



Ergebnisbericht

zum BMBF-Verbundprojekt

HiPer-LS

Ressourceneffizientes und reproduzierbares Hochleistungs-Laser-Sintern zur Herstellung von Kunststoffbauteilen

Resource Efficient and Reproducible High Performance Laser Sintering for Production of Plastic Parts

Projektbeteiligte:

- EOS GmbH, Krailing
- Universität Duisburg-Essen, IPE - Lehrstuhl Fertigungstechnik
- Fraunhofer ILT, Aachen
- Festo AG & Co. KG, Esslingen
- BMW AG, München
- K+K Wissen GmbH & Co. KG, Köln
- Infratec GmbH, Dresden



UNIVERSITÄT
DUISBURG
ESSEN
Offen im Denken



Fraunhofer **FESTO**
ILT



K + K INFRATEC.

BETREUT VOM



PTKA
Projektträger Karlsruhe
Karlsruher Institut für Technologie

Förderhinweis:

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wurde durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert (Förderkennzeichen 02PN2090 – 02PN2096) und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorin / beim Autor.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| Abbildungsverzeichnis | V |
| Aufgabenstellung | 1 |
| Voraussetzung unter der das Vorhaben durchgeführt wurde | 2 |
| Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn und Ende des Vorhabens | 7 |
| Planung und Ablauf des Vorhabens | 11 |
| Erzielte Ergebnisse | 12 |
| AP A Anforderungen | 12 |
| Anfordungsdefinition an den zu entwickelnden Versuchsaufbau | 12 |
| Zentrale Anforderungen an die zu entwickelnde Anlage | 12 |
| Anforderungsdefinition auf Komponentenebene | 13 |
| AP B Laser-Scanner-Systeme | 15 |
| AP B.1 Entwicklung, Aufbau und Inbetriebnahme eines Laser-Sinter-Versuchstandes | 15 |
| AP B.2 – Konzeptionierung und Aufbau eines Optiksystems zur dynamischen und variablen Anpassung des Strahldurchmessers und der Strahlform | 17 |
| AP B.3 Integration in den Versuchsstand | 24 |
| AP B.4 Verifikation der Hardware | 25 |
| AP C Prozessüberwachung | 36 |
| AP C.1 Auswahl Kamera | 36 |
| AP C.2 Integrationsmöglichkeiten | 37 |
| AP C.3 Auslegung | 39 |
| AP C.4 Messstabilität | 39 |
| AP C.5 Integration | 42 |
| AP C.6 Eingriffsgrenzen | 43 |
| AP D Softwareentwicklung | 47 |
| AP D.1 Steuerung Versuchsaufbau | 47 |
| AP D.2 – Softwareentwicklung und -implementierung zur Optik-Ansteuerung: Ansteuerung zur Durchführung von grundlegenden Laser-Sinterversuchen | 48 |
| AP D.3 Variable Steuerung | 50 |
| AP D.4 Anpassung IR-Software | 51 |
| AP D.5 Umsetzung der Prozessüberwachung in die Anlagesteuerung | 53 |
| AP D.6 Belichtungsalgorithmen | 53 |
| AP E Prozesszusammenhänge | 55 |
| AP E.1 Versuchsplanung | 55 |
| AP E.2 Zusammenhänge | 56 |
| AP E.3 Schmelztemperaturen | 71 |
| AP E.4 Homogener Energieeintrag | 72 |
| AP E.5 Maßnahmen | 72 |
| AP F Bauteilprüfung | 73 |
| AP F.1 Werkstoffeigenschaften | 74 |
| AP F.2 Bauteileigenschaften | 80 |
| Funktionstests an Demonstratoren der Automatisierungstechnik | 90 |
| Funktionstest „Montage“ | 96 |
| AP G Anlagenintegration | 99 |
| AP H Validierung | 99 |
| AP H.1 Benchmark Seriensysteme | 99 |
| AP H.2 Maximale Aufbauraten | 112 |

| | |
|-------------------------------------|-----------|
| AP I Projektmanagement | <hr/> 112 |
| Zusammenfassung und Ausblick | <hr/> 113 |
| Literaturangaben | <hr/> 115 |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Abbildung 1: Lastenhefte und Anforderungen an das zu entwickelnde System | 14 |
| Abbildung 2: Erstes Grundkonzept des Optiksystems | 17 |
| Abbildung 3: Auf Basis der Anforderungen modifiziertes Konzept des Optiksystems | 19 |
| Abbildung 4: Simulation unterschiedlicher Intensitätsverteilungen, die mit dem System realisiert werden sollen | 20 |
| Abbildung 5: Schematische Darstellung eines 3D-Scansystems | 21 |
| Abbildung 6: Verschiedene Varianten für das 3D-Scansystem | 22 |
| Abbildung 7: CAD-Ansicht des Optiksystems | 22 |
| Abbildung 8: Aufbau des Optiksystems | 23 |
| Abbildung 9: CAD-Modell zur Positionierung der Thermografiekamera der Universität Duisburg-Essen neben dem 3D-Scansystem | 24 |
| Abbildung 10: Optiksystem nach der Integration in den Versuchsstand der Universität Duisburg-Essen ohne Einhausung (links) und mit Laserschutz-Einhäusung (rechts), sowie Gesamtansicht (unten) | 25 |
| Abbildung 11: Verwendung von Thermopapier und Fadenkreuzen zur Justage des Strahlengangs | 25 |
| Abbildung 12: Verschiedene Beugungsordnungen des AOM | 26 |
| Abbildung 13: Justage des Strahlformers – mithilfe eines 5-Achs-Halters kann ein verkippungs- und verschiebungsfreier Zustand erzielt werden | 26 |
| Abbildung 14: Soll- Ist-Vergleich bei 100 % Stromvorgabe | 27 |
| Abbildung 15: Ergebnis der Rise- und Falltime-Messung des 600 W CO ₂ -Lasers in Abhängigkeit der Laserleistung | 28 |
| Abbildung 16: Zeitliche Charakterisierung des 70 W-Lasers sowie des AOM mit 600 W-Laser | 29 |
| Abbildung 17: Vermessung der LeistungsdichteVerteilung der 0. Ordnung ca. 1 m nach dem Durchgang durch den AOM | 30 |
| Abbildung 18: Vermessung der LeistungsdichteVerteilung der 1. Ordnung nach dem Durchgang der Laserstrahlung durch den AOM | 31 |
| Abbildung 19: Beispiel einer Kaustikmessung zur Bestimmung der Lage der Fokusebene sowie des Fokusdurchmessers d _s | 31 |
| Abbildung 20: Einstellung unterschiedlicher Strahldurchmesser durch Defokussieren unter Verwendung des AOM | 32 |
| Abbildung 21: Verschiedene mit dem Optiksystem realisierbare Strahlprofile mit Strahlabmessung d _s | 33 |
| Abbildung 22: Leistungskennlinie des Optiksystems mit AOM | 34 |
| Abbildung 23: Abgleich der Systemeigenschaften mit den formulierten Anforderungen | 35 |
| Abbildung 24: Konstruktive Integration in die Formiga P100 | 38 |
| Abbildung 25: Integrationsmöglichkeiten für die Thermografie Prozessüberwachung | 38 |
| Abbildung 26: Integriertes Messsystem | 40 |
| Abbildung 27: Ansicht der Schutzfenster | 40 |
| Abbildung 28: Ableich Formiga-Shutter-Thermografiekamera | 41 |
| Abbildung 29: Bei geöffnetem Shutter werden die Peaks gemessen, die den Temperaturverlauf der Bauteile wiedergeben | 41 |
| Abbildung 30: Temperatur-Zeit Diagramm; rote Linie rechtes Bauteil, blaue Linie linkes Bauteil; zu sehen sind 3 Shutteröffnungen: nach erster Belichtung, nach Beschichtung, nach 2. Belichtung | 42 |
| Abbildung 31: Programmstruktur für ML Programm | 44 |
| Abbildung 32: Dendrogramm für die durchgeführte Klassifizierung. Rechts ein Ausschnitt der die Zuordnung des blauen Bereichs zur Klasse ohne Bauteil beschreibt. | 44 |
| Abbildung 33: Confusion Matrix zeigt z. B., dass von 86 Bildern mit einem Bauteil 82 richtig zugeordnet wurden | 45 |
| Abbildung 34: Bilder die aufgrund unscharfer Kontur oder geringer Intensität schwer von dem Modell zu klassifizieren sind | 45 |
| Abbildung 35: Dendrogramm zeigt die Zerlegung der Datensätze in 5 Klassen | 46 |
| Abbildung 36: Confusion Matrix zeigt in diesem Fall dass von 518 Bildern mit einem Bauteil 459 richtig zugeordnet wurden | 46 |

| | |
|--|-----|
| Abbildung 37: Kombinierte Systemsteuerung | 47 |
| Abbildung 38: Blockschaltbild zur elektrischen und steuerungstechnischen Verkabelung des Optiksystems | 48 |
| Abbildung 39: Benutzeroberfläche der Steuerungssoftware | 49 |
| Abbildung 40: Beispielhafte Hülle-Kern-Strategie | 49 |
| Abbildung 41: Handshake-Logik | 50 |
| Abbildung 42: Einbrände auf Thermopapier bei verschiedenen Fokusstufen | 54 |
| Abbildung 43: Abbildung der Scanvektoren im Bauteilquerschnitt | 54 |
| Abbildung 44: Verschiedene Fokusdurchmesser im Einzelspur-Versuch | 55 |
| Abbildung 45: Geschwindigkeitsvektoren der verwendeten Auftragsmechanismen | 57 |
| Abbildung 46: Erreichte Packungsdichten nach resultierender Geschwindigkeit | 57 |
| Abbildung 47: Probekörper und Messstellen | 59 |
| Abbildung 48: Versuchsergebnisse nach erreichter Packungsdichte und Rauheit | 60 |
| Abbildung 49: Betrachtung der Reproduzierbarkeit nach Auftragsmechanismus und Packungsdichte | 60 |
| Abbildung 50: Spurbreite zur Fokusdurchmesser-Variation | 62 |
| Abbildung 51: Schmelzbadvergleich Fokus 2 und Fokus 7 | 62 |
| Abbildung 52: Bauteildichte der Fokusstufen 0 - 1 | 64 |
| Abbildung 53: Bauteildichte der Fokusstufe 4 und 5 | 64 |
| Abbildung 54: Dünnschnitte an verschiedenen Fokusstufen | 65 |
| Abbildung 55: Zugfestigkeit der Fokusstufe 4 in xy-Richtung | 67 |
| Abbildung 56: Zeitabhängiger Belichtungsverlauf unterschiedlicher Spurbreiten bei variierenden Scangeschwindigkeiten | 68 |
| Abbildung 57: Log-Zeiten der einzelnen Prozessschritte | 69 |
| Abbildung 58: Zeitlicher Vergleich unterschiedlicher Fokusstufen an liegenden und stehenden Zugproben | 70 |
| Abbildung 59: Einbaubedingungen der Thermografiekamera Image IR 5300 | 72 |
| Abbildung 60: Vielfalt der im Projekt hergestellten und untersuchten Prüfkörper | 73 |
| Abbildung 61: Anordnung der Probenteile im Bauraum | 74 |
| Abbildung 62: Zugproben Geometrie und Orientierung im Bauraum | 75 |
| Abbildung 63: Auswertung der Zugfestigkeit nach Partner in X-Richtung | 76 |
| Abbildung 64: Auswertung der Zugfestigkeit nach Partnern in Z-Richtung | 76 |
| Abbildung 65: Zugfestigkeit in Z-Richtung mit Ausreißer | 77 |
| Abbildung 66: Vergleich der Belichtungsparameter in X-Richtung (Festo) | 79 |
| Abbildung 67: Vergleich der Belichtungsparameter in Z-Richtung (Festo) | 79 |
| Abbildung 68: Berstdruckprüfkörper | 80 |
| Abbildung 69: Ergebnisse der Leckagemessung | 81 |
| Abbildung 70: Ergebnisse der Berstdruckprüfung | 82 |
| Abbildung 71: Ergebnisse der Leckagemessung von den TRU-Vergleichsproben | 83 |
| Abbildung 72: Schwingprobe (Geometrie und Form) und Lage im Bauraum | 84 |
| Abbildung 73: Schwingprüfmaschine für Biegewechselbeanspruchung | 85 |
| Abbildung 74: Ergebnisse des Dauerschwingversuchs für den 1. Baujob | 86 |
| Abbildung 75: Ergebnisse des Dauerschwingversuchs für 2. Baujob | 87 |
| Abbildung 76: Schwingprobe BM-01-7 und BM-02-7, mit Gold beschichtet | 88 |
| Abbildung 77: REM-Aufnahmen der Bruchfläche der Biegewechsel-Probe BM-01-7 | 89 |
| Abbildung 78: Balggreifer und Dauerlaufaufbau | 90 |
| Abbildung 79: Ergebnisse der Funktionsprüfung an den Balggreifern | 92 |
| Abbildung 80: Ergebnisse der Leckagemessung an den Balggreifern in Abhängigkeit der Schaltspielzahl | 93 |
| Abbildung 81: Ergebnisse der Probendurchmesser im drucklosen Zustand an den Balggreifern | 94 |
| Abbildung 82: Ergebnisse der Durchfahrdruckmessung an den Balggreifern | 95 |
| Abbildung 83: Ergebnisse der Ausziehkraftmessungen | 96 |
| Abbildung 84: Sicherheitsdeckel für Schalldämpfer (\varnothing ca. 20 mm x 15 mm) | 97 |
| Abbildung 85: Gemessener Abstand 'x' zu der Schraubenkopflage | 97 |
| Abbildung 86: Auswertung der Gewindeprüfung | 98 |
| Abbildung 87: Auswertung der Bruchdehnung nach Partner und Baujob in X-Richtung | 99 |
| Abbildung 88: Auswertung der Bruchdehnung nach Partner und Baujob in Z-Richtung | 100 |

| | |
|--|-----|
| <i>Abbildung 89: Auswertung der Zugfestigkeit nach Lage und Bauraum</i> | 101 |
| <i>Abbildung 90: Auswertung der Zugfestigkeit nach Lage im Bauraum für Z-Richtung</i> | 102 |
| <i>Abbildung 91: Standardabweichung der Zugfestigkeit zwischen den Anlagen in X-Richtung</i> | 103 |
| <i>Abbildung 92: Standardabweichung der Zugfestigkeit zwischen den Anlagen in Z-Richtung</i> | 103 |
| <i>Abbildung 93: Auswertung der Bruchdehnung nach Lage im Bauraum für X-Richtung</i> | 104 |
| <i>Abbildung 94: Auswertung der Bruchdehnung nach Lage im Bauraum für Z-Richtung</i> | 105 |
| <i>Abbildung 95: Standardabweichung der Bruchdehnung zwischen den Anlagen in Z-Richtung</i> | 105 |
| <i>Abbildung 96: Standardabweichung der Bruchdehnung zwischen den Anlagen in X-Richtung</i> | 106 |
| <i>Abbildung 97: Vermessung der Zündspulkappe</i> | 106 |
| <i>Abbildung 98: Fehlerfarbenbild Bauteilvermessung</i> | 107 |
| <i>Abbildung 99: Bewertungskriterien Simkartenhalter</i> | 109 |
| <i>Abbildung 100: Bauteile in liegender Aufbaurichtung</i> | 110 |
| <i>Abbildung 101: Übersicht über die erreichbaren Oberflächenqualitäten</i> | 111 |
| <i>Abbildung 102: Geringe Oberflächenqualitäten und Bruchflächenverlauf durch Beschriftung</i> | 112 |

Aufgabenstellung

Die Aufgabenstellung des Projektes beschreibt neue Ansätze zur Steigerung der Produktivität und der Wirtschaftlichkeit von Laser-Sinter-Anlagen um einen Faktor 5-10. Dabei soll eine höchst mögliche Reproduzierbarkeit sowie Prozesssicherheit unter der Prämisse höchster Ressourceneffizienz erreicht werden.

Der Synergieeffekt zwischen Produktivitätssteigerung und Verbesserung der Wirtschaftlichkeit soll mittels aufgeweiteten Laser-Fokus erreicht werden. Dieser soll mit einem Durchmesser von bis zu 5 mm großflächige Konturen belichten, was im Vergleich mit einem Standard-Fokussdurchmesser aus dem Stand der Technik von 0,4 – 0,6 mm zu einer verringerten Belichtungsdauer führt. Zugleich soll die Detailtreue nicht eingeschränkt werden, weshalb neue Laser-Optiken zur variablen Fokussdurchmesser-Variation eines CO₂-Lasers entwickelt werden sollen. Dadurch differenziert sich dieses Forschungsvorhaben erheblich vom aktuellen Stand der Technik und es können unbekannte Wechselwirkungen zwischen Laser und Pulveroberfläche entdeckt werden. Die verlängerte Wechselwirkungszeit führt zu einem veränderten Energieeintrag, der zunächst mittels thermografischer Untersuchungen charakterisiert werden muss. Zwecks großflächiger Belichtung sollen neue Ansätze zur Belichtungsstrategie erarbeitet und erprobt werden.

Zur Überprüfung des homogenen Energieeintrages soll eine Online-Qualitätskontrolle für die hergestellten Bauteile entwickelt werden. Zielführend ist ein Überwachungssystem, welches auf Basis thermografischer Überwachung regulierend in den Prozess eingreifen kann. Realisiert werden soll dies durch die Aufnahme der einzelnen Querschnitte, das überprüfen der Soll-Ist-Kontur und bei Bedarf der Anpassung des Energieeintrages. Zielführend ist hierbei die Auswahl des Kamera-Systems, welches sowohl in der Lage ist, das gesamte Baufeld zu überwachen als auch eine ausreichend hohe geometrische Auflösung besitzt, um die detaillierten Querschnitte erfassen zu können. Zudem müssen die Eingriffsgrenzen evaluiert werden, bei dem ein Eingriff in den Prozess notwendig wird und zu einem erfolgreichen Prozess führt. Weiterführende Maßnahmen zur homogenen Vorheizung des Anlagensystems sollen mittels variablen Mehrzonen-Heizstrahler, aktiv beheizten Pulverauftrag und Gaszufluss sowie die Verwendung von Heizkörpern an potentiellen Wärmebrücken, die durch Massenanhäufungen entstehen können.

Nachdem robuste Prozessparameter ermittelt wurden, müssen die Auswirkungen dieser auf die Bauteileigenschaften und Werkstoffkennwerte evaluiert werden. Untersucht werden sollen hierbei die Einflüsse eines aufgeweiteten Fokussdurchmessers auf das Ausgangsmaterial. Kennzeichnend können hierbei Einzelpuren sein, die sowohl die Aufschmelzbreite als auch die Eindringtiefe des bewegten Laserspots aufzeigen. Weiterführend können Einzelschichten erzeugt werden, mit deren Hilfe die Eindringtiefe und die Ausprägung des Schmelzbades ermittelt und so Aussagen über die Schichtanbindung innerhalb entstehender Bauteile getätigt werden können. Weiterführende Aussagen werden über Dichtewürfel erzeugt, die mit verschiedenen Scanstrategien und Fokussdurchmessern optimiert werden. Abschließend werden die evaluierten Parameter für den Bau von Zugproben verwendet und optimiert, sodass Vergleiche mit dem Stand der Technik durchgeführt werden können.

Den Stand der Technik bildet hierbei das Anlagensystem Formiga P 100 / P 110 der Firma EOS, mit dem ein Benchmark der Seriensysteme bei unterschiedlichen Anwendern durchgeführt wird. Verschiedene Technologiedemonstratoren werden gefertigt, die das Potential der Technologie aufzeigen sollen. Dabei kann es sich sowohl um funktionsintegrierte, hochkomplexe oder aus beiden Eigenschaften kombinierte Bauteile handeln, die mittels Laser-Sintern wirtschaftlich gefertigt werden können.

Voraussetzung unter der das Vorhaben durchgeführt wurde

Zur Erreichung der geplanten Projektziele hat sich ein Konsortium aus sechs Unternehmen und zwei Forschungseinrichtungen zusammengefunden, welches auf ein umfangreiches Prozesswissen beim Laser-Sintern bzw. in angrenzenden Technologien verfügt.

EOS verfügt hierbei aufgrund seiner Marktstellung über die Kernkompetenz bei der Prozess- und Anlagenentwicklung im Bereich Laser-Sintern. Im Bereich Verbundprojekte besitzt EOS weitreichende Erfahrungen und hat als Partner bereits an vielen europäischen und nationalen F&E Förderprojekten teilgenommen, darunter zuletzt Projekte wie Custom-IMD, MADE4U, DirectSpare, SimuSint und Rapid.Repair. EOS verfügt über ein breites Patentportfolio, das viele Aspekte der laserbasierten Additiven Fertigung abdeckt. Neben den über 60 eigenen Patentfamilien in verschiedenen Ländern wurden weitere Patentrechte von Fremdfirmen erworben oder lizenziert.

In den Entwicklungsabteilungen der EOS GmbH werden Projekte zur Forschung und Entwicklung im Bereich pulverbasiertem Additive Manufacturing bearbeitet. Speziell für die Prozessentwicklung kunststoffpulverbasierter Verfahren sind hier mehrere Entwicklungsprojekte in den relevanten Themengebieten durchgeführt worden.

Die Anpassung der eingebrachten Energie je nach Lage der zu belichtenden Bauteile wird seit der neusten Maschinengeneration P396 angewandt. Dieses Feature wird EOSAME genannt. Dabei wird die Scangeschwindigkeit bei der Belichtung so variiert, dass abhängig von der Position (Temperatur) durch den Laser unterschiedliche Energiemengen eingebracht werden [1]. Dies führt zu einer Homogenisierung sowohl der Maßhaltigkeit als auch der mechanischen Kennwerte der generierten Bauteile. Hierbei erfolgt jedoch keine Online-Regelung, sondern eine Kalibrierung anhand der Verteilung der mechanischen Eigenschaften in Aufbaurichtung. Von dieser Steuerung zu einer Regelung in Abhängigkeit von gemessenen Temperaturdaten überzugehen, stellt den nächsten logischen – gleichwohl sehr herausfordernden – Schritt bei der Verbesserung der Prozesszuverlässigkeit dar.

Im Bereich einer Maschinengeneration zur generativen Fertigung von Formsanden wurde bei EOS ein System entwickelt, das mit Dualfokus betrieben wird [30]. Dabei wird bei der Belichtung des Hatch (Füllung großer Flächen) der Laserstrahl defokussiert. Zur Belichtung der Kontur wird mit fokussiertem Laserstrahl gearbeitet, um die Detailauflösung der Bauteile zu erhöhen. Hier wird allerdings nur mit 2 Stufen gearbeitet, fokussiert und defokussiert. Eine stufenlose Einstellung des Fokuspunkts ist nicht möglich. Mit dieser Optik wurden erste Tests auch auf Kunststoffsystemen bereits erfolgreich durchgeführt, so dass wir erwarten, dass der Prozess auch mit einem defokussierten Strahl funktioniert und Bauteile mit guten Eigenschaften liefert.

Die thermischen Verhältnisse spielen in der Verarbeitung von Thermoplasten grundsätzlich eine große Rolle. Darum werden im Rahmen von Vorentwicklungsprojekten bei EOS schon seit knapp 10 Jahren Thermokameras eingesetzt, um die Temperaturverteilung im Bauraum zu überwachen. Einerseits erfolgen diese Messungen im stationären Zustand, um die Temperaturverteilung im Baufeld zu erfassen und damit die Heizleistungsverteilung der Heizstrahler zu optimieren oder neue Heizungssysteme zu testen. Zum anderen werden auch dynamische Systeme untersucht, insbesondere der Auftrag neuer Pulverschichten, um die Dynamik der Aufheizvorgänge und Prozesse wie Konvektion in der Prozesskammer zu analysieren. Ferner können nach Abschluss der Belichtung einer Schicht die Wärmeverteilung in Baufeld und Bauteilen, sowie die Abkühlung der Bauteile nach der Belichtung thermografisch erfasst und untersucht werden, ohne jedoch bislang in die Heizungs- oder Lasersteuerung einzugreifen. Wie bereits erwähnt, wird die Implementierung einer solchen Prozessregelung ein wichtiger nächster Schritt bei der Industrialisierung des LS-Verfahrens.

EOS benutzt zur Kalibrierung der Heizungen bei Kundensystemen im Feld ein selbst entwickeltes System (PYROSCAN). Hierbei wird in den Strahlengang des Lasers ein Pyrometer eingebaut und statt das Baufeld mit dem Laser zu bestahlen, wird umgekehrt die Abstrahlung der Pulveroberfläche

„rückwärts“ über die Scannerspiegel auf das Pyrometer gelenkt und mit diesem die lokale Temperatur der Stelle detektiert, auf welche die Spiegel in diesem Moment ausgerichtet sind [66]. Durch die Bewegung der Scannerspiegel, kann die Position im Baufeld variiert werden. Mit diesem System kann analog zu einer Thermokamera die Temperaturverteilung im Baufeld ortsaufgelöst erfasst werden und die Heizstrahler entsprechend optimiert werden, um eine ideale homogene Temperatur im gesamten Baufeld zu erhalten. Da dieses Pyrometer jedoch im Strahlengang sitzt, ist auch hier nur eine Erfassung der Temperaturverteilung vor (oder nach) der Belichtung mit dem Laser möglich. Ferner ist der Messfleck des Pyrometers im Baufeld ca. 20mm groß, was die räumliche Auflösung, im Vergleich zu einer Thermokamera, deutlich verschlechtert.

Der **Lehrstuhl für Fertigungstechnik der Universität Duisburg-Essen** beschäftigt sich seit 1998 mit Themen im Bereich Laser-Sintern von Kunststoffen mit dem Fokus auf der Erarbeitung von Prozesswissen. In verschiedenen Arbeiten und Forschungsprojekten konnten grundlegende Zusammenhänge zwischen Prozessparametern und Bauteileigenschaften ermittelt werden [67-69].

Weiterführend werden die Ergebnisse der im Rahmen des DFG-Projektes „Grundlagen für ein Qualitätssicherungssystem angewandt auf Rapid Manufacturing Prozesse“ genutzt, um neue Ansätze im Laser-Sinter-Prozess zu erarbeiten. Die Ergebnisse zeigen, dass optimierte mechanische Eigenschaften contraire zur Produktivität und somit auch zu den entstehenden Kosten stehen. Thermografiemessungen für PA 12 mit einer High-Speed-Kamera zeigen jedoch, dass im optimalen Energiedichtebereich insbesondere beim Belichten kurzer Scanvektoren bereits eine Materialzersetzung auftreten kann. Somit kann es bei heutigen Anlagensysteme notwendig sein, zur Erzielung optimaler Bauteileigenschaften insbesondere in der kritischen Aufbaurichtung die Zersetzungsgrenze zu überschreiten. Dagegen wird bei langen Scanvektoren nicht zwingend die notwendige Schmelztemperatur erreicht, um eine optimale Anbindung zur darunterliegenden Schicht zu gewährleisten. Ausgehend von diesen im Widerspruch der zueinanderstehenden Verarbeitungsstrategien leitet sich die Handlung einer homogenen und Scanvektorlängenabhängigen Energieeinbringung ab. Die Ergebnisse belegen, dass sich keine ausreichende Schichtanbindung zwischen den Schichten ausbilden kann, wenn sich nicht zumindest oberflächlich homogene Temperaturen einstellen. Gleichzeitig zeigt sich, dass zur Erzielung homogener Schmelzfilme eine Nachsinterzeit von mindestens 10 s notwendig ist. Auf dieser Basis wurde die „Theorie über die Fortführung von Aufschmelzvorgängen“ als weitere Anforderung an eine robuste Prozessführung beim Laser-Sintern aufgestellt. Diese besagt, dass Laser-Sinter-Materialien in ihrem Absorptionsverhalten so beschaffen sein müssen, dass die Schmelze mehr Wärmeenergie des Heizstrahlers absorbieren kann als das umliegende Pulver und somit auch nach der Belichtung bis zum Pulverauftrag ein Temperaturniveau oberhalb der Materialschmelztemperatur annehmen kann. Hierdurch wird der neu aufgetragenen Schicht zusätzlich Wärme von unten zugeführt, woraus sich eine bessere Schichtanbindung resultiert. Die durchgeführten Untersuchungen weisen somit nach, dass auf Basis thermografischer Überwachungsmechanismen eine robuste Prozessführung gewährleistet werden kann.

In weiteren Untersuchungen wurde der Einfluss der inhomogenen Temperaturverteilung auf die Bauteileigenschaften untersucht [2]. Die sich einstellenden Temperaturdifferenzen von bis zu 11 K führen zu einer extremen Schwankung der mechanischen Kennwerte um bis zu 50 %. Um diese Unterschiede zu reduzieren, wurde im Rahmen des Projektes ein neues Temperaturlaufführungssystem für Laser-Sinteranlagen mit einem Multizonenheizstrahler sowie eine Multizonenbaubehältertemperierung entwickelt, wodurch sich die Temperaturunterschiede auf der Pulverbettoboberfläche auf 5,7 K reduzieren lassen und sich ein gleichmäßigeres Abkühlen der Bauteile einstellt. Gleichzeitig wurden weitere Anlagenoptimierungen zur Verbesserung der Prozessführung entwickelt.

Neben diesen Forschungsergebnissen behandeln laufende bzw. kürzlich abgeschlossene Projekte des Lehrstuhls die Qualitätsbewertung generativ hergestellter Bauteile (AIF KF2095009US9), die Entwicklung von Unterstützungssystemen zur Wissensvermittlung im Gebiet der generativen Fertigungsverfahren (AIF 424 ZBG), den Aufbau eines bildgestützten Prozessüberwachungssystems beim Strahlschmelzen (AIF BG09580/09) [3, 4], die Reduktion von Eigenspannungen beim Strahlschmelzen (AIF B12674/11), optimierte Postprocessing-Verfahren für generative Verfahren (AIF

KF2095026FH1) oder das Langzeitverhalten von lasergesinterten Bauteilen (AIF 17945N). Darüber hinaus wurde in dem DFG-Projekt „Multiziel-Optimierung des Pre-Prozesses zur Qualitätssicherung lasergesinterter Bauteile“ ein breites Prozessverständnis für die Verarbeitung alternativer kommerzieller Laser-Sinter-Materialien gesammelt. In umfangreichen Untersuchungen wurden die Rauheit, die mechanischen Eigenschaften, die Maßhaltigkeit sowie der Bauteilverzug betrachtet [5, 6]. Basierend auf diesem Wissensstand werden die entwickelten Methoden und Systeme zielführend auf die Aufgabenstellung im Rahmen des beantragten Verbundprojektes übertragen und sollen zur Weiterentwicklung des Laser-Sinters beitragen.

Die Kernkompetenzen des **Fraunhofer Institut für Lasertechnik** (ILT) umfassen die Entwicklung neuer Laserstrahlquellen und –komponenten, die Lasermess- und Prüftechnik sowie die Lasermaterialbearbeitung. In der Gruppe Rapid Manufacturing werden seit 18 Jahren nationale und internationale Projekte durchgeführt in deren Mittelpunkt die Weiterentwicklung und Anwendung pulverbettbasierter additiver Fertigungsverfahren zur industriellen Nutzung steht.

Der deutliche Trend zur stärkeren Nutzung der Additiven Fertigungsverfahren für die Serienproduktion insbesondere bei der Verarbeitung metallischer Werkstoffe mittels des Selective Laser Melting (SLM) erfordert u.a. eine höhere Produktivität, Reproduzierbarkeit und Zuverlässigkeit von SLM-Anlagen. Die Erhöhung der Produktivität durch Einsatz von Laserstrahlquellen im kW-Bereich (High Power SLM (HP-SLM)) und der damit erzielten höheren Aufbaurate konnte am Fraunhofer ILT bereits gezeigt werden [7, 8]. Die Grundlagen und Voraussetzungen für das HP-SLM wurden u.a. in Kooperation mit dem Lehrstuhl für Lasertechnik (LLT) und dem Lehrstuhl für Technologie optischer Systeme (TOS) der RWTH Aachen im Exzellenzcluster „Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer“ entwickelt. Hier konnte in der ersten Projektphase erstmals die Prozessführung und die Anlagentechnik für die Nutzung einer Laserleistung von bis zu 1 kW zur Steigerung der Produktivität des SLM-Prozesses entwickelt werden.

Zur Umsetzung von Laserleistung in Aufbaurate werden neue Prozessführungsstrategien am Fraunhofer ILT entwickelt. Untersuchungen haben gezeigt, dass unterschiedliche Belichtungsstrategien (Scanstrategien) mit angepassten Strahldurchmessern, u.a. in Abhängigkeit der thermophysikalischen Eigenschaften der Werkstoffe, angewendet werden können [7]. Die industrielle Nutzung der kW-Strahlquellen und werkstoffabhängigen Belichtungsstrategien in kommerziellen SLM-Anlagen erfordern u.a. neue und robuste Optikkonzepte zur Strahlführung und -formung. Zur Umsetzung dieser Belichtungsstrategien werden am Fraunhofer ILT entsprechend geeignete optische Systeme für die jeweilige Prozessführung bspw. anhand von Simulationen ausgelegt [9].

Nach praktischer Erprobung der Optikkonzepte am Fraunhofer ILT erfolgt die Umsetzung ausgewählter Systeme in kommerziellen SLM-Anlagen in Zusammenarbeit mit Anlagenherstellern unter Berücksichtigung spezifischer Randbedingungen wie z.B. geforderte Scanfeldgröße, Fokussdurchmesser und Leistungsdichteverteilungen (Intensitätsprofil). In Zusammenarbeit mit unterschiedlichen Anlagenherstellern wurden Ende 2012 zwei unterschiedliche optische Systeme in kommerzielle Anlagen umgesetzt, mit denen erstmals SLM-Anlagen mit einer Laserleistung von 1 kW verfügbar sind. Zum einen wird eine variable Fokussieroptik zur stufenlosen Verstellung des Strahldurchmessers bei Verwendung einer 1 kW Single Mode Strahlquelle eingesetzt (X-Line 1000R, Concept Laser GmbH). Zum anderen wird ein Zweistrahlnkonzept (Hülle-Kern-Strategie) verwendet, welches mittels zweier Strahlquellen die Umschaltung zwischen einem kleinen Strahldurchmesser mit einer gaußförmigen Intensitätsverteilung und einem großen Strahldurchmesser mit Top-Hat-förmiger Intensitätsverteilung erlaubt (SLM 280HL, SLM Solutions GmbH). [9]

Typischerweise werden in den Additiven Fertigungsverfahren für metallische Werkstoffe Laserstrahlquellen eingesetzt, die eine Wellenlänge von ca. 1060 nm aufweisen. Bei der Verarbeitung von Kunststoffen, wie es bspw. bei Laser-Sinter-Prozessen der Fall ist, werden aufgrund der besseren Absorptionseigenschaften CO₂-Laserstrahlquellen verwendet, die eine Strahlung mit einer Wellenlänge von 10600 nm emittieren. Das Fraunhofer ILT verwendet bspw. zur Verarbeitung bioresorbierbarer Werkstoffe im Rahmen von öffentlich geförderten Projekten (z.B. ActiveBone, ResoBone) ebenfalls

CO₂-Laserstrahlquellen. Speziell dafür angepasste Optiksysteme hinsichtlich der Strahlführung und -formung werden am ILT entwickelt und für die werkstoffspezifische Verarbeitung eingesetzt.

Sowohl für die Verarbeitung metallischer Werkstoffe als auch für die Verarbeitung von Polymeren werden am ILT in enger Kooperation (bilateral oder in öffentlich geförderten Projekten (z.B. Gencast)) mit Softwareherstellern wie z.B. Marcam Engineering (bzw. Materialise) die Belichtungsstrategien durch Softwaremodifikationen weiterentwickelt. Aufgrund langjähriger Erfahrung im Bereich von Anlagenmodifikationen und durch die Entwicklung eigener SLM-Anlagensysteme und Steuerungssoftware liegt somit dem ILT umfangreiches Know-How zur Scannersteuerung und Programmierung vor. Darüber hinaus ist die Entwicklung von Hard- und Software von Scannersystemen für die Lasermaterialbearbeitung ein Schwerpunkt des ILT für unterschiedliche Prozesse, insbesondere z.B. für die Ultra-Kurz-Puls-Bearbeitung.

Die Firma **Festo** beteiligt sich seit Jahren an der Weiterentwicklung von additiven Fertigungsverfahren im Rahmen von internen und externen Forschungsprojekten sowie insbesondere in Verbundvorhaben. Hierbei stand bislang vor allem die Optimierung des Strahlschmelzprozesses von Metallen zum Serienfertigungsverfahren im Fokus. So wirkte die beteiligte Arbeitsgruppe an den Verbundprojekten PartSupport der BVS (AZ-934-10) sowie SimuSint und AluGenerativ des BMBF mit. Die Ergebnisse seiner Tätigkeiten zur Anwendbarkeit der additiven Technologien als Serienfertigungsverfahren hat Festo hierbei in zahlreichen Veröffentlichungen anhand verschiedener Beispiele dargelegt [10 bis 12]. Neben den Vorteilen einer Anwendung wird gleichzeitig stets der aktuelle Entwicklungsstand der Verfahren mit den entsprechenden Problematiken beim Einsatz kritisch beleuchtet und notwendige Handlungsfelder zur Weiterentwicklung aufgezeigt. So beschränken derzeit vor allem Themen der Bauteil- und Anlagenreproduzierbarkeit, der Prozesssicherheit sowie der Materialqualität die Nutzbarkeit des Laser-Sinterns zur Serienteilherstellung bei Festo [11, 12].

Die **BMW AG** ist einer von wenigen Herstellern für Automobile und Motorräder weltweit, der sich mit allen Marken und über alle relevanten Segmente hinweg ausschließlich auf den Premium-Anspruch bei gleichzeitig hoher Individualisierung konzentriert. Ferner verfügt die innovative Technologie der additiven Fertigung von Metall- und Kunststoffbauteilen bei BMW über einen hohen Stellenwert, was mit den vielschichtigen drittmittelgeförderten Projekten in denen das Rapid Technology Centers (RTC) beteiligt war und ist, belegt werden kann. Wissenschaftliche Ergebnisse der Antragsteller finden sich u. a. in [13 bis 15]. Das RTC der BMW AG besitzt langjährige Erfahrung im Bereich der Fertigung von Prototypen und Kleinserien aus Metall sowie Kunststoffen. Es unterstützt den Produktentstehungsprozess durch geometrische und funktionale Prototypen, die mit den additiven Fertigungsverfahren Stereolithographie, Polyjet, Laserstrahlschmelzen oder Laser-Sintern hergestellt werden. Der größte Teil des Bauteilvolumens wird durch die Technologie des Laser-Sinterns von Kunststoffpulvern abgedeckt. Neben der Produktion von Prototypen werden Entwicklungs- und Transferprojekte im RTC vorangetrieben. Schwerpunkt der Entwicklungsleistung bildet die Qualifizierung der additiven Fertigungsverfahren für die Kundenanforderungen.

InfraTec ist seit mehr als 20 Jahren auf Infrarotmesstechnik, berührungslose Temperaturmessungen und Thermografie konzentriert. Auf der Grundlage vielfältigster praktischer Thermografieanwendungen mit stand-alone-Systemen in allen Branchen konnte ein tiefgründiges spezialisiertes Fachwissen akkumuliert werden. Die hochqualifizierten Mitarbeiter von InfraTec verfügen inzwischen auch über mehr als 15-jährige Erfahrungen in der Thermografieautomation. Hier bildet das thermografische Temperaturmessverfahren die Kerntechnologie von automatisierten Lösungen zur Fertigungssteuerung, Prozessüberwachung und Qualitätssicherung.

Von InfraTec entwickelte, gefertigte, installierte und im Service betreute Thermografie-Anwendungstechnik und -Software wird weltweit in zahlreichen Applikationen und Branchen eingesetzt, darunter die Automobilindustrie, die Stahlindustrie, die Recyclingwirtschaft, Elektrotechnik und Elektronik sowie im Feld der erneuerbaren Energien.

Im Rahmen von Thermografieautomationsprojekten des Geschäftsbereiches Infrarotmesstechnik sind in den letzten Jahren verstärkt die Verfahren der Aktivthermografie entwickelt worden, da sich diese

Verfahren zunehmend als Schlüssel für die Qualitätssteuerung in automatisierten Fertigungen wie beispielsweise in der Automobilindustrie und Solarzellenindustrie erweisen. Hierbei konnten vielfältige Erkenntnisse bei der Entwicklung hochdynamischer thermografischer Messungen hinsichtlich der Gestaltung der Thermografie-Hard- und Software gewonnen werden, die für das beantragte Projekt eine gute Ausgangsbasis bilden.

InfraTec entwickelt und fertigt seit 2009 eigene gekühlte high-end-Thermografiesysteme der Familie ImageIR® für Anwendungsfelder in denen höchste Ansprüche an thermische und geometrische Auflösung sowie Messgeschwindigkeit gestellt werden. Auf der Grundlage eines Baukastens, der die verschiedenen funktionellen und konstruktiven Bestandteile einer Hochleistungskamera strukturiert, kann eine zielgerichtete Erweiterung bzw. die Ableitung anwendungsspezifischer Derivate vorgenommen werden, ohne dass der Zeit- und Kostenaufwand für eine komplette Neukonstruktion anfällt. Im Verbundprojekt kommt dieser Vorteil in besonderer Weise zum Tragen.

InfraTec verfügt über langjährige Erfahrungen bei der Teilnahme und z. T. auch Koordination von FuE-Förderprojekten im nationalen (Einzel-, Verbund-, Kooperationsprojekte) und internationalen (FP7) Umfeld. Folgende Beispiele sind typisch für die in den vergangenen Jahren erfolgreich bearbeitete bzw. noch laufende Forschungs- und Entwicklungsprojekte wie TPA Automatisierte Produktionstechnik für den Flugzeugbau, Surprise, FANTOM Full-Field Advanced Non-Destructive Technique for Online Thermo-Mechanical Measurement on Aeronautical Structures, Thermobot Autonomous robotic system for thermographic detection of cracks und ESIP Efficient Silicon Multi-Chip System-in-Package Integration Reliability, Failure Analysis and Test.

Der antragstellende und projektbeginnende Partner war die IwF GmbH. Hier sollte die angewandte Forschungskompetenz als Aninstitut der Uni Duisburg auf dem Bereich der LS-Herstellkompetenz in die industrielle Anwendung hinein ausgebaut und verstetigt werden. Dazu bot der Partnermix aus Anlagenherstellern, Hochschulen und applikationsnahen Groß- sowie Kleinunternehmen die besten Voraussetzungen. Durch einen Gesellschafterbeschluss des IwF wurde ein Wechsel aller dort im Projekt arbeitenden Mitarbeitern samt Teilprojekt-Leiter hin zur **K+K Wissenstransfer e.K.** eingeleitet.

Die K+K ist F&E-Service-Provider für die Industrie mit Schwerpunkt dezentrale µP-Steuerungen zur Ressourcenoptimierung von Anlagen und Prozessen.

Im Bereich der Elektronik- und Steuerungsentwicklung hatte K+K zu dieser Zeit ein System entwickelt zur CFD-gestützten Bewertung und Energiefluss-Steuerung von Solarenergie, die eingestrahlt wird in eigens dafür von einem Forschungspartner entwickelte Photovoltaik-Hybrid-Panels an Hausfassaden. Aufbauend auf dieser µP-Steuerung mit Messstellenwandlern für PT1000-Sensoren und Pumpeneinheiten, die in modifizierter Form die Ausgangsbasis für die messtechnische Systemparametrisierung bildeten, sollten im weiteren Projektverlauf die parametrische Modellbildung zur dynamischen Steuerung thermischer Ausgleichsprozesse entwickelt werden. Die vorhandenen und bis dahin eigenentwickelten Hard- und Softwaresysteme sollen in ein Diagnosesystem überführt werden, welches in der Industrie sowohl dem originären Zwecke der Optimierung des LS-Herstellprozesses von Maschinenelementen dient, als auch außerhalb dessen geeignet ist zur thermodynamischen Prozessanalyse und Steuerung wie beispielsweise der Effizienzoptimierung von Abwärme-Nutzeffekten.

Damit sollten und wurden die klassisch elektronischen und IT-technischen Vorkenntnisse und Produkte mit Verfahren der künstlichen Intelligenz ideal ergänzt.

Abgeschlossene Forschungsvorhaben diesbezüglich sind ausführlich dokumentiert im ZIM-Abschlussbericht zum Projekt KF3083001DF2, „Entwicklung einer Solarzellen-Stapeltechnik zur kombinierten thermisch und elektrischen Energieerzeugung aus Solar-Gebäudefassaden“ vom 04.02.2016.

Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn und Ende des Vorhabens

Bei der Verarbeitung von Kunststoffen durch Laser-Sintern ergeben sich verschiedene Einflüsse, wie die thermischen Verarbeitungsgrenzen, welche eine beliebige Steigerung der Produktivität verhindern. Die entsprechenden Vorarbeiten des Konsortiums in diesem Bereich insbesondere am IPE-FT sind ausführlich in Kapitel 4.2 beschrieben. Anders als andere Materialien, wie Metalle, weisen Kunststoffe oberhalb ihrer Schmelztemperatur nur einen kleinen Verarbeitungsbereich auf, ohne dass Zersetzungseffekte auftreten. Bei PA 12 ergibt sich beispielsweise zwischen dem Schmelzpunkt von 186 °C und der Zersetzungssstarttemperatur von 318 °C ein im Vergleich zu anderen Kunststoffen großes Prozessfenster von ca. 120 °C. Bei alternativen teilkristallinen Kunststoffen reduziert sich dieses Fenster auf unter 50 °C. Schmelz- und Zersetzungstemperatur bilden somit die Grenzen, die beim Laser-Sintern eingehalten werden müssen. Das Pulverbett wird bis knapp unter die Schmelztemperatur vorgeheizt. Der Laser schmilzt anschließend das Pulver auf. Um zunehmende Porosität zu vermeiden, darf hierbei die Zersetzungsgrenze nicht überschritten werden. Vasquez hat in [16, 17] durch thermogravimetrische Analysen und theoretische Berechnungen das Erreichen der Zersetzungsgrenze beim Belichten nachgewiesen. Durch Untersuchung der mechanischen Eigenschaften wurde nachgewiesen, dass eine Erhöhung der mechanischen Eigenschaften bis zu einer oberen Grenze der eingebrachten Energie erreicht werden kann, dann jedoch durch das Einsetzen von Zersetzungsmechanismen ein Festigkeitsabfall folgt. Der Energieeintrag darf somit diese Grenze nicht überschreiten. Wird die Schichtdicke zur Erzielung einer Produktivitätssteigerung erhöht, muss zur Beibehaltung der Bauteilqualität auch die Energiedichte erhöht werden. Hierdurch steigt jedoch die Gefahr von Zersetzungseffekten, welche für eine robuste Prozessführung aber in jedem Fall vermieden werden müssen. Somit führt eine Erhöhung der Schichtstärke stets zu einer Verschlechterung der Bauteilqualität, da bei Einhaltung der Prozessfenster keine gute Schichtanbindung mehr erreicht werden kann (vgl. Kapitel 4.2). Gleichzeitig ist eine ausreichende Wechselwirkungszeit zwischen Laser und Pulver erforderlich, damit auch in unteren Schichtbereichen ein ausreichender Energieeintrag stattfinden und sich eine gute Verbindung der Schichten einstellen kann. Somit sind auch die Möglichkeiten zur Beschleunigung der Scangeschwindigkeit nach oben hin limitiert. Daher sind neuartige Ansätze zur Steigerung der Produktivität notwendig, wenn gleichzeitig eine optimale Bauteilqualität erreicht werden soll [18].

Derzeit bestehen unterschiedliche Ansätze zur Steigerung der Produktivität beim Laser-Sintern: Die Firma EOS arbeitet bei großen Bauräumen beispielsweise mit zwei, anstelle von einem Laser, wodurch die Aufbaurate entsprechend gesteigert wird. Auch Kim [19] nutzt ein solches System mit zwei Lasern. Weitere Konzepte bei EOS verfolgen die Reduzierung der Abkühlzeiten in der Maschine durch entnehmbare Bauräume, die Reduzierung der Nebenzeiten durch zeitoptimierte Belichtungsstrategien oder kurze Beschichtungszeiten sowie Prozessstrategien mit erhöhten Schichtstärken bis zu 180 µm. 3D-Systems setzt dagegen in ihrer SPro-Reihe auf High-Speed-Scaneinheiten, die Abtastgeschwindigkeiten von bis zu 15 m/s erlauben, während EOS aus Gründen der Bauteilqualität lediglich Geschwindigkeiten bis 4 m/s nutzt. Eine deutliche Steigerung der Produktivität ist jedoch mit diesen Strategien auch in den nächsten Jahren nicht mehr zu erwarten.

