Bambusrohr im äußeren Durchmesserbereich angehäufte Zugfasern, welche in eine druckfeste Matrix eingebettet sind [GRO-74], [JAN-81]. Die schädlingresistente Pflanze wächst mit geringen Bodenansprüchen traditionell von Südostasien über

Indien und Afrika bis nach Südamerika und wird zunehmend auch in Europa angepflanzt [SUN-09], [VAN-15]. Bambus ist eine der am schnellsten wachsenden Pflanzen der Welt (bis zu 1 Meter am Tag) und bereits ab 3 Jahren mit den angestrebten mechanischen Eigenschaften erntereif [ABD-12], [INO-08]. Das Potenzial als umweltschonender Leichtbauwerkstoff zeigt sich in seiner Effizienz: Das Verhältnis von Biegefestigkeit zu Dichte übersteigt selbst das von Aluminium, für dessen Herstellung je Kilogramm etwa die 60-fache Energiemenge wie für Bambus benötigt wird [VOG-20].

Für die **technische Anwendung von Bambusrohr** eignen sich besonders Rahmen und Fachwerke, die aus stabförmigen Elementen bestehen. Prominente Beispiele, wie Fahrräder, Baugerüste und Häuser, werden weltweit in kleinen Losgrößen manuell hergestellt und beweisen teils seit Jahrhunderten ihre Zuverlässigkeit im praktischen Einsatz (Bild 10). Die etablierten Verfahren erfordern kaum Investitionen in Anlagen oder Infrastruktur und sind mit einfachen Werkzeugen umsetzbar.

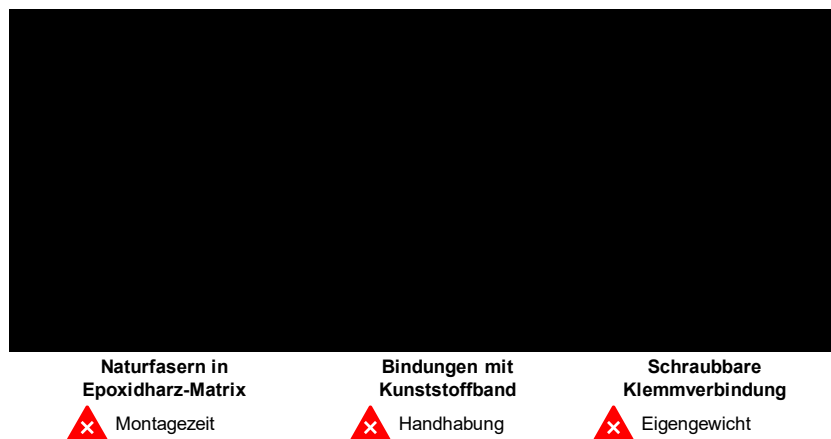


Bild 10: Technische Anwendungen von Bambusrohr

Es zeigen sich jedoch zwei wesentliche **Schwachpunkte der manuellen Fertigung**. Erstens sind die Verbindungsstellen deutlich überdimensioniert (Volumen und Masse). Grund dafür sind die unbekanntenen, individuellen mechanischen Eigenschaften jedes Bambusrohrs und der Verbindung selbst. Dies lässt bisher weder eine last- und leichtbaugerechte Konstruktion zu noch eine durchgehende Qualitätssicherung des Herstellungsprozesses nach industriell geforderten Standards. Zweitens sind die eingesetzten Verbindungsmethoden sehr zeitintensiv (etwa 80 Stunden Arbeitszeit pro Fahrradrahmen), schlecht automatisierbar oder zu schwer für den Leichtbau [MYB-20]. Dies resultiert vor allem aus der unregelmäßigen Außenkontur, die sich bei jedem Bambusrohr unterscheidet.

Einer wirtschaftlichen Fertigung stehen die zwei genannten **Kernprobleme** gegenüber: **unzureichende Fügemethoden** und **individuelle Materialeigenschaften**. Lösungen zur schnellen, kostengünstigen und zeitgleich strukturellen Kraftübertragung finden sich weder auf dem Markt noch in Literatur und Patenten. Dies wurde im Rahmen einer umfassenden, aktuellen Recherche bestätigt, in der über 170 Fügelösungen gesichtet und bewertet wurden [WIN-19].

Prüfnormen für Bambusrohr existieren bisher nur in sehr kleinem Umfang. Sie sehen lediglich exemplarische Versuche mit Werkstoffproben vor, die keine sicheren Aussagen zu den individuellen Materialeigenschaften der nicht geprüften Bambusrohre zulassen. Da es sich ausschließlich um zerstörende Prüfungen handelt, sind sie nicht als 100 %-Prüfung in den industriellen Herstellungsprozess integrierbar [ISO 22157]. Für das Verbinden der Bambusrohre sind robotergetriebene Fügeprozesse unter Berücksichtigung der Krafteinwirkung erforderlich („Schlüssel-ins-Schlüsselloch-Problem“). Cobots, also sensitive Manipulatoren, verfügen über entsprechende Kraftsensorik und sind bereits im Markt etabliert. Adaptive Konzepte zur Lösung des „Schlüssel-ins-Schlüsselloch-Problems“ sind umfassend erforscht und kommen bereits stellenweise in der Industrie zur Anwendung [KUK-21].

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die assoziierten Partner cleanLASER, LaVa-X und my Boo stehen für das Projekt mit ihrem langjährigen Know-how in der Oberflächenbehandlung, im Laserstrahlschweißen und in der Herstellung von Bambusfahrradrahmen beratend bereit. **cleanLASER** entwickelt, produziert und implementiert seit 1997 hochpräzise Lasersysteme für die industrielle Oberflächenbearbeitung, etwa im Bereich der Oberflächenreinigung und -aktivierung durch Laserlicht. Im Vorhaben wird die Oberflächenbehandlung von Bambus mittels Laserlicht in Stichversuchen erprobt. Die 2017 gegründete **LaVa-X** GmbH entwickelt produktbezogene Maschinen für das Laserstrahlschweißen im Vakuum (LaVa). Im Vorhaben werden Ergebnisse aus früheren Forschungsprojekten zum Fügen geklebter AM-Bauteile mittels LaVa bereitgestellt, um die Wärmeentwicklung und die Auswirkungen auf die Klebschicht abschätzen zu können. Die 2012 gegründete **my Boo** GmbH entwickelt, fertigt und vertreibt Bambusfahrräder. Im Projekt stellt my Boo seine Erfahrungen rund um die Anforderungen und den manuellen Herstellungsprozess von Bambusrahmen bereit. Weiterhin wird in Zusammenarbeit mit my Boo ein Gravelbike-Rahmen konstruiert, der sich für die Herstellung aus Bambusrohr und Klebmuffen eignet.

2 Eingehende Darstellung

2.1 Erzielte Ergebnisse

Nachfolgend sind die Ergebnisse gegliedert nach den Arbeitspaketen (AP) 1 bis 5 dargestellt.

2.1.1 Anforderungserhebung und Use Case Definition (AP 1)

Zu Beginn des Projekts wird der zu entwickelnde **Bambuskinderwagen** spezifiziert. Beachtet werden müssen die bambusspezifischen Anforderungen, welche für den Kinderwagen relevant und im Gegensatz zu üblichen Aluminiumgestellen neu sind. Hier sind neben den fügetechnischen Herausforderungen etwa die Integrierbarkeit von Bauteilen in die Rohre zu nennen, welche bei herkömmlichen Kinderwagen im großen Stil genutzt wird. Der entwickelte Kinderwagen entspricht den Normvorgaben nach DIN EN 71 sowie DIN EN 1888, erfüllt alle gängigen Funktionen marktüblicher Kinderwagen (Faltbarkeit, Bremse, Verstellmöglichkeiten usw.) und verfügt über ein vergleichbares geringes Gewicht. Zudem kann der Kinderwagen beziehungsweise Baugruppen des Kinderwagens automatisiert in der Fertigungsanlage montiert werden. Eine diesen Anforderungen entsprechende Gestellgeometrie wird festgelegt (vgl. AP 5.1, Kapitel 2.1.5.1) und die Fertigbarkeit mit allen beteiligten Partnern diskutiert. Wesentliche Einflussgrößen für die Fertigbarkeit sind die geforderten Durchmesser und Längen der Rohrstücke, die für das Kinderwagengestell benötigt werden.

Außerdem wird auf Basis von Konstruktionsdaten der my Boo GmbH eine geeignete Rahmengenometrie eines **Bambus-Gravelbikes** ausgewählt. Auf dieser Grundlage wird eine eigene Rahmengenometrie konstruiert, die mittels additiver Fertigung herstellbare Knotenpunkte enthält (Bild 11).

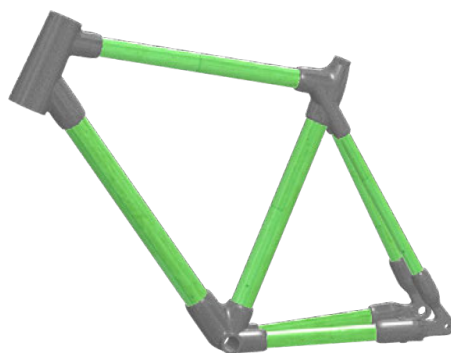


Bild 11: Bambus-Gravelbike-Rahmengenometrie

Neben den Use Cases werden sämtliche **Anforderungen an die Fertigungsanlage** laufend in Arbeitstreffen diskutiert und in einem Anforderungskatalog sowie einem Lastenheft verschriftlicht. Zu Beginn noch undeutliche Zielvorstellungen werden mit den wachsenden Erkenntnissen aus den partnerspezifischen Arbeitspaketen (AP 2 bis 5) laufend nachgeschärft und in beide Dokumente aufgenommen.

Die **technischen Schnittstellen**, die bei der Entwicklung der Fertigungsanlage zwischen den einzelnen Partnern entstehen, werden zunächst im Rahmen eines Konzeptworkshops ausgelotet. Hardware-, Software- und Benutzerschnittstellen werden im weiteren Projektfortgang weiter präzisiert, sobald die nötigen Erkenntnisse hierfür vorliegen. Dies betrifft etwa Bauräume, Befestigungsmethoden, die Leistungsversorgung und physische Datenschnittstellen. Die Projektpartner können sich auf ein ganzheitliches Konzept für die Fertigungsanlage einigen, welches von allen Partnern als durchführbar erachtet wird.

2.1.2 100%-Prüfung von Bambusrohren (AP 2)

2.1.2.1 Berührungslose Bestimmung der Biegelinie (AP 2.1)

Die Bestimmung der Biegelinie des Bambusrohrs ist ein zentraler Punkt des Vorhabens, da nur so die mechanischen Eigenschaften des in die Konstruktion einzupassenden Bambusrohrs bestimmt werden können. Hier existieren mehrere Verfahren, um die Biegesteifigkeit von Halbzeugen in der industriellen Fertigung zu bestimmen. Beim Bambusrohr ist der Innendurchmesser schwer bestimmbar. Da es sich um keinen homogenen Werkstoff handelt, ist hier die Kombination – also das Produkt aus Elastizitätsmodul und Flächenträgheitsmoment – einfacher zu ermitteln. In den Voruntersuchungen wurde bereits der Aufbau eines querkräftfreien 4-Punkt Biegeversuchsstandes validiert und für die industrielle Anwendung bevorzugt.

Aufbau und Prinzip der Biegelinienbestimmung: Zur Bestimmung der Biegesteifigkeit EI wird das Bambusrohr mit einer vorher aufgrund des Durchmessers abgeschätzten Last beaufschlagt, um möglichst eine Durchbiegung zu erzielen, die gut erfassbar, aber auch nicht schädigend für das weiter zu verarbeitende Bambusrohr ist. Diese Kraft wird über einen starren Balken in zwei Teilkräfte zerlegt, die nahe an den Auflagerpunkten des Rohres eingeleitet werden (Bild 12). Kameras, die an der Vorderseite des Versuchsstands angebracht werden, erfassen die Durchbiegung. An den Auflagerpunkten sind 3D-Kraftmessdosen installiert, die alle drei Komponenten der Lagerkräfte erfassen können. Die aufzubringende Last wird durch einen Servo-Pneumatik-Zylinder generiert, der eine Wegregelung besitzt. Dementsprechend wird der Verfahrensweg des Balkens geregelt. Bild 13 zeigt den simulierten Verlauf der Querkraft, des Biegemomentes und der resultierenden Durchbiegung bei einem 4-Punkt-Biegeversuch. Die Durchbiegung wird mit zwei Kameras erfasst, die jeweiligen Teilbereiche wieder kombiniert und der weiteren Verarbeitung zur Verfügung gestellt.

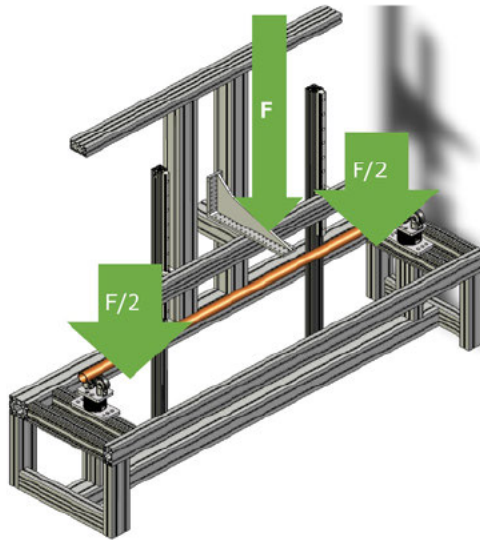


Bild 12: Skizze des Biegeversuchs zur berührungslosen Bestimmung der Biegelinie

Kamerasystem und Maskierung: Im Verlauf des Projektes wird das Kamerasystem, bestehend aus zwei einzelnen Kameras mit einem Spiegelsystem modifiziert, da der Abstand der Kameras zum Bambusrohrmittelpunkt ca. 1,6 m betragen muss, um eine möglichst verzerrungsfreie Abbildung zu gewährleisten. Da das Bambusrohr nur eine geringe Querauslenkung (Durchbiegung) von maximal 30 mm bei einem Durchmesser von ca. 20 mm besitzt – im Anwendungsfall des Kinderwagens - können rechteckige Spiegel eingesetzt werden. Diese erlauben es, die Anlage deutlich kompakter durch rechtwinklige Montage der Kameras zum Bambusrohr auszuliegen.

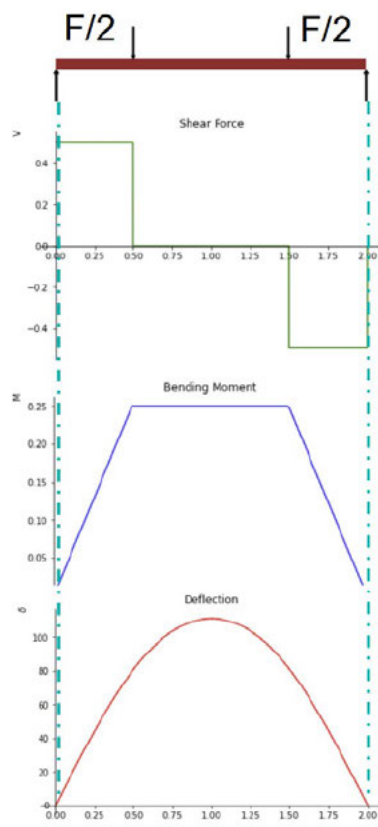
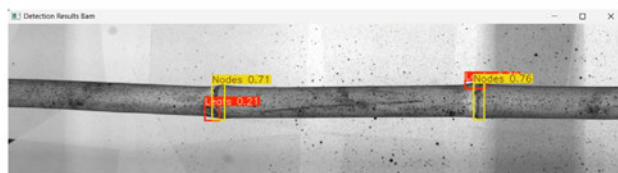


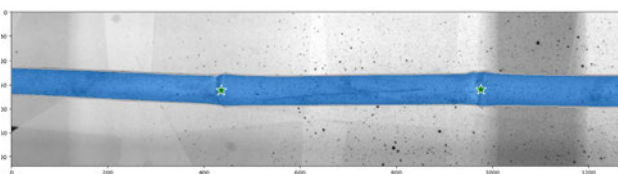
Bild 13: Theoretische Verläufe der physikalischen Größen beim Biegeversuch

Zur Erfassung der Biegelinie wird eine ähnliche Vorgehensweise genutzt, wie in AP 2.2 (Kapitel 2.1.2.2) beschrieben (Charakterisierung des Bambusrohrs durch KI-Nutzung). Das Bild des Bambusrohrs wird durch ein neuronales Netz (YOLOv8) klassifiziert und die Lage der Knoten und der Blattstielkerben werden erzeugt. Die Koordinaten der Knoten dienen zur Maskierung der Innenkontur des Bambusrohrs und damit zur Erfassung der Nulllage des Rohres vor der Biegung. Die Koordinaten werden von dem Maskierungstool SAM2 benutzt, wobei die Analyse des erhältlichen Modells (sam2.1_hiera_large) recht lange dauert (ca. 5 s), jedoch sehr robuste Ergebnisse erzielt. Auch hier wird das Gesamtbild in mehrere Teilbilder zerlegt, da ansonsten die Maskierung nicht ausreichend präzise Pixelkoordinaten produziert (Bild 14).

Bestimmung der Biegelinie: Nach erfolgter Maskierung wird aus der Maske eine Polygonkontur erzeugt, deren Mittellinie durch ein Polygon dritten Grades erzeugt wird. Dabei dienen die Punkte der Kontur als Stützstellen für einen Least-Square-Fit aus der numpy polyfit Bibliothek. Die einzelnen Punkte (Bild 15, blau) der Polylinie werden als Referenz gespeichert und später von der ausgelenkten Kontur subtrahiert. So lassen sich auch Bambusrohre, die bereits eine Krümmung besitzen, robust auswerten. Bild 15 (oben) zeigt ein unbelastetes Bambusrohr, welches eine leichte Krümmung aufweist. Die blauen Punkte stellen Kontrollpunkte dar, deren Verlagerung in Abhängigkeit der Durchbiegung verfolgt wird. Im unteren Bereich ist das durchgebogene Bambusrohr mit den Kontrollpunkten dargestellt. Die Biegelinie ist die euklidische beziehungsweise kartesische Distanz zwischen den Kontrollpunkten. Dargestellt ist nur die Sicht der linken Kamera. Die beiden Biegelinien der linken und rechten Kamera werden abschließend kontinuierlich und krümmungsidentisch verbunden, wie Bild 16 vor der finalen Verbindung zeigt.



Knotenkoordinaten werden zur Beschreibung des Bambusrohrs und zur Generierung von POI für SAM genutzt. Daten → SQL Datenbank
Speed: ~60ms Yolov8



Maskierung durch SAM2 mit POI aus Yolov8
Speed: ~5s SAM2 (!)
SAM und SAM2 recht langsam → Nutzung von Yolov11 Segmentation oder GPU Support

Problem: Aufteilung eines höherauflösenden Gesamtbildes auf 1280x320, da Speicherbegrenzung. Daher bei 2m Bambus in 1mm Auflösung muss Gesamtbild (2560x320) in zwei Einzelbilder zerlegt und nacheinander berechnet werden.

Bild 14: Maskierung des Bambusrohrs zur Bestimmung der Biegelinie

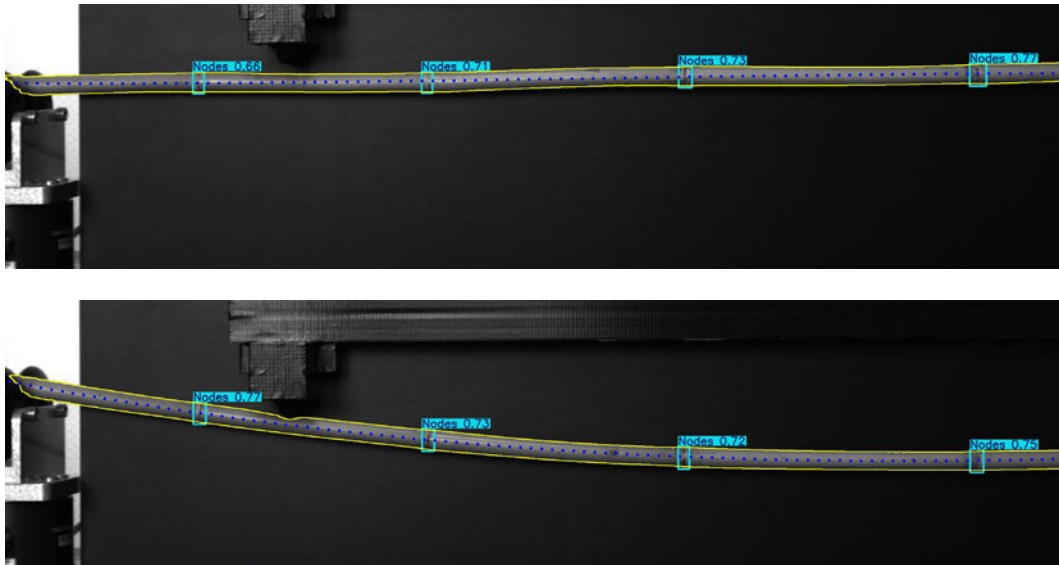


Bild 15: Nulllinie Bambusrohr unbelastet (oben), Bambusrohr belastet mit Durchbiegung (unten)

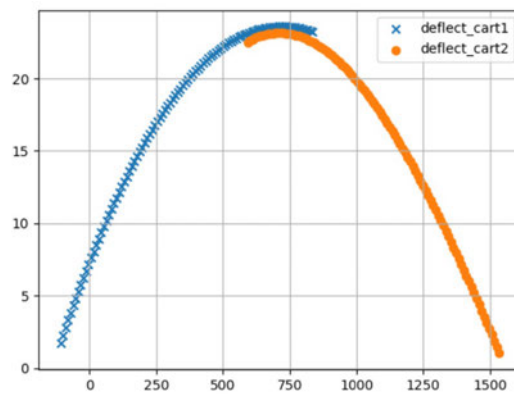


Bild 16: Exemplarischer Verlauf der Biegelinie von linker (blau) und rechter (orange) Kamera

Simulation der erwarteten Durchbiegung: Die Benutzung von Simulationstechniken kann für die experimentelle Bestimmung von physikalischen Größen wichtige Randbedingungen liefern. Im vorliegenden Fall wird die Durchbiegung des Bambusrohrs nach dem Wareneingang mithilfe des in Kapitel 2.1.2.2 beschriebenen KI-gestützten Verfahrens simuliert. Aus der ersten Bildverarbeitung kann die Gesamtlänge des Bambusrohrs, die Anzahl und Lage der Knoten, die Durchmesser und die Anzahl der Blattstielkerben näherungsweise bestimmt werden. Mit dem python package SymBeam kann bereits vor dem Biegeversuch eine Schätzung der Durchbiegung erfolgen, indem die näherungsweise bestimmten Durchmesser und erfassten Segmente mit Erfahrungswerten für die Wandstärken in die Simulation einfließen. So kann eine Abschätzung der benötigten Biegekraft vor dem eigentlichen Biegeversuch erfolgen und eine Validierung der Ergebnisse ist ebenfalls möglich. Bild 17 zeigt eine beispielhafte Simulation von Segmenten mit unterschiedlichen Durchmessern.

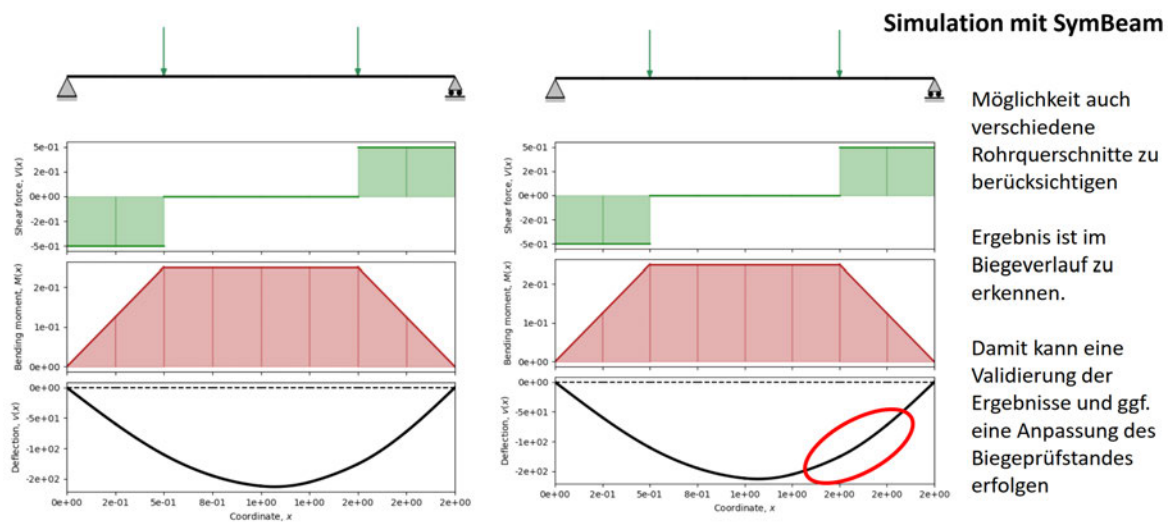


Bild 17: Simulation der Durchbiegung eines Bambusrohrs mit unterschiedlichen Segmenten

2.1.2.2 3D-Rekonstruktion des Bambusrohrs (AP 2.2)

Ein weiterer Forschungs- und Entwicklungsschwerpunkt im Projekt stellt die Erfassung der Geometrie des zu verarbeitenden Bambusrohrs dar. Hier wird besonders die 3D-Rekonstruktion betrachtet, die auf unterschiedliche Weise erfolgen kann. Die Verfahren, die im Rahmen des Projekts zum Einsatz kommen sollen, sind optische Verfahren, die berührungslos und mit relativ hoher örtlicher Auflösung die Geometrie bestimmen. Weitere Anforderungen sind die Geschwindigkeit der Verfahren, die für eine industrielle Anwendung eine geringe Taktzeit ermöglichen sollen und die Robustheit der Messtechnik, um auch in einer industriellen Umgebung – außerhalb des Labors – zuverlässig und rückführbar zu funktionieren. Da die ILA_5150 seit mehr als dreißig Jahren in der Bildverarbeitung Algorithmen u.a. auf Basis von Korrelationsmethoden entwickelt, wird in diesem Projekt der Einsatz eines stereoskopischen Kamerasystems zur 3D Geometriebestimmung auf Korrelationsbasis für Bambusrohre untersucht und eingesetzt. Zusätzlich wird ein kommerzieller 2D-Lasertriangulationssensor zur parallelen Erfassung und Rückführung der Messergebnisse genutzt.

Zur robusten Korrelationsanalyse von Bilddaten müssen sehr hochauflösende Kameras eingesetzt werden, die möglichst rauscharm sind. Hierfür werden 4 sCMOS Kameras der Firma pco (pandas 26 Serie) mit je 26 Megapixel Auflösung für zwei Stereosysteme beschafft und eingesetzt. Da die Geometrie des Bambusrohrs als Objekt mit deutlich längerer Längsausdehnung als Querausdehnung mit einem Stereosystem nicht gänzlich erfasst werden kann, müssen zwei parallel arbeitende Systeme eingesetzt werden.

Aufbau der Prüfwelle

Stereokamerasystem: Die Auswahl der Objektive wird in Abstimmung mit den räumlichen Randbedingungen (Abmessungen der Prüfwelle) getroffen und anhand einzelner Bambusproben hinsichtlich der Bildqualität bewertet. Demnach ist eine bildliche Erfassung eines bis zu 2000 mm

langen Bambusrohrs mit jeweils zwei paarweise angeordneten sCMOS Kameras ohne Traversierung möglich. Für eine exemplarische Bildanalyse mittels Doppelbildkreuzkorrelation werden verschiedene Bambusstabsegmente aufgenommen und die Oberflächenauslenkungen ermittelt. Als Ergebnis weist die Oberflächentextur bei einigen Bambussorten ein ausreichend hohes Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) zur anschließenden Korrelationsanalyse auf. Jedoch besitzen einige Bambussorten auch eine recht homogene Oberflächentextur, sodass nur sinnvolle Korrelationsergebnisse bei Nutzung großer Interrogation Spots (Auswertungsgebiete) von 128x128 Pixeln entstehen. Dies reduziert die örtliche Auflösung und resultiert in einem geometrischen Tiefpassfilter, sodass kleinere Details und Rundungen gedämpft werden.

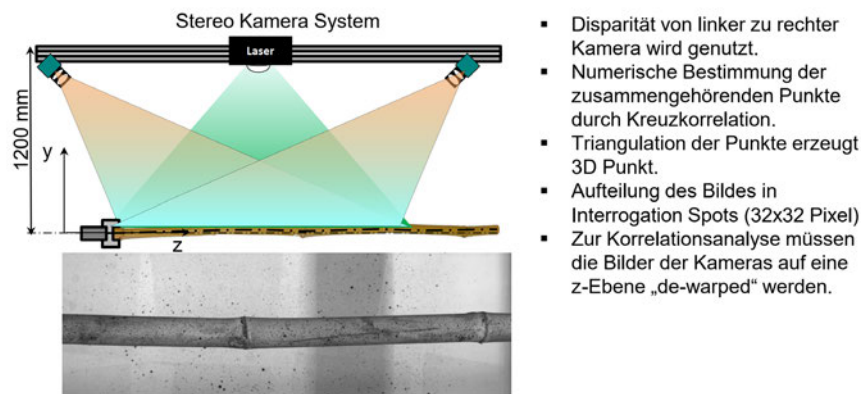


Bild 18: Aufbau des Stereokamerasystems

Die Kalibrierung des Stereosystems wurde mit einem neuartigen Verfahren mittels Charuco-Targets durchgeführt, welches im Rahmen des Projektes implementiert wurde. Das Verfahren zeichnet sich insbesondere durch einen hohen Automatisierungsgrad aus. Während der Untersuchungen zur Kalibrierung stellte sich heraus, dass eine Trennung der Biegezone und der optischen Messzone sinnvoll erscheint, da sowohl immense Lieferverzögerungen bei der Servo-Pneumatik vorherrschten als auch die Robustheit der mechanischen Konstruktion gegenüber Vibrationen durch den Biegevorgang zur Bearbeitungszeit nicht abschätzbar waren.

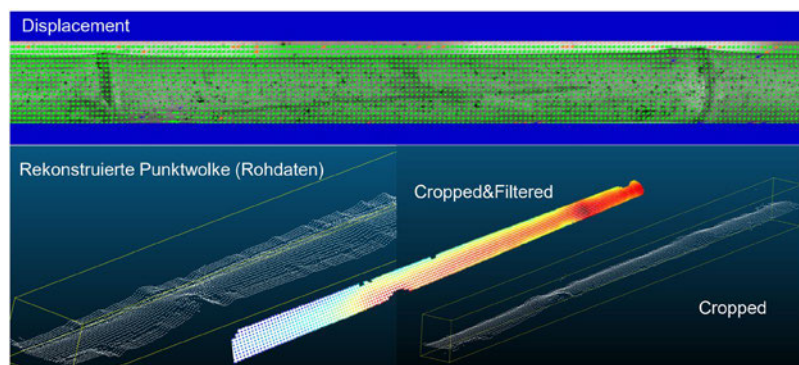


Bild 19: Rekonstruiertes Bambusrohr als Punktwolke

Wie erwähnt weisen nicht alle Bambusrohre eine ausreichend korrelierbare Oberflächenstruktur auf, sodass stochastische Muster auf der Oberfläche zur Erhöhung des SNR der Korrelationsfunktion benutzt werden. Diese Muster lassen sich durch Einfärbung, zum Beispiel durch kleine

Farbtropfen auf der Oberfläche des Bambusrohrs erzeugen. Alternativ können die Muster projiziert werden.

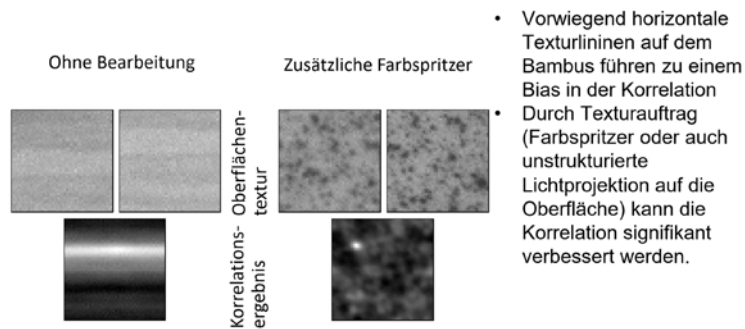
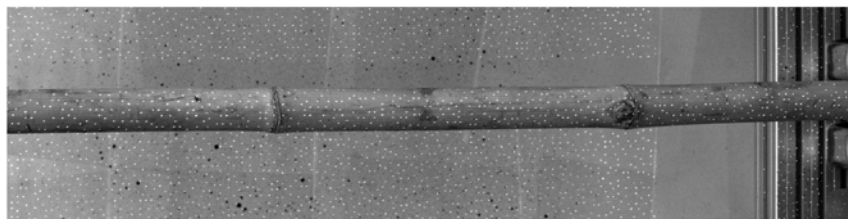


Bild 20: Korrelationsergebnisse bei unbehandelter und behandelter Oberfläche

Um die Bambusoberfläche für die weitere Verarbeitung nicht zu schädigen, wird ein Laserprojektor verwendet, wie die folgende Abbildung zeigt.



- Struktur und Muster der Bambusoberfläche sehr unregelmäßig mit teilweise schlechtem Kontrast
- Aufbringen / Beleuchten der Oberfläche mit einem Laserpunktmuster
- → Kontrast verbessert, ABER: Punktedichte (Auflösung) noch zu gering

Bild 21: Visualisierung des infraroten Projektionsmusters

Lasertriangulationssensor: Zur Ergänzung und zur Überprüfung der 3D-Geometriebestimmung durch das Stereosystem wird ein kommerzieller 2D-Lasertriangulationssensor mit einem Traversiersystem, welches das Bambusrohr bis zu einer Länge von 3 m befahren kann, in den Prüfstand integriert. Die Messabweichung des 2D-Laser-Triangulationssystems wird mit Hilfe von Parallel-Endmaßen auf $U_{95} = 0,05$ mm bestimmt, was dem Zehnfachen der sinnvoll einsetzbaren Unsicherheit des Gesamtsystems entspricht.

Rotation der Bambusrohre: Da sowohl das Stereosystem als auch das 2D-Lasertriangulationssystem nur die Oberfläche des Bambusrohrs mit einem Erfassungswinkel von ca. 120° aus einer Ansicht generieren kann, muss das Bambusrohr aus weiteren Winkeln erfasst und dabei zum Beispiel gedreht werden. Durch zusätzliche Sensoren könnte die Rotation entfallen, jedoch würde hier die Wirtschaftlichkeit stark reduziert werden. Außerdem wurden nur Mittel für die einen einzigen 2D-Lasertriangulationssensor beantragt. Das Konzept zur Rotation der Bambusrohre während des Scanversuchs wird untersucht und mithilfe motorisch angetriebener Rollen realisiert; hier wird das Bambusrohr axial- und längskraftfrei gelagert und behält dabei die Form. Die in Bild 22 gezeigte orange Rolle ist mittels Servomotor angetrieben und benutzt einen En-

coder zur Bestimmung des Rotationswinkels; die blaue Rolle – ebenfalls mit einem Encoder ausgerüstet – wird geschleppt und kann daher die Abweichung des Bambusrohrs von der ideal runden Geometrie bestimmen.

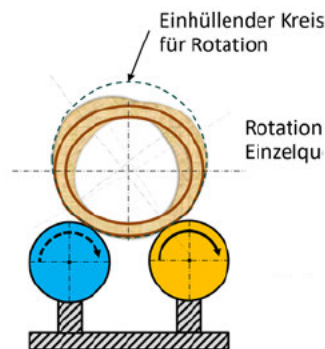
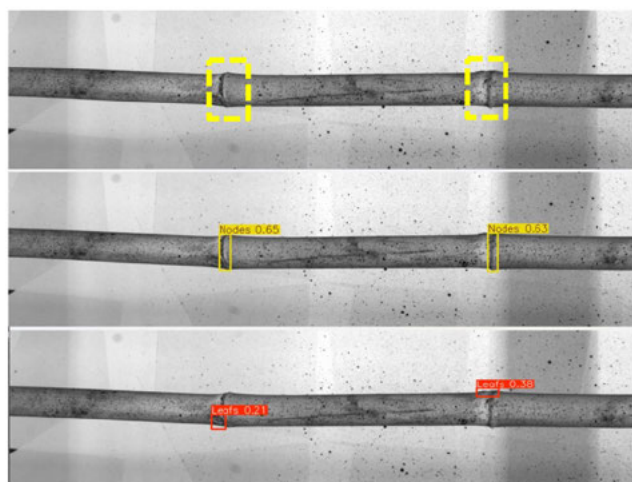


Bild 22: Aufbau der Manipulation des Bambusrohrs durch Rotation

Charakterisierung des Bambusrohrs durch KI-Nutzung beim Wareneingang: Bambusrohre lassen sich zum Beispiel durch die Anzahl der Knoten (Nodes), Blattstielkerben (Leafs) und weitere – optisch erfassbare – Merkmale charakterisieren. Daher wird ein YOLOv8 Convolutional Neural Network auf ca. 1.500 Bilder von verschiedenen vorrätigen Bambussorten trainiert. In der Prüfzelle können damit – bevor die optische Messung zur Bestimmung der 3D-Geometrie beginnt – bereits die ersten signifikanten Parameter des Bambusrohrs bestimmt werden. So werden aus einem Bild des Bambusrohrs die Anzahl der Knoten, die Segmentlängen, die Anzahl der Blattstielkerben und die Gesamtlänge näherungsweise bestimmt. Bild 24 zeigt eine typische Auswertung des trainierten Modells zur Detektion von optischen Bambusmerkmalen.



Knoten und ‚Leafs‘ werden durch Angabe der zu detektierenden Klassen und Wahrscheinlichkeiten mit Hilfe von KI erkannt.
Modell: Bamboo186.pt

Speed: 3.0ms preprocess, 88.5ms inference, 248.8ms postprocess per image at shape (1, 3, 320, 1280)
Found 2 Objects. 0 Leafs and 2 Nodes
Node at: tensor([437.6784, 161.9212, 24.1616, 72.4376]) with 65 %
Node at: tensor([976.7257, 161.6579, 18.7317, 77.2299]) with 63 %

Bild 23: Ausgabe des YOLOv8 Modells Bamboo186.pt

Allerdings muss das s/w-Bild der verwendeten IDS-Kamera mit einer Auflösung von 2048x256 Pixeln in zwei Teilabschnitte von je 1024x256 Pixeln klassifiziert werden, da ansonsten die benutzte YOLOv8 Architektur nicht auf der verfügbaren Hardware trainierbar ist. Zusätzlich wäre das Modell zu speicherintensiv, um es auf Standard-PCs ohne GPU Unterstützung zu applizieren.

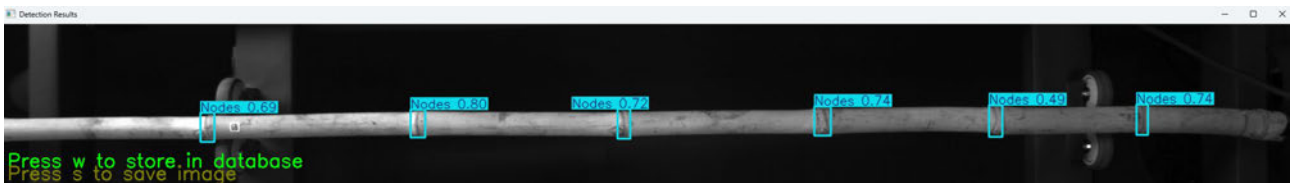


Bild 24: Klassifikation eines Bambusrohrs beim Wareneingang

Datenbankanbindung für Lagerhaltung: Die Daten des Bambusrohrs werden in einem Datenbanksystem, bestehend aus einer SQL- und einer NoSQL-Komponente, abgelegt (vgl. AP 2.5, Kapitel 2.1.2.5). Hier wird ein Lagerhaltungssystem für Bambusrohre generiert, welches die wesentlichen Eigenschaften zur weiteren Verarbeitung von Bambusrohren darstellen soll.

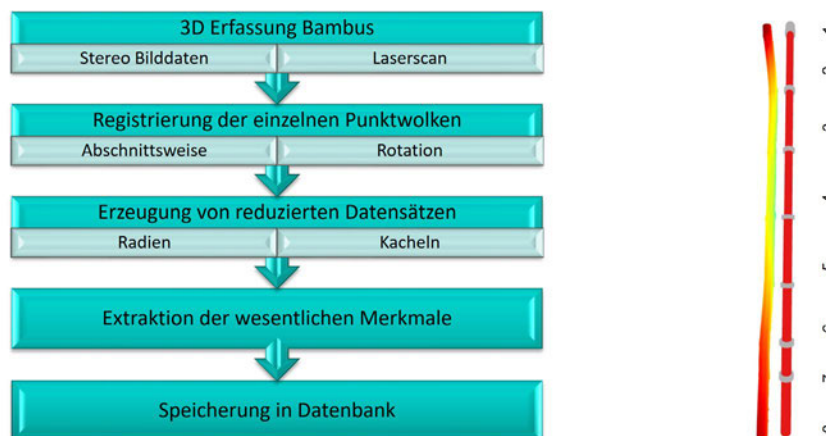


Bild 25: Methodik zur Datenerfassung und Speicherung

Bei der Speicherung der Daten wird bereits die Problematik der Datenreduktion sichtbar und teilweise gelöst. Die Punktwolken eines Bambusrohrs bestehen bei maximaler Auflösung aus 3 - 5 Millionen Einzelpunkten, je nach Durchmesser und Länge. Eine Reduktion dieser Datenmenge ist erforderlich und wird:

1. Durch Mittelung auf Scanlinien im Abstand von 0,5 mm erzeugt, d.h. die ursprüngliche Auflösung der einzelnen Scans in z-Richtung von 0,114 mm wird stark reduziert und
2. Die einzelnen Punkte einer Scanlinie werden durch approximierte Kreise beziehungsweise Ellipsen ersetzt, deren Mittelpunkte und Radien in eine gesonderte Datei geschrieben werden.

Eine weitere Reduktion, die getestet wird, ist die Unterteilung des Bambusrohrs in geometrische Primitive, zum Beispiel Abschnitte des Rohres als Zylinder. Diese recht grobe Reduktion wurde allerdings im Projekt nicht weiter verfolgt, da die Segmente zwischen den einzelnen „Nodes“ eine beidseitige Konizität aufweisen, die noch nicht berücksichtigt werden konnte. Besonders wichtig wird die Datenreduktion aber bei der Implementierung der Datenbank, da beispielsweise die verwendete NoSQL-Datenbank (MongoDB) nur Datensätze mit jeweils 16 MB standardmäßig verarbeiten kann. Die meisten generierten, reinen Punktwolken liegen aber weit über diesem Wert, sodass die Daten nur in reduzierter Form gespeichert werden können.

Die Methodik der Prüfzelle mit den benutzten Komponenten und der Datenbankanbindung zeigt Bild 26.

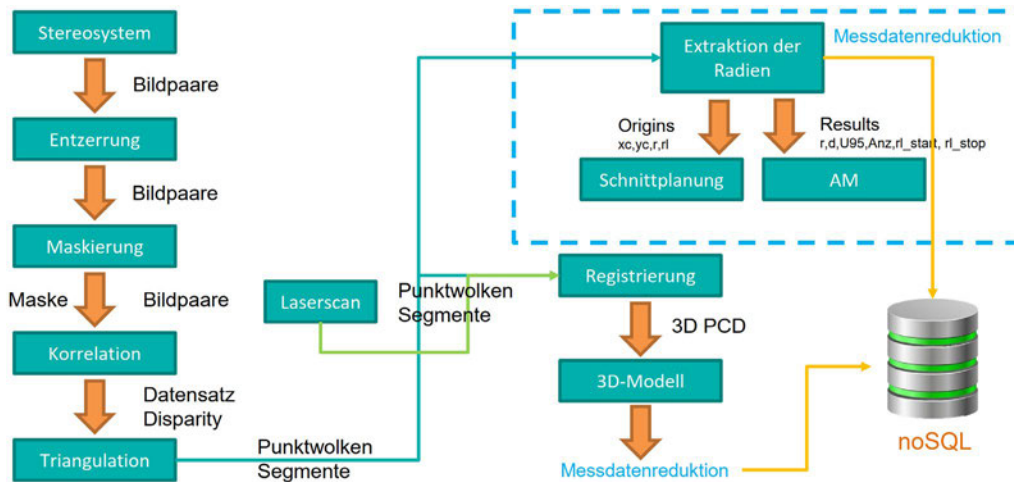


Bild 26: Überblick 3D-Rekonstruktion

Benutzung von optischen Markern: Die Bambusrohre müssen für die weitere Verarbeitung eindeutig gekennzeichnet werden, so dass in der Datenbank die individuellen Eigenschaften dem Bambusrohr zugeordnet werden können (vgl. AP 2.5, Kapitel 2.1.2.5). Da die Bambusrohre nach der Lieferung als erstes in die optische Prüfzelle zur Geometriebestimmung eingelegt werden, ist eine Markierung vor den weiteren Prüfungen sinnvoll. Es wurden daher verschiedene Markierungstechniken miteinander verglichen und optische 2D-Marker bevorzugt, da diese Marker ebenfalls Informationen über die Pose des Bambusrohrs für die spätere Verarbeitung liefern können. Bild 27 zeigt den Vergleich zwischen Barcodes, die besonders auf den auflösungsreduzierten Bildern Schwierigkeiten bei der Detektion aufweisen und ArUco Markern, die schließlich während des Projektes eingesetzt wurden.

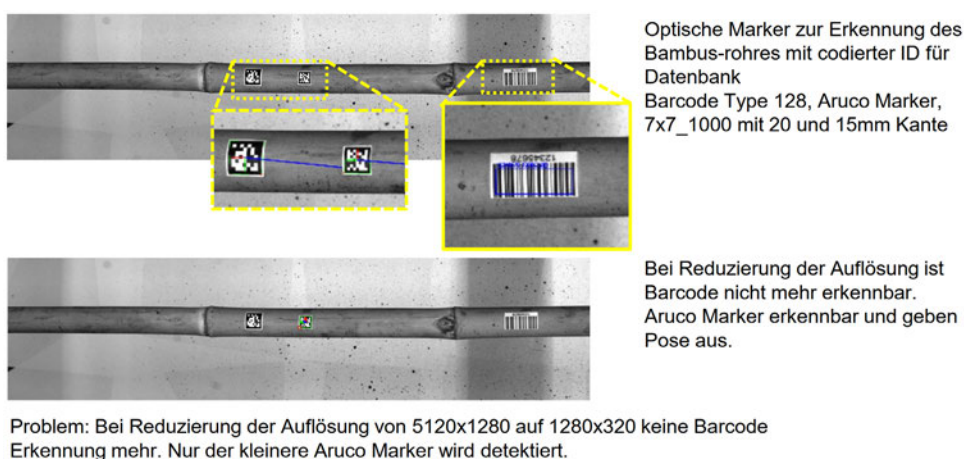


Bild 27: Vergleich ArUco- und Barcodes

2.1.2.3 Entwicklung Prüfmodul (AP 2.3)

Das Prüfmodul besteht aus den beiden Prüfmethode, die in den vorherigen Abschnitten erläutert wurden. Die 3D-Rekonstruktion wurde von dem eigentlichen Biegeversuchstand getrennt, da

es sich während des Projektes als sinnvoll erwies. Jedoch sollen für eine weitere kommerzielle Anwendung die beiden Methoden wieder in einer Prüfzelle kombiniert werden.