Im Rahmen des SFB 814 in Erlangen entwickelt Laumer in [20, 21] ein System zur Multimaterialverarbeitung von Kunststoffen bei dem das vorgeheizte Pulverbett flächig über Microspiegel mit einem Thulium-Laser belichtet und aufgeschmolzen werden soll. Die Untersuchungen zeigen, dass Schmelztiefen bis zu mehreren mm und damit eine erhöhte Aufbaurate erzielt werden können. Allerdings ist bei dieser Lösung eine gleichmäßige Durchschmelzung über die gesamte Tiefe und damit eine gute Schichtanbindung bislang ungeklärt. Gleichzeitig können mit diesem System kaum feine Strukturen in Aufbaurichtung generiert werden. Auch die Problematik einer klaren Kantendefinition vor allem bei angewinkelten Flächen erscheint bislang ungelöst. Gleichzeitig zeigen Messungen von Laumer für PA 12 bei Verwendung eines Thulium-Lasers einen sehr hohen Reflexionsgrad von 30 % und Eindringtiefen bis 700 µm [21]. Andere Materialien haben im Nahinfrarot (Wellenlänge Thulium-Laser 1,9 µm) möglicherweise ein noch ungünstigeres Absorptionsverhalten, wodurch für eine Etablierung dieser Art der Prozessführung noch viele grundlegende Fragestellungen zu klären sind,

sodass mit keiner zeitnahen Kommerzialisierung zu rechnen ist. Bei Verwendung von CO₂-Lasern entfallen aufgrund der optischen Eindringtiefe von wenigen 100 µm die beschriebenen Problematiken, wodurch die Prozessführung und die Herstellung von Bauteilen mit klarer Kantendefinition deutlich erleichtert werden.

Bei der Verarbeitung von Metallen mittels Strahlschmelzen ergeben sich aufgrund des unterschiedlichen Materialverhaltens andere Möglichkeiten zur Steigerung der Produktivität. Durch Erhöhung der Laserleistung kann hier die Einschmelztiefe erhöht werden, wodurch für neuste Anlagengenerationen ein steter Anstieg der Laserleistung zu beobachten ist. SLM Solutions nutzt bei der Belichtung in ihrem neusten Anlagensystem der SLM 500HL ein patentiertes System [22] mit bis zu vier Lasern mit einer Gesamtleraserleistung von bis zu 2.800 W. Zur Beschleunigung des Prozesses kommt hier eine Hülle-Kern-Strategie mit großen Fokusdurchmessern und hohen Leistungen zum Aufschmelzen großer Volumina über mehrere Schichten hinweg im Kern und kleinen Fokusdurchmessern mit niedrigeren Leistungen zum Aufschmelzen einzelner Schichten im Randbereich zur Erzielung einer guten Kantendefinition zum Einsatz. Die Verwendung unterschiedlicher Fokusdurchmesser für Oberflächen- und Innenbereiche wurde hierbei allgemein bereits 1998 von Toyota patentiert [23]. Auch Concept Laser verfolgt mit seiner X line 1000R eine ähnliche Strategie. Beide Systeme entstanden unter aktiver Mitwirkung des ILT. Eine direkte Übertragung auf die Kunststoffverarbeitung mittels Laser-Sintern ist aufgrund unterschiedlicher Absorptionsmechanismen und der Problematik der Zersetzungsgrenze sowie anderer verwendeter Laser nicht möglich.

Eine Möglichkeit, die beschrieben Probleme bei der Steigerung der Produktivität zu umgehen, wurde in Untersuchungen in [24] betrachtet. Durch die Vergrößerung des Fokusdurchmessers des verwendeten Laserstrahls konnten die Maximaltemperaturen reduziert werden, wodurch eine Erhöhung der Abtastgeschwindigkeiten möglich ist. Die Versuche zeigten jedoch, dass die theoretischen Ansätze zu optimieren sind. Eine Umsetzung in kommerzielle Systeme mit variablem Fokusdurchmesser beim Laser-Sintern von Kunststoffen und die Untersuchung konkreter Zusammenhänge erfolgte bislang nicht. Lediglich bei der Verarbeitung von Formsanden wurde durch die Firma EOS ein Scansystem mit zwei unterschiedlichen Fokusdurchmessern umgesetzt [25]. Insgesamt betrachtet bietet diese Lösung im Vergleich zu anderen umrissenen Ansätzen somit das größte Potential zeitnah eine deutliche Produktivitätssteigerung beim Laser-Sintern zu erreichen. Beim Laser-Sintern mit hohen Leistungen und großen Fokusdurchmessern gewinnt das Thema Strahlformung an Bedeutung; die Firma Evonik hat die Verwendung einer Strahlhomogenisierung patentiert [26], durch die ein größerer Bereich des Laserspots in den optimalen Temperaturbereich gebracht werden kann.

Neben Einschränkungen bezüglich der Steigerung der Produktivität ergeben sich beim Laser-Sintern auch Einschränkungen bezüglich der Reproduzierbarkeit, wie ein Vergleich verschiedener Anlagensysteme im Rahmen der Erarbeitung der VDI Richtlinie 3405 Blatt 1 zeigt. [27]

Durch die hohen und die Materialkosten zu senken wird das Pulver aus dem Bauraum recycelt und nach Auffrischung mit Neupulver erneut dem Prozess zugeführt. Durch eine schwankende Qualität sowohl des neuen als auch des recycelten Pulvers stellen sich jedoch unterschiedliche Mischungsqualitäten ein [28]. Diese führen bei der Verarbeitung zu schwankenden Bauteileigenschaften und können durch Auftreten von Orangenhaut sogar zur Herstellung von Ausschussbauteilen führen [29, 30].

Auch im Bereich Anlagentechnik bestehen verschiedene Problematiken, welche die Bauteilqualität, die Prozessstabilität und die Reproduzierbarkeit innerhalb eines Prozesses, zwischen mehreren Prozessen auf einer Anlage sowie zwischen verschiedenen Anlagensystemen einschränkt und in deutlichen Schwankungsbreiten der Bauteilkennwerte resultieren [10, 18, 31, 32]. Vor allem Temperaturunterschiede auf der Pulverbettoboberfläche von bis zu mehreren Grad bedingt eine Positionsabhängigkeit der Bauteileigenschaften [2, 33]. Optimierte Heizsysteme, welche von Drittanbietern wie beispielsweise Integra Services oder LSS oder von EOS in der P110 angeboten werden, zeigen hier erste Lösungsansätze, vermeiden die Temperaturunterschiede jedoch nicht gänzlich. Gleichzeitig verfolgen die am Markt aktiven Anlagenhersteller unterschiedliche Prozessstrategien zur vorrangigen Erzielung einer maximalen Detailtreue oder guter mechanischer

Eigenschaften [34]. Gerade hierdurch sowie durch die unzureichende Kenntnis der Prozesszusammenhänge ergeben sich große Abweichungen im Bezug auf die Bauteilqualität unterschiedlicher Anlagensysteme und Anbieter. Gleichzeitig wird in starkem Maße die Anisotropie der mechanischen Eigenschaften beeinflusst, welche durch den schichtweisen Bauprozess beim Laser-Sintern entsteht [35]. Bei bisherigen Betrachtungen kann grundsätzlich festgestellt werden, dass zum Erreichen hoher mechanischer Eigenschaften mit geringer Anisotropie oft in Grenzbereichen gearbeitet werden muss. Zudem zeigen Untersuchungen, dass die Bauteilqualität und die Prozessrobustheit ihre Optima in engen Bereichen haben.

Somit tritt die bislang noch eher untergeordnete Prozessüberwachung immer mehr in den Fokus der Forschung. Vor allem für die Metallverarbeitung mittels Strahlschmelzen wurden verschiedene Systeme entwickelt: Aktivitäten an der Katholischen Universität Leuven führten zur Entwicklung eines ersten Prozessüberwachungssystems für den Strahlschmelzprozess. Dieses nutzt die Messwerte einer CMOS-Kamera und einer Photodiode, um Aussagen über die Temperatur im Schmelzpool und dessen Größe abzuleiten [36 bis 38]. Basierend auf dem System wurden aktive Regelungsmechanismen zur Anpassung der Laserleistung beim Scannen entwickelt, um beispielsweise die Prozessführung bei der Herstellung von beim Strahlschmelzen kritischen Überhangstrukturen zu optimieren [37, 39]. Dieses System wurde mittlerweile durch die Firma Concept Laser kommerzialisiert. Arcam hat ein System patentiert, die Strahlleistung auf Basis von gemessenen Oberflächentemperaturen zu regeln [40]. Ähnliche Patente existieren auch für Laser-Sintern für den Fall, dass die thermische Abstrahlung im Wesentlichen mit einer anderen Wellenlänge als der Laserwellenlänge erfolgt [41, 42].

Einen anderen Ansatz zur Prozessüberwachung beim Strahlschmelzen von Metallen realisierte Kleszczynski und zur Jacobsmühlen in [43, 44]. Sie nutzen ein hochauflösendes optisches Kamerasystem zur Überwachung des Pulverauftrages und der Schweißbahnen sowie zur Identifizierung von Prozessfehlern. Krauss [45] und Schwertfeger [46] untersuchen jeweils die Anwendbarkeit der Infrarotthermografie zur Identifikation von Prozessfehlern beim Laserstrahlschmelzen bzw. beim Elektronenstrahlschmelzen. Die Arbeiten von Krauss führten hierbei zur Patentanmeldung eines thermografiebasierten Überwachungssystems für den Strahlschmelzprozess durch die Firma MTU [47].

Zur Überwachung des Laser-Sinter-Prozesses wird im Rahmen des SFB 814 von Hausotte ein System auf Basis von Streifenlichtprojektion und Weißlichtinterferometrie entwickelt, um die aufgeschmolzenen Bereiche optisch zu vermessen [48] [19-20]. Weitere Untersuchungen nutzen zwar Thermografie aber lediglich zur Beobachtung von Prozesszusammenhängen oder zur Messung der Temperaturverteilungen im Prozess [49 bis 51]. In [52] wird die Thermografie zu Regelung des Heizstrahlers genutzt, während EOS in [1] einen Ansatz zur Überwachung der Pulverschicht mittels Strahlungsdaten beschreibt. EOS entwickelt zur Überwachung des Schichtauftrages und der aufgeschmolzenen Konturbereiche ein optisches System, welches die Erfassung von Konturen auf der Pulverbettobерfläche erlaubt. Alternative, patentierte Überwachungssysteme beinhalten die Überwachung der Temperatur durch eine IR-Kamera [51, 52] oder ein Thermoelement [3] statt des üblichen Pyrometers oder die Überprüfung des Schichtzustandes sowie der verfestigten Bereiche durch IR-Strahlungsbilder [1]. Eine Überprüfung der Schmelztemperaturen innerhalb der aufgeschmolzenen Bereiche unter Korrelation der Werte mit Einflüssen auf die Bauteilqualität, wie im Verbundprojekt HiPer-LS vorgesehen, erfolgt jedoch in keiner der beschriebenen Arbeiten. Zudem fehlt bislang generell die kommerzielle Umsetzung und Verbreitung von Prozessüberwachungssystemen für das Laser-Sintern von Kunststoffen.

Als angrenzendes Forschungsprojekt ergibt sich im Bereich des Laser-Sinterns vor allem der SFB 814 in Erlangen. Ziel dieses Sonderforschungsbereiches ist jedoch nicht die Steigerung der Produktivität und Wirtschaftlichkeit, sondern der Aufbau eines grundlegenden Verständnisses beim Laser-Sintern mit Fokus besonders auf die Materialeigenschaften, die Prozessführung, eine Multimaterialverarbeitung und die simulative Abbildung des Prozesses, sodass hier keine Überschneidung mit dem auf Produktivitätssteigerung ausgelegten Verbundprojekt auftritt. Beide Projekte betrachten zwar das Thema Prozessüberwachung jedoch, wie ausgeführt, mit sehr unterschiedlichen Ansätzen durch Verwendung optischer bzw. thermografiebasierter Systeme. Somit ist auch hier eine eindeutige

Abgrenzung zwischen beiden Vorhaben möglich. Insgesamt betrachtet ist also eine klare Abgrenzung des Verbundvorhabens zum SFB 814 gegeben.

Am IPE-FT der Universität Duisburg-Essen läuft seit 11/2013 das AiF-IGF-Projekt „Ressourcenschonende Kleinserienproduktion durch Kunststoff-Laser-Sintern – Stabilisierung der Langzeiteigenschaften von laser-gesinterten Bauteilen (LZE-LS). Dieses behandelt zwar auch den Laser-Sinter-Prozess soll aber im Wesentlichen die Langzeiteigenschaften lasergesinterter Bauteile charakterisieren. Hierbei werden auch optimierte Parametersätze betrachtet. Diese sind jedoch in Bezug auf die mechanischen Eigenschaften optimiert, wobei stets nur Standardanlagensysteme mit den gängigen Variationsgrößen der Energiedichte genutzt werden.

Weitere intensive Forschungstätigkeiten im Bereich des Laser-Sinterns erfolgen am DMRC in Paderborn, in welchem auch EOS und Blue Production Mitglied sind. Aktuelle Forschungsfelder liegen hierbei im Nachweis der Prozessfähigkeit heutiger Anlagensysteme beispielsweise für die Luftfahrtindustrie. Aktivitäten im Bereich Produktivitätssteigerung und Prozessüberwachung werden hier bislang nicht verfolgt.

Die Ausnutzung des erheblichen Verfahrenspotentials pulver- und strahlbasiert additiver Fertigungsverfahren zur ressourceneffizienten Serienfertigung ist Gegenstand eines Projektes im Verbund Green Factory Bavaria der bayerischen Staatsregierung. Im Gegensatz zum vorliegenden Projektantrag werden hier die Einfluss- und Störgrößen im Serienprozess untersucht und es soll versucht werden, durch Änderungen in den vor- und nachgeschalteten Prozessschritten (Bauteilkonstruktion und Positionierung, Materialhandling, Bauteilentnahme etc.) sowohl die Qualität wie auch die Ökobilanz zu verbessern. Im Gegensatz zum Verbundprojekt wird somit keine Produktivitätssteigerung und Verbesserung der Reproduzierbarkeit durch Prozessregelung durch neuartige Anlagensysteme angestrebt. Hierdurch ist eine klare Abgrenzung gegeben.

Ansonsten bestehen im Bereich der Additiven Fertigung hauptsächlich Projekte zur Weiterentwicklung des Strahlschmelzens von Metallen. Die dort ermittelten Erkenntnisse lassen sich in den meisten Fällen jedoch aufgrund der unterschiedlichen Materialcharakteristika sowie den Unterschieden in der Prozessführung nicht auf Kunststoffe übertragen, sodass sich das geplante Verbundprojekt klar von diesen Aktivitäten trennen lässt.

Planung und Ablauf des Vorhabens

Der Umfang und die Komplexität des Projektes wurden vom Konsortium als aufwendig eingestuft. Resultierend wurden die Arbeitspakete (AP) nach den Kompetenzen der Projektpartner aufgegliedert. Die zeitliche Planung des Vorhabens erlaubte es viele AP simultan und autark voneinander zu bearbeiten.

Der erste Meilenstein wird dabei durch die Fertigstellung und Inbetriebnahme des Versuchsstandes beschrieben und sollte nach Planung innerhalb 1,5 Jahre abgeschlossen sein. Notwendig hierzu ist die komplette Bearbeitung des AP B. Aufgrund technischer Herausforderungen, die es vor einer Inbetriebnahme zu beseitigen gab, verzögerte sich die Inbetriebnahme des Versuchsstandes signifikant. Dies führte zu einer Verzögerung der AP C, E und H.2. Folgende Änderungen ergaben sich aus diesem neuen Sachverhalt:

- Teile des AP C werden für Erkenntnisgewinn und Vorrarbeit auf einer Formiga P110 durchgeführt
- Das Projekt wird für die Erreichung der gesetzten Ziele um fünf Monate (bis 12/17) kostenneutral verlängert
- Verzögerungen im AP D, verursacht durch technische Probleme, führen zu späterem Beginn effizienter Versuchsdurchführung
- Um Erkenntnisgewinn bei den zugrundeliegenden Effekten zwischen Laserstrahl und Pulverbett zu erhöhen wird das AP G zugunsten von AP E gestrichen; die Fördergelder werden freigegeben
- Die Arbeitsinhalte im AP E haben sich auf eine gaußförmige Intensitätsverteilung der Laserstrahlung verringert
- Die Verifizierung in AP H wird somit auch nicht auf der umgebauten Formiga durchgeführt

Die technischen Herausforderungen des AP B führten bei fortgeschrittenen Projekt dazu, dass nicht alle Anforderungen des Anforderungskataloges aus AP A erfüllt werden konnten. Eine Betrachtung der Prozesszusammenhänge konnte demnach lediglich für eine gaußförmige Intensitätsverteilung des Laserstrahls realisiert werden. Diese wurde in zehn unterschiedlichen Fokusdurchmesser-Variationen erprobt und zu robusten Prozessparametern weiterentwickelt.

Ein Projektpartner ist im Verlaufe des Projektes ausgeschieden, weshalb die Arbeitsinhalte des Projektpartners auf die verbleibenden Industriepartner aufgeteilt wurden.

Erzielte Ergebnisse

Nachfolgend sind die Ergebnisse der einzelnen Arbeitspakete (AP) aufgeführt. Die Teilergebnisse der einzelnen AP werden am Ende zu einer Schlussfolgerung zusammengefasst und liefern die wichtigsten Ergebnisse in komprimierter Form.

AP A Anforderungen

Federführung: BMW AG, München

Co-Federführung: Festo AG & Co. KG, Esslingen

Im AP A sollen die grundsätzlichen Anforderungen an ein Hochleistungs-Laser-Sinter-Verfahren und an die damit hergestellten Bauteile ermittelt werden. Hierzu soll ein Anforderungskatalog aufgestellt werden, welcher die angestrebten Zielsetzungen für das zu entwickelnde Hochleistungs-Laser-Scanner-System sowie das Prozessüberwachungssystem formuliert. Auf Basis dieses Kataloges soll am Projektende die Zielerreichung bewertet werden. Ausgehend von bekannten Erkenntnissen von Standardsystemen können hierbei Anforderungen an die Belichtungseinheit definiert werden.

Gleichzeitig werden zusätzliche Referenzbauteile mit speziellen Anforderungsprofilen (größeres Volumen, dickwandige Teile, starke mechanische Belastung) ausgewählt bzw. aus allem Demonstratorbauteilen spezielle Referenzbauszenarien zusammengestellt, welche sich mit heutigen Anlagensystemen nur unwirtschaftlich bzw. mit hoher Ausschussquote bzw. großen Variationsbereichen der Bauteileigenschaften produzieren lassen. Diese sollen im Rahmen der Validierung und Verifizierung die Grundlage für den Vergleich von konventionellem und Hochleistungs-Laser-Sintern bilden. Neben realen Bauteilen gilt es geeignete Normprüfkörper und -verfahren auszuwählen, welche sich zur Bewertung unterschiedlicher Prozessstrategien eignen.

Derzeit gibt es jedoch vielseitige Interpretationen über Bauteilqualität bzw. industriespezifischen Anforderungen an Bauteile und deren Eigenschaften und deshalb kein übergreifendes Verständnis/Terminologie. Daher sind für eine erfolgreiche Interpretation der Ergebnisse und eine Übertragbarkeit der Ergebnisse die einzelnen Definitionen und Messgrößen und daraus ableitend Definition der Messmittel, Messmethodiken, anwendbare Normen und die dafür notwendigen Rahmenbedingungen im Konsortium abzustimmen.

Anforderungsdefinition an den zu entwickelnden Versuchsaufbau

Vor den Verarbeitungsversuchen auf der modifizierten Lasersinteranlage werden die untersuchten Materialien grundlegend untersucht. Bei BMW stehen neben einem Camsizer der Fa. Retsch zur Ermittlung der Korngrößenverteilung und Partikelform auch ein DSC-Analyse-Gerät zur Charakterisierung des Aufschmelzverhaltens zur Verfügung. Diese Ergebnisse bilden die Grundlage für die Bewertung der späteren Verarbeitbarkeit des Materials.

Zentrale Anforderungen an die zu entwickelnde Anlage

Erhöhung der Reproduzierbarkeit und Verringerung der Anisotropie der Bauteile

Die Probekörper sollen unabhängig der Positionierung im Bauraum reproduzierbare und konstante Bauteileigenschaften aufweisen. Diese Eigenschaften umfassen neben den bekannten richtungsabhängigen mechanischen Eigenschaften (E-Modul, Zugfestigkeit und Reißdehnung, Schlagzähigkeit) auch die Maßhaltigkeit und die Bauteildichte, sowie die Oberflächeneigenschaften, wie beispielsweise die Rauheit in Abhängigkeit der Bauteilarbeitung und Positionierung. Diese Art der Qualitätssteigerung aber auch der Erhöhung der Prozessrobustheit ist essentiell für einen späteren Einsatz der Technologie für die Fertigung von Serienteilen.

Gleichbleibende Auflösungsgenauigkeit zu aktuellen Produktionsanlagen

Die Auflösungsgenauigkeit des neuen Anlagensystems soll mindestens vergleichbar mit aktuellen Anlagensystemen des Typs EOS Formiga P110 sein.

Erhöhung der Aufbaugeschwindigkeit

Verglichen mit der heutigen Anlagengeschwindigkeit einer EOS Formiga P110 soll eine Erhöhung der Aufbaugeschwindigkeit stattfinden. Ziel des Vorhabens ist eine Erhöhung der Geschwindigkeit um Faktor 7-10, mindestens soll dabei die Aufbaugeschwindigkeit durch neue Belichtungsstrategien und größere Strahldurchmesser mit angepassten Laserstrahlprofilen um den Faktor 2 erreicht werden.

Anforderungsdefinition auf Komponentenebene

Optisches System

Die Anforderungen an den optischen Versuchsaufbau wurden gemeinsam, wie in Tabelle 1 dargestellt, bestimmt. In der Tabelle ist zudem gegenübergestellt, welche Eigenschaften durch die ausgewählten Komponenten laut den entsprechenden Datenblättern erreicht werden können.

Prozessüberwachung

Neben der Auswahl der optischen Komponenten ist die Überwachung des Bauprozesses mit einer Thermografiekamera eine zentrale Anforderung zur Erhöhung der Bauteilqualität. Mittels Thermografiemessungen sollen die Temperaturen der Schmelze und des Pulverbetts ermittelt werden und der Energieeintrag durch den Laser jeweils optimal angepasst werden. Ziel ist die Homogenisierung der Schmelzetemperatur über den gesamten Bauprozess hinweg auf ein konstantes, ausreichend hohes Niveau, da dies einen wichtigen Faktor für die Ausbildung eines homogenen Schmelzfilms darstellt. Dies resultiert wiederum in dichten Bauteilen mit geringer Porenbildung und homogenem Schwund, was eine essentielle Grundlage für die Erhöhung der Reproduzierbarkeit und Bauteilqualität bildet.

Anlagensteuerung

Die Steuerung der Anlage soll weiterhin auf Basis einer EOS Formiga P110 erfolgen. Hierzu ist es notwendig, die Steuerung entsprechend der neuen optischen Möglichkeiten zu erweitern. Unter anderem ist es notwendig neue, prozessangepasste Scanstrategien zu implementieren, um die anlagenseitigen Vorteile, die z.B. durch variable Strahldurchmesser und neue Strahlprofile erreicht werden können, umzusetzen.

In Abbildung 1 werden die durchzuführenden Untersuchungen und Zusammenhänge zur Ermittlung der Leistungsfähigkeit des Anlagensystems dargestellt. Die Bauteilqualität stellt hierbei einen sehr großen Anteil dar und kann größtenteils bei den industriellen Projektpartnern untersucht werden. Außerdem stellen die industriellen Prozesspartner einen Vergleich der Wirtschaftlichkeit zwischen bestehendem Anlagensystem EOS Formiga und der Neuentwicklung an. Die Arbeitspunkte, welche die neue Anlagentechnik selbst betreffen, werden in Absprache mit den übrigen Projektpartnern bei den Projektpartnern EOS, IPE, InfraTec und IwF, definiert und erarbeitet.

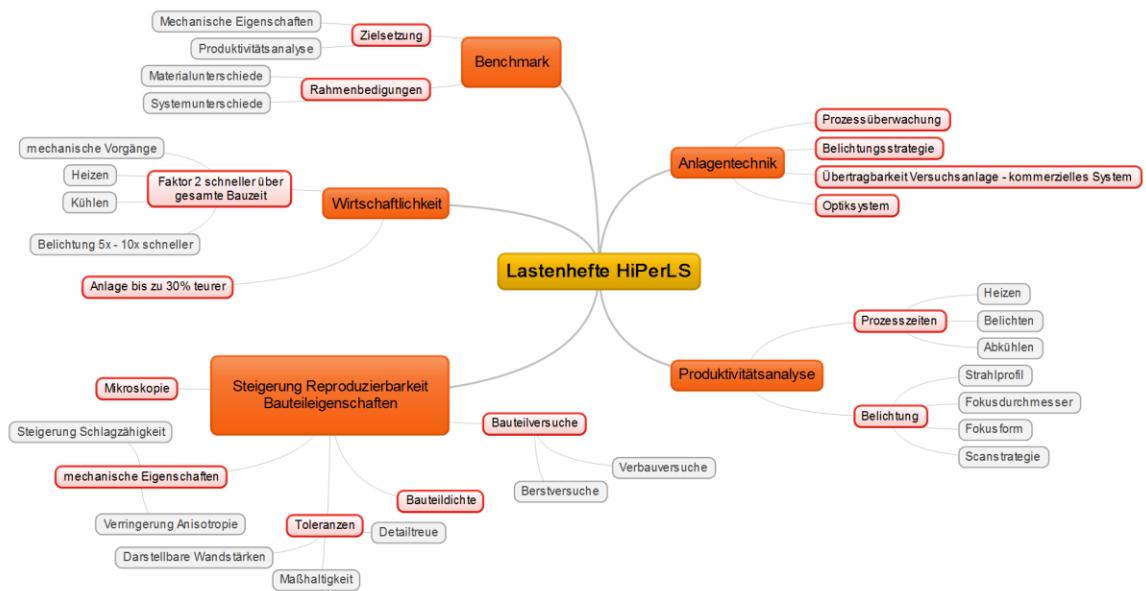


Abbildung 1: Lastenhefte und Anforderungen an das zu entwickelnde System

AP B Laser-Scanner-Systeme

Federführung: Fraunhofer-Institut für Lasertechnik (ILT), Aachen

Co-Federführung: Lehrstuhl für Fertigungstechnik (IPE-FT), Universität Duisburg-Essen

Im Gesamtarbeitspaket B entwickeln die Verbundpartner EOS, IPE-FT und ILT in enger Kooperation einen Laser-Sinter-Versuchsstand (LS-Versuchsstand). Typischerweise besteht eine Laser-Sinteranlage aus einer Prozesskammer, einem Optik-Lasermodul und einem Pulverbereich. Das IPE-FT ist verantwortlich für den Aufbau des Versuchsstandes insbesondere für die Auslegung und Fertigung der Prozesskammer sowie des Pulverbereichs. Das Optiksystem und die Strahlquelle, welche in den Versuchsstand integriert werden sollen, werden vom ILT ausgelegt und aufgebaut. Die entwickelten Scannersysteme sollen hierbei in Kombination mit einem CO₂-Laser hoher Leistung einen möglichst großen Variationsraum bezüglich Fokusprofil und Fokussdurchmesser bieten.

AP B.1 Entwicklung, Aufbau und Inbetriebnahme eines Laser-Sinter-Versuchstandes

Kommerzielle Anlagensysteme lassen sich sowohl hardware- als auch softwaretechnisch nur unter großem Aufwand zu einfach adaptierbaren Versuchsträgern umrüsten. Um jedoch neuartige Komponenten wie Laser-Scanner-Systeme oder Prozessüberwachungssysteme ohne großen Umbauaufwand testen und gegebenenfalls im Aufbau ändern zu können ist ein variabel anpassbarer Versuchsstand notwendig. Bei der Entwicklung des Versuchsstandes wurden die einzelnen Konstruktionsabläufe nach VDI Richtlinie 2210E reziprok 2221 durchgeführt und erarbeitet. Nach dem klären und präzisieren der Aufgabenstellung wurde ein Anforderungskatalog erstellt, der zum Ermitteln der einzelnen Funktionen und deren Strukturen herangezogen wurde. Die darauffolgende Entwicklung der möglichen Lösungsprinzipien der einzelnen Funktionen wird detailliert in einer Prinzip-Erarbeitung, Gestaltung und Detaillierung bearbeitet. Die sich ergebenen prinzipiellen Lösungen werden in realisierbare Module eingeordnet, um eine modulare Struktur zu erhalten. Diese Struktur wird in der Gestaltungsphase erarbeitet und zu einem Gesamtentwurf ausgearbeitet. [53, 54]

Um die neu entwickelten Systeme und die sich hieraus ergebenen Prozesseinflüsse grundlegend untersuchen zu können, muss der Versuchsstand hierbei die essentiellen Aufgaben einer Laser-Sinter-Anlage, wie Pulverauftrag, Behältersysteme, Vorheizung sowie Inertisierung sicherstellen. Ein entsprechend variabel modifizierbarer Versuchsstand soll im Rahmen von AP B.1 entwickelt und aufgebaut werden. Hierzu gilt es einen geeigneten Aufbau festzulegen und entsprechende mechanische und steuerungstechnische Komponenten auszuwählen und konstruktiv unter Berücksichtigung geeigneter Schnittstellen zum Laser-Scanner-System zu einem Gesamtsystem auszuarbeiten. Jegliche Schnittstellen bezüglich der Ansteuerung des Optik-Systems und der Datenaufbereitung werden vom IPE-FT in enger Zusammenarbeit mit dem ILT und EOS definiert und spezifiziert.

Konzepterstellung

Zur Sicherstellung eines variablen Aufbaus des Versuchsstandes, wurde die Konstruktion mit Aluminium-Nutprofilen durchgeführt. Die Verwendung von Aluminiumprofilen erlaubt den flexiblen Zusammenbau und Austausch einzelner Konstruktionsteile, ohne die Gesamtkonstruktion neu auslegen zu müssen. Die Nuten in den Profilen dienen der flexiblen Montage zweier Profile. Standardisiert wird die Montage auf Stoß durchgeführt, kann jedoch durch Sonderbeschläge auch variabel gestaltet werden. Der Grundaufbau wurde an einem bestehenden Anlagensystem angelehnt. Zwei Anlagenprinzipien haben sich hierbei auf dem Markt etabliert: Das der Firma EOS und der Firma 3D Systems [55]. Der Anlagenaufbau unterscheidet sich im Wesentlichen durch das Pulvermanagement. Während bei EOS die Pulverzuführung kontinuierlich im Prozess erfolgt und mittels Pulverschüttung vor der Pulverauftragseinheit appliziert wird, realisieren 3D Systems Anlagen die Pulverzuführung mittels

Vorratsbehälter [56]. Dieser Vorrat wird entgegen der Baubehälterbewegung nach oben bewegt, wodurch Material für das Pulverauftragssystem zur Verfügung gestellt wird. Vorteile liegen hier in der einfachen Realisierung und der genaueren Vorheizung der Vorratsbehälter, die der begrenzten Menge des Materials und dem vergrößerten Bauraumvolumen gegenüberstehen. Da die thermische Prozessführung jedoch im Sinne der Reproduzierbarkeit steht und der längere Verfahrtsweg des Pulverauftragssystems mit einer erhöhten Verfahrgeschwindigkeit kompensiert wird, wurde sich in diesem Projekt für das Anlagenprinzip einer 3D Systems Anlage entschieden.

Ein modularer Aufbau ermöglicht dabei sowohl die Montage der einzelnen Bauteile in Baugruppen als auch die Austauschbarkeit einzelner Baugruppen über definierte Schnittstellen zur Gesamtbaugruppe. Der Aufbau erfolgt in den Baugruppen Grundgestell, Bauraum, Prozesskammer, Getriebekasten und Pulverauftragseinheit. Das Grundgestell übernimmt die Aufgabe des Fixierens der einzelnen Baugruppen und der Dämpfung der durch mechanische Komponenten verursachten Schwingungen. Zugleich muss eine zur Pulverbettobерfläche parallele Aufnahme und Fixierung der Optik-Bank erfüllt werden. Um die notwendige Steifigkeit als auch Stabilität zu erzeugen, wurden $80 \times 80 \text{ mm}^2$ Aluminiumprofile verwendet. Der Bauraum soll dabei entnehmbar sowie mit zwölf Hochleistungs-Heizpatronen und einem Bauplattform-Heizer ausgestattet werden. Diese Maßnahmen sind zur homogenen Temperierung des Baubehälters und zur definierten Abkühlung des Bauprozesses nach Prozessende gedacht. Alle Heizelemente sind mit Thermoelementen ausgerüstet und erlauben eine genaue Temperaturkontrolle. Die Prozesskammer ist auf dem Baufeld mit einem 6-Zonen Heizstrahler ausgestattet. Alle Heizstrahler emittieren im Spektralbereich der schnellen Infrarot-Mittelwelle, was eine schnelle Reaktion der Heizstrahler auf die Regelgröße erlaubt und zugleich einen hohen Absorptionsgrad im verwendeten Material besitzt. Im Getriebekasten befinden sich die mechanischen Komponenten, die für den Pulverauftrag verantwortlich sind. Mit Schrittmotoren und Kettenantrieben wurden Verfahrgeschwindigkeiten des Pulverauftragsmechanismus von bis zu 450 mm/s erreicht. Der Pulverauftrag kann dabei sowohl von einer Rakel als auch von einer rotierenden Walze realisiert werden. Die rotatorische Drehbewegung ist dabei von der translatorischen Verfahrgeschwindigkeit vollständig entkoppelt. So wurde eine gleich- und gegenläufige Rotation der Auftragswalze realisiert, die neue Auftragsstrategien ermöglicht.

Die Hauptaufgabe der Steuerung übernimmt eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) der Firma WAGO. Der Vorteil dieser Steuereinheit liegt bei der modularen Bauweise und der bei Bedarf erweiterbaren Steuerkarten. Somit ist die Inbetriebnahme weiterer Motoren oder Ein-/Ausgänge einfach zu realisieren. Zudem bietet eine SPS eine erhöhte Zuverlässigkeit und ermöglicht die Verwendung verschiedener Schnittstellenformate.

Aufbau und Inbetriebnahme

Nach dem Zusammenbau einzelner Teilbaugruppen, wurden diese auf Ihre Funktionalität überprüft und zu testzwecken in Betrieb genommen. So konnten notwendige Anpassungen frühzeitig erkannt und durchgeführt werden. Im Fokus standen dabei die Einhaltung einzelner Fertigungs- und Baugruppentoleranzen. Weitergehend wurden die Schnittstellen der einzelnen Komponenten definiert und in das Gesamtkonzept implementiert. Grundlegende Funktionen wie die Regelung einzelner Heizstrahler und die Inbetriebnahme eines Schrittmotors mit der SPS wurden erprobt. Zur genauen Anordnung der Heizstrahler im Baufeld wurden die einzelnen Strahler mittels Thermografie charakterisiert und in ein mathematisches Modell eingepflegt, um einen optimierten Energieeintrag in das Baufeld zu ermöglichen. Verbaut wurden insgesamt 171 Profile, mehr als 1200 Zukaufteile und über 300 Einzelanfertigungen. Darunter wurden unter anderem drei Präzisions-Lineareinheiten, eine Hochtemperatur-Linearachse, zwei Antriebsmotoren, Gas- und Elektroleitungen und zahlreiche Elektronik-Komponenten zur Steuerung und Regelung des Versuchsstandes montiert.

Nach der Konstruktion und Auslegung des Versuchsstandes wurde das Gestell erweitert, um die Optik-Bank aufnehmen zu können. Die ursprüngliche Stellfläche von $1650 \times 862 \text{ mm}^2$ musste auf $2600 \times 1332 \text{ mm}^2$ angepasst werden, um genug Auflagefläche für die Optik-Bank zur Verfügung zu stellen. Schnittstellen bilden hierbei die acht aufrechtstehenden Aluminiumprofile, die zusätzlich mit Querstreben verbunden sind. Ausgehend von der Lage der Scanner-Einheit und des Arbeitsabstandes,

wurde eine konstruktive Lösung zur Integration der Thermografie-Kamera in den Versuchsstand erarbeitet, um Thermogramme während der Belichtung der Querschnitte aufnehmen zu können

AP B.2 – Konzeptionierung und Aufbau eines Optiksystems zur dynamischen und variablen Anpassung des Strahldurchmessers und der Strahlform

In diesem Arbeitspaket soll ein Optiksystem zur dynamischen und variablen Anpassung des Strahldurchmessers und der Strahlform ausgelegt und aufgebaut werden. Das Ziel ist, einen möglichst großen Variationsraum bezüglich Strahlprofil und Strahldurchmesser zu ermöglichen. Dies erlaubt einen optimierten Erkenntnisgewinn für potentielle technische Maßnahmen zur Produktivitäts- und Reproduzierbarkeitssteigerung. Charakteristisch für Polyamid 12 ist der hohe Absorptionsgrad im mittleren Bereich der Infrarot Strahlung. Ausgehend von diesem Sachverhalt soll das System mit einem CO₂-Laser der Wellenlänge $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$ ausgelegt werden.

Konzepterstellung

Zunächst wurde ein Grundkonzept des Optiksystems erstellt (Abbildung 2). Der 600 W CO₂-Laser hat eine Einschaltschwelle von ca. 70 W unterhalb derer keine Laserstrahlung emittiert wird. Daher wird ein manueller Strahlabschwächer vorgesehen, der eine stufenlose Variation der Laserleistung auch für kleine Laserleistungen zwischen ca. 5 und 70 W ermöglicht. Das anamorphe Teleskop dient zur Realisierung eines linienförmigen Intensitätsprofils. Der Zoom-Aufweiter ermöglicht die gezielte Anpassung des Strahldurchmessers an die Eingangsapertur des Strahlformers. Der Strahlformer soll eine Top-Hat-förmige Intensitätsverteilung ermöglichen. Die dynamische Fokussiereinheit ermöglicht die Variation des Laserstrahldurchmessers in der Pulverbettalebene. Der Galvanometer-Scanner dient zur Ablenkung des Laserstrahls in der Pulverbettalebene.

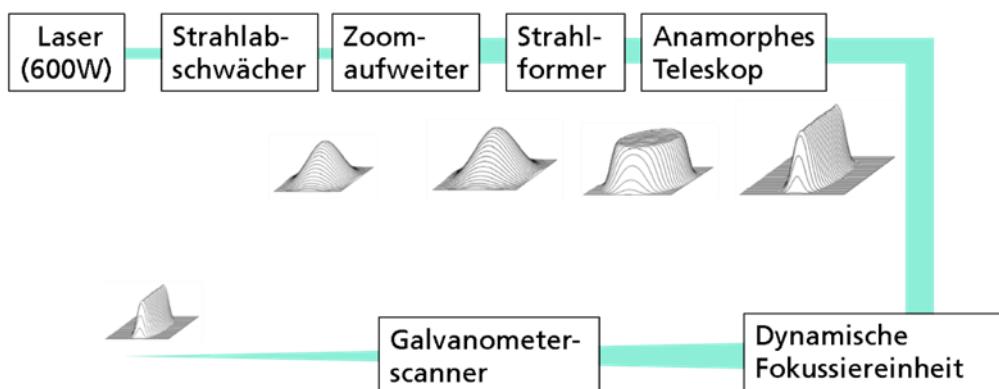


Abbildung 2: Erstes Grundkonzept des Optiksystems

Dieses Grundkonzept wurde im Rahmen von AP A – Anforderungsermittlung im Konsortium diskutiert. Hierbei wurden die in Tabelle 1 zusammengefassten Anforderungen ermittelt.

Tabelle 1: Anforderungen an das Optik-System

| Eigenschaft | Anforderung |
|---|------------------------------------|
| Wellenlänge λ | 10,6 μm |
| Max. Laserleistung P_{\max} | 600 W |
| Min. Laserleistung P_{\min} | 5 W |
| Umschaltzeit zwischen großer (>70 W) und kleiner Laserleistung | < 0,5 s |
| Rise- und Falltime der Laserstrahlung | < 100 μs |
| Variabler Fokusdurchmesser (1/e ² -Durchmesser für Gauß LDV) | 0,45 – 5 mm |
| Variable Leistungsdichteverteilung (LDV) | Gauß Tophat Linienverteilung |
| Bildfeldgröße | 320 x 320 mm |
| Arbeitsabstand | > 380 mm |
| Dynamik | Mindestens 3 m/s |

Auf Basis dieser Anforderungen wurde das erste Grundkonzept überarbeitet:

- Aufgrund der Forderung nach einer Umschaltzeit < 0,5 s zwischen großer und kleiner Laserleistung wird eine zweite Laserstrahlquelle in das Konzept integriert (Abbildung 3). Mit Hilfe einer Strahlweiche kann nun zwischen einem Laser mit kleiner Ausgangsleistung (< 70 W) und dem 600 W-Laser umgeschaltet werden. Da pneumatisch betriebene Strahlweichen mit Schaltzeiten von ca. 0,2 s kommerziell verfügbar sind, kann die Anforderung mit dieser Lösung erfüllt werden. Der manuelle Strahlabschwächer wird aus dem Konzept entfernt, da das manuelle Umschalten zu viel Zeit in Anspruch nehmen würde und elektrisch verstellbare Lösungen langsamer und teurer sind. Zusätzlich zum 70 W-Laser wird ein weiterer Zoom-Aufweiter integriert, mit dem der Laserstrahldurchmesser des 70 W-Lasers an jenen des 600 W-Lasers angepasst werden kann. So wird sichergestellt, dass die Strahlen beider Laser das optische System auf gleiche Weise durchlaufen.
- Aufgrund der Forderung nach einer Rise- und Falltime der Laserstrahlung < 100 μs wurde eine zeitliche Charakterisierung des 600 W-Lasers durchgeführt. Hierbei hat sich herausgestellt, dass die Rise- und Falltime > 100 μs ist. Dies würde bei kurzen Scanvektoren (d.h. schnell aufeinander folgenden Belichtungen) zu Fehlzündungen des Lasers und somit zum Prozessabbruch führen. Daher wird ein akustooptischer Modulator (AOM) in das Konzept integriert, um eine konventionelle Laser-Sinter-Prozessführung zu ermöglichen. Der AOM dient als optischer Schalter mit Schaltzeiten im niedrigen μs -Bereich. Zudem werden durch den AOM Einschaltüberhöhungen der Laserleistung vermieden, die das Prozessergebnis nachteilig beeinflussen könnten.

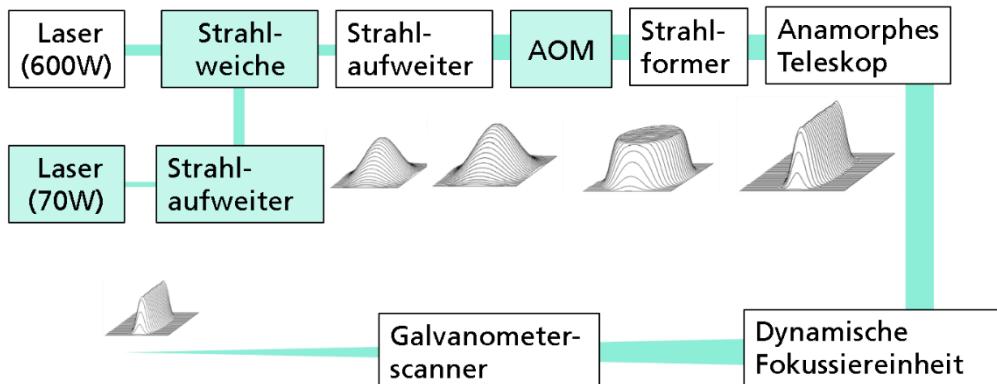


Abbildung 3: Auf Basis der Anforderungen modifiziertes Konzept des Optiksystems

Auslegung der optischen Bank und des Strahlengangs

Die Größe der optischen Bank wird maßgeblich durch den 600 W-Laser (Abmessungen: 2200 x 220 x 220 mm³) sowie den benötigten freien Strahlweg nach dem akustooptischen Modulator (1,3 m) bestimmt. Durch Beugung innerhalb des Germanium-Kristalls des AOM wird ein Teil des Strahls (bis zu 90 %) abgelenkt. Dieser abgelenkte Strahl wird im Folgenden als 1. Ordnung bezeichnet. Da der nicht abgelenkte Strahl (0. Ordnung) immer mindestens 10 % der Eingangsleistung enthält, muss dieser mit Hilfe einer wassergekühlten Strahlfalle unschädlich gemacht werden. Um eine Strahlfalle zur Absorption der 0. Ordnung sowie einen Spiegel zur weiteren Strahlführung der 1. Ordnung räumlich nebeneinander platzieren zu können, bedarf es eines lateralen Abstands von ca. 100 mm. Aufgrund des physikalisch vorgegebenen Separations-Winkels von 77,1 mrad ist hierfür ein freier Strahlweg von ca. 1300 mm nach dem AOM erforderlich. Dies muss bei der Auslegung des Systems berücksichtigt werden und verlängert den notwendigen Strahlweg signifikant. Als Grundplatte wird eine 20 mm dicke Aluminium-Gussplatte mit einer Grundfläche von 2750 mm x 1158 mm verwendet. Die Dicke der Platte wurde auf Basis einer statisch-mechanischen Analyse ausgewählt. Hierdurch wird sichergestellt, dass die Verformung so gering ist, dass die Strahllage nicht signifikant beeinflusst wird (< 135 µm, was ca. 1 % des Strahldurchmessers von 12 mm entspricht). Um den Strahl zu führen werden NiCu-Spiegel mit Hart-Gold Beschichtung verwendet. Diese haben einen Reflexionsgrad > 98,8 % und sind aufgrund der guten Wärmeabfuhr besonders für hohe Laserleistungen geeignet. Um einen breiten Laserleistungsbereich abzudecken, verfügt das System über zwei Laserstrahlquellen. Der 600 W-Laser kann ab ca. 70 W stabil betrieben werden. Der 70 W-Laser kann für kleine Laserleistungen im Bereich von 5–70 W verwendet werden.

Auswahl des akustooptischen Modulators (AOM)

Bei der Auswahl des AOM wurde darauf geachtet das Modell mit der größtmöglichen Apertur auszuwählen. Je größer die Apertur ist, umso größer kann der verwendete Laserstrahldurchmesser sein. Je größer der Laserstrahldurchmesser ist, desto kleiner ist die Intensität und somit die thermische Last auf dem Germanium-Kristall des AOM. Dies führt dazu, dass thermische Linseneffekte, die den Strahl negativ beeinflussen können, erst bei vergleichsweise großen Laserleistungen auftreten. Der hier verwendete AOM hat eine aktive Apertur von 12 mm Höhe x 30 mm Breite. Der AOM ist auf einem Drehteller montiert, um den Einfallswinkel des Laserstrahls präzise einstellen zu können. Dies ist notwendig, da die Beugungseffizienz bei Einfall im Bragg-Winkel (38,5 mrad) maximal ist und Rückreflexe minimiert werden.

Realisierung unterschiedlicher Leistungsdichteverteilungen

Um das von Natur aus gaußförmige Strahlprofil der CO₂-Laserstrahlen zu verändern, muss die Intensität innerhalb des Strahls umverteilt werden. Dafür kommen Spiegel, Linsen oder diffraktive optische Elemente in Frage. Da die Verwendung von Linsen im Hinblick auf die Robustheit bei Verkippung, die Stabilität bei Defokussierung, die optischen Verluste sowie die Kosten als vorteilhaft eingeschätzt wird, wurde beschlossen die Strahlformung mit Hilfe von Linsen zu realisieren. Abbildung 4 zeigt Simulationsdarstellungen drei unterschiedlicher Intensitätsverteilungen, die mit dem Optiksystem realisiert werden sollen.

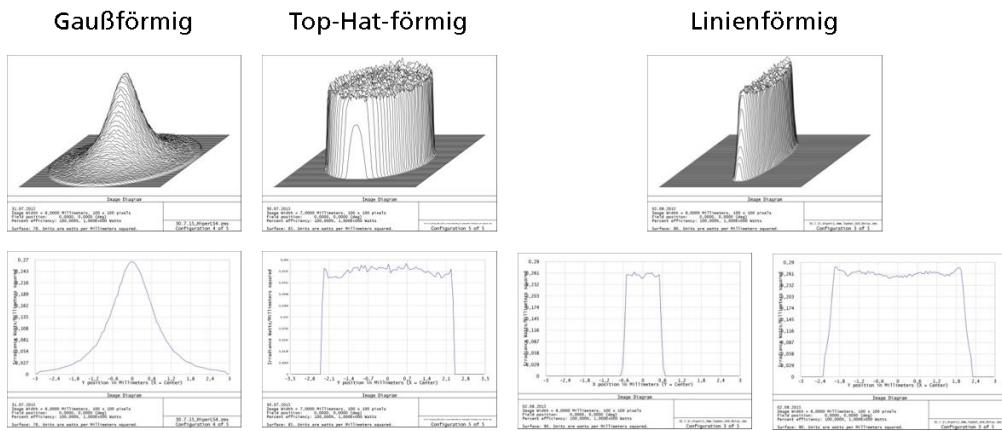


Abbildung 4: Simulation unterschiedlicher Intensitätsverteilungen, die mit dem System realisiert werden sollen

Gauß-Profil: Da es sich bei den verwendeten Lasern um CO₂-Laser handelt, die im Grundmode (TEM₀₀) betrieben werden, ist die LeistungsdichteVerteilung von Natur aus gaußförmig. Zur Realisierung des Gauß-Profiles muss also lediglich eine einwandfreie Justage des optischen Systems sichergestellt werden.

Top-Hat-Profil: Zur Realisierung einer Top-Hat-förmigen LeistungsdichteVerteilung (LDV), muss die Intensität des Gaußstrahls umverteilt werden. Hierfür existiert in Form des π Shapers eine kommerzielle Lösung der Firma AdlOptica, die auf asphärischen ZnSe-Linsen beruht. Hierbei ist entscheidend, dass diese Lösung auf einen exakt definierten Laserstrahldurchmesser (hier: 12 mm) ausgelegt ist. Falls der Laserstrahldurchmesser vom Soll-Wert abweicht, kann keine korrekte Top-Hat-Form erzielt werden. Daher wurde im Rahmen der Konzeptionierung des Optiksystems ein variabler Zoom-Aufweiter vorgesehen, der eine stufenlose Anpassung des Eingangsstrahldurchmessers ermöglicht.

Linienprofil: Um eine linienförmige LDV zu erzeugen, sollen zwei Zylinderlinsen eingesetzt werden. Zylindrische Linsen fokussieren oder weiten einen Lichtstrahl längs einer einzigen Achse auf. Da die andere Achse weitgehend unbeeinflusst bleibt, kann somit aus einer gaußförmigen eine linienförmige LDV erzeugt werden.

Auslegung des 3D-Scansystems

Ein 3D-Scansystem besteht im Wesentlichen aus einer dynamischen Strahlaufweitung und einem 2D-Galvanometer-Scanner (Abbildung 5). Die dynamische Strahlaufweitung besteht in der Regel aus zwei Linsen, von denen eine beweglich ist, so dass die Brennweite des Gesamtsystems durch Translation dieser Linse verändert werden kann. Bei der Auslegung des Systems müssen folgende Punkte berücksichtigt werden:

- Je größer das Baufeld ist, desto größer muss der Arbeitsabstand sein, um dieses Baufeld abdecken zu können.
- Je größer der gewünschte Arbeitsabstand ist, desto größer muss auch die Brennweite sein, damit die Fokusebene mit der Bearbeitungsebene übereinstimmt.
- Je größer die Brennweite ist, desto größer ist der minimal erzielbare Fokusdurchmesser.
- Je größer der Eingangsstrahl ist (d.h. der Strahl vor dem Eintritt in die dynamische Strahlaufweitung), desto kleiner ist der minimal erzielbare Fokusdurchmesser.
- Je größer der Eingangsstrahl ist, desto größer müssen die Scannerspiegel sein, um diesen Strahl abzulenken.
- Je größer die Scannerspiegel sind, desto kleiner sind die maximale Scangeschwindigkeit und damit die Produktivität.

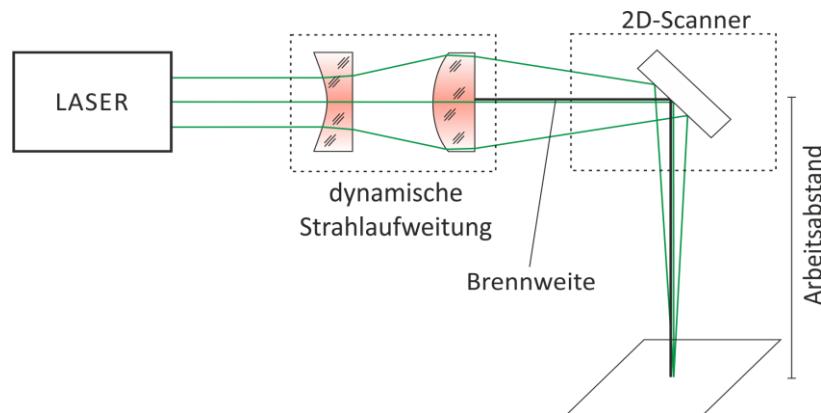


Abbildung 5: Schematische Darstellung eines 3D-Scansystems

Hieraus ergeben sich Zielkonflikte zwischen Laserstrahldurchmesser, Produktivität, Baufeldgröße und Arbeitsabstand. Beispielsweise ist ein großer Arbeitsabstand wünschenswert, um die Maschinenintegration zu erleichtern. Dies führt allerdings zu einem größeren Laserstrahldurchmesser, wodurch die Detailauflösung eingeschränkt wird. Daher wurden zunächst verschiedene Lösungen zusammengestellt (Abbildung 6).

| | Var. 1 | Var. 2 | Var. 3 |
|----------------------------------|------------------|------------------|------------------|
| Dynamische Fokussiereinheit | varioSCAN de 40i | varioSCAN de 40i | varioSCAN de 40i |
| Scankopf | intelliSCAN30 | powerSCAN33 | intelliSCAN30 |
| Freier Arbeitsabstand [mm] | 380 | 380 | 310 |
| Feldgröße [mm ²] | 320 x 320 | 320 x 320 | 280 x 280 |
| Spotgrößen [µm] | 460 – 4300 | 430 – 5000 | 400 - 4400 |
| Positioniergeschwindigkeit [m/s] | ca. 4 | ca. 4 | ca. 4 |
| Abmessungen [mm] | 400 x180 x 140 | 460 x 225 x 220 | 400 x180 x 140 |
| RTC-Standard | RTC 5 | RTC 4 | RTC 5 |

Abbildung 6: Verschiedene Varianten für das 3D-Scansystem

Die Anforderungen an den Fokusdurchmesser könnten mit Variante 2 nahezu vollständig erfüllt werden. Allerdings hat diese Variante den Nachteil, dass ein vergleichsweise großer 2D-Scankopf (powerSCAN33) eingesetzt werden müsste. Dies ist im Hinblick auf eine möglichst platzsparende Maschinenintegration nachteilig. Daher wurde Variante 1 im Konsortium ausgewählt. Diese hat zudem gegenüber Variante 3 den Vorteil eines größeren Bildfeldes und Arbeitsabstands.

Wasserkühlung

Die beiden CO₂-Laser sowie die optischen Komponenten (insbesondere Umlenkspiegel, AOM sowie 3D-Scansystem) bedürfen einer Wasserkühlung. Während die Kühlwasserleitungen des 70 W-Lasers aus Kupfer und die Leitungen der optischen Komponenten aus Aluminium sind, sind im 600 W-Laser Leitungen aus diversen Buntmetallen verbaut. Um eine galvanische Korrosion zu vermeiden, ist daher eine Trennung der Kühlkreisläufe notwendig. Somit verfügt das Optiksystem über drei verschiedene Kühlkreisläufe mit unterschiedlichen Korrosionsschutz-Zusätzen.

Zusammenfassung

Auf Basis des oben beschriebenen Konzepts wurde ein CAD-Modell der Optikbank und der optischen Komponenten erstellt (Abbildung 7).

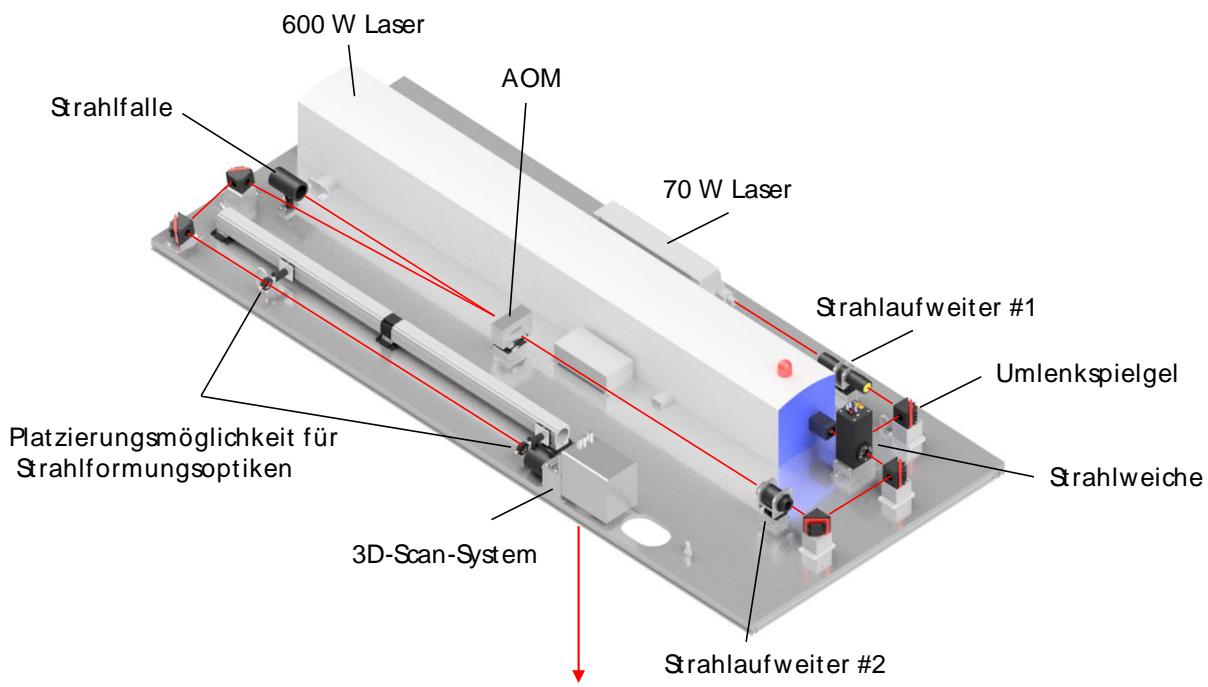


Abbildung 7: CAD-Ansicht des Optiksystems

Zusammenfassend besteht das System aus den folgenden Komponenten:

- Aluminium-Grundplatte mit den Abmaßen 2750 mm x 1158 mm x 20 mm (BxTxH).
- Zwei Laserstrahlquellen, um einen breiten Laserleistungsbereich zwischen ca. 5 W - 600 W nutzen zu können. Der zweite Laser (70 W) ist notwendig, um auch niedrige Laserleistungen im Bereich von 5–70 W realisieren zu können, da der 600 W Laser erst ab ca. 70 W betrieben werden kann.
- Strahlaufweiter #1 zur Anpassung des Strahldurchmessers des 70 W Lasers an den Strahldurchmesser des 600 W Lasers.
- Pneumatische Strahlweiche, mit der binnen ca. 0,2 s zwischen den beiden Laserstrahlquellen umgeschaltet werden kann.
- Strahlaufweiter #2 zur Anpassung des Strahldurchmessers an die Eingangsapertur des AOM bzw. des Strahlformers.
- Akustooptischer Modulator (AOM) zur Vermeidung von Einschaltüberhöhungen der CO₂-Laser und zum schnellen Zu- und Wegschalten der Laserstrahlung (10 µs Risetime des AOM im Vergleich zu 100–800 µs Risetime der CO₂-Laser).
- Strahlfalle, um jenen Teil der Laserstrahlung zu absorbieren, der nicht durch den AOM abgelenkt wird.
- Variable Platzierungsmöglichkeit für Strahlformungsoptiken (Top-Hat-Former sowie anamorphes Teleskop) zur Erzeugung einer Top-hat-förmigen bzw. linienförmigen Intensitätsverteilung.
- 3D-Scansystem zur Realisierung eines variablen Gaußstrahldurchmessers im Bereich von ca. 0,46–4,3 mm.

Aufbau des Optiksystems

Auf Basis des CAD-Modells wurde das Optiksystem gefertigt und am Fraunhofer ILT aufgebaut (Abbildung 8). Die Aluminium-Grundplatte wird durch ein ITEM-Gestell gestützt, welches in identischer Ausführung auch im Versuchsstand der Universität Duisburg-Essen zum Einsatz kommen wird, so dass eine einfache Integration in den Versuchsstand gewährleistet ist.

Der Aufbau und die Justage des Optiksystems werden zunächst am Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT durchgeführt, da in den Laboratorien des ILT eine Justage bei offenem Strahlengang möglich ist.

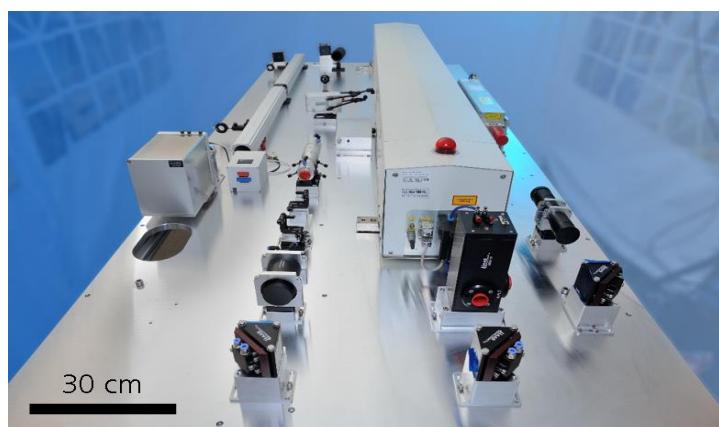


Abbildung 8: Aufbau des Optiksystems

AP B.3 Integration in den Versuchsstand

In diesem Arbeitspaket wird das Optiksystem mechanisch und steuerungstechnisch in den Versuchsstand der Universität Duisburg-Essen integriert.

Bei der Positionierung des 3D-Scansystems wird sichergestellt, dass der korrekte Arbeitsabstand von ca. 420 mm zur Pulverbett ebene eingehalten wird. Dies ist essentiell, damit die Fokusebene mit der Pulverbett ebene zusammenfällt.

Bei der Fertigung der optischen Bank wurde in Absprache mit der Universität Duisburg-Essen eine Aussparung für die Thermografiekamera vorgesehen (Abbildung 9). Die Aussparung wurde möglichst nah am Scanner platziert, um einen möglichst steilen Beobachtungswinkel (ca. 25° zur Flächennormalen) zu ermöglichen, da dies vorteilhaft für die Präzision der thermografischen Messungen ist.

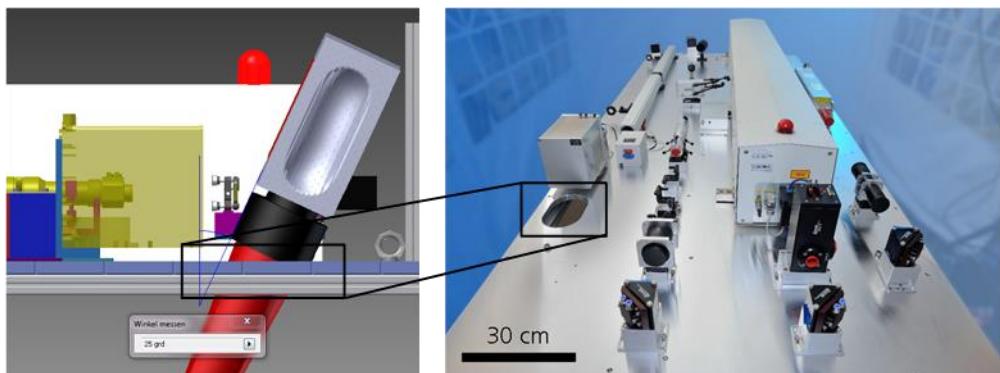


Abbildung 9: CAD-Modell zur Positionierung der Thermografiekamera der Universität Duisburg-Essen neben dem 3D-Scansystem

Für die mechanische Integration der optischen Bank in den Lasersinter (LS)- Versuchsstand wurden entsprechende Ringschrauben vorgesehen, an denen Lastengurte befestigt werden können. Somit kann die optische Bank mit Hilfe eines Krans auf den LS-Versuchsstand aufgesetzt werden. Das vollständig integrierte Optiksystem ist in Abbildung 10 dargestellt.

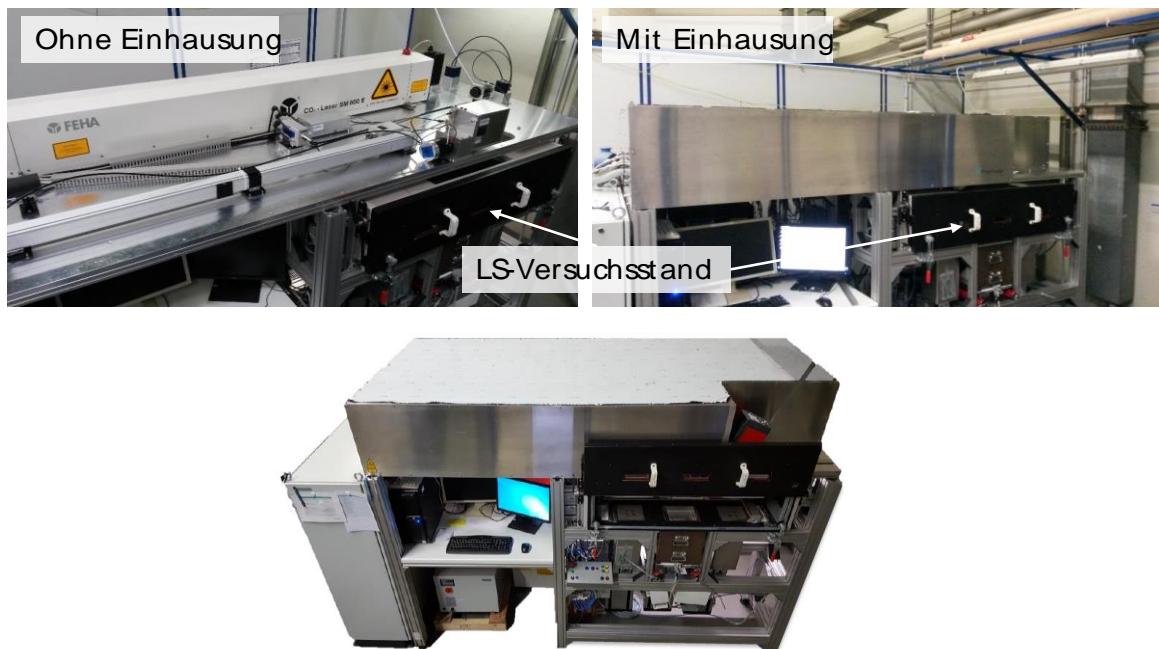


Abbildung 10: Optiksystem nach der Integration in den Versuchsstand der Universität Duisburg-Essen ohne Einhausung (links) und mit Laserschutz-Einhäusung (rechts), sowie Gesamtansicht (unten)

AP B.4 Verifikation der Hardware

In diesem Arbeitspaket wird das Optiksystem justiert sowie zeitlich (Einschaltodynamik) und räumlich (Strahlform/Leistungsdichteverteilung) charakterisiert.

Justage

Der Strahlengang wird zunächst so justiert, dass der Rohstrahl die Eingangsaperturen aller optischen Komponenten (Umlenkspiegel, Zoom-Aufweiter, AOM, 3D-Scansystem) möglichst zentral durchläuft (Abbildung 11).

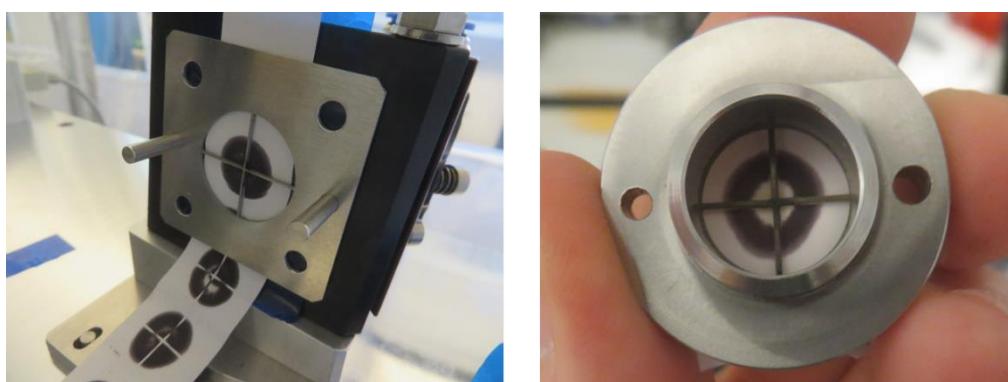


Abbildung 11: Verwendung von Thermopapier und Fadenkreuzen zur Justage des Strahlengangs

Die Feinjustage des Rohstrahlprofils erfolgt mithilfe eines Strahldiagnosegeräts und Justage des Auskoppelspiegels des 600 W-Lasers. Durch die Justage kann eine symmetrische Strahlform erzielt

werden. Die Strahlform weicht im Nahfeld von einer gaußförmigen LeistungsdichteVerteilung ab, da an allen Aperturen innerhalb des Resonators Strahlanteile gebeugt werden, welche Interferenzen in der LeistungsdichteVerteilung erzeugen [57]. Diese gebeugten Strahlanteile laufen jedoch aufgrund ihrer höheren Divergenz innerhalb von 5 m aus dem eigentlich gaußförmigen Strahlprofil heraus.

Höhere Beugungsordnungen

Während der Justage des AOM wurde festgestellt, dass neben der 0. und 1. Beugungsordnung auch ein Teil der Laserleistung (< 2,2 %) in die -1. und 2. Beugungsordnung abgelenkt wird (Abbildung 12). Im Falle von 400 W sind dies ca. 8 W, die bereits Schaden anrichten könnten. Daher wurden die -1. und 2. Beugungsordnung entsprechend abgeschirmt.

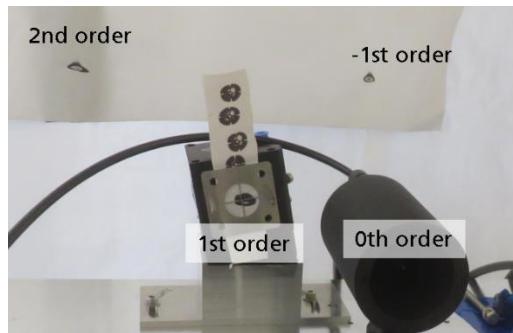


Abbildung 12: Verschiedene Beugungsordnungen des AOM

Justage des Top-Hat-Profil

Um die korrekte Funktionsweise des Strahlformers sicherzustellen, muss dieser verkippungs- und verschiebungsfrei im Strahlengang platziert werden. Die Justage erfolgt mit einem 5-Achs-Halter, der eine unabhängige Justage der Verkippung und Verschiebung ermöglicht. Abbildung 13 zeigt den Unterschied zwischen präzise justiertem Zustand (ganz rechts) und dejustiertem Zustand (links).

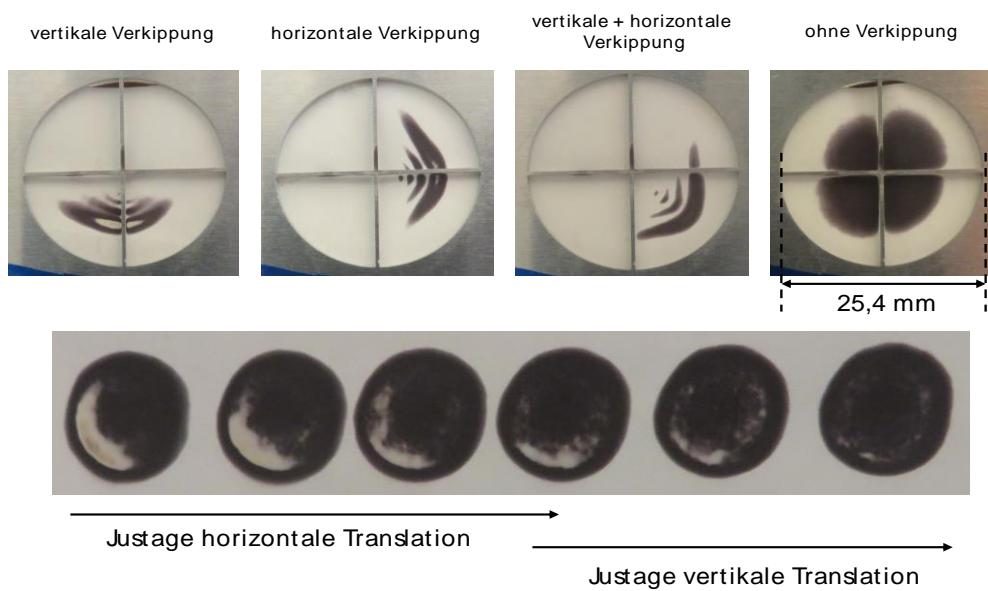


Abbildung 13: Justage des Strahlformers – mithilfe eines 5-Achs-Halters kann ein verkippungs- und verschiebungsfreier Zustand erzielt werden

Zeitliche Charakterisierung

Im Folgenden werden sowohl der 600 W-Laser als auch der AOM im Hinblick auf ihre Ein- und Ausschaltodynamik untersucht.

Charakterisierung des 600 W-Lasers

Da im Rahmen von AP A – Anforderungsermittlung eine kurze Rise- und Falltime < 100 µs gefordert wurde, soll der 600 W-Laser im Folgenden zeitlich charakterisiert werden. Hierzu wird das interne Leistungsmessgerät des 600 W-Lasers verwendet, das eine Messfrequenz von 25 kHz und somit eine zeitliche Auflösung von 40 µs bietet. Das Leistungsmessgerät wird mit Hilfe eines Digital-Oszilloskops ausgelesen. Zudem wird das LaserOn-Signal, mit dem die Pulsfrequenz gezielt eingestellt werden kann, aufgezeichnet.

Um die Rise- und Falltime zu untersuchen, wird das in Abbildung 14 dargestellte LaserOn-Signal (blaue Linie) verwendet. Dieses entspricht einer typischen Leistungsvorgabe beim Lasersintern – zunächst wird die Bauteilkontur belichtet (4 ms Block zu Beginn des Signals); anschließend wird nach einer kurzen Pause (300 ms) das Bauteilinnere in Form einzelner Scanvektoren (1 ms Blöcke) belichtet. Die Abbildung zeigt, dass sich das Laserleistungssignal unterscheidet, je nachdem ob die Gasentladung nach einer Ruhephase zum ersten Mal gezündet wird (Konturscan und erster Hatchvektor) oder ob die Gasentladung immer wieder rasch aufeinanderfolgend gezündet wird. Zu Beginn des Konturscans wird eine ca. 3-fache Leistungsüberhöhung festgestellt. Dies bedeutet, dass kurzzeitig ca. 1.800 W anstatt der beabsichtigten 600 W emittiert werden. Dies könnte zu einer punktuellen Materialschädigung führen und ist somit unerwünscht.

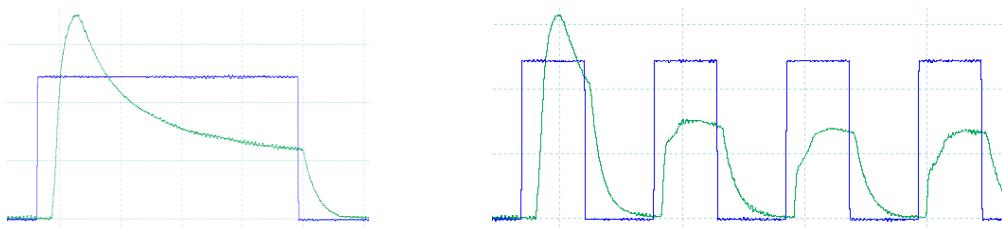


Abbildung 14: Soll- Ist-Vergleich bei 100 % Stromvorgabe

Darüber hinaus ist zu erkennen, dass die Einschaltverzögerung (zeitliche Differenz zwischen dem Anstieg des LaserOn-Signals und dem Anstieg des Laserleistungssignals) im Falle des Konturscans und des ersten Hatchvektors größer ist als im eingeschwungenen Zustand. Dies würde bei der Belichtung von Bauteilen dazu führen, dass der Anfang der Kontur bzw. des ersten Hatchvektors nicht vollständig belichtet würde.

Abbildung 15 zeigt das Ergebnis der Rise- und Falltime-Messung. Eine Rise- und Falltime von beispielsweise 400 µs würde bei einer typischen Scangeschwindigkeit von 5 m/s einer Belichtungsstrecke von 2 mm entsprechen. Diese Belichtungsstrecke würde im Falle der Risetime mit zu wenig Energie beaufschlagt. Im Falle der Falltime würden Bereiche belichtet, die gar nicht mehr zum Bauteil gehören. Dies würde die Bauteilqualität beeinträchtigen, so dass eine möglichst kleine Rise- und Falltime von < 100 µs angestrebt wird. Die vergleichsweise große Rise- und Falltime des 600 W-Lasers ist bauartbedingt, da es sich um einen längsgeströmten Gaslaser handelt. Die Geschwindigkeit mit der die etwa 2 m langen Gasentladungsrohren gezündet und abgeregelt werden unterliegt physikalischen Limitationen auf molekular-atomarer Ebene, die keine schnelleren Schaltzeiten zulassen. Da die Zeitdauer zur Zündung und Abregung der Gasentladung von der Stromvorgabe und somit von der Laserleistung abhängt, wurde die Rise- und Falltime für verschiedene Laserleistungen bestimmt.

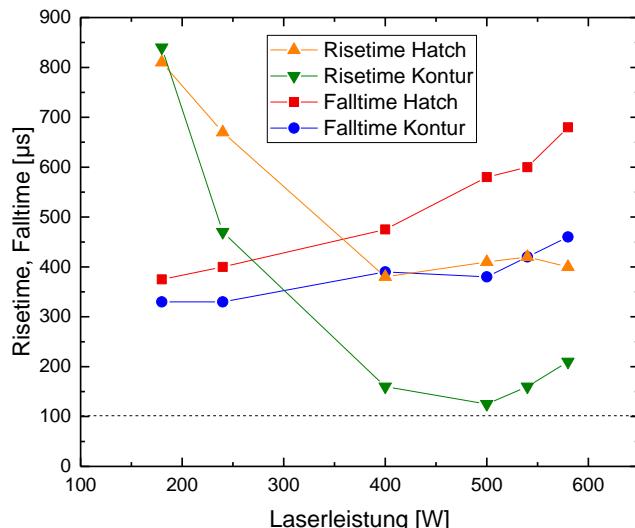


Abbildung 15: Ergebnis der Rise- und Falltime-Messung des 600 W CO₂-Lasers in Abhängigkeit der Laserleistung

Tendenziell wird die Risetime für große Laserleistungen kleiner und die Falltime wird größer. Dies war zu erwarten, da der Gasentladung zur Erzielung großer Laserleistungen mehr Pumpenergie zugeführt wird. Dies führt zu einer schnelleren Zündung und langsameren Abregung. Da die Rise- und Falltime im gesamten Leistungsbereich > 100 μ s ist, ist der 600 W CO₂-Laser nur bedingt für das Laser-Sintern geeignet. Daher wurde ein AOM in das Optiksystem integriert. Dieser ermöglicht das schnelle Schalten der Laserstrahlung während der 600 W CO₂-Laser im continuous wave Modus betrieben wird (d.h. nicht an- und ausgeschaltet wird).

Charakterisierung des AOM

Zur zeitlichen Charakterisierung des AOM wird ein Leistungsmesskopf mit einer zeitlichen Auflösung von 1,6 μ s verwendet. Die Rise- und Falltime des AOM beträgt ca. 11 μ s. Damit erfüllt der AOM die Forderung nach einer Rise- und Falltime < 100 μ s und ist sogar noch dynamischer als der 70 W-Laser. Die größere Dynamik wird in Abbildung 16 deutlich. Während die Laserleistung des 70 W-Lasers zwischen zwei Einschaltsignalen nicht mehr auf null abfällt, ist mit dem AOM ein vollständiges Ausschalten zwischen zwei Einschaltsignalen möglich.

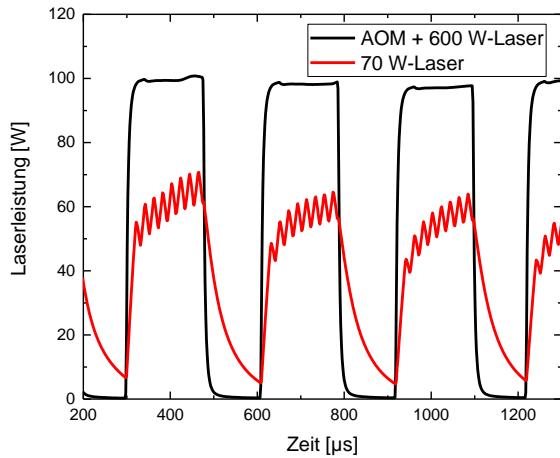


Abbildung 16: Zeitliche Charakterisierung des 70 W-Lasers sowie des AOM mit 600 W-Laser

Hierdurch wird ein noch präziserer Belichtungsvorgang möglich, der zu einer Steigerung der Bauteilqualität (z. B. geringere Oberflächenrauheit) führen könnte. Zudem ist zu erkennen, dass es sich bei dem 70 W-Laser, der standardmäßig in Lasersinter-Anlagen verwendet wird, um einen modulierten Laser handelt. Dies bedeutet, dass die mittlere Laserleistung dadurch gesteuert wird, dass der Laser schnell ein- und ausgeschaltet wird. Demgegenüber wird der 600 W-Laser im cw-Modus betrieben, so dass eine deutlich konstantere Ausgangsleistung erzielt werden kann. Darüber hinaus werden mit dem AOM Leistungsspitzen, die beim Einschalten von CO₂-Lasern entstehen können, vermieden. Hierdurch wird ebenfalls eine Steigerung der Bauteilqualität erwartet.

Leistungsdichteverteilung

Im Folgenden wird zunächst die Leistungsdichteverteilung des Rohstrahls bestimmt (d.h. bevor dieser durch das 3D-Scansystem fokussiert wird). Anschließend wird der Strahl nach der Fokussierung durch das 3D-Scansystem vermessen.

Die Vermessung des Rohstrahls vor dem AOM zeigt, dass sowohl die Leistungsdichteverteilung als auch der Laserstrahldurchmesser von der Laserleistung abhängen. Die Ursache hierfür liegt darin, dass es innerhalb des Strahlaufweiters #1, welcher aus drei ZnSe-Linsen besteht, zu einem thermischen Linseneffekt kommt. Dies bedeutet, dass bei großen Laserleistungen aufgrund der Abhängigkeit des Brechungsindex von der Temperatur eine Fokussierung des Laserstrahls erfolgt. In der Mitte des Strahls, wo die Intensität am größten ist, werden die Linsen am stärksten erwärmt, wodurch der Brechungsindex steigt. Somit sieht der zentrale Teil des Laserstrahls einen größeren Brechungsindex als der Randbereich. Dies entspricht genau einer Fokussierlinse, die im Zentrum dicker ist als an den Rändern und somit in der Mitte die größte Brechkraft aufweist.

Im vorliegenden Fall wurde der Strahldurchmesser mithilfe des Strahlaufweiters so eingestellt, dass dieser bei 400 W kleiner als 10,7 mm ist. Dies entspricht der Faustregel, dass der Strahl beim Durchgang durch eine Apertur ca. 1,5 x kleiner als die Apertur sein sollte, um Beugungseffekte zu vermeiden (hier: Eingangsapertur des AOM = 16 mm → 16/1,5 ~ 10,7).

Um den Einfluss des AOM auf die Strahlform zu untersuchen, wird die Leistungsdichteverteilung nach dem Durchlaufen des AOM erneut bestimmt. Abbildung 17 zeigt, dass bereits ab ca. 200 W eine Fokussierung des Strahls. Dies ist auf einen thermischen Linseneffekt bei hohen Laserleistungen zurückzuführen, der diesmal im Germanium-Kristall des AOM auftritt.

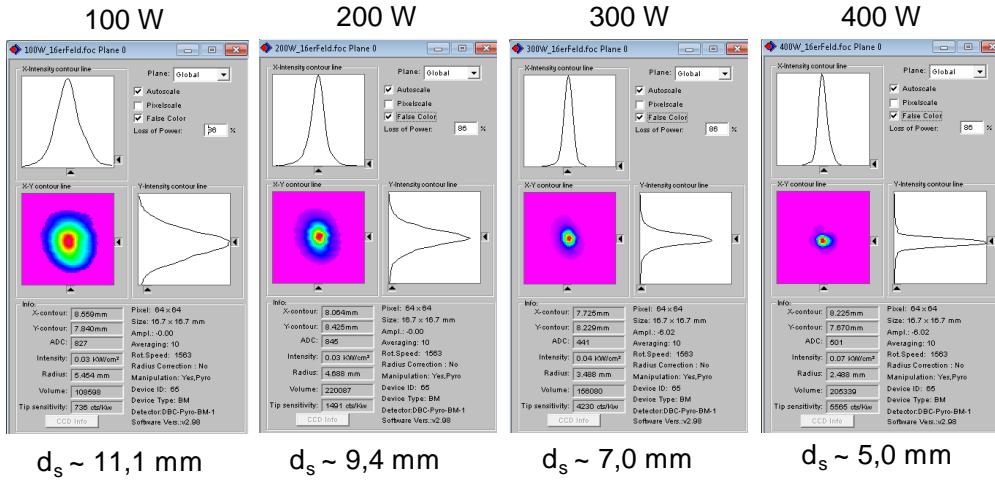


Abbildung 17: Vermessung der LeistungsdichteVerteilung der 0. Ordnung ca. 1 m nach dem Durchgang durch den AOM

Dieser thermische Linseneffekt ist in mehrerlei Hinsicht unerwünscht. Zum einen kann die Fokussierung des Strahls zur Zerstörung der Strahlalfe führen, falls die Zerstörschwelle des Materials überschritten wird. Zum anderen ist die Fokussierung nicht kontrollierbar und kann zur Degradation des Strahls führen. In Abbildung 17 wurde die 0. Beugungsordnung vermessen, d.h. jener Strahl der ungenutzt in der Strahlalfe absorbiert wird. Im Folgenden wird der Germanium-Kristall durch eine RF-Welle angeregt, so dass der Großteil der einfallenden Laserstrahlung (ca. 85 %) in die 1. Beugungsordnung umgelenkt wird.

In Abbildung 18 ist das Strahlprofil der 1. Beugungsordnung nach dem Durchgang durch den akustooptischen Modulator (AOM) für verschiedene Laserleistungen dargestellt. Während das Strahlprofil bei 200 W Laserausgangsleistung aufgrund seiner symmetrischen Gaußform als sehr gut bewertet werden kann, nimmt die Qualität ab 300 W deutlich ab (Bildung von Nebenmaxima/ Degradation des Strahls). Dies ist auf thermische Linseneffekte im Germanium-Kristall des AOM zurückzuführen, die trotz Wasserkühlung nicht verhindert werden können. Auch die Senkung der Kühlwassertemperatur von 18°C auf 10°C führte zu keiner signifikanten Verbesserung. Da durch die Anregung des Germanium-Kristalls durch die RF-Welle zusätzliche Wärmeenergie im Kristall deponiert wird, ist der thermische Linseneffekt ausgeprägter als für die 0. Ordnung. Daher kommt es nicht nur zu einer Fokussierung, sondern zu einer Zerstörung des Strahlprofils. Daher kann das Optiksystem mit AOM nur bis maximal 200 W Laserausgangsleistung sinnvoll betrieben werden.

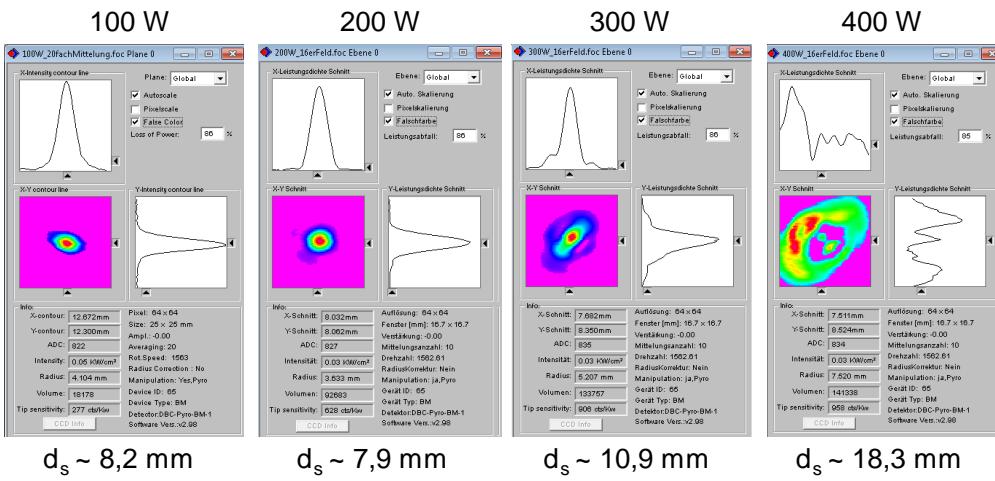


Abbildung 18: Vermessung der Leistungsdichteverteilung der 1. Ordnung nach dem Durchgang der Laserstrahlung durch den AOM

Fokussierter Strahl nach dem 3D-Scansystem

Im Folgenden wird der Laserstrahl nach dem Durchlaufen des 3D-Scansystems vermessen. Hierzu wird der Laserstrahl innerhalb eines gewissen Bereichs um die Fokusebene (z. B. 40 mm) in mehreren Ebenen vermessen. Das Ergebnis einer solchen Kaustikmessung ist in Abbildung 19 dargestellt. Die Messung ermöglicht die exakte Lokalisation der Fokusebene, so dass sichergestellt werden kann, dass die Fokusebene mit der Pulverbettelbene übereinstimmt.

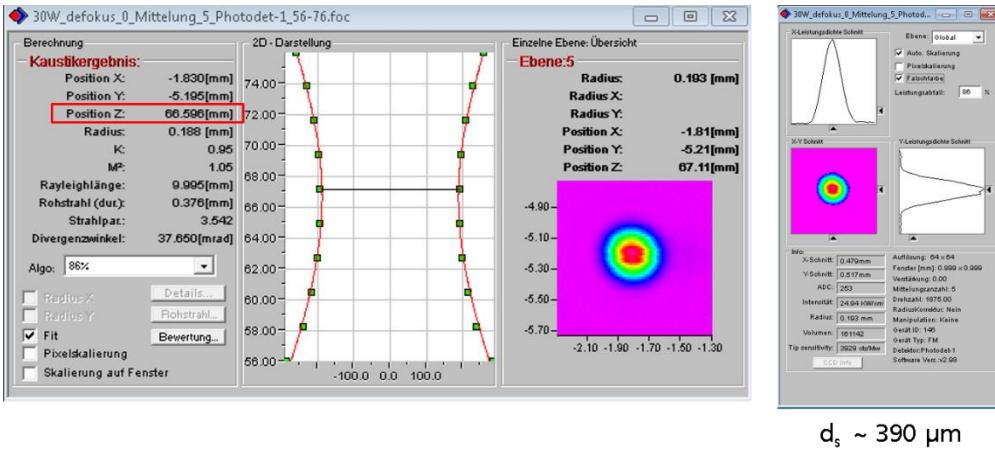


Abbildung 19: Beispiel einer Kaustikmessung zur Bestimmung der Lage der Fokusebene sowie des Fokusdurchmessers d_s

Die Laserstrahlkaustik in Abhängigkeit der Laserleistung lässt erkennen, dass sich die Fokuslage mit steigender Laserleistung um wenige Millimeter (ca. 7 mm) nach oben verschiebt. Der Laserstrahldurchmesser ist annähernd konstant (370–390 μm). Dieses Ergebnis ist typisch, da sich bei hohen Laserleistungen auch in der Fokussieroptik eine thermische Linse ausbilden kann. Aufgrund des annähernd konstanten Strahldurchmessers ist hierdurch jedoch keine Einschränkung der Bearbeitungsqualität zu erwarten. Die Messung wurde zu Vergleichszwecken ohne AOM durchgeführt. Es zeigt sich, dass bei Verwendung des AOMs ein deutlich größerer Einfluss der Laserleistung auf die Fokuslage und -größe besteht. Dies ist auf die thermische Linse innerhalb des Germanium-Kristalls des

AOMs zurückzuführen, die einen wesentlich größeren Einfluss auf die Strahlkaustik hat als die thermischen Linsen in den übrigen Komponenten (Strahlaufweiter, Fokussieroptik).

Das Ergebnis zeigt, dass die Eingangsleistung, die auf dem AOM lastet, konstant gehalten werden sollte. Nur so kann eine definierte Fokusposition und Größe erzielt werden. Zudem erscheint der Betrieb des Systems mit zwei definierten AOM-Eingangsleistungen sinnvoll: Mit kleiner Laserleistung (< 100 W) kann ein kleiner Fokusdurchmesser von ca. 470 µm erzielt werden, der eine hohe Detailauflösung ermöglicht. Damit kann die Anforderung von 450 µm nahezu erfüllt werden. Bei großer Laserleistung (200 W) steht zwar mehr Leistung zur Verfügung, was wichtig für die angestrebte Produktivitätssteigerung ist, allerdings wird auch die Detailauflösung durch den größeren Fokusdurchmesser von ca. 760 µm eingeschränkt. Dies liegt daran, dass der Rohstrahl durch die einsetzende thermische Linse des AOM bereits vor dem 3D-Scansystem fokussiert wird. Somit ist der Eingangsstrahl in das 3D-Scansystem kleiner, was zu einem größeren Fokusdurchmesser führt. Bei noch größerer Laserleistung (300 W) treten weitere Effekte auf, die auf die Degradation des Strahlprofils zurückzuführen sind. Da die Verwendung von Laserleistungen > 200 W nicht sinnvoll ist (vgl. Abbildung 18), wird hierauf nicht weiter eingegangen.

Variabler Laserstrahldurchmesser

Mithilfe des 3D-Scansystems kann die Fokusebene in gewissen Grenzen verschoben werden. Dies wird durch die Verschiebung einer Fokussierlinse realisiert, wodurch die effektive Brennweite des Systems verändert wird. Da die Position der Pulverbettalebene feststeht, führt die Änderung der Brennweite zu einer Defokussierung und somit zu einer Vergrößerung des Strahldurchmessers in der Pulverbettalebene. Die Messung ohne AOM zeigt, dass der Laserstrahldurchmesser zwischen ca. 450 µm und 3 mm variiert werden kann. Die Einstellung kann nahezu stufenlos erfolgen.

Im Rahmen der Anforderungsermittlung wurde ein Laserstrahldurchmesser von bis zu 5 mm gefordert. Dieser Wert wurde nach Auslegung des 3D-Scansystems auf 4,3 mm eingeschränkt und beträgt real gemessen 3 mm. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei der Auslegung des 3D-Scansystems ein Eingangsstrahldurchmesser von ca. 12 mm vom Hersteller zu Grunde gelegt wurde. Dieser Wert ist jedoch unrealistisch, da die Eingangsapertur des 3D-Scansystems nur 14 mm beträgt. Daher sollte der Laserstrahldurchmesser nicht größer als ca. 14/1,5 = 9,3 mm sein, um signifikante Leistungsverluste zu vermeiden. Dieser kleinere Eingangsstrahldurchmesser führt dazu, dass der maximal durch Defokussierung erzielbare Strahldurchmesser 3 mm statt 4,3 mm beträgt.

Defokus

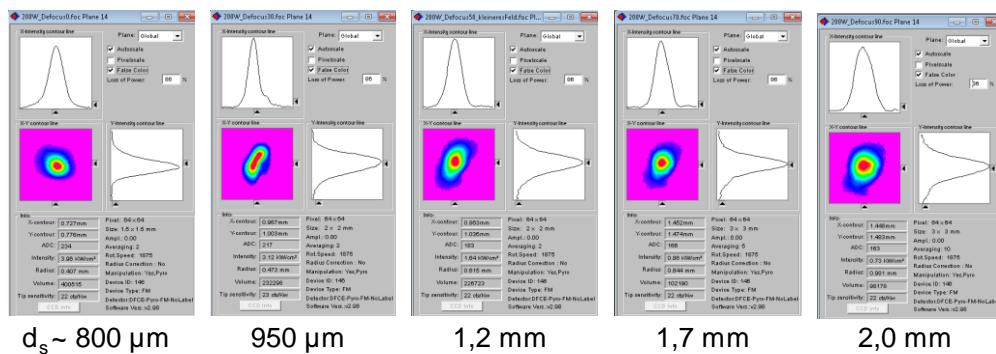


Abbildung 20: Einstellung unterschiedlicher Strahldurchmesser durch Defokussieren unter Verwendung des AOM

Mit Verwendung des AOM wird der maximal erzielbare Laserstrahldurchmesser weiter eingeschränkt (vgl. Abbildung 20). Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Eingangsstrahldurchmesser beim Eingang in das 3D-Scansystem aufgrund der thermischen Linsenwirkung des AOM kleiner ist als ursprünglich angestrebt (ca. 7 vs. 9 mm). Dies führt dazu, dass der maximal nutzbare Strahldurchmesser mit AOM auf ca. 2,0 mm begrenzt ist. Zudem ist ersichtlich, dass das Strahlprofil bei gewissen Zwischenstufen von einer ideal gaußförmigen Verteilung abweicht. Dies ist auf die einsetzende Degradation des Strahls aufgrund der thermischen Linse zurückzuführen.

Variable LeistungsdichteVerteilung

In Abbildung 21 sind verschiedene Strahlprofile dargestellt, die mit dem Optiksystem realisiert werden können (Gauß-, Top-Hat- und Linien-Profil).