Methodik der Biege-Prüfung: Wie bereits in Kapitel 2.1.2.1 erläutert wird ein Kamera-Array zur Erfassung der Biegelinie benutzt, welches den Vorteil besitzt, dass keine optischen Komponenten beweglich anzuordnen sind. So können die Kameras ausgerichtet und kalibriert werden, ohne dass weitere Einflüsse auf die Messunsicherheit berücksichtigt werden müssen, wie beispielsweise die Unsicherheit der Positionierung einer Traversiereinheit. Wie in Bild 28 erläutert, werden die verschiedenen Abschnitte des Bambusrohrs detektiert, klassifiziert und zur Segmentierung des Rohres benutzt. Die Lage der Knoten und die Durchmesser der einzelnen Teilsegmente des Bambusrohrs dienen – bei Verwendung einer vor dem Biegeversuch durchführbaren Simulation – der Bestimmung der Kraft, die für eine bestimmte Durchbiegung notwendig ist und erlauben später ebenfalls eine experimentelle Verifizierung des Simulationsmodells. Die Biegelinie wird wie beschrieben erzeugt und Stützstellen der Biegelinie mit einer konfigurierbaren Auflösung generiert. Diese Punkte der Biegelinie werden in einer SQL- beziehungsweise NoSQL-Datenbank gespeichert.

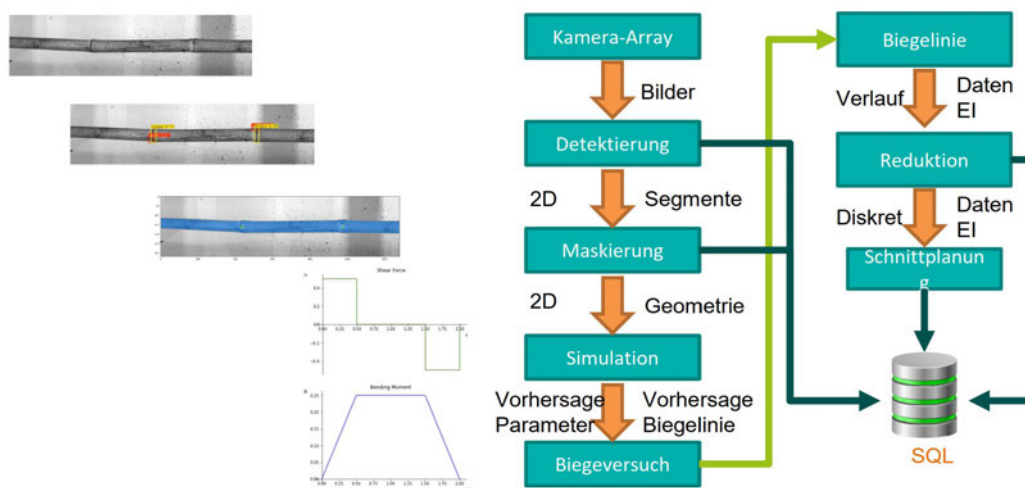


Bild 28: Methodik zur Erfassung der Biegesteifigkeit

Steuerung der Prüfzelle: Die Prüfzelle wird mit einer speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) (Wago PFC200) weitgehend automatisiert. Hier werden die Kräfte der zwei Kraftmessdosen über analoge Eingänge (12 Bit) gemessen. Auch die Position des Servo-Zylinders wird als analoger 12 Bit-Wert erfasst. Die Position des Servo-Zylinders wird als 12 Bit-Wert vorgegeben.

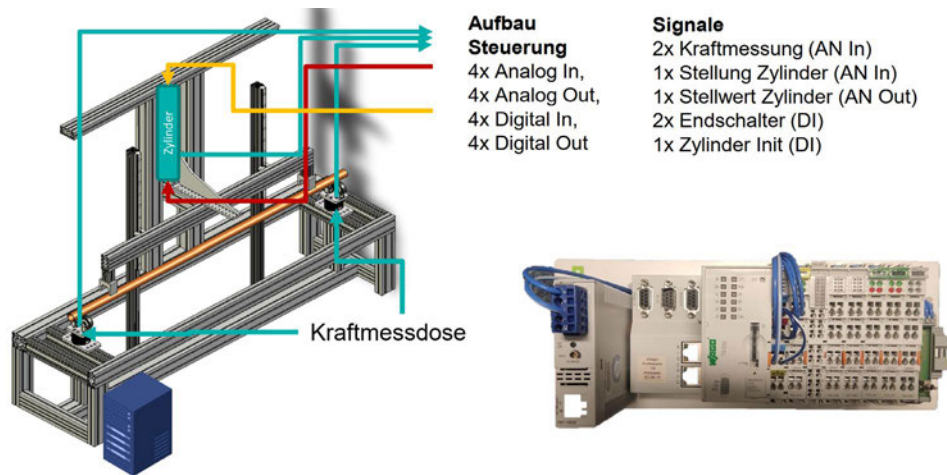


Bild 29: Steuerungskonzept des Biegeversuchsstands



Pneumatischer Biege-Prüfstand
(mit Bambusrohr)

WAGO-Steuerung des pneumatischen Zylinders

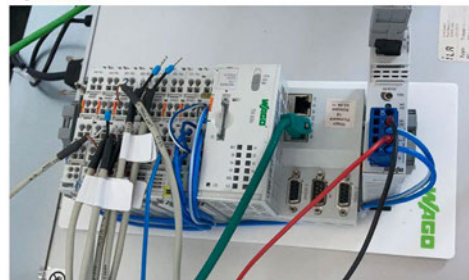


Bild 30: Erster Prototyp der Prüfzelle

Die Kraftmessdosen müssen zur Konfiguration mit einem Standard-PC verbunden werden, um den Eingangsbereich zum Beispiel der Kraftmessung festzulegen und auf Werte zu normieren, die von der Steuerung zu verarbeiten sind.

Kommunikation zwischen den einzelnen Fertigungszellen: Die Ergebnisse der Biegekraftmessung müssen in die SQL-Datenbank zur Auswertung und zur Steuerung weiterer Fertigungszellen geschrieben werden, da die von den Projektpartnern verwendeten Steuerungen nur den Zugriff auf SQL-Datenbanken unterstützen. Auf eine direkte Schnittstelle von der Wago SPS zu einem Datenbankserver (Windows SQL-Express) wurde verzichtet, da an dieser Stelle Echtzeitsysteme mit nicht-echtzeitfähigen Systemen gekoppelt werden würden. Daher wurde eine Kommunikation mittels des Message Queueing Telemetry Transport (MQTT)-Protokolls erzeugt, die sowohl die Anbindung an Standard-PCs, als auch die Anbindung von Standardkomponenten aus der Automatisierungstechnik erlaubt. Die über MQTT gesendeten Daten können somit hardware- und betriebssystemübergreifend zur Verfügung gestellt werden, sodass ebenfalls mobile Endgeräte den Status der Fertigungszellen anzeigen können.

Generierung eines Human Machine Interface (HMI) für die Steuerung der Zelle: Bild 31 zeigt die recht einfache grafische Benutzerschnittstelle der Prü fzelle, die als Webinterface in jedem Browser darstellbar ist. Hiermit kann recht einfach die Prü fzelle gesteuert werden. Auch ist ein Greifer integriert, der das Bambusrohr um 180 ° drehen kann, um einen weiteren Rotationswinkel für die Biegeprüfung zu ermöglichen.



Bild 31: Grafische Oberfläche zur Steuerung der Prü fzelle

Bild 32 zeigt den finalen Aufbau der Biege zelle mit dem PC zur Erfassung der Biegelinie, den Kameras, den Umlenkspiegeln und dem Servo-Zylinder.

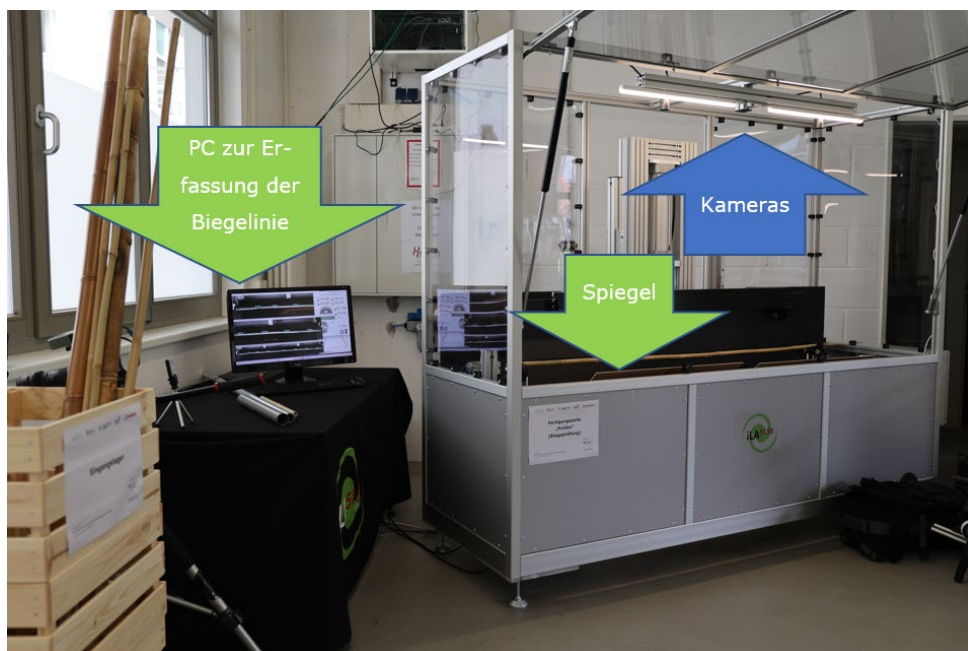


Bild 32: Finaler Aufbau der Prü fzelle (Biegeversuch)

2.1.2.4 Digitaler CAD-Klon des Bambusrohrs (AP 2.4)

Um frühzeitig die Prozessierung der **Rohraußenkontur** anhand realistischen Daten erproben zu können, werden mit einem kommerziellen Kompaktscanner des Herstellers Keyence zwei Rohr-

stücke 3D-gescannt. Hierbei zeigen sich Messabweichungen von ca. 0,2 mm, verglichen mit einer händischen Messung mittels Messschieber (Fehlergrenze Messschieber laut Herstellerangabe: 0,03 mm). Die Rohraußenkonturen werden als STL-Modell weiter zu CAD-Volumenmodellen (3D-Modellen) verarbeitet. Aus den Rohraußenkonturen lassen sich außerdem an die Rohrstücke angepasste Klebmuffen (individuelle Klebmuffen) generieren (vgl. AP 3.4, Kapitel 2.1.3.4).

Zur Bestimmung der Messgenauigkeit der 3D-Scan-Messmethoden (vgl. AP 2.2, Kapitel 2.1.2.4) wird eine **bambusähnliche Messreferenz** (Masterstück) hergestellt. Es handelt sich um ein eloxiertes Aluminiumdrehteil (Material AlMgSi0,5) mit eingepprägten Verdickungen, welche die Knoten im Bambusrohr für verschieden große Durchmesser nachbilden (Bild 33). Das Masterstück wird mittels digitalem Messschieber (Fehlergrenze Messschieber laut Herstellerangabe: 0,03 mm) und Bügelmessschraube (kalibriert mit 25 mm-Parallelendmaß; Messunsicherheit nach abgeschätzter t-Verteilung $U95 = 0,002$ mm) vermessen und zeigt keine messbaren Rundheitsabweichungen.



Bild 33: Masterstück als bambusähnliche Messreferenz

Mittels Messdaten des am IaAM vorhandenen Biegeprüfstands für Bambusrohre wird eine Methode zur analytischen Bestimmung der **Biegesteifigkeit** von Bambusrohren umgesetzt. Die Biegesteifigkeit wird analytisch aus der gemessenen Biegelinie (vgl. AP 2.1, Kapitel 2.1.2.1) lokal aufgelöst berechnet (Bild 34).

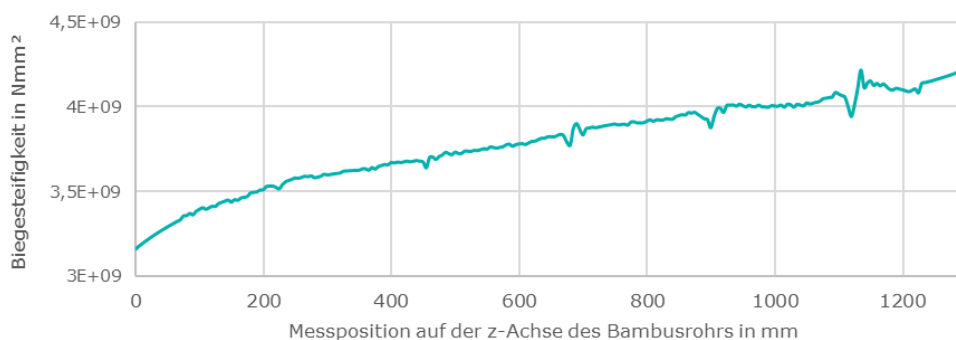


Bild 34: Analytisch bestimmte Biegefestigkeit über die Bambusrohrlänge

Der **digitale Klon** eines Bambusrohrs umfasst das aus der Außenkontur abgeleitete 3D-Modell und den aus der Biegelinie berechneten Biegesteifigkeitsverlauf. Beide Datensätze können zu einem Datensatz kombiniert werden:

Dies kann zum einen über eine **iterative Annäherung der Wandstärke** erfolgen. Hierzu wird die bekannte Außenkontur des Bambusrohrs zunächst um eine Innenkontur ergänzt. Die Innenkontur ergibt sich durch Skalieren der Außenkontur mit einem bambustypischen Faktor von 0,8. Unter Annahme dieser Innenkontur wird mit Hilfe der maximalen Durchbiegung aus dem 4-Punkt-Biegeversuch ein Durchschnittswert des Biegemoduls berechnet. Unter Annahme dieses Biegemoduls lässt sich die theoretische Biegesteifigkeit in jedem Querschnitt entlang der Rohrachse berechnen. Durch einen Vergleich dieser theoretischen mit der im 4-Punkt-Biegeversuch ermittelten Biegesteifigkeit wird die Innenkontur so lange iterativ angepasst, bis sich für jeden Querschnitt eine theoretische Biegesteifigkeit ergibt, die von der berechneten Biegesteifigkeit $< 3\%$ abweicht (Bild 35, links). Ergebnis ist ein 3D-Modell mit einer (fiktiven) Innenkontur (= Digitaler Klon), das sich etwa in Finite-Elemente-Analysen für die Konstruktion von Bambusrohrstrukturen nutzen lässt und die realen Biegeeigenschaften der vermessenen Bambusrohre abbilden kann (Bild 35, rechts). Es fällt auf, dass sich über den Umfang ändernde Wandstärken ergeben, die auf die unterschiedliche Biegesteifigkeit von Bambusrohren in unterschiedlichen Rotationswinkeln zurückzuführen sind. In Zukunft erfolgen am IaAM Untersuchungen, wie sich aus der Biegesteifigkeit weitere mechanische Kennwerte abschätzen lassen, etwa die Zug- und Druckfestigkeit sowie die entsprechenden E-Moduln des Bambusrohrs.

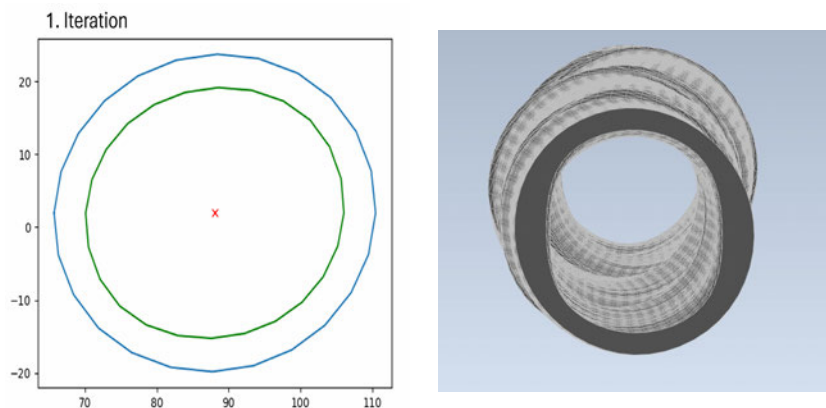


Bild 35: Einprägung der Biegesteifigkeit durch Anpassung des Innendurchmessers [JOE-24]

Zum anderen kann die Biegesteifigkeit mit Hilfe einer qualitativen **Farbskala** in das 3D-Modell des Bambusrohrs eingepreßt werden (Bild 36). Dies dient vor allem der anschaulichen Darstellung des Digitalen Klons. Für die Einbauort- und Schnittplanung werden die ermittelte Außenkontur und Biegesteifigkeit der Bambusrohre lediglich in Form von Arrays verarbeitet (vgl. AP 2.5, Kapitel 2.1.2.5).

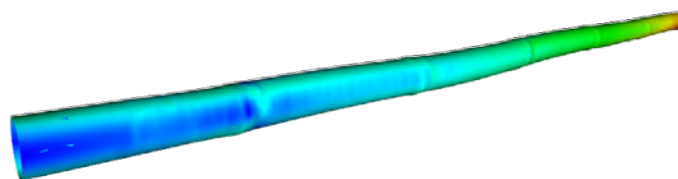


Bild 36: Einprägung der Biegesteifigkeit in das 3D-Modell durch qualitative Farbskala [JOE-24]

Der **Einfluss der Gewichtskraft des Bambusrohrs auf die Durchbiegung** soll nachfolgend diskutiert werden. Theoretische Berechnungen nach dem elastischen Stoffgesetz zeigen einen anti-quadratischen Zusammenhang: Je kleiner der Rohraußendurchmesser, desto größer ist die absolute Durchbiegung durch Eigengewicht (Bild 37). Für einen Rohraußendurchmesser von 10 mm beträgt die maximale Durchbiegung durch Eigengewicht ca. 6,5 mm. Für einen Rohraußendurchmesser von 100 mm ergeben sich Werte von maximal 0,06 mm.

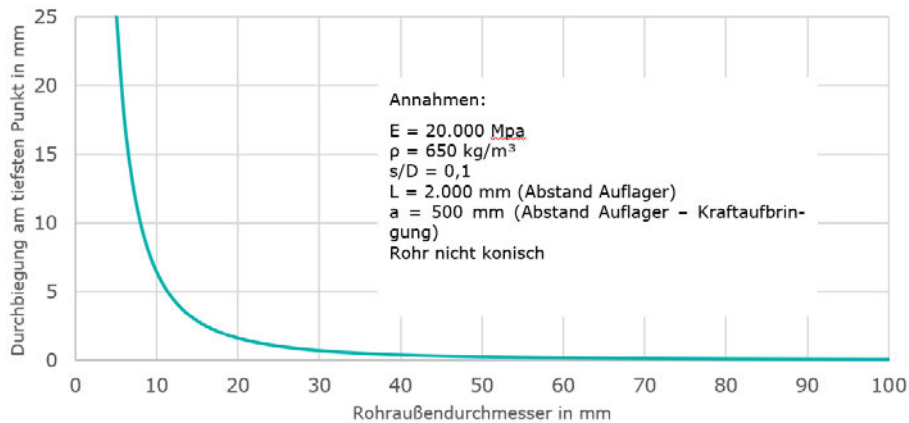


Bild 37: Durchbiegung durch Eigengewicht eines Bambusrohrs im 4-Punktbiegeversuch

Zur Bestimmung der Biegelinie wird die Differenz zwischen der unbelasteten und der belasteten Mittellinie eines Bambusrohrs gebildet. Daher wird ein möglicher Einfluss der Durchbiegung durch Eigengewicht auf die berechnete Biegesteifigkeit eliminiert. Allerdings beeinflusst die Durchbiegung durch Eigengewicht die erfasste Außenkontur des Bambusrohrs und verfälscht so die tatsächliche Krümmung der Rohrachse. Der Einfluss wird jedoch erst bei sehr dünnen Bambusrohren (Außendurchmesser < 12 mm) kritisch und kann bei Bedarf durch zu ermittelnde Korrekturkonstanten eliminiert werden.

2.1.2.5 Automatisierte Einbauort- und Schnittplanung (AP 2.5)

Die Messdaten der Bambusrohre (Außenkontur und Biegelinie) werden für jedes Bambusrohr in einem Datenbanksystem gespeichert. Dazu wird jedes Bambusrohr vor der Prüfung mit einer **individuellen Identifikation** (ID) in Form eines maschinenlesbaren ArUco Markers markiert (Bild 38). Zusätzlich ist die ID als menschenlesbare Zahl aufgebracht. Ein Pfeil gibt die Orientierung der z-Achse und die (ungefähre) Lage der 0 °-Rotationsrichtung an. Die Markierung erfolgt im Projekt mittels Etiketten (vgl. AP 3.5, Kapitel 2.1.3.5). Andere Markierverfahren wie das Lasern oder der Tintenstrahldruck sind ebenfalls denkbar, erfordern aber höhere Investitionen in die Fertigungsanlage.



Bild 38: Beispielhafte Markierung mit der ID 1

Das **Datenbanksystem** besteht aus 3 einzelnen Datenbanken (Bild 39): In der relationalen Structured Query Language (SQL)-Datenbank testing_db werden die Metadaten der Bambusrohre gespeichert. Die eigentlichen Messdaten werden aufgrund ihres großen Volumens und ihrer inkonsistenten Struktur in der nicht-relationalen Not only Structured Query Language (NoSQL)-Datenbank mongo_testing_db gespeichert, die auf dem Datenbankmanagementsystem MongoDB beruht. Die SQL-Datenbank production_db ist in 3 Schemen gegliedert, in welchen der Status der Bambusrohre, die Fertigungspläne der Bambusrohre und der Knotenpunkte (zum Beispiel der Schnittplan) beziehungsweise die Aufträge und Baupläne der Produkte gespeichert werden. Die Rohrstücke sowie die AM-gefertigten Knotenpunkte werden wie die vermessenen Bambusrohr mit Etiketten versehen und im Datensystem hinterlegt.

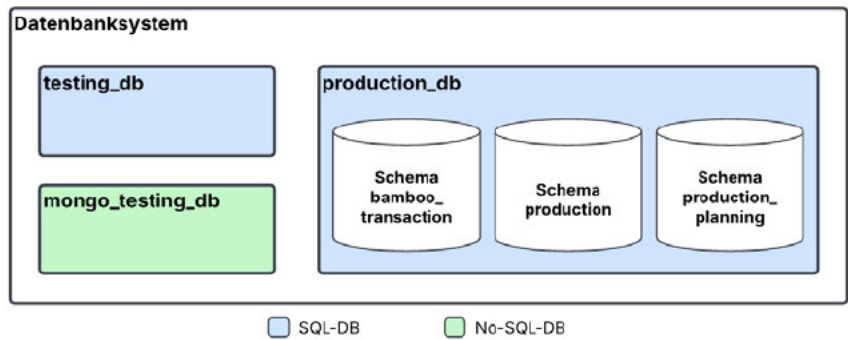


Bild 39: Struktur des Datenbanksystems [EWE-25]

Mit Hilfe der Daten aus dem Datenbanksystem koordiniert und priorisiert die **Fertigungsplanung** die weiteren Prozessschritte in der Fertigungsanlage. Abhängig von eingehenden Aufträgen initiiert die Fertigungsplanung die Einbauort- und Schnittplanung der Bambusrohre und gibt aus, welche Bambusrohre und Rohrstücke als nächstes der Säge- beziehungsweise Fügezelle zugeführt werden sollen. Die grafische Nutzeroberfläche der Fertigungsplanung stellt Übersichten zu den aktuell im Lager befindlichen Bambusrohren, Rohrstücken und Knotenpunkten (für den Kinderwagen) bereit (Bild 41). Des Weiteren werden in der Nutzeroberfläche die Daten aus dem Datenbanksystem visualisiert, etwa die Biegelinien und die berechneten Schnittpläne der vermessenen Bambusrohre.

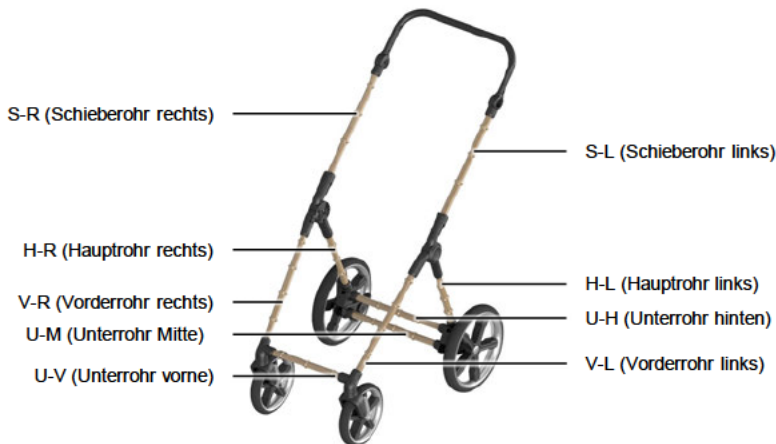


Bild 40: Einbauorte im Produkt Kinderwagengestell

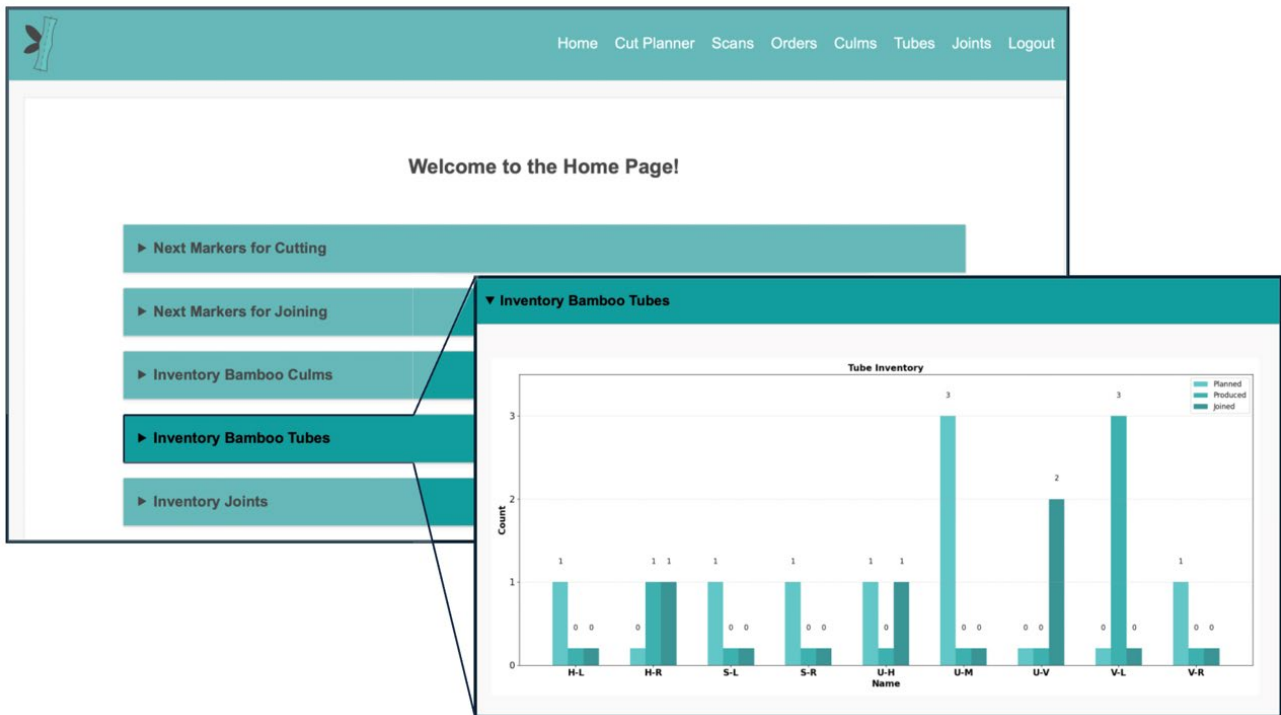


Bild 41: Grafische Nutzeroberfläche der Fertigungsplanung [EWE-25]

Die Auswahl passender Rohrstücke eines Bambusrohrs für ein Produkt (beispielsweise das Kinderwagengestell, Bild 40) nimmt bei der manuellen Fertigung viel Zeit in Anspruch und führt zu relativ hohem Verschnitt der Bambusrohre. Im Vorhaben wird daher ein Programm für die **automatisierte Einbauort- und Schnittplanung** entwickelt. Das Programm weist die verfügbaren vermessenen Bambusrohre passenden Einbauorten im Produkt zu und erstellt einen hinsichtlich unterschiedlicher Parameter optimierten Schnittplan (Bild 42). Dadurch werden Arbeitsaufwand und Verschnitt auf ein Minimum reduziert.

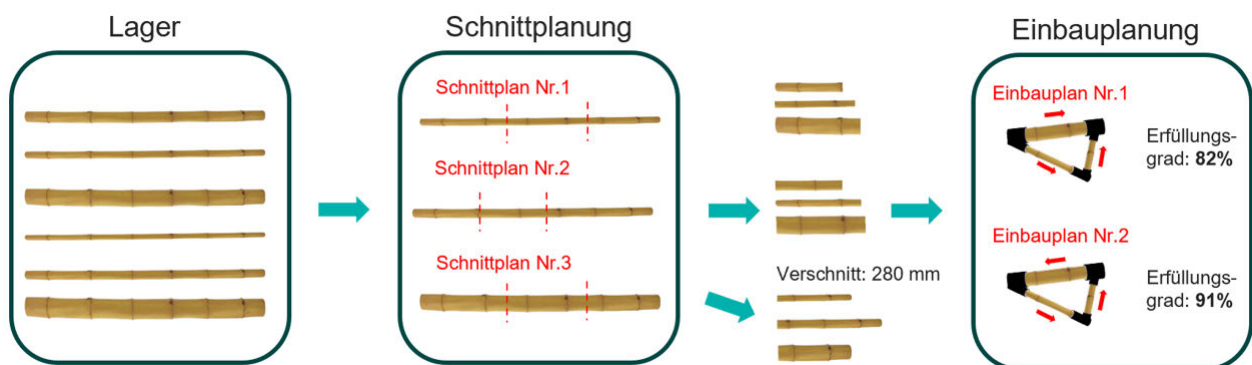


Bild 42: Darstellung der Schnitt- und Einbauortplanung zweier beispielhafter Rahmen [EWE-25]

Die Zuweisung von Bambusrohren zu Einbauorten erfolgt durch einen Abgleich der Soll-Eigenschaften (definiert durch das jeweilige Produkt) mit den Ist-Eigenschaften (ermittelt aus den Messdaten des jeweiligen Bambusrohrs). Folgende Eigenschaften werden bei der Einbauortplanung betrachtet:

- Min. und max. Durchmesser des Rohrstücks ¹, ggf. ²
- Lage der Knoten ¹
- Max. Unrundheit des Rohrstücks ^{1, 2}
- Max. Krümmung des Rohrstücks ^{1, 2}, ggf. ³
- Min. Biegesteifigkeit des Rohrstücks ³

¹ funktionelle Anforderung der Klebmuffen

² optische Anforderung

³ mechanische Anforderung

Anhand dieser Kriterien werden für die jeweiligen Bambusrohre Schnittintervalle erzeugt. Diese geben an – basierend auf dem Abgleich der Soll- und Ist-Eigenschaften – in welchen Bereichen der Rohrachse ein Schnitt erfolgen darf, um nutzbare Rohrstücke für passende Einbauorte zu erzeugen (Bild 43).

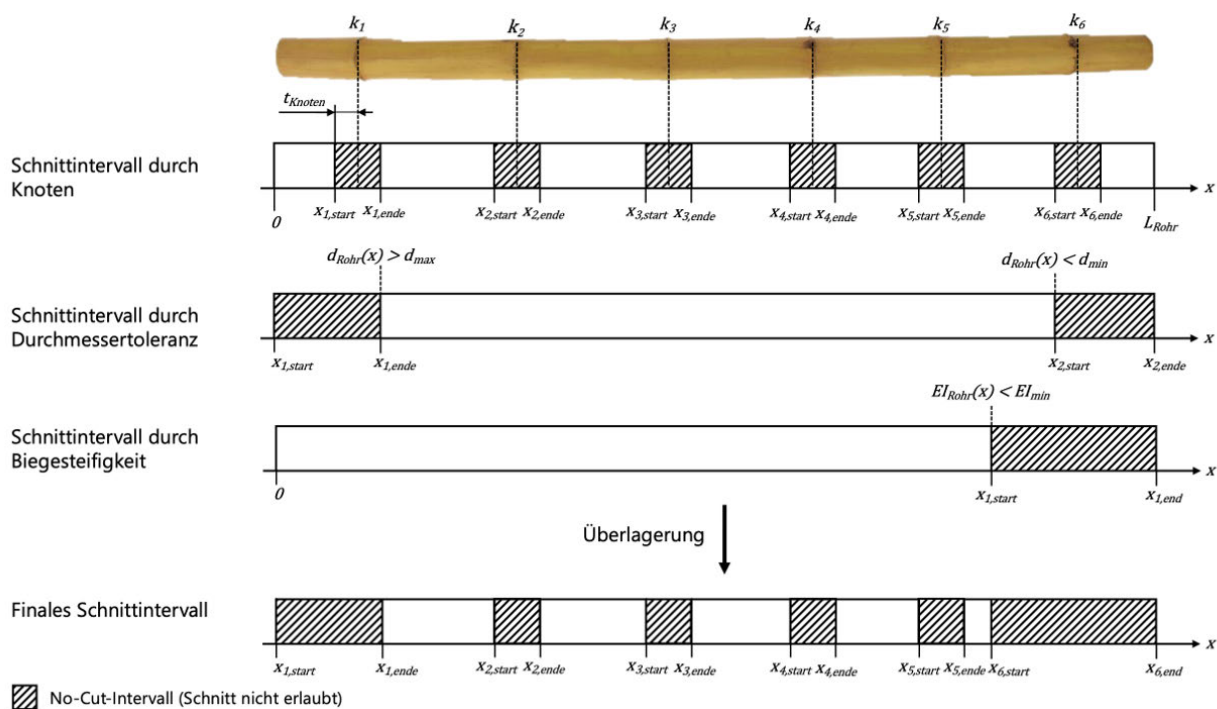


Bild 43: Beispielhafte Erzeugung eines überlagerten Schnittintervalls [EWE-25]

Aus den Schnittintervallen aller vorrätigen vermessenen Bambusrohre wird eine Schnittkombination gebildet. Diese Schnittkombination wird anhand nachfolgender Optimierungskriterien so lange iterativ verbessert, bis sich die Kriterien einem Optimum annähern:

- Erzielung eines minimalen Verschnitts
- Erfüllung vorliegender Fertigungsaufträge
- Auffüllung des Lagervorrats an Rohrstücken

Mit der optimalen Schnittkombination stehen für jedes betrachtete Bambusrohr die Schnittpositionen sowie die Einbauorte der resultierenden Rohrstücke fest. Im letzten Schritt der Einbauort- und Schnittplanung werden anhand des

- Verlaufs der Biegesteifigkeit über den Rotationswinkel und des
- Verlaufs der Biegesteifigkeit über die Rohrachse

der optimale Einbaurotationswinkel sowie die optimale Orientierung des Rohrstücks festgelegt. Das heißt, die Rohrstücke werden mit ihrer mechanisch „stärksten“ Richtung und Seite an den höchstbelasteten Stellen im Produkt eingebaut.

Im weiteren Fertigungsprozess kann es zu **geometrischen Abweichungen aufgrund der natürlichen Rohrkrümmung beim Sägen** der Bambusrohre kommen. So entspricht die geplante Rohrstücklänge nicht zwangsweise der tatsächlichen Rohrstücklänge (Bild 44). Dieser Effekt kann durch schiefes Aufliegen des gekrümmten Bambusrohrs beim Sägen zusätzlich verstärkt werden.

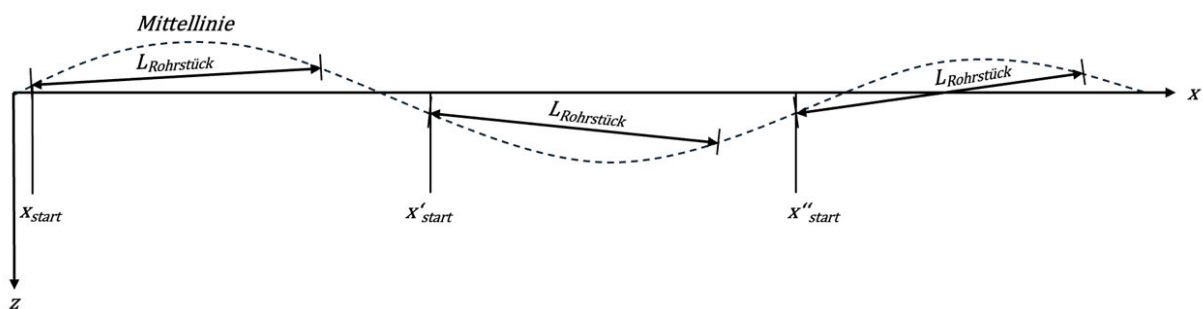


Bild 44: Einfluss der Rohrkrümmung auf die Rohrstücklängen [EWE-25]

Zudem ergeben sich Schnittwinkel, die von einem „perfekten“ rechtwinkligen Schnitt abweichen. Beides muss bei der Konstruktion von Bambusprodukten in Form von Toleranzen berücksichtigt werden. Um die zu erwartende Höhe dieser Abweichungen abschätzen zu können, wird der Sägeprozess simuliert. Die Bambusrohre werden in Form von Sinuskurven nachgebildet, welche im zweidimensionalen Raum die natürlich auftretenden Krümmungen von Bambusrohren abzubilden vermögen (Bild 45).

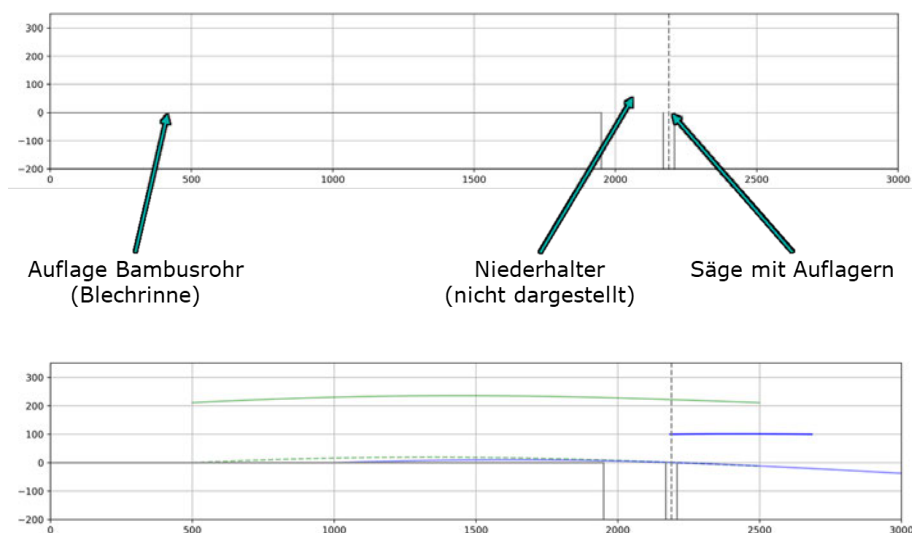


Bild 45: Nachbildung der Sägezelle (oben) samt Bambusrohr (unten) zur Simulation des Sägeprozesses

In einer Monte-Carlo-Simulation werden 100.000 Sägeprozesse mit unterschiedlichen Rohrkrümmungen, Rohrstücklängen und Schnittpositionen simuliert. Die entstehenden Abweichungen werden in Histogrammen zusammengetragen (Bild 46).

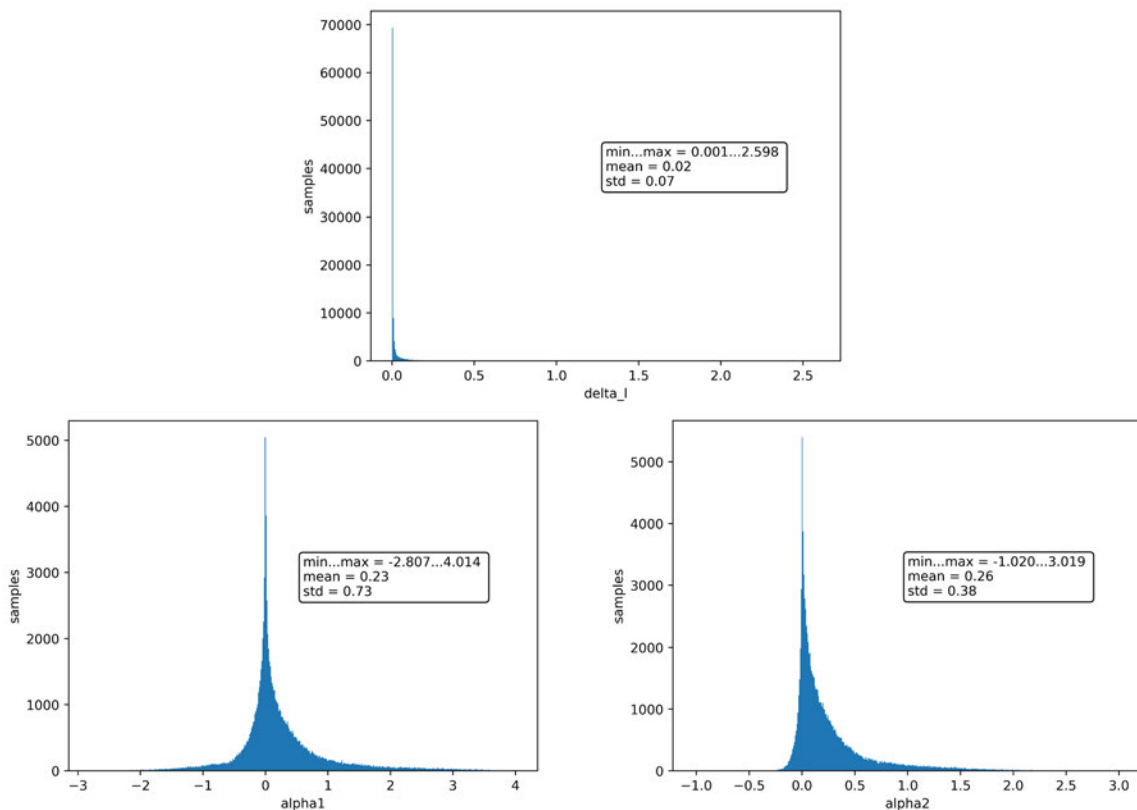


Bild 46: Differenz der Rohrstücklänge (oben) und der Schnittwinkel (unten) (Monte-Carlo-Simulation)

Für die Länge ergeben sich bei 99 % (99,9 %) der Rohrstücke Abweichungen von 0...0,3 mm (0...1 mm). Für die Schnittwinkel ergeben sich bei 99 % (99,9 %) der Rohrstücke Abweichungen von -1,5...3 ° (-2,2...3,7 °). Diese Abweichungen werden für die Bambusprodukte als unkritisch bewertet. Es ist davon auszugehen, dass die fertigungsbedingten Abweichungen in der Sägezelle, insbesondere bei der Rohstücklänge, zu deutlich größeren Abweichungen führen werden, die gegebenenfalls untersucht werden sollten.

2.1.3 Leichtbaugerechte Klebmuffe (AP 3)

2.1.3.1 Analyse anwendbarer additiver Verfahren (AP 3.1)

Im Rahmen von Arbeitspaket 3.1 wird ein **Vergleich von additiven Fertigungstechnologien**, die grundsätzlich für das in AP 1 definierte Produktkonzept geeignet sind, durchgeführt. Dazu findet eine Recherche der jeweiligen Vor- und Nachteile der einzelnen Technologien und Werkstoffe statt. Zusätzlich wird die Skalierbarkeit für eine zukünftige Serienfertigung beurteilt. Der Vergleich umfasst sowohl kunststoff- als auch metallbasierte Fertigungstechnologien, die im Folgenden aufgeführt sind:

- Laserstrahlschmelzen von Metall (Laser Powder Bed Fusion, LPBF)
- Kunststoffbasiertes Extrusionsverfahren (Fused Layer Modeling, FLM)
- Selektives Lasersintern mit Kunststoffpulver (Selective Laser Sintering, SLS)
- Harzbasiertes Verfahren mit LCD-Display als Lichtquelle (Digital Light Processing, DLP)
- Harzbasiertes Verfahren Stereolithografie (SLA)
- Binder Jetting (Kunststoff und Metall)
- Laserauftragsschweißen
- Multijet Modeling (MJM)
- HP Multijetfusion (MJF)

Betrachtet werden dabei folgende Kriterien:

- Skalierbarkeit
- Reproduzierbarkeit
- Wirtschaftlichkeit beziehungsweise Kosten pro Bauteil

Die individuellen Vor- und Nachteile werden in den folgenden Tabellen (Tabelle 2 bis Tabelle 4) gegenübergestellt.

Tabelle 2: Verfahrensvergleich zwischen FLM, SLS, MJF und Binder Jetting (Kunststoff)

Verfahren	Fused Deposition Modeling (FLM)	Selektives Lasersintern (SLS)	HP Multijet (MJF)	Binder Jetting (Kunststoff)
Toleranzen	± 0,5 % (Untergrenze: ± 0,5 mm)	± 0,3 % (Untergrenze: ± 0,3 mm)	±0,3 % (Untergrenze: ±0,3 mm)	±0,5 %, min. 0,5 mm
Material	PLA, PETG, PMA/PLA, PEEK, ABS, PHA, TPU, TPC, FLAM, ASA und weitere	Pulvermaterialien (zum Beispiel Alumide, Polyamide, Nylon) PA12, PA11, PA6, TPU, PEEK	Polyamid – PA12	AE 12

Verfahren	Fused Deposition Modeling (FLM)	Selektives Lasersintern (SLS)	HP Multijet (MJF)	Binder Jetting (Kunststoff)
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Kostengünstig ▪ Die am weitesten verbreitete Desktop-Technologie in der Branche ▪ Einfache Handhabung und Verwendung ▪ Die Preise für 3D-Drucker sind mit Preisen ab etwa 200€ deutlich günstiger 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Größtmögliche konstruktive Freiheit – keine Stützstrukturen oder -Materialien notwendig ▪ Bauteile bieten hohe mechanische Belastbarkeit und Temperaturbeständigkeit ▪ Eigenschaften der Werkstücke liegen nah am spritzgegossenen Teil ▪ Keine mechanische Alterung der Bauteile ▪ Lebensmittelechtheit des Materials ▪ Gute Nacharbeitsmöglichkeiten ▪ Bauteile gut lackier- und färbbar 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mechanisch belastbar ▪ Es sind keine Stützstrukturen nötig ▪ Hohe Bauteildichte ▪ Komplexeste Formgebung möglich ▪ Thermisch und mechanisch belastbar ▪ Sehr schneller Fertigungsprozess 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Größtmögliche konstruktive Freiheit ▪ Keine Stützstrukturen oder -materialien notwendig ▪ Geeignet für große Bauteile ▪ Kein thermischer Verzug (warping) ▪ Kosteneffizienz durch 100% Pulverrecycling ▪ Gute Nacharbeitsmöglichkeiten
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Nicht temperaturbeständig ▪ Sorgfältige Kalibrierung notwendig, um Modelle mit Qualität zu erhalten ▪ Druckdetails sind normalerweise geringer als bei den anderen Technologien ▪ raue Oberfläche 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Leicht raue Oberfläche (bedingt durch Pulverkorngröße) ▪ Mittlere Detailabbildung ▪ Bauteile können im Laufe der Zeit etwas vergilben, wenn die Oberfläche nicht behandelt wird ▪ Oberflächenbeschaffenheit materialabhängig 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Leicht raue Oberfläche ▪ Nur einfarbige Modelle sind möglich 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Leicht raue Oberfläche (bedingt durch Pulverkorngröße) ▪ Mittlere Detailabbildung
Biologisch abbaubar	<p>PMA - Polymilchsäure (Maisstärke) in der Entwicklung (2021):</p> <p>PHA - Polyhydroxyalkanoate (Kultivierung von Bakterien)</p> <p>FLAM - Fungal like additive material (Zellulose & Chitin)</p>	<p>Ja, PA12 basiert auf Rizinusöl, Soja</p>		
Anlagenkosten	Gering	Hoch		
Stützen notwendig	Ja	Nein	Nein	

Verfahren	Fused Deposition Modeling (FLM)	Selektives Lasersintern (SLS)	HP Multijet (MJF)	Binder Jetting (Kunststoff)
Erforderliche Nachbearbeitung	Entfernen der Stützstrukturen (falls vorhanden), Schleifen (optional)	Entfernen des überschüssigen Pulvers, Bestrahlen mit Strahlmittel oder Gleitschleifen	Entfernen des überschüssigen Pulvers, Bestrahlen mit Strahlmittel oder Gleitschleifen	
Skalierbarkeit	+	+++		

Tabelle 3: Verfahrensvergleich zwischen SLA, DLP und MJM

Verfahren	Stereolithografie (SLA)	Digitale Lichtverarbeitungstechnologie (DLP)	MultiJet Modeling (MJM)
Toleranzen	± 0,2 % (Untergrenze: ± 0,2 mm)	± 0,1 – 0,2 % (Untergrenze: ± 0,1 – 0,2 mm)	+/- 0,5 %, min. 0,05mm
Material	Photopolymere	Photopolymere	Photopolymere Wachs
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Höchste Genauigkeit (+/- 0,05 mm) und Detailabbildung ▪ Beste Oberflächengüte ▪ Gute Nacharbeitsmöglichkeiten ▪ Geringer Nachbearbeitungsaufwand 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Kompakte Bauform ▪ Günstiger Einstiegspreis ▪ Schneller Druck 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sehr große Materialvielfalt (von fest bis gummielastisch) ▪ Transparente Bauteile ▪ Verbundmaterialien herstellbar ▪ Hohe Genauigkeit und Oberflächenqualität ▪ Schnelles Verfahren, da keine Aufheiz- und Abkühlzeiten benötigt werden ▪ Herstellung von 3D-gedruckten Spritzgießkavitäten aus Kunststoff ▪ Gute Nacharbeitsmöglichkeiten ▪ Geringer Nachbearbeitungsaufwand
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bauteile nicht lichtbeständig ▪ Relativ teures Verfahren (Drucker, Material, Extras wie Tanks für jedes Material etc. ▪ Aufwendige Nachbearbeitung ▪ Materialauswahl vergleichsweise klein ▪ Aushärtung erhöht die Durchlaufzeiten von Ausdrucken ▪ Es werden nahezu immer Stützstrukturen benötigt 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Aufwändiges Entfernen der Stützkonstruktion ▪ Nicht lichtbeständig ▪ Photopolymere sind in der Anschaffung recht teuer ▪ Die Bauform der Drucker ist nicht für große Modelle geeignet ▪ Oberflächen nicht hundertprozentig glatt ▪ Mechanisches Nachbearbeiten immer nötig ▪ Teilweise noch Nachbelichtung oder Brennen erforderlich 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Geringere Temperaturbeständigkeit ▪ Materialien leicht spröde ▪ Materialien nicht UV-beständig (Versprödung und Verfärbung möglich) ▪ Einschränkungen in der geometrischen Freiheit, da Stützmaterial mit Wasserstrahl entfernenbar sein muss (Zugänglichkeit, Beschädigungsgefahr) ▪ Limitierte Materialvielfalt

Verfahren	Stereolithografie (SLA)	Digitale Lichtverarbeitungstechnologie (DLP)	MultiJet Modeling (MJM)
Biologisch abbaubar	Ja, Resin sojabasiert	Ja, Resin sojabasiert	
Anlagenkosten	Mittel	Mittel	Hoch
Stützmaterial notwendig	Ja	Ja	Ja
Erforderliche Nachbearbeitung	Waschen, Nachhärten (optional), Entfernen der Stützstrukturen (falls vorhanden), Schleifen (optional)	Waschen, Nachhärten (optional), Entfernen der Stützstrukturen (falls vorhanden), Schleifen (optional)	wasserlösliches Stützmaterial
Skalierbarkeit	++	++	++

Tabelle 4: Verfahrensvergleich zwischen LPBF, Binder Jetting (Metall) und Laserauftragsschweißen

Verfahren	Laser Powder Bed Fusion (LPBF)	Binder Jetting (Metall)	Laserauftragsschweißen
Toleranzen	± 0,5 % (mit einer unteren Grenze von ± 0,5 mm)		
Material	Metallisches Pulver Werkzeugstahl Edelstahl Aluminium Inconel Kuper Titan Zink Cobaltchrom		Edelstahl Nickel-Basislegierungen Wolfram-/Titankarbide Bronze- und Messinglegierungen CrCo - Molybdän - Legierungen Stellite Werkzeugstahl (schweißbar) Aluminium-/Titanlegierungen Sehr gute Bauteileigenschaften – hohe Dichte und feine Mikrostrukturen

Verfahren	Laser Powder Bed Fusion (LPBF)	Binder Jetting (Metall)	Laserauftragsschweißen
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dichte Funktionsteile aus verschiedenen metallischen Werkstoffen ▪ Hohe mechanische Belastbarkeit ▪ Gute Eignung für Spritzgießwerkzeuge ▪ Konturnahe Kühlung/Temperaturierung ▪ Herstellung von Bauteilen aus Kupfer mit hoher elektrischer Leitfähigkeit ▪ Gute Nacharbeitsmöglichkeiten (zum Beispiel Wärmebehandlung/Härten) 		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Hohe Aufbauraten ▪ Große Bauteile ▪ Reparatur von Bauteilen ▪ Beschichtung ▪ Möglichkeit Multimaterialienaufbau
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Leicht raue Oberfläche ▪ Oberflächenbearbeitung von Funktionsflächen notwendig 		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Keine feinen Strukturen möglich ▪ Eingeschränkte Komplexität ▪ Hohe Materialkosten ▪ Geringe Materialvielfalt ▪ Materialverlust bis zu 20%
Recyclebar	Je nach Legierung wieder einschmelzbar		
Biologisch abbaubar	Nein	Nein	Nein
Anlagenkosten	200.000 € - ca. 6 Mio. €	300.000 € bis 2 Mio. €	
Stützmaterial notwendig	Ja	Nein	
erforderliche Nachbearbeitung	Entfernen der Stützstrukturen (falls vorhanden), Schleifen und Strahlen (optional)		
Skalierbarkeit	+++		

Zur **Kostenkalkulation** wurden einerseits die Materialkosten betrachtet, aber auch Drucksimulationen auf verschiedenen Druckern für die oben genannten Verfahren durchgeführt. Hierbei haben verschiedene Faktoren einen Einfluss auf die Druckzeit. Zum einen spielt die Parallelisierung der Fertigung eine Rolle. So können sogenannte DLP-Drucker durch ihr LCD-Display eine komplette Schicht aushärten und müssen nicht jedes Bauteil individuell bearbeiten. Andere Verfahren, wie zum Beispiel das FLM-, SLA-, SLS- oder auch LPBF-Verfahren, arbeiten sequenziell und es muss pro Schicht eine Bearbeitung jedes einzelnen Bauteils stattfinden. Allerdings müssen hierbei auch die resultierenden Bauteileigenschaften berücksichtigt werden. So führt die Verwendung von Photoharzen häufig zu sehr spröden Bauteilen, welche in der späteren Anwendung in der Klebmuffe verifiziert werden müssen, da fraglich ist, ob sie als Dichtlippe fungieren können.

Basierend auf den Erkenntnissen und den Anforderungen an die Eigenschaften des Produktkonzepts wird eine **Vorauswahl der Verfahren** getroffen und mit Testdrucken begonnen. Ausgewählt werden für die Verarbeitung von Kunststoff das SLS-Verfahren und der FLM-Prozess. Für die Verarbeitung von Metall wird der LPBF-Prozess gewählt.

2.1.3.2 Materialauswahl und Testdrucke (AP 3.2)

Im Arbeitspaket 3.2 wird die additive Fertigung in Hinblick auf die **Prozessfähigkeit** beurteilt. Dazu werden im AP 3.2.1 zunächst die grundsätzlichen mechanisch-technologischen Eigenschaften in drei unterschiedlichen Ausrichtungen analysiert und aufgenommen. In Arbeitspaket 3.2.2 werden vorausgewählte additive Verfahren in Testreihen hinsichtlich ihrer dimensional Genauigkeit evaluiert. Abschließend werden in Arbeitspaket 3.2.3 Klebmuffen-ähnliche Strukturen untersucht. Diese werden in Hinblick auf Dichtigkeit und Aufnahme unterschiedlicher Bambusrohrdurchmesser evaluiert.

Vorausgewählte additive Verfahren in Testreihen hinsichtlich mechanisch-technologischer Eigenschaften evaluieren (AP 3.2.1)

Die in AP 3.1 identifizierten Fertigungstechnologien sollen im Rahmen dieses Arbeitspaketes hinsichtlich ihrer mechanisch-technologischen Eigenschaften bewertet werden, um so ihre Eignung zur Herstellung von Klebmuffenverbindungen zu bewerten. [REDACTED]

[REDACTED] Dabei müssen verschiedene **Anforderungen an die Bauteile** erfüllt werden, um eine reproduzierbare Fertigung der Klebmuffenverbinder zu ermöglichen:

- Muffe:
 - Mechanische Stabilität
 - Wetterbeständigkeit
 - Temperaturbeständigkeit

- Dichtlippen:
 - Dichtigkeit beim Einspritzen [REDACTED]
 - Aufnahme verschiedener Bambusrohrdurchmesser
 - Gleichmäßige Füllung der Klebfuge

Um diese Anforderungen zu erfüllen, werden zwei verschiedene Ansätze verfolgt. Zum einen sollen mittels des SLS-Prozesses die verschiedenen Eigenschaften über eine **Variation der Wandstärken** erreicht werden. Der zweite Ansatz beinhaltet die **Verarbeitung mehrerer Werkstoffe in einem Fertigungsprozess**. Die hierfür geeigneten additiven Fertigungsprozesse sind im vorherigen Arbeitspaket (AP 3.1, Kapitel 2.1.3.1) bereits identifiziert und beschrieben worden.

Um die mechanisch-technologischen Eigenschaften der verschiedenen Fertigungsverfahren zu vergleichen, werden zunächst Zug-, Druck und Biegeversuche an **1-komponentigen Prüfkörpern** durchgeführt. Dazu werden mittels des SLS- und FLM-Verfahrens normierte und standardisierte Probekörper hergestellt. Die Probekörper werden in drei unterschiedlichen Aufbaurichtungen (0° , 45° , 90°) gefertigt. Zusätzlich werden im FLM-Verfahren Zug- und Druckproben mit fünf verschiedenen Füllgraden (Infills) produziert.

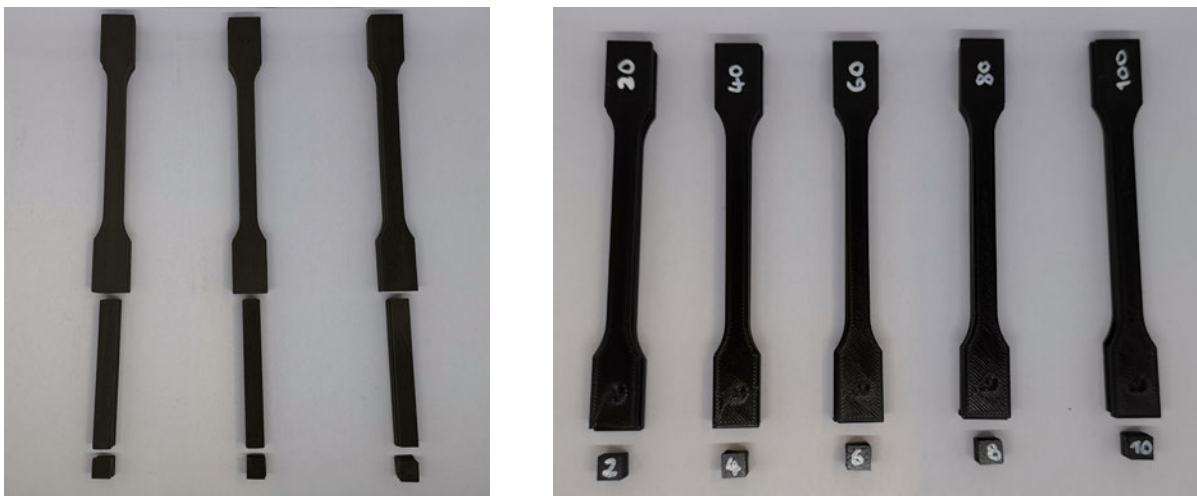


Bild 47: Prüfkörper in verschiedenen Aufbaurichtungen (SLS, links) und Füllgraden (FLM, rechts)

Bevor in den folgenden Abschnitten die Ergebnisse der Materialuntersuchungen an Multimaterialproben aus dem FLM-Prozess den Werkstoffkennwerten der Einzelwerkstoffe gegenübergestellt werden, finden sich in der folgenden Tabelle 5 und Tabelle 6 die Materialeigenschaften des SLS-Prozesses mit PA12.

Tabelle 5: Zugfestigkeit PA12 Industrial

Versuch	R_{p0,2} [MPa]	R_{p1} [MPa]	R_m [MPa]	A_{manuell} [%]
SLS - 0°	29,21	35,59	41,47	8,93
SLS - 45°	24,81	29,84	32,97	7,10
SLS - 90°	26,10	29,66	32,03	6,27

Orientierung: 0 ° = vertikal, 90° = horizontal

Zugfestigkeit nach DIN EN ISO 527

Tabelle 6: Biegefestigkeit PA12 Industrial

	0°	45°	90°
Biegefestigkeit [MPa]	52,77	53,10	45,80

Orientierung: 0 ° = vertikal, 90° = horizontal

Biegefestigkeit nach DIN EN ISO 178

Im nächsten Schritt sollen **Multimaterialprüfkörper** hergestellt werden, um die Eigenschaften von Werkstoffpaarungen zu untersuchen. Dazu müssen zunächst geeignete Prozessparameter für multimateriale Probekörper identifiziert werden. Die Festlegung der richtigen Prozessparameter ist hierbei von entscheidender Bedeutung, um eine reproduzierbare Fertigung sicherzustellen. Durch die Verarbeitung mehrerer Werkstoffe wird es möglich, zwei oder mehr Materialien gemäß ihren individuellen Eigenschaften optimal in einem Bauteil, entsprechend den spezifischen Anforderungen, zu verwenden. Eine Herausforderung hierbei liegt allerdings in den begrenzten vorhandenen Daten zu den mechanischen Eigenschaften eines solchen Multimaterialbauteils. Insbesondere die Schnittstelle zwischen den Materialien muss betrachtet werden.

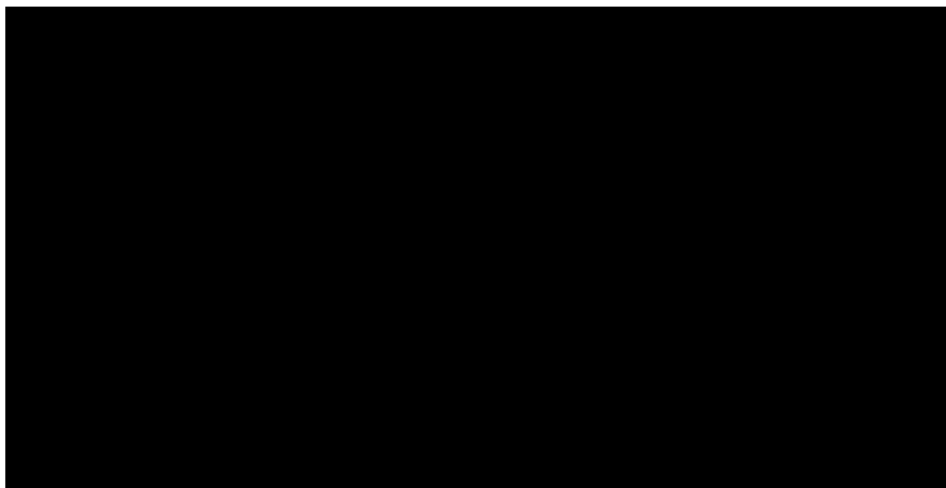


Bild 48: Aufbau des Multimaterial-Inlays

Für das spätere Inlay ist eine Kombination aus einem starren und einem flexiblen Werkstoff geplant.

. Deshalb werden diese Geometrien aus PLA, PETG oder ASA gefertigt, welche in Bild 48 in Gelb dargestellt sind. Sowohl der Verteilring als auch der Dichtring sollen sich der Geometrie des Bambusrohrs anpassen, um eine ausreichende Dichtigkeit zu erhalten und einen möglichst großen Durchmesserbereich von Bambusrohren im Inlay aufnehmen zu können. Dafür benötigt der Werkstoff eine ausreichende Flexibilität, welche TPU und auch TPC bieten können. Diese sind in Bild 48 in Rot dargestellt.

Für die **Zug-, Druck-, und Biegeprüfungen** werden insgesamt 71 Proben gefertigt, welche in Bild 49 ersichtlich sind. Die 71 Proben unterteilen sich in 29 Zugproben, 33 Druckproben und 9 Biegeproben. Aus den Grundwerkstoffen und den jeweiligen Werkstoffkombinationen werden jeweils 3 Proben gedruckt, um die Wahrscheinlichkeit für Messfehler zu reduzieren. Die Prozessparameter für die Fertigung sind ermittelt und getestet worden und orientieren sich an den Angaben der Hersteller. Die Zugproben, welche im linken Abschnitt in Bild 49 gezeigt werden, werden alle mit 100 % Füllichte gefertigt.

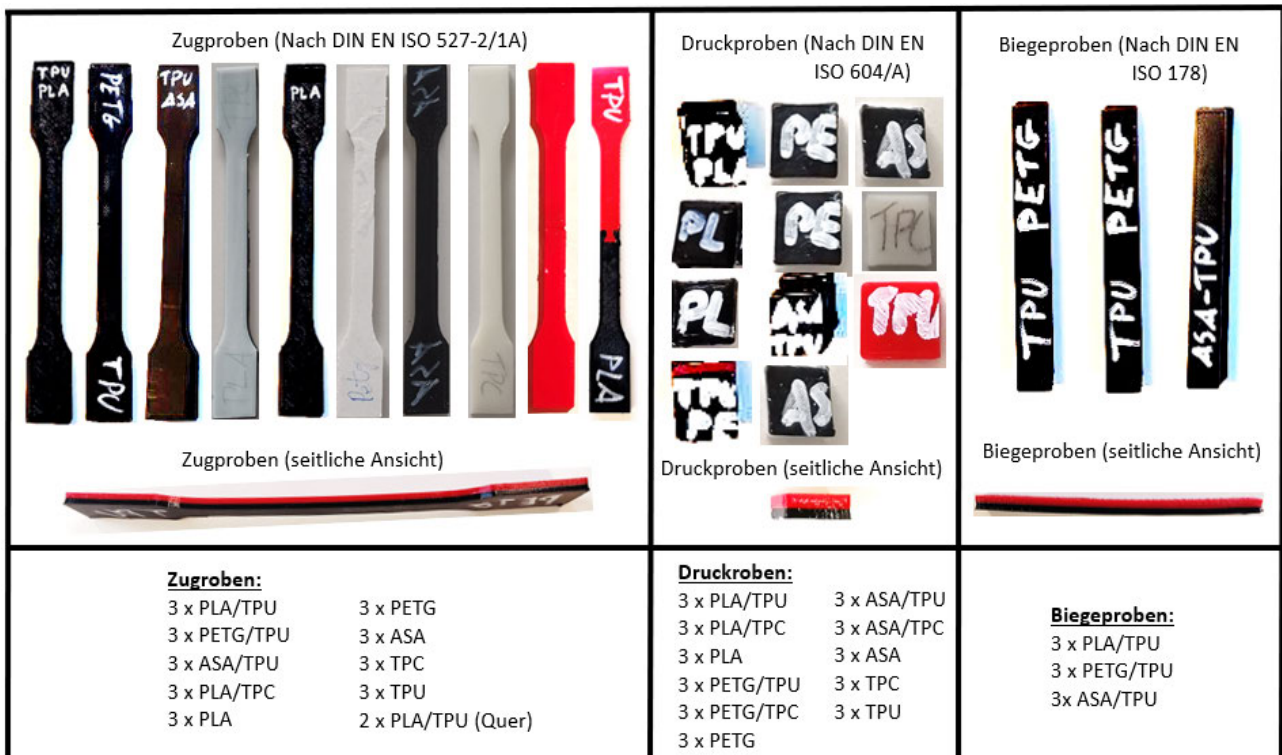


Bild 49: Multimaterial-Prüfkörper

Die biegesteifen Werkstoffe PLA, PETG, ASA werden jeweils als Multimaterialprobe mit TPU gefertigt. Der Werkstoffwechsel während des Multimaterialdrucks erfolgt in der x-y Ebene. Die anfänglichen Proben mit TPU werden unter Verwendung von dem Filament des Herstellers "Das Filament" hergestellt. Allerdings führt dieses Filament zu einem inkonstanten Materialstrom während des Druckvorgangs, und es ist nicht möglich, diese Problematik durch Änderungen der Prozessparameter zu beheben. Daher wird die Fertigung der TPU-Proben auf das Filament vom Maschinenhersteller UltiMaker umgestellt. Das TPC wird ausschließlich mit PLA kombiniert, da die Herstellung von Zugproben aus PETG/TPC aufgrund von Materialinkompatibilitäten nicht

durchführbar ist. Zusätzlich werden zwei Proben aus PLA/TPU hergestellt, bei denen die Werkstoffübergangsstelle in der y-z-Ebene liegt, um die Verbindungspunkte sowohl mit Stoßverbindung als auch mit Schwalbenschwanzverbindung zu prüfen. Die Druckproben, wie sie im mittleren Abschnitt von Bild 49 dargestellt sind, entsprechen denselben Probenvarianten wie die Zugproben. Zudem werden alle Werkstoffkombinationen mit TPC gedruckt, was aufgrund der kleineren Probengeometrie und der geringeren Druckdauer möglich ist. Für die Biegeproben wurden ausschließlich Werkstoffkombinationen aus PLA, PETG und ASA mit TPU hergestellt.

In den folgenden Abschnitten erfolgt die **Auswertung** der Zug-, Druck- und Biegeprüfungen an den Probekörpern. Für jede Werkstoffkombination werden der Mittelwert und der Median für jeden Messwert ermittelt, um Ungenauigkeiten in den Messungen zu minimieren. In Bild 50 werden zwei der vier bewerteten Messgrößen des Zugversuches gezeigt.

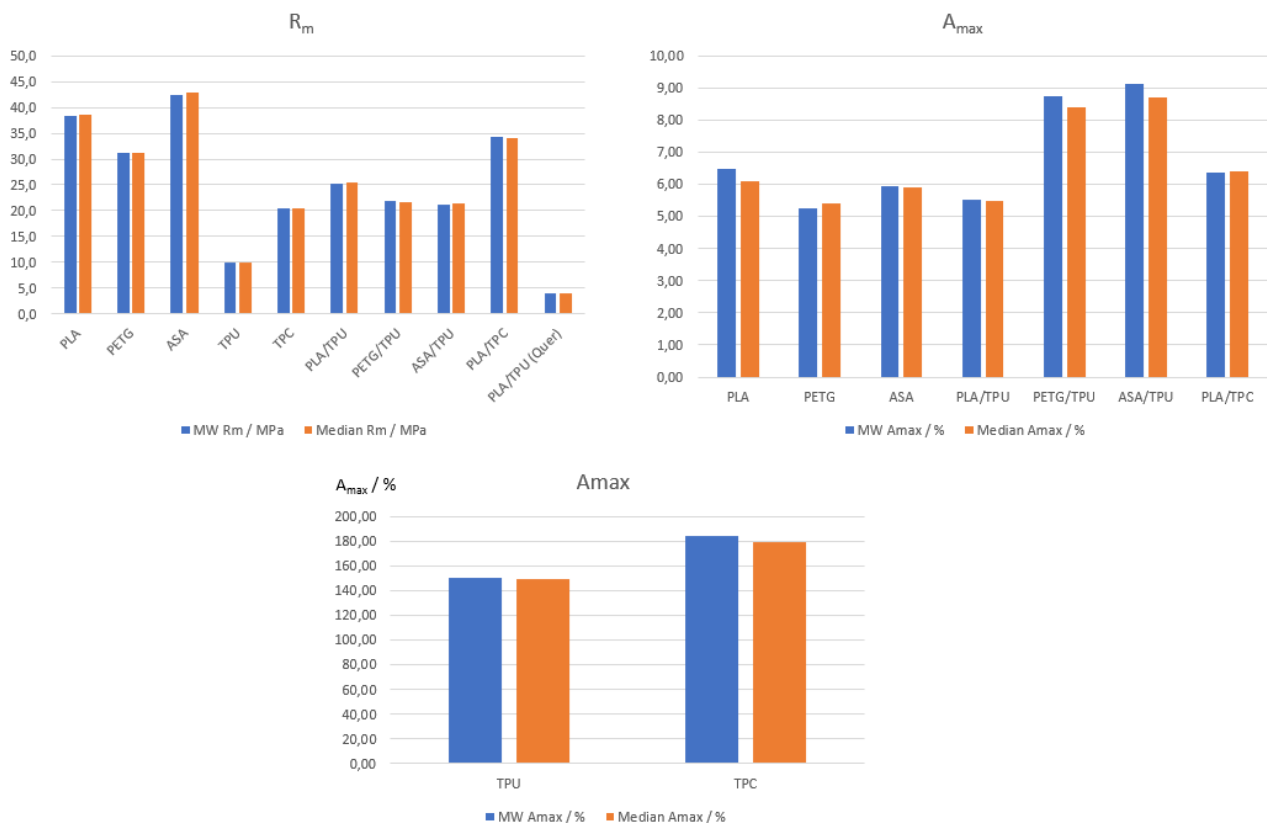


Bild 50: Balkendiagramme von R_m und A_{max}

Im **Zugfestigkeits**diagramm zeigt sich, dass ASA mit 42,4 MPa vor PLA mit 38,3 MPa und PETG mit 31,3 MPa die höchste Zugfestigkeit aufweist. Die Werkstoffe mit flexibleren Eigenschaften werden in einem separaten Balkendiagramm präsentiert, da ihre Dehnungswerte erheblich höher sind und somit effektiver visualisiert werden können. TPC erreicht mit einer Zugfestigkeit von 20,5 MPa das Zweifache der Zugfestigkeit von TPU mit 10,0 MPa.

Bei den Werkstoffkombinationen erreicht PLA/TPC die höchste Zugfestigkeit mit 34,3 MPa. Die Probe aus PLA/TPU hat die zweithöchste Zugfestigkeit, was zeigt, dass die Werkstoffverbindungen mit PLA eine höhere Festigkeit aufweisen als Werkstoffkombinationen mit ASA und PETG.

Eine weitere Erkenntnis ist, dass die Multimaterialproben einseitig an den biegesteiferen Werkstoffen versagen. Bei den beiden PLA/TPU (Quer)-Proben ist die Probe mit Stoßverbindung zu schnell gebrochen, sodass keine nennenswerte Spannung aufgenommen werden konnte. Die Schwalbenschwanzverbindung erreicht eine Zugfestigkeit von nur 3,92 MPa. Dies weist auf eine ungenügende Materialhaftung der Werkstoffkombination hin. Dennoch lässt sich die Festigkeit an der Übergangsstelle mittels einer geeigneteren Geometrie erhöhen. Bei der maximalen Dehnung erreicht das TPC mit 184 % den höchsten Wert vor dem TPU mit einer Dehnung von 150 %. Somit ist das TPC-Filament der flexiblere Werkstoff. Die weiteren Werkstoffe zeigen in dieser Kategorie keine erheblichen Unterschiede. Bei den Werkstoffkombinationen erreichen die PETG/TPU-Proben eine Dehnung von 8,73 % und die ASA/TPU-Proben 9,13 % höhere Dehnungen als die PLA-Werkstoffkombinationen.

Für die **Druckversuche** werden in Bild 51 die Diagramme für die Druckfließspannung (links) und die Druckspannung bei Bruch (rechts) präsentiert.

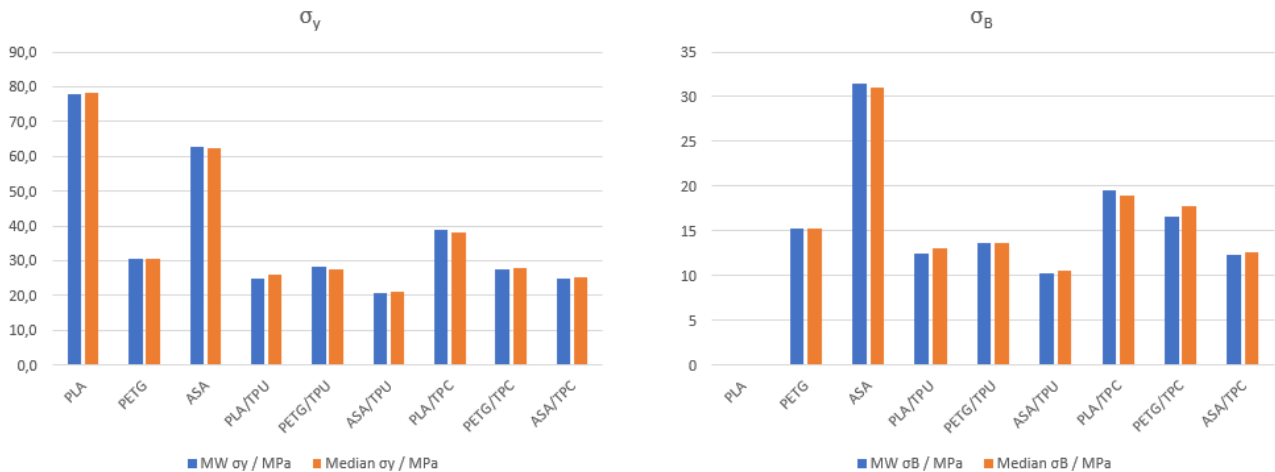


Bild 51: Balkendiagramme der Druckfließspannung σ_y und der Druckbruchspannung σ_B

Die höchste Druckfließspannung erreicht das PLA mit 78,0 MPa vor ASA mit 62,8 MPa und PETG (30,7 MPa). Die Dehnbarkeit von TPC und TPU sind zu hoch, sodass keine gültige Messung durchgeführt werden kann. Bei den Multimaterialproben zeigt sich, dass die TPC-Kombinationen höhere Druckfestigkeiten erreichen als die TPU-Kombinationen und dabei PLA/TPC die höchste Druckfließspannung unter den Werkstoffkombinationen erreicht mit $\sigma_y = 39,0$ MPa. Bei der Druckspannung, die während des Bruchs aufgenommen wird, erzielt ASA den höchsten Wert mit $\sigma_b = 31,4$ MPa. Die PLA-Proben können nicht bis zum Bruch geprüft werden, da diese aufgrund der Elastizität des Werkstoffs ohne Bruch gestaucht werden. Bei den Werkstoffkombinationen sind die Druckfestigkeitsverhältnisse bei Bruch ähnlich wie bei der Druckfließspannung und folglich erreichen die PLA/TPC-Proben den höchsten Festigkeitswert mit $\sigma_b = 19,5$ MPa. Obwohl die PLA/TPC-Verbindung gute mechanische Eigenschaften aufweist, zeigen sich deutliche Anhaftungsprobleme bei der Verbindungsnaht, sowohl bei den Zugproben als auch bei den Druckpro-

ben. Eine weitere Erkenntnis ist, dass die ASA/TPU-Proben und die ASA/TPC-Proben an der Verbindungsnaht auseinanderbrechen, wohingegen die PLA/TPU-Proben, die PETG/TPU-Proben und die PETG/TPC-Proben fließend an der Schnittstelle verformt werden, was für eine bessere Anhaftung zwischen den Werkstoffen spricht.

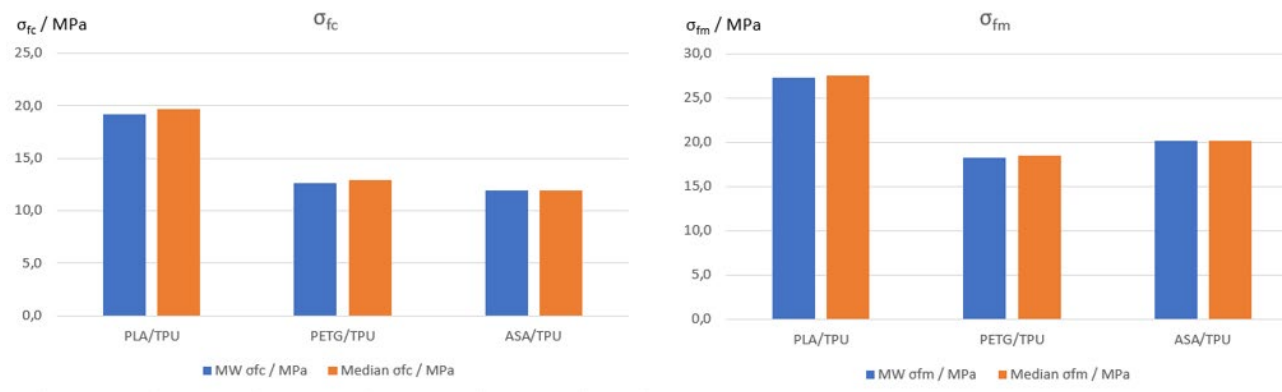


Bild 52: Balkendiagramme für σ_{fc} und σ_{fm} der Biegeversuche

Aus den **Biegeversuchen** (vgl. Bild 52) geht hervor, dass die PETG/TPU-Kombination und die ASA/TPU-Kombination keine erheblichen Unterschiede in den Biegefestigkeiten aufweisen. Im Vergleich dazu weist die Kombination aus PLA/TPU höhere Biegefestigkeiten auf mit $\sigma_{fc} = 19,2$ MPa und $\sigma_{fm} = 27,3$ MPa. Die einzelnen Messergebnisse werden durch eine Punktebewertung, welche in Tabelle 7 ersichtlich ist, miteinander verglichen.

Tabelle 7: Bewertungsschema für die Werkstoffprüfungen

Punktetabelle											
Punkte / 1	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
Prozent / %	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0
Zugprüfung											
RP _{0,2} / MPa	31,1	28,0	24,9	21,8	18,7	15,6	12,4	9,3	6,2	3,1	0
RP ₁ / MPa	34,2	30,8	27,4	23,9	20,5	17,1	13,7	10,3	6,84	3,42	0
R _m / MPa	34,3	30,9	27,4	24,0	20,6	17,2	13,7	10,3	6,86	3,43	0
A _{max} / %	9,13	8,22	7,30	6,39	5,48	4,57	3,65	2,74	1,83	0,913	0
Druckprüfung											
σ_y / Mpa	39,0	35,1	31,2	27,3	23,4	19,5	15,6	11,7	7,80	3,90	0
σ_1 / Mpa	0,547	0,492	0,438	0,383	0,328	0,274	0,219	0,164	0,109	0,055	0
σ_8 / Mpa	19,5	17,6	15,6	13,7	11,7	9,75	7,80	5,85	3,90	1,95	0

Für die **Bewertung** ist ein Punktespektrum von 1 bis 10 Punkten vorgesehen. Dabei werden dem höchsten gemessenen Wert einer Werkstoffkombination 10 Punkte zugeordnet. Von diesem Höchstwert ausgehend werden in 10 %-Schritten Intervalle gebildet, denen ebenfalls jeweils die Punkte absteigend zugeordnet werden. 0 Punkte erhält eine Werkstoffkombination, wenn diese nicht gefertigt werden konnte. In Bild 53 ist das Ergebnis der Analyse der Werkstoffkombinationen ersichtlich.

Werkstoff	RP _{0,2} -Punkte	RP ₁ -Punkte	R _M -Punkte	A _{max} -Punkte	σ _y -Punkte	σ ₁ -Punkte	σ _B -Punkte	Gesamt
PLA/TPU	7	7	7	6	6	10	6	49
PETG/TPU	5	6	6	9	7	8	6	47
ASA/TPU	6	6	6	10	5	3	5	41
PLA/TPC	10	10	10	6	10	6	10	62
PETG/TPC	0	0	0	0	7	7	8	22
ASA/TPC	0	0	0	0	6	4	6	16

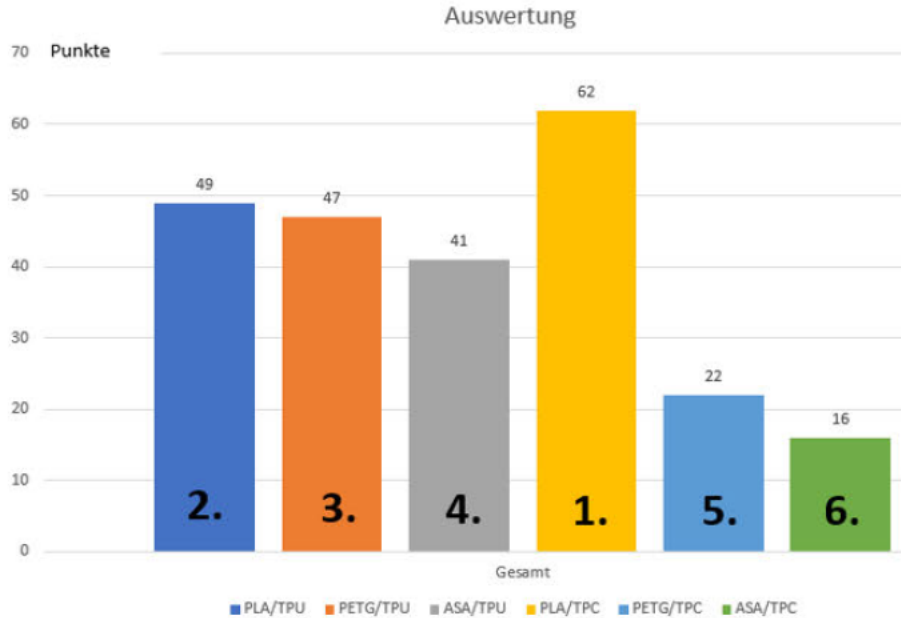


Bild 53: Analyse der Werkstoffkombinationen

Durch die in der Punktetabelle zugeordneten Punkte ergibt sich, dass die PLA/TPC-Verbindung mit 62 Punkten die höchsten mechanischen Eigenschaften bei Zug- und Druckbelastungen hat. In fünf von sieben Bewertungskategorien erreicht diese Verbindung die Höchstpunktzahl mit 10 Punkten. Mit einer erheblichen Differenz von 13 und 15 Punkten schneiden die Kombinationen aus PLA/TPU und PETG/TPU schlechter ab als die PLA/TPC-Verbindung, obwohl diese Verbindungen eine bessere Schnittstellenanhaftung aufweisen als die PLA/TPC-Proben. Die PETG/TPC- und die ASA/TPC-Kombinationen erhalten mit einer deutlichen Differenz die geringsten Punktzahlen, was unter anderem an den nicht zu fertigenden Zugproben liegt. Für die Optimierung des Inlays zeigt sich, dass konstruktive Geometrien für die Dichtlippe entwickelt werden müssen, um die Verbindung an den Übergangsbereichen zweier Werkstoffe zu unterstützen. Weiterhin wird das Inlay aufgrund der besten mechanischen Eigenschaften aus PLA und TPC gefertigt. Falls die nötige Anhaftung der beiden Werkstoffe nicht durch konstruktive Anpassungen erzeugt werden kann, ist die Fertigung aus PLA/TPU eine Alternative, besonders da bislang keine Festigkeitswerte für die Verbindungsbauteile festgelegt wurden.

Vorausgewählte additive Verfahren in Testreihen hinsichtlich dimensionaler Genauigkeit evaluieren (AP 3.2.2)

Im Arbeitspaket 3.2.2 wird eine umfassende Untersuchung zur Geometrie-Genauigkeit durchgeführt, um die geometrische Leistungsfähigkeit der Anlage zum Selektiven Lasersintern (SLS) zu

bewerten. In diesem Zusammenhang wird ein **Benchmark-Probekörper** verwendet, der verschiedene Geometrien und Formen enthält. Diese wurden gemäß den Normen DIN EN ISO / ASTM 520902 und unter Berücksichtigung der Arbeit von [OLE-20] entwickelt.

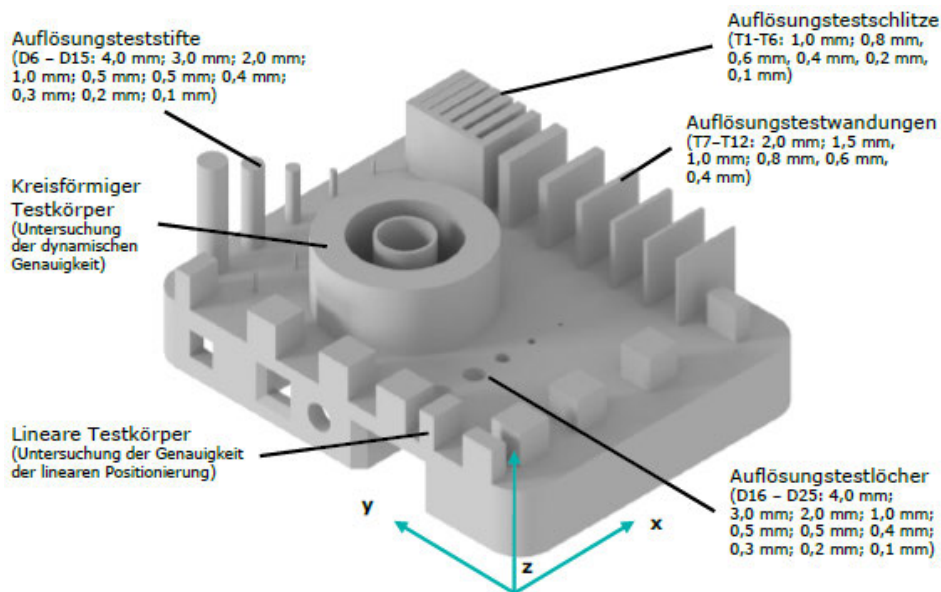


Bild 54: SLS-Prüfkörper nach [OLE-20]

Die Prüfgeometrien werden, wie auch bereits die mechanischen Versuche, in drei unterschiedlichen Aufbaurichtungen (0°, 45°, 90°) mittels des SLS-Verfahrens gefertigt. Die Testobjekte auf dem Benchmark-Probekörper sind alle auf einer einheitlichen Baufläche von 50 mm x 65 mm angeordnet. Diese Auswahl erfolgt gezielt, um Erkenntnisse über die lineare und dynamische Genauigkeit des SLS-Systems zu gewinnen und gleichzeitig die Grenzen in Bezug auf die jeweiligen Auflösungen zu ermitteln. Hierfür werden **zwei Benchtop-Anlagen** verglichen. Die Lisa Pro, mit einem sogenannten Gantry-System, bei welchem der Laser über ein kartesisches System verfahren wird, und die Lisa X. Die Lisa X besitzt ein Laser-Scannersystem, welches deutlich höhere Geschwindigkeiten und Beschleunigungen umsetzen kann.

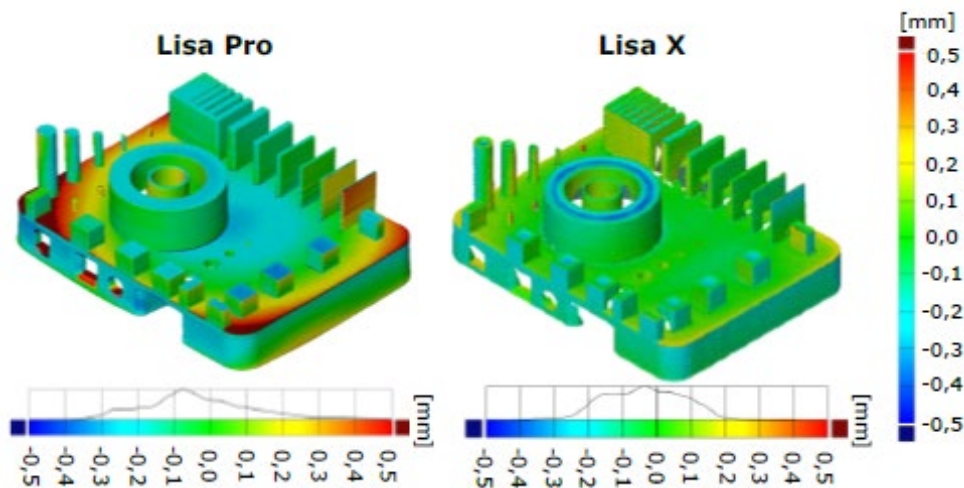


Bild 55: Soll-Ist-Vergleich der Geometriegeauigkeit bei flacher Positionierung

Für die Untersuchung der Geometriegenauigkeit werden insgesamt 3 Probekörper je Anlage gefertigt. Dabei werden alle Probekörper flach im Bauraum platziert. Bild 55 zeigt beispielhaft den Soll-Ist-Vergleich jeweils einer Probe aus beiden Anlagen. Mithilfe dieser Prüfgeometrien werden minimale Größen qualitativ und quantitativ identifiziert. Dazu erfolgt eine Beurteilung der dimensional Genauigkeit der gedruckten Teile, indem sie entweder direkt vermessen oder per 3D-Scan analysiert werden.