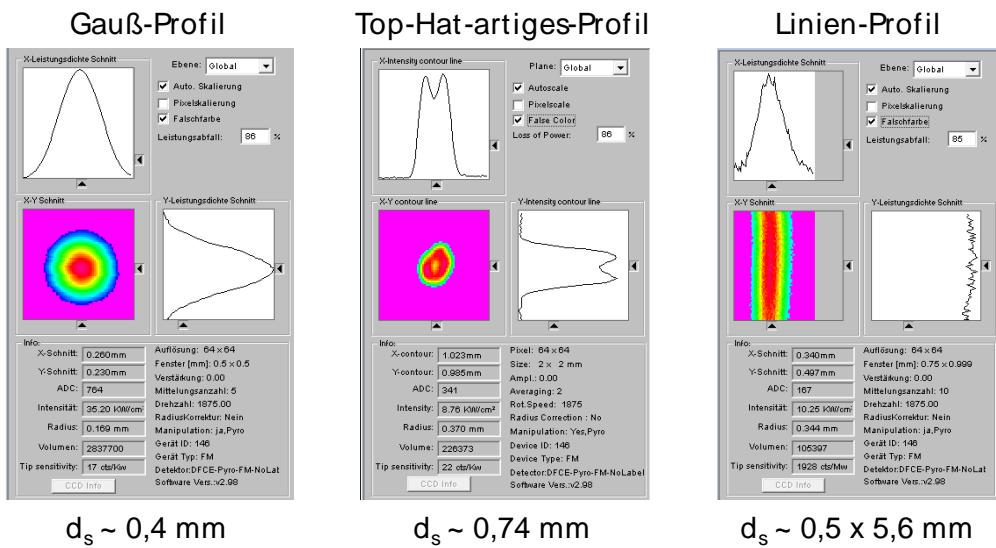


Abbildung 21: Verschiedene mit dem Optiksystem realisierbare Strahlprofile mit Strahlabmessung d_s

Das Top-Hat-artige Profil wurde nicht wie ursprünglich geplant mit dem Strahlformer realisiert. Zwar konnte mit dem Strahlformer ein Rohstrahl mit Top-Hat-Profil erzeugt werden, dieser Rohstrahl konnte jedoch nicht zufriedenstellend durch das 3D-Scansystem abgebildet werden. Die Ursache hierfür ist vermutlich, dass Teile des Rohstrahls an der Eintrittsblende des 3D-Scansystems abgeschnitten werden. Während dies bei gaußförmiger Intensitätsverteilung nicht nachteilig ist, fehlen diese Strahlanteile jedoch bei der Abbildung des Top-Hat-förmigen Profils. Daher wurde nach Rücksprache mit den Projektpartnern ein Top-Hat-artiges Profil durch gezieltes Defokussieren bei Verwendung des AOM realisiert. In diesem Fall ist die thermische Linsenwirkung vorteilhaft und führt zur Erzeugung des Top-Hat-artigen Profils. Das Linien-Profil mit Abmessungen von ca. 0,5 mm x 5,6 mm kann durch manuelles Einsetzen des anamorphen Teleskops in den Strahlengang realisiert werden.

Effizienz

Die Effizienz des Optiksystems beträgt ohne AOM ca. 87 % und mit AOM ca. 70 %. Die Verluste entstehen zum einen an den Spiegeln, die einen Reflektionsgrad von ca. 99 % aufweisen sowie in den ZnSe-Linsen der Strahlaufweiter sowie des 3D-Scansystems. Im Falle des AOM entstehen zusätzlich Verluste durch Absorption im Germanium-Kristall und durch die limitierte Beugungseffizienz.

Aufgrund der Effizienz von 87 % und der maximalen Ausgangsleistung des 600 W-Lasers von ca. 580 W, kann mit dem System ohne AOM eine maximale Nutzleistung von ca. 500 W zur Verfügung gestellt werden.

Aufgrund der Limitation der Laserleistung auf max. 200 W und der Effizienz von 70 % ist die maximale Nutzleistung bei Verwendung des AOM auf ca. 140 W begrenzt.

Laserleistung

Die Laserleistungskennlinie des 600 W-Lasers zeigt, dass eine maximale Ausgangsleistung von ca. 580 W erreicht wird. Die volle Nennleistung von 600 W wird nicht mehr erreicht, da es sich bei dem verwendeten Laser um ein Gebrauchtsystem mit ca. 10 Betriebsjahren handelt.

Über die RF-Leistung (akustische Welle), die in den Germaniumkristall des AOM eingekoppelt wird, kann der Anteil der Laserstrahlung, der in die 1. Beugungsordnung abgelenkt wird, eingestellt werden (vgl. Abbildung 22). Durch die RF-Leistung kann die Ausgeprägtheit des Beugungsgitters gesteuert werden und somit die Beugungseffizienz.

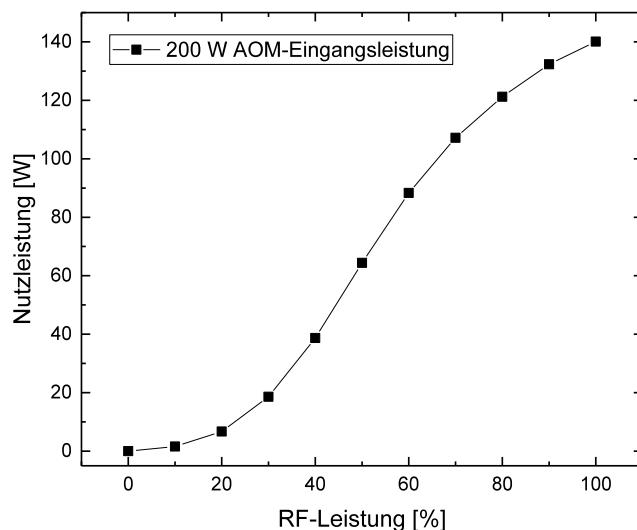


Abbildung 22: Leistungskennlinie des Optiksystems mit AOM

Diese Leistungskennlinie kann auf dem Steuerungs-PC hinterlegt werden, und zur Einstellung der gewünschten Nutzleistung verwendet werden. Da eine stufenlose Einstellung auch kleiner Laserleistungen möglich ist, kann bei Nutzung des AOM auf ein Umschalten zwischen 70 W- und 600 W-Laser mittels Strahlweiche verzichtet werden.

Warm-up Verhalten und Leistungsstabilität

Nach dem Einschalten des Optiksystems (Kühlkreisläufe, Laser, 3D-Scansystem, AOM, etc.) wird ein ca. 30-minütiges Warmlaufen des Systems empfohlen. In den ersten Minuten nach dem Systemstart unterliegt die Nutzleistung signifikanten Schwankungen. Insofern die 30-minütige Thermalisierungsdauer berücksichtigt wird, ist die Leistungsstabilität des Systems sehr hoch (ca. 0,3 % Standardabweichung und 1,7 % absolute Leistungsschwankung innerhalb von 30 Minuten). Die verbleibenden periodischen Leistungsschwankungen sind vernachlässigbar klein und auf Schwankungen der Kühlwassertemperatur zurückzuführen.

Zusammenfassung

In Abbildung 23 ist zusammenfassend ein Abgleich der finalen Systemeigenschaften mit den ursprünglich formulierten Anforderungen dargestellt. Es ist gelungen, die Anforderungen in weiten Teilen erfolgreich zu erfüllen. Teilweise haben physikalische Limitationen (insbesondere thermische Linseneffekte) dazu geführt, dass die Zielgrößen nicht vollständig erreicht werden konnten. Die thermischen Linseneffekte konnten im Vorfeld nicht durch Simulationen berücksichtigt werden, da vom Hersteller kein Blackbox-Modell für den akustooptischen Modulator zur Verfügung gestellt werden konnte.

| Eigenschaft | Anforderung | Realisiert |
|--|------------------------------------|---|
| Wellenlänge λ | 10,6 µm | 10,6 µm |
| Max. Laserleistung P_{\max} | 600 W | 500 W ohne AOM 140 W mit AOM |
| Min. Laserleistung P_{\min} | 5 W | 5 W |
| Umschaltzeit zwischen großer (>70 W) und kleiner Laserleistung | < 0,5 s | 0,2 s mit Strahlweiche < 0,1 s mit AOM |
| Rise- und Falltime der Laserstrahlung | < 100 µs | < 11 µs mit AOM < 800 µs ohne AOM |
| Variabler Fokussdurchmesser (1/e² für Gauß LDV) | 0,45–5 mm | 0,46–3 mm ohne AOM 0,47–2 mm mit AOM |
| Variable LeistungsdichteVerteilung (LDV) | Gauß Tophat Linienverteilung | Gauß Tophat-artig Linienverteilung |
| Bildfeldgröße | 320 x 320 mm | 320 x 320 mm |
| Arbeitsabstand | > 380 mm | 380 mm |
| Dynamik | Mindestens 3 m/s | ca. 4 m/s |

Abbildung 23: Abgleich der Systemeigenschaften mit den formulierten Anforderungen

Zusammenfassend können mit dem Optiksystem verschiedene Gauß-Strahldurchmesser sowie unterschiedliche Strahlprofile (Gauß-, Top-Hat, Linienprofil) realisiert werden. Hierdurch wurde die Basis für eine Steigerung der Produktivität des Lasersinterns geschaffen. Auf Basis der in Abbildung 23 zusammengefassten Systemeigenschaften kann folgender Entwicklungsbedarf für die Industrie abgeleitet werden:

- Entwicklung schnell schaltbarer Hochleistungs-CO₂-Laser mit Laserleistung > 400 W und Rise- und Falltime < 100 µs
- Minimierung thermischer Linseneffekte in akustooptischen Modulatoren für Hochleistungs-CO₂-Laser > 200 W
- Entwicklung von 3D-Scansystemen mit größerem Defokussierbereich.

AP C Prozessüberwachung

Federführung: K+K - Wissenstransfer GmbH & Co. KG, Köln
Co-Federführung: InfraTec GmbH, Dresden

In dem ersten Arbeitspaket wurden Anforderungen an den Messaufbau bzgl. der Wärmebildkamera analysiert.

Die Temperaturen des Messobjektes liegen bei ca. 150 – 320 °C. Dabei wird ein Phasenübergang von Feststoff zur Schmelze beobachtet. Die Prozesskammer selbst wird auf ca. 167 °C aufgeheizt und mit möglichst konstanter Temperatur betrieben. Die Messgenauigkeit sollte möglichst nahe der Genauigkeit der Lasersinteranlage liegen, welche mit einer Einzelpur bei bislang ca. 50 µm liegt. Als Strahlquelle wird ein CO₂-Laser mit einer Wellenlänge von 10,6 µm und einer anvisierten Ausgangsleistung von bis zu 600 W verwendet.

Diese Rahmenbedingungen führen zu besonderen Anforderungen, die es in den Nachfolgenden AP zu beachten gilt.

AP C.1 Auswahl Kamera

Für den Bereich der Messtemperatur sind sowohl mittelwellige als auch langwellige Wärmebildkameras geeignet. Mit einer mittelwelligen IR-Kamera im Wellenlängenbereich von 2,0 ... 5,5 µm wurden bereits Voruntersuchungen gemacht. Diese IR-Kamera verfügt über eine aktive Kühlung des Detektors. Aufgrund der Parameter Baugröße, geringe Standzeiten des integrierten Kühlers aber auch des Kamerapreises kann auf diesen Kameratyp für eine Anwendung in dem Zielsystem und unter Produktionsbedingungen nicht zurückgegriffen werden.

Außer der geometrischen Auflösung beeinflusst die Anzahl der Bildpixel die mit einer Thermografiekamera erreichbare Qualität – genauer gesagt die Detailliertheit – des Thermobildes. Grund hierfür ist, dass ausreichend viele Bildpunkte auf das Objekt entfallen müssen, um dessen Form und Struktur erkennen zu können – die gleiche Situation, wie wir sie bei der digitalen Fotografie gewöhnt sind. Es ist daher leicht zu verstehen, dass bei höherer Pixelzahl entweder die gegebene Objektoberfläche detaillierter oder aber eine größere Objektfäche mit gleichbleibender Detailliertheit aufgenommen werden kann.

Besitzt eine Thermografiekamera nur wenige Bildpunkte, sind zur Erreichung entsprechender Detailliertheit viele kleinflächige Aufnahmen anzufertigen, welche danach zur Dokumentation oder Berichterstellung zu montieren sind. Dies ist insbesondere dann unumgänglich, wenn zur Auswertung ein Überblick über die gesamte Objektoberfläche (z. B. längere Wohnblöcke, ausgedehnte Leiterplatten, größere Maschinengruppen, Trockenöfen etc.) notwendig ist.

Die Anzahl der Pixel ist im Falle von Thermografie-Kameras ein ausgesprochen wesentlicher Parameter. Während wir bei digitalen Fotoapparaten über Auflösungen von mehr als 10 Megapixel sprechen, geht es bei thermografischen Messsystemen typischerweise um 320 x 240 (76.800), 384 x 288 (110.592) oder 640 x 480 (307.200) Bildpunkte. LowCost-IR-Kameras besitzen sogar gerade einmal 160 x 120 (somit nur 19.200) Bildpunkte, mit welchen daher also nur ausgesprochen kleine Objektfächen mit ausreichender Detailliertheit gemessen und dargestellt werden können. Dies schränkt die Anwendungsgebiete solcher Kameras trotz ihres niedrigen Preises stark ein, da mit weit höherem Mess- und Auswerteaufwand kalkuliert werden muss.

Dank der rasanten Entwicklung der Detektortechnologien sind heute Thermografie-Kameras mit (1.024 x 768) bzw. (1.280 x 1.024) IR-Bildpunkten erhältlich, welche diese Auflösung sogar mit bis zu 100 Hz Aufnahmefrequenz bieten.

Speziell unter der Maßgabe eines Dauereinsatzes in einer Produktion wurde der Typ einer Mikrobolometerkamera mit einem zweidimensionalem Focal Plane Array zurückgegriffen. Die Kameras sind mit einer Auflösung des Focal Plane Array von bis zu 1024 x 768 Pixel verfügbar. Über eine zusätzliche opto-mechanische Einrichtung in der Kamera kann die Auflösung vervierfacht werden.

Damit ergab sich für die ausgewählte Wärmebildkamera folgende technische Spezifikation:

Tabelle 2: Spezifikationen der Kamera

| | |
|---|--|
| Spektralbereich | (7,5 ... 14) µm |
| Detektortyp, Detektorformat (IR-Pixel) | Ungekühltes Mikrobolometer Focal Plane Array (1.024 x 768), opto-mechanisches MicroScan auf (2.048 x 1.536) |
| Temperaturmessbereich | (-40 ... 1.200) °C, optional > 2.000 °C |
| Messgenauigkeit | ± 1,5 °C oder ± 1,5 %, optional ± 1 °C oder ± 1 % |
| Temperaturauflösung bei 30 °C | Besser als 0,05 K, optional < 0,03 K |
| IR-Bildfrequenz | 30 Hz (Vollbild) / 60 Hz (640 x 480) / 120 Hz (384 x 288) / 240 Hz (1.024 x 96) |
| Objektive (Bildfeld) | 1.0/15 mm (60 x 47)° Weitwinkelobjektiv 1.0/30 mm (32 x 24)° Standardobjektiv 1.0/60 mm (16 x 12)° Teleobjektiv |
| Bildspeicherung | GigE-Vision bis 240 Hz, interner Echtzeitspeicher |
| A/D-Wandlung | 16 Bit |
| Schnittstellen | GigE-Vision, DVI-D, C-Video, RS232, Trigger |
| Stromversorgung | Netzadapter |
| Arbeits-, Lagertemperaturbereich | (-25 ... 50) °C, (-40 ... 70) °C |
| Schutzgrad | IP54, IEC 529 |
| Stoß-, Vibrationsbelastbarkeit Betrieb | im 25 G (IEC 68 - 2 - 29), 2 G (IEC 68 - 2 - 6) |
| Abmessungen | (210 x 125 x 155) mm |
| Gewicht (Vollausstattung) | 1,7 kg (Komplettausstattung) |
| Automatikfunktionen | Autofokus, permanenter Autofokus, automatische Entfernungsanzeige, abstandsabhängige Berechnung der zulässigen Pixelgröße, Autoimage, Autolevel, Min./Max., alarmgesteuerte Bildspeicherung |
| Messfunktionen | 8 frei wählbare, bewegliche Messfelder / -punkte, automatische Hot-/Cold-Spot-Anzeige, global und innerhalb definierter Messfelder, Differenztemperaturmessung: zeitlich/örtlich, Temperaturprofil, Histogramm, Differenzbild, Isothermdarstellung |

AP C.2 Integrationsmöglichkeiten

In einem ersten Schritt wurde eine Unterbringung der Wärmebildkamera im Bauraum der Sinteranlage geprüft. Sowohl aus Gründen der Baugröße der Kamera als auch der Temperaturverhältnisse im Bauraum wurde diese Variante verworfen.

In einem weiteren Schritt wurde als Alternative eine Anbringung der Kamera außerhalb des Bauraumes geprüft. Dazu befindet sich eine Öffnung nahezu parallel zum Laser oberhalb des Bauraumes. Nach einer ersten Prüfung der grundsätzlichen Verwendbarkeit wurden vor allem die geometrischen Abbildungsverhältnisse geprüft.

Aus diesen messtechnischen Anforderungen ergeben sich Anforderungen an den messtechnischen Aufbau der Gesamtanlage.

Zum mechanischen Aufbau wurden konstruktive Arbeiten durchgeführt, um in der jeweiligen Versuchsanordnung an der Lasersinteranlage einen mechanisch stabilen Aufbau zu gewährleisten.

Dabei mussten Analysen, Berechnungen und Versuche durchgeführt werden, um den Einfluss von Vibration und thermische Einflüsse auf die jeweiligen Messungen zu berücksichtigen.

Die folgenden Grafiken in Abbildung 24 zeigen die Anordnung und Projektion der IR-Kamera an der Laser-Sinter-Anlage.

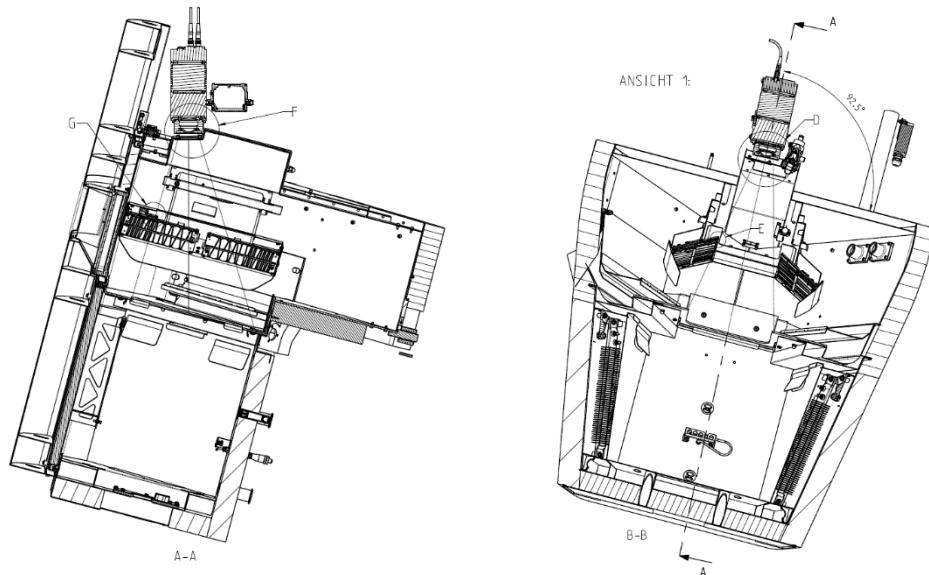


Abbildung 24: Konstruktive Integration in die Formiga P100

Die Integrationsmöglichkeiten wurden ebenfalls vor Ort an einer Formiga P110 überprüft. Hierbei konnte sichergestellt werden, dass alle Annahmen aus der Konstruktion in ein reales Konzept übernommen werden können.



Abbildung 25: Integrationsmöglichkeiten für die Thermografie Prozessüberwachung

Damit konnte die Auswahl des Messsystems und dessen mechanische Integration abgeschlossen werden.

AP C.3 Auslegung

Neben dem thermischen hat das geometrische Auflösungsvermögen erheblichen Einfluss auf die mit einem Thermografie-Gerät erzielbare Bildqualität. Der Parameter IFOV - "Instantaneous Field of View" (augenblickliches Bildfeld) - beschreibt jenen Raumwinkel, der von einem einzigen Bildpunkt erfasst wird. Um eine gute Wiedergabe von Details und eine korrekte Temperaturmessung zu erreichen, muss dieser Wert möglichst klein sein. Beispielsweise besagt ein Wert von 1,5 mrad, dass bei 1 m Objektentfernung der jedem Pixel zugeordnete Einzelmessfleck einen Durchmesser von 1,5 mm aufweist. Es muss beachtet werden, dass dieser Wert abhängig ist von der verwendeten Optik, also bei Thermografie-Systemen mit Wechselobjektiven keinen konstanten kameraspezifischen Parameter darstellt! Aus diesen theoretischen Ableitungen ergeben sich für die im Projekt verwendete Anordnung bislang folgende Parameter:

Bildfeld (Scanfeld) 320 x 320 mm

min. Messabstand (Laserabstand) 440 mm

berechneter Öffnungswinkel (max.) 42,6°

Der maximale Abstand des Objektivs zum Meßobjekt betrug 550 mm und die maximale Bauteilbreite 320 mm. Daraus resultierte ein minimaler Öffnungswinkel des Objektivs von ca. 32°. Um eine größtmögliche geometrische Auflösung zu erzielen, sollte eine Kamera mit höchstmöglicher Pixelauflösung in dem anvisierten Wellenlängenbereich zu Einsatz kommen. Damit ergab sich eine mögliche Hardwarekonfiguration mit der IR-Kamera VarioCAM HD. Diese verfügt über eine geometrische Auflösung von 1.024 Pixel, welche sich optisch durch die Funktion „resolution enhancement“ vervierfachen ließ. Für diese Kamera standen verschiedene Optiken zur Verfügung.

Tabelle 3: Objektiv-Auswahl

| Detektorformat (IR-Pixel) | (640 x 480) | (1.240 x 768) |
|---------------------------|-----------------|--------------------------------|
| Objektiv | Brennweite (mm) | FOV (°) |
| Super-Weitwinkelobjektiv | 7,5 | (93,7 x 77,3) (98,5 x 82,1) |
| Weitwinkelobjektiv | 15 | (56,1 x 43,6) (60,3 x 47,0) |
| Normalobjektiv | 30 | (29,9 x 22,6) (32,4 x 25,6) |
| Teleobjektiv | 60 | (15,2 x 11,4) (16,5 x 12,4) |
| Teleobjektiv | 120 | (7,6 x 5,7) (8,3 x 6,2) |

Als optimal erwies sich eine Optik mit einer Brennweite von 30mm. Diese besitzt einen Öffnungswinkel von ca. 32 x 25°. Somit konnte der Bauraum nahezu flächendeckend messtechnisch erfasst werden.

AP C.4 Messstabilität

Für die Prozessüberwachung in der Laser-Sinteranlage wird ein Thermografie-Kamerasystem installiert, welches die Temperaturverteilung unmittelbar nach einem Schichtauftrag erfasst. Für Versuche wurde eine EOS Formiga P110 verwendet. Die aus dem Thermografie-Bild abgeleiteten Informationen werden hinsichtlich ihrer Eignung zur Prozesssteuerung diskutiert. Zum Schutz der Thermografiekamera vor Laserstrahlung ist vor dieser ein Shutter montiert.

Der Shutter besteht aus einer mechanischen Blende und wird über einen Mikroprozessor gesteuert. Das Steuerprogramm für den Shutter erhält Signale von der Laser-Sinter-Anlage, um den Aufnahmevergang für die Thermokamera zu starten und zu stoppen. Nach Einbau des Shutters wird die Thermokamera senkrecht zum Bauraum installiert und an die Steuerung der Formiga angeschlossen (Abbildung 26).



Abbildung 26: Integriertes Messsystem

Um mit der Thermografiekamera in die Prozesskammer schauen zu können, wurde ein ZnSn-Fenster eingesetzt und der Freiblasungsstrom des Laserwindows umgelenkt, um auch dieses Fenster vor Ablagerungen zu schützen (vgl. Abbildung 27). So kann ein konstantes Ergebnis über einen kompletten Baujob erreicht werden.



Abbildung 27: Ansicht der Schutzfenster

In einem ersten Versuchsaufbau wird die Kamera auf eine Bildaufnahmefrequenz von 30 Hz eingestellt und in Dauerbetrieb gesetzt.

Sind Thermografiekamera und Shutter nicht synchronisiert wird der Bauraum durch den Shutter verdeckt (Abbildung 28). Der aus den Thermografie-Bildern errechnete Temperaturverlauf der ersten sieben Testmessungen ist in Abbildung 29 dargestellt. Damit ist die Schnittstelle Lasersintermaschine - Shutter – Thermografiekamera für Einzel und Dauermessung geprüft.

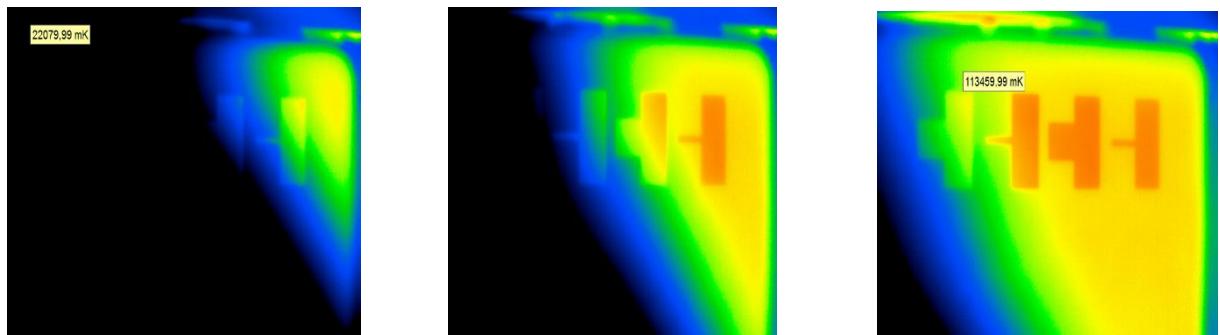


Abbildung 28: Ableich Formiga-Shutter-Thermografiekamera

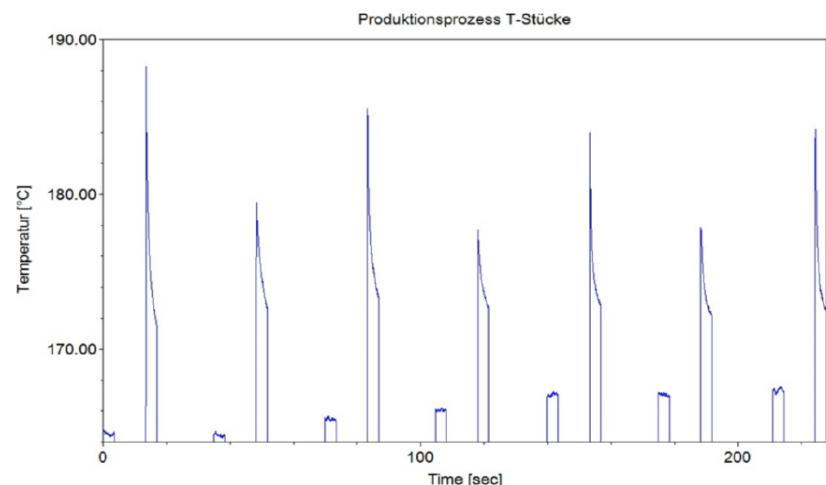


Abbildung 29: Bei geöffnetem Shutter werden die Peaks gemessen, die den Temperaturverlauf der Bauteile wiedergeben

Durch verschiedene Öffnungsduern des Shutters kann nun das Abkühlverhalten der Schmelze untersucht werden. Beispielhaft ist in Abbildung 30 ist der zeitliche Verlauf der maximalen und minimalen Temperatur über die erste und zweite Belichtung über die Messstrecken dargestellt.

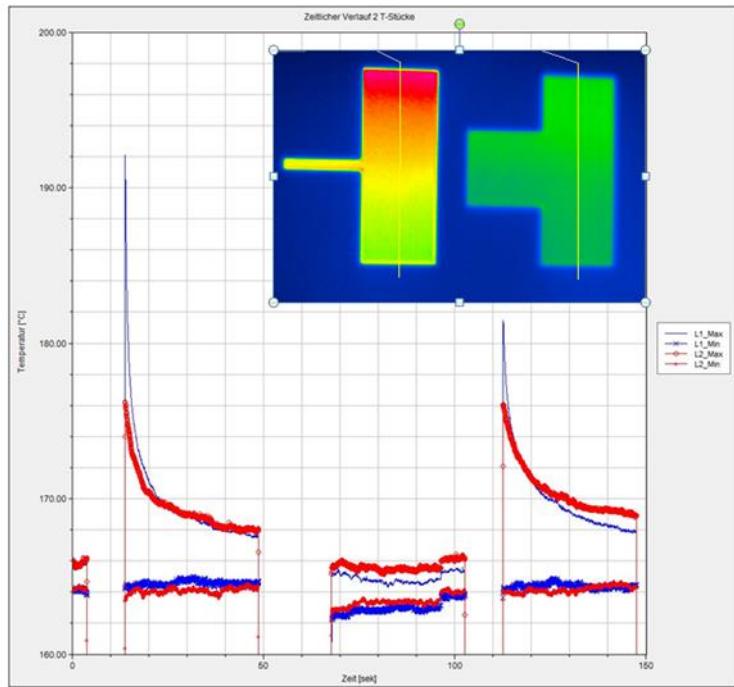


Abbildung 30: Temperatur-Zeit Diagramm; rote Linie rechtes Bauteil, blaue Linie linkes Bauteil; zu sehen sind 3 Shutteröffnungen: nach erster Belichtung, nach Beschichtung, nach 2. Belichtung

Für eine Prozessüberwachung mittels Thermografiekamera, die den Prozess nicht beeinflusst, darf der Shutter nur kurz geöffnet werden und ein einzelnes Thermogramm aufgenommen werden.

Um dieses Thermogramm verarbeiten zu können, muss das Bild von Störgrößen befreit und zeitlich homogenisiert werden.

AP C.5 Integration

Für die Integration der Thermografiekamera in den richtigen Ablauf der Lasersintermaschine ist diese an einen eigens entwickelten externen Rechner angeschlossen. Dieser Rechner ist mit der gleichen „Handshake-Logik“ wie am Versuchsstand der Universität Duisburg-Essen mit der Lasersintermaschine verbunden. Von dort wird sowohl der Shutter als auch die Thermografiekamera angesteuert.

So konnte im Versuchsaufbau folgender Ablauf implementiert werden:

1. Schichtauftrag und Ausheizen der Schicht
2. Belichtung
3. Shutter öffnet sich
4. Thermografiekamera nimmt Bild auf
5. Shutter wird geschlossen
6. Nächste Schicht

Das in diesem Ablauf aufgenommene Bild kann nun in der Software der Thermografiekamera bearbeitet, von Störgrößen befreit und anschließend interpretiert werden.

Mit dieser implementierten Lösung kann eine Prozessüberwachung im Lasersinterprozess durchgeführt werden.

AP C.6 Eingriffsgrenzen

Für die Thermografie-Bilder der Bauraumoberfläche stellt sich die Frage, wie kann die gewonnene detaillierte Information über die Temperaturverteilung in nutzbare Klassen und angemessene Maßnahmen zur Prozesssteuerung überführt werden?

Herkömmliche Verfahren der Bildverarbeitung (z.B. Kantendetektion) eignen sich bei Infrarotaufnahmen bei geringem Temperaturunterschied wegen dem geringen Kontrast weniger gut, die Anwendung von Filtern zur Bildoptimierung sind rechenintensiv und bringen keinen nutzbaren Informationsgewinn.

Für die auf der Bildgebung basierenden Daten wird hier im Weiteren ein Verfahren zur Mustererkennung/ Klassifizierung aus dem Bereich Machine Learning (ML) angewandt, um Aussagen über den Zustand der Bauraumoberfläche und den vorhandenen Bildern treffen zu können:

- hat eine Bauteilbelichtung stattgefunden,
- wie viele Bauteile sind in Arbeit,
- stimmt der Temperaturverlauf und
- treten hohe Temperaturgradienten auf.

Bei der überwachten Klassifizierung bringt der Beobachter Kenntnisse des zu untersuchenden Prozesses in die Bearbeitung ein, indem die Bilder entsprechend der Klassifizierung gelabelt werden. Der Prozess wird in entsprechende Merkmalsgruppen untergliedert, und es werden Trainingsgebiete gebildet, bei denen sicher ist, welcher Objektklasse sie zugehören. Aus dem gewonnenen Bildmaterial wurden für einen ersten Test 125 Bilder ausgewählt und den Merkmalsklassen

- Leerer Bauraum
- Bauraum mit einem Bauteil
- Bauraum mit zwei Bauteilen
- Bauraum mit vier Bauteilen
- Bauteil mit zu hohem Temperaturgradienten

zugeordnet.

In Abbildung 31 ist die Programmstruktur des ML Verfahrens dargestellt. In einem ersten Schritt werden die Bilder in das Programm eingelesen und jedem Pixel ein Zahlenwert zugeordnet und als Matrix dargestellt. Gemäß der vorgegebenen Klassifizierung werden die Daten von einem k-Nearest Neighbor-Algorithmus (kNN) nach Mustern durchsucht und entsprechende Merkmalsklassen erstellt, denen ein Parameter zugeordnet wird. Die Parameter werden durch Koeffizienten mithilfe der logarithmischen Regression iterativ an die Datenstruktur angepasst. Bei der Klassifikation werden für die einzelnen Elemente, die Bilder der Thermografiekamera, Objektmerkmale festgelegt (Temperatur, ...). Für die Ausprägungen der Objektmerkmale wird eine Metrik festgelegt. Der kNN- Algorithmus bestimmt über das Abstandsmaß die Zugehörigkeit zur entsprechenden Klasse. Durch die Zuordnung zu einer Klasse kann diese Methode auch zur Prognose eingesetzt werden [58].

Die überwachte Klassifizierung lässt sich in Stufen einteilen:

- Trainieren (learning): Herauslesen der zu den Merkmalsgruppen gehörenden Bilddaten. Aus dem gesamten Datensatz werden ca. 70 % der Datensätze als Stichproben entnommen und zum Trainieren des Algorithmus herangezogen.
 - Jeder Datensatz wird eindeutig einer Kategorie zugeordnet
 - Das aus dem Training entwickelte Modell wird mit den verbliebenen 30 % der Datensätze getestet. Die Auswertung dieses Vorgangs wird in der Confusion Matrix [59] bewertet, in der Vorgabe und Vorhersage verglichen werden

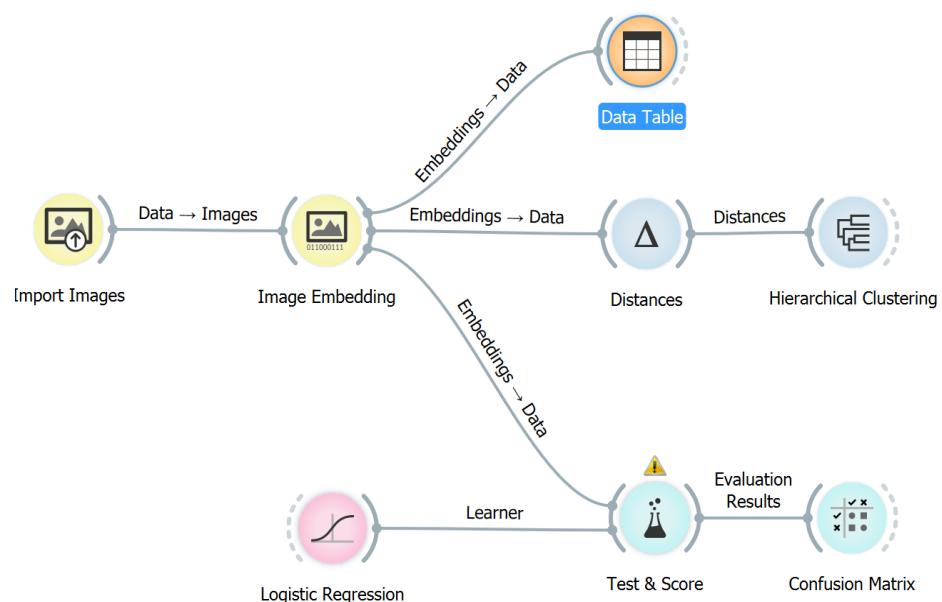


Abbildung 31: Programmstruktur für ML Programm

Das überwachte Klassifizierungsverfahren wird anschließend über eine Distance-Berechnung in einen hierarchischen Cluster überführt der zur Beurteilung des Klassifizierungsergebnisses dient.

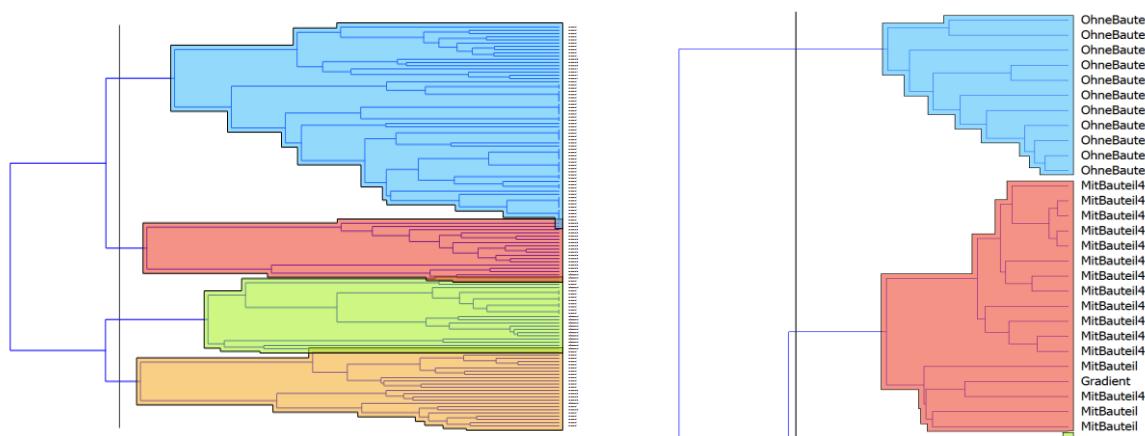


Abbildung 32:: Dendrogramm für die durchgeführte Klassifizierung. Rechts ein Ausschnitt der die Zuordnung des blauen Bereichs zur Klasse ohne Bauteil beschreibt.

Die Zuordnung erfolgt durch den Temperaturgradienten von dem gesinterten Bauteil in Bezug auf den gesamten Bauraum, nicht über Kantendetektion. Inhomogenitäten im Temperaturverlauf werden nicht als Bauteil identifiziert. Für eine Auswertung bezüglich lokaler Übertemperaturen im Bauteil, wie in Abb. 35 dargestellt, ist die Datenbasis nicht ausreichend.

Eine Confusion Matrix fasst die durch das Modell vorhergesagten Klassifikationen mit den wirklichen Klassen in einer Tabelle zusammen und zeigt auf, bei welchen Klassen das Modell die größten Schwächen in der Zuordnung hat. Von den 125 Bildern wurden 120 Bilder, also 96 % richtig zugeordnet. Die meisten falschen Zuordnungen erfolgen bei einem Bauteil.

Confusion matrix for Logistic Regression (showing number of instances)

| | | Predicted | | | | Σ |
|--------|-------------|------------|-------------|-------------|-------------|----------|
| | | MitBauteil | MitBauteil2 | MitBauteil4 | OhneBauteil | |
| Actual | MitBauteil | 82 | 0 | 0 | 0 | 82 |
| | MitBauteil2 | 1 | 3 | 0 | 0 | 4 |
| | MitBauteil4 | 1 | 0 | 23 | 0 | 24 |
| | OhneBauteil | 2 | 0 | 1 | 12 | 15 |
| | Σ | 86 | 3 | 24 | 12 | 125 |

Abbildung 33: Confusion Matrix zeigt z.B., dass von 86 Bildern mit einem Bauteil 82 richtig zugeordnet wurden

Um die Grenzen des Modells weiter auszutesten werden zusätzliche Bilder aufgenommen, die schwer zu klassifizieren sind. Wie in Abbildung 34 gezeigt sind das Bauteile mit sehr unscharfen Rand, bzw Bauteile, die sich in ihrem Temperaturprofil bereits der Umgebung annähern und dadurch keinen starken Kontrast liefern.

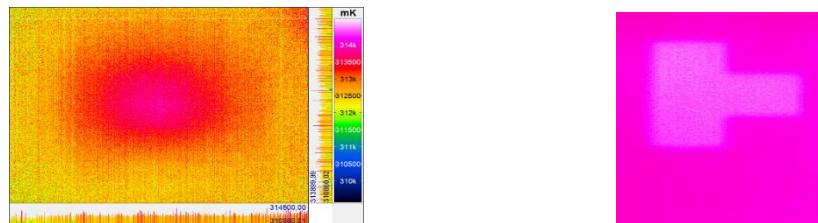


Abbildung 34: Bilder die aufgrund unscharfer Kontur oder geringer Intensität schwer von dem Modell zu klassifizieren sind

Anhand der zugehörigen Confusion Matrix ist zu erkennen, dass die Vorhersagegenauigkeit für ein Bauteil auf 89 % gesunken ist, insgesamt liegt die Vorhersagegenauigkeit noch bei 91 %.

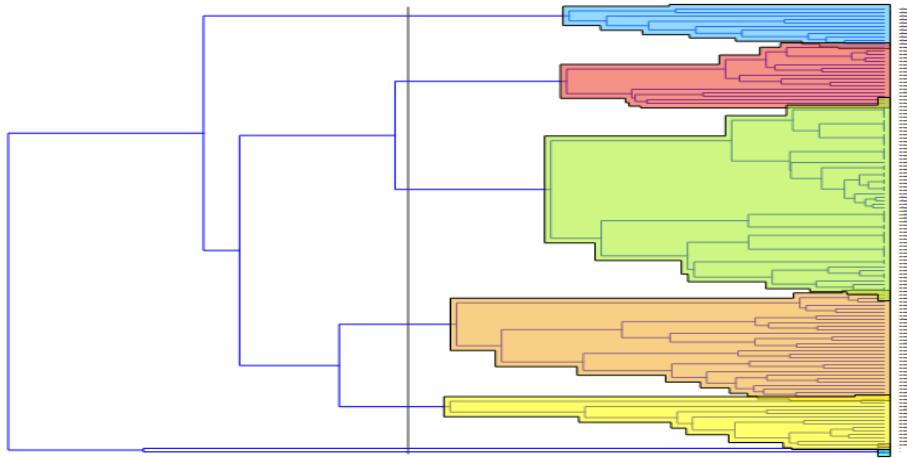


Abbildung 35: Dendrogramm zeigt die Zerlegung der Datensätze in 5 Klassen

In einer ersten Bewertung ist die Bildauswertung über ML Algorithmen für die Prozessüberwachung ein geeignetes Instrument, da selbst bei einem hohen Anteil unscharfer Bilder noch ein hoher Prozentsatz an richtigen Vorhersagen erreicht wird.

Confusion matrix for Logistic Regression (showing number of instances)

| | | Predicted | | | | | Σ |
|-------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|-----|----------|
| Actual | MitBauteil | MitBauteil | MitBauteil2 | MitBauteil4 | OhneBauteil | . | |
| MitBauteil | 459 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 460 |
| MitBauteil2 | 5 | 14 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 |
| MitBauteil4 | 14 | 0 | 125 | 1 | 0 | 0 | 140 |
| OhneBauteil | 22 | 0 | 0 | 78 | 0 | 0 | 100 |
| . | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Gradient | 18 | 4 | 0 | 0 | 0 | 18 | 40 |
| Σ | 518 | 18 | 125 | 80 | 19 | 760 | |

Abbildung 36: Confusion Matrix zeigt in diesem Fall dass von 518 Bildern mit einem Bauteil 459 richtig zugeordnet wurden

In einer ersten Bewertung eignet sich die Bildauswertung über ML Algorithmen für die Prozessüberwachung als ein geeignetes Instrument, da selbst bei einem hohen Anteil unscharfer Bilder noch ein hoher Prozentsatz an richtigen Vorhersagen erreicht wird.

Zur Verbesserung des Procedere kann die aus dem Slicing mit dem aktuellen Sinterprozess korrelierte Datei auf das Thermografie-Bild abgebildet werden. Das Thermografie-Bild wird auf die Konturen reduziert, aus den eingestellten Prozessparametern wie Laserleistung, Geschwindigkeit, etc. ergibt sich eine theoretische Temperaturverteilung. Der Vergleich aus theoretischer Vorhersage und aktueller Messung liefert Aussagen über quantifizierbare futuristische Modalitäten, die Voraussage relativer Häufigkeiten eines Ereignisses bei veränderten Prozessparametern dient zur Korrektur von Abweichungen. Der Rechenaufwand für eine im Datenvolumen reduzierte Variante kann in Echtzeit durch einen Microprocessor bewältigt werden.

AP D Softwareentwicklung

Federführung: EOS GmbH, Krailling
Co-Federführung: InfraTec GmbH, Dresden

AP D.1 Steuerung Versuchsaufbau

In diesem Arbeitspaket werden geeignete Schnittstellen und erforderliche Signalweitergaben definiert, die bei der Implementierung der Gesamtsteuerung für den Versuchsstand berücksichtigt werden müssen.

Die Steuerungsarchitektur wurde in Absprache mit der Universität Duisburg-Essen festgelegt. Die SPS der Universität Duisburg-Essen wird als „Master“ die Hauptsteuerung des Versuchsstands übernehmen (z. B. Ansteuerung der Linearachsen für den Pulverauftragsmechanismus und die Bauplattform, Steuerung der IR-Heizung, etc.) während das Optiksystem als „Slave“ die Belichtung übernehmen wird (eingerahmte Variante in Abbildung 37). Die Kommunikation erfolgt über eine Hilscher PC-Karte auf Basis des CANopen Bus.

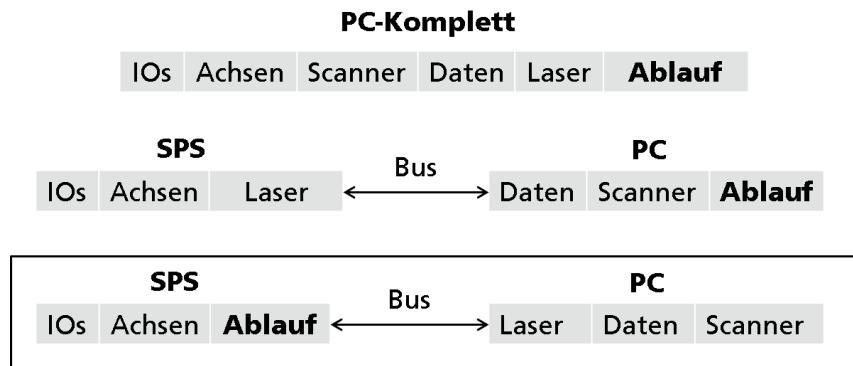


Abbildung 37: Kombinierte Systemsteuerung

Die Signalschnittstellen zur SPS wurden definiert. Zum Test der Signalschnittstellen zur SPS wurde ein Bedienpanel eingerichtet, welches die Visualisierung von Statusmeldungen mittels LED beinhaltet. Das Blockschaltbild der Verkabelung des Optiksystems ist in Abbildung 38 dargestellt.

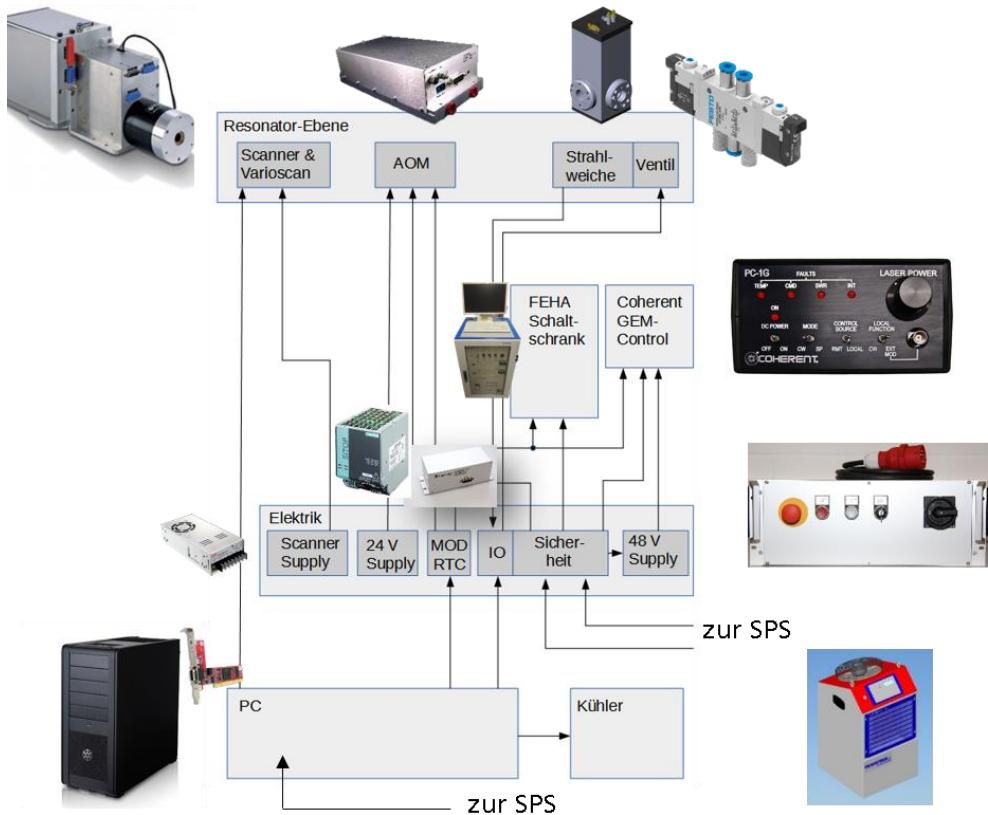


Abbildung 38: Blockschaltbild zur elektrischen und steuerungstechnischen Verkabelung des Optiksystems

Um die Ansteuerung der beiden Laser sowie des akustooptischen Modulators über eine RTC5-Scannerkarte zu ermöglichen, wurde in der Elektronik-Werkstatt des Fraunhofer ILT eine Elektronikbox hergestellt, die die Weiterleitung der RTC5-Signale in Form von Analogsignalen ermöglicht. Zudem wurde ein Netzteil entworfen und gefertigt, welches die Integration des 70 W-Lasers in einen Sicherheitskreis (Interlock- bzw. Not-Aus-Kreis) ermöglicht.