Die Proben der Lisa X (mit Galvo-Scanner) weisen laut Verteilung im Schnitt **Geometrieabweichungen** von etwa $\pm 0,30$ mm auf, während die Proben der Anlage mit Gantry-System (Lisa Pro) Abweichungen von etwa $\pm 0,60$ mm aufzeigen. Hierbei neigen die Proben der Lisa Pro zu deutlich mehr Verzug, sodass gerade am Rand der Probe die Abweichungen erkennbar sind. Der Verzug ist auf die ungünstige flache Platzierung in Kombination mit den langsamen Verfahrensgeschwindigkeiten des Gantry-Systems zurückzuführen. Hierdurch kommt es durch die lange Belichtungszeit der Fläche zu ungleichmäßiger Wärmeverteilung, sodass das Bauteil zu Verzug neigt. Die Proben aus der Lisa X sind bei gleicher Positionierung deutlich verzugsärmer. Hier ist davon auszugehen, dass mithilfe der höheren Laserleistungen sowie der schnelleren Scangeschwindigkeiten die Flächen schneller belichtet werden können, wodurch eine homogenere Temperaturverteilung erreicht wird.

Die Untersuchung der **Auflösungsdetails** zeigt, dass bei beiden Anlagen die Auflösungsstifte bis max. 1,00 mm Durchmesser gefertigt werden, wobei die durchschnittlichen Abweichungen etwa 0,20 mm (Lisa Pro) beziehungsweise 0,10 mm (Lisa X) betragen. Hinsichtlich der Testwandungen lassen sich an beiden Benchtop-Anlagen Wandstärken bis etwa 0,60 mm Dicke und Abweichungen von 0,10 mm fertigen. Bei den Auflösungstestlöchern lassen sich kleinstmögliche Durchmesser von 1,00 mm und Abweichungen von 0,10 mm (Lisa Pro) beziehungsweise 0,30 mm (Lisa X) realisieren. Die bessere Umsetzbarkeit von kleineren Lochdurchmessern mit der Lisa Pro ist vermutlich durch die feinere Pulvergrößenverteilung des PA12 Smooth-Pulvers ($d_{50} = 41,0 \mu\text{m}$) gegenüber PA12 Industrial ($d_{50} = 62,0 \mu\text{m}$) gegeben. Zusätzlich zeigten Untersuchungen durch [OLE-20], dass das Pulver des Herstellers Sinterit eine höhere Schmelzenthalpie aufweist, wodurch das umliegende Pulver innerhalb des Loches nicht aufgeschmolzen wird.

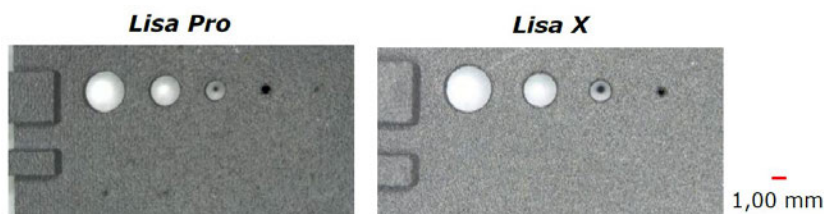


Bild 56: Mikroskopieaufnahmen der Auflösungstestlöcher von 4,00 mm bis 0,10 mm

Beide Benchtop-Anlagen ermöglichen kleinstmögliche Abstände von Testschlitzen von 0,6 mm mit Abweichungen von 0,05 mm. Lediglich die Lisa Pro ermöglicht vereinzelt noch Abstände von

0,4 mm, bei denen das dazwischenliegende Pulver entfernt werden kann. Bei der Lisa X kommt es hier zu Pulveransinterungen zwischen den Wänden (Bild 57).

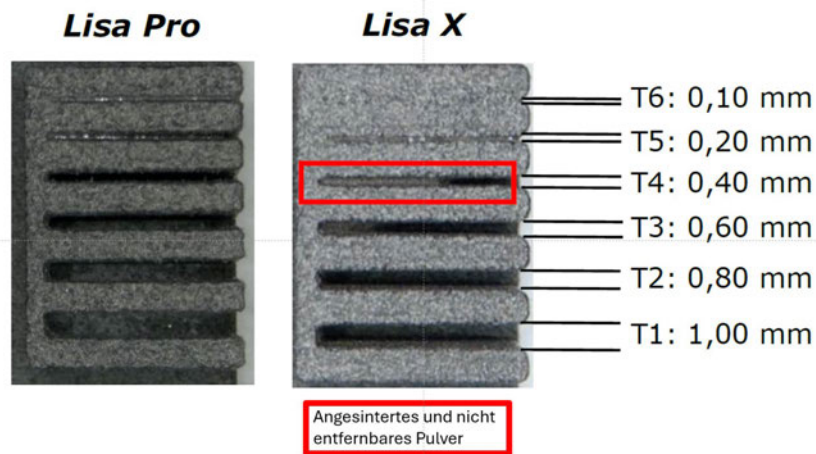


Bild 57: Gegenüberstellung der Auflösungsstestschlitz

Insgesamt lässt sich ein Teil der Geometrieabweichungen an der *Lisa Pro* auf den stärkeren Verzug zurückzuführen, welcher durch die längere Belichtungszeit, bedingt durch das Gantry-System, verursacht wird. Weitere Untersuchungen zeigen jedoch, dass bereits durch eine leicht geneigte Positionierung ebenfalls gute Ergebnisse am Benchtop-System mit Gantry-Antrieb (*Lisa Pro*) erreicht werden können. Bereits eine **Neigung um 15° zur Bauplattform** in x- und y-Richtung ermöglicht die Fertigung deutlich verzugsärmerer Proben (Bild 58).

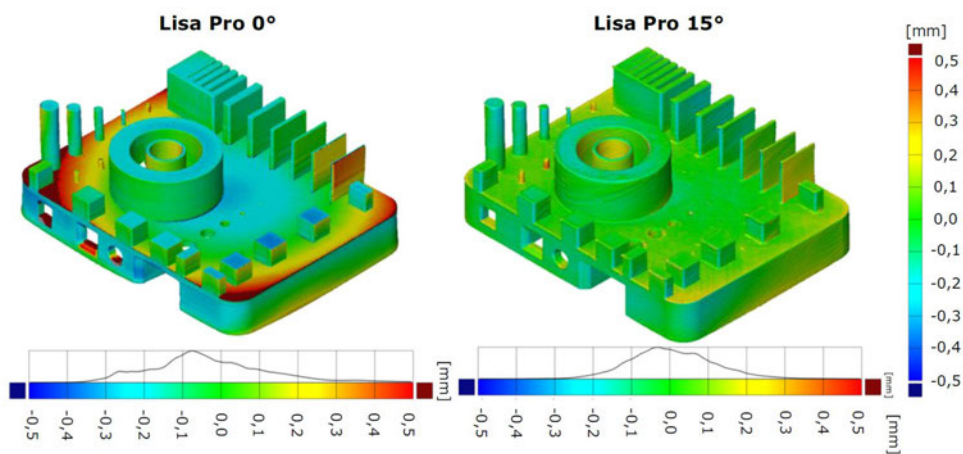


Bild 58: Soll-Ist-Vergleich der Lisa Pro in Abhängigkeit des Neigungswinkels

Die mechanisch-technologische Eigenschaften und die dimensionale Genauigkeit sind entscheidende Faktoren, die über die Qualität und Zuverlässigkeit der gedruckten Teile sowie über die Anwendbarkeit der Verfahren im Hinblick auf das Produktkonzept Aufschluss geben werden. Mit diesen Erkenntnissen können fundierte Entscheidungen für das weitere Vorgehen im Projekt getroffen und möglicherweise Anpassungen oder Optimierungen in der Verfahrensauswahl vorgenommen werden.

Arbeitspaket 3.2.3 Prüfung Klebmuffen-ähnlicher Strukturen

Im Rahmen des Arbeitspakets 3.2.3 wird, teilweise parallel zu den Entwicklungen in AP 3.2.1, das Inlay an die Anforderungen der ausgewählten Fertigungsverfahren angepasst. Die beiden ausgewählten Verfahren sind das SLS-Verfahren und das FLM-Verfahren. Die entwickelten Geometrien werden in Bezug auf Ihre Durchmessertoleranz und die Dichtigkeit untersucht. Bevor die Ergebnisse der beiden Fertigungsverfahren vorgestellt werden, wird zunächst die im Arbeitspaket verwendete Prüfmethodik erläutert.

Um das Toleranzspektrum der anwendbaren Bambusrohre ermitteln zu können, ist eine **Durchmesserprüfung** notwendig. Hierfür wurden unterschiedliche Probekörper über eine FLM-gefertigt und durch Vermessen als solche qualifiziert (siehe Bild 59).



Bild 59: Prüfkörper

Die Anpassungsfähigkeit einer Lippenkonstruktion an Bambusrohre verschiedener Dicke wird jeweils in einer Testreihe mittels Probekörper bestimmt. Die Probekörper haben eine zylindrische Form und überdecken einen Prüfbereich von 16,5 bis 21 mm in 0,5 mm-Abstufungen. Es ist zu beachten, dass diese Art von Prüfung nur einer Annäherung eines Bambusrohrs entspricht.

In die vorgesehenen Inlaymodelle werden die einzelnen Prüfkörper der Größe nach eingesetzt. Bei einem Bruch des Inlays ist die Prüfung abgeschlossen und der Durchmesser des unmittelbar zuvor verwendeten Prüfkörpers stellt den maximal aufnehmbaren Durchmesser dar. Das Prüfverfahren wird als Toleranzprüfung bezeichnet. Als Toleranz werden die Nenndurchmesser des zuerst und zuletzt einwandfrei einschiebbaren Prüfkörpers angegeben

Am IaAM wurde bereits ein Verfahren zur **Dichtigkeitsprüfung** entwickelt und etabliert. Dieses wird auch zur Beurteilung der Inlays genutzt. Die Dichtigkeitsprüfung erfolgt als nachgelagerter Schritt zur Toleranzprüfung, sodass nur Konstruktionen, welche die Toleranzprüfung erfolgreich bestanden haben, für diese Prüfung gewählt werden. [REDACTED]

[REDACTED] Die Prüfung wird unter Verwendung von Honig als Prüfmedium durchgeführt, da Honig bei vergleichbaren Fließigenschaften wiederverwendbar und kostengünstiger als der verwendete [REDACTED]

Die Einspritzung erfolgt per Klebpistole, möglichst vertikal und mit gleichmäßigem Druck.



Bild 60: Klebversuch

Im Anschluss wird die Dichtigkeit bewertet. Es werden vier unterschiedliche Klassen eingeführt, die es ermöglichen eine Beurteilung zwischen unzureichender, akzeptabler, guter und sehr guter Dichtigkeit zu beurteilen (Bild 61). Klebstoff tritt:

- O an mehr als 25 % des Dichtrings aus, lange bevor die Klebfuge komplett gefüllt ist.
- + an mehreren Stellen des Dichtrings aus, lange bevor die Klebfuge komplett gefüllt ist.
- ++ an einer Stelle des Dichtrings aus, zeitgleich wenn die Klebfuge komplett gefüllt ist.
- +++ erst am Dichtrings aus, wenn die Klebfuge gefüllt ist und weiter befüllt wird.

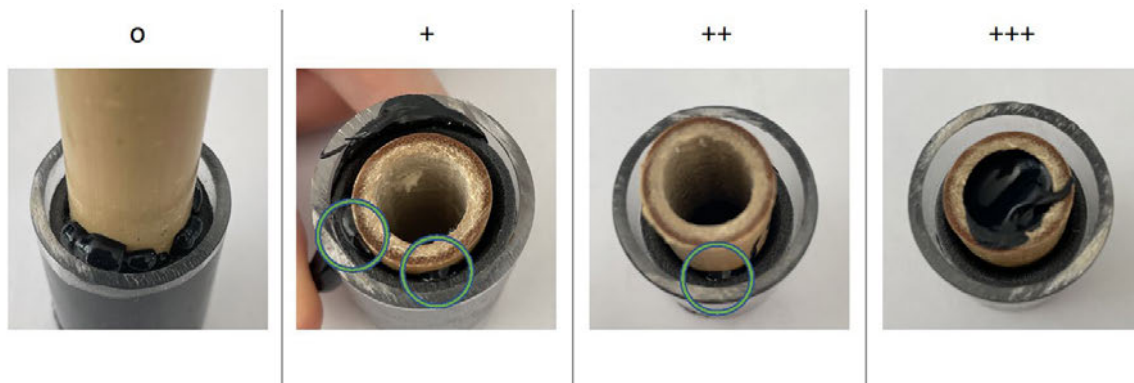


Bild 61: Klasseneinteilung der Dichtigkeit

Für die **Geometrieentwicklung für den SLS-Prozess** wird das Inlay vollständig aus PA12 gefertigt, wobei die unterschiedlichen benötigten Flexibilitäten durch verschiedene Wandstärken erreicht werden sollen. Durch die Anpassungen der Wandstärken soll eine hohe Dichtigkeit und Anpassungsfähigkeit an verschiedene Bambusrohrdurchmesser gewährleistet werden. Es werden unterschiedliche Designideen für das Inlay entwickelt und untersucht.

Die erste Konstruktionslösungen stellt die „**Abgewinkelte Dichtlippe**“ dar. Die Konstruktion ist in Bild 62 dargestellt.



Bild 62: Konstruktionsvariante „Abgewinkelte Dichtlippe“

Basis dieser Geometrie ist eine flache Lippenform, bei welcher die Lippen nach unten abgewinkelt werden. Die Dichtlippen werden gekrümmt, um sich elastisch zu verformen und das Bambusrohr zu führen. Dies führt zu der Einschränkung, dass die Lippen nicht in einer Schicht gefertigt werden können und unter Umständen die Schichten als Soll-Bruchstellen fungieren. Um die geeignete Lückenweite zwischen den Dichtlippen festzulegen, werden Modelle mit Lücken von 1° und $0,5^\circ$ gefertigt. Die hergestellten Dichtlippen mit 1° -Lücken weisen nach der Fertigung minimale, aber sichtbare Lücken auf. Nach einer Anpassung auf $0,5^\circ$ sind die Lücken als angedeutete Struktur für das Auge sichtbar, minimal gesintert, sodass sie keine sichtbaren Öffnungen aufweisen, die zum Austreten von Klebstoff führen würden. Ziel der abgewinkelten Dichtlippen ist es, durch die kombinierte Anwendung von Stufen und Sollbruchstellen eine möglichst effektive Anpassung an die Bambusrohrform zu erreichen. Da aber ein unregelmäßiges Abbrechen der Zähne festzustellen ist, wird diese Konstruktionsweise verworfen und folgend dargestellte Sollbruchstellenart konstruiert.

Die Sollbruchstelle besitzt ähnliche geometrische Abmessungen wie die Ausgangskonstruktion, wurde aber zu einer V-Kerbe umkonstruiert, um so ein gesteigertes Rissverhalten zu erreichen. Durch verlängerte Zähne kann die Anzahl an Sollbruchstellen von anfangs 4 auf 14 pro Zahn erhöht werden. Dieselbe Geometrie wird auch auf der Unterseite der Dichtlippe abgebildet. Die Ergebnisse der Toleranzprüfung sind in Tabelle 8 dargestellt.

Folgend werden die Ergebnisse der geprüften „Abgewinkelten Dichtlippen“-Modelle dargestellt und analysiert.

In einem ersten Schritt wird die Konstruktionslösung bezüglich unterschiedlicher Wandstärken (Proben 1 bis 4) untersucht. Es wird festgestellt, dass eine Wandstärke von 0,3 mm im Vergleich zu dickeren Wandstärken ein breiteres Durchmesserpektrum abdeckt. Jedoch fällt bei allen Modellen eine signifikante, ungleichmäßige vertikale Rissbildung in der Dichtlippe auf.

Tabelle 8: Versuchsergebnisse Abgewinkelte Dichtlippen

Modell- bezeichnung	Min. Wand- stärke (mm)	Lücken- anzahl	Anzahl an Prüfkörper	Ermitteltes Durch- messerspektrum [mm]
Abgewinkelte Dichtlippe 1	0,3	0	8	16,5 bis 20 mm
Abgewinkelte Dichtlippe 2	0,4	0	7	16,5 bis 19,5 mm
Abgewinkelte Dichtlippe 3	0,5	0	7	16,5 bis 19,5 mm
Abgewinkelte Dichtlippe 4	0,6	0	3	16,5 bis 17,5 mm
Abgewinkelte Dichtlippe 5	0,3	20	7	16,5 bis 19,5 mm
Abgewinkelte Dichtlippe 6	0,4	20	7	16,5 bis 19,5 mm
Abgewinkelte Dichtlippe 7	0,5	20	7	16,5 bis 19,5 mm
Abgewinkelte Dichtlippe 8	0,6	20	7	16,5 bis 19,5 mm
Abgewinkelte Dichtlippe 9	0,3	1	8	16,5 bis 20,0 mm
Abgewinkelte Dichtlippe 10	0,3	2	7	16,5 bis 19,5 mm
Abgewinkelte Dichtlippe 11	0,3	3	6	16,5 bis 19,0 mm
Abgewinkelte Dichtlippe 12	0,3	4	8	16,5 bis 20,0 mm

Um einer unerwünschten Rissbildung entgegenzuwirken, wird der Einfluss von in die Dichtlippen integrierten Lücken untersucht (Proben 5 bis 8). Hierbei werden die zuvor geprüften Modelle mit derselben Wandstärken mit insgesamt 20 Lücken versehen. Die Variation der Wandstärke in Verbindung mit den integrierten 20 Lücken zeigt keine wesentlichen Abweichungen hinsichtlich des erfassten Durchmesserspektrums. Allerdings führt eine höhere Wandstärke bei 20 Lücken zu erhöhtem Abbrechen gesamter Zähne, was sich negativ auf die zu erfüllende Dichtigkeit auswirkt.

Basierend auf vorherigen Ergebnissen wird die 0,3-mm-Variante der Dichtlippe für weitere Untersuchungen ausgewählt (Proben 9 bis 12). Hier zeigten sich die besten Durchmessertoleranzen. Da kein klarer Zusammenhang zwischen der Anzahl der integrierten Lücken und den erzielten Durchmesserspektren festgestellt werden konnte, werden alle vier Variationen zusätzlich einer Dichtigkeitsprüfung unterzogen (in Tabelle 8 grün dargestellt). Die Rissbildung der Modelle mit 20 integrierten Lücken erfolgt deutlich gezielter, sodass das Modell „Abgewinkelte Dichtlippe 5“ mit 0,3 mm, vor allem in Hinblick auf eine mögliche Reproduzierbarkeit, nicht verworfen und ebenfalls einer Dichtigkeitsprüfung unterzogen wird.

Zeitgleich wird die **Trichterform** entwickelt. Hier soll durch einen konischen Zulauf in Kombination mit abgerundeten Sollbruchstellen ein noch größerer Kontakt der Dichtung zum Bambusrohr hergestellt werden, um eine bessere Dichtwirkung zu erzielen.



Bild 63: Trichterform

Für die Trichterform, wie sie mit Bild 63 dargestellt ist, werden Modelle mit minimalen Wandstärken von 0,1; 0,2; 0,3 und 0,4 mm gefertigt. Da diese Dichtlippengeometrie die lückenlose Bauweise sehr starr macht, soll durch eine möglichst geringe minimale Wandstärke ein sauberer Bruch provoziert werden.

Tabelle 9: Versuchsergebnisse Trichterform

Modellbezeichnung	Min. Wandstärke (mm)	Lückenanzahl	Anzahl an Prüfkörper	Ermitteltes Durchmesserspektrum [mm]
Trichterform 1	0,1 mm	0	7	16,5 bis 19,5 mm
Trichterform 2	0,2 mm	0	4	16,5 bis 18,0 mm
Trichterform 3	0,3 mm	0	6	16,5 bis 19,0 mm
Trichterform 4	0,4 mm	0	6	16,5 bis 19,0 mm

Wie bei den Ergebnissen der Abgewinkelten Dichtlippe wird auch in diesem Kontext deutlich, dass die Verwendung der dünnsten Wandstärke zu einer Erhöhung der erfassten Durchmesserspektren führt. Das Fehlen von Lücken führt in den Versuchsreihen zu unkontrollierter Rissbildung. Die Sollbruchstellen erweisen sich in diesem Zusammenhang als nicht funktionsfähig. Ein kontrolliertes Brechen entlang dieser Stellen kann nur in wenigen Fällen erreicht werden. Um dennoch eine klare Vergleichbarkeit der einzelnen Modelle hinsichtlich der Wandstärke zu gewährleisten, ist für alle vier Modelle eine zusätzliche Dichtigkeitsprüfung vorgesehen

Bei den vorherigen Konstruktionen gingen die Lippen stets vom äußeren oberen Rand des Inlays aus und nutzen, letztlich als Trichterform, den freien Innenraum. Dadurch kamen die Sollbruchstellen jedes Zahns im Inlay auf einer eigenen Höhenlinie zu liegen. Alternativ werden im Konzept „**Einzelne Dichtringe**“ eben verlaufende, durchgehende Dichtringe umgesetzt, die in entsprechenden Höhen von der Inlay-Innenseite ausgehen und mit abgestuften Lippenbreiten der Trichterform nachempfunden sind (Bild 64, links). Versuchsergebnisse der Durchmesserprüfung zeigt Tabelle 10.



Bild 64: Variante „Einzelne Dichtringe“

Um eine unzulässige Klebstoffverteilung außerhalb des Inlays zu vermeiden, werden die einzelnen Dichtringe an den Außendurchmessers angepasst. Hiermit soll vermieden werden, dass der Klebstoff dem in Bild 64 (rechts) als roten Pfeil dargestellten Weg folgt. Zwischenzeitliche Prüfungen zeigen jedoch hohe Undichtigkeiten.

Ein hinsichtlich der Dichtigkeit verbessertes Konzept stellt die „**Doppeldichtlippe**“ dar. Das Inlay enthält hier eine zusätzliche Abdichtung in Form eines Deckels (Bild 65). Der Deckel weist eine durchgehende Höhe von 0,2 mm auf und verfügt über vier Sollbruchstellen pro Lippenzahn, mit gleicher Breite und Tiefe wie die ursprüngliche Inlay-Geometrie.

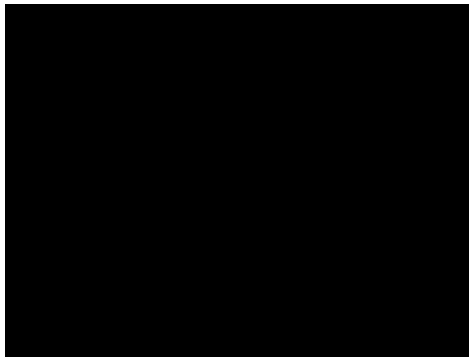


Bild 65: „Doppeldichtlippe“

Der Bereich zwischen Dichtlippe und Deckel ist jedoch schwer zugänglich, vor allem im Hinblick auf den Entpulverungsprozess. Um diese Zugänglichkeit zu erleichtern, wird der Abstand zwischen Deckel und eigentlicher Dichtlippe um 1,5 mm erhöht.

Als weitere und stark von den anderen abweichende Konstruktionslösung besteht das Konzept „**Mittiger Einspritzpunkt**“. Diese Konstruktionsidee ist in Zusammenarbeit mit dem IaAM entstanden. [REDACTED]

[REDACTED] Diese Konstruktion wird für die Versuchsdurchführung in Kombination mit der „Abgewinkelten Dichtlippe 5“ gefertigt.

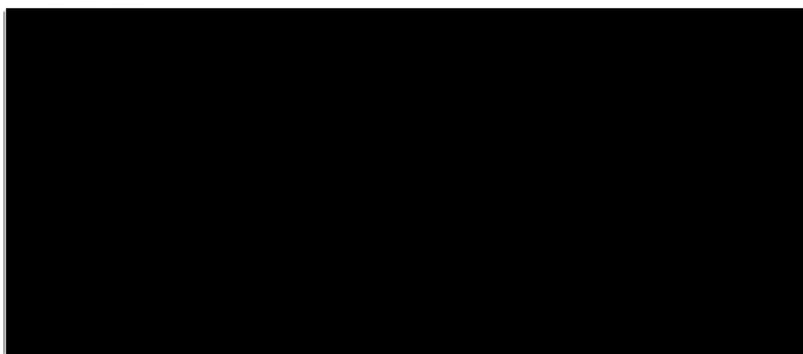


Bild 66: Variante „Mittlerer Einspritzpunkt“

Die Geometrie kann dasselbe Durchmesserspektrum wie die Abgewinkelte Dichtlippe aufnehmen. Um die Verteilung des Klebstoffs in dieser Konstruktion und die sich daraus ergebende Dichtigkeit zu bewerten, ist ebenfalls eine Dichtigkeitsprüfung vorgesehen.

Tabelle 10: Versuchsergebnisse der weiteren Varianten

Modellbezeichnung	Min. Wandstärke [mm]	Anzahl an Prüfkörpern	Ermitteltes Durchmesserspektrum [mm]
Einzelne Dichtringe	0,3	8	16,5 - 20
Doppeldichtlippe + Einzelne Dichtringe	0,3	8	16,5 - 20,0
Mittiger Einspritzpunkt + Abgewinkelte Dichtlippe 5	0,3	7	16,5 - 19,5

Im Rahmen der **Dichtigkeitsprüfung** erfolgt der Vergleich der existierenden Dichtlippenmodelle, sowohl hinsichtlich ihrer erfassten Durchmesserspektren als auch in Bezug auf die erzielte Dichtigkeit. In der Messreihe unter Verwendung von **Honig** wird kontinuierlich dasselbe Bambusrohr mit einem Rohraußendurchmesser von 17,5 - 18,6 mm eingesetzt. Diese Durchmesser konnten von den geprüften Modellen bei den vorausgegangenen Durchmesserprüfungen erfolgreich aufgenommen werden.

Die vorliegenden Ergebnisse zeigen deutliche Unterschiede in Bezug auf die erzielte Dichtigkeit. Die Konstruktion „Einzelne Dichtringe“ bleibt trotz durchgeführter Modifikationsschritte undicht. Dies ist auf eine schlechte Anpassungsfähigkeit der Dichtringe an das Bambusrohr zurückzuführen. Ähnlich verhält sich die Doppeldichtung, obwohl diese primär nicht für eine vollständige Abdichtung, sondern vielmehr zur Verbesserung minimaler Rest-Undichtigkeiten der eigentlichen Dichtlippe konzipiert ist. Die abgewinkelten Dichtlippen, insbesondere Dichtlippe 10 und 12, zeigen eine untereinander ähnlich gute Dichtigkeit. „Abgewinkelte Dichtlippe 12“ wird für den Epoxidharz-Versuch ausgewählt (in Tabelle 11 grün dargestellt). Dies hängt mit der Integration von 4 statt nur 2 Lücken zusammen, wodurch, wie zuvor anhand der 20 Lücken festgestellt, ein leicht besseres Rissverhalten gegeben ist. Die „Abgewinkelte Dichtlippe 5“ in ihrer Ausführung als „Mittiger Einspritzpunkt“ zeigt ebenfalls gute Dichtigkeitsergebnisse und wird daher zusätzlich im folgenden [REDACTED] getestet (in Tabelle 11 grün dargestellt). Die „Muffen-/

Trichterform“ zeigte ebenfalls gute Dichtigkeitsergebnisse. Hier ragt die Variante mit einer Wandstärke von 0,3 mm heraus (in Tabelle 11 grün dargestellt). Dies könnte vor allem auf die unkontrollierte Rissbildung zurückzuführen sein, die sich im Fall des 0,3 mm dicken Modells positiv auf die Dichtigkeit ausgewirkt hat.

Tabelle 11: Ergebnisse Dichtigkeitsprüfung mit Honig

Bezeichnung des Inlays	Dichtigkeit
Abgewinkelte Dichtlippe 9	+
Abgewinkelte Dichtlippe 10	++
Abgewinkelte Dichtlippe 11	+
Abgewinkelte Dichtlippe 12	++
Muffen-/ Trichterform 1	++
Muffen-/ Trichterform 2	++
Muffen-/ Trichterform 3	+++
Muffen-/ Trichterform 4	++
Einzelne Dichtringe	o
Doppeldichtlippe + Einzelne Dichtringe	o
Mittiger Einspritzpunkt + Abgewinkelte Dichtlippe 5	++

Die Überprüfung der Dichtigkeit einzelner Dichtlippenmodelle erfolgt [REDACTED] (Tabelle 12). Dieser Versuch wird in Zusammenarbeit mit dem IaAM durchgeführt. Für den Vergleich der nachfolgend geprüften Modelle werden Bambusrohrdicken ausgewählt, die im Durchschnitt Außendurchmesser von 17,6 mm aufweisen.

Tabelle 12: Ergebnisse Dichtigkeitsprüfung mit Kleber

Bezeichnung des Inlays	Dichtigkeit
Abgewinkelte Dichtlippe 12	+++
Muffen-/ Trichterform 3	++
Abgewinkelte Dichtlippe 5	++

Aufgrund der sehr guten Dichtigkeitsergebnisse des Modells „**Abgewinkelte Dichtlippe 12**“ wird es als Basis für die Prüfung verschiedener Konstruktionserweiterungen ausgewählt:

- Abgewinkelte Dichtlippe 12 + Doppeldichtlippe
- Abgewinkelte Dichtlippe 12 + Mittiger Einspritzpunkt
- Abgewinkelte Dichtlippe 12 + Doppeldichtlippe + Mittiger Einspritzpunkt

Eine Toleranzprüfung dieser Modelle wird nicht durchgeführt, da zuvor nachgewiesen wurde, dass die Erweiterungen dieser Konstruktionen zu keiner Veränderung des Durchmesserpektrums führen. [REDACTED], dass die Erweiterung der Konstruktion um eine Doppeldichtlippe nur bei minimal vorhandenen Undichtigkeiten zu einer Steigerung der Dichtigkeit führen kann. Darüber hinaus stellt die Erweiterung eines „Mittigen Einspritzpunktes“ mit zusätzlicher Doppeldichtlippe eine effektive Methode zur Erzielung einer guten Abdichtung dar.

Tabelle 13: Ergebnisse Dichtigkeitsprüfung weitere Varianten

Bezeichnung des Inlays	Dichtigkeit
Abgewinkelte Dichtlippe 12 + Doppeldichtlippe	+++
Abgewinkelte Dichtlippe 12 + Mittiger Einspritzpunkt	++
Abgewinkelte Dichtlippe 12 + Mittiger Einspritzpunkt + Doppeldichtlippe	+++

Für die **Geometrieentwicklung für den FLM-Prozess** werden zwei Ansätze verfolgt. Der erste Ansatz besteht in der Kombination von [REDACTED]. In Bild 67 sind Geometrieanpassungen zu erkennen, die durchgeführt werden, um das ursprüngliche Inlay, welches für eine Fertigung aus nur einem Werkstoff konzipiert wurde, auf das Multimaterialverfahren anzupassen. Außerdem ist Ziel der Optimierung das Inlay ohne Stützstrukturen zu fertigen, um den Nachbearbeitungs- und den Materialaufwand auf ein Minimum zu reduzieren.

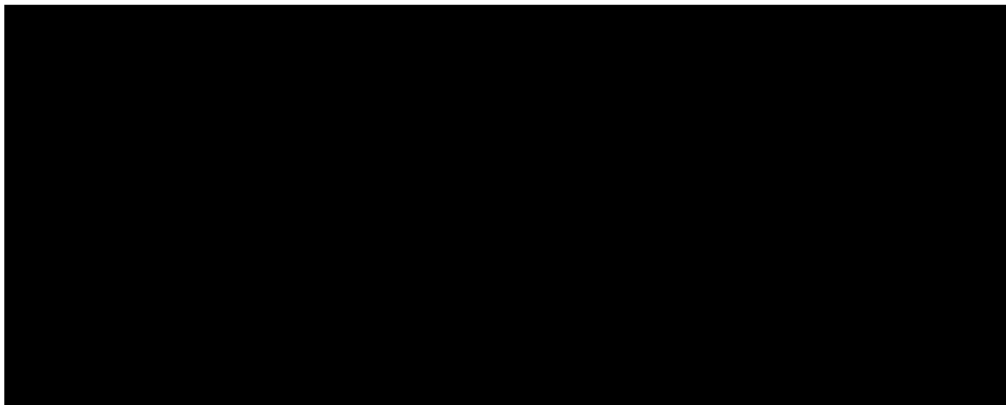


Bild 67: Anpassung des Inlays für den Multimaterialprozess

Die **Kombination** [REDACTED] in einem Prozess hat Ihre Hürden im Bereich der Fertigung der integrierten Dichtringe, wenn diese nicht auf dem Druckbett aufliegen. Hierbei kommt es beim Drucken im freien Raum zu einem Absacken des Dichtrings und starken Deformationen.

[REDACTED] Diese Sollbruchstellen werden beim flexiblen TPC nicht mehr benötigt. Weiterhin werden die Dicke beider Ringe vorläufig von 0,2 mm auf 1 mm erhöht, um die Detailierung für den FLM-Prozess zu senken und eine höhere Stabilität zu erhalten. Zusätzlich werden die Stützen rund um das Inlay von 2,26 mm auf 4,1 mm verbreitert und die Dicke von 1 mm auf

1,5 mm angepasst, um die Stabilität des Inlays zu erhöhen und die Auflagefläche zwischen den beiden Werkstoffen an den Schnittstellen zu vergrößern. [REDACTED]

[REDACTED] Eine weitere Anpassung ist Erhöhung der Bodendicke von 0,75 mm auf 1,5 mm, damit diese den Belastungen beim Zusammenfügen mit dem Bambusrohr standhält.

Mit den erfolgreich gefertigten Inlays werden im Anschluss zwei verschiedene anwendungsbezogene Prüfungen durchgeführt. Das Ergebnis der **Durchmesserprüfung** nach der ersten geometrischen Anpassung des Inlays zeigt einen Durchmesserbereich von 15 mm bis 16 mm. Dieser geringe Toleranzbereich begründet sich durch die schlechte Anhaftung zwischen dem steifen und dem flexiblen Kunststoff bei der Geometrie aus Bild 67. Die Prüfung wurde mit zwei baugleichen Inlays durchgeführt und bei beiden Prüfreiheiten hat sich die Dichtlippe beim Einfügen eines Prüfkörpers mit 16,5 mm Durchmesser gelöst.

[REDACTED] Der abdichtende Verteilring sorgt jedoch für einen zu hohen Druck im Klebspalt, wodurch Klebstoff in das untere Ende des Bambusrohrs gelangt. Des Weiteren ist an der Probe aus Bild 68 ersichtlich, dass die Druckqualität der Dichtlippen gesteigert werden muss. Trotz eines geringen Überhangs von 1,8 mm führt der Druck ohne Stützen zu Löchern und größeren Innendurchmessern, was zu leichtem Austreten von Klebstoff führt.

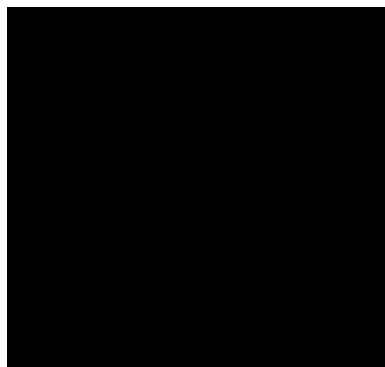


Bild 68: Fehlerhafter Dichtring durch mangelnde Unterstützung

Das Inlay wird wie in Bild 69 ersichtlich weiterentwickelt. [REDACTED]



Bild 69: Zweite Anpassung des Inlays

Die Dichtringe werden nun mit einem konzentrischen Füllmuster gefertigt. Dabei muss die Bewegungsabfolge des Extruders von außen nach innen erfolgen. Dafür wird im Slicerprogramm die Wandlinieneinstellung [REDACTED] die obere/untere Dicke auf 0,0 mm definiert und der randomisierte Füllstart ausgeschaltet. [REDACTED]

[REDACTED] Für diese Anpassung werden drei Varianten der **Dichtringanbindung** untersucht, welche in Bild 70 zu sehen sind.

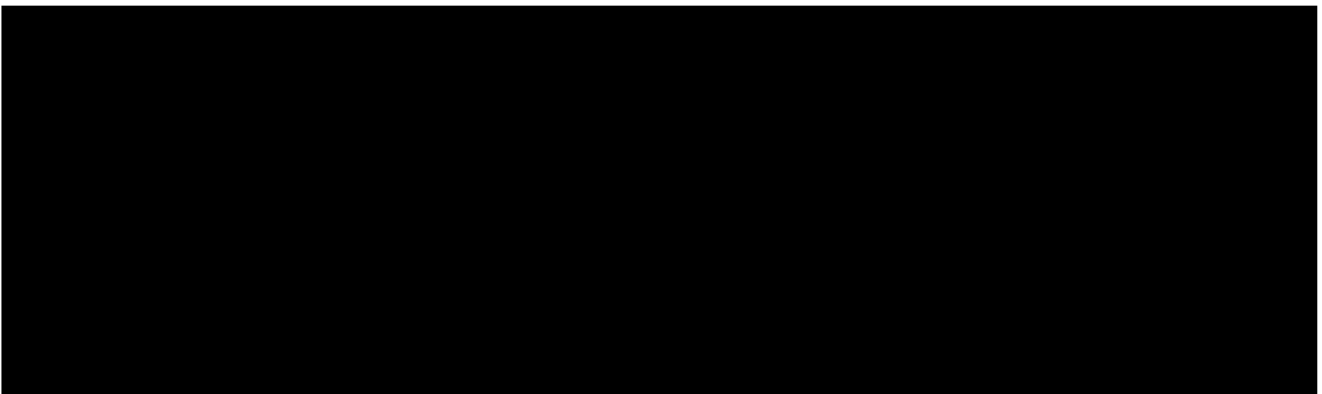


Bild 70: Dichtringanbindung

Bei Version 1 der Dichtlippenanbindung wird der Dichtring um 0,8 mm in den Stützkörper gefertigt. Es entsteht ein Überhang von 1,8 mm und ein Abstand zum Rand des Inlays von 1,2 mm. Zusätzlich wird der Dichtring mit einer 0,6 mm dicken Schicht überdeckt. Durch das Einbauen des Dichtringes wird die Anbindung gesteigert und auch die Entnahme des Inlays verbessert, da die Anhaftung des Werkstoffes des Stützkörpers an der Bauplattform geringer ist. Version 2 wird durch eine Dreiecksform im Stützkörper erweitert, um die Auflagefläche zwischen den Körpern zu vergrößern. Für Version 3 wird eine Schwalbenschwanzverbindung verwendet.

Bei der Fertigung der drei Versionen zeigt sich, dass die Verringerung des Randabstandes auf 0,8 mm bei Version 2 und 3 zu einer Instabilität dieser Schichten führt, sodass das Inlay an diesen Stellen bricht. Außerdem ist an der Bruchstelle zu sehen, dass der Detaillierungsgrad der Dreiecks- und Schwalbenschwanzform zu klein ist, um diese im FLM-Verfahren zu fertigen. Es wird die Dicke der Stützpfiler von 1,5 mm auf 1,7 mm erhöht, da eine hohe Stabilität des Inlays

beim Zusammenbau der Verbindungsstruktur während des Klebeversuchs von großer Bedeutung ist.

Bei der **Durchmesserprüfung** zeigt sich, dass das Inlay ein Durchmesserspektrum von 15,5 mm bis 19 mm aufnehmen kann. Die Verbindung zwischen Dichtringen und Stützkörper löst sich auch beim Einführen großer Prüfkörper nicht. Das weiterentwickelte Inlay wird ebenfalls in dem **Dichtigkeitsprüfungen** untersucht. Dabei werden zwei Bambusrohrdurchmesser (15,5 mm und 18,9 mm) getestet. Das Ergebnis zeigt, dass bei beiden Proben die geforderte Dichtigkeit und die gleichmäßige Klebfugenfüllung erreicht werden. [REDACTED]

Basierend auf den Ergebnissen der Versuche des Inlays wird ein **einteiliger Prototyp** konstruiert und [REDACTED]

[REDACTED] Für den Zusammenbau werden zwei Bambusrohre von beiden Seiten durch die jeweils zwei Dichtringe eingeführt. Bei der Durchmesserprüfung kann der Prototyp ein Durchmesserspektrum von 16 mm bis 21 mm aufnehmen.

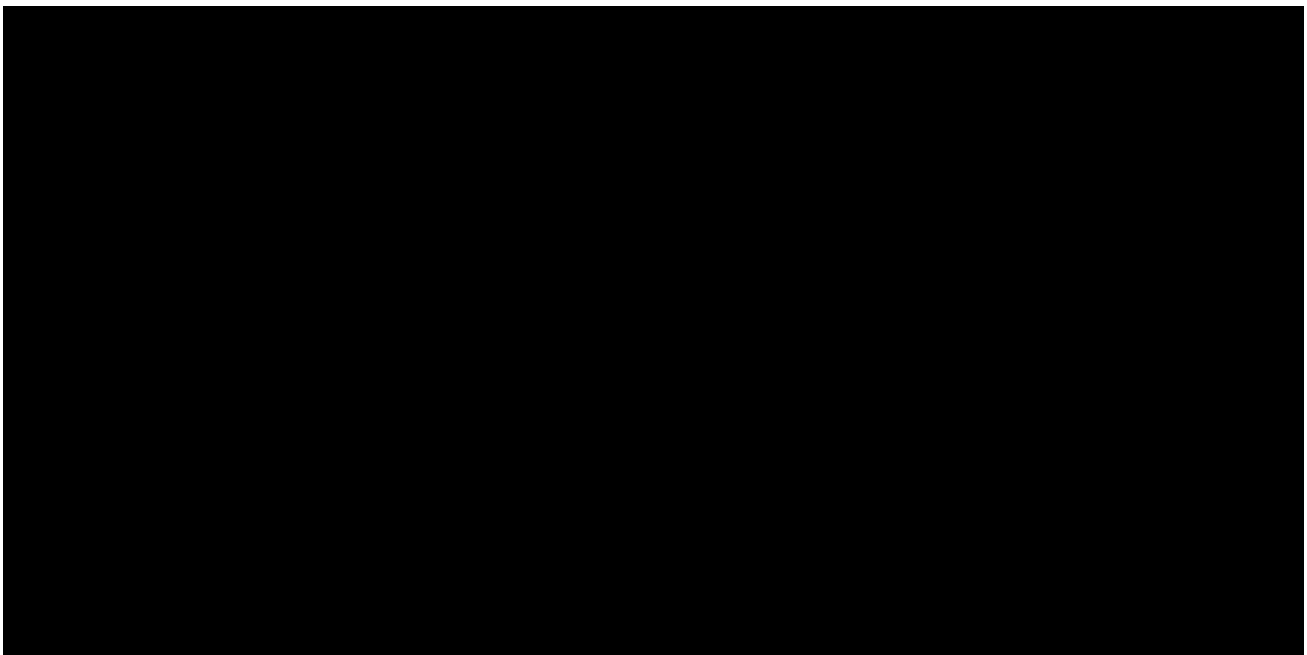


Bild 71: Kombination aus Inlay und Muffe

[REDACTED]
[REDACTED]
[REDACTED]
[REDACTED] Die weiteren Versuche fokussieren sich daher auf die prozess- und seriensichere Umsetzung der Dichtlippen [REDACTED]
[REDACTED] Trotz der besseren Verarbeitbarkeit im Prozess stellt sich das [REDACTED] als nicht erfolgsversprechend heraus, [REDACTED]

So können einzelne Inlays auf einer Bauplattform fehlerfrei umgesetzt werden. Sobald jedoch die Anzahl an Inlays erhöht wird und sich längere Verfahrswege des Düsenkopfes ergeben, kommt es zu erheblichen Deformationen und teilweisen Beschädigung der Inlays während des Fertigungsprozesses (Bild 72). Dies wird maßgeblich verursacht durch die große Flexibilität der vertikalen Stützen. Diese können jedoch nicht verstärkt werden, da hierdurch die gleichmäßige Verteilung des Klebstoffs behindert würde. Ein weiterer Nachteil ergibt sich durch die langen Prozesszeiten, bedingt durch die, aufgrund der Flexibilität des Material, notwendigen langsame Verfahrgeschwindigkeit

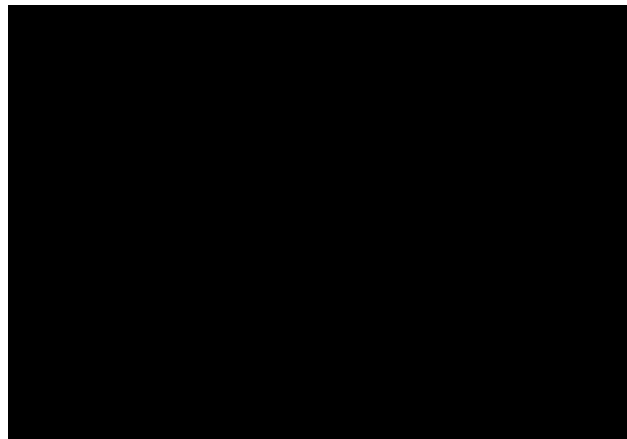


Bild 72: Inlays aus einem Material

Um die zuvor genannten Nachteile zu umgehen und die Reproduzierbarkeit des Prozesses zu verbessern, werden Versuche mit einem **zweigeteilten Inlay** durchgeführt (Bild 73).

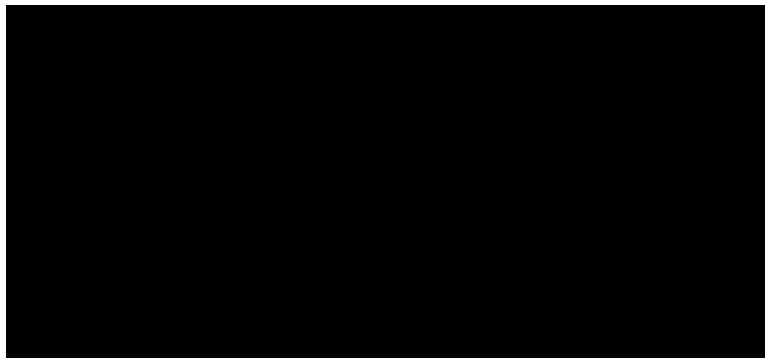


Bild 73: Zweiteiliges Inlay, Demonstrator

Durch die kann eine deutliche Reduktion der Fertigungszeit und somit eine Steigerung der Wirtschaftlichkeit erzielt werden. Bisher wurden für ein einteiliges Inlay 33 min Fertigungszeit benötigt. Bei den neuen Inlays können 10 Inlays (20 Einzelteile) in 1:33 h (ca. 9,5 min/Inlay) gefertigt werden (Bild 74). Dies übertrifft ebenfalls die Fertigungszeiten der Inlays im SLS-Prozess und beim Multimaterial-FLM-Prozess um ein Vielfaches.

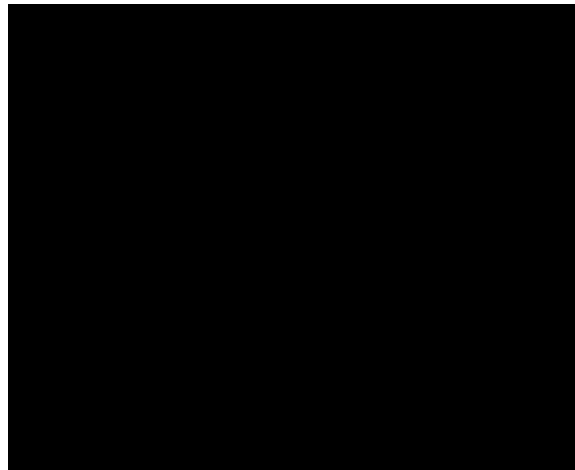


Bild 74: Fertigung zweiteiliges Inlay [redacted] Bauzeit: 1:33 h/10 Inlays

Ein weiterer Vorteil ist die deutlich gesteigerte Prozesssicherheit und -stabilität. Möglich wird der zweiteilige Aufbau der Inlays jedoch erst nach einer konstruktiven und gestalterischen Änderung.

[redacted]
[redacted]
[redacted]

Bisher wurde dieser Übergang scharfkantig gestaltet, wodurch er im Kontrast zu den harmonischen, natürlichen Geometrien der Bambusrohre stand. Um einen fließenden Übergang zwischen Bambusrohr und Muffe zu schaffen, werden die Kragen mit einer zusätzlichen Fase versehen. Der zweiteilige Aufbau der Inlays wird ebenfalls durch das IaAM untersucht, da weiterhin eine gleichmäßige Verteilung des Klebstoffs gewährleistet sein muss. Die Klebversuche mit zeigen, dass eine homogene Verteilung des Klebstoffs [redacted] [redacted] erreicht wird.

Neben der additiven Verarbeitung von Kunststoffen, wird ebenfalls das **metallische Laserstrahlschmelzen (LPBF)** untersucht worden. Dieses additive Fertigungsverfahren kommt bei den Fahrradbauteilen (Knotenpunkten) aufgrund der geänderten mechanisch-technologischen Anforderungen zur Anwendung. Hierbei wird der LPBF-Prozess mit der Aluminiumlegierung AlSi10Mg genutzt. Trotz der sehr großen Ähnlichkeit des metallischen Laserstrahlschmelzens mit dem selektiven Lasersintern von Kunststoffen gibt es einige entscheidende Unterschiede, die bei der Prozessauslegung und -planung berücksichtigt werden müssen. Insbesondere die beim Metall notwendigen Stützstrukturen und die geänderte Temperaturführung im Prozess müssen hier beachtet werden. Stützstrukturen müssen an den sogenannten Downskinflächen (Flächen mit einem Winkel $< 45^\circ$ zu Bauplattform) angebracht werden. Dabei dienen sie, entgegen der Bezeichnung, nicht als Stütze, sondern vielmehr als Zuganker um thermischen Verzügen entgegenzuwirken und das sogenannte Curling (Hochziehen) der Bauteile zu vermeiden. Da die Stützen aus dem gleichen Werkstoff wie die Bauteile gefertigt werden, müssen sie nach Abschluss des additiven Prozesses mechanisch entfernt werden. Dies führt in der Regel zu einer Verschlechterung der Oberflächenqualität und der Notwendigkeit der Nachbearbeitung. Im Rahmen des

Projektes werden die metallisch additiv gefertigten Bauteile ausschließlich als Knotenpunkt und/oder Muffe verwendet. Daher werden im Rahmen dieses Arbeitspaketes einfache Zylinder (Bild 75) gefertigt, in welche anschließend die Bambusrohre, unter Nutzung der entsprechenden FLM-gefertigten Inlays, eingeklebt und im Zugversuch untersucht werden. Die Fertigung der Fahrrad- und Kinderwagenbauteile ist im nachfolgenden Kapitel 2.1.3.3 beschrieben.



Bild 75: Zylinder AlSi10Mg für Klebversuche

2.1.3.3 Entwicklung additiver Fertigungsmethodik (AP 3.3)

Ziel bei der Entwicklung einer additiven Fertigungsmethodik ist die **automatische, individualisierte Konstruktion von Klebmuffen** in Abhängigkeit des Einbauorts und des jeweiligen Rohrstücks. Daher sind in diesem Arbeitspaket, neben der entsprechenden Programmierung und dem Aufbau einer parametrischen Konstruktion, umfangreiche Abstimmungen mit den beteiligten Projektpartnern notwendig. Bei den Abstimmungen geht es primär um ein einheitliches Datenformat und eine Austauschchnittstelle zur Übergabe von Informationen zu den Bambusrohren.

Für die Übergabe der geometrischen Informationen stehen zwei Möglichkeiten zur Verfügung. Zum einen können die Geometriedaten in einer Datentabelle übergeben werden. Die andere Möglichkeit besteht in der Übergabe von CAD-Modellen in neutralen Datenformaten (zum Beispiel STP oder IGES). Es ist beschlossen worden, mit formatierten Datentabellen in Form der **Datenbank** (vgl. AP 2.5, Kapitel 2.1.2.5) zu arbeiten. Aus den Scandaten in der NoSQL-Datenbank werden die entsprechenden Parameter zur Steuerung der automatisierten Konstruktion abgerufen. Dazu wird ein MongoDB Client in einem Konstruktionskript (siehe Arbeitspaket 3.3.1) integriert, welcher direkt mit der Datenbank interagiert.

Steuerungsparametern identifizieren und evaluieren (AP 3.3.1)

In Arbeitspaket 3.3.1 soll eine Verarbeitung der 3D-Scandaten erfolgen und ein automatisierter Aufbau einer angepassten Muffe umgesetzt werden. Ziel ist die vollautomatisierte Erstellung der Muffe, ohne dass manuelle Eingriffe erfolgen müssen. Dies bedingt die Nutzung eines skriptbasierten Konstruktionsprogramms.

Für die Erstellung einer parametrischen und flexibel anpassbaren Konstruktion müssen zunächst alle **Steuerungsparameter** identifiziert und implementiert werden. Dabei soll in lokale und zentrale Parameter unterschieden werden. Die zentralen Parameter werden aus der SQL-Datenbank ausgelesen, die lokalen im Skript als Steuerungsparameter hinterlegt. Die folgende Auflistung zeigt die identifizierten Parameter:

Zentrale Parameter

- Muffenart und Verbindungsstelle (falls die Muffe mehrere Bambusrohre aufnehmen kann)
- Bambusrohrorientierung
- Schnittpositionen des Bambusrohrs
- Länge der Klebflächen

Lokale Parameter

Dichtringe

- [REDACTED]
- Abstand des Dichtrings vom Muffenboden
- [REDACTED]
- Breite des Dichtrings
- Überlapp des Dichtrings in die Muffe

Muffe

- Wandstärke der Muffe
- Spaltmaß des Klebspalts
- Dicke/Stärke der Bodenplatte der Muffe
- Überstand der Muffe über den oberen Dichtring
- Fase an der Muffe

Im nächsten Schritt erfolgt eine Analyse der möglichen, am Markt befindlichen Systeme. Die Auswahl fiel dabei auf die **Open-Source Lösungen OpenSCAD und CadQuery**. CadQuery hat den Vorteil, dass es Python-basiert ist und die Nutzung von umfangreichen Programmbibliotheken erlaubt. Hierdurch kann auf einfache Art und Weise die Schnittstelle zur SQL- und NoSQL-Datenbank integriert werden. OpenSCAD basiert hingegen auf der Programmiersprache C. Hierbei wäre ein weiteres Programm zur Verbindung und Bereitstellung der Daten zur Konstruktion notwendig. Da OpenSCAD jedoch besser mit STL-Daten umgehen kann als CadQuery, wird die Software im weiteren Verlauf berücksichtigt.

Wenn aus einem 3D-Scan eine sogenannte „**wasserdichte**“ **STL-Datei** vorliegt, kann diese als Grundlage für eine automatisierte Konstruktion mit OpenSCAD verwendet werden. Hierfür muss die mittels 3D-Scan ermittelte Punktwolke trianguliert und vernetzt werden. Der Vorteil des vollständigen Scans liegt in der genaueren Abbildung von Blattstielkerben und Knotenpunkten. Um aus dem 3D-Scan des Bambusrohrs eine Muffe zu erzeugen, wird die Datei in unterschiedlich

hohe Segmente geschnitten, von denen Aufdickungen gebildet werden. Diese Aufdickungen beschreiben die Dichtlippen und werden wiederum über Parameter gesteuert. Bild 76 zeigt ein trianguliertes Bambusstück (rot) mit daran angepassten Dichtlippen (blau und orange). Zur besseren Sichtbarkeit ist die äußere Muffe ausgeblendet worden.

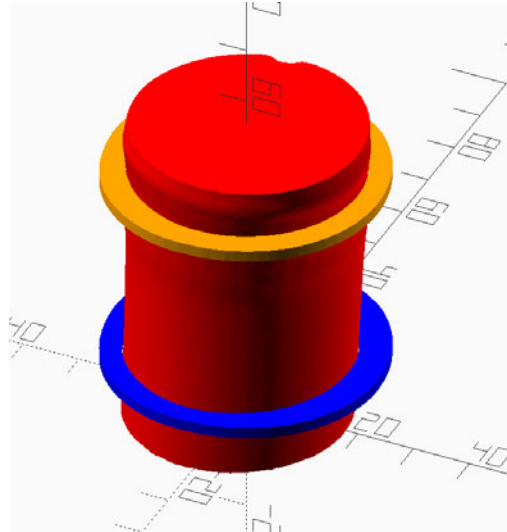


Bild 76: OpenSCAD - Gescanntes Bambusrohr (rot) mit unterem (blau) und oberem (orange) Dichtring

In der CadQuery-Umgebung werden die Daten direkt aus der Datenbank eingelesen und verarbeitet. Die Datentabellen enthalten eine Laufkoordinate (Messlänge) und den **gemittelten Durchmesser des Bambusrohrs**, sowie den jeweiligen Mittelpunkt des Kreises. Um flexible Anpassungen an die Geometrien zu ermöglichen, wird das Skript in verschiedene Module unterteilt. Es existieren zentrale Steuerparameter, die die wesentlichen geometrischen Abmessungen vorgeben und weitere Module für die Erstellung der Dichtlippen, der Muffe und des Bambusrohrs. Im ersten Schritt der Erstellung erfolgt eine Koordinatentransformation. Diese dient dazu das üblicherweise gekrümmte Bambusrohr in den Mittelpunkt der x-y-Ebene zu verschieben und es entlang der idealen Rohrachse auszurichten (Bild 77).

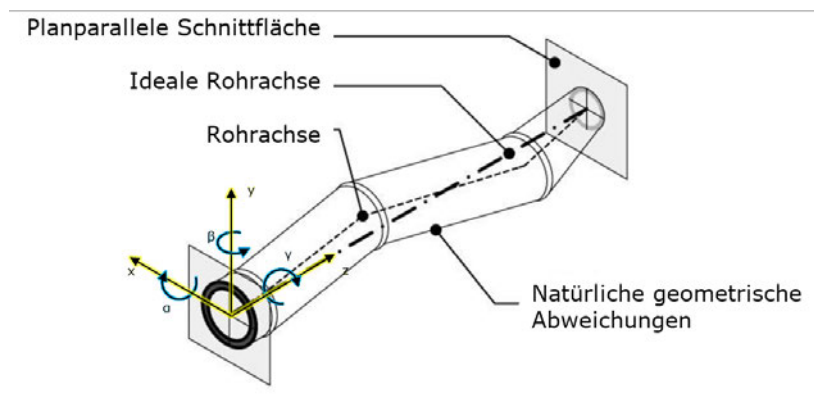


Bild 77: Definitionen Bambusrohr, Abbildung basierend auf [STE-17]

Zudem findet eine Visualisierung des Rohrs mit reduzierter Auflösung entlang der Messrichtung statt (Bild 78). Diese Reduktion der Auflösung ist notwendig, um die Rechenzeit des Programms zu reduzieren, sie wird aber nicht für die Erstellung der weiteren Elemente verwendet.

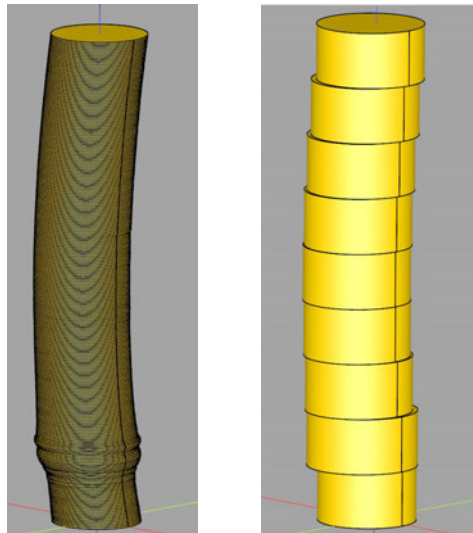


Bild 78: Vergleich volle Auflösung (links) und reduzierte Auflösung (rechts)

Im Anschluss an die Visualisierung der Messdaten erfolgt die Erstellung der Dichtlippen und der Muffe. Dabei wird jeder Datenpunkt einbezogen, um die höchstmögliche Genauigkeit zu erzielen. Die Erstellung der Dichtlippen (Bild 79) und der Muffen (Rohranfang und -ende) erfolgen dabei jeweils um gemittelte Mittelpunktkoordinaten über die jeweilige Muffenlänge.

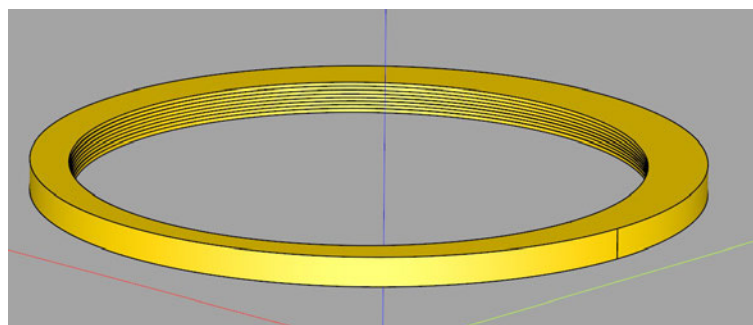


Bild 79: Dichtlippe erzeugt mit CadQuery

Bei dieser Vorgehensweise muss der Einfluss von Verformungen im Bambusrohr, wie beispielsweise Kerben oder Dellen, auf die Dichtigkeit der Lippen geprüft werden. Durch die Annäherung des Rohrs über Kreise wird die Auflösung reduziert und somit kommt es zu Abweichungen zwischen realer Bambusgeometrie und Dichtlippe.

Einfluss der Wärmeleitung auf Genauigkeit prüfen (AP 3.3.2)

Um den Einfluss der Wärmeleitung auf die geometrische Genauigkeit zu prüfen, werden in unterschiedlichen Verfahren mehrere Bauteile parallel gefertigt. Ziel ist hierbei, eine Beeinflussung zwischen den verschiedenen Bauteilen zu evaluieren. Durch die geänderte Anordnung, beziehungsweise die geänderte Bauteilanzahl im Bauraum ergeben sich Abweichungen bei den Schichtzeiten. So variieren die Aufheiz- und Abkühlzeiten, wodurch sich Änderungen im Schrumpfungs- und Verzugsverhalten der Bauteile ergeben können. Die Bauprozesse bestehen sowohl aus Bauteilen für den Kinderwagen als auch aus Bauteilen für ein Kinderfahrrad und ein Gravelbike. Die Materialien umfassen Kunststoff und Metall.

Bei der Fertigung von Kinderwagenprototypen (vgl. AP 3.5, Kapitel 2.1.3.5) wurde entschieden, die Knotenpunkte mittels des **SLS-Verfahrens** aus PA12 zu fertigen und die Inlays mittels des FLM-Verfahrens XXXXXXXXXX. Im Rahmen der Herstellung der Knotenpunkte wurde auch der Einfluss einer höheren Bauhöhe des Prozesses getestet werden und damit verbunden der Einfluss einer längeren Verweildauer der Bauteile im warmen (ca. 180 °C) Pulverbett. In vorherigen Fertigungsprozessen kam es teilweise zu einem Verbacken des Pulvers, bei gleichzeitig sehr brüchigen und porösen Bauteilen, wie in Bild 80 gezeigt.



Bild 80: Fehlerhafter Bauprozess durch Überhitzung des Pulverbetts

Durch Anpassungen an der Software und eine Kalibration der Anlagenhardware durch den Maschinenhersteller kann dieses Problem vermieden werden. Ursächlich für den Fehler war wahrscheinlich ein fehlerhafter Temperaturwert des Pyrometers, wodurch eine zu hohe Pulverbetttemperatur erreicht wurde und das Pulver verbacken ist. Nach Neukalibration, beziehungsweise Austausch des defekten Temperatursensors können alle Knotenpunkte für einen Kinderwagen erfolgreich umgesetzt (Bild 81) und für den Aufbau eines Prototyps verwendet werden.



Bild 81: Satz Kinderwagenmuffen aus PA12

Der in Bild 81 gezeigte Bauprozess wird, aufgrund von Beschädigungen an Bauteilen durch Überlast, zusätzlich im Werkstoff PA11CF, einem carbonfaserverstärkten Material umgesetzt worden,

wodurch die Festigkeit und insbesondere die Schlagzähigkeit, im Vergleich zum PA12, gesteigert wird.

Die Prüfung der **Erhöhung der Bauhöhe** soll zum einen die Wirtschaftlichkeit erhöhen, zusätzlich aber den Prozess, aufgrund weniger manueller Eingriffe, besser automatisieren. Verglichen werden drei einzelne Baujobs (Bild 82) mit einem kombinierten Baujob (Bild 83).

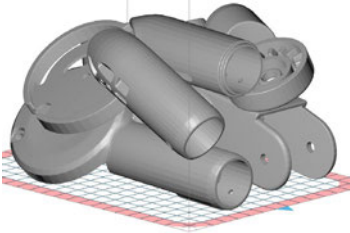
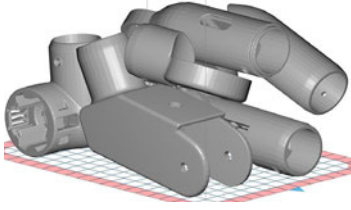
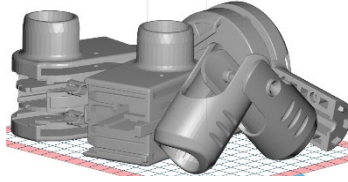
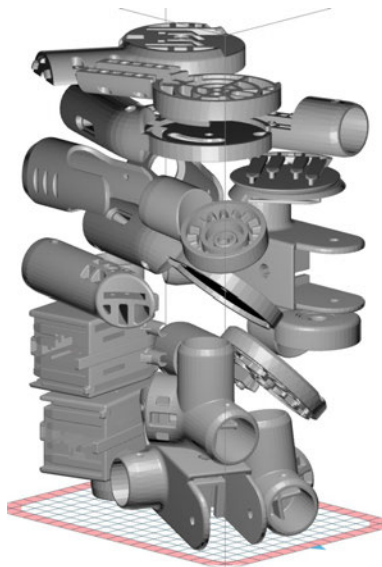
<u>Baujob 1</u>	<u>Baujob 2</u>	<u>Baujob 3</u>
		
Bauzeit [hh:mm]: 14:34	Bauzeit [hh:mm]: 11:41	Bauzeit [hh:mm]: 10:31
Materialbedarf [l]: 1,26	Materialbedarf [l]: 1,25	Materialbedarf [l]: 1,00
Packungsdichte [%]: 9,7	Packungsdichte [%]: 9,8	Packungsdichte [%]: 11,8

Bild 82: Anordnung der Bauteile im Bauraum



Bauzeit [hh:mm]: 26:23
 Materialbedarf [l]: 3,38
 Packungsdichte [%]: 11,0

Bild 83: Anordnung aller Knotenpunkte in einem Bauprozess

Dabei gelingt es, einen kompletten Satz an Muffen im Bauraum der SLS-Anlage zu verschachteln. Die Reduktion der Baujobanzahl führt zu einer Pulvereinsparung von nur 0,13 l, die Druckzeit kann aber um über 10 h gegenüber den einzelnen Bauprozessen reduziert werden. Nicht eingerechnet ist der Zeitaufwand für die manuelle Entnahme des Baujobs, welcher noch hinzukommt. Der Fertigungsprozess für das Gesamtpaket dauert insgesamt 26:23 h.

Tabelle 14: Vergleich Baujobauslegung

	Bauzeit [hh:mm]	Materialbedarf [l]	Packungsdichte [%]
3 Baujobs	36:46	3,51	10,43
1 Baujob	26:23	3,38	11,00
Differenz	-10:23	-0,13	+0,57

Es lässt sich festhalten, dass auch die gesteigerte Produktivität mittels des SLS-Prozesses für einen Serienprozess zur Produktion der Knotenpunkte nicht ausreichend ist und die Hauptanwendung des SLS-Prozesses in der Fertigung von Klein- und Sonderserien zu sehen ist. Zur weiteren Steigerung der Produktivität wird daher zusätzlich das **Multi Jet-Fusion-Verfahren** von HP betrachtet. Dieses erlaubt ebenfalls die Verarbeitung von Polyamiden und bietet ähnliche Materialeigenschaften wie das Lasersintern. Mittels des HP-Verfahrens können die für einen Kinderwagen benötigten Bauteile innerhalb von 8,5 h gefertigt werden.

Zur Prüfung der Qualität des additiven Fertigungsprozesses wird je ein Bauteil aus den drei vorgestellten Kunststoffprozessen (SLS, FLM und HP MJF) per **3D-Scan** vermessen. Dabei wird aus allen drei Bauprozessen das gleiche Bauteil verwendet und mit den Toleranzanforderungen aus dem Lastenheft verglichen (Wunschanforderung $\pm 0,1$ mm, Mindestanforderung $\pm 0,3$ mm). In den folgenden Abbildungen ist Untermaß in Blau dargestellt, Übermaß in Rot.



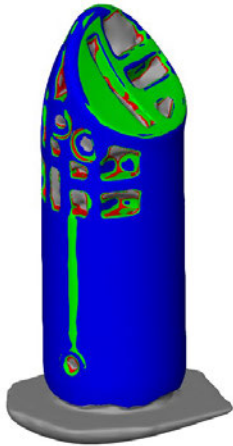
Toleranz $\pm 0,1$ mm



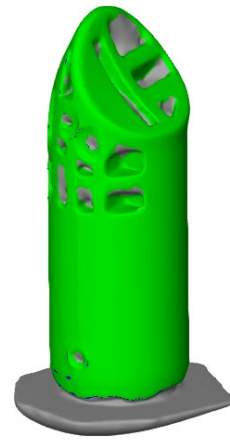
Toleranz $\pm 0,3$ mm

Bild 84: 3D-Scan und Messung Verbindungsbauteil gefertigt aus PA12 mittels SLS

Bei dem SLS-gefertigten Bauteil zeigt sich, dass die Toleranz von $\pm 0,3$ mm eingehalten werden kann. Die Genauigkeit liegt jedoch oberhalb der Wunschanforderung von $0,1$ mm.



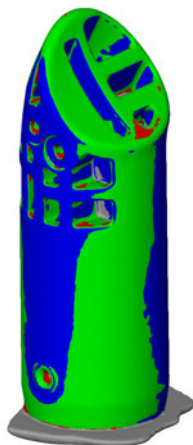
Toleranz $\pm 0,1$ mm



Toleranz $\pm 0,3$ mm

Bild 85: 3D-Scan und Messung Verbindungsbauteil gefertigt aus PETG mittels FLM

Auch bei dem im FLM-Prozess gefertigten Bauteil wird die Toleranz von $\pm 0,3$ mm erreicht. Für eine Maßhaltigkeit von $\pm 0,1$ reicht aber die Prozessgenauigkeit auch hier nicht aus.



Toleranz $\pm 0,1$ mm



Toleranz $\pm 0,3$ mm

Bild 86: 3D-Scan und Messung Verbindungsbauteil gefertigt aus PA12 mittels HP MJF

Bei dem HP MJF Prozess zeigen sich Abweichungen von der Soll-Geometrie, die größer als $\pm 0,3$ mm sind. Hierbei müsste eine weitere Anpassung der Prozessparameter, beziehungsweise gegebenenfalls eine werkstofftechnische Anpassung vorgenommen werden, um die benötigten Toleranzen zu erreichen.

Als alternatives Fertigungsverfahren wird für die Kinderwagenknotenpunkte auch das **metallische Laserstrahlschmelzen** untersucht. Hierbei werden alle Knotenpunkte auf der Bauplattform platziert und in einem Fertigungsprozess hergestellt, wie in Bild 87 zu sehen. Eine weitere Einschränkung des Metallprozesses, welche sich aus der Notwendigkeit der Stützstrukturen ergibt, ist die Anordnung der Bauteile ausschließlich in einer Ebene.

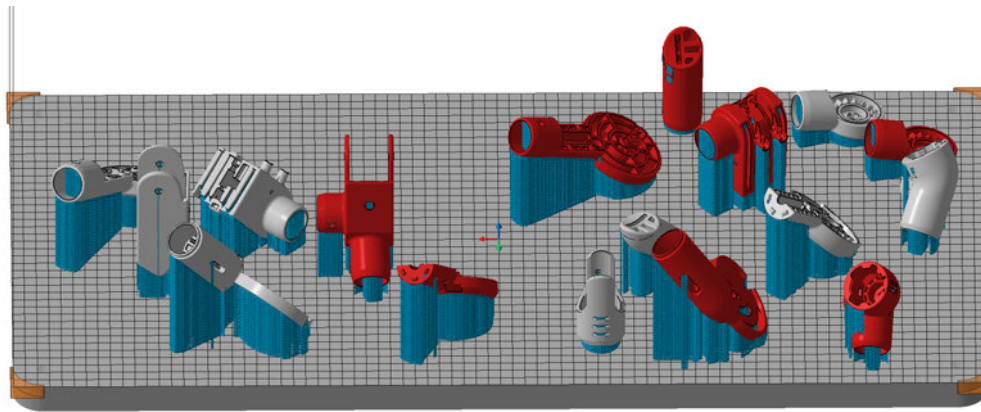


Bild 87: Anordnung der Kinderwagenbauteile für den Aluminiumprozess

Da die Knotenpunkte für den Kunststoffprozess ausgelegt wurden, stellt sich bei der Auswertung der Passgenauigkeit heraus, dass die Bauteile aufgrund der notwendigen Stützstrukturen (Bild 88, links) den Anforderungen nicht gerecht werden. Für den metallischen Prozess wäre daher eine konstruktive Anpassung der Verbinder notwendig, welche unter Berücksichtigung des geplanten Serienfertigungsverfahrens für die Kinderwagenbauteile aber nicht umgesetzt wird.

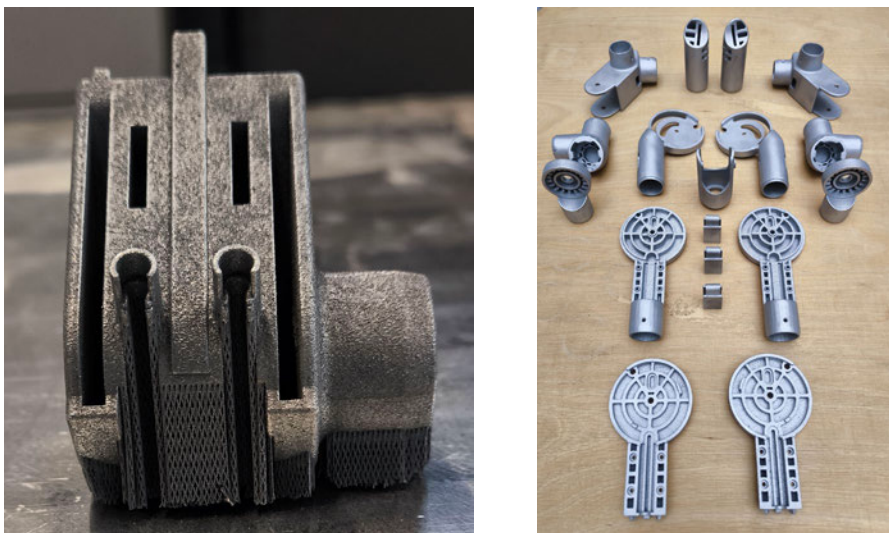


Bild 88: Knotenpunkt aus AlSi10Mg mit Stützstrukturen (links) und nach Post-Processing (rechts)

Durch eine aufwendige, händische mechanische Nachbearbeitung der gefertigten Aluminiumbauteile wird ein Satz Muffen realisiert, welcher zu einem Kinderwagen aufgebaut wird (vgl. AP 5.2, Kapitel 0). Der Kinderwagenprototyp verfügt aufgrund der geometrischen Abweichungen der Aluminiumbauteile jedoch nicht über alle Funktionalitäten.

Im Vergleich zu den Bauteilen des Kinderwagens müssen die **Knotenpunkte für die Fahrräder** (Kinderfahrrad und Gravelbike) deutlich größere Kräfte übertragen und daher robuster ausgelegt sein. Daher werden auch diese Verbinder aus Metall gefertigt. Hierbei ist eine Orientierung der Bauteile möglich, in welcher die Stützstrukturen keinen negativen Einfluss auf die kritischen Abmessungen haben (Bild 89 und Bild 90). Die Bauteile können daher innerhalb der vorgesehenen Toleranzen gefertigt und anschließend montiert werden.

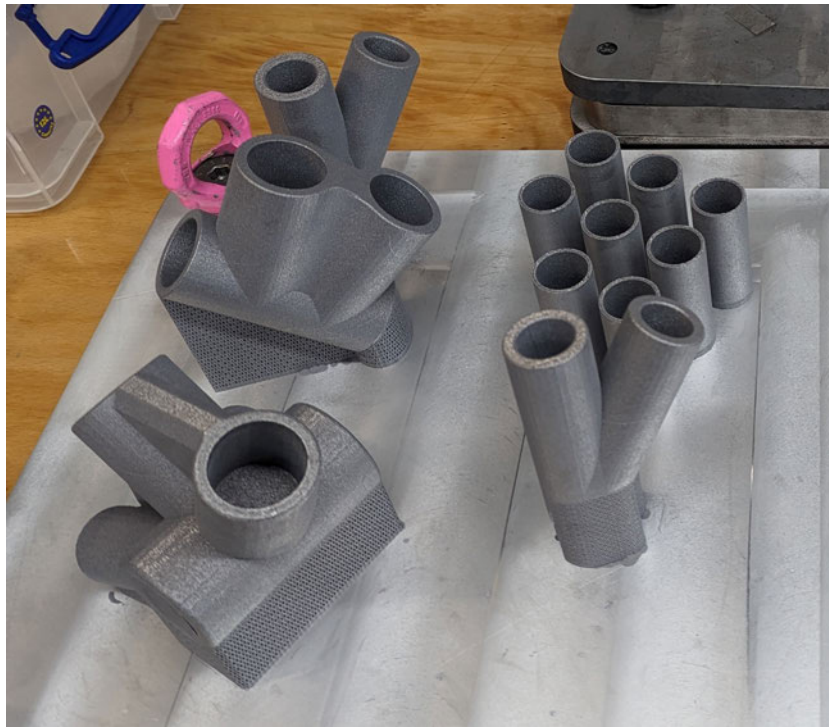


Bild 89: Satz Kinderfahrradmuffen auf Bauplattform (LPBF, AlSi10Mg)



Bild 90: Satz Gravelbikemuffen auf Bauplattform (LPBF, AlSi10Mg)

2.1.3.4 Konstruktionsoptimierung Klebmuffe (AP 3.4)

Zur Reduzierung des radialen Bauraums der Klebmuffe wird die **Durchmessertoleranz** der Klebmuffe erhöht. Ziel ist die Tolerierung großer Durchmesserabweichungen der Rohrstücke, welche sich aus dem ovalen Querschnitt und den Verdickungen in den Knotenbereichen ergeben. Für die Bambussorte *Pseudosasa amabilis* („Tonkin“), welche auch im Kinderwagen zum Einsatz kommt, betragen diese Abweichungen bezogen auf den mittleren Rohraußendurchmesser in Summe ca. $\pm 4,5\%$. Mit einer Durchmessertoleranz der Klebmuffe von über $\pm 4,5\%$ ließen sich demnach auch Knotenbereiche fügen.

Zur Untersuchung weiterer additiver Herstellungsverfahren und Materialien werden am IwF verschiedene Inlays angefertigt und am IaAM auf ihre Durchmessertoleranz getestet. Dazu werden ████████████████████ Probekörper mit Durchmessern von 16 - 20 mm ████

hineingedrückt werden (Bild 91, siehe auch Durchmesserprüfung spezieller Inlay-Geometrien in AP 3.2.3, Kapitel 2.1.3.2).

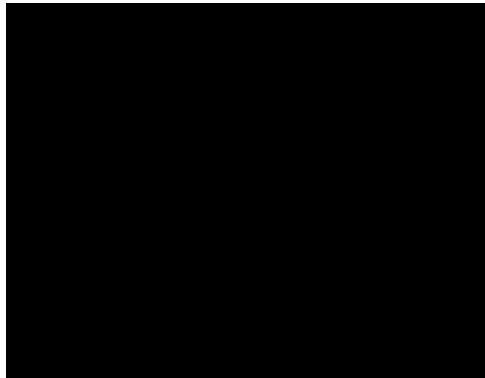


Bild 91: Abstandhalter, Stahlmuffe und Inlay mit Probekörper für Durchmessertoleranztests

Die Ergebnisse in Tabelle 15 erhalten auch Testergebnisse von Inlays, die außerhalb dieses Vorhabens am IaAM entwickelt wurden.

Inlays aus dem FLM-Verfahren werden mit Dichtringen in Form von Zahnkränzen gefertigt, welche für die nötige Zentrierung, Abdichtung und Klebstoffverteilung sorgen. Die erreichten Durchmessertoleranzen liegen aber nur bei $\pm 4,5\%$. Im SLA-Verfahren hergestellte Inlays zeigen zwar gute Detailauflösungen der Zahnkränze, jedoch weisen die für das Verfahren verfügbaren Materialien eine zu geringe Bruchdehnung auf. Schon bei kleinen Verformungen kommt es zu Brüchen im gesamten Inlay. Mit PA12 können durch die Nutzung sehr geringer Schichtdicken, die im SLS-Verfahren möglich werden, flexiblere Zahnkränze gefertigt werden, die Durchmessertoleranzen von $\pm 10\%$ erlauben.

Im Zusammenhang mit den Versuchen zu den rheometrischen Fließeigenschaften des verwendeten Klebstoffs (vgl. AP 3.5, Kapitel 2.1.3.5) werden die Funktionen **Klebstoffverteilung, Füllgrad und Dichtwirkung der Klebmuffe** weiter untersucht.

Diese Eigenschaften tragen dazu bei, dass sich der Klebstoff mit moderatem Druck in die Klebmuffe einspritzen lässt, sich vollständig in der Klebfuge ausbreitet, verlässlich durch die Dichtlippen begrenzt wird und anschließend seine Form beibehält, ohne aus der Klebfuge zu entweichen. In Zusammenspiel mit den Inlays lassen sich so reproduzierbare Füllgrade von 100 % erreichen. Problematisch ist hingegen noch das Fehlen eines verlässlichen Füllstandindikators, um den Füllvorgang genau bei Erreichen eines Füllgrads von 100 %

zu beenden und das Auslaufen von Klebstoff aus der Klebfuge durch weiteres Füllen sicher zu vermeiden.

Tabelle 15: Durchmessertoleranzen von Inlays abhängig von Material und AM-Prozess

AM-Prozess	FLM*	FLM*	SLA	SLS
Material	■	■	■	■
Bild	■			
Durchm.-toleranz	± 4,5 %	± 16 %	< 1 %	± 10 %

*außerhalb dieses Vorhabens am IaAM entwickelte Inlays

Um Rohrstücke mit großen geometrischen Abweichungen, beispielsweise großen Unrundheiten, Knoten oder Blattstielkerben, noch besser aufnehmen zu können, werden **individuelle Klebmuffen** konstruiert und hergestellt. Diese werden für jedes Rohrstück individuell an die gemessene Rohraußenkontur angepasst und im AM-Prozess hergestellt (vgl. AP 3.3, Kapitel 2.1.3.3). Das ermöglicht geringere Wandstärken und deutlich dünnere Klebfugen, also optische und gewichtsmäßige Vorteile. Für Versuchszwecke werden die in AP 2.4 (Kapitel 2.1.2.4) verwendeten Außenkonturmessungen als CAD-Modell verwendet. Im CAD-Modell wird eine Muffe als Gegenstück um das Rohrstück konstruiert. Durch das Skalieren der Muffe in radialer Richtung wird eine dünne Klebfuge erzeugt, die mit 2 Dichtringen begrenzt wird (Bild 92).

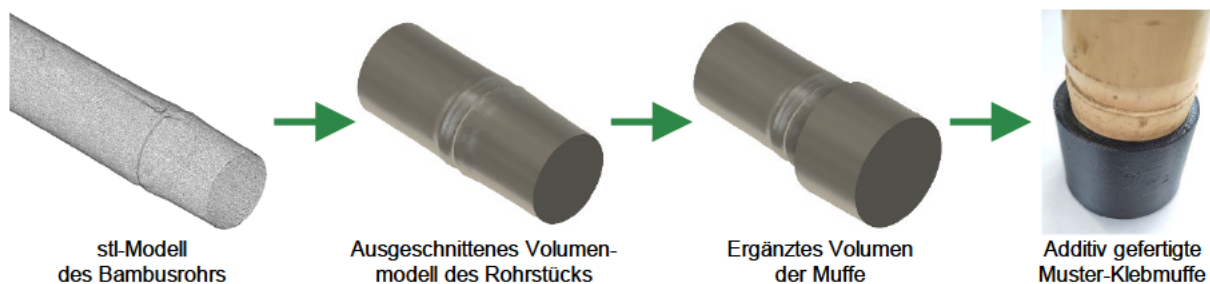


Bild 92: Erstellen einer individuellen Muffe aus der Rohraußenkontur

Die Dichtwirkung der individuellen Klebmuffe ist aufgrund der geringen Klebfugen und kurzen Dichtlippen zunächst deutlich geringer als bei Klebmuffen mit zylindrischem Querschnitt. Durch iteratives Testen und Anpassen der Dichtlippengeometrie können aber angezielte Füllgrade der Klebfuge bis zu 100 % erreicht werden (s. Bild 7).



Bild 93: Klebversuche zur Dichtwirkung unterschiedlicher individueller Klebmuffen

Die **Belastbarkeit der Klebmuffe** wird in Zusammenhang mit Versuchen zur Oberflächenbehandlung von Bambus (vgl. AP 3.5, Kapitel 2.1.3.5) untersucht. Grundsätzlich hängt die Belastbarkeit von den verwendeten Werkstoffen, dem Klebstoff und den wirksamen Querschnitten ab. Versagenskritisch sind die Adhäsionsfestigkeit zwischen Klebstoffs und Bambus beziehungsweise Muffe, die örtliche Festigkeit der Bambusoberfläche und die Kohäsionsfestigkeit des Klebstoffs. Für die Anwendung im Kinderwagen und Fahrradrahmen reichen die erreichten Klebfestigkeiten nach derzeitigen Erkenntnissen aus. Die Steigerung der Klebfestigkeit wird in Zukunft dennoch weiter untersucht, gerade hinsichtlich anspruchsvollerer Anwendungen und Belastungen für Klebstoff und Bambus (statische/dynamische Dauerlast, längere Alterung, Torsions- und Druckbelastung).

Aufgrund der variablen Geometrie der Bambusrohre muss der **Umgang mit gekrümmten Rohrachsen** diskutiert werden. Insbesondere muss festgelegt werden, wie die Klebmuffen in einer vorgegebenen Bambusrohrstruktur an den Knotenpunkten zu den Rohrstücken ausgerichtet werden sollten. Die erste Option ist die Ausrichtung parallel zur Rohrachse (Bild 94, links). Vorteile dieser Option sind schmale und gleichmäßig dicke Klebfugen, vor allem bei Verwendung der individuell auf das Rohrstück angepassten Klebmuffe. Die zweite Option besteht darin, die Klebmuffen nicht auf das Rohrstück auszurichten, sondern stets fluchtend zueinander anzuordnen (Bild 94, rechts). Der wesentliche Vorteil dieser Option ist, dass ein Knotenpunkt immer dieselbe Geometrie aufweist und in Massenfertigung hergestellt werden kann, insbesondere bei Verwendung standardisierter Klebmuffen. Zudem kann die Fügebewegung immer entlang derselben Achse erfolgen. Aus diesen Gründen wird die Option fluchtender Klebmuffen weiterverfolgt.



Bild 94: Optionen zur Ausrichtung von Klebmuffen zu gekrümmten Rohrstücken

Für die **Fertigung der Prototypen** Kinderwagengestell und Fahrradrahmen werden die Schnittstellen zwischen Rohrstück, Klebmuffe und Knotenpunkten definiert. Die Knotenpunkte erhalten einfache Rohrstützen (Muffe) (s. Bild 95).



Bild 95: Kinderwagenknotenpunkte mit Klebmuffen-Schnittstelle und Inlays

In Zusammenarbeit mit EnDePro (vgl. AP 5.2, Kapitel 0) und dem IwF (vgl. AP 3.3, Kapitel 2.1.3.3) wird das entwickelte **Bambuskinderwagengestell** mit SLS-gedruckten Knotenpunkten am IaAM mittels Kleben gefügt. Die Rohrstücke werden an den Fügestellen gestrahlt und anschließend mit Aceton gereinigt, um ausreichend hohe Adhäsionsfestigkeiten zu erzielen. Das Fügen erfolgt manuell, indem die Knotenpunkte zur Fixierung und richtigen Ausrichtung in Negative eingesetzt werden. Die Negative eignen sich außerdem, um durch den Roboterarm gegriffen zu werden (vgl. AP 4.5, Kapitel 2.1.4.5). Sie werden auf Aluminiumprofilen beweglich montiert und das Bambusrohr durch Zusammenschieben der Knotenpunkte eingesteckt (Bild 96). Anschließend wird der Klebstoff injiziert und verbindet jedes Rohrstück mit je einem Knotenpunkt an seinen beiden Enden.

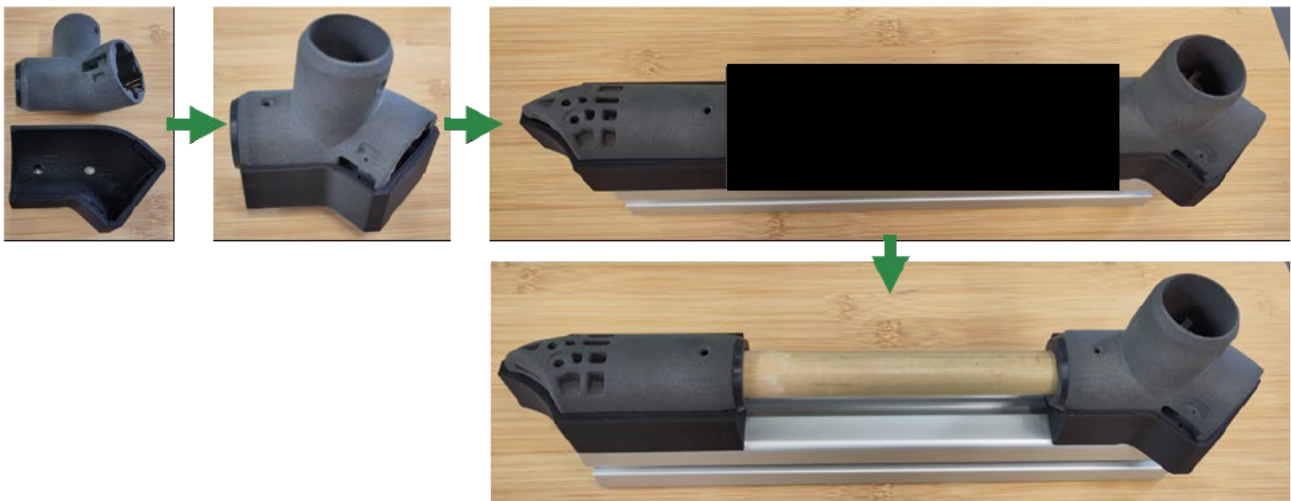


Bild 96: Fügen der Kinderwagenknotenpunkte und Rohrstücke mit Hilfe beweglicher Negative

Die Rohrstücke samt Knotenpunkten werden nach Erreichen der Handhabungsfestigkeit in Rahmenlehren zu dreidimensionalen Baugruppen gefügt. Die Rahmenlehren stellen die korrekte Anordnung der Knotenpunkte sicher (Bild 97). Schließlich wird das Kinderwagengestell durch Verbinden der Knotenpunkte (Montage von Schrauben, Nieten und weiteren Zukaufteilen) fertiggestellt (Bild 98).