AP D.2 – Softwareentwicklung und -implementierung zur Optik-Ansteuerung: Ansteuerung zur Durchführung von grundlegenden Laser-Sinterversuchen

Aufgabe von EOS im Projekt war die softwareseitige Ansteuerung der vom Fraunhofer ILT im Rahmen des Projektes entwickelten Optikbank. Im Vergleich zu konventionellen Laser-Sinter-Anlagen wurde hier ein deutlich stärkerer Laser (FEHA600) mit einer Ausgangsleistung von 600 W verbaut. Um auch bei geringeren Laserleistungen arbeiten zu können, wurde von EOS ein Laser (C70L) mit einer Ausgangsleistung von 70 W zur Verfügung gestellt, der mittels einer Strahlweiche durch den gleichen Strahlengang geleitet wird. Durch das träge Einschaltverhalten und aufkommende Leistungsspitzen musste der FEHA600 mit einem akustooptischen Modulator (AOM) kombiniert werden. Um bei hohen Laserleistungen keine zu hohen Energiedichten auf dem Pulverbett zu erzielen, wird eine dynamische Fokussiereinheit vor dem 2D-Scanner verbaut mit der eine variable Fokusgrößenverstellung möglich ist.

Zur Sicherstellung der Versuchsstandfunktion wurde in diesem Arbeitspaket eine redundante Steuerungssoftware für den Lasersinter-Versuchsstand entwickelt. Die Benutzeroberfläche dieser

Software ist in Abbildung 39 gezeigt. Die Ansteuerung des 600 W-Lasers, des 70 W-Lasers, des AOMs sowie des 3D-Scansystems wurde implementiert.

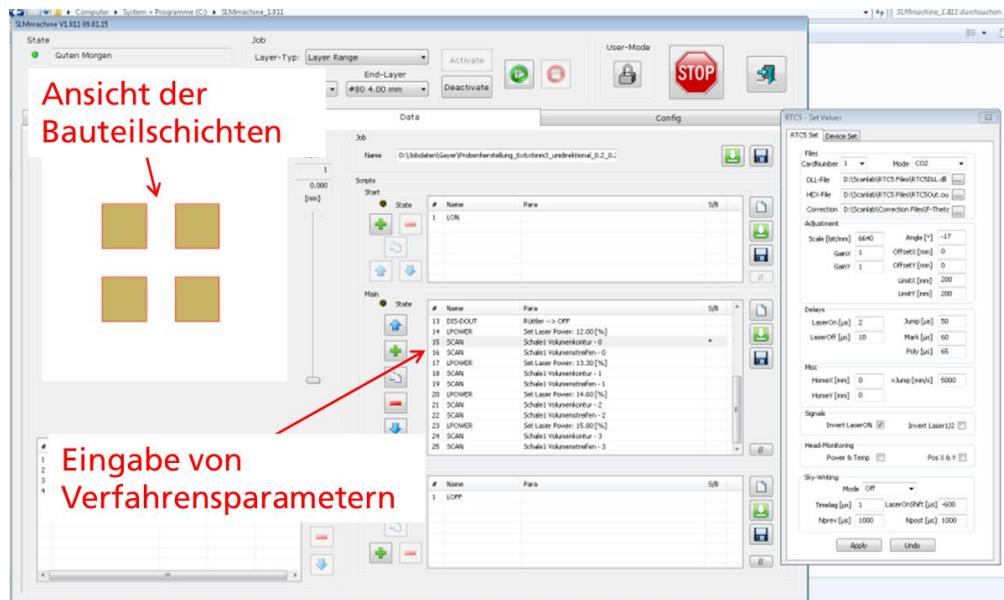


Abbildung 39: Benutzeroberfläche der Steuerungssoftware

Zur Durchführung von grundlegenden Laser-Sinterversuchen mit Hülle-Kern-Belichtungsstrategie wurde die Unterstützung unterschiedlicher Vektortypen implementiert. In Abbildung 40 ist links ein Bauteil mit Hüllvektoren (kleine Vektoren mit kleinem Abstand im Randbereich) und Kernvektoren (längere Vektoren mit größerem Abstand im Kernbereich) dargestellt. Die Software ermöglicht die selektive Ansteuerung dieser Bereiche, so dass zwischen der Belichtung von Hülle und Kern beliebige Programm-Befehle (z. B. Defokussierung, Änderung der Scangeschwindigkeit) ausgeführt werden können.

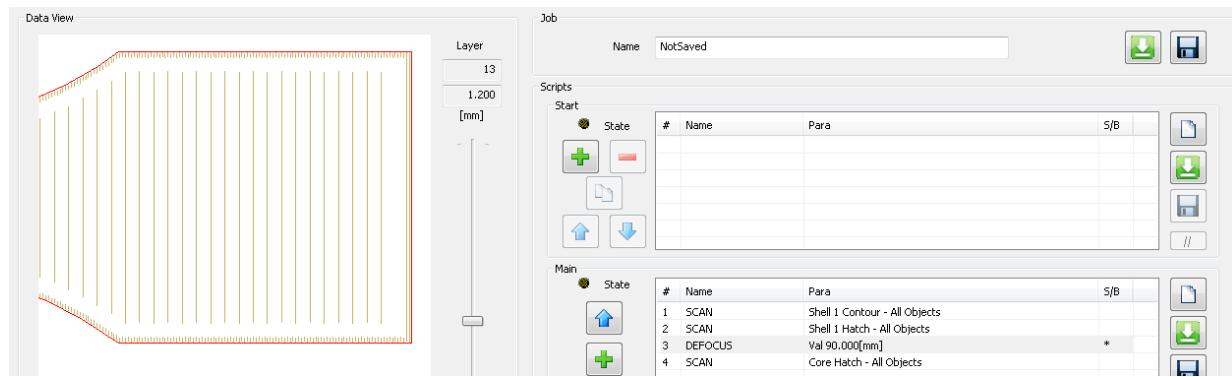


Abbildung 40: Beispielhafte Hülle-Kern-Strategie

Nach der Definition der Steuerungsarchitektur und –schnittstellen, v.a. auch mit der Versuchsanlage des IPE-FT der Universität Duisburg, auf der die Optikbank installiert wurde, wurde die Software zur Optikansteuerung entwickelt und implementiert. Dabei wurde auf die EOSPRINT Software sowie die Firmware des Charon-Controllers der EOS GmbH zurückgegriffen.

Für beide Teile wurden spezielle Versionen entwickelt, um den Anforderungen an eine variable Ansteuerung mit einfacher Bedienung und der Möglichkeit zur Umsetzung von Hochleistungs-Scanstrategien gerecht zu werden.

Belichtungssteuerung EOSPRINT:

Um das Arbeiten am Versuchsstand zu erleichtern wurde in EOSPRINT die Baufeldgröße und Orientierung der Belichtung an den Versuchsstand angepasst. In der EOSPRINT Software werden die Bauteile platziert, skaliert und die genauen Belichtungsstrategien zugewiesen. Diese Funktion wird zum Jobstart gestartet, EOSPRINT berechnet die Belichtungsdaten der eingestellten Schicht, schickt diese an die Charon und springt anschließend automatisch in die nächste Schicht. Bei Rückantwort der Charon, dass die Belichtung beendet ist, werden die Belichtungsdaten der darauffolgenden Schicht berechnet und geschickt (vgl. Abbildung 41)

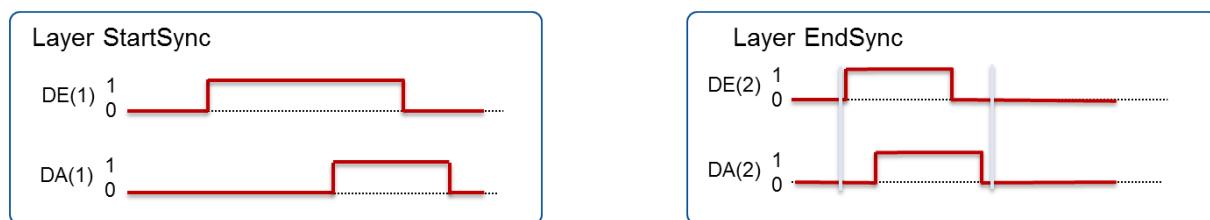


Abbildung 41: Handshake-Logik

Der prinzipielle Ablauf beim Lasersintern bestehend aus Schichtauftrag, Aufheizen der Schicht und Belichtung wurden vom Versuchsstand in Duisburg mit einer Wago-SPS mit allen nötigen Unterfunktionen umgesetzt. Der Schritt Belichtung wurde über die Ansteuerung mittels EOSPRINT und Charon implementiert. Um diesen Schritt zeitlich in den Ablauf einzubinden, wurde eine fehlersichere Kommunikation zwischen Wago-SPS und Charon mittels 24V Signalen aufgebaut. So wird sichergestellt, dass durch die Charon keine Belichtung ausgelöst wird, wenn gerade eine neue Schicht aufgetragen wird. Andersherum wird auch keine neue Schicht aufgetragen, wenn während der Belichtung ein Fehler auftritt und die Belichtung nicht beendet werden kann.

AP D.3 Variable Steuerung

Ziel dieses Arbeitspaketes war es, die Rückmeldung aus der Thermografie, also der Temperaturverteilung der Schmelzeoberfläche in die Energieeinbringung des neuen Optiksystems einfließen zu lassen.

Für die Steuerung der eingebrachten Energie über das Baufeld wurde, ähnlich dem EOSAME Feature der EOS GmbH, eine Matrix implementiert, mit der in Abhängigkeit des Ortes die Energie manipuliert wird. So wird nach der Berechnung der Vektoren je nach Ort die zugehörige einzubringende Energie erhöht oder gesenkt. Input sollte ein interpretiertes Thermografie-Bild der vorherigen Schicht sein. Bei Temperatursenken sollte so die Energie erhöht werden, falls die Temperatur zu hoch war, sollte die Energie gesenkt werden.

Diese Manipulation der Belichtungsdaten wurde direkt im Charon Controller implementiert.

Durch Verzögerungen im Arbeitspaket C konnte die Rückkopplung der Thermografie-Ergebnisse direkt in den Prozess, also eine schichtweise Änderung dieser Matrix, nicht mehr umgesetzt werden.

AP D.4 Anpassung IR-Software

Zur Prozessüberwachung wurde eine Software erstellt zur Steuerung der Wärmebildkamera, angepasst an die individuellen Anforderungen des Lasersinterns.

Zur Einbindung in den Gesamtprozess des Lasersinters eines sog. Sinterjobs wurde folgender Prozessablauf für das Thermografie-Systems definiert und in die Software implementiert:

- 1) Jobstart; Auftragen der ersten Pulverschicht
- 2) Analyse der geometrischen Temperaturverteilung im Bauraum nach dem Auftragen der ersten Pulverschicht
- 3) Belichten der ersten Pulverschicht
- 4) IR-Aufnahme des Pulverbettes nach dem Ende des Belichtungsvorganges
 - a. automatische Erstellen von Messfeldern (ROI) aus den belichteten Gebieten
 - b. Abspeichern des Bildes und der ROI
- 5) Belichten der nächsten Pulverschicht
- 6) IR-Aufnahme des Pulverbettes nach dem Ende des Belichtungsvorganges
 - i. Laden der ROI der vorherigen Belichtung
 - ii. Differenzbild aus der jetzigen Belichtung und der vorherigen Belichtung
 - iii. Erstellen eines Histogramms für jedes ROI
 - iv. Analyse des Histogramms auf Basis von parametrierbaren Schwellwerten (Temperaturdifferenz [K], Anteil [%])
 - v. farbliche Darstellung der ROI, logging und Ausgabe an ein DO bei Überschreitung der Schwellwerte
 - vi. automatische Erstellen von ROI aus den belichteten Gebieten
 - vii. Abspeichern des Bildes und der ROI
- 7) Wiederholung bis Jobende

Zur Anbindung der Schnittstelle zur Maschinensteuerung der Lasersinteranlage an eine spezifische Hardware eines Industrie-PCs wurde ein Spezial-PC ausgewählt. Dieser PC verfügt zusätzlich über 8 digitale Ein- und Ausgänge (DIO), welche direkt an die Maschinensteuerung der Laserbelichtungsanlage gekoppelt werden. Für diese DIO wurden spezielle Treiber entwickelt, welche sowohl die Hardware als auch die verwendete Betriebssystemarchitektur unterstützen.

Zur Bedienung der Software wurde eine grafische Bedienoberfläche (GUI) entwickelt. Diese hat folgende Aufgaben:

- Visualisierung der IR-Daten der Kamera
- Einrichtung von Messflächen
- Parametrierung zur Auswertung der IR-Bilder
- Darstellung von Systemzuständen
- Steuerung der IR-Kamera

Die Visualisierung der Kameradaten erfolgt über eine großformatige Darstellung. Diese beinhaltet nicht nur die eigentlichen Daten, sondern auch die Messflächen und eine Farbskala. Temperaturwerte einer IR-Kamera werden über eine der Messaufgabe angepassten Farbskala visuell dargestellt, um sowohl das Messobjekt erkennen zu können, als auch eine visuelle Abschätzung der Temperaturverteilung innerhalb des Bildes vornehmen zu können. Dies ersetzt aber nicht eine exakte, pixelgenaue Temperaturauswertung. Zur Auswertung der Temperaturen werden dem Messobjekt Messflächen, -linien oder -punkte zugeordnet. Diese werden über ein Werkzeug zur Erzeugung und Zuordnung von geometrischen Figuren erstellt.

Damit kann jede geometrische Figur innerhalb des Thermografie-Bildes separat ausgewertet werden. Ebenso kann jeder Messfläche Eigenschaften zugeordnet werden, welche zur genauen Temperaturdatenermittlung notwendig sind. Dies sind z.B. Thermografie-Parameter wie der ε -Wert. Systemzustände wie Verfügbarkeit der IR-Kamera oder die Prozessanzeige der Maschinen- und Kamerasteuerung werden ebenfalls auf der GUI visualisiert.

Um Zustände und potentielle Fehler der IR-Kamera oder Fehler in der Datenübertragung zwischen Kamera und PC zu erkennen, müssen verschiedene Verfahren implementiert werden. U.a. wird untersucht, um ein kontinuierlicher Datenstrom vorhanden ist. Ist der Datenstrom über eine einstellbare Zeit (Bildfolge) nicht mehr vorhanden, wird überprüft, ob noch eine Kommunikation und Steuerung mit der IR-Kamera möglich ist. Sofern dies möglich ist, wird ein sog. Soft-Reset durchgeführt, um die Kamerasoftware neu zu initialisieren. Ist dies nicht möglich, wird die Kamera von der Versorgungsspannung kurz getrennt und damit neu gestartet. Ebenso wird die Innentemperatur der Kamera überwacht, um eine erhöhte Temperatur zu erkennen. Da die Kamera nur innerhalb des angegebenen Betriebstemperaturbereichs exakte Werte liefert, kann damit eine Übermittlung von fehlerhaften Werten erkannt und vermieden werden.

Nachfolgend wurde die elektrische und softwaretechnische Integration in die Lasersinteranlage für die Ansteuerung der Hochleistungs-Laser-Scanner-Systeme sowie für das Prozessüberwachungssystem entwickelt und vorgenommen.

Als Voruntersuchung wurde geprüft, welche Schnittstellenmöglichkeiten zwischen IR-Kamerasystem und einer externen Steuer- und Auswerteeinheit möglich sind, welche Eigenschaften und Einschränkungen diese haben und wie diese auf eine Prozesszeit Einfluss haben.

Höherwertige Kommunikationsprotokolle wie Profibus oder Profinet wurden getestet. Als sehr effektiv und am besten integrierbar war eine für die Messaufgabe spezifische Implementierung des udp-Protokolls. Die Steuerung der Anlage selbst erfolgte über digitale In-/Outputs.

Das UDP (User Datagram Protocol) ist ein minimales, verbindungsloses Netzwerkprotokoll, das zur Transportschicht der Internetprotokollfamilie gehört. UDP ermöglicht Anwendungen den Versand von Datagrammen in IP-basierten Rechnernetzen. UDP verwendet Ports, um versendete Daten dem richtigen Programm auf dem Zielrechner zukommen zu lassen. Dazu enthält jedes Datagramm die Portnummer des Dienstes, der die Daten erhalten soll. Diese Erweiterung der Host-zu-Host-Übertragung des Internet Protokolls auf eine Prozess-zu-Prozess-Übertragung wird als Anwendungsmultiplexen und -demultiplexen bezeichnet.

Zusätzlich bietet UDP die Möglichkeit einer Integritätsüberprüfung an, indem eine Prüfsumme mitgesendet wird. Dadurch können fehlerhaft übertragene Datagramme erkannt werden. Diese Grundstruktur wurde in einer Testanwendung erprobt.

Für eine mögliche Kommunikation über eine Softwareschnittstelle wurde ein Konzept entwickelt und beispielhafte Teileimplementierungen vorgenommen, um die Leistungsfähigkeit dieser Schnittstelle zu testen.

Die Schnittstelle selbst wurde als sog. DLL (dynamic link library), einer unter Microsoft Windows üblichen Schnittstelle, ausgeführt. Das Konzept sieht folgendermaßen aus:

Die DLL stellt den lesenden Zugriff auf folgende Eigenschaften eines Thermografie-Bildes innerhalb einer IRB-Datei (IRB ist das InfraTec eigene Dateiformat für Thermografie-Bilder) zur Verfügung:

- Höhe und Breite des Thermografie-Bildes
- Minimum-Temperatur in Kelvin
- durchschnittliche Temperatur in Kelvin
- Maximum-Temperatur in Kelvin
- Standardabweichung
- Zeitstempel
- Frame-Nummer
- Trigger
- Combined-Count (Anzahl der Bilder im Frame)

- Temperaturen an (x,y)-Koordinaten als Schwarzstrahler- und korrigierte Werte (über LookUpTable)

Für die Ansteuerung der Hochleistungs-Laser-Scanner-Systeme sowie für das Prozessüberwachungssystem wurde eine Software entwickelt, um in einem späteren Schritt geeignete Hochleistungs-Scanstrategien zu entwickeln.

Grundlegend wurden die Daten der Wärmebildkamera an eine spezielle Software übertragen. Diese Software analysiert die Daten verschiedener Messbereiche und übermittelt Daten weiter an die Maschinensteuerung, um ggf. Parameter des Belichtungsprozesses anpassen zu können.

Die Software wurde in verschiedene Funktionsblöcke aufgeteilt:

- Basissoftware
- Schnittstelle zur IR-Kamera
- Schnittstelle zur Maschinensteuerung
- grafische Bedienoberfläche
- Auswerte- und Prozessmodul

Die Basissoftware beinhaltet alle Grundfunktionen zur Einbindung in das Betriebssystem (Windows 7 / 10) und der einzelnen Schnittstellen.

Die Schnittstelle zur IR-Kamera ermöglicht die Kommunikation und Steuerung der IR-Kamera von der Software aus. Die Daten werden in einem standardisierten Format an die Software übergeben. Als Datenformat wird das Protokoll GigE Vision verwendet. Dieses erlaubt eine einheitliche Steuerung von GigE Vision tauglichen Kameras. Darüber hinaus werden auch Hersteller-spezifische Erweiterungen unterstützt. Die eigentlichen IR-Daten der Kamera werden mittels eines verlustfreien Komprimierungsverfahrens an den PC übertragen. Dies ist notwendig, um die Originaldaten jedes Pixels des IR-Bildes zu erhalten und weiterverarbeiten zu können, um daraus Temperaturdaten zu generieren.

Die Steuerung der IR-Kamera ist notwendig, um das Abgleichverhalten (Shuttern) dem Prozessablauf anzupassen. Eine IR-Kamera muss auf Grund ihres physikalischen Aufbaus und Verhaltens regelmäßig (wenige Minuten) auf einen schwarzen Körper abgeglichen werden, um ein Driften der Temperaturwerte zu verhindern. Dieses funktioniert automatisch, kann aber auch gesteuert vorgenommen werden, speziell für automatisierte Bildaufnahmeverfahren in z.B. industriellen Prozessen.

AP D.5 Umsetzung der Prozessüberwachung in die Anlagesteuerung

Durch den Entfall des AP G, der Integration des neuen Optikkonzeptes und der Thermografiekamera auf eine Serienanlage der EOS GmbH, wurde dieser Teil des AP D, nur für den Teststand implementiert und ist im Abschnitt AP D.3 beschrieben.

AP D.6 Belichtungsalgorithmen

Die Belichtungsstrategie wird dabei im Parameter-Editor für jedes Bauteil festgelegt. Hier können auch neue, komplexere Strategien definiert werden. Die Parameter Laserleistung, Hatch-Abstand, Scangeschwindigkeit, Beamoffset sowie die Fokusgröße können in den Belichtungstypen Kontur, Edge und Hatch frei parametriert werden.

Mit der variablen Fokuseinstellung können so auch die höheren Laserleistungen ins Baufeld eingebracht werden. Exemplarisch sind im Bild Einbrände auf Papier mit verschiedenen Einstellungen zu sehen:

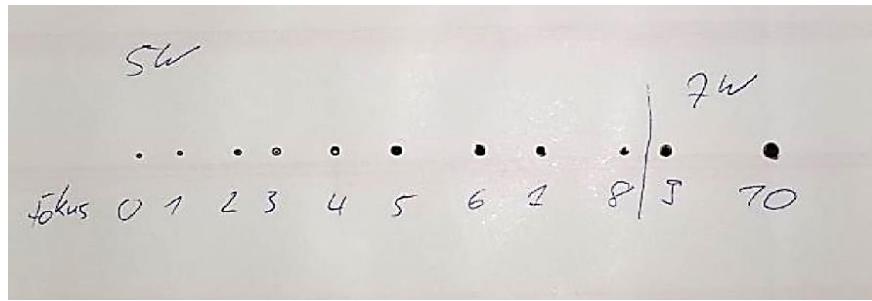


Abbildung 42: Einbrände auf Thermopapier bei verschiedenen Fokusstufen

Auch komplexere Strategien wie das Hülle-Kern Prinzip sind darstellbar. Hier kann ein äußerer Bereich definierter Dicke (Hülle) des Bauteils mit anderen Parametern belichtet werden als der innere Bereich (Kern). So können Belichtungszeiten durch die Verwendung großer Fokusse im inneren des Bauteils realisiert werden, ohne auf Detailauflösung am Rand der Bauteile zu verzichten. Der Screenshot zeigt die verschiedenen Einstellmöglichkeiten der Hüllendicke in den Richtungen X/Y (in einer Schicht) und Z (senkrecht zu den Schichten), sowie die Zuordnung der Belichtungsalgorithmen zu den so entstehenden Bauteilsegmenten. Zur besseren Veranschaulichung der Belichtungsbahnen des Lasers können diese in den Bauteilquerschnitten jeder Schicht angezeigt werden. Für eine Hülle-Kern-Strategie ist dies nachfolgend dargestellt:

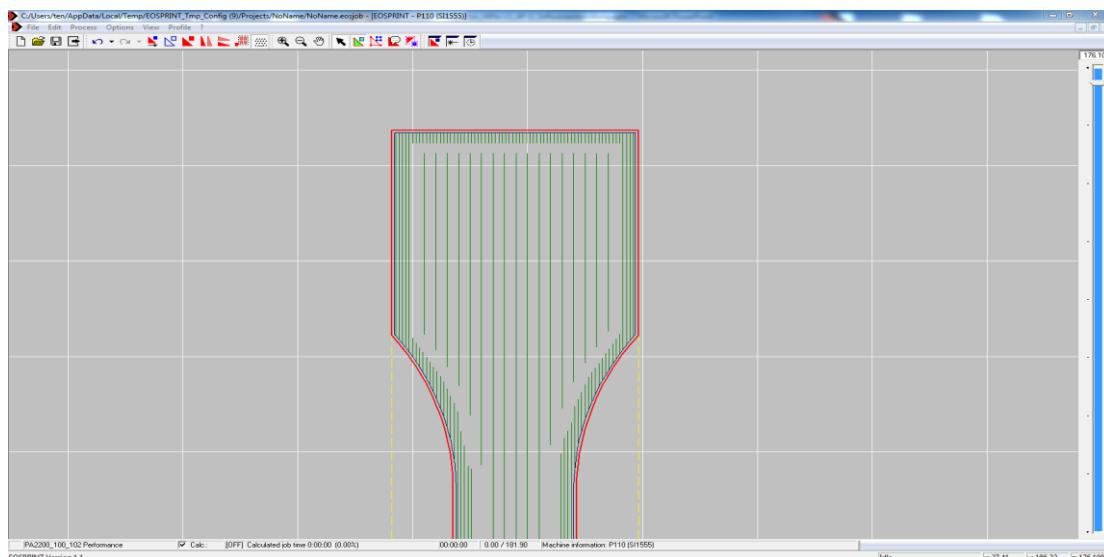


Abbildung 43: Abbildung der Scanvektoren im Bauteilquerschnitt

Für den Jobbetrieb wurde eine Zusatzfunktion in EOSPRINT integriert, die es erlaubt, Einzelschichten zu berechnen und die Belichtungsdaten schichtweise an die Charon zu übertragen.

AP E Prozesszusammenhänge

Federführung: Lehrstuhl für Fertigungstechnik (IPE-FT), Universität Duisburg-Essen

Co-Federführung: EOS GmbH, Krailling; InfraTec GmbH, Dresden

Im AP E sollen für die in Arbeitspaket B entwickelten Systeme die sich aufgrund des größeren Fokusdurchmessers bzw. der verlängerten Wechselwirkungszeit gegenüber dem Stand der Technik veränderten Prozesszusammenhänge analysiert werden. Auf dieser Basis gilt es, robuste Verarbeitungsfenster für die Prozessparameter zu ermitteln, welche sich gegenüber heutigen Verarbeitungsparametern durch eine homogener Energieeinbringung optimierte Bauteileigenschaften auszeichnet. Zusätzlich sollen in diesem Arbeitspaket die grundlegenden Zusammenhänge für die Aufstellung von Eingriffsgrenzen für die thermografiebasierte Prozessüberwachung erarbeitet werden.

Durch die im AP B erreichten Ergebnisse und den zeitlichen Verzug der vorangegangenen Arbeiten konnten lediglich Versuche zu einer gaußförmigen Intensitätsverteilung des Laserstrahls bei unterschiedlichen Fokusdurchmessern durchgeführt werden. Dabei wurde der Fokus mit den Fokusstufen von 0 bis 10 in ganzzahligen Schritten variiert. Zusätzlich wurden alle Versuche unter der Verwendung des eingebauten AOMs durchgeführt, da der Laser sonst nicht für das Laser-Sintern geeignet ist. Die Ausgangsleistung des Lasers betrug in allen durchgeföhrten Versuchen ca. 206 W, welche durch den AOM auf die eingestellte Laserleistung angepasst wurde. Die Schichtstärke wurde bei den vorliegenden Versuchen konstant auf 0,1 mm gehalten. Das für Probekörper verwendete Material ist das PA 2200 der Firma EOS, welches in einem konstanten Mischverhältnis von 50 % Neupulver und 50 % Altpulver vorlag.

AP E.1 Versuchsplanung

Um eine möglichst effiziente Versuchsdurchführung zu realisieren wurden verschiedene Versuchsreihen geplant und durchgeführt. Zur Sicherstellung grundlegender Funktionen, wurde der Pulverauftrag und die resultierenden Packungsdichten untersucht. Darauf aufbauend konnten Korrelationen zur Oberflächenrauheit erarbeitet werden. Diese Erkenntnisse wurden zur Parameterermittlung verschiedener Fokusdurchmesservariationen genutzt. Ein entwickelter Probekörper kombiniert die Möglichkeit zur Einzelspuruntersuchung und der Betrachtung variierender Einzelspurabstände bis hin zu einem homogenen Schmelzbad (vgl. Abbildung 44). Durch die Einzelpuren, die Ihren Abstand zueinander jeweils um 10 % erhöhen, ist es möglich einen ersten Eindruck von der notwendigen Spurbreite zu bekommen.

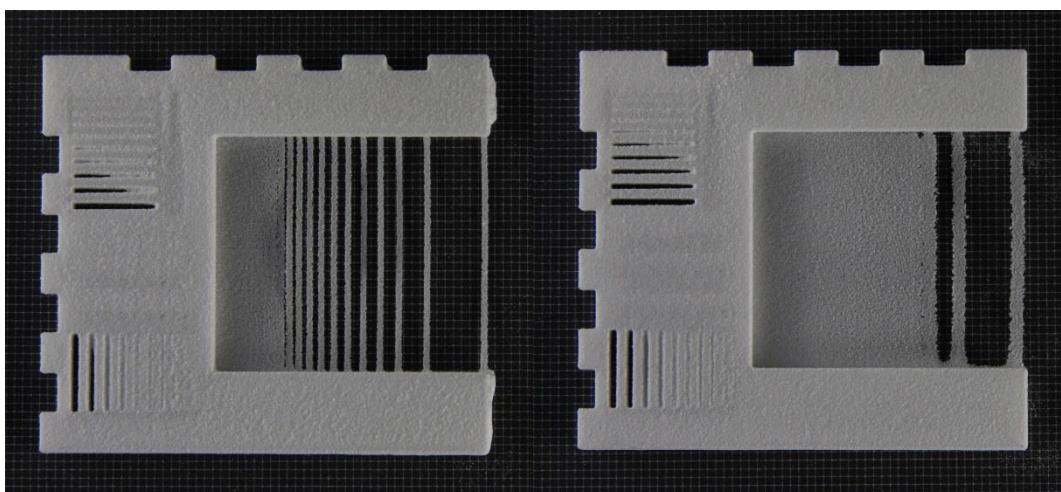


Abbildung 44: Verschiedene Fokusdurchmesser im Einzelspur-Versuch

Die Einzelspur-Versuch-Probekörper wurden in Kunstharz eingebettet und mittels Dünnschnitte und Mikroskopaufnahmen untersucht. So konnten Aussagen über die Eindringtiefe und die Ausprägung des Schmelzbades in Abhängigkeit zum Spurbreitenabstand gemacht werden.

Aufbauend auf den Ergebnissen der Einzelspur-Versuche konnten erste Parameter ermittelt werden, die eine Verarbeitung mit unterschiedlichen Fokusdurchmessern und die Erzeugung von Dichtewürfeln ermöglicht haben. Die vorhandenen Parameter wurden in Screening-Versuche weiter variiert, um die Verarbeitung zu optimieren und erste Prozessgrenzen zu validieren. Diese Ergebnisse wurden mit Dünnschnitten und Mikroskopuntersuchungen detailliert analysiert und bildeten die Grundlage für die Fertigung von mechanischen Probekörpern.

Ausgehend von den robusten Parametern wurden sowohl liegende xy-Zugproben als auch stehende z-Zugproben in einem Baujob mit einer Höhe von 220 mm gebaut. Zur Optimierung der verwendeten Parameter wurde für jede Fokusdurchmesser-Stufe eine statistische Versuchsplanung mit der Variation des Spurbreitenabstandes der Laserleistung und der Orientierung durchgeführt.

Die Verwendung größerer Fokusdurchmesser zum Aufschmelzen größerer Bereiche erfordert neuartige Bearbeitungsstrategien, die sich wesentlich vom bisherigen Stand der Technik differenzieren. So konnten während der Qualifizierung neuer Parameter neue Prozesszusammenhänge ermittelt werden, die im nachfolgenden Kapitel genauer erläutert werden.

AP E.2 Zusammenhänge

Die erarbeiteten Zusammenhänge werden gemäß den durchgeführten Tests dargestellt. Weiterführend wird auf die Produktivitätssteigerung und die Materialalterung als direkte Folge der Produktivitätssteigerung eingegangen.

Packungsdichte

Eine grundlegende Prozessgröße im Laser-Sintern ist die Packungsdichte, die im Prozess erreicht werden kann. Pro Bauteilschicht wiederholen sich die drei Verfahrensschritte des Vorheizens, der Schichtgenerierung und des Pulverauftrages. Bei der Schichterzeugung wird mit Hilfe eines Scan-Systems ein Laserstrahl auf einer Pulverbettoberfläche definiert abgelenkt und so selektiv eine Schicht des Bauteils aufgeschmolzen. Nach dem erzeugen einer Bauteilschicht, bewegt sich die Bauteilplattform um eine Schichtstärke nach unten, um eine frische Pulverschicht aufzutragen. Wesentlichen Einfluss auf den gesamten Prozess hat dabei der Pulverauftrag. Anders als viele additiven Fertigungsverfahren, arbeitet das Laser-Sintern ohne Stützkonstruktionen, sodass das Bauteil frei im gesamten zur Verfügung stehenden Bauraum platziert werden kann. Mehrere Bauteile können demnach verschachtelt oder übereinander platziert werden, was die Vorteile des Verfahrens in Bezug auf die Produktivität im Vergleich mit anderen deutlich aufzeigt. Voraussetzung hierfür ist, dass die verdichtete Pulverschüttung in der Lage ist die erzeugten Bauteile in Form zu halten. Aus diesem Grund wurden unterschiedliche Pulverauftrags-mechanismen und -strategien miteinander verglichen und gegenübergestellt.

Die durchgeführten Untersuchungen sollen den Zusammenhang der rotatorischen Geschwindigkeit der Auftragswalze zur erreichbaren Packungsdichten in Korrelation zu der erzielten Oberflächenrauheit der Bauteile setzen. Unterschiedliche rotatorische Geschwindigkeiten haben dabei einen Einfluss auf die vorhandene resultierende Geschwindigkeit v_{res} an der tangierenden Unterseite der Walze. Die resultierende Geschwindigkeit besteht demnach bei einer Walze aus einer Überlagerung der tangentialen Umfangsgeschwindigkeit v_{tang} und der translatorischen Geschwindigkeit des Beschichters v_{trans} . Diese bestimmt das Verhältnis der Verdichtung zum Überwurf der Pulverpartikel und hat damit direkten Einfluss auf die lose Pulverrotation vor der Beschichter-Einheit [56].

Bei allen durchgeführten Versuchen zur Packungsdichte wurde die translatorische Geschwindigkeit v_{trans} konstant auf 127 mm/s gehalten. Bei der Verwendung einer Rakel entfällt hingegen die Umfangsgeschwindigkeit und die translatorische Geschwindigkeit v_{trans} wird zur resultierenden Geschwindigkeit v_{res} (vgl. Abbildung 45).

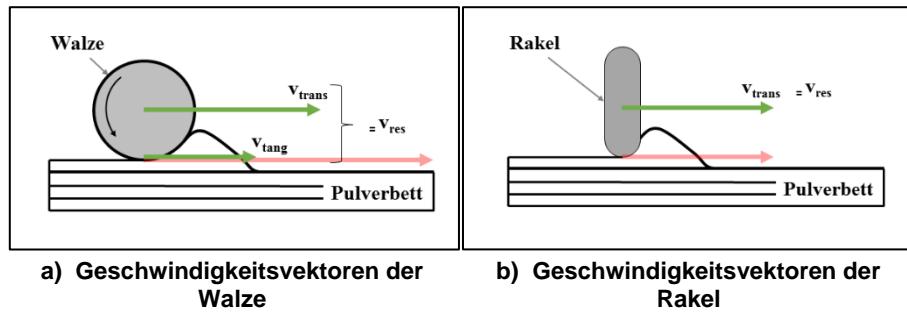


Abbildung 45: Geschwindigkeitsvektoren der verwendeten Auftragsmechanismen

Zusätzlich zu der Versuchsreihe an der Versuchsanlage wurden die Ergebnisse mit einer Stützstelle einer kommerziellen Anlage verglichen. Die kommerzielle Anlage stellt dabei eine DTM Sinterstation 2500 dar. Die Geschwindigkeit der DTM-Anlage an der Pulverbettoberfläche resultiert dabei ebenfalls aus der translatorischen Bewegung und der Anfangsgeschwindigkeit der Auftragswalze. Unter Berücksichtigung des größeren Walzendurchmessers entspricht dies dabei dem Wert der resultierenden Geschwindigkeit von ca. 233 mm/s. Variiert wurden die Rotationsgeschwindigkeiten und ergaben Parameter der resultierenden Geschwindigkeiten von 233, 189, 153 und minimal 140 mm/s.

Die Ergebnisse zeigen, dass eine erhöhte Packungsdichte mit angepassten Parametern erreicht werden kann. In Abbildung 46 ist die erreichte Packungsdichte gegenüber der resultierenden Geschwindigkeit aufgetragen. Differenziert werden kann hierbei durch das verwendete Farbschema. Grün steht für eine Klingengeometrie, grau für die Stützstelle der kommerziellen Anlage und Blau für die variablen Parameter des Versuchsstandes.

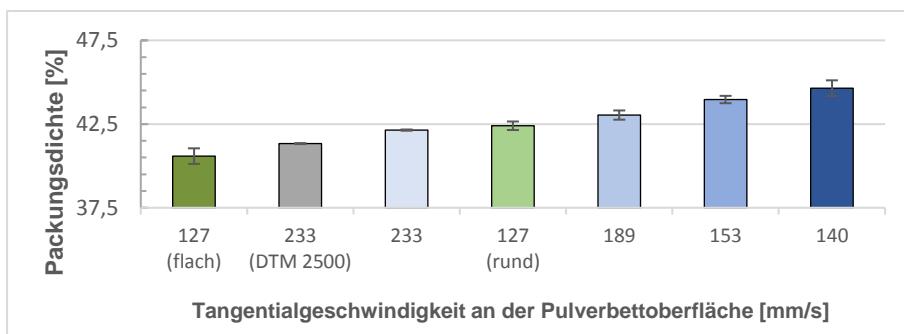


Abbildung 46: Erreichte Packungsdichten nach resultierender Geschwindigkeit

Wie in [62] ebenfalls aufgezeigt, erreichen materialoptimierte Rakel eine höhere Packungsdichte als es bei kommerziellen Anlagen der Fall ist. Das flache Rakel hingegen erreicht keine optimalen Werte der Packungsdichte. Weiterführend zeigen die Ergebnisse in Abbildung 46, dass eine optimierte Packungsdichte mit der Variation der Rotationsgeschwindigkeit erreicht werden kann.

Bei der Betrachtung der grünen Balken wird ersichtlich, dass eine abgerundete Rakel-Geometrie eine hohe Packungsdichte bei geringer Standardabweichung erreichen kann. Im Vergleich dazu ist die abgeflachte Rakel auf einem niedrigeren Level mit erhöhter Standardabweichung zu sehen. Eine

mögliche Schlussfolgerung kann sein, dass die Rakelgeometrie einen wesentlichen Einfluss auf die Packungsdichte im Prozess hat. Durch eine abgerundete Unterseite wird mehr Kraft auf das Pulver ausgeübt und somit stärker verdichtet.

Weiterführend kann beobachtet werden, dass die Rotationsgeschwindigkeit der Walze einen entscheidenden Einfluss auf die Packungsdichte nehmen kann. Dies wird anhand der monoton steigenden Packungsdichte hin zu geringeren Rotationsgeschwindigkeiten deutlich. Die minimale Rotationsgeschwindigkeit erreicht dabei die höchste Verdichtung, wobei eine weitere Verringerung der Rotationsgeschwindigkeit zu instabilen Prozessverhalten geführt hat. Der beobachtete Einfluss der Rotationsgeschwindigkeit wurde auf anhand von Auftragsversuchen mit anderen Materialien validiert (vgl. Tabelle 4). Durchgeführt wurden die Auftragsversuche mit dem PA 2200 Standardmaterial (PA 12), einem vermahlenen Polyamid 6 (PA 6) und einem Polybutylenterephthalat (PBT).

Tabelle 4: Auftragsversuche mit optimierten Auftragsparametern

| | Standard | Optimiert |
|--------------|---|--|
| PA 12 | $v_{res} = 233 \text{ mm/s}$  | $v_{res} = 140 \text{ mm/s}$  |
| PA 6 | $v_{res} = 233 \text{ mm/s}$  | $v_{res} = 140 \text{ mm/s}$  |
| PBT | $v_{res} = 233 \text{ mm/s}$  | $v_{res} = 335 \text{ mm/s}$  |

Deutlich zu erkennen ist, dass die Standardparameter in allen Fällen optimiert werden konnten. Besonders auffällig ist, dass die besten Optimierungen bei gemahlenen Pulvern, wie dem PA 6 und dem PBT erreicht wurden. Dabei sind die optimierten Parameter einmal bei verringelter und einmal bei erhöhter Rotationsgeschwindigkeit der Walze vorzufinden. Aufgrund unterschiedlicher Partikelgrößenverteilung und einer heteromorphen Partikelgeometrie kann es also sinnvoll sein, die Rotationsgeschwindigkeit anzupassen, um einen zuverlässigen Pulverauftrag zu gewährleisten.

Die Betrachtung der unterschiedlichen Rakel-Geometrien ergab im Gegensatz zu dem Pulverauftrag mittels Walze, dass andere Materialein oder Auftragsgeschwindigkeiten keine glatte Pulveroberfläche erzeugten. Somit können diese als nicht prozessstabil bezeichnet werden. Eine mögliche Schlussfolgerung kann daher sein, dass jedes Material seine angepasste Rakel-Geometrie benötigt, um prozessstabil verarbeitet werden zu können.

Die Untersuchungen zur Packungsdichte zeigen das Potenzial des Pulverauftragsmechanismus auf. Eine grundlegende Prozessgröße des Laser-Sinterns wurde mit unterschiedlichen Pulverauftragsmechanismen bestimmt und gezielt optimiert. Dabei zeigte sich sowohl ein hoher Einfluss des verwendeten Auftragssystems, als auch von den verwendeten Walzendurchmessern und deren Rotationsgeschwindigkeit.

Oberflächenrauheit

Weiterführende Untersuchungen beziehen sich auf die Korrelation der Oberflächenrauheit zur Packungsdichte. Hierzu wurde die Oberflächenrauheit der Packungsdichte-Container in Abhängigkeit der im Bauraum herrschenden Orientierung vermessen und bewertet.

Bei der Korrelation der Packungsdichte zur Oberflächenrauheit wurden die bereits ausgewerteten Packungsdichte-Container verwendet. Die vorherrschenden Material- und Prozessbedingungen sind demnach identisch mit der zuvor beschriebenen Versuchsreihe. Die Orientierung im Bauraum und die daraus resultierenden Messflächen sind in Abbildung 47 dargestellt. Dabei wird zwischen den Rauheitswerten der Oberfläche ($Rz O$), der Unterseite ($Rz U$) und den Seitenflächen ($Rz YZ / Rz XZ$) unterschieden. Jede Fläche wurde anhand eines taktilen Messverfahrens gemäß DIN EN ISO 4287 untersucht. Die Seitenflächen wurden dabei stets in Aufbaurichtung gemessen.

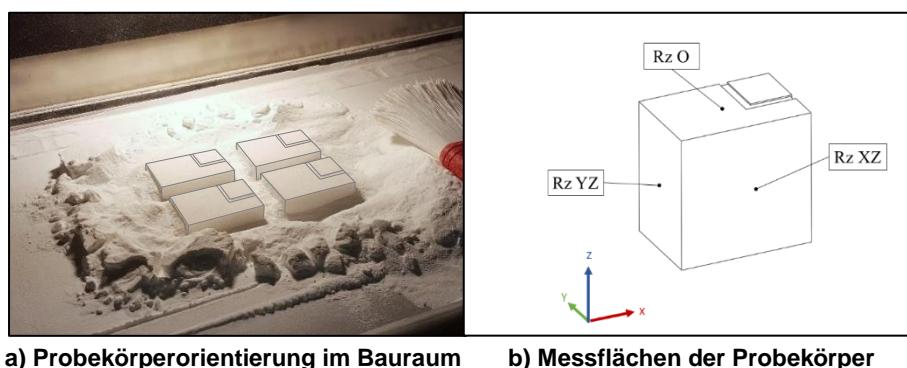


Abbildung 47: Probekörper und Messstellen

Da die Belichtungsparameter während der Versuchsreihe konstant gehalten wurden, können die Änderungen der Oberflächenrauheit den Änderungen der Packungsdichte zugeschrieben werden.

Nachfolgend wurde in Abbildung 48 die erreichte Oberflächenrauheit der erreichten Packungsdichte gegenübergestellt. Auffallend ist, dass es einen qualitativen Unterschied zu den betrachteten Seitenflächen der Probekörper gibt. Weitere Unterschiede sind in den grundlegenden Auftragsmechanismen und unterschiedlichen Anlagen zu finden.

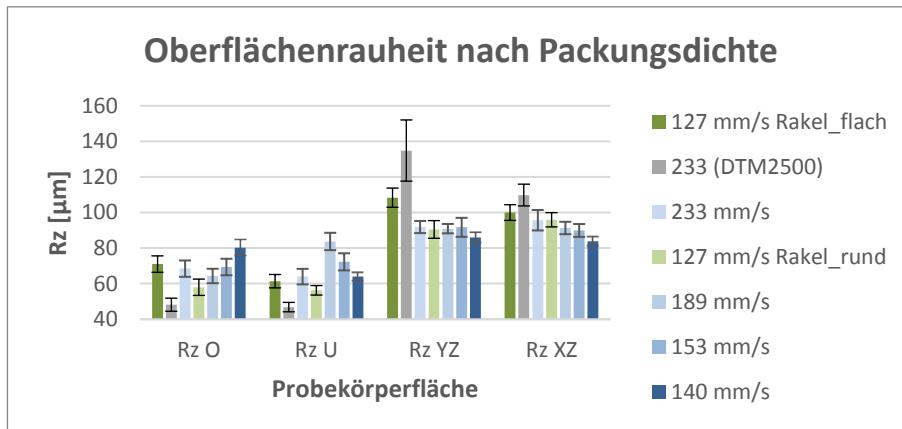


Abbildung 48: Versuchsergebnisse nach erreichter Packungsdichte und Rauheit

Ein erhöhtes Optimierungspotenzial kann folglich den Seitenflächen in Aufbaurichtung eines Bauteils zugesprochen werden. Hier hat die Packungsdichte einen positiven Einfluss auf die entstehende Oberflächenrauheit. Gleichzeitig zeigt sich, dass die Ober- und Unterseiten eine geringere Qualität aufweisen, als es bei niedrigen Packungsdichten der Fall ist. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass niedrigere Packungsdichten zu einer geringeren Reproduzierbarkeit führen, da der qualitative Unterschied der einzelnen Flächen signifikant vergrößert ist.

Zusammengefasst zeigt sich eine gesteigerte Reproduzierbarkeit der Oberflächenqualität bei erhöhten Packungsdichten. Die Differenz vom jeweiligen erreichten Mittelwert der einzelnen Versuchsreihen zwischen den Seitenflächen und den Ober- Unterseiten ist in Abbildung 49 dargestellt.

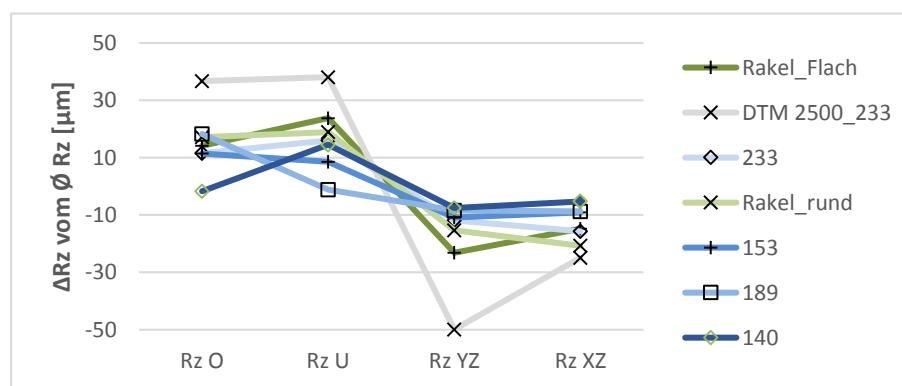


Abbildung 49: Betrachtung der Reproduzierbarkeit nach Auftragsmechanismus und Packungsdichte

Abbildung 49 zeigt dabei, dass die Reproduzierbarkeit mit steigender Packungsdichte ebenfalls zunimmt. Die geringste Reproduzierbarkeit wird hierbei von der kommerziellen Anlage erreicht (graue Linie). Eine ebenfalls geringe Reproduzierbarkeit erreicht der Versuchsstand mit einer flachen Rakel.

Die reproduzierbarsten Ergebnisse werden bei der höchsten Packungsdichte in dieser Versuchsreihe mit 140 mm/s relativer Oberflächengeschwindigkeit erreicht.

Die zusammengefassten Ergebnisse gemäß Abbildung 48 lassen erkennen, dass eine Annäherung der Oberflächenrauheit der betrachteten Flächen zu höheren Packungsdichten stattfindet. Dieser ermittelte Trend ist dabei unabhängig von der verwendeten Anlage sowie dem verwendeten Auftragsmechanismus und zeigt, dass die Packungsdichte dabei einen signifikanten Einfluss auf die Bauteilqualität ausüben kann. Die höchste Oberflächenrauheit befindet sich auf den Seitenflächen der Bauteile und sollte dahingehend optimiert werden, dass eine gleichmäßige Oberflächenrauheit an allen Flächen vorliegt. Dies hätte den Vorteil, dass die Oberflächenrauheit weniger von der Orientierung des Bauteils abhängen würde. Erfolgversprechend wäre dies unter anderem bei einer chemischen Nachbehandlung, deren Ergebnis ebenfalls von der vorliegenden Oberflächenrauheit bzw. von der vorliegenden Oberfläche abhängen kann [63]. Abgesehen vom Stufeneffekt der aufeinandergelegten Einzelschichten wäre somit die Oberflächenqualität eines additiv gefertigten Bauteils weitestgehend konstant. Dabei lässt sich der Treppenstufeneffekt durch Verringerung der Schichtstärke ebenfalls optimieren [64]. Die Ergebnisse in Abbildung 49 zeigen die Unterschiede der einzelnen Flächen im Vergleich zur durchschnittlichen Oberflächenrauheit. So soll verdeutlicht werden, welchen Einfluss die unterschiedlichen Auftragsmechanismen und die unterschiedlich erreichten Packungsdichten auf die Reproduzierbarkeit der Probekörper ausüben. Im Idealfall würde die Linie bei geringer Oberflächenrauheit auf der Nullachse verlaufen.