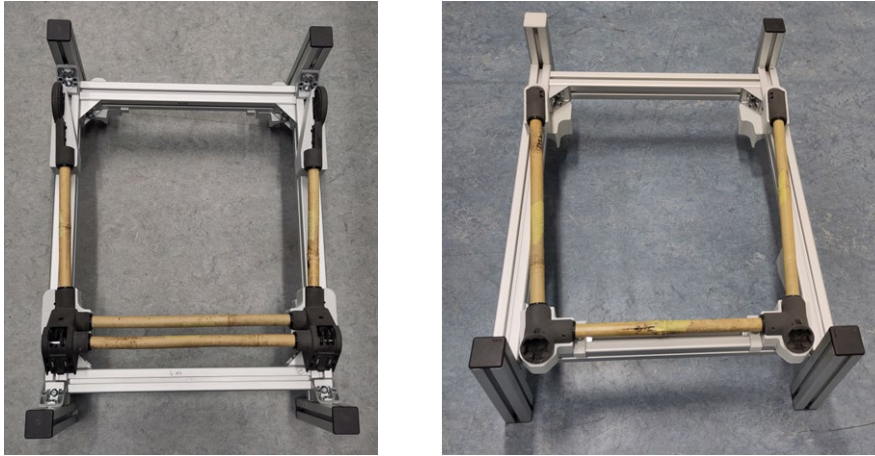


Bild 97: Fügeprozess mehrerer Rohrstücke zu Baugruppen mit Hilfe von Rahmenlehren



Bild 98: Fertig montiertes Prototypgestell eines Bambuskinderwagens

2.1.3.5 Evaluierung Klebstoffe und Klebsysteme (AP 3.5)

Zur **Evaluierung geeigneter Oberflächenbehandlungsverfahren** (OBV) von Bambus werden zwei Versuchsreihen XXXXXXXXXX durchgeführt. Ziel ist die Erzeugung hoher Adhäsionsfestigkeiten zwischen Klebstoff und Bambus, um hohe Tragfähigkeiten bei kleinen Klebflächen in den Prototypen und zukünftigen Anwendungen zu realisieren. Erstens werden in Raupenschälversuchen (qualitative Bewertung) verschiedene Arten des alleinigen Reinigens, Schleifens, Bürstens, Einprägens einer Außenkontur, Laserns und Strahlens von Bambus untersucht. Die vielversprechendsten Verfahren wurden zweitens in Zugversuchen (quantitative Bewertung) untersucht.

Die **Raupenschälversuchen** werden in Anlehnung an DIN ISO 21194 durchgeführt. Trotz der deutlich geringeren Bruchdehnung und dem höheren E-Modul des Klebstoffs als in der Norm vorgeschrieben lassen sich mit den Versuchen deutliche qualitative Unterschiede zwischen den einzelnen OBV aufzeigen. Bewertet wird die nötige Handkraft, um die Klebraupen vom Bambusrohr zu hebeln. Bild 99 zeigt die untersuchten Probenvarianten (1 Probe je Variante).

Schlussbericht zum Verbundvorhaben „BambusFAB“

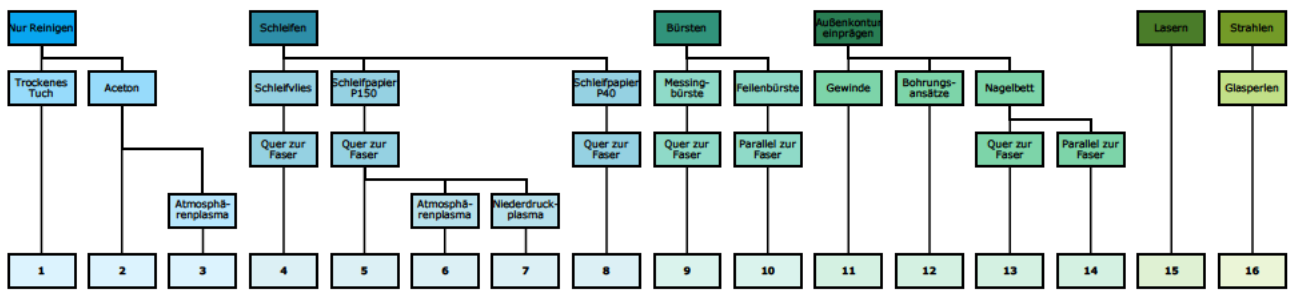


Bild 99: Oberflächenbehandlung von Bambus der Probenvarianten für Raupenschälversuche

Die Raupenschälversuche führen zur Erkenntnis, dass die biologische Außenhaut des Bambus (bestehend aus Wachsschicht, Epidermis, Subcutis und Kortex) vollständig entfernt und die freigelegten, hochfesten Fasern möglichst nicht beschädigt/unterbrochen werden sollten. Folgende OBV scheinen für Bambusrohr geeignet:

- Schleifen (s. beispielsweise Bild 100)
- Bürsten
- Strahlen

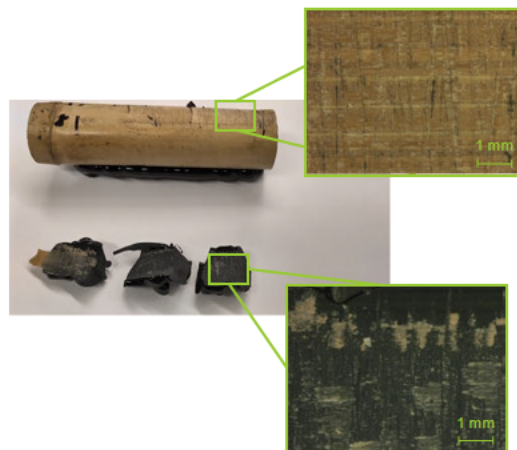


Bild 100: Bruchbildanalyse des Raupenschälversuchs 8 (teilweise beschädigte Fasern)

Folgende OBV scheinen für Bambusrohr ungeeignet:

- Nur Reinigen (Problem: Außenhaut nicht entfernt, s. beispielsweise Bild 101)
- Plasma (Problem: Außenhaut nicht entfernt)
- Einprägen einer Außenkontur durch Bohrlöcher/Gewinde/Riefen (Problem: Außenhaut nicht vollständig entfernt, Fasern beschädigt, s. beispielsweise Bild 101)
- Lasern (Problem: Zellstruktur thermisch zerstört)



Bild 101: Bruchbilder der Raupenschälversuche 1, 11 und 12

In den quasistatistischen **Zugversuchen** mit Klebmuffen werden einige Probenvarianten (3 Proben je Variante) der genannten OBV bei Normalklima weiter untersucht (Bild 12). Die Klebungen werden auf Zugscherung belastet. Für einen quantitativen Vergleich der OBV wird für jede Probe die Klebfestigkeit bestimmt als Quotient aus Bruchkraft und Klebfläche.

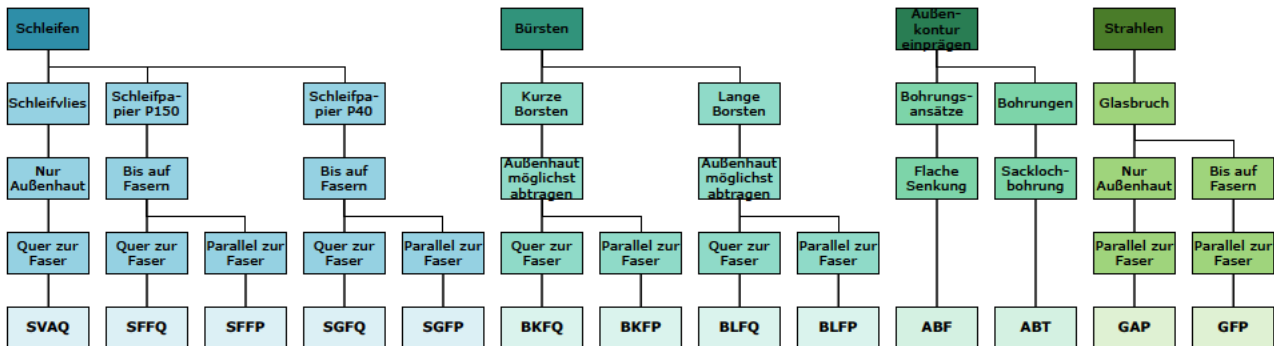


Bild 102: Oberflächenbehandlung von Bambus der Probenvarianten für Zugversuche

In den Zugversuchen zeigen sich nachfolgende Ergebnisse. Folgende OBV erzielten hohe Klebfestigkeiten:

- Schleifen (> 10 MPa, s. beispielweise Bild 103)
- Bürsten (längs zu Fasern: > 12 MPa; quer zu Fasern: > 7 MPa, s. beispielweise Bild 104)
- Strahlen (nur Außenhaut: > 5 MPa; bis Fasern: > 13 MPa, s. beispielweise Bild 105)



Bild 103: Proben SFFP (rechts: Bruch an Bambus, im Klebstoff und an Muffe)



Bild 104: Proben BLFQ (rechts: Bruch am Bambus)

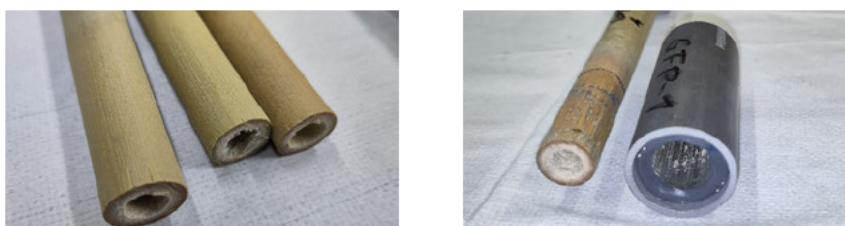


Bild 105: Proben GFP (rechts: Bruch am Bambus)

Folgende OBV erzielen niedrige Klebefestigkeiten:

- Nur Reinigen (festgestellt an 1 Probe wegen fehlerhafter Probenherstellung: ca. 0,3 MPa)
- Einprägen einer Außenkontur durch Bohrlöcher (Senkung: > 5,3 MPa, Sachlochbohrung: > 2,8 MPa)

In Zukunft folgen weitere Zugversuche mit gelasertem Bambus unter Verwendung geeigneter Laserparameter und mit durch Hobeln/Finieren behandeltem Bambus.

Stichversuche zur **Klebfestigkeit nach Alterung** werden nach 2-wöchigen Temperaturwechseln zwischen -18 °C und 70 °C und gesättigter Luftfeuchte durchgeführt (Bild 106 und Bild 107).

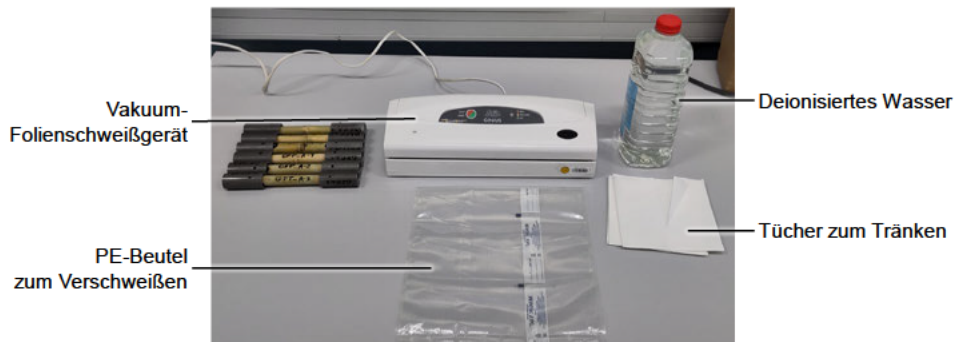


Bild 106: Vorbereitung der Alterungsproben für Behandlung in feuchtgesättigtem Klima

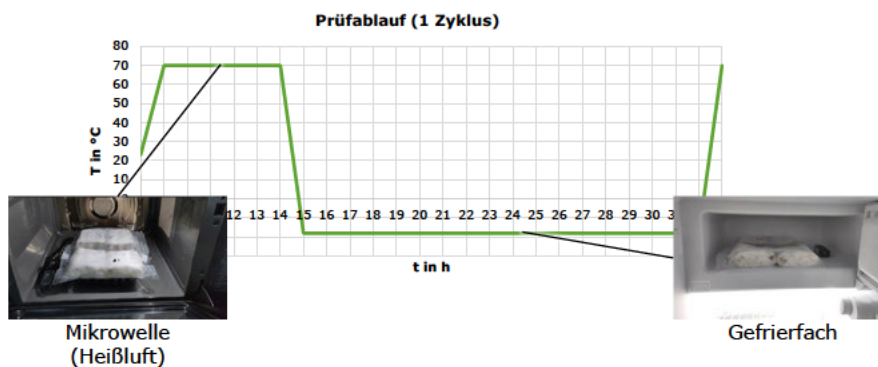


Bild 107: Ablauf der Alterungsprüfung (1 von 10 Zyklen dargestellt)

Insgesamt werden 10 Wärmezyklen durchlaufen. Zum Einsatz kommen Proben mit gebürsteten und gestrahlten Rohrstücken (3 Proben je Variante, Bild 108). Die Alterung zeigt gegenüber den nicht gealterten Zugversuchen keine Verminderung der Klebfestigkeit, sondern tendenziell sogar eine leichte Erhöhung. Dies entspricht den erwarteten Angaben des Klebstoffherstellers und ist etwa durch Nachvernetzungen in der Klebschicht bei den höheren Temperaturen zu erklären.



Bild 108: Gealterte Zugproben unmittelbar nach dem Entpacken

Die beschriebenen Raupenschäl- und Zugversuche werden ebenfalls für **im LPBF-Verfahren hergestellte Aluminiumteile** (Pulver CL 32AL, Werkstoff AlSi10Mg) durchgeführt. Hier kann für alle Vorbehandlungsverfahren (auch „Nur Reinigen“) eine bei Normalklima ausreichend hohe Adhäsionsfestigkeit mit dem Klebstoff nachgewiesen werden. In den Zugversuchen kommt es ausschließlich zu Brüchen am Bambus oder am Klebstoff. Daher kann keine vergleichende Bewertung einzelner OBV für LPBF-gefertigtes Aluminium erfolgen.

Beim Füllvorgang der Klebmuffen muss der Klebstoff mit moderatem Druck in die Klebmuffe injizierbar sein, sich vollständig in der Klebfuge ausbreiten und verlässlich durch die Dichtlippen begrenzt werden, ohne aus der Klebfuge zu entweichen. Insbesondere bei Anwendung der individuellen Klebmuffe können Klebfugen mit Dicken $< 0,3$ mm auftreten. Dies erschwert das Erreichen der vorgenannten Anforderungen beim Füllvorgang. Auch die **rheometrischen Fließ-eigenschaften des Klebstoffs** haben einen wesentlichen Einfluss auf den Füllvorgang. In Füllversuchen wird daher das Fließverhalten unterschiedlicher Klebstoffe [REDACTED] mit verschiedenen kinematischen Zähigkeiten v getestet:

- $14,5 \text{ mm}^2 / \text{s}$ [REDACTED]
- $46,5 \text{ mm}^2 / \text{s}$ [REDACTED]
- $51,4 \text{ mm}^2 / \text{s}$ [REDACTED]
- $58,3 \text{ mm}^2 / \text{s}$ [REDACTED]
- $69,4 \text{ mm}^2 / \text{s}$ [REDACTED]
- [REDACTED]

Es wird untersucht, ob und wie schnell sich unterschiedlich dicke Klebfugen unter konstantem Einspritzdruck füllen lassen. Mithilfe transparenter FLM-gefertigter Bauteile werden Proben erzeugt, deren Klebfugendicke sich stufenweise von anfänglich 2 mm auf schließlich ca. 0,05 mm verkleinert (Bild 109). Es zeigt sich, dass für die meisten Klebstoffe die Fließgeschwindigkeit tendenziell mit steigender kinematischer Zähigkeit abnimmt. Nach entsprechend langer Zeit ($t \approx 1.240 \text{ s}$) sind alle Klebstoffe in der Lage, selbst die dünnste Klebfuge mit einer Dicke von ca. 0,05 mm zu füllen (Bild 110).

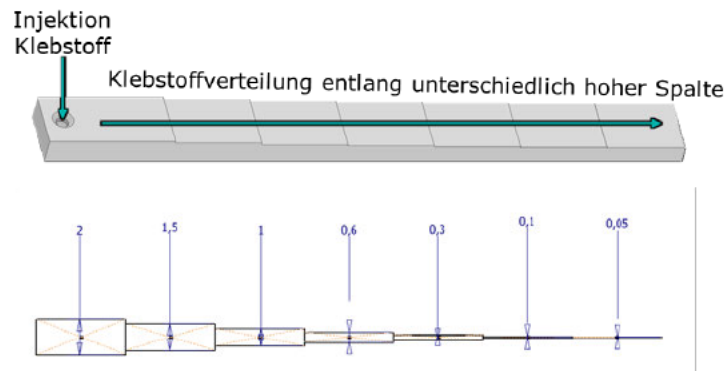


Bild 109: Probengeometrie zum Test des Füllvorgangs von Klebstoff in dünnen Klebfugen

Anhand der benötigten Zeit lässt sich abschätzen, wie lange der Füllvorgang von Klebmuffen mit entsprechend dünnen Klebfugen benötigt beziehungsweise welche Einspritzdrücke für einen schnelleren Füllvorgang nötig wären. Versuche zur Abdichtung müssen mit bauteilnahen Versuchen erfolgen, welche die tatsächlichen Dimensionen der im Produkt genutzten Klebmuffen abbilden, da diese Dimensionen einen erheblichen Einfluss auf die Klebstoffverteilung und Abdichtung haben.

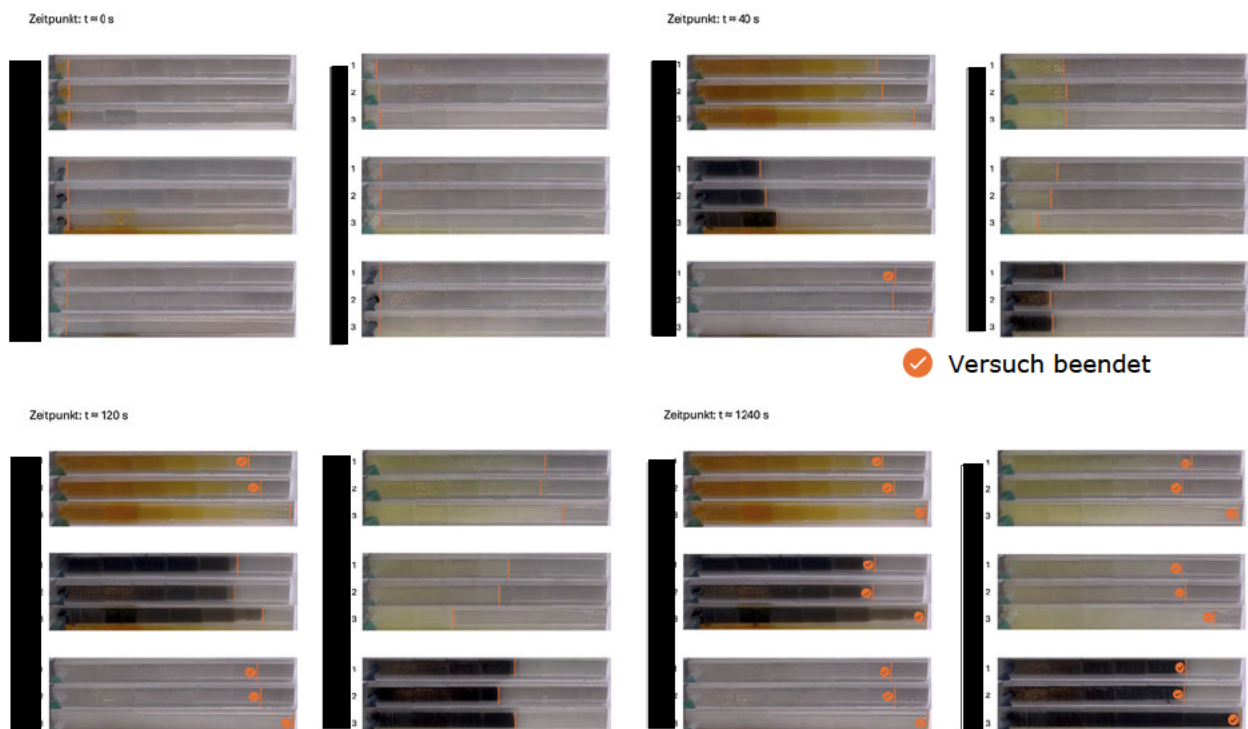


Bild 110: Füllstand der Klebfugenproben nach unterschiedlichen Zeiten

Neben der strukturellen Klebmuffenverbindung wird außerdem die **Haftung verschiedener Etikettenmaterialien auf Bambusrohr** getestet. Zur Identifikation der Bambusrohre und Rohrstücke innerhalb der Fertigungskette sind auf den Etiketten maschinen- und menschenlesbare Codes abgebildet (vgl. AP 2.5, Kapitel 2.1.2.5). Folgende Materialien werden in Verbindung mit Acrylatklebstoff getestet:

- Mattes Papier
- Matte Polyesterfolie
- Mattes Thermotransferpapier
- Mattes Thermotransferpapier mit 40 % Grasfaseranteil
- Glänzende PE-Thermotransferfolie

Die Etiketten sollen lange (während der Produktions- und Lagerdauer) auf dem Bambusrohr haften und anschließend rückstandsfrei ablösbar sein (nach Fertigstellung des Produkts). Im Idealfall sollen die Etiketten wiederverwendbar sein. Die Haftung wird unter verschiedenen Bedingungen getestet, welche die auftretenden Beanspruchungen während der Produktion nachbilden sollen (Bild 111):

- Test 1: Keine vorherige Reinigung des Bambusrohrs
- Test 2: Vorherige Reinigung des Bambus mit Wasser
- Test 3: Vorherige Reinigung des Bambus mit Aceton
- Test 4: Langzeitbelastung durch Wärme
- Test 5: Langzeitbelastung durch Außenwitterung (Niedrige Temperatur + Regen)



Bild 111: Test unterschiedlicher Etikettenmaterialien unter verschiedenen Einflüssen

Eine ausreichende Haftung und eine gute Ablösbarkeit sind bei folgenden Materialien gegeben. Eine mehrfache Wiederverwendung der Etiketten erscheint aber nicht möglich:

- Matte Polyesterfolie, ablösbar, wetterfest (Hersteller HERMA, Nr. 4571/4572)
- Mattes Thermotransferpapier, Acrylat, permanent (Hersteller etimark, Material 417)
- Glänzende PE-Thermotransferfolie, Acrylat, ablösbar (Hersteller etimark, Material 380)

Diese Etiketten zeigen auch während der ersten Probedurchläufe der Fertigungsanlage eine ausreichend gute Haftung auf den Bambusrohren und Rohrstücken.

2.1.4 Universelle koppelbare Fertigungszellen (AP 4)

2.1.4.1 Konvertierbare Basiszelle (AP 4.1)

Zu Beginn des Arbeitspakets werden mehrere Workshops durchgeführt, um auf der Basis der im Unternehmen bereits gefertigten Roboter und Automationszellen das Konzept der konvertierbaren Roboterzelle auszuarbeiten. Zudem wird die Firma item besucht, um die neuesten Innovationen kennenzulernen und sich im Bereich der Profilverfahren weiterzubilden. Diese Erkenntnisse fließen direkt in die Planung der **Basiszelle** ein. Besonders im Bereich der Modularität und Reinheitsklasse können hier deutliche Verbesserungen erzielt werden. So werden zum Beispiel Kabel nicht in gesonderten Kabelkanäle eingelegt, sondern teilweise direkt in der tragenden Struktur der Zelle verlegt.

Das Konzept basiert auf einer Standard-Fertigungszelle, die modular erweitert werden kann. Die Fertigungszellen werden so konzipiert, dass diese mit geringem Aufwand durch normalgroße Türen transportiert werden können.

In der **Softwareentwicklung** werden diverse Standardbausteine für eine S7-Steuerung programmiert, die für verschiedene Module genutzt werden können. Hier sind beispielhaft Bausteine für die Sicherheitstüren der Anlage, sowie für einfachere Zylinderansteuerungen zu nennen. Damit werden zukünftig die Softwareentwicklung und die Inbetriebnahme der Anlagen deutlich vereinfacht und die dafür benötigten Zeiten verkürzt.

Nachdem ein erstes Zellenkonzept erstellt wurde, werden in AP 4.2 ein erster Versuchsstand aufgebaut und Abläufe mit den neu entwickelten Standard-Softwarebausteinen erstellt. Die Erkenntnisse daraus werden in die Entwicklung der Basiszelle sowie den Erweiterungszellen und den Softwaremodulen mit eingearbeitet.

Die Basiszelle durchläuft noch mehrere **Konzeptzyklen**. So wird zum Beispiel der Entwurf verworfen, den Unterteil der Anlage als Schaltschrank zu nutzen. Hier ergab sich seitens der Risikobewertung, die im Rahmen der CE-Konformitätserklärung erarbeitet wurde, dass hier umfangreiche Arbeiten und Zertifizierungen nötig gewesen wären, um die Schutzklasse und die EMV-Richtlinie zu gewährleisten. Als Alternative wurde erarbeitet, dass hier keine offenen Montageplatten in den Auszügen unter der Basiszelle befestigt werden, sondern mehrere geschlossene Schaltschränke eingesetzt werden sollen. Zukaufteile, wie der Roboterschrank, können ebenfalls integriert werden.

Im weiteren Projektverlauf werden eine Basis- und eine Erweiterungszelle so konstruiert, dass sie die Vorgaben bezüglich der Verbesserung der Modularität und der Reinheitsklasse erfüllen.

Die Basiszelle stellt die Grundlage zur Konstruktion von Fertigungs-, Füge- und Messzelle dar und enthält einen Schaltschrank, Sicherheitskomponenten und ein optionales Modul zur pneumatischen Steuerung.

Von einem separaten Aufbau und einer separaten Inbetriebnahme der Basiszelle ist abgesehen worden, da die Anpassungen an die konkreten Zellen jeweils auch individuelle und unnötige Umbauarbeiten nötig gemacht hätten. Basis- und Erweiterungsmodul dienen somit als Template für die optimierte Entwicklung der konkreten Fertigungszellen.

2.1.4.2 Fertigungszelle Verarbeiten (AP 4.2)

In diesem Arbeitspaket wird zunächst im Rahmen einer Bachelorarbeit ein **Versuchsstand zum Sägen der Bambusrohre** mit Hilfe eines UR10e Roboters aufgebaut und in Betrieb genommen (Bild 112). Der Versuchsstand wird so konzipiert, dass dieser schnell angepasst werden kann. Die Bambusrohraufnahmen werden konstruiert und im 3D-Druckverfahren hergestellt, um auch hier Kosten und Aufwand für den Versuchsstand gering zu halten. Der Versuchsstand liefert sehr gute Sägeergebnisse, sodass die Erkenntnisse aus dem Testaufbau in die Konstruktion der eigentlichen Sägezelle einfließen. Die Abläufe werden mit den neu entwickelten Standard-Softwarebausteinen aus AP 4.1 erstellt, sodass sich diese auch schon in der Praxis bewähren können.

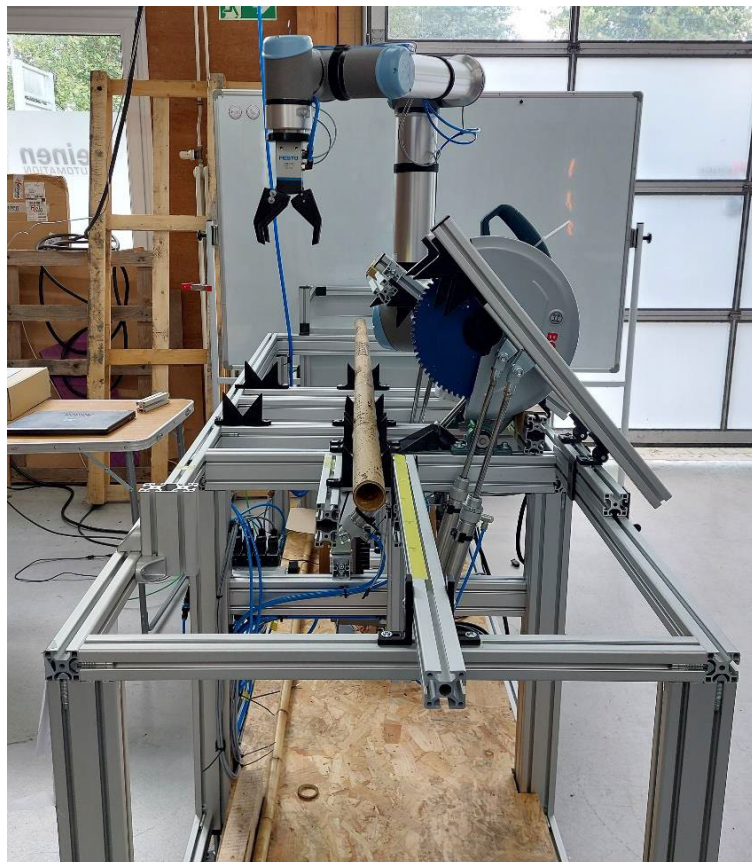


Bild 112: Versuchsstand der Sägezelle

Daraufhin werden die ersten Konzepte zur elektrischen Ansteuerung erstellt, können aber erst nach Festlegung der Spezifikationen für Sensorik und Aktorik, seitens der mechanischen Konstruktion, weiter verfeinert werden.

Im weiteren Projektverlauf werden sowohl eine erste Version der SPS-Steuerungssoftware, die erste standardisierte Funktionsblöcke enthält (Bild 113), einer HMI (Bild 114) als auch der Roboter-Software entwickelt. Sägeversuche mit unterschiedlichen Rohrlängen und -durchmessern zeigten, welche Stellen des Konzeptes noch geändert werden mussten. Ein Problem des bisherigen Versuchsstand war, dass die möglichen Griffpositionen des Roboters sehr limitiert waren, da an den Stützen nicht gegriffen werden kann. Dabei muss sowohl die Abgabeposition des zu sägenden Bambusrohres als auch die Entnahmeposition des gesägten Bambusrohres berücksichtigt werden.

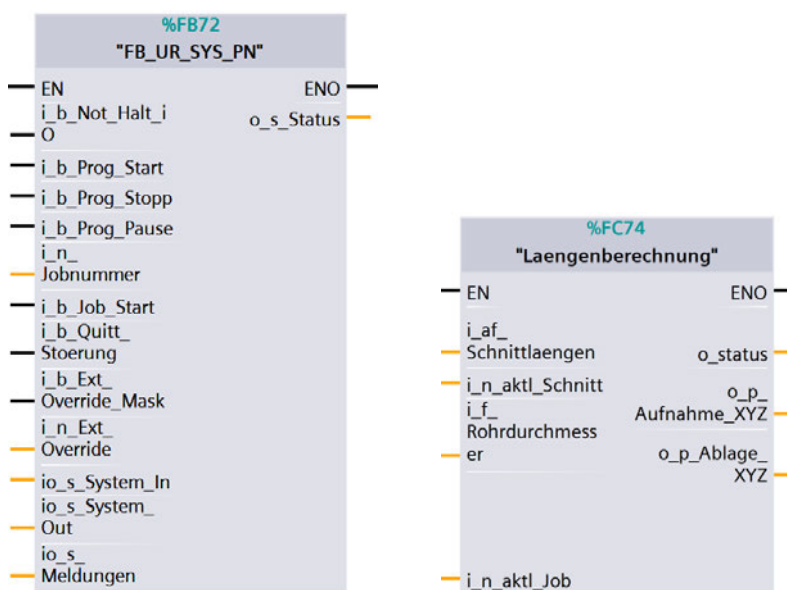


Bild 113: Funktionsbausteine für die SPS der Sägezelle

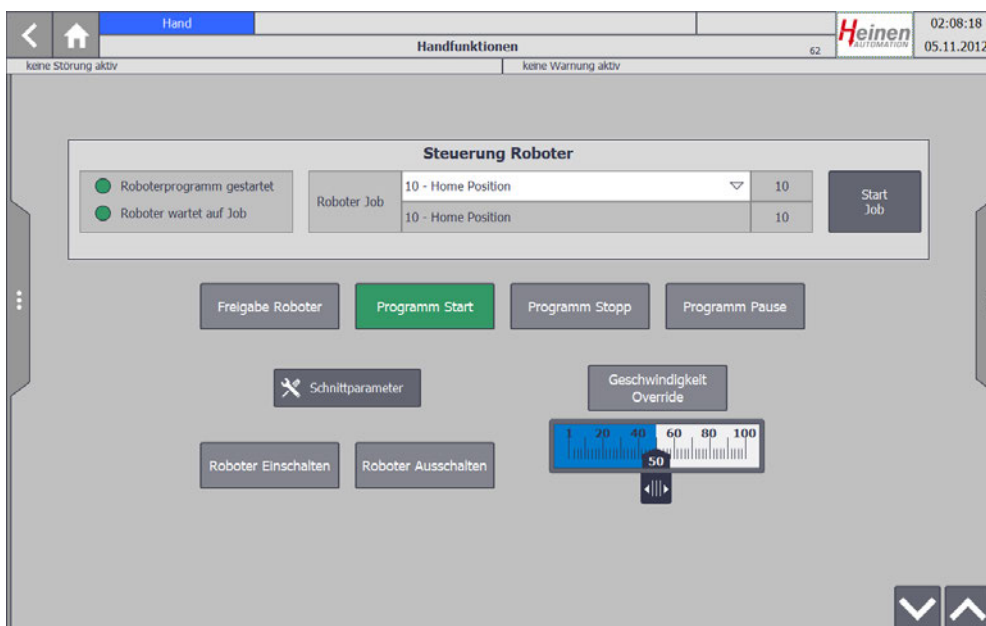


Bild 114: HMI der Sägezelle

Hieraus wird die aktuelle, optimierte **Sägezelle** entwickelt und konstruiert, die aus einer Basis- und zwei Erweiterungszellen besteht (Bild 115 und Bild 116). Neben den Basiskomponenten sind ein Roboter, eine Säge, mit ihrem zugehörigen pneumatischen Zylinder, ein Niederhalter, ebenfalls mit seinem zugehörigen pneumatischen Zylinder und eine Schublade, in der das Bambusrohr zugeführt und die fertig verarbeiteten Bambusrohre wieder entnommen werden können, enthalten.

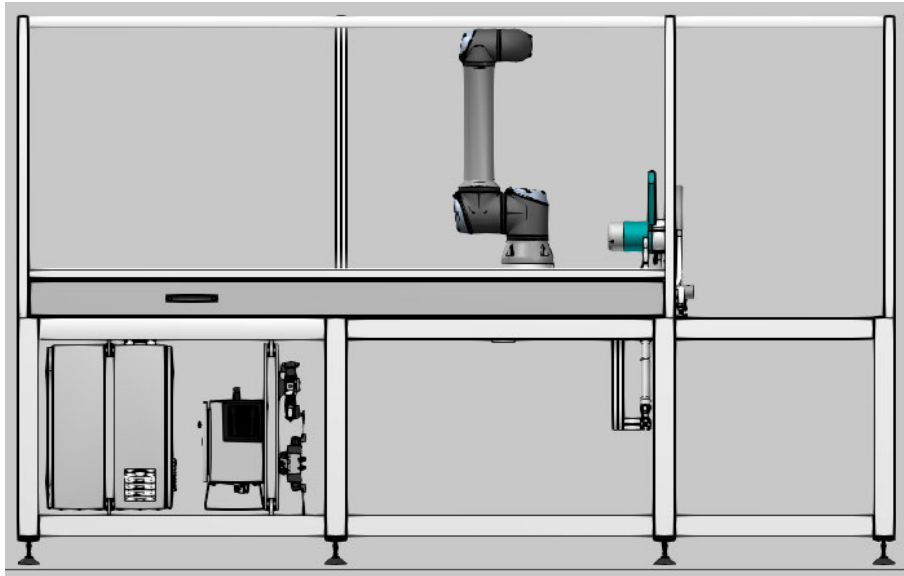


Bild 115: Ansicht der Sägezelle von vorne

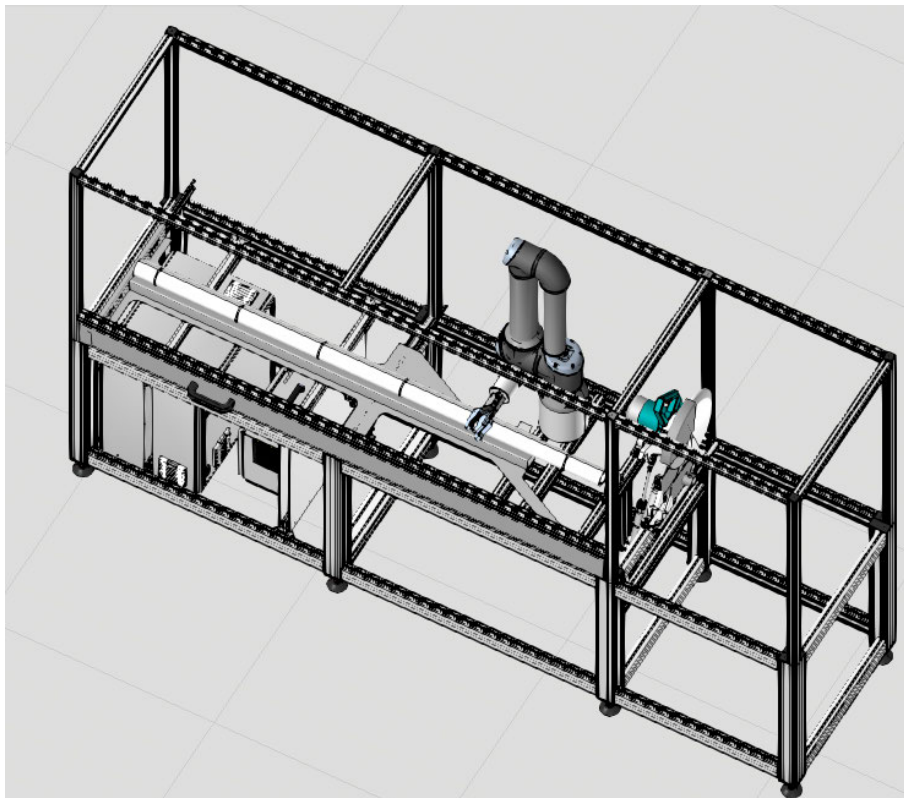


Bild 116: Ansicht der Sägezelle von rechts-vorne-oben

Gegenüber dem ersten Versuchsaufbau wird die Funktionsweise so geändert, dass jetzt nur eine kleine Griffzone links der Säge benötigt wird, über die der Roboter alle geforderten Rohlängen positionieren kann, indem er das Rohr dort greift und es in die gewünschte Position nach rechts zieht. Des Weiteren kann durch das geänderte Design auf einige Pneumatik-Zylinder verzichtet werden. Im aktuellen Design werden nur noch zwei Pneumatik-Zylinder benötigt: einer für die Klemmung des Rohres vor der Säge und einer für die Säge. Die Klemmung auf der rechten Seite der Säge übernimmt jetzt der Roboter selbst.

Abschließend wird die Konstruktion in dynamischen Simulationen überprüft und so angepasst, dass der Roboter mit seinen Bewegungen nicht mit der Einhausung der „Fertigungszelle Verarbeiten“ kollidiert. Um eine sichere Funktionsweise der beiden Pneumatik-Zylinder und des pneumatischen Greifers zu gewährleisten, werden sie mit Positionssensoren ausgerüstet.

Durch **Sägetests** mit Bambusrohren wird ein passendes Sägeblatt bestimmt. Da die Bandbreite an möglichen Bambusrohren mit ihren unterschiedlichen Eigenschaften aber sehr groß ist, sind in Zukunft weitere Sägetests nötig. Zur Absaugung der Sägespäne wird ein Industriesauger verwendet, für den eine Absaugvorrichtung konstruiert und mit 3D-Druckverfahren erstellt wird. Es zeigt sich, dass die Absaugung in mehreren Iterationsschritten weiter verbessert werden muss, damit eine gute Absaugung der Sägespäne gewährleistet werden kann. Spezielle Klemmvorrichtungen, die aus Stützen und pneumatisch angetriebenen Niederhaltern bestehen, werden ebenfalls in mehreren Iterationen optimiert und 3D-gedruckt. Ebenso werden die Greifbacken weiter optimiert, sodass die geforderten Rohrdurchmesser sicher gegriffen werden können.

Als Steuerkonzept wird die **Steuerung** mit einer SPS als übergeordnete Steuerung festgelegt (Bild 117), da es größtmögliche Flexibilität und Erweiterbarkeit bei den zu verwendeten Komponenten bietet. SPS, HMI und Roboter kommunizieren über Profinet miteinander (Bild 118). Die Standard-Softwarebausteine, Abb. 13, werden entwickelt und erfolgreich getestet. Der Schaltplan der Anlage wird weitgehend fertiggestellt.

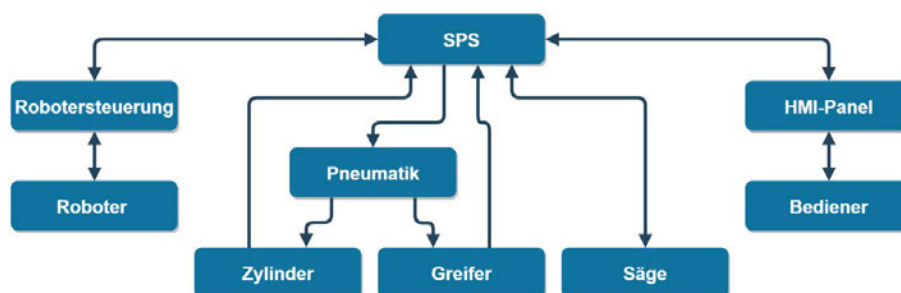


Bild 117: Steuerkonzept der Sägezelle

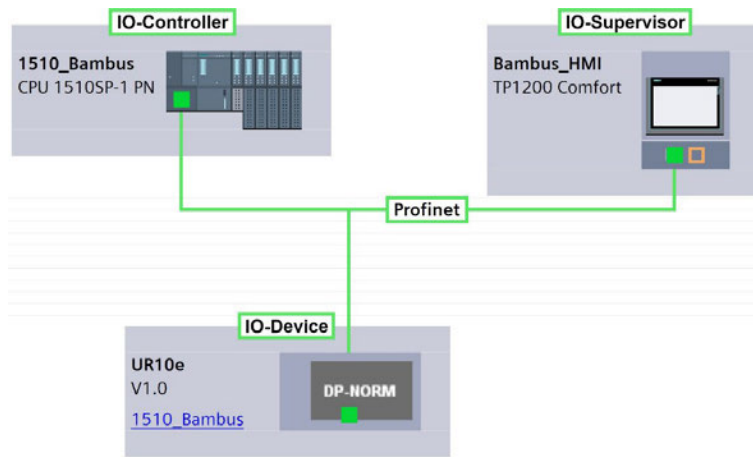


Bild 118: Kommunikationsarchitektur der Sägezelle

Nachdem die Vorarbeiten abgeschlossen sind, erfolgt der **Aufbau der Sägezelle** nach dem aktuellen, optimierten Konzept. Der Rahmen wird in Profilbauweise ausgeführt (Bild 119) und Fertigungsteile (Schublade) werden extern gefertigt. Parallel werden der finale Schaltplan erstellt, die elektrischen Komponenten bestellt und der Bau der beiden Schaltschränke begonnen (Bild 120).

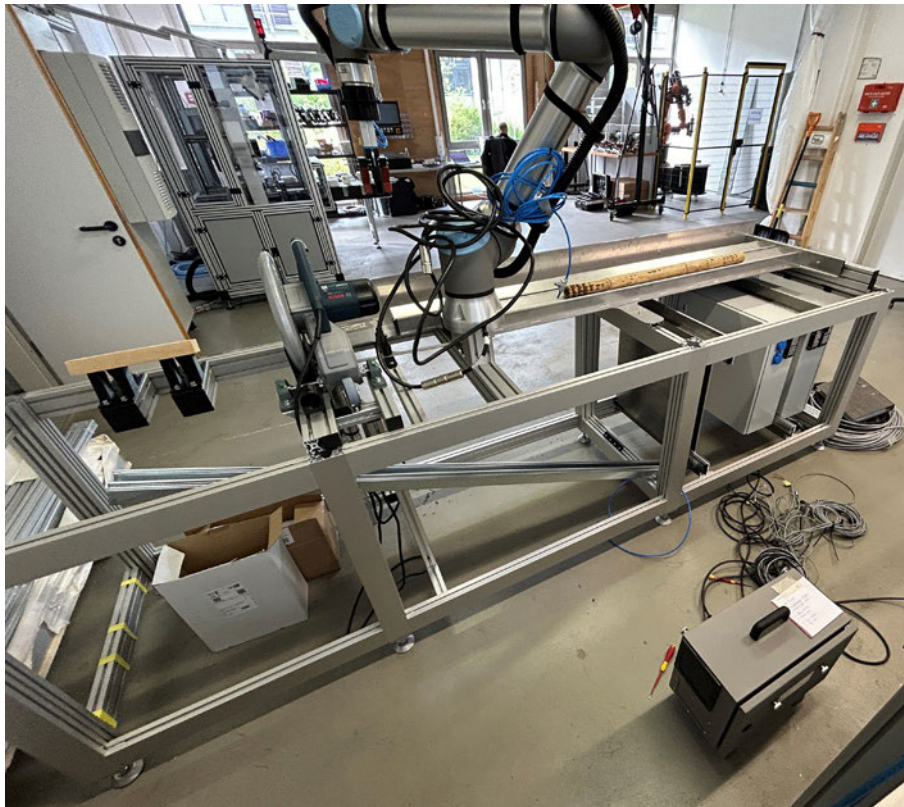


Bild 119: Zellenbau der Sägezelle

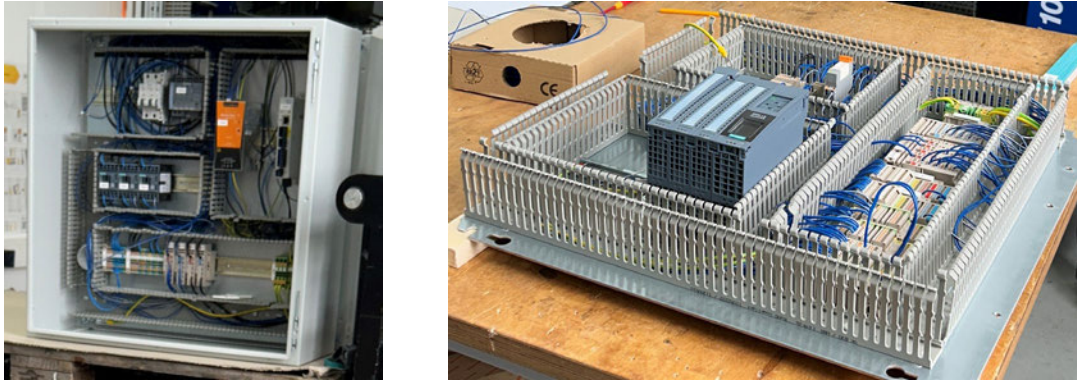


Bild 120: Schaltschrankbau für die Sägezelle

Die fertige Verarbeitungszelle ist in Bild 121 dargestellt. In Bild 122 und Bild 123 sind die Einschübe zu sehen, in der die Schaltschranke, das Roboter-Panel und die Pneumatik eingebaut sind und in Bild 124 die Bedieneinheit. Eine vollautomatische Strahleinheit wird in mehreren Iterationsschritten optimiert, 3D-gedruckt und in die Anlage eingebaut (Bild 125). Eine halbautomatische Reinigungseinheit wird ebenfalls in der Anlage vorgesehen und als Dummy-Vorrichtung eingebaut. Der Sicherheitskreis wird separat von der SPS ausgeführt und beinhaltet die Überwachung der Tür, Schublade, des Roboters, der Pneumatik und der Säge. Tür oder Schublade können nur geöffnet werden, wenn der Roboter und die Säge sich nicht bewegen. Die pneumatischen Zylinder sind dann drucklos.