Einzelspur-Versuche

Bei der Ermittlung der möglichen Prozessparameter ist es notwendig genug Energie einzutragen, um eine homogene Schmelze zu erzeugen. Neben den Parametern Hatch und Laserleistung ist es mit dem Versuchsstand möglich auch den Spotdurchmesser des Laserstrahls zu variieren. Damit ergeben sich signifikante Veränderungen in der Wechselwirkungszeit zwischen Laser und Pulverbett. Um diese Wechselwirkungen beurteile zu können wurde ein Probekörper entwickelt, der die Auswertung des Verhaltens von Laserstrahl und Pulverbett bei verschiedenen Fokusdurchmesser-Variationen ermöglicht.

Das Design des Probekörpers ist darauf ausgelegt, Einzelspuren, unterschiedliche Spurbreitenabstände und homogene Schmelzbäder für unterschiedliche Fokusdurchmesser untersuchen zu können. Zusätzlich lassen sich Spaltmaße, Bohrungen und die xy-Skalierung überprüfen. Um diese multifunktionalen Anwendungen zu realisieren besteht der Probekörper aus einem C-Förmigen Grundkörper, der die Einzelspuren in Position hält. Zwischen jeder Einzelspur erhöht sich der Abstand zur nächsten um jeweils 10 %. So können Spurbreitenabstände von 0,2 bis 3,264 mm betrachtet werden. Die Einzelspuren stellen einen eigenen Probekörper dar und erlauben so, dass der Grundkörper immer mit Standard-Parametern gefertigt werden können, während die Einzelspuren mit Fokusdurchmesser-Variationen realisiert wurden. Um eine Stützstelle bei prozesssicheren Parametern zu erhalten wurden im Vorfeld Screening-Versuche durchgeführt, auf die nicht im Detail eingegangen wird.

Die Ergebnisse zeigen eine typische Abhängigkeit der Spurbreite zum eingestellten Fokusdurchmesser. Die Probekörper wurden bezüglich der resultierenden Einzelspur (Streifenbreite), einem beginnenden Schmelzbad und einem homogenen / dichten Schmelzbad graphisch ausgewertet (vgl. Abbildung 50). Erreicht wurde in dieser Versuchsreihe eine Einzelspurbreite von bis zu 1,72 mm, was dem 3,7-fachen der minimalen Spurbreite von 0,46 mm entspricht.

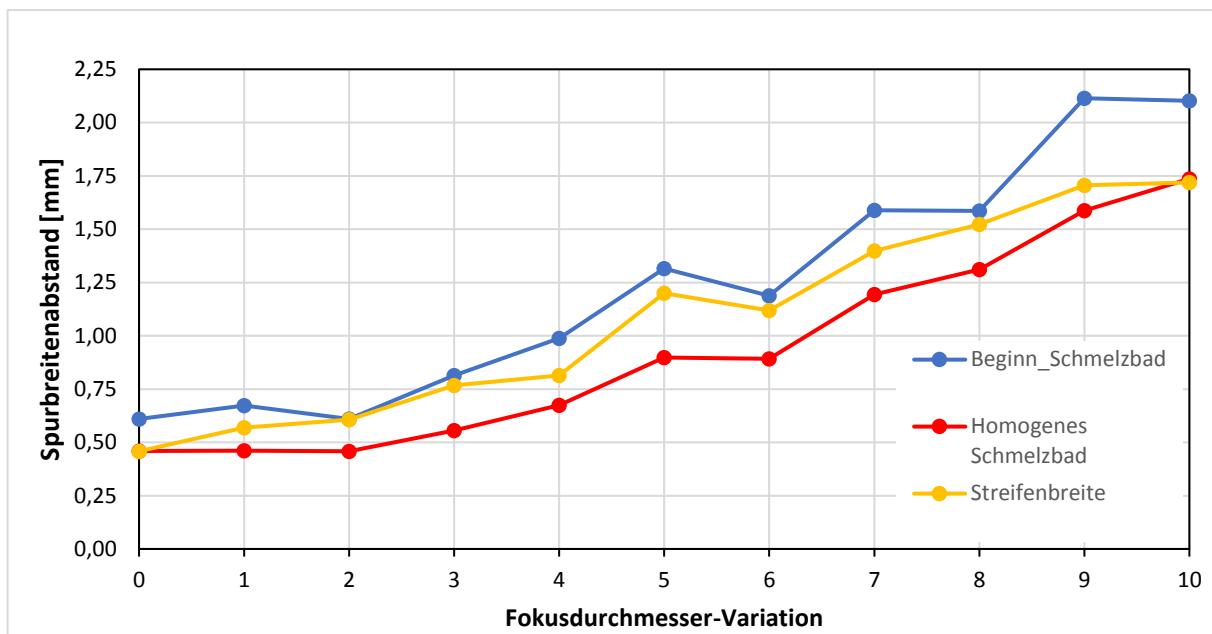


Abbildung 50: Spurbreite zur Fokusdurchmesser-Variation

Die Einzelspuren haben eine geringere Breite, als es der Spurbreitenabstand des beginnenden Schmelzbades widergibt. Hieraus kann die Wechselwirkung der einzelnen Spuren erkannt werden, der eine Vorwärmung des Ausgangsmaterials zur Folge hat und zu einer breiteren Einzelspur führt. Ein homogenes Schmelzbad entsteht jedoch erst durch eine Überlappung der Einzelspuren und erlaubt gemäß den Versuchen einen Spurbreitenabstand von bis 1,7 mm.

Die Untersuchungen der einzelnen Fokusdurchmesser-Variationen zeigten im Dünnschnitt eine unterschiedliche Schmelzbadausprägung in Ausprägung und Breite des Schmelzbades. Teile des Schmelzbades enthielten noch einzelne Partikel und zeigten so, dass eine homogene Schmelze nicht entstanden ist. In Abbildung 51 sind zwei erstarrte Schmelzbäder gegenübergestellt. Das linke Schmelzbad ist mit der Fokusdurchmesser-Variation 2, das rechte mit der -Variation 7 hergestellt worden. Die Fokusstufe 2 führte bei den Versuchen zu einer homogenen Schmelzbadausprägung. Einzelne Partikel konnten vollständig verschmolzen werden, während in der Abbildung rechts noch einzelne Partikel erkannt werden können.

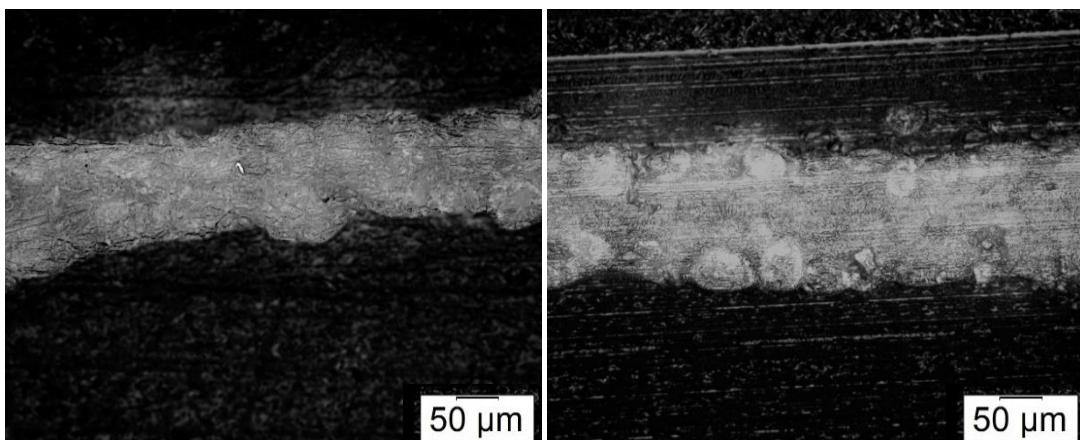


Abbildung 51: Schmelzbadvergleich Fokus 2 und Fokus 7

Aus den Dünnschnitten ist zu erkennen, dass größere Fokusdurchmesser zwar bei deutlich größeren Spurbreitenabständen ein homogenes Schmelzbad erzeugen, jedoch teilweise nicht in der Lage sind, die Partikel vollständig aufzuschmelzen. Die Eindringtiefe des Lasers bleibt dabei über den Verlauf der beginnenden homogenen Schmelzen mit 150 – 220 µm konstant.

Die durchgeführten Versuchsreihen dienten der Parameterfindung für größere Fokusdurchmesser. Im weiteren Verlauf der Auswertung ergab sich ein Spurbreitenabstand von ca. einer halben Einzelspur-Breite als Stützstelle einer robusten Prozessführung. Diese Parameter für die Konturfüllung (Fill) wurden nachfolgend an realen Probekörpern in optimiert.

Bauteildichte

Eine typische Größe der Bauteilprüfung ist die Bauteildichte. Diese dient dabei als Anhaltspunkt für die robuste Verarbeitung im Prozess und die daraus resultierenden mechanischen Bauteileigenschaften wie E-Modul, Bruchdehnung und Zugfestigkeit. Ein Vorteil bei der Ermittlung der Packungsdichte liegt in der Möglichkeit zur zerstörungsfreien Prüfung und der einfachen Auswertung der würfel- oder quaderförmigen Prüfkörper. Die theoretisch Bauteildichte beträgt nach Datenblatt 0,9 – 0,95 g/cm³ [65].

Die Bauteildichte wird in Versuchen zumeist anhand von Dichtewürfeln ermittelt. In den folgenden Versuchen werden die Bauteildichten mit Hilfe von 20 x 20 x 20 mm³ Probekörpern bestimmt. Diese werden hierzu gewogen und mittels Messschieber vermessen. Aus dem ermittelten Volumen und dem Probengewicht kann somit die Dichte errechnet werden. Alternativ wurde die Dichte der Proben zusätzlich nach dem archimedischen Messprinzip ermittelt. Untersucht wurden dabei verschiedene Scanstrategien und Laserleistungen, sowie Spurbreitenabstände. Besonders bei größeren Fokusdurchmessern ist darauf zu achten, dass der Abstand zwischen Fill und Kontur nicht zu groß ist, da andernfalls Lücken im Bauteil entstehen können. Aus diesem Grund wurde ggf. die Kantenlänge einzelner Dichtewürfel angepasst, sodass die Abstände der Hatchlinien zur Kontur konstant gehalten wurden.

Im ersten Durchlauf wurde die Energiedichte von 0,15 - 0,5 J/mm³ für jede Fokusstufe von 0 bis 10 variiert. Die Ergebnisse zeigten, besonders für Fokusdurchmesser größer als Fokusstufe 3 einen Versatz des Fills zur Kontur. Dieser konnte iterativ in nachfolgenden Versuchen optimiert werden. Zunächst wurden verschiedene Scanstrategien mit Hülle-Kern-Belichtungen versucht. Diese führten jedoch nicht zum gewünschten Ergebnis und verlangsamten den Prozess signifikant. Folglich wurde auf eine doppelte Konturbelichtung gewechselt. Diese beinhaltet im ersten Schritt eine Kontur größeren Durchmessers und wird nachfolgend von einer feinen Kontur eingerahmt. Die erste Kontur hat dabei die Aufgabe, die Anbindung zwischen Kontur und Fill zu gewährleisten. Die Detailgetreue wird wiederum von der zweiten Kontur sichergestellt.

Ausgehend von den Änderungen wurde eine Versuchsplanung pro Fokusstufe mit einer jeweils positiven und negativen Variation um 10 % des Spurbreitenabstandes und der Laserleistung durchgeführt. Die Ergebnisse werden nachfolgend dargestellt. Bei kleineren Fokusstufen ist ein Anstieg der Dichte bis zum jeweiligen Maxima zu erkennen. Nach Überschreitung der Bauteildichte von 0,954 g/cm³ sinkt die Bauteildichte bei steigender Energiedichte wieder ab (vgl. Abbildung 52). Das Absinken der Bauteildichte wird dabei der beginnenden Zersetzung zugesprochen [66 bis 68].

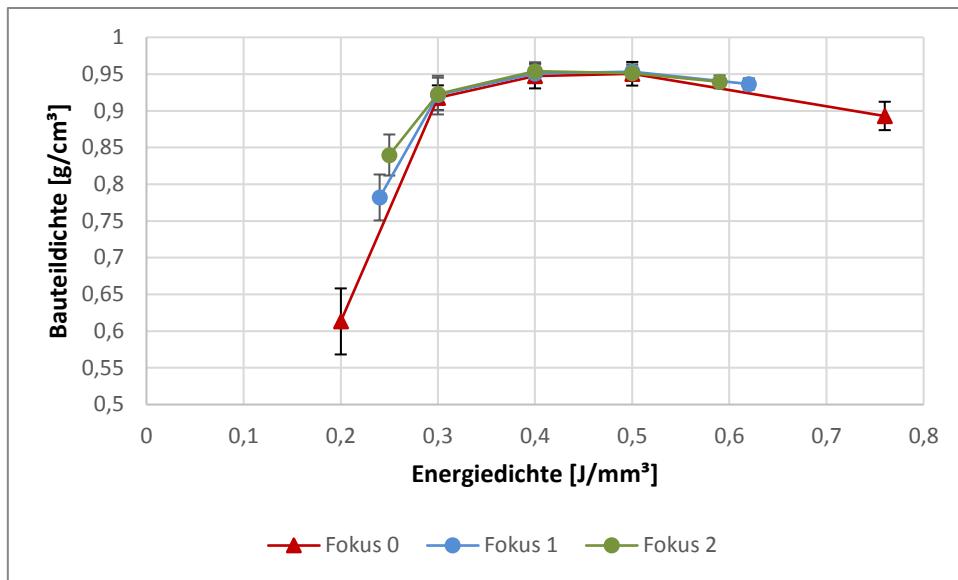


Abbildung 52: Bauteildichte der Fokusstufen 0 - 1

Der ansteigende Verlauf der Dichte bis zu einer Energiedichte von $0,4 \text{ J/mm}^3$ war dadurch bedingt, dass mit steigender energiedichte genug Energie zum vollständigen Aufschmelzen der Pulverpartikel zur Verfügung gestellt wird. Aufgrund der geringen Wärmeleitung des Polyamid-Pulvers, kann die hinzugeführte Energie in nicht ausreichender Geschwindigkeit in die tieferen Schichten eindringen. Steigt die hinzugeführte Energie also weiter an, werden in Konsequenz auf der Oberseite liegende Partikel zu heiß und beginnen sich zu zersetzen. Ein Nachweis dieser Zersetzung sind runde Poren im Bauteil, die während des Prozess nicht aus der Schmelze entgasen konnten [66, 68].

Während die kleineren Fokusstufen ein gewohntes Bild eines Dichteverlaufes aufzeigten, erreichten größere Fokusstufen eine maximaldichte, die danach unabhängig von der Energiedichte weitestgehend konstant verläuft (vgl. Abbildung 53).

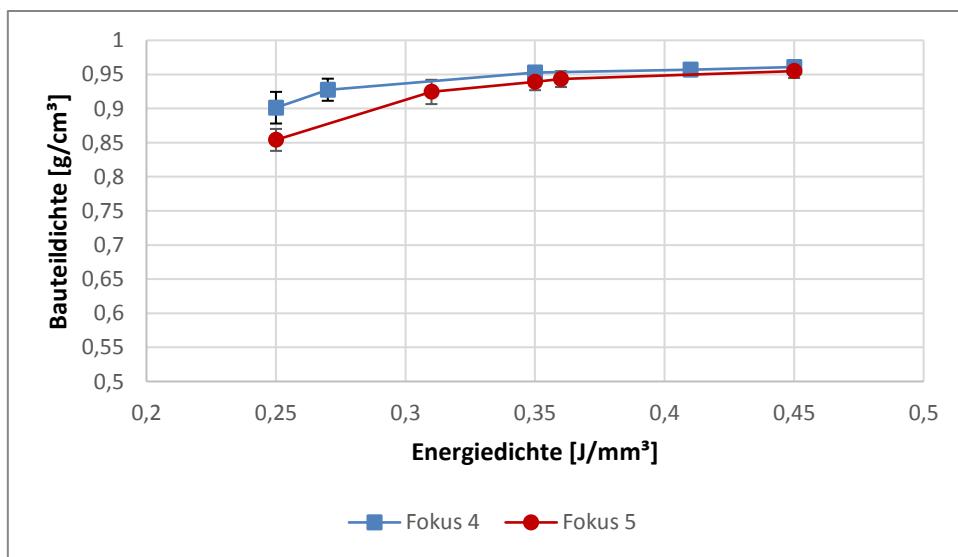


Abbildung 53: Bauteildichte der Fokusstufe 4 und 5

Eine mögliche Erklärung lieferte der Blick auf das Baufeld während des Prozesses. Ein nicht verschmolzener Steg aus pulverförmigen Ausgangsmaterial blieb bevorzugt bei den größeren Fokusstufen stehen. Daher konnte vermutet werden, dass die Anbindung der Kontur zum Fill nicht fehlerfrei erfolgte. Zur Prüfung dieser Vermutung wurden Dünnschnitte der Proben erstellt.

Die Dünnschnittuntersuchungen zeigten, dass gegenläufig zur entstehenden Bauteildichte der Fill zu niedrigeren Energiedichten deutlich weniger und kleinere Poren aufweist, als es im vermeintlich optimierten Zustand der Fall war (vgl. Abbildung 54). Während sich bei kleinen Fokusstufen eine optimierte Bauteildichte bei Energiedichten um $0,4 \text{ J/mm}^3$ einstellt, verschiebt sich das optimierte Gefüge der reinen Bauteildichte hin zu niedrigeren Energiedichten bis zu $0,25 \text{ J/mm}^3$. Besonders auffällig ist hierbei, dass der gemessene Wert der Bauteildichte bei $0,4 \text{ J/mm}^3$ am höchsten war. Runde Poren entstehen bei der Zersetzung des Ursprungsmaterials, während kantige Poren ein Anzeichen für einen nicht ausreichenden Energieeintrag sind. Der Übergang zwischen runden und kantigen Poren kann dabei auch gleichzeitig auftreten.

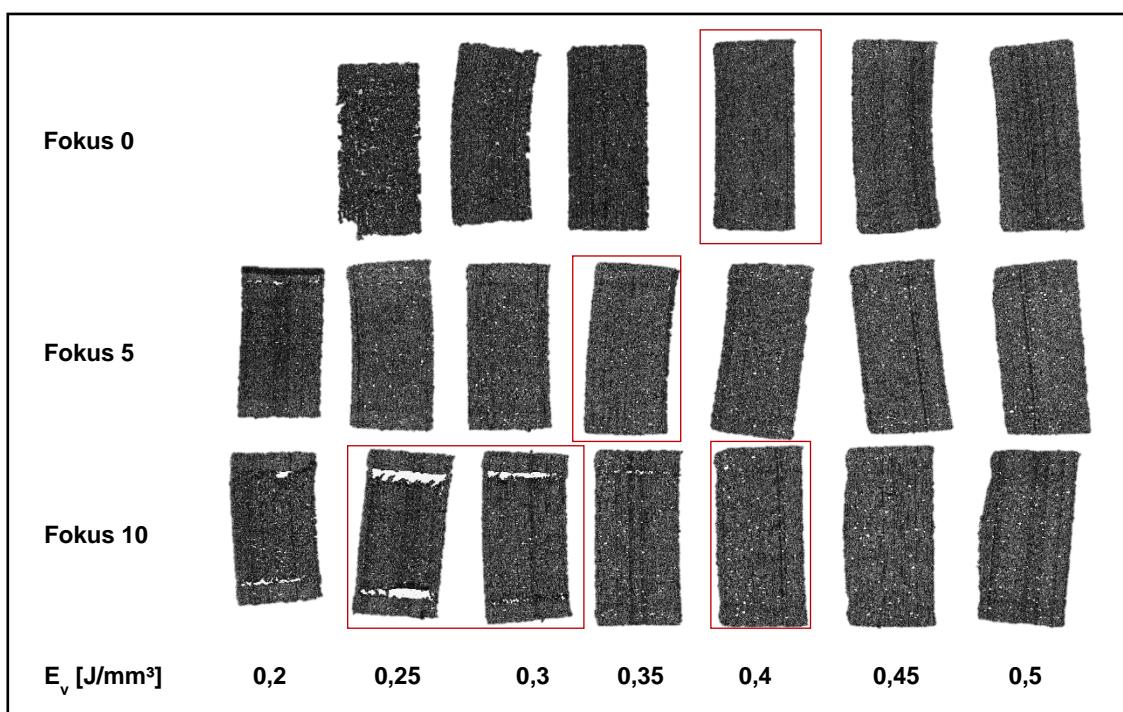


Abbildung 54: Dünnschnitte an verschiedenen Fokusstufen

Mögliche Ursachen für diese gegenläufigen Ergebnisse können die verbesserte Anbindung zwischen Kontur und Fill bei höheren Energiedichten sein. Ist der poröse Raum zwischen Kontur und Fill bei niedrigen Energiedichten noch in Schnittrichtung zu sehen, ist dieser bei höheren Energiedichten ab $0,4 \text{ J/mm}^3$ nicht mehr signifikant. Dafür steigt jedoch die Porosität durch stattfindende Zersetzungseffekte. Der Effekt der Konturanbindung überlagert demnach den der Zersetzung und führt bei der klassischen Messung zu einer Verfälschung der ermittelten Bauteildichte. Alle erreichten Ergebnisse bezüglich der Bauteildichte sind in nachfolgender Tabelle enthalten. Dabei werden die Daten aus dem Datenblatt ausnahmslos erfüllt, obwohl die Randeffekte der Kontur die Bauteildichte reduzieren.

Tabelle 5: Maximale Bauteildichte nach Fokusstufe

| Fokusstufe | Maximale Bauteildichte [g/cm ³] | Energiedichte [J/mm ³] |
|-----------------|---|------------------------------------|
| Fokus 0 | 0,95 | 0,5 |
| Fokus 1 | 0,953 | 0,5 |
| Fokus 2 | 0,954 | 0,4 |
| Fokus 3 | 0,958 | 0,45 |
| Fokus 4 | 0,96 | 0,45 |
| Fokus 5 | 0,955 | 0,45 |
| Fokus 6 | 0,948 | 0,45 |
| Fokus 7 | 0,944 | 0,45 |
| Fokus 8 | 0,939 | 0,4 |
| Fokus 9 | 0,931 | 0,4 |
| Fokus 10 | 0,907 | 0,4 |

Um eine Überprüfung der Verfälschung durch die Kontur zu realisieren, wurde ein Dichtewürfel der Fokusstufe 10 geschält. Der ursprüngliche Maximalwert aus Tabelle 5 konnte durch das Entfernen der Kontur auf 0,94 g/cm³ gesteigert werden und bestätigt damit den signifikanten Einfluss der Konturanbindung auf die resultierende Bauteildichte. Zur Reduzierung des Effektes der Verfälschung wurde der Offset zur Kontur ab der Fokusstufe 5 für die mittlere Energiedichteneinstellung entsprechend angepasst und die Parameter der doppelten Konturbelichtung optimiert. Die Fokusstufen 5-7 konnten so ebenfalls bei einer geringeren Energiedichte von 0,35 J/mm³ Probekörper oberhalb der Bauteildichte von 0,94 g/cm³ fertigen.

Zusammenfassend konnten alle Fokusstufen als robuste Parameter qualifiziert werden. Nach optischen Bewertungen und einer Korrelation der Bauteildichten wurden Standardparameter für die Zugproben definiert.

Zugproben

Eine Zugprobe stellt einen multifunktionalen Probekörper dar, der zur Ermittlung der mechanischen Kennwerte des E-Moduls, der Bruchdehnung und der Zugfestigkeit dient. Weiterführend kann eine Zugprobe auch zur Oberflächenrauheit und zur Ermittlung des Verzuges herangezogen werden.

Die im vorangegangenen Kapitel ermittelten Standardparameter für jede Fokusstufe wurden für eine Versuchsreihe von liegenden und stehenden Zugproben verwendet. In einem Bauprozess befinden sich jeweils 32 liegende und 32 stehende Zugproben. Insgesamt konnten alle Fokusstufen in zwei Bauprozessen abgehandelt werden. Nach erfolgreicher Validierung der Prozesssicherheit wurden sechs weitere Bauprozesse mit einer Gesamthöhe von 220mm mittels statistischer Versuchsplanung geplant und durchgeführt. Variiert wurden dabei die verwendeten Laserleistungen und der Spurweitenabstand im Fill für jede Fokusstufe. Gefertigt wurden in dem 2²-voll faktoriellen Versuchsplan

jeweils drei Realisierungen mit jeweils drei Proben und einem Zentralpunktversuch. Die Versuchsreihen wurden in der KW 24 2018 beendet.

Die ersten Teilergebnisse liegen bereits vor. Noch konnte keine Versuchsreihe komplett ausgewertet werden. Eine rudimentäre Auswertung der vorliegenden Ergebnisse lässt jedoch vermuten, dass robuste Prozessparameter mit reproduzierbaren Ergebnissen erzielt wurden. In Abbildung 55 sind die qualitativ hochwertigsten Ergebnisse der Fokusstufe 4 dargestellt. Erreicht wird eine mittlere Bruchdehnung von $21,2 \pm 0,5\%$ der E-Modul liegt bei 1798 ± 11 MPa und die Zugfestigkeit kann mit $49 \pm 0,3$ MPa quantifiziert werden. Die geringen Standardabweichungen der Proben können dabei ein Indiz einer gesteigerten Reproduzierbarkeit darstellen.

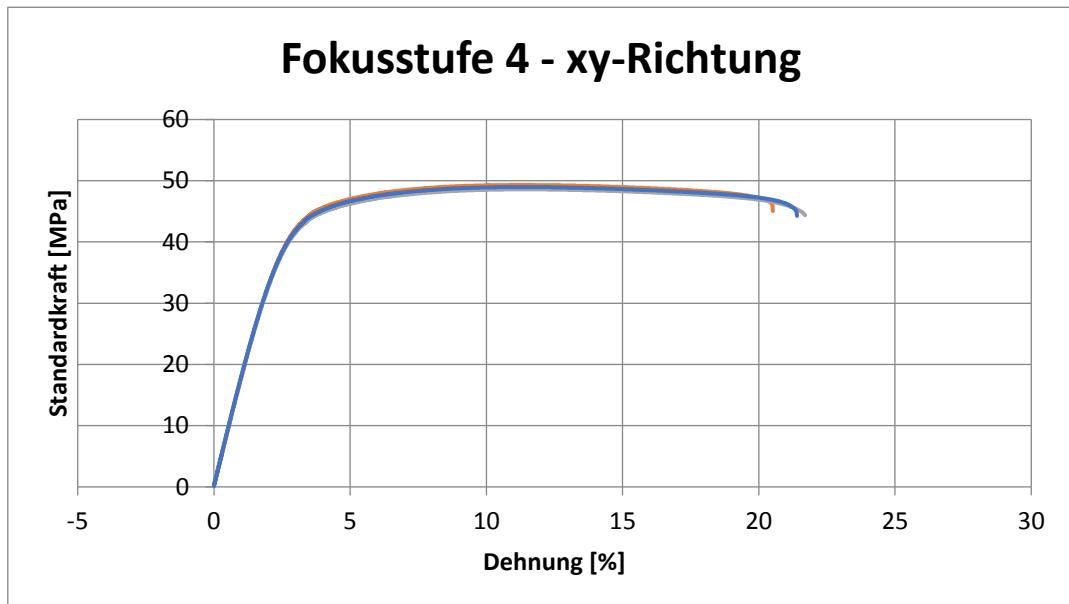


Abbildung 55: Zugfestigkeit der Fokusstufe 4 in xy-Richtung

Ähnlich sieht es innerhalb der größeren Fokusstufen aus. Die zusammengefassten Werte der Zugprüfung sind in Tabelle 5 aufgelistet. Dargestellt sind die Größen der E-Modul (E_t), der Zugfestigkeit (s_m) und der Bruchdehnung (e_B) mit den jeweiligen Standardabweichungen (STABW) und den zwei betrachteten Fokusstufen-Variationen

Tabelle 6: Weitere Ergebnisse der Zugprüfung

| | E_t [MPa] | STABW | s_m [MPa] | STABW | e_B [%] | STABW |
|---------------------|-------------|-------|-------------|-------|-----------|-------|
| Fokusstufe 6 | 1796,3 | 55,05 | 48,80 | 0,066 | 21,72 | 0,88 |
| Fokusstufe 7 | 1738,36 | 63,3 | 48,42 | 0,94 | 23,90 | 1,41 |

Die Ergebnisse lassen jedoch noch keine allgemeingültige Schlussfolgerung zu. Die zukünftigen Ergebnisse werden vollständig ausgewertet und auch der Öffentlichkeit in Form von wissenschaftlichen Papern und/oder einer Dissertationsschrift veröffentlicht.

Produktivitätssteigerung

Signifikanten Einfluss auf die gesamte Prozesszeit hat die Belichtung, die das pulverförmige Ausgangsmaterial in Schmelze überführt. Beim Laser-Sintern wird dies Anhand eines Laserstrahls

realisiert, der auf der Baufelddoberfläche in den zu erzeugenden Querschnitten abgelenkt wird. Im Stand der Technik wird zugunsten einer detailgetreuen Darstellung ein möglichst kleiner Fokussdurchmesser verwendet, welcher einen geringen Spurbreitenabstand zulässt. Erweitert wurde der Stand der Technik mit einem größeren Fokus, der einen signifikant höheren Spurbreitenabstand fahren kann, um großflächige Bauteile schneller Belichten zu können. Das theoretische Potenzial dieser Vorgehensweise kann der Abbildung 56 entnommen werden. Hierbei wurde die Trägheit der Spiegel beim Umkehren der Richtung, sowie die Vorgänge des Beschleunigens und des Abbremsens nicht weiter berücksichtigt. Betrachtet wird die benötigte Zeit für eine $170 \times 10 \text{ mm}^2$ Fläche bei unterschiedlichen Spurbreitenabständen, die aus den einstellbaren Fokussdurchmessern entstehen. Im Sinne der Vergleichbarkeit werden hier technische Ansätze, die Multi-Laser-Anwendungen verwenden, nicht berücksichtigt.

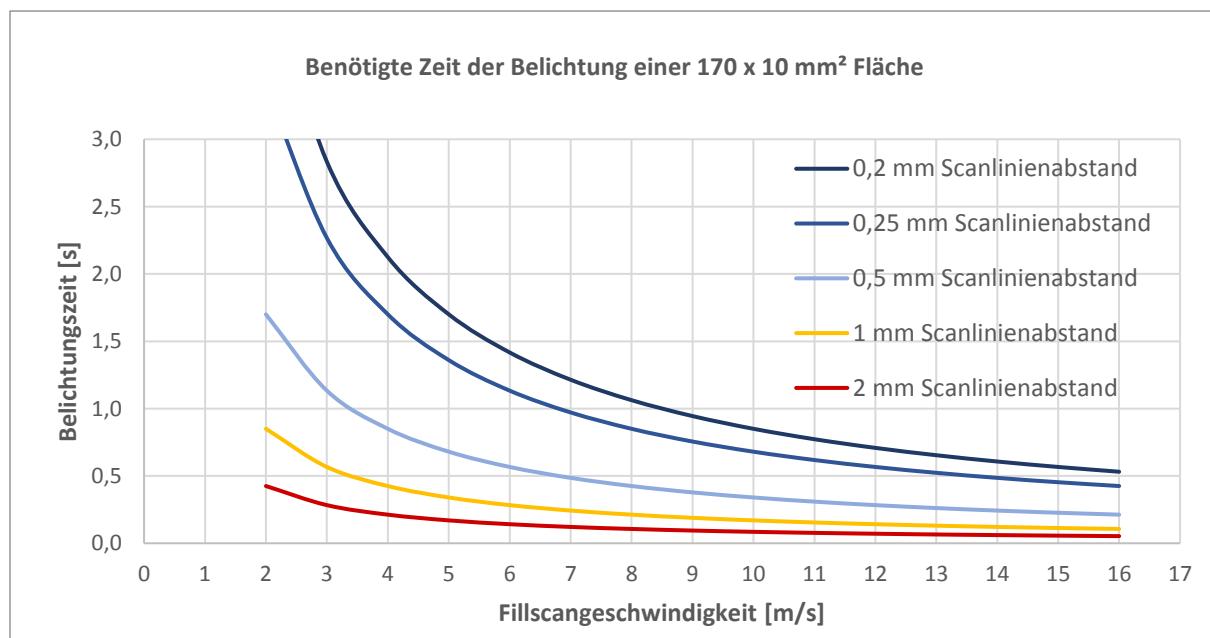


Abbildung 56: Zeitabhängiger Belichungsverlauf unterschiedlicher Spurbreiten bei variierenden Scangeschwindigkeiten

Aus der Abbildung kann entnommen werden, dass der Einfluss der Scangeschwindigkeit lediglich einen sekundären Einfluss auf die benötigte Zeit nimmt. Der derzeitige Stand der Technik ist in der Lage den Fokus mit bis zu 15 m/s auf dem Pulverbett zu bewegen [56, 69]. Damit würde die schnellste Anlage, die es gemäß Datenblatt gibt, für die betrachtete Fläche ca. 0,567 Sekunden bei einem Scanlinienabstand von 0,2 mm benötigen. Laut Anforderungskatalog sollte eine Spotgröße von 4 mm realisiert werden, während der Scanner in der Lage ist mit einer Dynamik von bis zu 4 m/s zu belichten. Aus diesen Spezifikationen ergibt sich eine theoretische Belichtungszeit von 0,213 Sekunden, was einem Faktor von ca. 2,7 entspricht. Realisier werden konnte jedoch nur eine Spurbreite von 0,86 mm bei einer Spotgröße von 2 mm, was bei 4 m/s Scangeschwindigkeit zu einer theoretischen Belichtungszeit von 0,494 Sekunden führen würde. Damit wurde die Produktivität der Querschnittbelichtung um den Faktor 1,15 im Vergleich zum Stand der Technik verbessert.

Bei den angegebenen Werten sollte erwähnt werden, dass eine Überprüfung der tatsächlichen Geschwindigkeiten nicht stattfinden kann, da hier lediglich Werte aus einem Datenblatt übernommen wurden. Die Vergleichsanlage in diesem Projekt stellt eine Formiga P100 der Firma EOS dar. Diese arbeitet innerhalb des Standard-Parameters für optimierte mechanische Eigenschaften mit einem Hatch von 0,25 mm bei 2,5 m/s und einer Laserleistung von 21 Watt. Demnach würde die Vergleichsanlage für den oben genannten Querschnitt 2,72 Sekunden benötigen. Resultierend beträgt der theoretisch errechnete Faktor der erreichten Produktivitätssteigerung damit 5,5.

Bei der Betrachtung eines realen Prozesses, der auf der Versuchsanlage mit der Fokusstufe 10 gefertigt wurde (vgl. Kapitel Zugproben), setzt sich die Gesamtzeit des Prozesses gemäß Abbildung 57 aus Achsenbewegung, Pulverauftrag, Vorheizzeit, Belichtungszeit und einer Totzeit zusammen. Alle Prozessschritte zusammen ergeben eine Gesamtzeit von 452 Minuten (7 Stunden 32 Minuten). Derselbe Baujob wurde in die Formiga P100 geladen und ergab eine errechnete Zeit von 1024 Minuten (17 Stunden 4 Minuten). Dies ergibt eine resultierende Produktivitätssteigerung im Vergleich zur Vergleichsanlage um den Faktor 2,27.

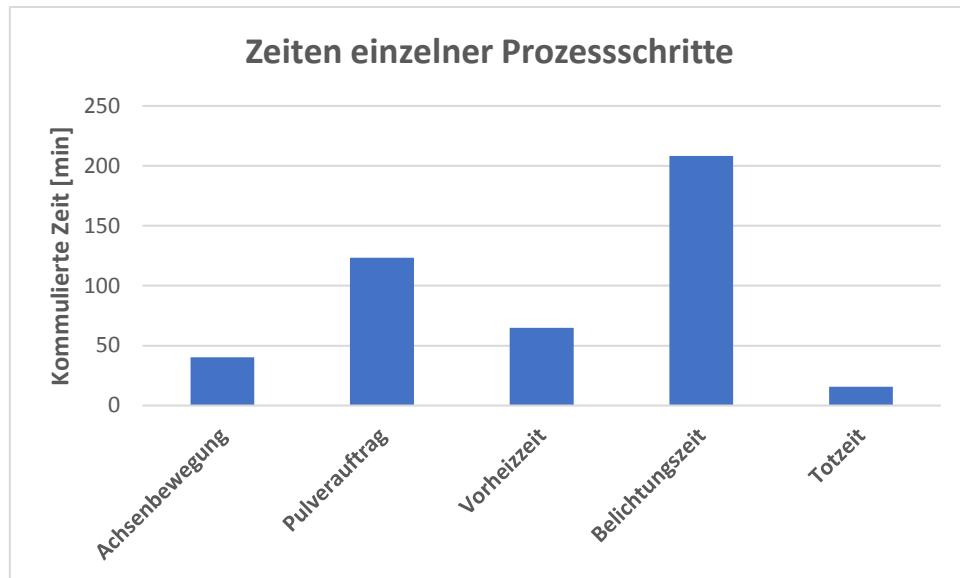


Abbildung 57: Log-Zeiten der einzelnen Prozessschritte

Die vorliegenden Werte beinhalten noch wesentliches Verbesserungspotential für die Serienanwendung. Jede einzelne Auslösung des Triggerpunktes verursacht ein Delay von etwa einer halben Sekunde. Zudem benötigt die Handshake-Logik zwischen der Charon-Steuerung und dem Versuchsstand eine weitere halbe Sekunde. Die Achsenbewegung wurde sequenziell realisiert und sollte in nachfolgenden Schritten parallel stattfinden. Diese Optimierung würde so pro Schicht ca. 0,8 Sekunden einsparen. Der Pulverauftrag verliert im Versuchsbetrieb bei jeder Schicht durch das verhältnismäßig sanfte Anfahren jeweils eine ganze Sekunde. Kumuliert ergeben sich so bereits 2,8 Sekunden Einsparpotential pro Schicht, was bei einem Prozess mit 1900 Schichten bereits 88,6 Minuten Prozesszeit ausmacht. Das größte Optimierungspotenzial befindet sich jedoch nach wie vor in den einzelnen Belichtungszeiten, weshalb nachfolgend genauer auf die unterschiedlichen Belichtungsstrategien eingegangen wird.

In Abbildung 58 sind die Belichtungszeiten bei der niedrigsten Fokusstufe der höchsten Fokusstufe gegenübergestellt. Die blaue Linie kennzeichnet dabei den Prozess, indem Zugproben mit der Fokusstufe 0 sowie der Fokusstufe 1 gefertigt wurden. Im selben Diagramm sind die Daten eines Bauprozesses geladen, der von der Anordnung der Bauteile identisch ist, jedoch die Fokusstufe 10 verwendet (orangene Linie).

Vergleich der Belichtungszeit unterschiedlicher Fokusstufen

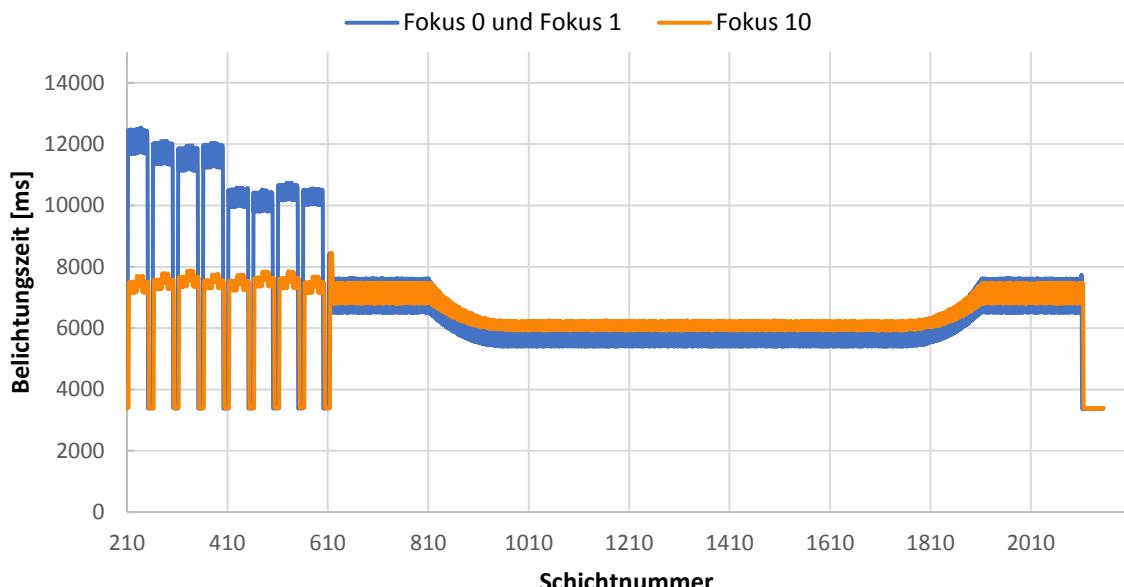


Abbildung 58: Zeitlicher Vergleich unterschiedlicher Fokusstufen an liegenden und stehenden Zugproben

Auffällig sind hierbei die signifikanten Verbesserungspotenziale, die aus der Scanstrategie resultieren können. Hieraus ergibt sich die Forderung, dass die Fokusstufe nicht Bauteilbezogen, sondern auf den Querschnitt bezogen werden sollte. Der Unterschied in der Belichtungszeit zwischen Fokusstufe 0 und Fokusstufe 1 beträgt bei den großen Querschnitten bis zur Schichtnummer 600 der liegenden Zugproben bereits mehr als 1,7 Sekunden pro Schicht. Die Fokusstufe 10 erreicht in diesem Bereich sogar eine Zeiteinsparung von rund 4,5 Sekunden. Anders sieht dies jedoch bei den stehenden Zugproben aus. Hier benötigt die Fokusstufe 10 mehr Zeit pro zu belichtende Schicht. Dies kann eine Folge der doppelten Konturbelichtung sein, die bei höheren Fokusstufen notwendig wurde, um die Darstellung der Bauteile zu gewährleisten. Dabei holen die niedrigen Fokusstufen pro Schicht bis zu ca. 0,8 Sekunden auf. Im direkten Vergleich ist die Fokusstufe 10 mit 452 Minuten um 68 Minuten schneller als es die Fokusstufe 0 und 1 sind. Dies zeigt, dass große Fokusdurchmesser erst ab einer großen Belichtungsfläche zu einer Produktivitätssteigerung führen können. Durch die Anpassung der Fokusstufe auf die zu fertigenden Bauteile kann eine Optimierung der Bauzeit des Referenzprozesses um weitere 10,6 Minuten durchgeführt werden. Ein zusätzlicher Aspekt dieser Anpassung wäre eine Gewährleistung außenliegender und filigraner Bauteiloberflächen.

Das Gesamtpotenzial des aufgebauten Versuchsstandes im Bereich der Produktivitätssteigerung wird nachfolgend betrachtet. Ausgehend von der bereits realisierten Bestmarke von 452 Minuten, werden die benannten Ansätze als optimiert betrachtet und eine theoretische Prozesszeit errechnet. In Abbildung 58 ist es auffällig, dass sogar in Schichten, in denen keine Querschnitterzeugung stattgefunden hat, eine Belichtungszeit von > 3 Sekunden benötigt wird. Diese Delays sind durch den nicht ausgereiften Technologiestand des Versuchsstandes begründet und zu einem großen Teil nicht notwendig. Diese lassen sich durch Optimierung der Programmierung in einem ausgereiften System auf weniger als 0,5 Sekunden reduzieren, wodurch sich bei 1900 Schichten eine zusätzliche Zeitsparnis von 79 Minuten ergeben würde. Die erreichte Bauzeit (452 Minuten) würde sich also mit der Optimierung der mechanischen Komponenten und deren Delays um 88,6 Minuten, der Fokusstufenvariation um 10,6 Minuten und durch programmiertechnische Optimierung der Belichtungszeiten zusätzlich um bis zu 79 Minuten verringern. Die theoretisch erreichbare Bauzeit, die durch Ausreifung der aufgeführten Ansätze erreicht werden kann, beträgt demnach rund 274 Minuten.

(4 Stunden 34 Minuten). In Bezug auf die Vergleichsanlage entspricht dies einer Produktivitätssteigerung um den Faktor 3,74.

Zusammenfassend konnte ein hohes Potenzial der Anlagentechnik in Bezug auf die Produktivitätssteigerung aufgedeckt werden. Der in den Anforderungen genannte Faktor von 5-10 konnte jedoch nicht erreicht werden. Gründe liegen in den Grenzen der technischen Machbarkeit innerhalb dieses Projektes. Mit einer modernen Laserquelle und leicht modifiziertem Optik-Komponenten können ggf. weitere Intensitätsprofile mit einer größeren Defokussierung getestet werden, die eine Konturbelichtung hinfällig machen.

Materialalterung

Die Materialalterung ist beim Laser-Sintern eine signifikante Größe. Die Auffrischrate und damit die Kosteneffizienz des Verfahrens hängen im Wesentlichen von der thermisch bedingten Nachpolymerisation im Bauprozess statt. Dieser Alterungsprozess ist sowohl temperatur-, als auch zeitabhängig [28, 70]. Aus diesem Grund beinhaltet ein schneller Bauprozess gleichzeitig die Synergieeffekte der geringeren Materialalterung.

Eine Methode, um die Materialalterung zu quantifizieren ist die Ermittlung der Melt-Volume-Rate (MVR). Hierbei wird eine Kunststoffschmelze bei definierten Temperaturen und Drücken durch eine Düse extrudiert. Die gealterten Moleküle sind beim Polyamid langkettiger, weshalb diese erschwert durch die Düse extrudiert werden können. Folglich steht ein niedriger MVR-Wert für ein altes Pulver.

Neupulver besitzt ein MVR-Wert von über 70 cm³/10 min. Das Pulver aus dem Bauraum besitzt aufgrund der zugefügten hohen thermischen Belastungen einen höheren Alterungszustand. Messungen aus einer Auspackstation am RTC-Duisburg ergaben einen durchschnittlichen MVR-Wert von 8,996 cm³/10min. Mit der von EOS empfohlenen Auffrischrate von 50 % Neupulver ergibt sich dadurch ein MVR-Wert von 37,0 +/- 3,7 cm³/10 min [67, 71]. Die MVR-Werte aus den Prozessen mit den Fokusstufen 0, 1 und 10 ergaben einen durchschnittlichen MVR-Wert des Partcakes von 20,34 cm³/10 min. Diese deutlich höhere Qualität des Pulvers lässt sich auf die verringerte Prozesszeit zurückführen. Folglich wurden Versuche zur Auffrischrate durchgeführt. Die Ergebnisse liefern eine neue Auffrischrate von lediglich 30 % Neupulver. Der durchschnittlich erreichte MVR-Wert beträgt 35,4 +/- 1,5 cm³/10 min und führte dazu, dass der Verbrauch an Neupulver um 20 % verringert werden konnte.

AP E.3 Schmelztemperaturen

Die Temperaturen der Schmelze sollen im AP E.3 ermittelt werden und mittels Überschreitung kritischer Grenzwerte zu einer robusten und reproduzierbaren Bauteilqualität führen. Hierfür wurde eine High-Speed-Thermografiekamera in den Versuchsstand integriert, die Einzellinien mit bis zu 10 kHz aufnehmen kann. In dem für das Lasersintern relevanten Bereich können noch Thermogramme mit einer Rate von 3 kHz aufgenommen und ausgewertet werden. Der Versuchsaufbau wird in Abbildung 59 dargestellt. Der Aufnahmewinkel der Thermogramme beträgt dabei ca. 25° zur Baufeldebene. Je nach Objektiv kann eine Detailaufnahme oder eine Aufnahme des gesamten Bauraumes erfolgen. Da die Kamera außerhalb der Optik-Komponenten eingebaut wurde, muss keine aktive Kühlung vorgesehen werden. Je nach Anforderungen kann durch ein ZnSe- oder einem Saphirglas-Fenster thermografiert werden.