Bild 121: Fertiggestellte Sägezelle

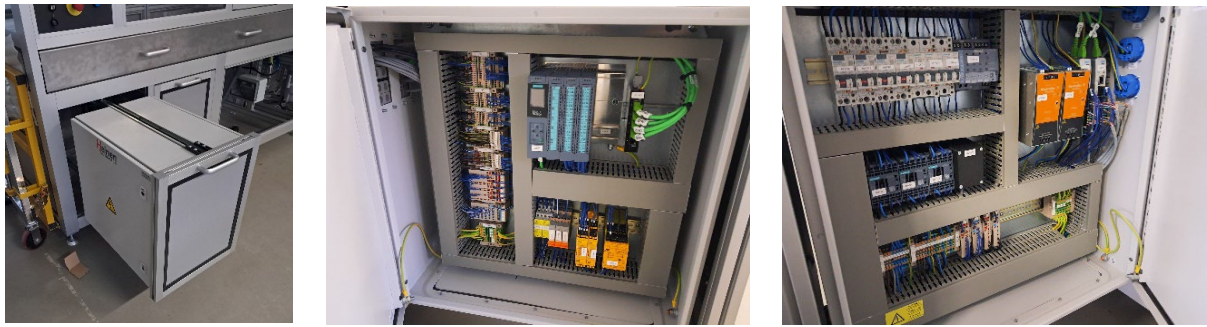


Bild 122: Leistungs- und Steuerschrank der Sägezelle

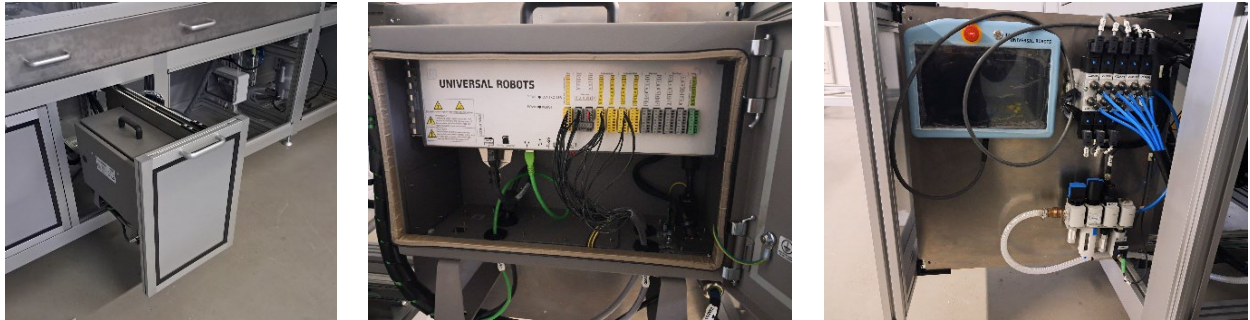


Bild 123: Roboterschaltschrank, Roboter-Steuerung, Pneumatik der Sägezelle



Bild 124: Bedieneinheit der Sägezelle

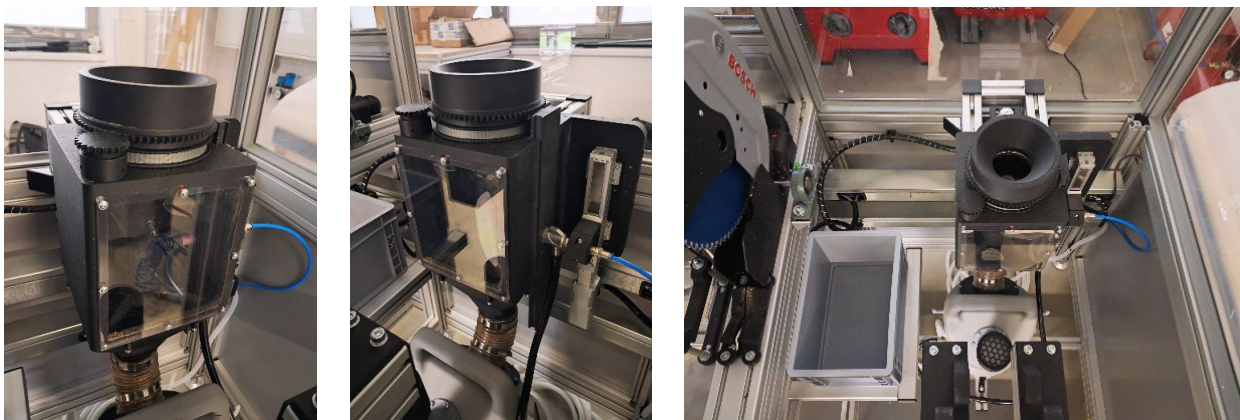


Bild 125: Strahleinheit der Sägezelle

Bei der ersten **Inbetriebnahme** stellen sich noch folgende Probleme heraus, die im weiteren Projektverlauf bearbeitet werden:

- Da die Bambusrohre unterschiedlich stark gekrümmt sind, werden manche Rohrstücke beim Einführen in die Strahleinheit nicht korrekt positioniert, wodurch der Roboter in eine Störung gehen kann. Dieses Problem sollte so gelöst werden, dass der Roboter das zu bearbeitende Rohrende an definierte Kanten fährt und dabei die Greifer-Orientierung entsprechend nachjustiert. Diese Lösung konnte nicht mehr einbaut werden, da der Roboter bei der Korrekturbewegung in Singularitäten kommt und daraufhin seine Bewegung stoppt.
- Obwohl am Eingang der Strahleinheit eine doppelt ausgelegte Ringbürste angebracht ist, kommen Glasperlen in den Lamellenverschluss, wodurch die Gängigkeit beeinträchtigt wird. Daher wird in einem nächsten Schritt die Abdichtung nach oben zum Lamellenverschluss verbessert.
- Dünne Rohre werden nicht sicher gegriffen. Der Greifer kann eine große Bandbreite an unterschiedlichen Durchmessern greifen. Es zeigt sich, dass dünne Rohre (< 20 mm) nicht ausreichend sicher gegriffen werden können. Daraufhin wird der Greifer entsprechend angepasst.

Nach der funktionellen Fertigstellung sowohl der Roboter- als auch der SPS-Programmierung geht es im weiteren Projektverlauf um die Anbindung der SPS-Software an ein **Datenbanksystem** (SQLEXPRESS) und um die Definition der Datenbanktabellen. Damit ist es möglich, dass der Bediener nur noch die ID des Bambusrohrs in der Bedieneinheit eingibt und alle rohrspezifischen Daten, wie Rohrdurchmesser, Sägeschnitte, Bearbeitungsbereiche der beiden Rohrenden und die Dauer zum Strahlen von der Datenbank geliefert werden. Die Strahlzeiten der Rohrenden müssen noch bestimmt werden. Sie sind von verschiedenen Parametern, wie Bambusart, Bearbeitungsbereich und Durchmesser abhängig.

Der (vereinfachte) **Gesamtablauf** sieht folgendermaßen aus:

Der Bediener soll ein Bambusrohr bearbeiten. Jedes Bambusrohr hat ein Etikett mit einer eindeutigen ID (Die ID wurde bereits vor dem Prüfvorgang in der Prüfzelle angebracht).

1. Der Bediener legt das Bambusrohr in die Zuführ-Ablage der Schublade
2. Der Bediener gibt die ID des Bambusrohrs im HMI ein
 - a. Dabei werden alle prozessrelevanten Daten aus der Datenbank abgefragt
3. Der Bediener labelt die zu sägenden Segmente mit Etiketten (Positionen werden aus der Datenbank gelesen und auf der HMI angezeigt)
4. Der Bediener schließt die Schublade und quittiert dies am Bedienpanel
5. Der Bediener startet die Bearbeitung (Automatik). Dabei werden folgende Schritte automatisch nacheinander ausgeführt:
 - a. Der Roboter positioniert das Rohr zum Ansägen

- b. Das Rohr wird angesägt
- c. Die Rohrstücke werden erstellt. Für jedes Rohrstück werden folgende Prozessschritte ausgeführt:
 - i. Das Rohr wird auf die gewünschte Länge des Rohrstücks vom Roboter nach rechts gezogen
 - ii. Das Rohr wird gesägt
 - iii. Der Roboter führt das gesägte Rohrstück zur Strahleinheit und führt das eine Rohrende dort ein
 - iv. Das Rohrende wird gestrahlt. Dabei pendelt die Düse für eine vorgegebene Zeit (Wert aus der Datenbank) in einem vorgegebenen Bereich (Wert aus der Datenbank) auf und ab
 - v. Der Roboter entnimmt das Rohrstück der Strahleinheit
 - vi. Der Roboter dreht das Rohrstück
 - vii. Der Roboter führt das andere Rohrende in die Strahleinheit ein
 - viii. Das Rohrende wird gestrahlt
 - ix. Der Roboter entnimmt das Rohrstück der Strahleinheit und legt es auf die Reinigungsstation
 - x. Die Sicherheitstür wird freigeben
 - xi. Der Bediener öffnet die Tür
 - xii. Der Bediener säubert die Rohrenden händisch. Dabei wird das Rohr weiterhin vom Roboter festgehalten
 - xiii. Der Bediener schließt die Sicherheitstür und bestätigt das am HMI
 - xiv. Der Roboter legt das Rohrstück in die Rohrstück-Ablage der Schublade ab und schiebt es so nach links, dass für ein weiteres Rohrstück entsprechend Platz ist
- d. Nach Fertigstellung aller Rohrstücke wird die Schublade freigegeben und die Rohrstücke können vom Bediener entnommen werden.

Zur Verbesserung der Lebensdauer der Strahleinheit wird zum Projektende eine **zusätzliche Absaugung** konstruiert und eingebaut. Zur Absaugung der Sägespäne beim Sägen gibt es bereits einen Staubsauger in der Sägezelle. Da Sägen und Strahlen nicht gleichzeitig durchgeführt werden, wird ein pneumatisch gesteuerter Schieber für die abzusaugende Luft konstruiert, 3D-gedruckt und eingebaut. Zusätzlich muss die SPS-Software geeignet erweitert werden.

Bei der Abschlussdemonstration kann der gesamte Ablauf der Sägezelle mit echten und aktuellen Daten gezeigt werden.

2.1.4.3 Implementierung Modul Prüfen (AP 4.3)

Auf Grundlage der Basiszelle aus AP 4.1 wird zunächst eine erste Konstruktion der Prüfwelle erstellt und an den Projektpartner (ILA_5150) geschickt. Nach Absprache mit dem Projektpartner wird die endgültige Prüfwelle konstruiert, vom Projektpartner (ILA_5150) freigegeben und bei Heinen Automation aufgebaut (Bild 126). Schaltplan und Schaltschrank werden im weiteren Verlauf des Projektes erstellt (Bild 127).

Der fertige Schaltschrank wird zum Projektpartner geliefert, der den funktionellen Teil der Prüfwelle vollständig erstellt.



Bild 126: Rahmenbau der Prüfwelle

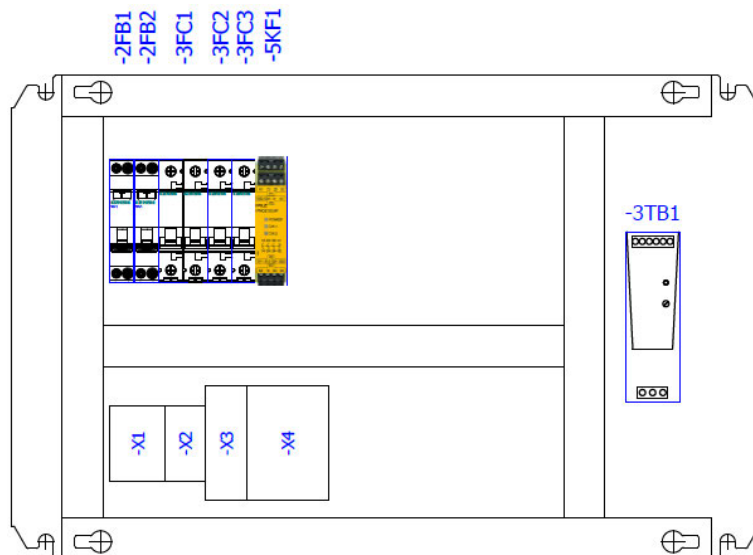


Bild 127: Schaltschrankplan der Prüfwelle

Kurz vor der Abschlussdemonstration werden der funktionelle Teil der Anlage eingebaut und die Prüfwelle fertig gestellt (Verkleidung).

Bei der Abschlussvorstellung kann die fertige und funktionsfähige „Fertigungszelle Prüfen“ gezeigt werden.

2.1.4.4 Implementierung Modul Verbinden (AP 4.4)

Auf Grundlage der Basiszelle aus AP 4.1 wird die Fügezelle in Absprache mit dem Projektpartner (IaAM) mechanisch konstruiert und der Schaltplan erstellt. Nach Abnahme der Konstruktion von Seiten des Projektpartners, wird der Rahmen der Fügezelle mechanisch inklusive des Schalt-schranks aufgebaut (Bild 128 und Bild 129).

Nach Fertigstellung wird die „Fertigungszelle Fügen“ an den Projektpartner (IaAM) ausgeliefert, der die funktionalen Komponenten einbaut.



Bild 128: Rahmenbau der Fügezelle



Bild 129: Schaltschrank der Fügezelle

Die Fügezelle wird zum Ende des Projekts vom Projektpartner (IaAM) wieder zurückgeliefert und mechanisch fertig gestellt (Verkleidung).

Bei der Abschlussdemonstration kann die fertige und funktionsfähige „Fertigungszelle Fügen“ gezeigt werden.

2.1.4.5 Bahnplanung Bambusrohr-Handling (AP 4.5)

Das Fügen der gesägten Rohrstücke mit den AM-gefertigten Knotenpunkten erfolgt in der Fügezelle. Hierzu wird ein **Robotersystem** verwendet. Zum Einsatz kommt der Roboterarm UR10e des Herstellers Universal Robots, ausgestattet mit einem Kraft-Drehmoment-Sensor des Typs FT-300-S und einem Zweifingergreifer des Typs 2F-85, beide des Herstellers Robotiq. Der Fügeprozess wird am Use Case Bambuskinderwagen entwickelt.

Es werden zweistufige **Greifbacken** für das Parallelgreifsystem entwickelt, die sowohl Rohrstücke als auch Knotenpunkte sicher greifen können. Zum Greifen Rohrstücke wird der obere Teil der Greifbacken verwendet. Die unregelmäßige Außengeometrie der Rohrstücke (konische Grundform vom Stamm bis zur Halmspitze, Knotenbereiche, konkaver Konturverlauf zwischen den Knoten) kann zum Verdrehen oder Verlagern des Rohrstücks nach dem Greifen führen. Der obere Teil der Greifbacken besteht daher aus einer breiten, prismatischen Aufnahme (Bild 130). Erste Versuche zeigen, dass das Verdrehen oder Verlagern durch die Aufnahme deutlich reduziert werden kann.

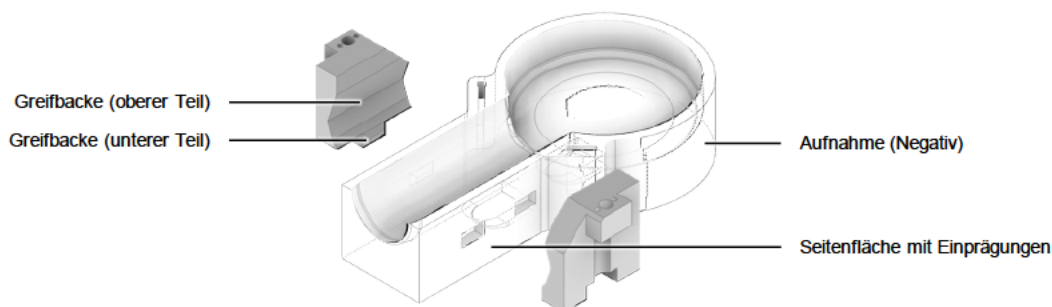


Bild 130: Zweistufige Greifbacken und Aufnahmen für die Knotenpunkte

Zum Greifen der Knotenpunkte wird der untere Teil der Greifbacken verwendet. Hier ergeben sich besonders hohe Anforderungen an die Wiederhol- und Positioniergenauigkeit beim Greifen beziehungsweise Manipulieren, da die Knotenpunkte in der Fügezelle an definierte Positionen abgelegt werden müssen, um sicher mit den Rohrstücken gefügt zu werden. Aufgrund der komplexen Form (viele Rundungen, kaum ebene Flächen) und der Vielzahl unterschiedlicher Knotenpunkte im Kinderwagen, werden die Knotenpunkte vor dem Fügeprozess in Negative (Aufnahmen) eingesetzt. Dies erfordert zwar einen weiteren manuellen Arbeitsschritt, vereinfacht den Fügeprozess in der Zelle aber signifikant. Die Aufnahmen verfügen über parallele Seitenflächen

und Einprägungen, in welche der untere Teil der Greifbacken zuverlässig greifen kann. Greifversuche zeigen, dass so ein sehr zuverlässiges Greifen und Positionieren möglich wird (vgl. AP 4.6, Kapitel 2.1.4.6).

Trotz der verbesserten Greifbacken muss die Lage des gegriffenen Rohrstücks visuell bestimmt werden. Vor allem gekrümmte Rohrachsen führen dazu, dass die Position der Rohrenden bei jedem Rohrstück stark variieren können. Beim Fügen in die Klebmuffen muss diese Position jedoch auf bis zu < 1 mm gekant sein. Mittels einer 3D-Kamera (Typ Realsense D435 des Herstellers Intel) wird daher ein **Ende des Rohrstücks visuell erfasst**. Es wird ein Softwarepaket entwickelt, das aus der aufgenommenen Punktwolke das Ende eines Rohrstücks erkennt (Bild 131). Durch die Verschiebung des Ursprungs in das Rohrstückende und wird dieses als virtueller Endeffektor für die anschließende Pfadplanung genutzt. Anhand der in der Datenbank hinterlegten Außenkontur und der Schnittpositionen kann das andere Rohrstückende ermittelt und die korrekte Lage zu beiden zu fügenden Klebmuffen eingestellt werden. Das Rohrstück wird anschließend als orientiertes Kollisionsobjekt in die Planungsszene eingefügt. Der Großteil des Softwarepakets basiert auf der Bibliothek Point Cloud Library.

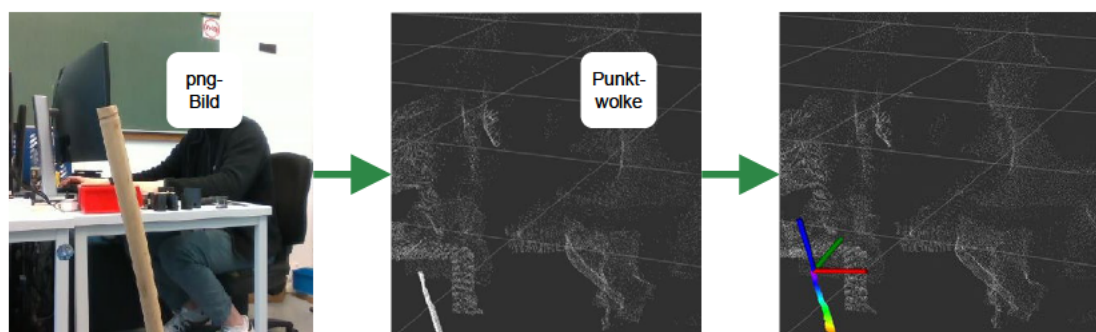


Bild 131: Automatische Erkennung eines Rohrstückendes mit Hilfe einer 3D-Kamera

Um die Rohrstücke und Knotenpunkte im begrenzten Platz der Fügezelle gut manipulieren zu können, wird zunächst der Arbeitsraumbedarf des Roboters analysiert (Bild 132). Es zeigt sich, dass die beste Erreichbarkeit gegeben ist, wenn der Roboterarm außermittig der Erweiterungszelle positioniert wird. Anhand dieser Informationen erfolgt anschließend die Konstruktion der Fügezelle (vgl. AP 4.4, Kapitel 2.1.4.4). Die CAD-Daten aus der fertiggestellten Konstruktion werden für die Erstellung der **Planungsszene der Fügezelle** genutzt. Das Framework „Moveit Task Constructor“ ermöglicht die holistische Planung komplizierter Bewegungsabläufe, sodass intermediäre Bewegungen des Roboterarms mit der nötigen Platzierungsbewegung kompatibel sind. Das Framework wird für den Einsatz im UR10e getestet und schließlich in die Fügezelle integriert.

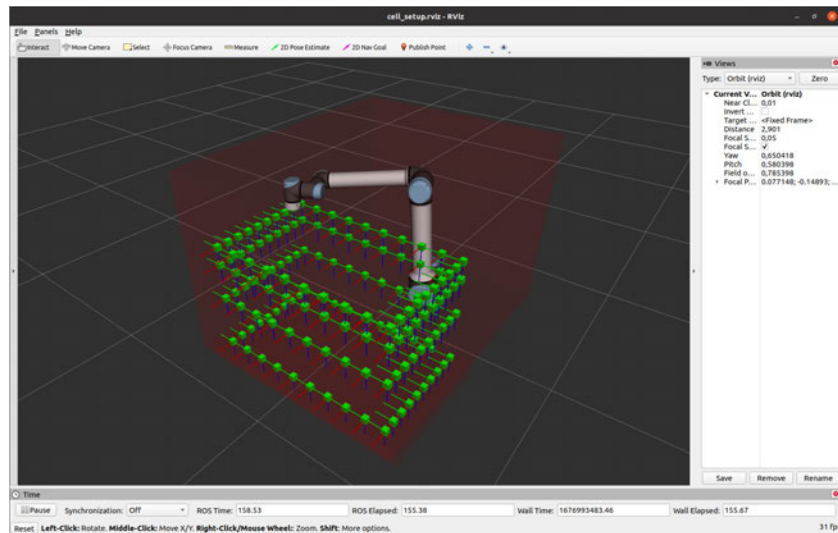


Bild 132: Erreichbarkeitsanalyse der Fügezelle

2.1.4.6 Adaptives robotergestütztes Fügen (AP 4.6)

Um den **Ablauf des Fügeprozesses** zu erleichtern, werden die Rohrstücke und Knotenpunkte mit einer pneumatisch betriebenen Vorrichtung gefügt (aktiver Antrieb). Der Roboterarm platziert die Knotenpunkte hierzu in einer weiteren Vorrichtung (passive Rahmenlehre). Die passive Rahmenlehre kann nach dem Fügevorgang samt der gefügten Komponenten entnommen werden, sodass die Klebungen zwischen den Komponenten in definierter Position abbinden können. Der aktive Antrieb ist fest in einer Schublade der Fügezelle verbaut. Als Vorbereitung für den Fügeprozess wird die Schublade mit 1 passiven Rahmenlehre, 3 Rohrstücken und 6 Knotenpunkten bestückt. Die passive Rahmenlehre rastet beim Einsetzen in die Schublade ein, sodass ihre 3 Linearschlitten über Mitnehmer durch den aktiven Antrieb bewegt werden können (Bild 133 und Bild 134). Damit wird die Anzahl der benötigten Pneumatikzylinder auf ein Minimum begrenzt, um die Investitionskosten der Fügezelle gering zu halten. Am Ende der Fügebewegungen rasten die 3 Linearschlitten der passiven Rahmenlehre ein, sodass sich ihre Position während des Abbindens des Klebstoffs nicht mehr ändert. Der Fügeprozess läuft im Detail wie folgt ab:

1. Schublade öffnen
2. 1 passive Rahmenlehre (Linearschlitten verriegelt) einsetzen
3. 3 Rohrstücke und 6 Aufnahmen mit Knotenpunkten einlegen
4. Schublade schließen
5. Verriegelung der Linearschlitten wird durch Entriegelungszylinder aufgehoben
6. Linearschlitten werden durch Linearzylinder auf Anschlag gefahren (auf)
7. Knotenpunktaufnahmen werden durch Roboterarm auf Rasten platziert
8. Rohrstück wird durch Roboterarm zwischen zwei Knotenpunkten ausgerichtet
9. Linearschlitten wird durch Linearzylinder auf Anschlag gefahren (zu), Linearschlitten verriegeln sich automatisch
10. Schritte 7 bis 9 werden für die übrigen Rohrstücke und Knotenpunkte wiederholt
11. Passive Rahmenlehre samt Komponenten entnehmen

12. (Schritte 1 bis 11 mit neuer passiver Rahmenlehre und Komponenten wiederholen)

13. Komponenten nach erreichter Handhabungsfestigkeit aus passiver Rahmenlehre entnehmen

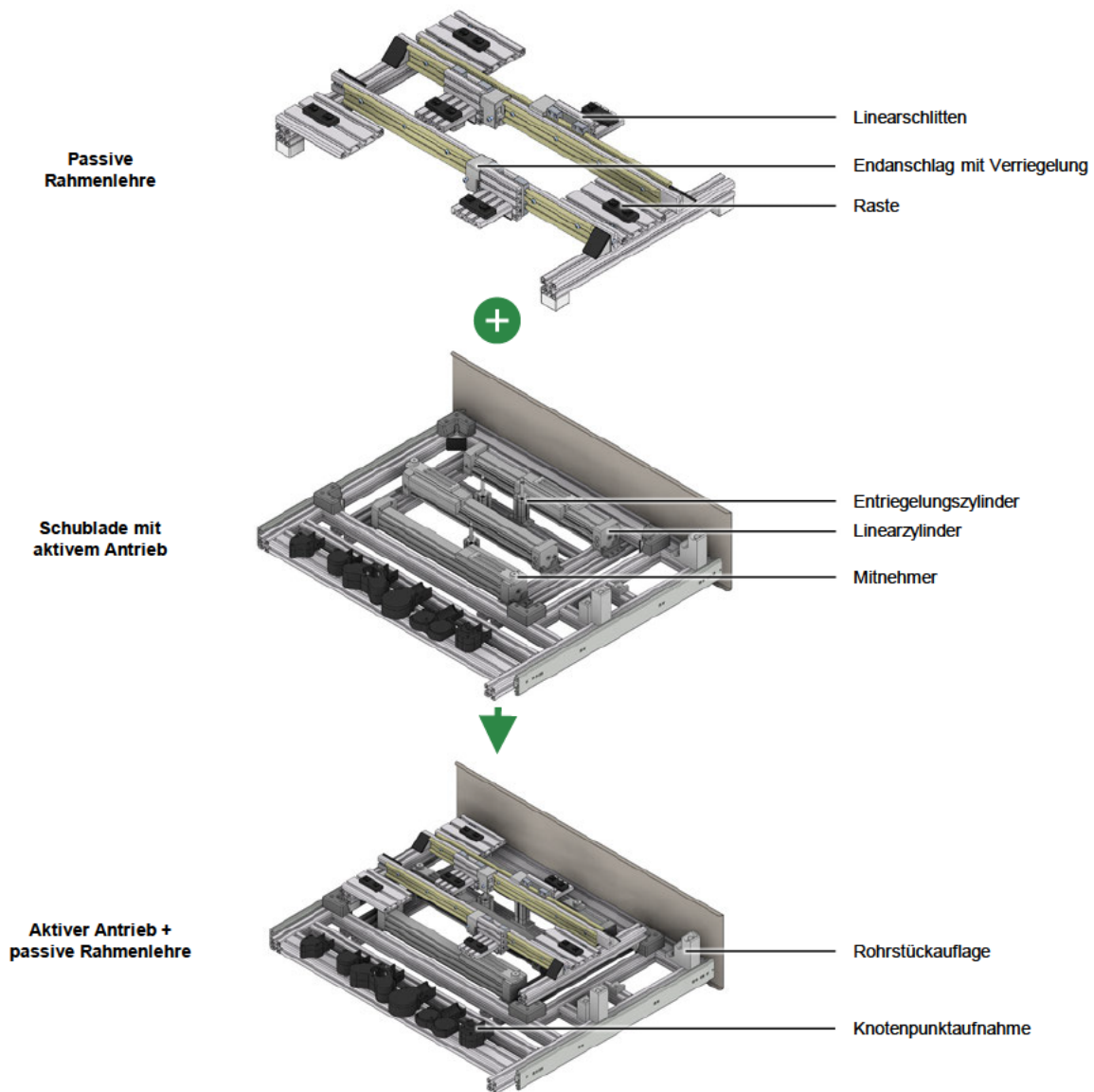


Bild 133: Aufbau der Fügevorrichtung

Beim **robotergestützten Fügen** wird der Roboterarm in den Freedrive-Modus versetzt, sodass sich das Rohrstück in den Klebmuffen der Knotenpunkte zentrieren kann. Der Freedrive-Modus wirkt nur auf die translatorischen Achsen. Die rotatorischen Achsen bleiben fixiert, sodass sich das Rohr beim Fügevorgang nicht verdreht. Das Erreichen der Endpositionen der Linear- und Entriegelungszyylinder wird durch Näherungsschalter überwacht. Sollte ein Näherungsschalter nicht auslösen, oder der Kraft-Drehmoment-Sensor unzulässig hohe Belastungen messen, wird der Fügeprozess abgebrochen. Der Klebprozess wurde im Projekt noch nicht automatisiert umgesetzt. Hierzu sind auf dem Markt aber Dosier- und Mischanlagen verfügbar, die über weitere Aktorik oder den Roboterarm zukünftig in den Fügeprozess eingebunden werden können.

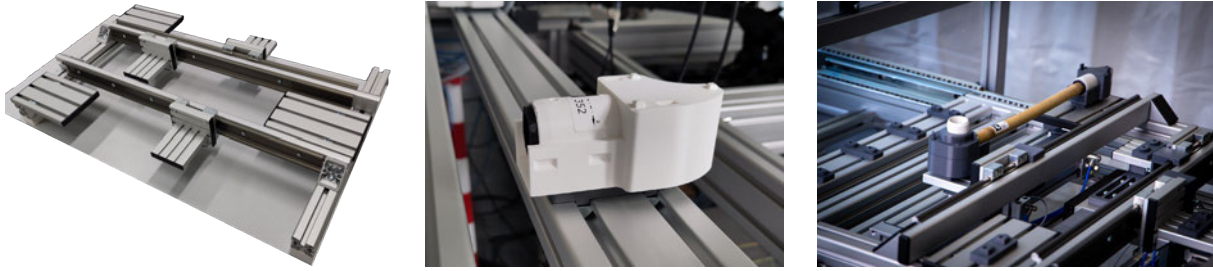


Bild 134: Passive Rahmenlehre, Knotenpunktaufnahme und Gesamtaufbau [MAR-25]

Zur **Steuerung** der verschiedenen Systemkomponenten wird ein Industrie-PC (IPC) eingesetzt. Der IPC nutzt das Betriebssystem Ubuntu 22.04 LTS und steuert das Robotersystem, die pneumatische Fügevorrichtung und die Sicherheitseinrichtungen der Fügezelle mit dem Framework Robot Operating System 2 (ROS2). Die pneumatischen Komponenten des aktiven Antriebs werden über die Schnittstellen des UR10e angesteuert.

Mit der **Fügezelle** lassen sich Rohrstücke mit einer Länge von bis zu 430 mm mit verschiedensten Knotenpunkten fügen. Hierzu müssen lediglich die Aufnahmen der Knotenpunkte angepasst werden. Neben Kinderwagengestellen lassen sich so auch Komponenten für andere Produkte in der Fügezelle vorproduzieren (Produktion von „Bambushalbzeugen“).

2.1.5 Test Use Case und Evaluierung (AP 5)

2.1.5.1 Konstruktive Ausgestaltung Bambusprodukt (AP 5.1)

Nach Präzisierung der Anforderungen und Funktionsmerkmale des Bambuskinderwagens wird ein erstes **Lösungskonzept** entwickelt und in einer CAD-Software modelliert (Bild 135). Im Rahmen eines Markt- und Patentvergleichs werden insbesondere verschiedene Zentralgelenke – die „Herzstücke“ eines Kinderwagens – analysiert und auf ihre Übertragbarkeit auf Bambusrohr geprüft.



Bild 135: CAD-Modell des finalen Bambuskinderwagengestells

Das entwickelte Konzept erfüllt alle wesentlichen Funktionen eines gängigen Kinderwagens, ohne dass ein Seilzug oder ähnlicher Verstellmechanismus in oder an den Bambusrohren notwendig ist, wie es bei herkömmlichen Kinderwagen üblich wäre. Möglich wird dieser Ansatz durch ein speziell ausgelegtes Zentralgelenk, das ohne solche Mechanismen auskommt. Dies vereinfacht die Konstruktion erheblich, da sie unabhängig von der variablen inneren Geometrie der Bambusrohre (zum Beispiel durch Knoten oder Maßtoleranzen) bleibt.

Im Anschluss werden vier wesentliche **Module des Kinderwagens** weiter ausgearbeitet:

- Vorderradaufhängung
- Hinterradaufhängung
- Schiebestange
- Zentrales Klappgelenk

Nach Fertigstellung der Konstruktionszeichnungen wird ein **erster Prototyp** mit Aluminiumgestell gefertigt (vgl. AP 5.2, Kapitel 2.1.5.3) und auf Stabilität getestet. Dabei treten folgende Probleme auf, die in der Folge identifiziert und konstruktiv überarbeitet werden:

Modul 1: Vorderradaufhängung (Bild 136)

- Vorderradgehäuse und -buchse brechen unter Last. Beide Bauteile werden entsprechend verstärkt.
- Die Räder schlackern bei schneller Fahrt, was durch eine Anpassung des Nachlaufs beseitigt wird.
- Der Arretierungsschnapper zum Feststellen der Vorderräder klemmt nicht und wird durch eine mechanische Überarbeitung korrigiert.
- Im Dauerlaufstest löst sich ein Vorderrad. Durch eine Umkonstruktion der Arretierungshebel und der Vorderradfeder kann das Problem behoben werden.



Bild 136: Modul Vorderradaufhängung

Modul 2: Hinterradaufhängung (Bild 137)

- Die Hinterräder stehen schräg und schleifen beim Fahren, was durch eine Erhöhung der Achslänge um 2 mm korrigiert wird.
- Beim Bremsvorgang wird die Stahlfeder beschädigt. Durch eine Überarbeitung der Führung kann das Problem beseitigt werden.
- Auf der Radachse herrscht zu viel Spiel. Eine Verstärkung und Anpassung der Druckgussteile löst das Problem.
- Die Presspassung des Kugellagers reicht nicht aus, was durch eine Nachbearbeitung des Gehäuses verbessert wird.



Bild 137: Modul Hinterradaufhängung

Modul 4: Zentrales Klappgelenk (Bild 138)

- Die Kollision des Entriegelungshebels führt zu einer umfassenden Neugestaltung des Klappgelenks, was einen erheblichen Mehraufwand verursacht. Letztlich kann jedoch eine funktionale Lösung realisiert werden: Der Klapphebel wird von einer Zug- auf eine Druckmechanik umgestellt. Dies reduzierte die Quetschgefahr erheblich, da die Hände bei Betätigung nun über 15 cm vom Gelenk entfernt positioniert sind – eine signifikante Verbesserung der Sicherheit und Ergonomie.
- Aufgrund einer Kollision des Entriegelungshebels mit dem Klappaufsatz muss das Zentrale Klappgelenk komplett neugestaltet werden.
- Eine weitere Geometrieüberarbeitung beseitigt das Haken der Klappfunktion.
- Eine überdimensionierte Verriegelungsfeder wird neu ausgelegt und konstruiert.

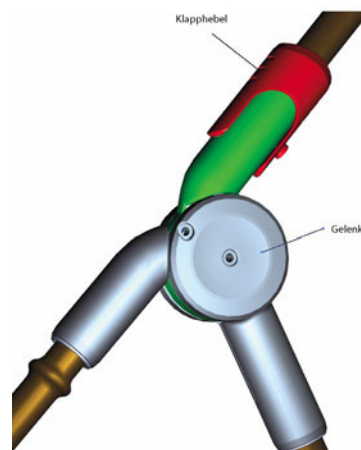


Bild 138: Modul zentrales Klappgelenk

2.1.5.2 Prototypenherstellung (AP 5.2)

Der **erste Funktionsprototyp** wird mit den bewährten Aluminiumrohren aufgebaut.



Bild 139: Funktionsprototyp auf Basis von Aluminiumrohren

Nach Umsetzung aller Konstruktionsanpassungen (vgl. AP 5.1, Kapitel 2.1.5.1) wird ein neuer **Prototyp** gefertigt (Bild 98) und auf die Einhaltung der Norm **EN 1888** geprüft. Alle Anforderungen werden erfüllt – mit Ausnahme der Prüfung der dynamischen Festigkeit. Die Ursache hierfür liegt in den SLS-gefertigten Lasersintererteilen, die den Belastungen nicht standhalten. Bereits nach wenigen Minuten treten Brüche auf. Zudem fallen weitere Brüche nach dem Transport und der erneuten Montage des Kinderwagengestells auf (Bild 140). Nach Rücksprache mit dem IwF werden zwei neue Bauteilsätze hergestellt:

- 1 Knotenpunktsatz aus **SLS-gefertigten carbonfaserverstärkten Teilen** (PA11CF)
- 1 Knotenpunktsatz aus **LPBF-gefertigten Aluminiumteilen** (AlSi10Mg)

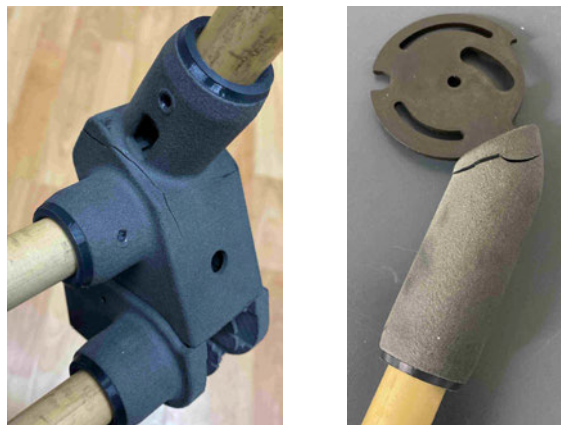


Bild 140: Brüche in den Kunststoffknotenpunkten

Mit den Aluminiumteilen wird der insgesamt **fünfte Prototyp** aufgebaut. Dieser verfügt über eine wesentlich höhere Stabilität. Der dynamische Normtest steht aktuell noch aus. Damit soll zeitnah nachgewiesen werden, dass sowohl das Muffenmaterial selbst als auch die Klebverbindungen zwischen Muffe und Bambusrohr selbst den dynamischen Anforderungen der Norm EN 1888 genügen.

2.1.5.3 Evaluierung automatisierte Prozesskette (AP 5.3)

Zur Evaluierung der Prozesskette werden alle entwickelten **Fertigungszellen** nebeneinander aufgebaut (Bild 141) und für einen demonstrativen Fertigungsprozess eines Kinderwagengestells vorbereitet. Dies umfasst auch die Einrichtung der Datenbank mit den nötigen Schnittstellen zu den Fertigungszellen und der additiven Fertigung.

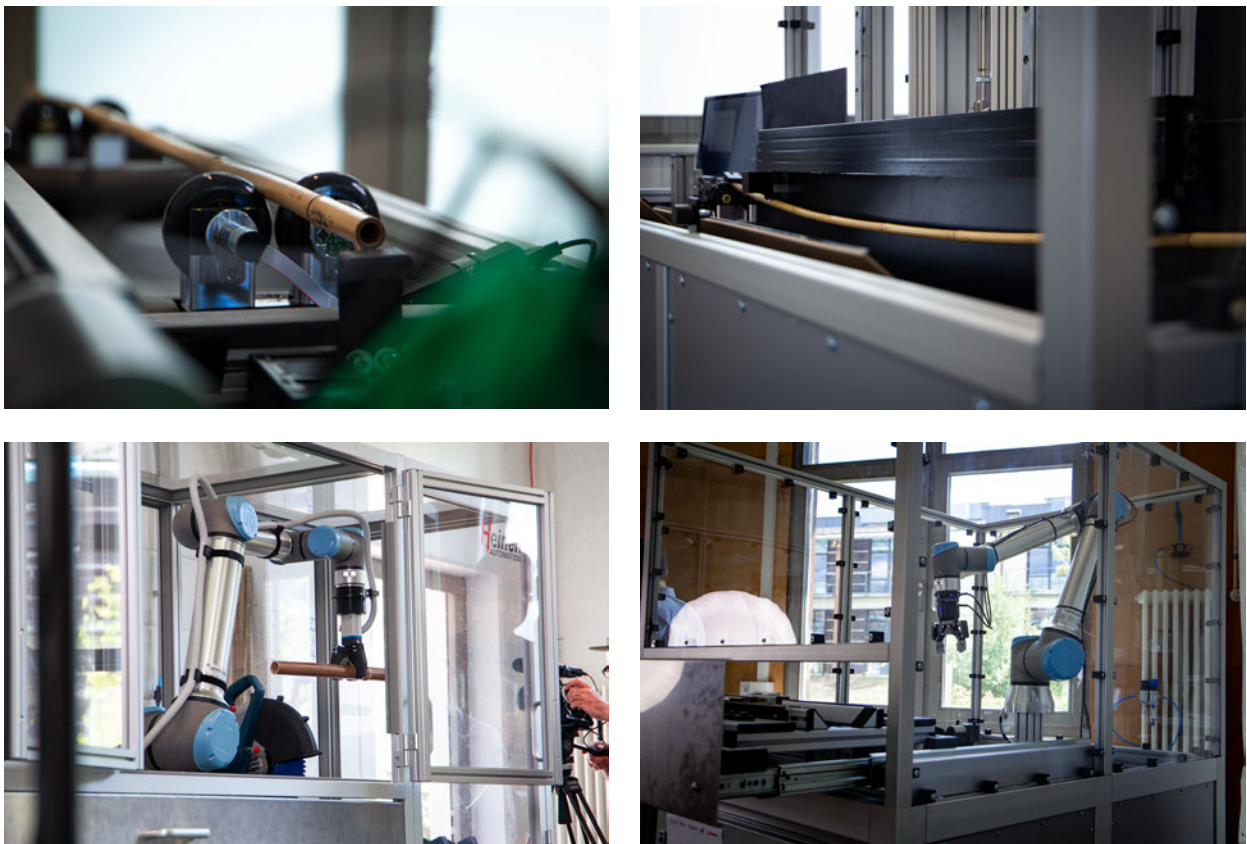


Bild 141: Fertiggestellte Prüf-, Säge- und Fügezellen [MAR-25]

Der **komplette Fertigungsprozess** läuft wie folgt ab. Die meisten Prozessschritte funktionieren bei der Evaluierung bereits erfolgreich automatisiert. Die Nummerierung entsprechen den Nummern aus Bild 142.