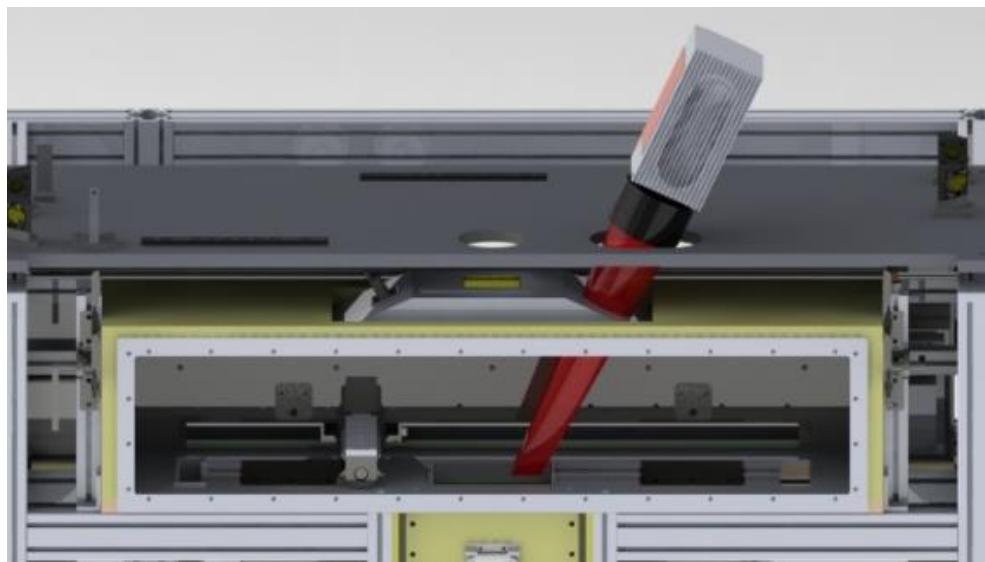


Abbildung 59: Einbaubedingungen der Thermografiekamera Image IR 5300

Im Verlaufe des Projektes konnten Daten zu jeder einstellbaren Fokusstufe gesammelt werden. Dies betrifft Einzelspurversuche, verschiedene Spurbreitenabstände, Dichtewürfel und Zugproben. Diese Rohdaten müssen mit diversen Korrekturfaktoren wie beispielsweise Emissionsgrad des Pulvers, Emissionsgrad der Schmelze, Transmissionsgrad der Messstrecke und Störgrößen erweitert und ausgewertet werden. Da die Versuchsdurchführung sehr zeitintensiv waren, konnten die gesammelten Daten noch nicht vollständig ausgewertet werden. Die generierten Daten werden ausgewertet und die Ergebnisse in Form von wissenschaftlichen Artikeln veröffentlicht.

AP E.4 Homogener Energieeintrag

Die homogenen Energieeinträge werden anhand der Thermografieaufnahmen an den Dichtewürfeln Zugproben ermittelt. Wichtige Kenngrößen sind hierbei die Heiz-Rate, die Maximaltemperatur und die approximierte Temperatur nach 10 Sekunden im Schmelzequerschnitt. Zudem wird nach der Streuung der Temperaturen im einzelnen Querschnitt und im Bezug aufeinander ausgewertet. Die generierten Daten werden ausgewertet und die Ergebnisse in Form von wissenschaftlichen Artikeln veröffentlicht.

AP E.5 Maßnahmen

Mit genauer Kenntnis der Auswirkungen eines vergrößerten Fokusdurchmessers können Maßnahmen definiert werden, die zu einer Erhöhung der Reproduzierbarkeit lasergesinterter Bauteile führen. Die generierten Daten werden ausgewertet und die Ergebnisse in Form von wissenschaftlichen Artikeln veröffentlicht.

AP F Bauteilprüfung

Federführung: Festo AG & Co. KG, Esslingen
Co-Federführung: BMW AG, München

Die zugeordneten Arbeitspakete lassen sich inhaltlich wie folgt umsetzen:

- Durchführung von qualitätsrelevanten Untersuchungen an unterschiedlichen LS-Prüfkörpern
- Validierung der Teilequalität bezüglich Reproduzierbarkeit (Geometrie und technische Funktionalität) zwischen aktuellen Anlagen der Projektpartner
- Dokumentation und Interpretation der Ergebnisse nach bestimmten statistischen Prozesskriterien
- Bewertung und Interpretation der Ergebnisse

Die ab dem folgenden Kapitel aufgeführten Ergebnisse basieren auf Prüfkörpern, die von unterschiedlichen Projektpartnern hergestellt wurden (Siehe Abbildung 60)



Abbildung 60: Vielfalt der im Projekt hergestellten und untersuchten Prüfkörper

In einem (von insgesamt 3) Baujob wurden jeweils 15 verschiedene Prüfkörper in unterschiedlichen Mengen generiert. Sämtliche Prüfkörper sind zum Zweck der eindeutigen Zuordnung mit der Seriennummer des jeweiligen Baujobs und des entsprechenden Herstellers beschriftet.

Die Teile für die nicht von Festo durchgeführten Untersuchungen wurden danach zu dem jeweiligen Projektpartner zurückgesandt, der für dieses Teil die Prüfung übernimmt.

Um die Maßhaltigkeit der Anlage zu prüfen und reproduzierbare Ergebnisse zu bekommen, wurden von jedem Projektpartner sukzessive 3 Baujobs hergestellt, die alle von der Bauraumplatzierung her identisch sind. Des Weiteren wurde für die additive Fertigung im Lasersinterprozess einheitlich PA12-Pulver aus demselben Pulverbatch, bereitgestellt durch die Firma EOS, verwendet. Insgesamt wurden 372 Proben von Festo geprüft

Abbildung 61 zeigt die Anordnung der Bauteile, die von Festo geprüft wurden, im Bauraum des jeweiligen Baujobs.

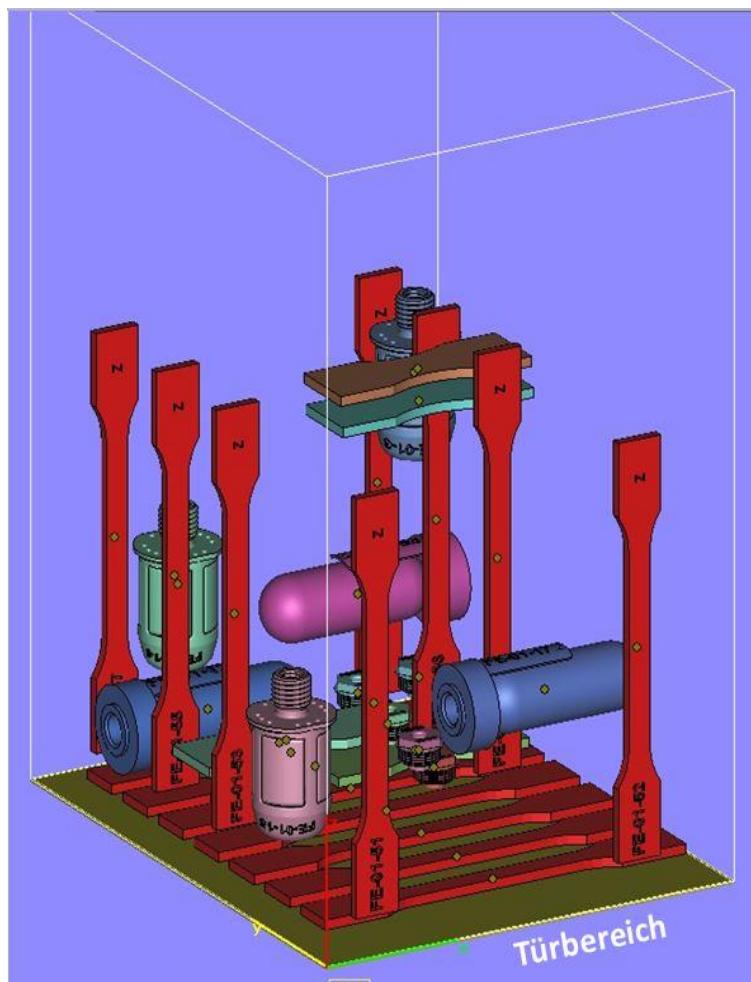


Abbildung 61: Anordnung der Probenteile im Bauraum

Anmerkung: Seitens BMW werden in Form von ASTM- Biege- / Kerbschlagprüfung weitere mechanische Untersuchungen sowie funktionale Untersuchungen an zusätzlichen Demonstratoren der Automobilbranche durchgeführt und separat dokumentiert

AP F.1 Werkstoffeigenschaften

Zugversuche

Für Zugversuche zur Ermittlung der mechanischen Kennwerte wurden in jedem Baujob 8 Zugproben stehend (Z-Richtung) und 7 Proben liegend (X-Richtung) aufgebaut, an unterschiedlichen Positionen im Bauraum. Die Proben wurden im vorderen, hinteren oder mittleren Bereich des Bauraums platziert

Die Zugstäbe sind nach DIN EN ISO 527 Probenform A gestaltet. Mit diesen Zugproben kann die Reproduzierbarkeit der mechanischen Eigenschaften bei statischer Belastung untersucht werden (siehe Abbildung 64)

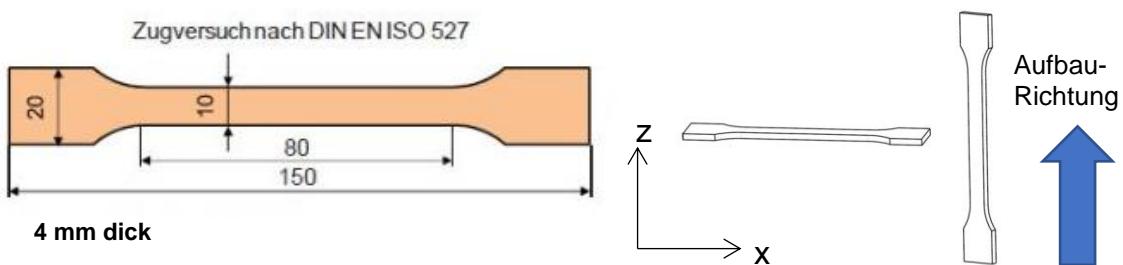


Abbildung 62: Zugproben Geometrie und Orientierung im Bauraum

Die Zugversuche wurden bei Raumtemperatur durchgeführt, wobei zur Ermittlung des E-Moduls mit einer Abzugsgeschwindigkeit $V_t = 1 \text{ mm/min}$ und der Zugeigenschaften mit $V_t = 500 \text{ mm/min}$ gezogen wurde. Vor der Zugprüfung wurden die Breite und die Dicke von den Proben mit einer Bügelmessschraube im hundertstel Bereich vermessen.

Im Rahmen der Zugversuche wiesen die additiv gefertigten Teile das gleiche Bruchverhalten wie spritzgegossene Teile auf. Die Zugproben schnüren nicht ein und hinterlassen keine bleibende Verformung. Da dieser PA12 Werkstoff ein relativ zähes Verhalten ohne ausgeprägte Streckgrenze aufweist, werden hier nur die Zugfestigkeit und die Bruchdehnung betrachtet und bewertet. Um die Qualität an diesen LS-Prüfkörpern zu untersuchen, werden die Ergebnisse nachfolgend hinsichtlich verschiedener Kriterien ausgewertet

Zugfestigkeit

Auswertung nach Partner und Baujob

Zu der Auswertung nach Partner und Baujob in X und Z Richtung wird der Mittelwert der Zugfestigkeit in MPa von den einzelnen Baujobs verglichen. Diese Werte sind unter den Balken in den Kästchen dargestellt

Zur besseren Veranschaulichung und Vergleichbarkeit wird hier die angegebene Zugfestigkeit von 48 MPa gemäß dem Materialdatenblatt des Pulverherstellers als schwarze Linie und die Standardabweichung bei allen Grafiken angezeigt

In den Abbildungen 76 bis 78 sind die Werte für die Zugfestigkeit R_m aller 3 Baujobs von den jeweiligen Partnern in beide Aufbaurichtungen aufgetragen.

Zugfestigkeit Rm in X-Richtung

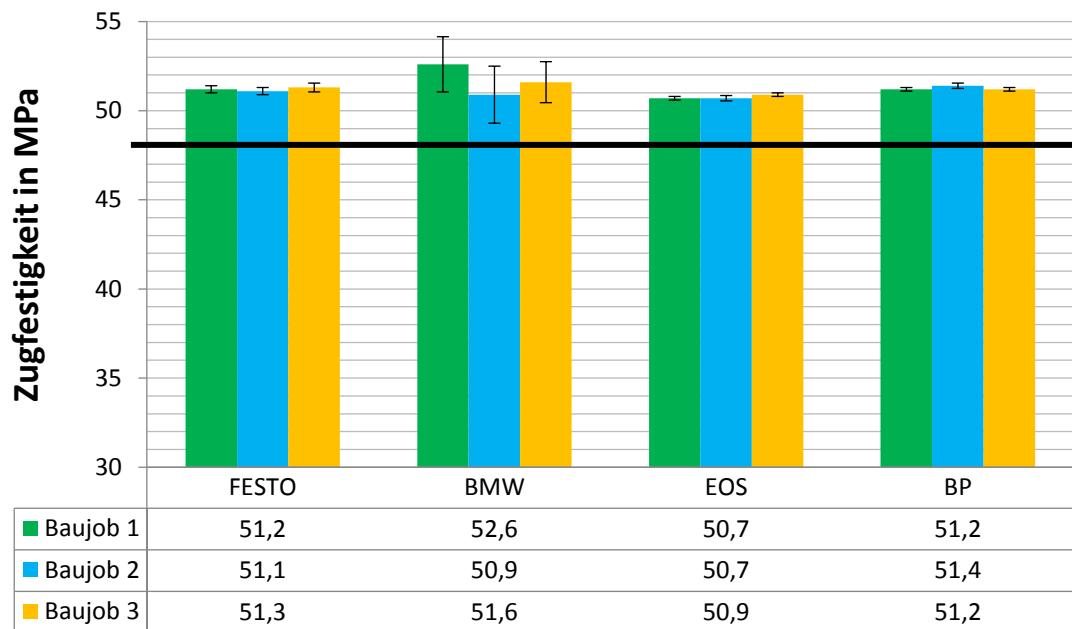


Abbildung 63: Auswertung der Zugfestigkeit nach Partner in X-Richtung

Zugfestigkeit Rm in Z-Richtung

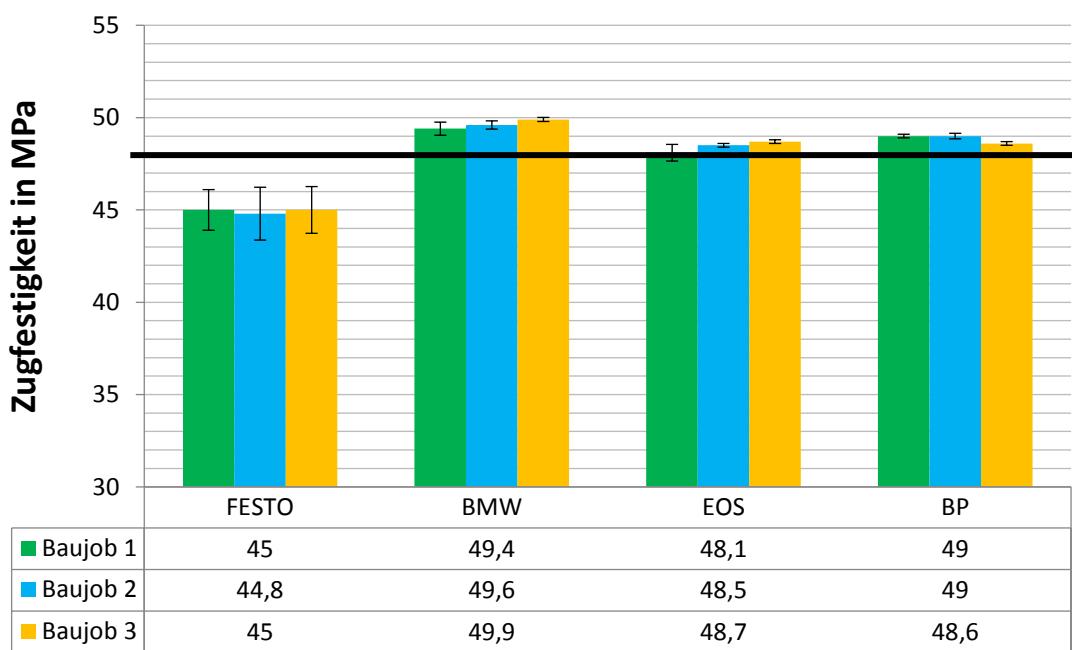


Abbildung 64: Auswertung der Zugfestigkeit nach Partnern in Z-Richtung

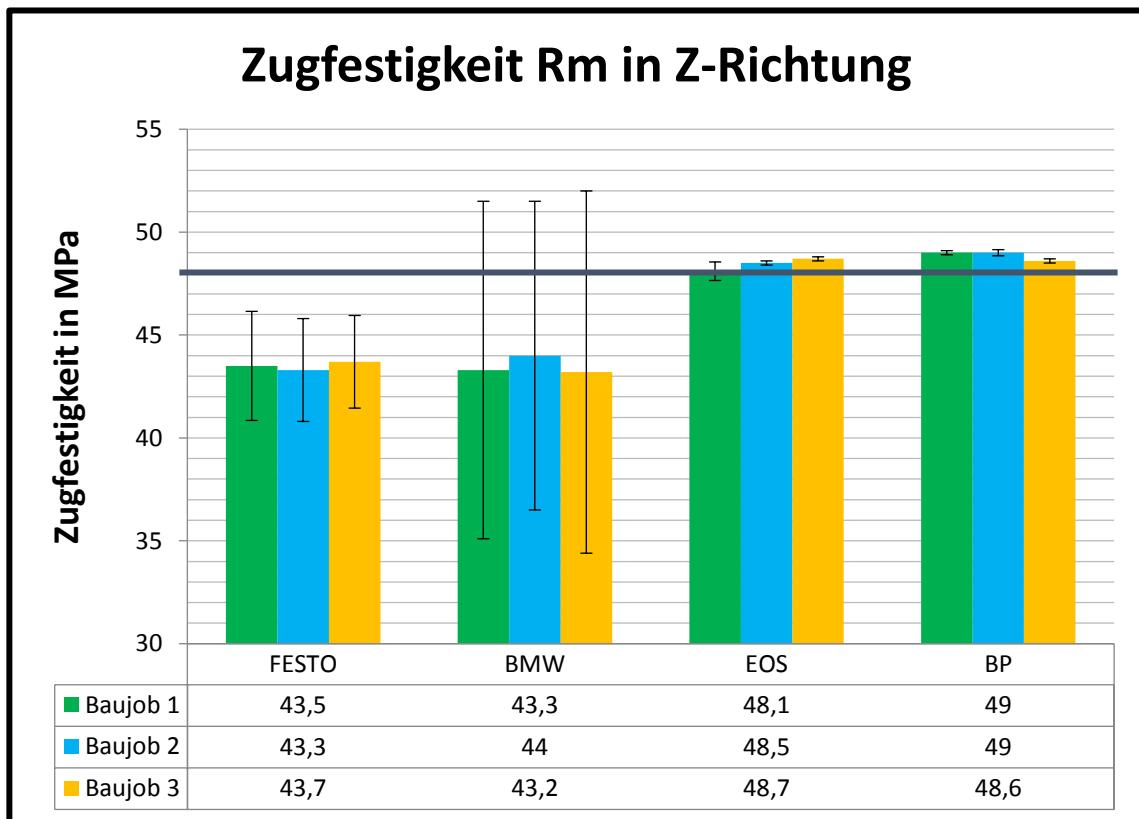


Abbildung 65: Zugfestigkeit in Z-Richtung mit Ausreißer

In der X-Richtung ist zu beachten, dass die Zugfestigkeiten oberhalb des Modellwerts liegen und sich nur geringfügig unterscheiden. Auffällig ist, dass die Werte von BMW in geringfügiger Weise eine größere Standardabweichung als bei den anderen aufweisen.

Für die Z-Richtung werden zwei Grafiken dargestellt, eine ohne Ausreißer und eine mit Ausreißer. Dies beruht darauf, dass zwei Proben von Festo und BMW, die sich am nächsten zur Anlagen-Türe befanden, wesentlich schlechtere Werte aufwiesen als die restlichen Proben. Dies beruht darauf, dass im Bereich der Tür eine große Temperaturschwankung zu sehen ist. Die Schichten sind nicht vollständig verschmolzen und viele Kerben sind vorhanden. Diese Schwachstellen führen zur geringen Festigkeit beim Zugversuch. Die Anzahl von Proben bei EOS und BP bleibt gleich. In den zwei Abbildungen ist zu erkennen, dass die Werte von Festo sich kaum geändert haben und noch unterhalb des Modellwertes liegen, wenn die Ausreißer nicht eingeschlossen werden. Wie abgebildet, ist die Standardabweichung der Proben von Festo in Z-Richtung im Vergleich zu den anderen Partnern größer. Die Werte der Zugfestigkeit bei BMW sind viel besser, wenn die Ausreißer ausgelassen werden.

Zusammenfassend betrachtet lässt sich sagen, dass (nur) EOS (BP wurde ebenfalls von EOS gefertigt) in beide Richtungen Proben mit geringerer Standardabweichung unter Einhaltung der Materialspezifikation hergestellt hat.

Bruchdehnung

Zur besseren Veranschaulichung und Vergleichbarkeit wird hier die angegebene Bruchdehnung von 24 % des Pulverherstellers EOS als schwarze Linie und die Standardabweichung bei allen Grafiken angezeigt.

Vergleich der mechanischen Kennwerte bei unterschiedlichen Belichtungsparametersätzen

Es gibt etliche verschiedene Belichtungsparameter für den Bauprozess, die „vorinstalliert“ mit Anlage und dem jeweiligen Material geliefert werden. Sämtliche Proben von Festo für dieses Forschungsprojekt sind zunächst mit dem Belichtungsparameter „Mechanics“ (auf der EOS P100-Anlage) gebaut. Mit diesem Parameter wird nur eine einzelne Konturbelichtung gefahren.

Speziell zur Herstellung druckdichter, dünnwandiger Teile wurde bei Festo in der Vergangenheit ein neuer Belichtungsparametersatz erarbeitet. Bei diesem Parametersatz, genannt „TRU“, wird die Kontur doppelt belichtet.

Im Rahmen dieses Projektes wurden Vergleichsproben bzw. Zugproben, Berstdruckprüfkörper und Deckel mit dem Belichtungsparameter „TRU“ (allerdings mit Material aus einem anderen Pulverbatch) gebaut. Die Position der Proben im Bauraum wurde gleich gehalten.

In Abbildung 66 sind die Ergebnisse der Zugfestigkeit und Bruchdehnung in die X-Richtung für die Zugproben von Festo, die mit dem „Mechanics“ bzw. den „TRU“-Belichtungsparametern gebaut wurden, aufgetragen. Bei den Ergebnissen der Zugfestigkeit ist zu erkennen, dass der Wert von den nachgelieferten TRU-Proben nur geringfügig von den Proben der anderen Projektpartner abweicht. Mit einer Zugfestigkeit von 48,5 MPa entspricht er auch dem Datenblattwert von EOS. Noch interessanter ist das Ergebnis der Bruchdehnung, da die Werte der Vergleichsproben, gebaut mit dem Belichtungsparameter „TRU“, etwa doppelt so groß sind wie bei den „Mechanics“-Proben und damit ebenfalls dem Datenblattwert von EOS entspricht.

Es zeigt sich, dass die Teile, gebaut auf einer P100-Anlage, bei der Wahl entsprechender Prozessparameter vergleichbare mechanische Eigenschaften wie bei der neueren P110-Anlage aufweisen können.

Analoges zeigt Abbildung 67 bei einem Vergleich der 2 Belichtungsparametersätze die Ergebnisse der Zugfestigkeit und Bruchdehnung in die Z-Richtung. Mit dem „TRU“ Belichtungsparameter ist die Bruchdehnung in Z-Aufbau-Richtung der Proben jedoch immer noch ungünstig, da die Ergebnisse deutlich unterhalb des Datenblattwertes liegen.

Vergleich der Belichtungsparameter [FESTO] X-Richtung

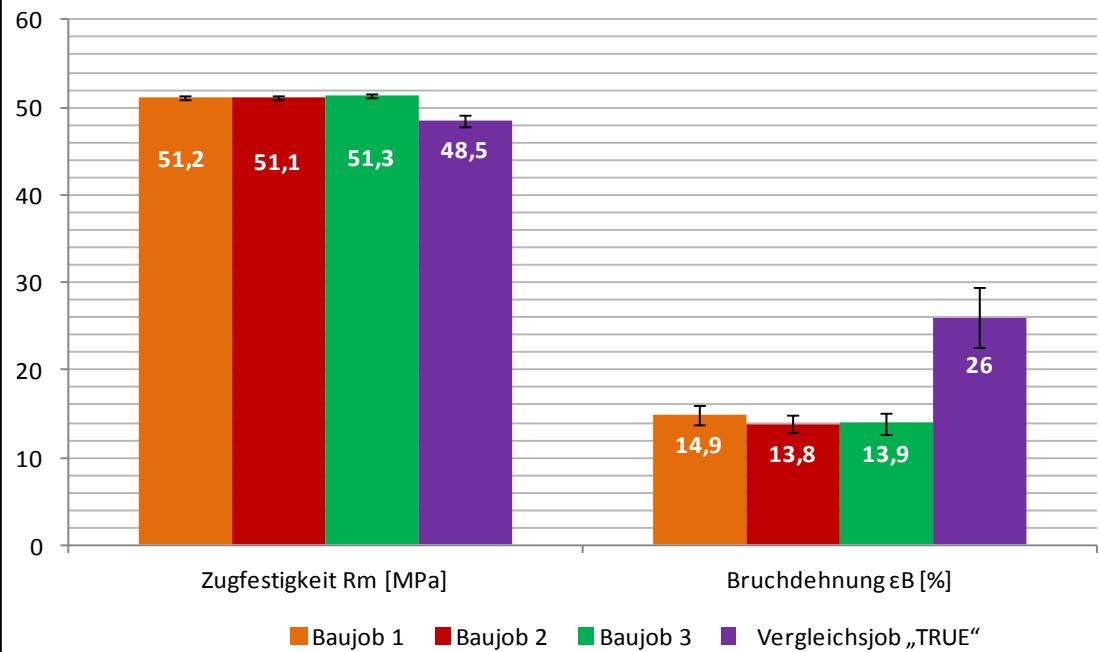


Abbildung 66: Vergleich der Belichtungsparameter in X-Richtung (Festo)

Vergleich der Belichtungsparameter [FESTO] Z-Richtung

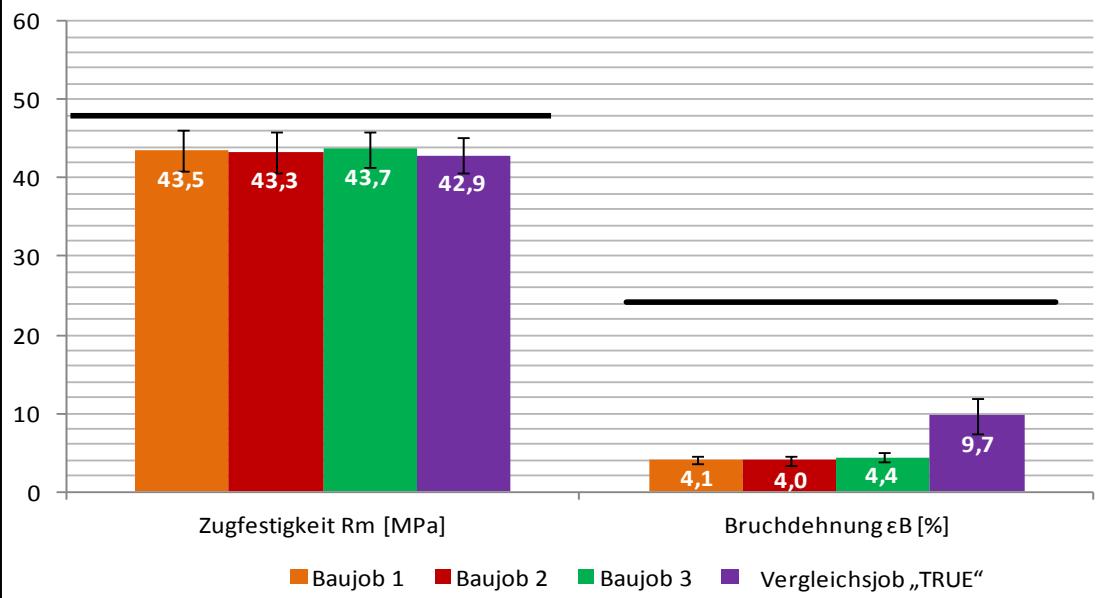


Abbildung 67: Vergleich der Belichtungsparameter in Z-Richtung (Festo)

AP F.2 Bauteileigenschaften

Berstversuche

Bei der **Berstdruckprüfung** wurden 3 Berstdruckprüfkörper (siehe Abbildung 68) pro Baujob generiert, die alle liegend aufgebaut wurden. In der Summe wurden die Berstdrücke von 36 Prüfkörpern ermittelt. Zu diesen Berstdruckprüfkörpern wurde auch eine Leckagemessung bei unterschiedlichen Drücken durchgeführt. Durch diese Prüfung lässt sich die Reproduzierbarkeit der Druckdichtheit von Teilen mit dünnen Wandstärken ermitteln.



Abbildung 68: Berstdruckprüfkörper

Leckagemessung

Die Bestimmung der Dichtheit von den Berstdruckprüfkörpern erfolgt durch die vor dem eigentlichen Berstversuch ausgeführte Leckagemessung. Die Leckage wurde alle 2 bar bis 12 bar gemessen und mit zwei verschiedenen Prüfmodi durchgeführt. Zum einen wurden die Messungen mit einer Entlüftungszeit von einer Minute dazwischen durchgeführt. Zum anderen wurden die Proben unmittelbar nach einer sukzessiven Erhöhung des Drucks gemessen. Als Ergebnis werden die Werte in Liter pro Stunde (l/h) angegeben. Um genauere Ergebnisse zu bekommen, wird die Stelle zwischen Adapter und der additiv gefertigten Probe mit einem Gummidichtring abgedichtet.

Die Ergebnisse der Leckagemessung zeigen die Dichtheit von den einzelnen Proben bei unterschiedlichen Druckniveaus. Die verschiedenen Kurvenfarben stehen hier für verschiedene Positionen im Bauraum. Die Werte der Leckage von den einzelnen Proben werden zusammen berechnet und der Mittelwert wird dann wie in Abbildung 69 dargestellt. Aus diesem Bild ist zu erkennen, dass die Proben von BMW, EOS und BP dicht sind, während die Proben von Festo eine Leckage aufweisen.

Ferner ist zu sehen, dass die Proben aller Partner eine größere Leckage mit zunehmendem Druck aufweisen, was vermutlich auf die Aufweitung der Mikroporen in der LS-Struktur zurückzuführen ist. Es konnte aber keine schlüssige Erklärung gefunden werden, warum die Werte nach 10 bar sinken.

Die Proben 1 und 17 von Festo weisen bei allen 3 Baujobs größere Leckage auf. Die Messung bei 12 bar ergab die höchste Leckage für die Probe 1 und 17 mit 130 l/h bzw. 80 l/h. Bei näherer Betrachtung ist festzustellen, dass es kleine Löcher in den Probenkörpern gibt. Die auf der Position 16 aufgebauten Proben haben geringere Leckage mit einem durchschnittlichen Wert von 5 l/h bei 12 bar.

Warum die Leckage bei den Proben von BMW, EOS und BP bei 12 bar im Vergleich zu 10 bar wieder abnimmt und nicht weiter ansteigt, konnte bisher nicht erklärt werden.

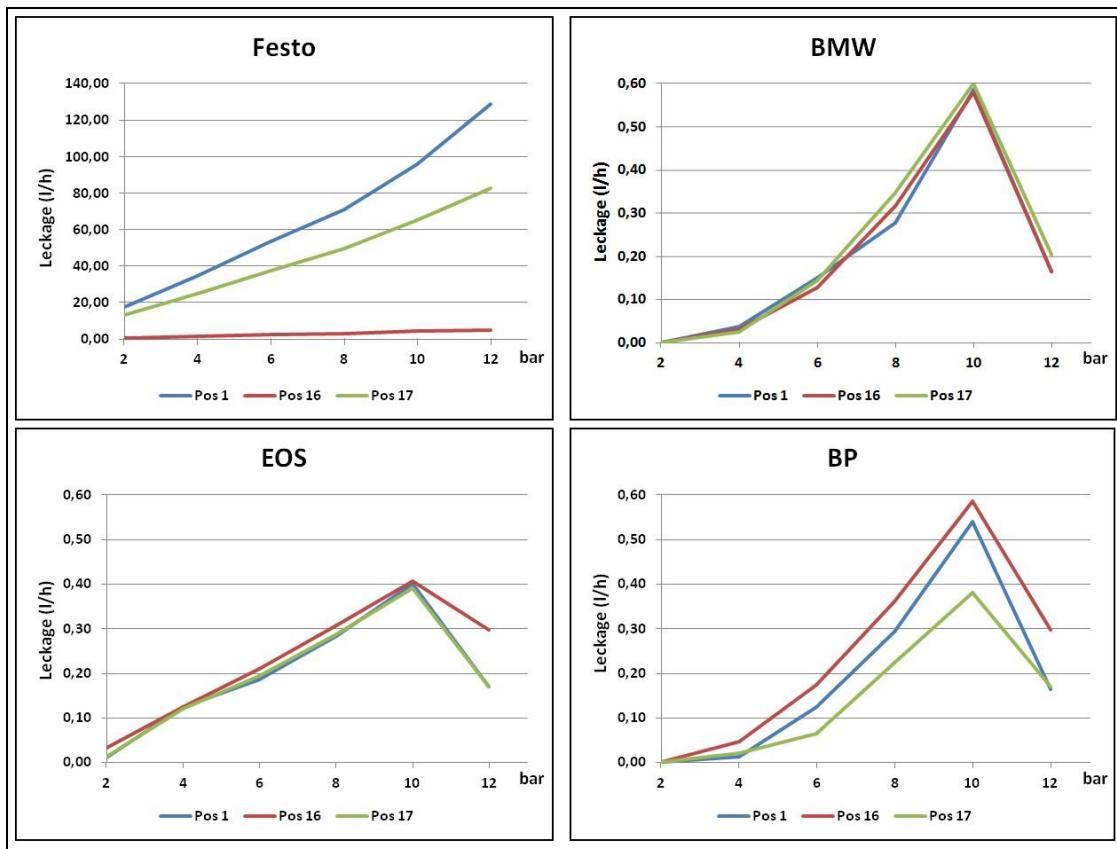


Abbildung 69: Ergebnisse der Leckagemessung

Die Anlagen zeigen trotz der Ergebnisse gute Reproduzierbarkeit, da die Werte pro Anlage zwischen den Baujobs nicht so sehr streuen.

Berstdruckversuche

Der verwendete Prüfstand wurde von Festo zur automatischen Ermittlung des Berstdrucks bei pneumatischen Komponenten mittels Druckluft entwickelt. Aus der Verwendung von Druckluft als Prüfmedium ergeben sich wesentliche Vorteile hinsichtlich der Sauberkeit, der einfachen und schnellen Durchführung einer Prüfserie und der Möglichkeit der Prüfung bei extremen Temperaturen, unter 0°C und über 150°C. Der Prüfablauf und die Bedienerführung wurden mittels SPS-Technik realisiert. Um die Bedienung möglichst einfach und übersichtlich zu halten, erfolgt die SPS-Steuerung über ein Touch-Panel, über welchen Prüfparameter eingegeben werden können und der aktuelle Stand der Prüfung visualisiert wird. Die Druckerzeugung und Prüfung bis 200 bar erfolgt innerhalb des Prüfstandes durch einen integrierten Kompressor. Die Druckrampen sind hierbei zwischen ca. 1 und 4 bar/s einstellbar. Die Temperierung des Prüflings erfolgt über ein optional anzuschließendes Konditionier-Gerät im Bereich von -40°C bis +150°C.

Für die im Rahmen des HiPer-LS-Projektes durchgeführten Berstdruckprüfungen wurde die Druckrampe-geschwindigkeit auf 1 bar/s eingestellt, da bei niedriger Rampengeschwindigkeit der Druck beim Bersten besser detektierbar ist. Darüber hinaus wurden Probekörper bei zwei unterschiedlichen Temperaturen 24°C und 60°C geprüft. Auf diese Weise kann zusätzlich der Einfluss der Temperatur auf den Berstdruck analysiert werden. Diese Prüfung ist besonders wichtig, da sie zeigt ob die Probekörper geeignet sind verschiedene Umgebungsbedingungen im Betrieb zuverlässig zu bestehen.

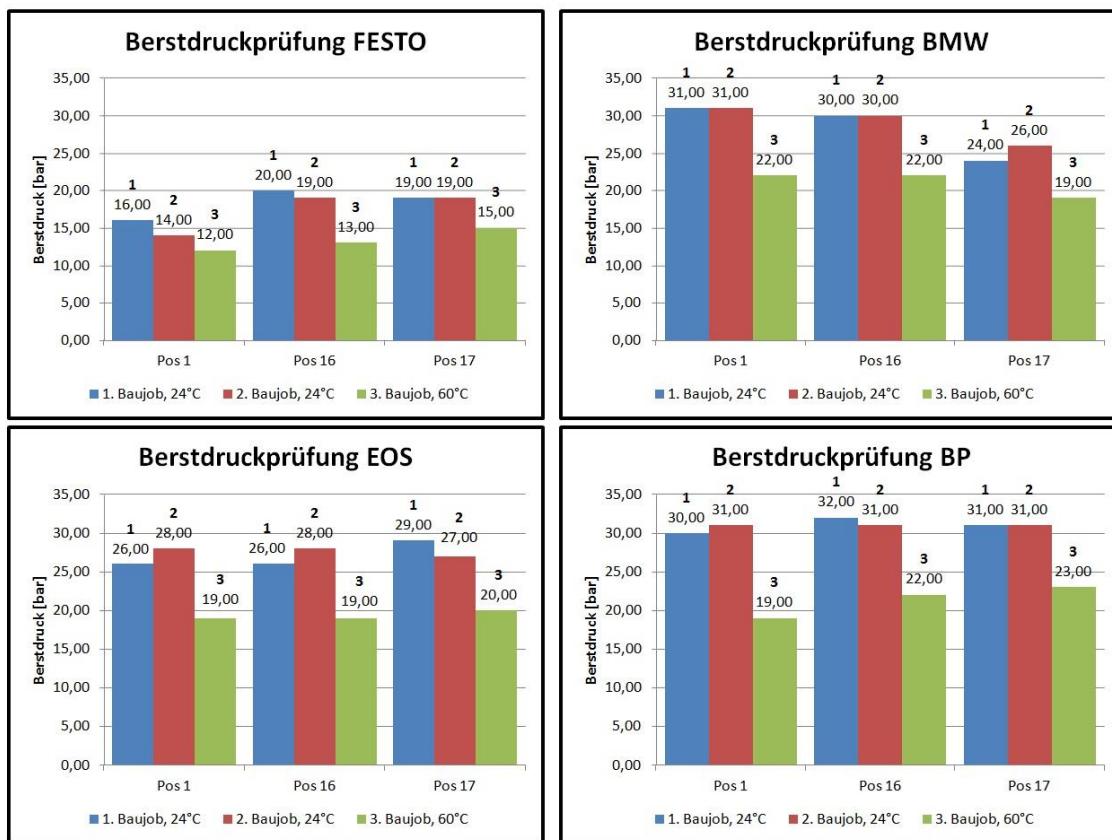


Abbildung 70: Ergebnisse der Berstdruckprüfung

Betrachtet wurde der minimale ertragbare Berstdruck des Probekörpers, d.h. es wurden die Berstdruckprüfkörper bei allen Baujobs liegend aufgebaut, da aufgrund von Erfahrungswerten die Probenqualität in dieser Aufbaurichtung am ungünstigsten ist.

Abbildung 67 zeigt den Vergleich der Berstdruckprüfung von verschiedenen Partnern. Hier werden die Proben nach ihrer Lage im Bauraum sortiert und ausgewertet. Die verschiedenen Balkenfarben stehen hier für die verschiedenen Baujobs. Die Proben aus dem 1. und 2. Baujob wurden bei Raumtemperatur geprüft. Die aus dem 3. Baujob wurden bei 60°C getestet.

Aus der Grafik ist zu erkennen, dass die erreichten Werte von Festo (gebaut mit dem Mechanics-Parameter) am kleinsten sind. Alle Werte sind niedriger als 20 bar. Die Werte, die mit den Proben der Projektpartner ermittelt wurden, pendeln grob um 30 bar.

Allgemein ist festzustellen, dass die Werte von Proben eines Partners sich nicht so stark voneinander unterscheiden, wenn diese bei Raumtemperatur geprüft werden. Wenn die Prüfung bei höherer Temperatur durchgeführt wurde, bersten die Proben bei geringerem Druck. Interessanterweise zeigen die BP-Proben etwas bessere Werte als die EOS-Proben auf, obwohl die Proben auch mit der neueren P110 Anlage gebaut wurden, d.h. auch innerhalb diesen Anlagentypes ist mit einer Varianz der Ergebnisse zu rechnen (selbst wenn möglichst viele Parameter konstant gehalten werden).

Eine Abhängigkeit der Berstdrücke zur Lage im Bauraum konnte dagegen nicht festgestellt werden.

Vergleich Berstdruck bei unterschiedlichen Belichtungsparametern

Wie bei dem Zugversuch wurden zu diesem Berstdruckversuch und der Leckagemessung auch die gleichen Proben mit dem (anderen) Belichtungsparameter „TRU“ von Festo gebaut. Die Position der Probe im Bauraum wurde nicht geändert. Das Ziel der Untersuchungen ist, zu bestimmen, ob durch die

doppelte Belichtung der Konturen bessere Ergebnisse erzielt werden können. Um die Wirkung des anderen Belichtungsparameters zu überprüfen müssen die Werte nur mit dem Ergebnis von Festo verglichen werden. Tabelle 6 zeigt das Ergebnis des Berstdruckversuchs von den Vergleichsproben. Wie in der Tabelle dargestellt wurden zwei von diesen Proben auf Raumtemperatur und die dritte auf 60°C geprüft.

Tabelle 7: Ergebnisse des Berstdruckversuchs von den Vergleichsproben (Belichtungsparameter „TRU“)

| Probe | Prüflings volumen [l] | Temperatur [°C] | Berstdruck [bar] |
|------------|-----------------------|-----------------|------------------|
| | | | |
| FE-01-1 S | 0,145 | 24 | 27 |
| FE-01-16 S | 0,148 | 24 | 26 |
| FE-01-17 S | 0,116 | 60 | 19 |

Aus dem Ergebnis ist zu sehen, dass die Vergleichsproben einen höheren Berstdruck aufweisen. Die Werte (der P100-Anlage) bei Raumtemperatur und 60°C sind mit dem Ergebnis der Proben von EOS (P110-Anlage) vergleichbar und korrespondieren in etwa mit Ergebnissen, die Festo bereits 2010 in einer anderen Untersuchung erzielt hat (damaliger Spitzenwert von 3 Proben lag bei 36 bar).

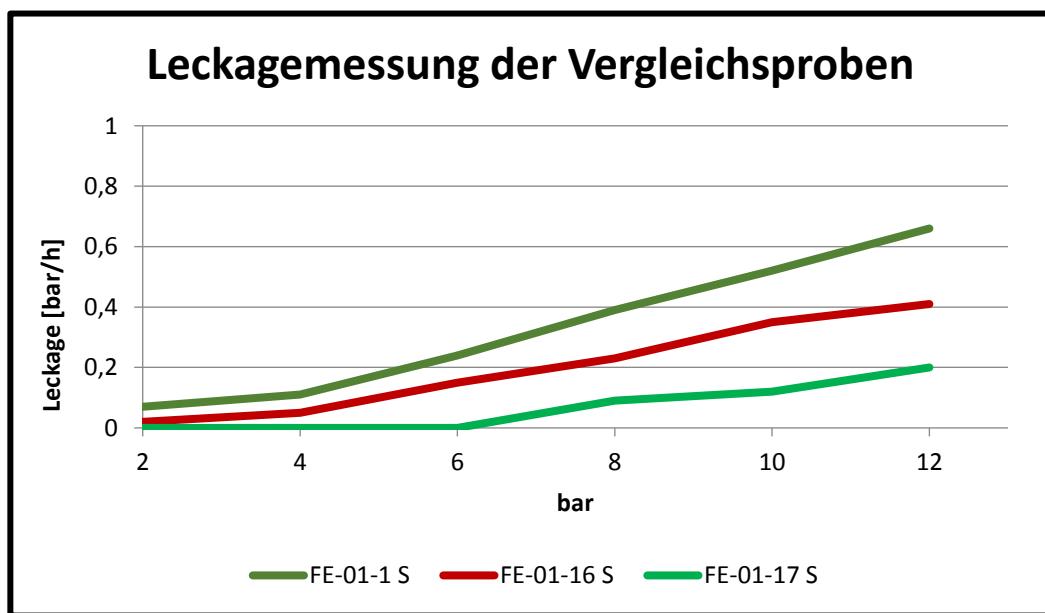


Abbildung 71: Ergebnisse der Leckagemessung von den TRU-Vergleichsproben

Abbildung 71 zeigt die Leckagemessung an den TRU-Vergleichs-Prüfkörpern von Festo. Aufgrund der anderen Belichtungsparameter weisen die Proben bessere und mit den Werten, die an Proben der Projektpartner ermittelt wurden, vergleichbare Werte auf und können als dicht bezeichnet werden. Die Probe FE-01-17 S, die in der Mitte des Bauraums gebaut wurde, weist dabei die besten Werte auf.

Auffällig ist jedoch, dass die Leckagewerte bei Erhöhung des Drucks stetig zunehmen und nicht, wie bei den Messungen an den Berstdruckprüfkörpern von EOS, BP und BMW gemessen, bei 12 bar eine geringere Leckage als bei 10 bar aufweisen.

Mechanisch-dynamische Untersuchungen

Biegewechselversuche

Zur Ermittlung der dynamischen Kennwerte wurde ein **Dauerschwingversuch** im Biegewechselbereich durchgeführt. In diesem Fall wurden die Proben (Abbildung 72) nur liegend aufgebaut, da in dieser Richtung die maximale Anisotropie des Gefüges zu erwarten ist und die Proben im extrem Fall untersucht werden können. Hier wurden pro Baujob 4 Proben generiert, die in unterschiedlicher Z-Lage im Bauraum positioniert wurden. Mit diesen Proben kann die Reproduzierbarkeit der mechanischen Eigenschaften bei dynamischer Belastung untersucht werden.

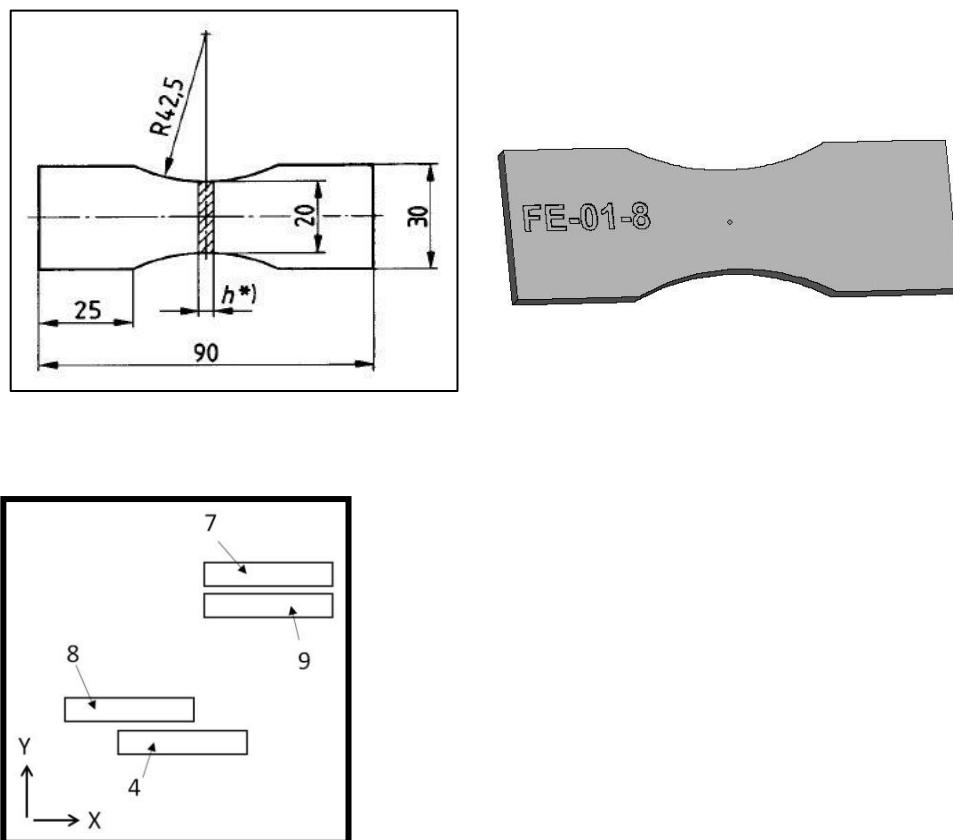


Abbildung 72: Schwingprobe (Geometrie und Form) und Lage im Bauraum

Die Biegewechselversuche werden auf einem Biegewechselprüfstand durchgeführt, der im Rahmen von Techniker- bzw. Bachelorarbeiten speziell zu diesem Zweck entwickelt und gebaut wurde. Abbildung 73 zeigt die wesentlichen Bestandteile der Exzenter-Schwingprüfeinrichtung.

Ein Servomotor (1) treibt über ein Zahnradgetriebe eine Exzenter scheibe (2) an. Über die Exzenter mimik mit Kraftmessdose (3) wird die, in der oberen Einspannung (4) und unteren Einspannung (6) verklemmte LS-Probe (5), zyklischen Biegewechselbelastungen unterzogen. Dabei ist die Exzenter mimik auf der oberen Einspannung und Exzenter scheibe frei drehbar gelagert. Die untere Einspannung

kann über eine manuell verstellbare Spannbacke geschlossen werden und klemmt das untere Probenende auf einer Länge von 20 mm ein. Die Befestigung der Probe in der oberen Einspannung kann durch Schrauben erfolgen, damit die Probe während der Messung richtig eingespannt wird.