1. Anlieferung eines Bambusrohrs
2. Lagern des Bambusrohrs im Eingangslager
3. Einlegen eines Bambusrohrs aus dem Eingangslager in die Prüfzelle (Scan)
 - a. Markieren des Bambusrohrs (Etikett)
 - b. Einlesen der Rohrmarkierung

- c. Messen der 3D-Kontur
 - d. Schreiben der 3D-Kontur in Datenbank
4. Einlegen des Bambusrohrs aus der Prüfwelle (Scan) in die Prüfwelle (Biegeprüfung)
 - a. Messen der Biegesteifigkeit
 - b. Schreiben der Bambusrohrdaten und Biegesteifigkeit in Datenbank
5. Lagern des Bambusrohrs im Rohrzwischenlager
6. Berechnen des Schnittplans des Bambusrohrs und Planung des Einbauorts
7. Schreiben der Schnittpositionen und Einbauorte in die Datenbank
8. Einlegen eines Bambusrohrs aus dem Rohrzwischenlager in die Sägewelle
 - a. Einlesen der Rohrmarkierung (Eintippen der Rohr-ID in das HMI)
 - b. Markieren der späteren Rohrstücke (Etiketten)
 - c. Entfernen der Rohrmarkierung
 - d. Sägen von Rohrstücken aus dem Bambusrohr
 - e. Strahlen der Rohrstückenden
 - f. Schreiben der Rohrstücke in die Datenbank
9. Lagern der Rohrstücke im Rohrstückzwischenlager (Bild 143)
10. Sammeln des Verschnitts zur Entsorgung oder anderweitigen Verwertung
11. Fertigen der (individuellen) Knotenpunkte inklusive Klebmuffen für ein Produkt
 - a. Markieren der Knotenpunkte (Etiketten)
 - b. Schreiben der Knotenpunkte in die Datenbank
12. Lagern der Klebmuffen im Knotenpunktlager (Bild 143)
13. Bestücken der Fügezelle
 - a. Einlegen von 3 bestimmten Rohrstücken aus dem Rohrstückzwischenlager
 - b. Einlegen von 6 bestimmten Klebmuffen aus dem Knotenpunktlager
 - c. Aufsetzen einer passiven Rahmenlehre aus dem Rahmenlehrenlager
14. Starten der Fügezelle
 - a. Einlesen der Markierungen der Klebmuffen
 - b. Platzieren der Knotenpunkte in die passive Rahmenlehre
 - c. Einlesen der Markierungen der Rohrstücke
 - d. Fügen der Rohrstücken mit den Klebmuffen
 - e. Kleben der Rohrstücke und der Klebmuffen zur Produktkomponente
15. Lagern der passiven Rahmenlehre samt der Produktkomponente im Abbinde- und Lager
16. Entnehmen der Bambushalbzeuge aus der Rahmenlehre
17. Lagern der passiven Rahmenlehre im Rahmenlehrenlager
18. Ggf. Montieren der Produktkomponenten zum Produkt
19. Ggf. dauerhaftes Markieren des Produkts für Rückverfolgbarkeit
20. Entfernen der Rohrstückmarkierungen
21. Versenden des Produkts



Bild 142: Ablauf des demonstrativen Fertigungsprozesses

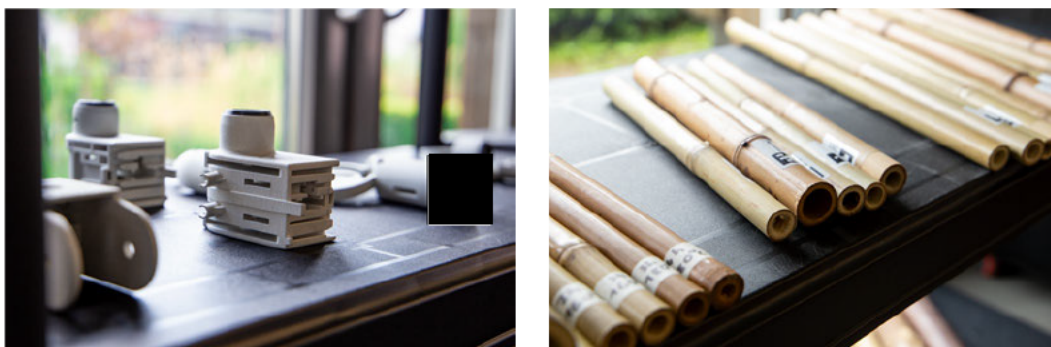


Bild 143: Demonstratives Knotenpunktlager [MAR-25] und Rohstückzwischenlager [GOT-25]

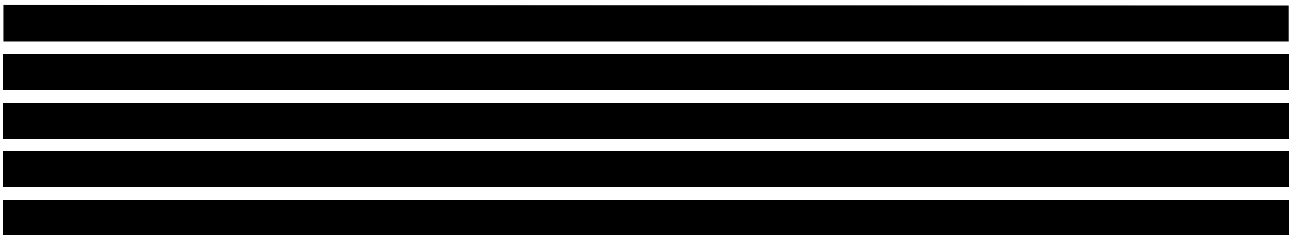
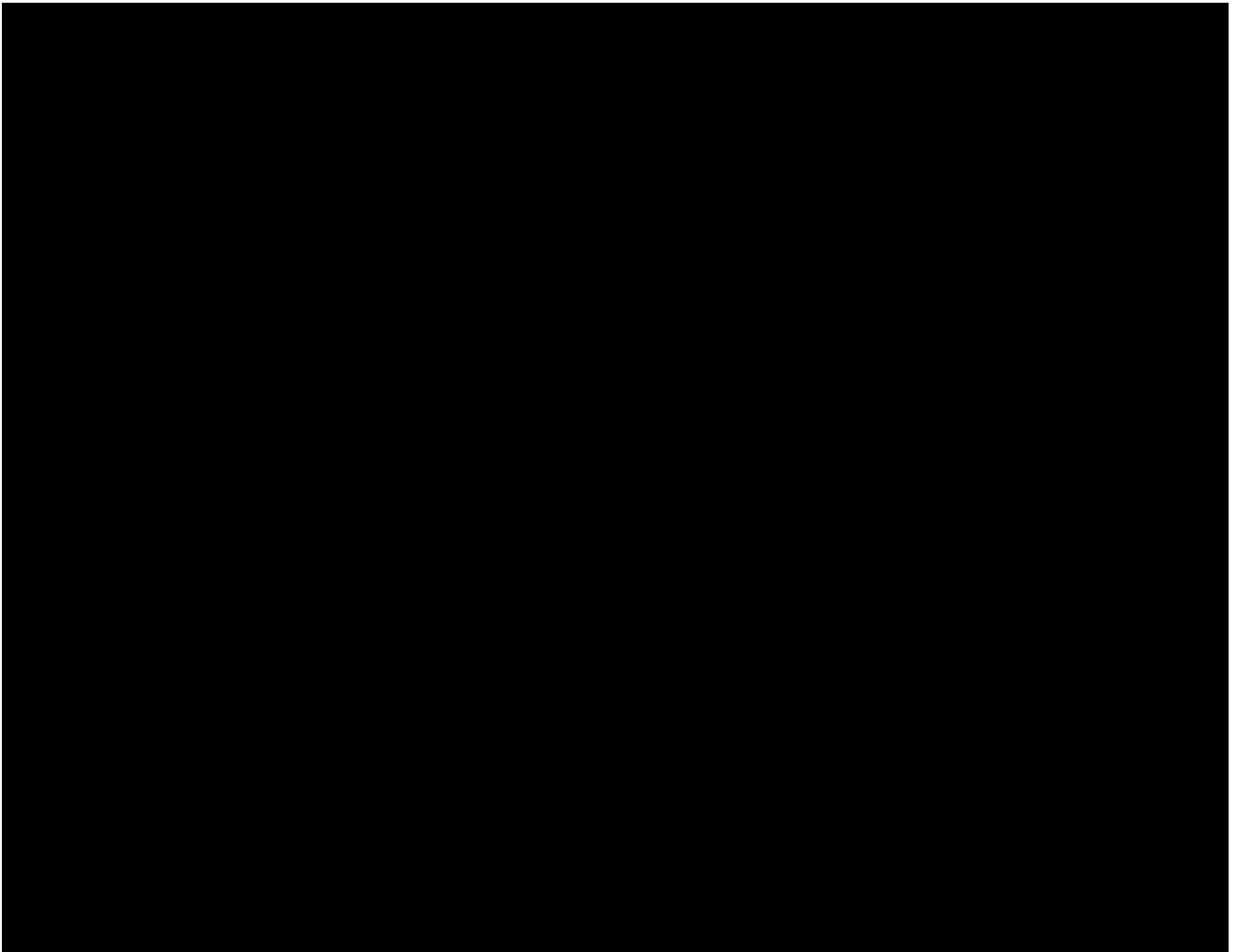
Im Rahmen einer **Projektabschlussdemonstration** werden die wesentlichen Prozessschritte des Fertigungsprozesses vorgeführt (Bild 142 und Bild 144). Zudem werden das Projektziel und die einzelnen Fertigungszellen im Rahmen eines eigenfinanzierten **Projektfilms** in Bewegtbildern festgehalten (Zugriffslink s. Kapitel 2.6).



Bild 144: Durchführung der Abschlussdemonstration [GOT-25]

2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die Vorhabenkosten zeigt Tabelle 16. Die **weiteren Kosten** sind in Tabelle 17 detailliert aufgeschlüsselt.



2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Als nicht-gewinnorientierte Einrichtung ist es dem **IaAM** der FH Aachen nicht möglich, ein Projekt im beantragten Rahmen komplett aus Eigenmitteln zu finanzieren. Wissenschaftlich-technische Risiken stellen sowohl die Entwicklung der Methodik zur Generierung des digitalen CAD-Klons als auch das robotergestützten Fügens der Bambusrohre und der Klebmuffen dar. Dank der Förderung und dem erfolgten Arbeitsaufwand konnte das Projekt erfolgreich umgesetzt werden.

Die Firma **Heinen Automation** ist ein kleines Unternehmen nach EU-Definition (2003/361/EG). Die erhebliche personelle Investition in ein Projekt, welches derzeit nur einen geringen bis keinen Marktanteil hat, ist unternehmerisch sehr risikobehaftet. Zwar bietet das Konzept mittel- und langfristig großes unternehmerisches Potenzial, welches dabei aber von der technischen Umsetzbarkeit abhängig ist. Das technische und wirtschaftliche Risiko ist aus unternehmerischer Sicht zu hoch. Wissenschaftlich-technische Risiken stellen beispielsweise die Entwicklung der konvertierbaren Fertigungszelle und das Verfahren zur Verarbeitung der Bambusrohre dar.

Auch die **ILA_5150** GmbH ist ein kleines Unternehmen nach EU-Definition (2003/361/EG). Das entwicklungsintensive Vorhaben ist geprägt durch technisch-wirtschaftliche Risiken und einen hohen Personalbedarf. Die wirtschaftlichen Risiken sind vor allem in der erheblichen personellen Investition für ein Projekt begründet, welches derzeit nur einen geringen bis keinen Marktanteil hat. Zusätzlich sind die eingesetzten Methoden im Bereich der innovativen Hochtechnologie anzusetzen, die entsprechend ausgebildetes Personal benötigen. Dies betrifft speziell den Einsatz von KI-Technologien und die aufwendige 3D-Rekonstruktionsmethodik inkl. Bildverarbeitung und Datenbankanbindung.

Ebenso ist die **IwF** GmbH ein kleines Unternehmen nach EU-Definition (2003/361/EG). Für die IwF GmbH liegt das wirtschaftliche Risiko hauptsächlich in der Entwicklung selbst begründet, da es sich um eine hohe Innovationstiefe mit komplexen technischen Problembereichen handelt, für deren Durchführung die finanziellen Ressourcen der IwF GmbH überschritten werden würden. Die Realisierung des Projektvorhabens ist ohne eine öffentliche Förderung daher nicht umsetzbar. Die wissenschaftlich-technischen Risiken sind in der Identifikation und Qualifizierung eines geeigneten additiven Fertigungsprozesses begründet.

Auch die Firma **EnDePro** gilt als kleines Unternehmen nach gängiger EU-Definition (2003/361/EG). In der hart umkämpften Kinderwagenbranche sind ständige Produktinnovationen unerlässlich, um die eigene Stellung auf dem Kinderwagenmarkt zu bewahren und zu festigen. Daher bietet das Vorhabens wirtschaftliches Potenzial für die EnDePro GmbH. Nichtsdestotrotz kann die technische Umsetzbarkeit nicht von vornherein sichergestellt werden, wodurch ein gewisses unternehmerisches Risiko entsteht, das nicht allein von EnDePro getragen werden kann. Daher ist die Förderung aus Bundesmitteln notwendig, um das Vorhabens in dem vielversprechenden Partnerverbund umzusetzen.

2.4 Verwertungsplan

Der naheliegende, kurzfristige wirtschaftliche Erfolg ist die Herstellung von Kinderwagengestellen und Fahrradrahmen mit Hilfe von **Klebmuffen**, die sich aber ebenso für Rohrprofile aus anderen Materialien anwenden lassen (Bild 145). Da die modularen Fertigungszellen einen großen Durchmesser- und Längenbereich von Bambusrohren verarbeiten kann, lassen sich Anwendungen mit vergleichbaren Anforderungen, wie zum Beispiel Rollatoren oder Lastenräder entsprechend kurz- bis mittelfristig realisieren. Mittelfristig ist die durchgehend automatisierte Serienfertigung von Bambusstrukturen geplant. Aufgrund der individuellen Eigenschaften von Bambusrohr handelt es sich bei der vorgestellten Prozesskette um eine besondere Variante der Einzelteilfertigung. Die **universellen koppelbaren Automatisierungszellen** bieten damit großes Verwertungspotenzial, auch über den Werkstoff Bambus hinaus. Die längerfristige Perspektive ist die Substitution von konventionellen Leichtbauwerkstoffen in **Produkten mit höheren technischen Anforderungen**.



Bild 145: Verwertbarkeit der Prozesstechnologie für Bambus

Darüber hinaus bildet das Vorhaben einen Ausgangspunkt für die prozesstechnische Verwertung entlang der gesamten Wertschöpfungskette. Entwickler von Automatisierungstechnik und Anlagen (Heinen Automation), Messtechnik und Prüfmaschinen (ILA_5150) sowie Fertigungsverfahren (IwF) werden ihre Produkte auf den Umbau der **industriellen Fertigung für Naturwerkstoffe** vorbereiten. Am IaAM werden kurzfristig die Entwicklungsarbeiten zur **kraftgeführten Manipulation** fortgesetzt und in Zusammenarbeit mit den Industriepartnern in weitere Anwendungen etabliert. Ein großer Erfolg ist die Integration biogener Werkstoffe in automatisierte Fertigungsumgebungen mit Hilfe des **digitalen Klons**.

Das Projektkonsortium spricht sich für eine individuelle **Markteinführung** aus, gegebenenfalls in Form von Partnerschaften. Die Umsetzung zur wirtschaftlichen Nutzung der Projektergebnisse erfolgt im Anschluss an das Projekt in vier Phasen, die im Folgenden beschrieben sind:

Phase 1: Produktbezogene Presse- und Öffentlichkeitsarbeit (2025, Endphase des Projektes)

- Online-Marketing (Presseartikel, Projektfilm)
- Messeteilnahmen, Beiträge in Fachzeitschriften und bei Fachkongressen
- Präsentation über das Internet/Websites
- Einarbeitung der Projektergebnisse in neue Schulungen, Seminare, Webinare

Phase 2: Markteintritt (2025 - 2026, ab Projektende):

- Gewinnung von Referenzkunden (Erstkunde Kinderwagen bereits vorhanden: EnDePro)
- Konzentration auf den deutschen Markt

Phase 3: Marktdurchdringung (2027 - 2029, ab ca. 2 Jahre nach Projektende)

- Erste Umsätze mit der digitalen Prozesskette und den neuen Schulungsinhalten
- Sukzessive Ausweitung auf Auslandsmärkte

Phase 4: Marktetablierung (2030, ab ca. 5 Jahre nach Projektende)

- Umsatzsteigerungen
- Personaleinstellungen

2.5 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Der wissenschaftliche und technische Fortschritt wurde während des Vorhabens insbesondere im **Themenbereich Bambus** verfolgt. Hier existieren ein paar wenige wissenschaftliche Veröffentlichungen zum Vermessen, Verarbeiten und zum Kleben von Bambusrohren. Es hat sich gezeigt, dass die im Projekt verfolgten Ansätze zum Vermessen von Bambusrohren den Herangehensweisen in der Forschung zum Teil im Kern entsprechen (beispielsweise die Definition von geometrischen Kenngrößen). Die im Projekt verwendeten Methoden übertreffen den Stand der Forschung aber deutlich in den Punkten Automatisierungsgrad, Taktzeit und Genauigkeit. Gleiches gilt für die im Projekt weiterentwickelte Klebmuffe. Sie übertrifft zudem alle bekannten Lösungen zum Verbinden von Bambusrohren im Punkt Kurzzeitfestigkeit beziehungsweise Kurzzeittragfähigkeit.

Auch in den **Themenbereichen Automatisierungstechnik, Messtechnik, Additive Fertigung und Kinderwagen** gibt es stets Weiterentwicklungen, welche die jeweiligen Projektpartner aufmerksam verfolgt haben. Hier sind während des Vorhabens ebenfalls keine Fortschritte bekanntgeworden, welche eine Änderung der im Projekt verfolgten Ansätze erforderlich gemacht hätten.

2.6 Veröffentlichungen

Die entwickelte Fertigungsanlage, die zugehörigen Teilprozesse und die Produktprototypen wurden zum Projektende in den Räumlichkeiten von Heinen Automation der interessierten Öffentlichkeit vorgeführt. Im Rahmen der **Projektabschlussdemonstration** (vgl. AP 5.3, Kapitel 2.1.5.3) sind 3 Presseartikel erschienen:

- A. Gottschalk: Innovative Produkte aus nachwachsenden Rohstoffen. Fachhochschule Aachen, 06.06.2025. (<https://www.fh-aachen.de/newsroom/artikel/innovative-produkte-aus-nachwachsenden-rohstoffen>)
- M. Heckert: „Mutter Naturs Alurohr“: Monschauer Technik macht Bambus industriefähig. Mediahuis Aachen, 01.06.2025. (<https://www.aachener-zeitung.de/lokales/region-aachen/monschau/mutter-naturs-alurohr-monschauer-technik-macht-bambus-industriefaehig/69494188.html>)
- T. Förster: Rohstoff, dem man beim Wachsen zusehen kann. Weiss-Verlag, 02.06.2025. (<https://www.wochenspiegellive.de/altkreis-monschau/artikel/rohstoff-dem-man-beim-wachsen-zusehen-kann>)

Zusätzlich wurde im Vorfeld der Abschlussdemonstration ein fünfeinhalb-minütiger **Projektfilm** produziert, der unter folgendem [Link](#) aufrufbar ist.

Die Projektergebnisse wurden und werden durch Beiträge auf folgenden **Konferenzen** bzw. in folgenden **Fachzeitschriften** veröffentlicht:

- Y. Windeln, M. Schleser: TTP LB – BambusFAB: Production line for automated bamboo culm processing. MSE 2024 (Material Science and Engineering Congress), 24. - 26.09.2024, Darmstadt.
- Artikel in Advances in Bamboo Science, Elsevier (geplant)
- Artikel in atp magazin, Vulkan-Verlag (geplant)

Weiterhin wurden die Projektergebnisse auf folgenden **Messen** präsentiert:

- Formnext 2023, Frankfurt (IwF GmbH: Kinderfahrradrahmen aus Bambusrohr mit LPBF-gefertigten Aluminiumknotenpunkten)
- Formnext 2024, Frankfurt (IwF GmbH: Komponenten eines Kinderwagengestells aus Bambusrohr mit SLS-gefertigten Kunststoffknotenpunkten)

Im Rahmen des Vorhabens wurden mehrere **Projekt- und Abschlussarbeiten** durchgeführt:

- A. Hoven: Entwicklung von Knotenverbindern für die Herstellung eines Kinderfahrrad-Rahmens aus Bambusrohr. Fachhochschule Aachen (Masterarbeit), 2022.

- D. Ehart, F. Graaf, H. Ghodasara, J. Janßen: Konstruktion und Simulation einer automatisierbaren Rahmenlehre zum Fahrradrahmenbau. Fachhochschule Aachen (Projektarbeit), 2024.
- L. Deidda: Entwicklung und Optimierung einer Dichtlippengeometrie für additiv gefertigte Bambusrohrverbindungen. IwF GmbH und Fachhochschule Aachen (Bachelorarbeit), 2023.
- L. Jöbgen: Erzeugung eines Digitalen Zwillings und Entwicklung einer daraus abgeleiteten automatischen Schnittplanung von Bambusrohren. Fachhochschule Aachen (Masterarbeit), 2024.
- M. Palm, R. Heinen, M. Schmitz: Bearbeitungszelle für Bambusrohre. Berufskolleg für Gestaltung und Technik der StädteRegion Aachen (Techniker-Abschlussarbeit), 2025.
- N. Ewert: Entwicklung einer datenbankbasierten Fertigungsplanung für die automatisierte Bambusrohrverarbeitung. Fachhochschule Aachen (Bachelorarbeit), 2025.
- T. Didolff: Entwicklung einer Werkstoffkombination für die Additive Fertigung. IwF GmbH und Fachhochschule Aachen (Bachelorarbeit), 2023.
- T. Hürtgen: Entwicklung und Umsetzung eines Steuerungskonzepts zum roboterbasierten Sägen von Bambusrohren. Heinen Automation GmbH & Co. KG und Fachhochschule Aachen (Bachelorarbeit), 2024.

Bildverzeichnis

Bild 1: Kombination der Vorteile manueller und konventioneller Fertigungsverfahren für Bambusrohr	5
Bild 2: Partieller Carbon Footprint von Aluminium-, Stahl- und Bambusrahmen	5
Bild 3: Vorarbeiten bei den Schlüsselinnovationen Prüfung, Verbindung und adaptive Manipulation.....	6
Bild 4: Erforderliche Innovationen zur Übertragung von Automatisierungslösungen auf Bambusrohr	8
Bild 5: Fertigungszellen und Zusammenstellung zu einer Prozesskette (Fertigungsebene).....	9
Bild 6: Modul 1 - Prüfen	9
Bild 7: Modul 2 - Verarbeiten	9
Bild 8: Modul 3 - Verbinden	10
Bild 9: Entwicklungsprozess und Arbeitsgruppen im Vorhaben.....	10
Bild 10: Technische Anwendungen von Bambusrohr.....	12
Bild 11: Bambus-Gravelbike-Rahmengeometrie.....	14
Bild 12: Skizze des Biegeversuchsstands zur berührungslosen Bestimmung der Biegelinie	16
Bild 13: Theoretische Verläufe der physikalischen Größen beim Biegeversuch	16
Bild 14: Maskierung des Bambusrohrs zur Bestimmung der Biegelinie.....	17
Bild 15: Nulllinie Bambusrohr unbelastet (oben), Bambusrohr belastet mit Durchbiegung (unten)	18
Bild 16: Exemplarischer Verlauf der Biegelinie von linker (blau) und rechter (orange) Kamera	18
Bild 17: Simulation der Durchbiegung eines Bambusrohrs mit unterschiedlichen Segmenten.....	19
Bild 18: Aufbau des Stereokamerasystems	20
Bild 19: Rekonstruiertes Bambusrohr als Punktwolke	20
Bild 20: Korrelationsergebnisse bei unbehandelter und behandelter Oberfläche	21
Bild 21: Visualisierung des infraroten Projektionsmusters	21
Bild 22: Aufbau der Manipulation des Bambusrohrs durch Rotation	22
Bild 23: Ausgabe des YOLOv8 Modells Bamboo186.pt	22
Bild 24: Klassifikation eines Bambusrohrs beim Wareneingang	23
Bild 25: Methodik zur Datenerfassung und Speicherung	23
Bild 26: Überblick 3D-Rekonstruktion.....	24
Bild 27: Vergleich ArUco- und Barcodes.....	24
Bild 28: Methodik zur Erfassung der Biegesteifigkeit	25
Bild 29: Steuerungskonzept des Biegeversuchsstands.....	26
Bild 30: Erster Prototyp der Prüfwelle	26
Bild 31: Grafische Oberfläche zur Steuerung der Prüfwelle.....	27
Bild 32: Finaler Aufbau der Prüfwelle (Biegeversuch)	27
Bild 33: Masterstück als bambusähnliche Messreferenz	28
Bild 34: Analytisch bestimmte Biegefestigkeit über die Bambusrohrlänge	28
Bild 35: Einprägung der Biegesteifigkeit durch Anpassung des Innendurchmessers [JOE-24]	29
Bild 36: Einprägung der Biegesteifigkeit in das 3D-Modell durch qualitative Farbskala [JOE-24].....	29
Bild 37: Durchbiegung durch Eigengewicht eines Bambusrohrs im 4-Punktbiegeversuch.....	30
Bild 38: Beispielhafte Markierung mit der ID 1	30
Bild 39: Struktur des Datenbanksystems [EWE-25]	31
Bild 40: Einbauorte im Produkt Kinderwagengestell.....	31
Bild 41: Grafische Nutzeroberfläche der Fertigungsplanung [EWE-25]	32
Bild 42: Darstellung der Schnitt- und Einbauortplanung zweier beispielhafter Rahmen [EWE-25].....	32
Bild 43: Beispielhafte Erzeugung eines überlagerten Schnittintervalls [EWE-25]	33
Bild 44: Einfluss der Rohrkrümmung auf die Rohrstücklängen [EWE-25].....	34
Bild 45: Nachbildung der Sägezelle (oben) samt Bambusrohr (unten) zur Simulation des Sägeprozesses.....	34
Bild 46: Differenz der Rohrstücklänge (oben) und der Schnittwinkel (unten) (Monte-Carlo-Simulation)	35
Bild 47: Prüfkörper in verschiedenen Aufbaurichtungen (SLS, links) und Füllgraden (FLM, rechts)	42

Schlussbericht zum Verbundvorhaben „BambusFAB“

Bild 48: Aufbau des Multimaterial-Inlays	43
Bild 49: Multimaterial-Prüfkörper	44
Bild 50: Balkendiagramme von R_m und A_{max}	45
Bild 51: Balkendiagramme der Druckfließspannung σ_y und der Druckbruchspannung σ_B	46
Bild 52: Balkendiagramme für σ_{fc} und σ_{fm} der Biegeversuche.....	47
Bild 53: Analyse der Werkstoffkombinationen.....	48
Bild 54: SLS-Prüfkörper nach [OLE-20]	49
Bild 55: Soll-Ist-Vergleich der Geometriegenauigkeit bei flacher Positionierung	49
Bild 56: Mikroskopieaufnahmen der Auflösungstestlöcher von 4,00 mm bis 0,10 mm	50
Bild 57: Gegenüberstellung der Auflösungstestschlitzte	51
Bild 58: Soll-Ist-Vergleich der Lisa Pro in Abhängigkeit des Neigungswinkels.....	51
Bild 59: Prüfkörper	52
Bild 60: Klebversuch	53
Bild 61: Klasseneinteilung der Dichtigkeit	53
Bild 62: Konstruktionsvariante „Abgewinkelte Dichtlippe“	54
Bild 63: Trichterform.....	56
Bild 64: Variante „Einzelne Dichtringe“	57
Bild 65: „Doppeldichtlippe“	57
Bild 66: Variante „Mittlerer Einspritzpunkt“	58
Bild 67: Anpassung des Inlays für den Multimaterialprozess.....	60
Bild 68: Fehlerhafter Dichtring durch mangelnde Unterstützung	61
Bild 69: Zweite Anpassung des Inlays	62
Bild 70: Dichtringanbindung.....	62
Bild 71: Kombination aus Inlay und Muffe.....	63
Bild 72: Inlays aus einem Material	64
Bild 73: Zweiteiliges Inlay, Demonstrator	64
Bild 74: Fertigung zweiteiliges Inlay XXXXXXXXXX Bauzeit: 1:33 h/10 Inlays	65
Bild 75: Zylinder AISi10Mg für Klebversuche	66
Bild 76: OpenSCAD - Gescanntes Bambusrohr (rot) mit unterem (blau) und oberem (orange) Dichtring.....	68
Bild 77: Definitionen Bambusrohr, Abbildung basierend auf [STE-17].....	68
Bild 78: Vergleich volle Auflösung (links) und reduzierte Auflösung (rechts).....	69
Bild 79: Dichtlippe erzeugt mit CadQuery	69
Bild 80: Fehlerhafter Bauprozess durch Überhitzung des Pulverbetts.....	70
Bild 81: Satz Kinderwagenmuffen aus PA12	70
Bild 82: Anordnung der Bauteile im Bauraum.....	71
Bild 83: Anordnung aller Knotenpunkte in einem Bauprozess	71
Bild 84: 3D-Scan und Messung Verbindungsbauteil gefertigt aus PA12 mittels SLS	72
Bild 85: 3D-Scan und Messung Verbindungsbauteil gefertigt aus PETG mittels FLM.....	73
Bild 86: 3D-Scan und Messung Verbindungsbauteil gefertigt aus PA12 mittels HP MJF.....	73
Bild 87: Anordnung der Kinderwagenbauteile für den Aluminiumprozess	74
Bild 88: Knotenpunkt aus AISi10Mg mit Stützstrukturen (links) und nach Post-Processing (rechts)	74
Bild 89: Satz Kinderfahrradmuffen auf Bauplattform (LPBF, AISi10Mg)	75
Bild 90: Satz Gravelbikemuffen auf Bauplattform (LPBF, AISi10Mg)	75
Bild 91: Abstandhalter, Stahlmuffe und Inlay mit Probekörper für Durchmesserertoleranztests	76
Bild 92: Erstellen einer individuellen Muffe aus der Rohraußenkontur	77
Bild 93: Klebversuche zur Dichtwirkung unterschiedlicher individueller Klebmuffen	78
Bild 94: Optionen zur Ausrichtung von Klebmuffen zu gekrümmten Rohrstücken	78
Bild 95: Kinderwagenknotenpunkte mit Klebmuffen-Schnittstelle und Inlays	79
Bild 96: Fügen der Kinderwagenknotenpunkte und Rohrstücke mit Hilfe beweglicher Negative	79
Bild 97: Fügeprozess mehrerer Rohrstücke zu Baugruppen mit Hilfe von Rahmenlehren	80

Schlussbericht zum Verbundvorhaben „BambusFAB“

Bild 98: Fertig montiertes Prototypgestell eines Bambuskinderwagens	80
Bild 99: Oberflächenbehandlung von Bambus der Probenvarianten für Raupenschälversuche	81
Bild 100: Bruchbildanalyse des Raupenschälversuchs 8 (teilweise beschädigte Fasern).....	81
Bild 101: Bruchbilder der Raupenschälversuche 1, 11 und 12.....	81
Bild 102: Oberflächenbehandlung von Bambus der Probenvarianten für Zugversuche.....	82
Bild 103: Proben SFFP (rechts: Bruch an Bambus, im Klebstoff und an Muffe).....	82
Bild 104: Proben BLFQ (rechts: Bruch am Bambus)	82
Bild 105: Proben GFP (rechts: Bruch am Bambus)	82
Bild 106: Vorbereitung der Alterungsproben für Behandlung in feuchtgesättigtem Klima.....	83
Bild 107: Ablauf der Alterungsprüfung (1 von 10 Zyklen dargestellt).....	83
Bild 108: Gealterte Zugproben unmittelbar nach dem Entpacken.....	84
Bild 109: Probengeometrie zum Test des Füllvorgangs von Klebstoff in dünnen Klebfugen.....	85
Bild 110: Füllstand der Klebfugenproben nach unterschiedlichen Zeiten.....	85
Bild 111: Test unterschiedlicher Etikettenmaterialien unter verschiedenen Einflüssen.....	86
Bild 112: Versuchsstand der Sägezelle	88
Bild 113: Funktionsbausteine für die SPS der Sägezelle	89
Bild 114: HMI der Sägezelle.....	89
Bild 115: Ansicht der Sägezelle von vorne	90
Bild 116: Ansicht der Sägezelle von rechts-vorne-oben	90
Bild 117: Steuerkonzept der Sägezelle	91
Bild 118: Kommunikationsarchitektur der Sägezelle.....	92
Bild 119: Zellenbau der Sägezelle.....	92
Bild 120: Schaltschrankbau für die Sägezelle	93
Bild 121: Fertiggestellte Sägezelle	93
Bild 122: Leistungs- und Steuerschrank der Sägezelle.....	94
Bild 123: Roboterschaltschrank, Roboter-Steuerung, Pneumatik der Sägezelle	94
Bild 124: Bedieneinheit der Sägezelle.....	94
Bild 125: Strahleinheit der Sägezelle.....	94
Bild 126: Rahmenbau der Prü fzelle	97
Bild 127: Schaltschrankplan der Prü fzelle	97
Bild 128: Rahmenbau der Füge zelle	98
Bild 129: Schaltschrank der Füge zelle	98
Bild 130: Zweistufige Greifbacken und Aufnahmen für die Knotenpunkte.....	99
Bild 131: Automatische Erkennung eines Rohrstückendes mit Hilfe einer 3D-Kamera	100
Bild 132: Erreichbarkeitsanalyse der Füge zelle	101
Bild 133: Aufbau der Fügevorrichtung	102
Bild 134: Passive Rahmenlehre, Knotenpunktaufnahme und Gesamtaufbau [MAR-25].....	103
Bild 135: CAD-Modell des finalen Bambuskinderwagengestells	103
Bild 136: Modul Vorderradaufhängung	104
Bild 137: Modul Hinterradaufhängung	105
Bild 138: Modul zentrales Klappgelenk	105
Bild 139: Funktionsprototyp auf Basis von Aluminiumrohren	106
Bild 140: Brüche in den Kunststoffknotenpunkten.....	106
Bild 141: Fertiggestellte Prüf-, Säge- und Füge zellen [MAR-25].....	107
Bild 142: Ablauf des demonstrativen Fertigungsprozesses	109
Bild 143: Demonstratives Knotenpunktlager [MAR-25] und Rohrstückzwischenlager [GOT-25].....	109
Bild 144: Durchführung der Abschlussdemonstration [GOT-25]	109
Bild 145: Verwertbarkeit der Prozesstechnologie für Bambus	112

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Kurz- und langfristiges THG-Minderungspotenzial pro Jahr	6
Tabelle 2: Verfahrensvergleich zwischen FLM, SLS, MJF und Binder Jetting (Kunststoff)	36
Tabelle 3: Verfahrensvergleich zwischen SLA, DLP und MJM	38
Tabelle 4: Verfahrensvergleich zwischen LPBF, Binder Jetting (Metall) und Laserauftragsschweißen	39
Tabelle 5: Zugfestigkeit PA12 Industrial	43
Tabelle 6: Biegefestigkeit PA12 Industrial	43
Tabelle 7: Bewertungsschema für die Werkstoffprüfungen	47
Tabelle 8: Versuchsergebnisse Abgewinkelte Dichtlippen	55
Tabelle 9: Versuchsergebnisse Trichterform	56
Tabelle 10: Versuchsergebnisse der weiteren Varianten	58
Tabelle 11: Ergebnisse Dichtigkeitsprüfung mit Honig	59
Tabelle 12: Ergebnisse Dichtigkeitsprüfung mit Kleber	59
Tabelle 13: Ergebnisse Dichtigkeitsprüfung weitere Varianten	60
Tabelle 14: Vergleich Baujobauslegung	72
Tabelle 15: Durchmesser toleranzen von Inlays abhängig von Material und AM-Prozess	77
Tabelle 16: Vorhabenkosten (HS: Hochschule, k/m_KMU kleines/mittleres Unternehmen)	110
Tabelle 17: Weitere Kosten (IV: Investition, MK: Material, VM: Verbrauchsmaterial, RK: Reisen)	110
Tabelle 18: Zusammensetzung des Carbon Footprints des benötigten Rohrmaterials	123
Tabelle 19: Zusammensetzung des Carbon Footprints des gesamten Rahmens	124

Literaturverzeichnis

- [AAL-06] Intergovernmental Panel on Climate Change: Aalde, Harald; Gonzalez, Patrick et al.: IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Volume 4 - Agriculture, Forestry and Other Land Use. Internet, 2020-05-18 (<https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>)
- [ABD-12] Abdul Khalil, H.P.S.; Bhat, I.U.H. et al.: Bamboo fibre reinforced biocomposites: A review, In: Materials & Design (2012), H. 42, S. 353–368
- [BEC-20] BVA BikeMedia GmbH: Beckendorff; Jo: Europäische Fahrrad-Verbände schnüren Marktstudie bis 2030. Internet, 2020-12-10 (<https://radmarkt.de/nachrichten/europaeische-fahrrad-verbaende-schnueren-positive-marktstudie-fuer-naechsten-zehn-jahre>)
- [EWE-25] Ewert, Nils: Entwicklung einer datenbankbasierten Fertigungsplanung für die automatisierte Bambusrohrverarbeitung; Aachen, Fachhochschule Aachen, 2025
- [GDA-20] Gesamtverband der Aluminiumindustrie e.V.: N.N.: Produktion und Bedarf. Internet, 2020-05-15 (<http://www.aluinfo.de/produktion-und-bedarf.html>)
- [GDA-21] Gesamtverband der Aluminiumindustrie e.V.: N.N.: Produktion weltweit. Internet, 2021-03-29 (<http://www.aluinfo.de/produktion-weltweit.html>)
- [GOT-25] Fachhochschule Aachen: Arnd Gottschalk, 2025
- [GRO-74] Grosser, Dietger; Liese, Walter: Verteilung der Leitbündel und Zellarten in Sproßachsen verschiedener Bambusarten, In: Holz als Roh- und Werkstoff (1974), H. 12, S. 473–482
- [HOT-14] Hottenroth, Heidi; Joa, Bettina et al.: Carbon Footprints für Produkte: Handbuch für die betriebliche Praxis kleiner und mittlerer Unternehmen; 1. Auflage, Münster, Monsenstein und Vannerdat, 2014
- [INO-08] Inoue, Masafumi; Paudel, Shyam K. et al.: Modern Bamboo Structures; Leiden, 2008
- [ISO 14067] Treibhausgase – Carbon Footprint von Produkten, Februar 2019
- [ISO 22157] Bamboo structures – Determination of physical and mechanical properties of bamboo culms – Test methods, Januar 2019
- [IVE-20] Ingenieurgesellschaft für Verkehrs- und Eisenbahnwesen mbH: N.N.: EcoTransIT World: Berechnung. Internet, 2020-05-18 (<https://www.ecotransit.org/calculat-ion.de.html>)
- [JAN-81] Janssen, Julius J. A.: Bamboo in building structures; Eindhoven, Technische Hogeschool Eindhoven, 1981
- [JOE-24] Jöbgen, Lukas: Erzeugung eines Digitalen Zwillings und Entwicklung einer daraus abgeleiteten automatischen Schnittplanung von Bambusrohren; Aachen, Fachhochschule Aachen, 2024
- [KUK-21] KUKA Aktiengesellschaft: N.N.: Sensitivität durch KUKA.ForceTorqueControl. Internet, 2021-03-29 (<https://www.kuka.com/de-de/produkte-leistungen/roboter-systeme/software/applikationssoftware/kuka-forcetorquecontrol>)
- [MAR-25] Fachhochschule Aachen: Julia Marcussen, 2025
- [MIC-18] Michaux, Frank; Kallweit, Stephan et al.: RoboPIV: How robotics enable PIV on a large industrial scale, In: Measurement Science and Technology (Bd. 29), H. 7, S. 74009
- [MIL-12] Millman, Lauren R.; Giancaspro, James W.: Environmental Evaluation of Abrasive Blasting with Sand, Water, and Dry Ice, In: International Journal of Architecture, Engineering and Construction (2012), H. 3, S. 174–182

- [MYB-20] My Boo GmbH: N.N.: Produktion: Wie in Ghana und Kiel aus Bambus ein Fahrrad wird. Internet, 2020-05-18 (<https://www.my-boo.de/produktion.html>)
- [NAK-16] Nakagawa, Masaki; Kallweit, Stephan et al.: Typical Velocity Fields and Vortical Structures around a Formula One Car, based on Experimental Investigations using Particle Image Velocimetry, In: SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems (Bd. 9), H. 2, S. 754–771
- [OLE-20] Olejarczyk, Michał; Gruber, Piotr et al.: Capabilities and Limitations of Using Desktop 3-D Printers in the Laser Sintering Process, In: Applied Sciences (2020), H. 10, S. 6184
- [STE-17] Steffen, Renko: Geschossdecken aus Bambus. Hannover, Gottfried-Wilhelm-Leibniz-Universität Hannover, 2017
- [SUN-09] Sungkaew, Sarawood; Stapleton, Chris M. A. et al.: Non-monophyly of the woody bamboos (Bambuseae; Poaceae): A multi-gene region phylogenetic analysis of Bambusoideae s.s., In: Journal of plant research (2009), H. 122, S. 95–108
- [VAN-15] van der Lugt, Pablo; Vogtländer, Joost G.: The Environmental Impact of Industrial Bamboo Products: Life-Cycle Assessment and Carbon Sequestration; Peking, International Network for Bamboo and Rattan, 2015
- [VOG-20] Delft University of Technology: Vogtländer, Joost G.: Data on Eco-Costs 2017 V1.6. Internet, 2019-09-03 (<https://www.ecocostsvalue.com/EVR/model/theory/5-data.html>)
- [WIN-19] Windeln, Yannic: Entwicklung von Gestaltungshinweisen und Prototypen für Bambusrohrverbindungen; Aachen, Fachhochschule Aachen, 2019
- [WSA-20] World Steel Association AISBL: N.N.: World Steel in Figures 2020. Internet, 2020-10-01 (<https://www.worldsteel.org/steel-by-topic/statistics/World-Steel-in-Figures.html>)

Anhang A1 - Berechnung des THG-Minderungspotenzials

Annahmen für die Abschätzung des partiellen Carbon Footprints von Fahrradrahmen:

- Betrachtet werden sowohl Ernte beziehungsweise Gewinnung und Formgebung der verwendeten Bambus- und Metallrohre als auch deren Verbrennung beziehungsweise Recycling. Nach ihrer Nutzung werden die Fahrräder am Ort der Produktion gesammelt und demontiert.
- Ebenfalls betrachtet werden Fertigungsschritte mit großem Einfluss auf den Carbon Footprint, darunter die Herstellung und das Recycling der verwendeten Schweißzusätze, des Klebstoffs und der Pulver- beziehungsweise Acryllackbeschichtung sowie die damit verbundenen Fertigungsprozesse. Weitere, für alle Rahmen identische Schnittstellenteile (etwa Tretlagergehäuse und Steuerrohr) fließen nicht in die Berechnung mit ein.
- Die Nutzungsphase des Produkts wird nicht betrachtet, unter der Annahme, dass Bambus- und Metallrahmen die gleichen Funktionen und eine ähnliche Nutzungsdauer aufweisen. Letzteres zeigt sich bereits in der Praxis für Bambus-Fahrräder.

Erläuterung **positiver, nicht betrachteter Faktoren**:

- Für die Photosynthese wird während des Pflanzenwachstums CO₂ aus der Atmosphäre gebunden und in Form biogenen Kohlenstoffgehalts im Produkt gespeichert. Dieser Anteil fließt zwar nicht in die Berechnung mit ein, bewirkt aber für die Lebensdauer des Produkts eine vorübergehende Vermeidung von Treibhauswirkung [HOT-14]. Das Ernten eines Bambushalms begünstigt zudem das schnelle Heranwachsen eines neuen Bambushalms aus dem gemeinsamen Wurzelsystem, wodurch rasch weiteres CO₂ in Biomasse gebunden wird [VAN-15].
- Die Landnutzungsänderung ergibt sich durch den Aufbau von neuen Bambusplantagen. Da der Bambusbestand in China stetig wächst und in den meisten Fällen unfruchtbaren Boden ersetzt, würde eine Betrachtung tendenziell zu negativen CO₂-Äquivalenten führen [VAN-15].
- Für die Produktion des Fahrradrahmens werden keine Materialverluste angenommen, was das Minderungspotenzial durch die Verwendung von Bambusrohr weiter steigern würde.

Tabelle 18: Zusammensetzung des Carbon Footprints des benötigten Rohrmaterials

		Bamb. ¹	Alum. ²	Stahl ³	Anmerkung/Quelle
Funktionelle Einheit (FE) ⁴	kg	2,39	3,33	3,77	Masse der benötigten Rohre
Rohstoffgewinnung	kg O ₂ Äq/kg	0,09	7,06	3,12	[VOG-20]
Biogener C-Gehalt ⁵		(-1,83)	-	-	-0,5 kg C/kg Bambus [AAL-06]
Transport (Rohstoff) ⁶		0,14	< 0,01	< 0,01	[IVE-20]
Eingangsprüfung ⁷		0,02	-	-	digitaler Klon für jedes Bambusrohr
Transport (Entsorgung) ⁸		0,01	< 0,01	0,01	[IVE-20]
Recycling/Entsorgung ⁹		-0,91	-3,12	-0,99	[VOG-20]
Rohstoffgewinnung	kg CO ₂ Äq/FE	0,21	23,54	11,76	
Biogener C-Gehalt		(-4,38)	-	-	
Transport (Rohstoff)		0,34	0,01	0,02	
Eingangsprüfung		0,04	-	-	
Transport (Entsorgung)		0,03	0,01	0,03	
Entsorgung/Recycling		-2,17	-10,41	-3,75	
Summe		-1,56	13,15	8,05	

- ¹ Bambusrohre der Sorte Tonkin (*Pseudosasa amabilis*) aus chinesischem Plantagenanbau
- ² Stranggepresstes Aluminiumrohr aus Al Zn5,5MgCu (EN AW-7075) T62 aus Deutschland; Mix aus etwa zwei Dritteln Primärmaterial, das durch recyceltes Sekundärmaterial ergänzt wird
- ³ Warmgewalztes, MAG-geschweißtes Stahlrohr aus 25CrMo4 aus Deutschland
- ⁴ Bemessungsgrundlage für den Materialbedarf und die funktionelle Einheit ist ein Fahrradrahmen aus Bambusrohr. Für die Aluminium- und Stahlvarianten werden dieselbe Rahmengenometrie und die Verwendung von Rohren gleicher Außendurchmesser unter Voraussetzung gleicher Biegebelastbarkeit, bezogen auf die Festigkeit und den Rohrquerschnitt, angenommen. Das resultierende Rahmengewicht ist realistisch und gleicht industriell hergestellten Aluminium- beziehungsweise Stahlrahmen.
- ⁵ Biogener Kohlenstoffgehalt bei einem molaren Massenverhältnis von 44/12 CO₂/C [HOT-14]
- ⁶ Bambus: Huaiji (Bambusplantage, CN) - Aachen (DE) = 18.449 km (Lkw/Seeschiff/Lkw)
Aluminium: Kerpen (Rohrhersteller, DE) - Aachen (DE) = 51 km (Lkw)
Stahl: Mechernich (Rohrhersteller, DE) - Aachen (DE) = 66 km (Lkw)
- ⁷ Betrachtet werden der Stromverbrauch für den Prüfstand (pneumatisch wirkende Zylinder, Motor zur Rotation der Bambusrohre, Kameras und Beleuchtung), die Auswertung der Messergebnisse als digitaler Klon am Rechner sowie der (bezogen auf die Gesamtnutzungszeit des Prüfstands, vernachlässigbar kleine) Materialbedarf des Prüfstands.
- ⁸ Bambus: Aachen (DE) - Bergkamen (Biomassekraftwerk, DE) = 173 km (Lkw)
Aluminium: Aachen (DE) - Bergheim (Recyclinganlage, DE) = 52 km (Lkw)
Stahl: Aachen (DE) - Duisburg (Recyclinganlage, DE) = 110 km (Lkw)
- ⁹ Bambus: Gutschrift für Energieerzeugnis durch Verbrennung [ISO 14067]
Aluminium/Stahl: Gutschrift für spätere Substitution von Primärmaterial

Tabelle 19: Zusammensetzung des Carbon Footprints des gesamten Rahmens

		Bamb.	Alum.	Stahl	Anmerkung/Quelle
Rohre	kg O ₂ Äq/FE	-1,56	13,15	8,05	
Stahlmuffen ¹⁰		3,36	-	-	25CrMo4, wie oben [VOG-20]
Schweißen ¹¹		0,71	1,07	0,62	[VOG-20]
Einlagen ¹²		0,12	-	-	PLA, recycelt [VOG-20]
Klebstoff ¹³		1,42	-	-	
Aufräuen ¹⁴		0,30	0,27	0,27	[MIL-12], [VOG-20]
Pulverbeschichten ¹⁵		0,84	2,62	2,65	Polyester-Pulverlack [VOG-20]
Lackieren ¹⁶		0,93	-	-	Acryllack, wasserbasiert [VOG-20]
Summe		6,12	17,11	11,59	

¹⁰ Benötigte Materialmenge (Rohr) = 1,58 kg

¹¹ Bambus: MAG-Schweißen der Muffen (Schweißnahtlänge = 2,79 m)

Aluminium: MIG-Schweißen der Rohre (Schweißnahtlänge = 2,45 m)

Stahl: MAG-Schweißen der Rohre (Schweißnahtlänge = 2,45 m)

¹² Benötigte Materialmenge (Spritzguss) = 0,07 kg

¹³ Benötigte Materialmenge (Klebstoff) = 0,35 kg

¹⁴ Bambus: Druckluftstrahlen (trocken) der Rohre und Muffen (zu behandelnde Oberfläche = 0,57 m²)

Aluminium: Druckluftstrahlen (trocken) der Rohre (zu behandelnde Oberfläche = 0,52 m²)

Stahl: Druckluftstrahlen (trocken) der Rohre (zu behandelnde Oberfläche = 0,52 m²)

¹⁵ Bambus: Pulverbeschichten der Muffen in zwei Schichten (zu beschichtende Oberfläche = 0,16 m²)

Aluminium: Pulverbeschichten der Rohre in zwei Schichten (zu beschichtende Oberfläche = 0,52 m²)

Stahl: Pulverbeschichten der Rohre in zwei Schichten (zu beschichtende Oberfläche = 0,52 m²)

¹⁶ Lackieren der Bambusrohre in zwei Schichten (zu beschichtende Oberfläche = 0,81 m²)