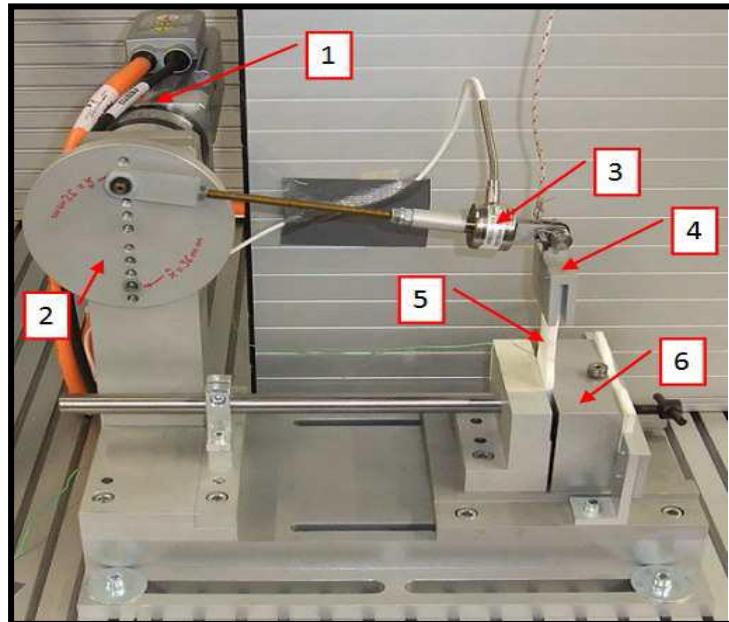


Abbildung 73: Schwingprüfmaschine für Biegewechselbeanspruchung

Die Verschiebung des Gelenkpunktes der oberen Einspannung durch die Exzentermimik verläuft bei konstanter Motordrehzahl näherungsweise sinusförmig (Die Abweichung von der Sinusform entsteht durch die Durchbiegung der Probe und daraus resultierende vertikale Bewegungskomponente des Gelenkpunktes). Der Versuch verläuft quasi-dehnungsgesteuert, wobei die Dehnungsamplitude über die Bohrungen der Exzenter scheibe variiert werden kann. Durch die gelenkige Befestigung der Exzentermimik an beiden Enden (Pendelstütze) ist die Kraftmessdose nur Normalkräften ausgesetzt. Mit einem gebundenen Federdraht zwischen der Exzentermimik und einem Sensor wird der Versuch unterbrochen, sobald die Probe gebrochen und die Exzentermimik nach unten gefallen ist.

Definition und Prüfablauf der Dauerschwingversuche

Im Prinzip dient der Dauerschwingversuch als eine qualitative Beurteilung des Verhaltens von Kunststoffen unter periodisch wechselnder Beanspruchung. Speziell für Kunststoffe gibt es die DIN 53442 „Dauerschwingversuch im Biegebereich an flachen Probekörpern“. Diese sieht die zeitlich konstante Wechselverformung von Kunststoffproben mittels Wechselbiegemaschinen vor. Aktuell liegen kaum Untersuchungen der zyklischen Belastung an LS-Probekörpern vor.

Aus der Vielzahl der möglichen Beanspruchungen ist ein Biegeschwingversuch beschrieben, bei dem einem flachen Probekörper ein zeitlich und einstufig konstanter Verformungsausschlag aufgezwungen wird. Die durch (gleichbleibende) zyklische Verformungen erzeugten Biegespannungen werden durch Relaxation und Temperaturerhöhung mit zunehmender Schwingspielzahl kleiner. Die Schwingfestigkeit der Probekörper des Kunststoffes kann mit Hilfe der ertragenen Schwingspielzahl beschrieben werden, wenn die Kunststoffe bei verschiedenen Prüfbeanspruchungen bis zum Bruch geprüft werden. Für die Untersuchungen werden die in DIN 53442 vorgeschlagenen Probekörper mit einer Wandstärke von 4 mm verwendet. Wie bei dem Zugversuch wurde die Probengeometrie vor der Prüfung vermessen.

In dieser Arbeit ergibt sich eine Besonderheit, da der weggesteuerte Biegeversuch nur bei einer Dehnungsamplitude von 36 mm durchgeführt wurde. Dies ist darauf zurückzuführen, dass für diesen vergleichenden Versuch nur die Einflüsse von anderen bestimmten Kriterien untersucht werden sollen und nicht der Einfluss von Dehnungsamplitude auf die Schwingspielzahl. Von einem Spannungs-Dehnungs-Diagramm eines 3-Punkt-Biegeversuchs [EOS] ist eine Biegespannung auf 42 MPa aus dieser Dehnungsamplitude berechnet. Zudem ist aufgrund von Erfahrungswerten aus o.g. Arbeiten die Prüffrequenz auf 5 Hz festgelegt, da bei geringen Frequenzen die Versuchsdauer steigt und höhere Frequenzen zu übermäßiger Temperaturentwicklung führen können. In diesem Sinne können die Ergebnisse mit den anderen Untersuchungen verglichen werden.

Als Ergebnis der Dauerschwingversuche sind die Schwingspiele der Proben bis zum Bruch und die Widerstandsmomente aufgetragen (Abbildung 74 und Abbildung 75). Die Proben sind nach Projektpartner und nach der Lage im Bauraum angeordnet und werden nach diesen Kriterien ausgewertet. Aus dem Ergebnis ist zu sehen, dass die Anzahl der Schwingspiele scheinbar keine direkte Korrelation zu dem Widerstandsmoment hat. In der zur Verfügung stehenden Zeit konnten nur 3 der 4 Proben aus den ersten zwei Baujobs untersucht werden. Bei der Beurteilung des Einflusses der Position im Bauraum wurde kein großer Unterschied zwischen Probe 7 und Probe 9 festgestellt. Dies wird darauf zurückgeführt, dass die Proben im Bauraum nahe beieinander aufgebaut wurden und damit nahezu identischen Bedingungen während des Bauprozess ausgesetzt waren.

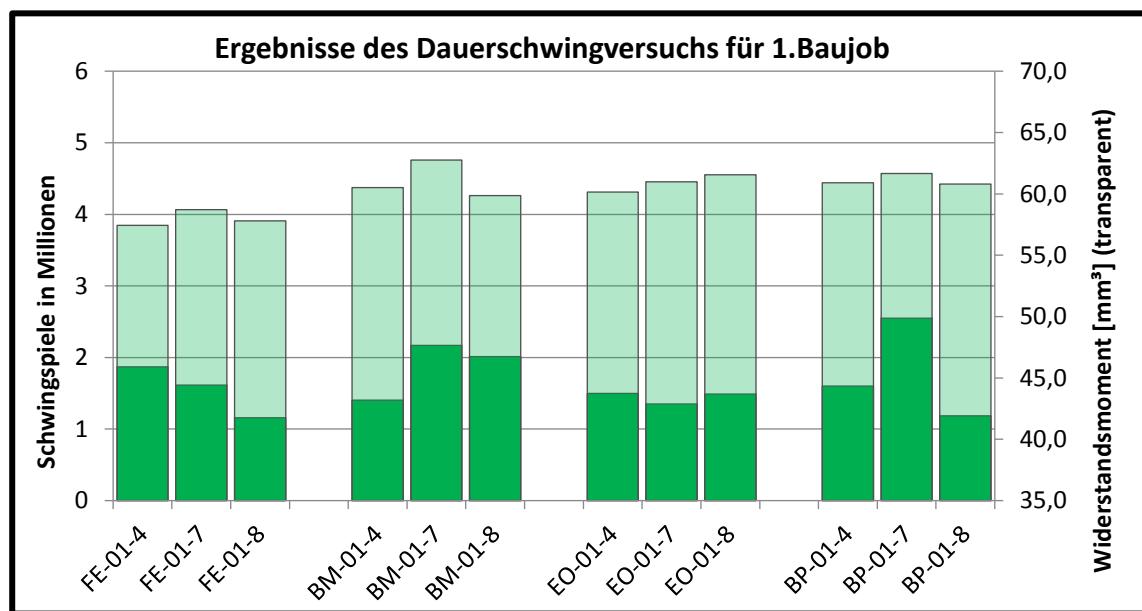


Abbildung 74: Ergebnisse des Dauerschwingversuchs für den 1. Baujob

Aus der Grafik ist zu erkennen, dass die von Festo gebauten Proben eine leicht geringere Querschnittsfläche im Vergleich zu den anderen Proben haben. Trotz des Unterschiedes wiesen alle Proben vergleichbare Anzahl der Schwingspiele auf, im Mittel in der Größenordnung 1,5 Millionen.

Aus dem Ergebnis lassen sich keine Unterschiede erkennen, die auf die Lage im Bauraum zurückzuführen wären. Dies spricht für eine recht homogene Atmosphäre im Bauprozess im dem Bereich, in dem die Proben aufgebaut wurden.

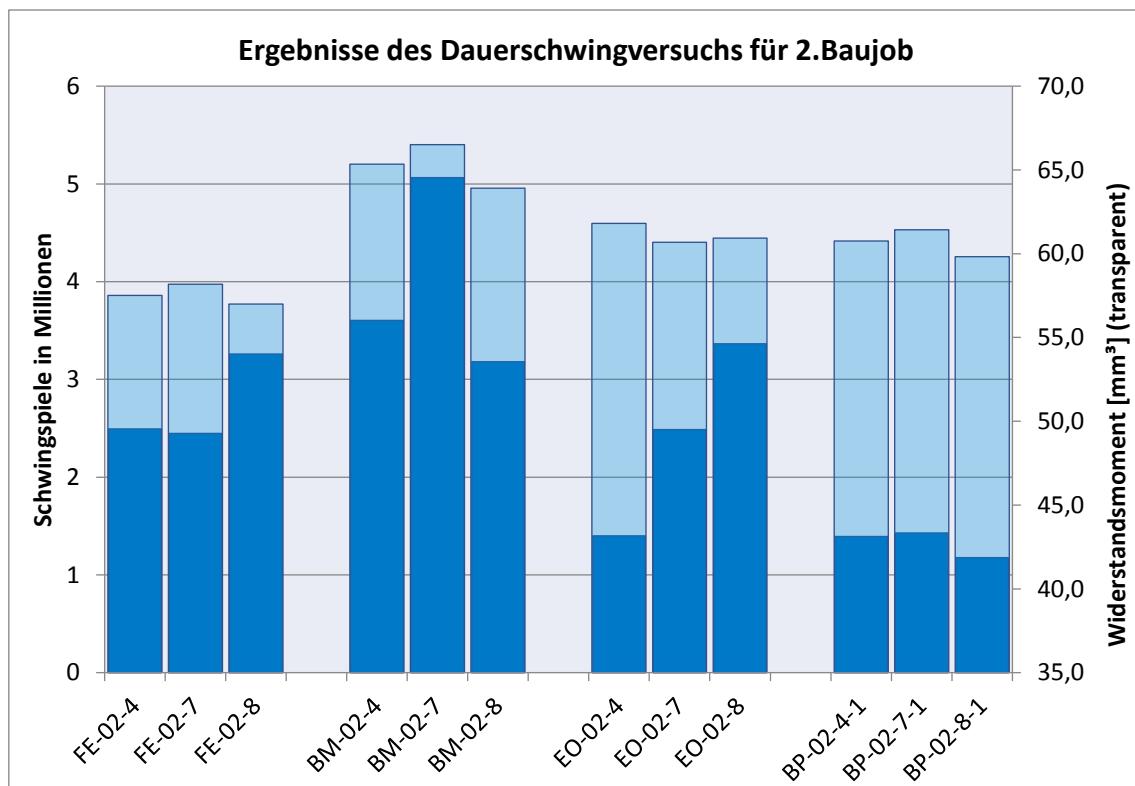


Abbildung 75: Ergebnisse des Dauerschwingversuchs für 2. Baujob

Bei der Auswertung des 2. Baujobs ist festzustellen, dass die Proben der Biegewechselbelastung länger standhielten, sprich bei höheren Lastspielzahlen gebrochen sind. Die Anzahl der Schwingspiele liegt im Bereich von einer Million bis fünf Millionen. Es könnte sein, dass die Lagerzeit und die damit verbundene Feuchtigkeitsaufnahme zwischen der Herstellung und dem Test einen gewissen Einfluss auf die Anzahl der Schwingspiele hat. Die Proben von Festo wurden Ende 2016 gebaut, die anderen Proben am Anfang des Jahres 2017. Die Schwingversuche selbst erfolgten sukzessive in 2017 (die des 1. Baujobs grob im 1. Drittel, die des 2. Baujobs im 2. Drittel von 2017).

Auf Basis der hier durchgeführten Dauerschwingversuche lässt sich auch nicht ableiten, lässt sich keine Korrelation zum Anlagentyp (P100/P110) ableiten.

Makro- und mikroskopische Untersuchung

Bei den Ergebnissen der Dauerschwingversuche sind deutliche Unterschiede zwischen den Proben aus dem ersten Baujob und dem zweiten Baujob, selbst bei identischer Anlage, zu sehen. Es wurde daher vermutet, dass die Proben bei verschiedener Anzahl der Lastspiele bis zum Bruch unter Umständen auch unterschiedliche Verhältnisse zwischen dem Schwingbruch und dem Gewaltbruch aufweisen könnten, was sich im Bruchbild zeigen müsste.

Untersucht wurden hier exemplarisch die Proben BM-01-7 (2 Mio. Lastspiele) und BM-02-7 (5 Mio. Lastspiele), die trotz der selben Fertigungsanlage und derselben Bauraumposition ganz unterschiedliche Schwingspielzahlen aufwiesen.

Makroskopische Untersuchung

Makroskopisch zeigen sich bei beiden Proben vom Rand ausgehend glatte Bruchstrukturen, die zur Mitte hin deutlich rauer werden. Unterschiede zwischen den Schwingproben lassen sich makroskopisch nicht feststellen (Abbildung 76).

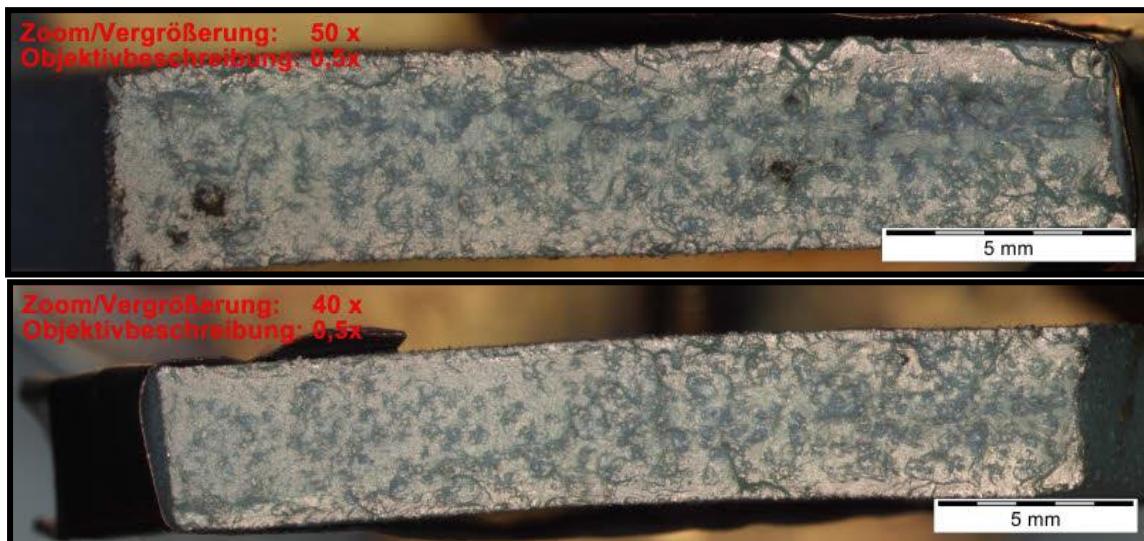


Abbildung 76: Schwingprobe BM-01-7 und BM-02-7, mit Gold beschichtet

Mikroskopische Untersuchung

Dokumentiert wurde hier exemplarisch die Probe BM-01-7.

Die rasterelektronenmikroskopische Untersuchung der Bruchflächen (Abbildung 77) zeigt den für diesen Werkstoff typischen duktilen Bruchverlauf mit Zipfelbildung und schwingbruchähnlichen Strukturen. Zwischen den beiden Schwingbruchproben konnten auch bei diesen Vergrößerungen keine Unterschiede festgestellt werden.

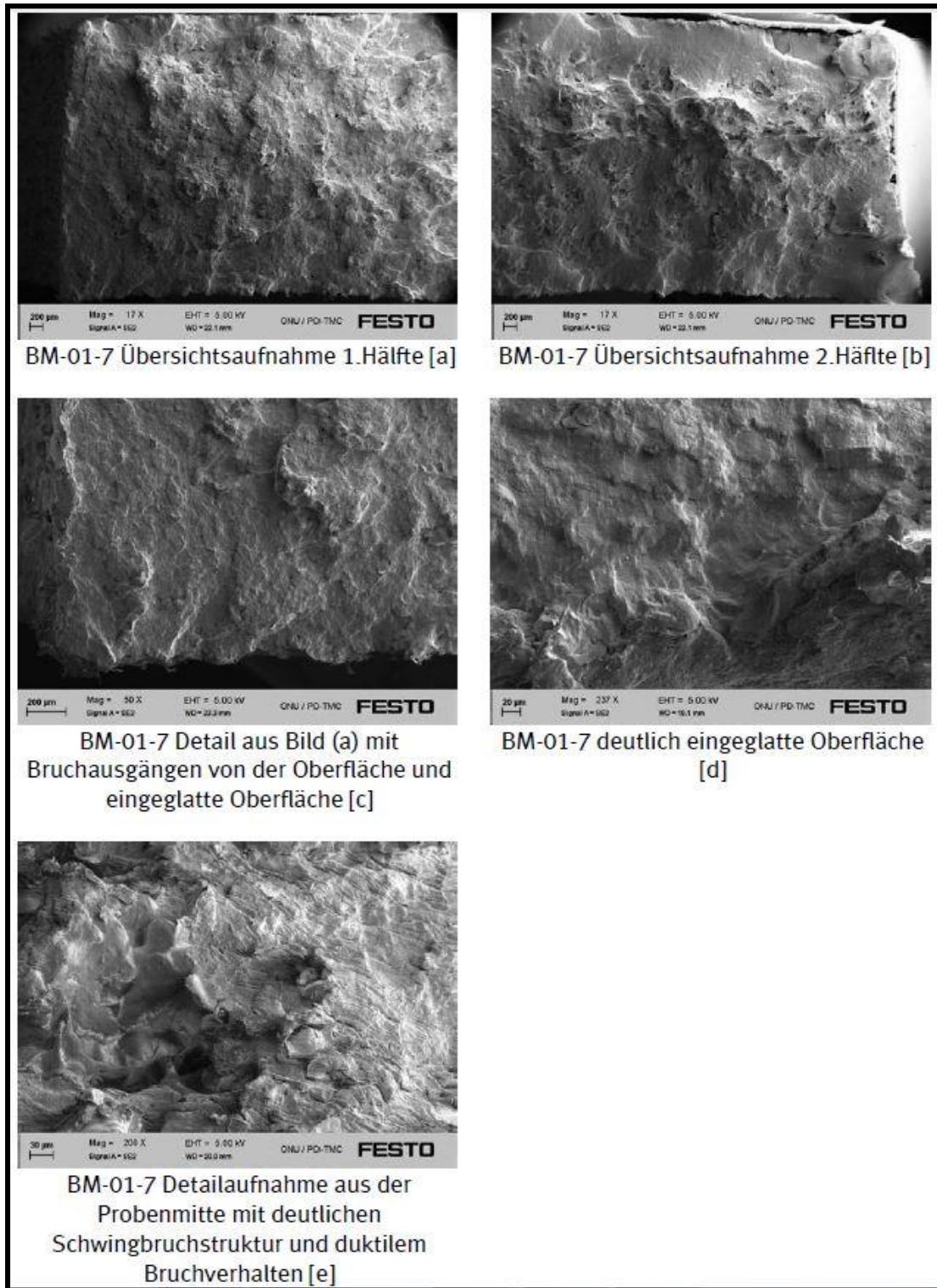


Abbildung 77: REM-Aufnahmen der Bruchfläche der Biegewechsel-Probe BM-01-7

Funktionstests an Demonstratoren der Automatisierungstechnik

Funktionstest „Greifen“

Bei der Kurz- und Langzeitmessung von Balggreifern wurden 3 Prüfkörper pro Baujob aufgebaut. Mit diesen Balggreifern kann die Druckdichtheit, Funktionalität und Reproduzierbarkeit von Teilen mit dünnen Wandstärken überprüft werden. Hier wurden technische Daten wie zum Beispiel die Ausziehkraft, die Leckage und der erforderliche Druck bei vollem Hub ermittelt. Wegen der Funktionsanforderungen der Geometrie wurden die Prüfkörper in optimaler Orientierung stehend aufgebaut und einem Funktionsdauerlauf (Abbildung 78) unterzogen.



Abbildung 78: Balggreifer und Dauerlaufaufbau

Zu diesem Funktionstest wurden Kurzzeitmessungen wie Leckagemessung, Durchfahrdruckmessung, Ausziehkraftmessung als auch die Langzeituntersuchungen bzw. Dauerlauf im Betrieb durchgeführt. Hier wurde die Langzeituntersuchung mit dem Greifer von dem ersten und dritten Baujob und die Ausziehkraftmessung mit den Greifern aus dem zweiten Baujob durchgeführt.

Leckagemessung

Die Leckagemessung am Balggreifer wird gemäß der Festo Werknorm FN940081: 2015-02 durchgeführt.

Für den Balggreifer liegen bisher keine Grenzwerte bezüglich Leckage fest, deshalb werden die Werte lediglich dokumentiert. Für diese Leckagemessung wird im Prinzip der Balggreifer mit 6 bar Druckluft ständig für eine bestimmte Zeit beaufschlagt und die Leckage wird kontinuierlich, während dieser Zeit, mit dem Prüfgerät gemessen. Um Verschleißtendenzen besser sichtbar zu machen, werden Leckagemessungen sowohl an den Prüflingen im Neuzustand als auch nach bestimmten Anzahlen von Schaltspielen, gemessen.

Diese Messung bezieht sich auf folgende Versuchsbedingungen:

- Ohne Zusatzlast
- Bei Raumtemperatur
- Verwendetes Leckagemessgerät: LMG-3 (QSV-Nr. 4076719)

Durchfahrdruckmessung

Der Durchfahrdruck ist laut Norm der minimale Druck an einer Kolbenfläche, bei dem der Kolben die gesamte Hubbewegung ohne sichtbares Ruckgleiten inklusive der Dämpfungseinrichtung ausführt (bei geöffneter Dämpfungseinstellung). Die Durchfahrdrücke werden bei Raumtemperatur nach Festo Werknorm FN942022: 2008-11 ermittelt. Diese Norm gilt für alle pneumatischen Antriebe, wie zum Beispiel für Zylinder mit und ohne Kolbenstange als auch für Greifer.

Ausziehkraftmessung

Diese Messung hat das Ziel, den minimalen erforderlichen Druck bei vollem Hub zu ermitteln. Hierbei wird ein Ring mit Innendurchmesser von 33,5 mm verwendet. Als erstes wird der Greifer 10 Hüben mit 2,5 bar Druck dynamisch beaufschlagt, um die Steifheit des Greifers zu reduzieren. Danach wird der Druck um eine Intervall von 0,1 bar reduziert und wieder dynamisch mit 3 Hüben beaufschlagt. Dieser Vorgang wiederholt sich, bis der Greifer die Ringe nicht mehr greifen kann. Die Messungen erfolgen ohne Zusatzmasse.

Diese Messung bezieht sich auf folgende Versuchsbedingungen:

- ohne Zusatzlast
- bei Raumtemperatur
- Durchfahrdruckmodul (QSV-Nr. 4074294)
- Durchfahrdrücke nach 10 Hüben dynamisch abfallend gemessen

Als Ausziehkraft versteht man die Kraft, die beim Ausziehen eines Prüflings notwendig ist, um diesen aus seiner Befestigung zu lösen. Für diesen Balggreifer ist es wichtig zu untersuchen, wie viel Gewicht die Greifer bei unterschiedlichen Werkstückdurchmessern und Betriebsdrücken aufheben können.

Die Ausziehkraftmessung des Greifers wurde an der Zug-Prüf-Maschine (UTS) geprüft. Im Prinzip wird der Ring zwischen den Metallblöcken gehalten und die Kraftmessdose lässt sich oben und unten durch eine Scheibe fahren. Der Greifer wird dann durch einen speziellen Adapter befestigt, der eine Öffnung für die Druckluftversorgung hat. Die Probe wird durch den Ring gefahren und mit Druck beaufschlagt. Nachdem sich die Taschen nach außen ausgeweitet haben, misst die Maschine die benötigte Kraft beim Ausziehen.

Diese Messung bezieht sich auf folgende Versuchsbedingungen:

- ohne Zusatzlast
- bei Raumtemperatur
- Betriebsdruck im Greifer 6 bar oder 2 bar
- Prüfgeschwindigkeit: 200 mm/min

- Durchmesser der Ringe 33,0 mm, 33,5 mm, 33,9 mm und 34,6 mm
- Kraftmessdose bis 200 N

Langzeituntersuchungen (Funktions-Dauertest)

Zu diesem Zweck wurde ein speziell konstruierter Dauerlaufprüfstand (vergleiche vorige Abbildung 36) verwendet. Hier wurde praxisnah, ähnlich dem Einsatz beim Kunden getestet, indem der Greifer eine Masse von 450 g greift und anhebt. Für diesen Dauerlauftest wurden die Greifer mit einem Betriebsdruck von 6 bar und einer Frequenz von 0,25 Hz bei Raumtemperatur belastet.

Als Langzeituntersuchung sollten die Proben die geforderte Lebensdauer von 5 Mio. Schaltspielen (SP) ohne Auffälligkeiten erreichen. In der zur Verfügung stehenden Projekt-Zeit konnte die Dauerlaufmessung nur bis 2,495 Mio SP durchgeführt werden. Neben der Leckagemessung und der Durchfahrdruckmessung wurden auch die Funktionsprüfung und der Durchmesser der Probe im drucklosen Zustand bewertet. Allgemein wurden die Messungen nach 0,136 Mio, 0,311 Mio, 0,5 Mio, 0,802 Mio, 1,205 Mio, 1,704 Mio und 2,495 Mio Schaltspiele sowie im Neuzustand durchgeführt.

Ergebnisse der Funktionsprüfung

Als Funktionsprüfung versteht man die Fähigkeit der Probe, um die Masse beim Betrieb zu greifen und los zu lassen. Hier wird die Funktion der Probe binär entweder mit 1 (funktioniert) oder 0 (funktioniert nicht) bewertet. Es kann zum Beispiel massive Leckage auftreten, dennoch kann die Probe die Masse noch greifen und loslassen. In der Abbildung 79 ist zu sehen, dass alle Greifer bis rund 2,5 Mio Schaltspiele (SP) problemlos funktionierten.

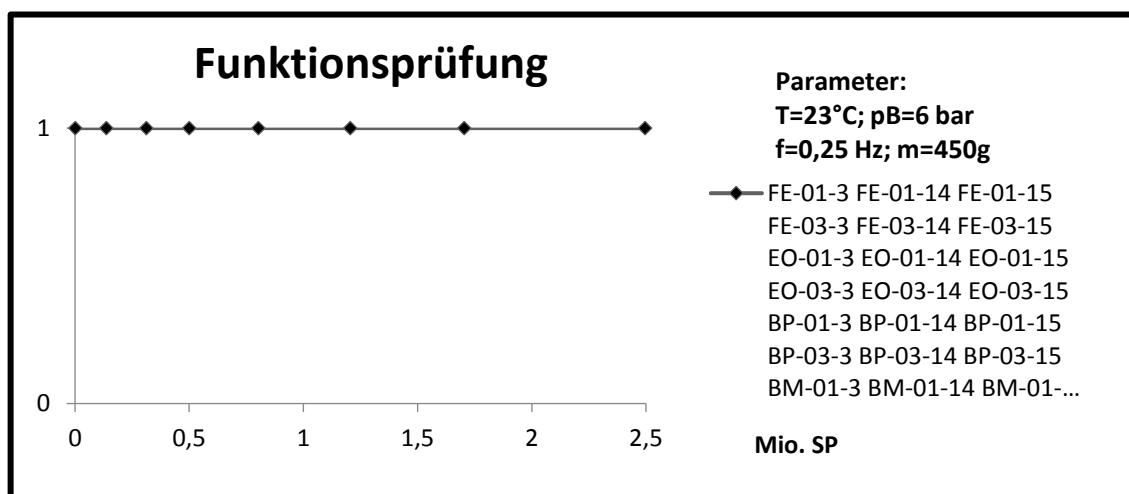


Abbildung 79: Ergebnisse der Funktionsprüfung an den Balggreifern

Ergebnisse der Leckagemessung

Hier ist die Dichtheit der Probe während der ständigen Druckbeanspruchung beim Dauerlauf zu prüfen. Dies lässt im Vergleich zu der Funktionsprüfung auf die Verschleißtendenz der Probe schließen. Die Stelle zwischen Adapter und Greifer wurde wie bei den Berstdruckprüfköpfen mit einem elastomeren Dichtring abgedichtet. Abbildung 80 zeigt die Ergebnisse der Leckagemessung an den Balggreifern bei 6 bar. Aus den Bildern ist zu sehen, dass alle Greifer nur leichte oder gar keine Leckage aufwiesen. Die Werte liegen unterhalb von 0,4 l/h. Bei den Greifern von Festo, EOS und BP waren die Werte am Anfang des Dauerlaufs erhöht, bevor sie wieder gesunken und konstant geblieben sind. Dies ist ein normales Verhalten bei allen pneumatisch oder mechanisch betriebenen Geräten (Stichwort Einlaufverschleiß). Des Weiteren lässt sich feststellen, dass die Werte von BP und Festo am geringsten sind.

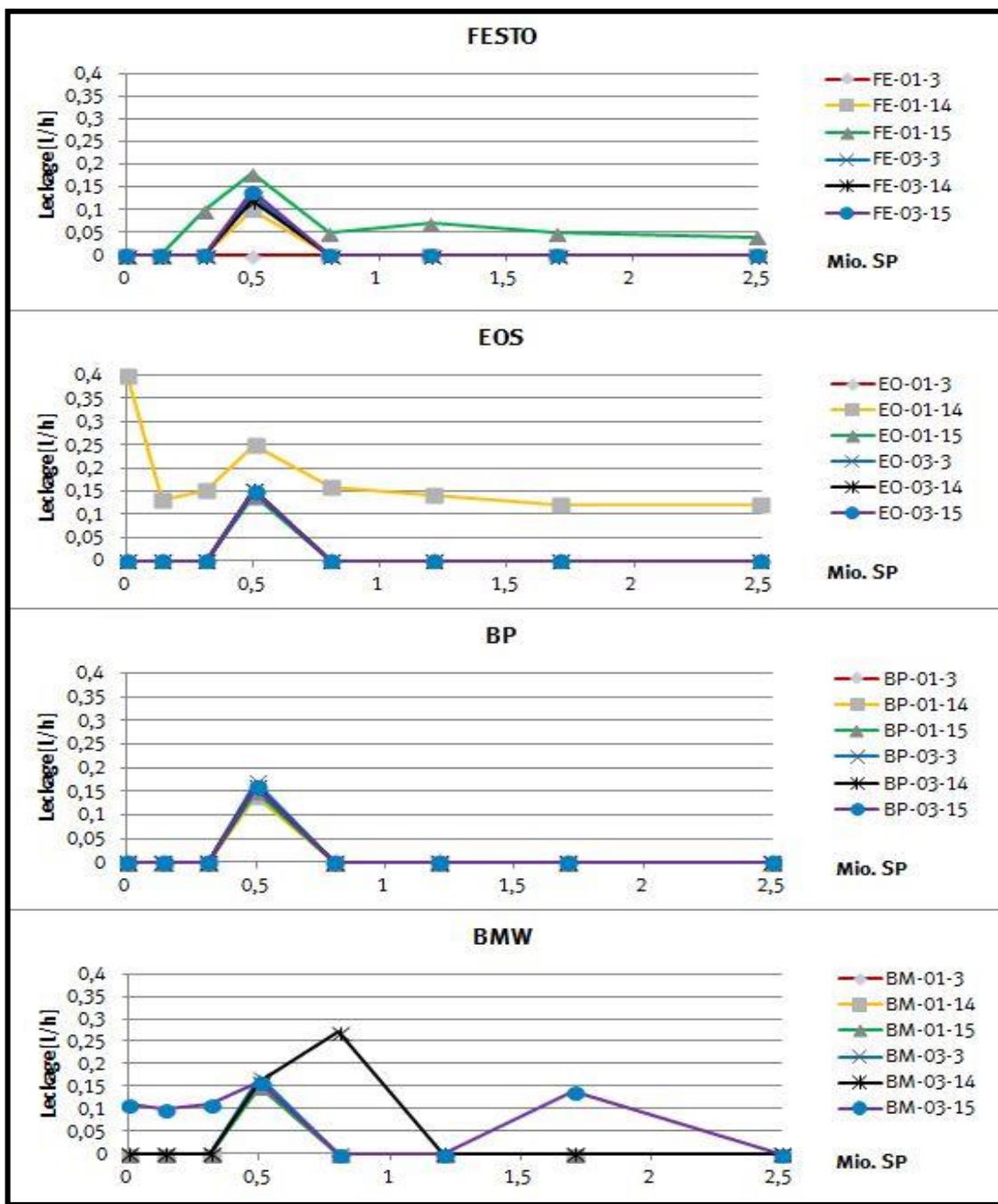


Abbildung 80: Ergebnisse der Leckagemessung an den Balggreifern in Abhängigkeit der Schaltspielzahl

Unterschiede durch die Anordnung im Bauraum lassen sich nicht erkennen.

Ergebnisse des Probendurchmessers im drucklosen Zustand

Um den Grad der plastischen Verformung von den Balggreifern zu untersuchen, wird der Probendurchmesser bei den Zwischenmessungen mit einem Messschieber gemessen. Die Messung wurde ungefähr in der Mitte der Tasche durchgeführt. Da die zwei Sätze von gegenüberliegenden Taschen unterschiedliche Werte aufweisen können, werden die beiden Sätze gemessen und der größere Wert aufgenommen.

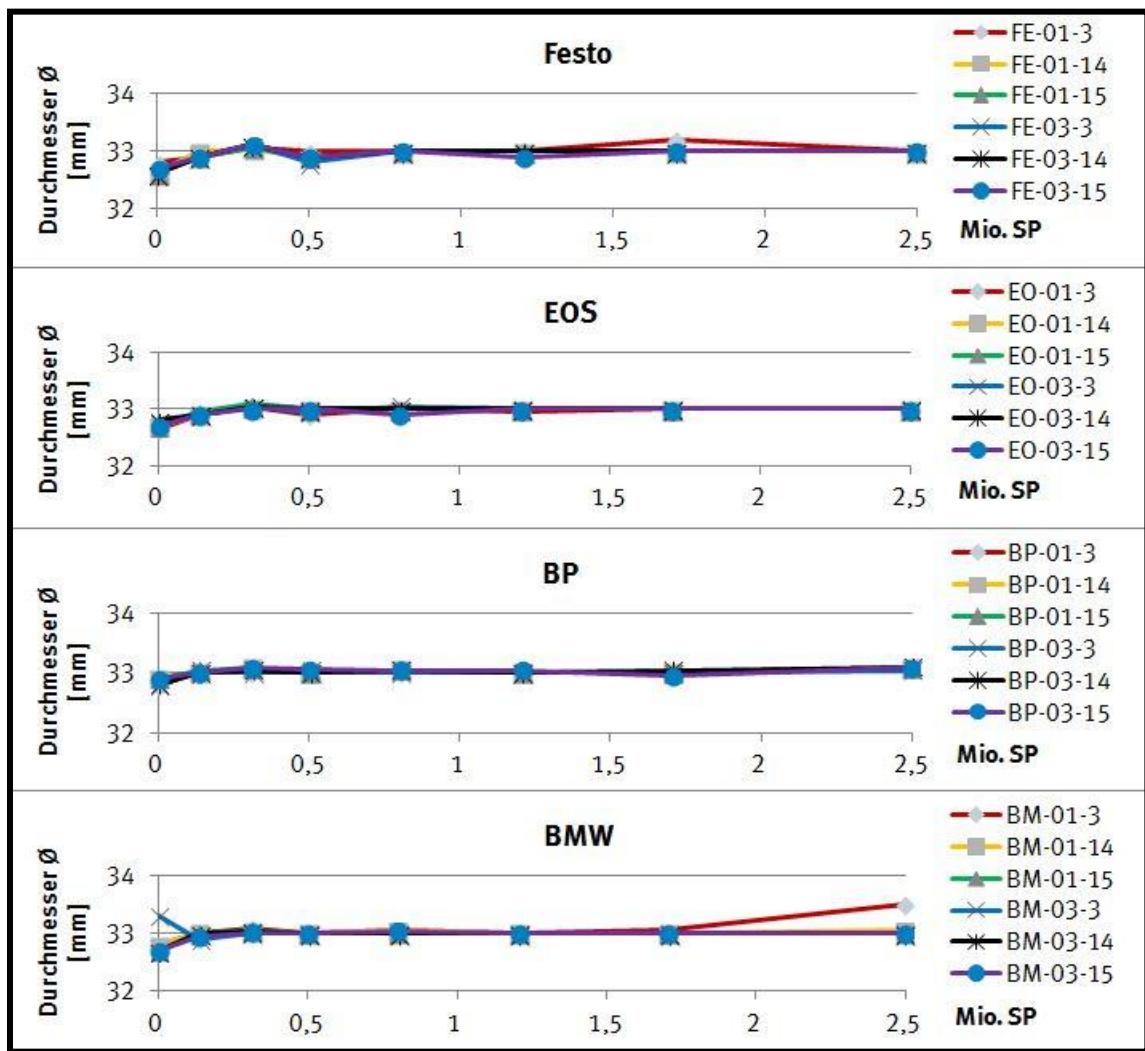


Abbildung 81: Ergebnisse der Probendurchmesser im drucklosen Zustand an den Balggreifern

Aus Abbildung 81 ist deutlich zu erkennen, dass die Greifer im Neuzustand kleinere Durchmesser aufweisen. Nach circa 0,15 Mio. SP sind die Greifer schon leicht durch den Betrieb verschlossen. Die Werte bleiben dann konstant bis knapp 2,5 Mio. SP. Nur der Greifer BM-01-3 zeigt nach 1,7 Mio. SP die Tendenz zu deformieren, da der Durchmesser bei dieser Schwingspielzahl anfängt, größer zu werden (Relaxationsverhalten des PA12?). Allgemein zeigen die Greifer von EOS und BP eine bessere Robustheit gegen Veränderungen im Taschendurchmesser auf.

Ergebnisse der Durchfahrdruckmessung

Bei der Durchfahrdruckmessung ist auch wie bei den anderen Messungen die gleiche Tendenz zu sehen, wobei die Proben die tatsächlich erforderlichen Werte beim Betrieb erst nach einer gewissen Schwingspielzahl aufwiesen, vergleiche Abbildung 82.

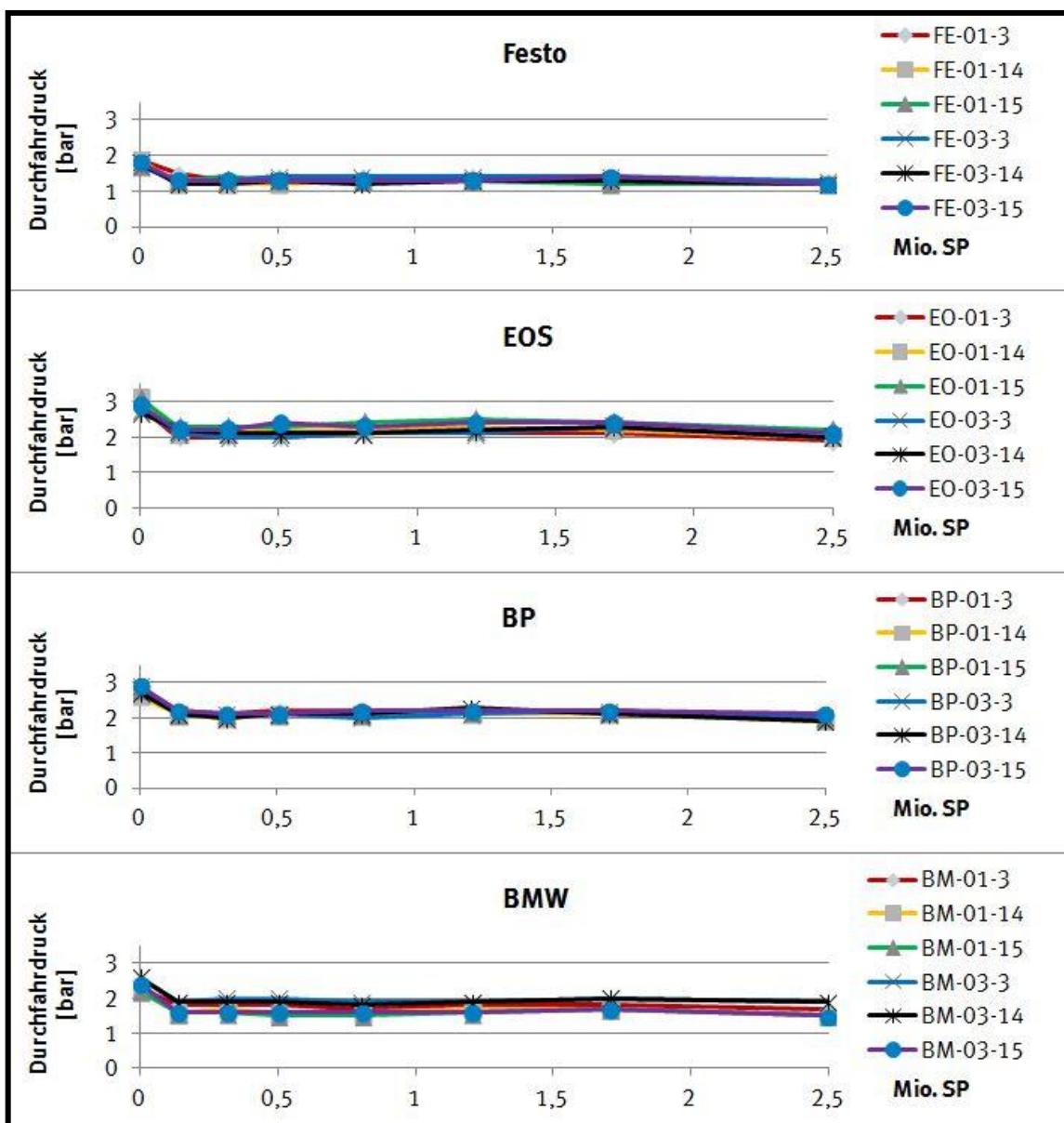


Abbildung 82: Ergebnisse der Durchfahrdruckmessung an den Balggreifern

Vergleicht man den benötigten Druck der benötigt wird um den geforderten Hub zu erreichen, sind diese bei den Greifern aus demselben Baujob recht konstant. Im Vergleich zu den Greifern von EOS und BP benötigen die von Festo und BMW geringere Drücke. Generell kann gesagt werden, dass die Proben nach 0,136 Mio. SP flexibel geworden sind. Die Werte sind für die nächste eine und halb Millionen SP konstant geblieben und haben sich dann langsam, nach 1,7 Mio. SP, verringert.

Ergebnisse der Ausziehkraftmessung

Im Rahmen der Ausziehkraftmessung sind einige Feststellungen gemacht worden. Relevant für die Messung sind nur der Bereich 0-10 mm von der oberen Stirnfläche oder in der Mitte der Balgtasche, da sich beim Ausziehen die Taschen verformen und geringere Werte anzeigen können. Abbildung 83 zeigt die Ergebnisse der Ausziehkraftmessung bei verschiedenen Werkstückdurchmessern und Drücken.

| | | Ausziehkraftmessung | | | | | | | | |
|--------------|----------|----------------------------|-------|---------|---------|---------------------|-------|---------|---------|---------|
| | | Kraft bei 2 bar [N] | | | | Kraft bei 6 bar [N] | | | | |
| | | Prüfling | 33 mm | 33,5 mm | 33,9 mm | 34,6 mm | 33 mm | 33,5 mm | 33,9 mm | 34,6 mm |
| FESTO | FE-02-3 | 20 | 5 | - | - | 80 | 50 | 45 | 15 | |
| | FE-02-14 | 14 | 3 | - | - | 55 | 37,5 | 35 | 15 | |
| | FE-02-15 | 15 | 6 | - | - | 50 | 37,5 | 35 | 12,5 | |
| EOS | EO-02-3 | 17,5 | - | - | - | 55 | 27 | 17 | - | |
| | EO-02-14 | 11 | - | - | - | 52 | 29 | 12 | - | |
| | EO-02-15 | 8 | - | - | - | 37,5 | 22,5 | 9 | - | |
| BP | BP-02-3 | 20 | - | - | - | 70 | 25 | 9 | - | |
| | BP-02-14 | 10 | - | - | - | 35 | 25 | 13 | - | |
| | BP-02-15 | 21 | - | - | - | 50 | 27 | 10 | - | |
| BMW | BM-02-3 | - | - | - | - | - | 24 | 11 | - | |
| | BM-02-14 | - | - | - | - | - | 26 | 14 | - | |
| | BM-02-15 | - | - | - | - | - | 25 | 22 | - | |

Abbildung 83: Ergebnisse der Ausziehkraftmessungen

Aus der Tabelle ist zu sehen, dass kein einziger Greifer alle Werkstückdurchmesser bei 2 bar greifen kann und nur die Greifer von Festo alle Werkstückdurchmesser beim Betriebsdruck von 6 bar handeln können. Die von EOS und BP hergestellten Greifer können die gleiche Anzahl den Werkstückdurchmessern greifen; die BMW-Greifer hingegen können nur zwei Werkstückdurchmesser bei 6 bar greifen und keine bei 2 bar. Hier ist zu beachten, dass die Greifer von BMW nicht zu dem Werkstückdurchmesser 33,0 mm passen können, da der untere Bereich des Greifers bereits einen größeren Durchmesser aufwies als der Werkstückdurchmesser ist.

Aus dem Ergebnis lässt sich schließen, dass die Greifer von Festo die größte Flexibilität aufweisen und sehr druckempfindlich sind.

Funktionstest „Montage“

Die Sicherheitsdeckel für Schalldämpfer (siehe Abbildung 84), deren Gewinde hier untersucht werden, wurden als Sonderauftrag konstruiert und mittels LS gebaut, da sich in der Inneren eine labyrinthartige Gestaltung von Kanälen befindet, die nicht mit einem konventionellen Herstellungsprozess gefertigt werden können. Um die Kosten zu senken und die Effizienz zu steigern, sollte der Deckel einwandfrei mit dem LS-Verfahren ohne erforderliche Nachbearbeitung hergestellt werden. Aus diesem Grund soll die Prozessgenauigkeit und Reproduzierbarkeit der Deckel untersucht werden. Dazu ist eine **Gewindeprüfung** vorgesehen, bei der im Prinzip die **Leichtgängigkeit** der Gewinde für den aus PA 2200 hergestellten Deckel geprüft und bewertet werden. Damit können Rückschlüsse auf Abbildungsgenauigkeit und Reproduzierbarkeit bei feinen Details als auch auf die Funktionalität gezogen werden

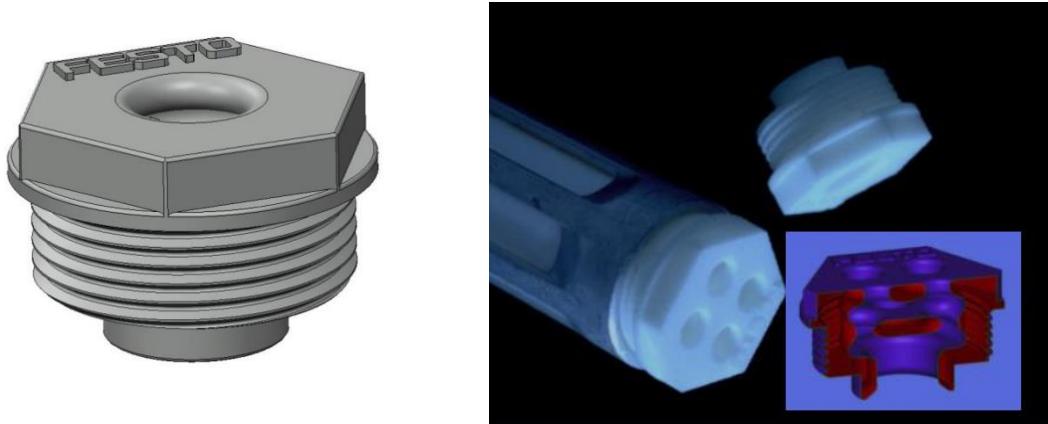


Abbildung 84: Sicherheitsdeckel für Schalldämpfer (\varnothing ca. 20 mm x 15 mm)

Prüfablauf der Gewindeprüfung

Der Deckel soll von Hand eingeschraubt werden können. Bei der Prüfung wurden die Deckel mit einem Drehmomentschlüssel befestigt, um ein gleichbleibendes Moment zu erzeugen und die anderen Variablen konstant zu halten. Der Drehmomentschlüssel wurde auf das kleinste einstellbare Drehmoment von 0,8 Nm eingestellt. Anschließend wurde der verbleibende Abstand zur Schraubenkopfplatte ermittelt (vergl. Abbildung 85).

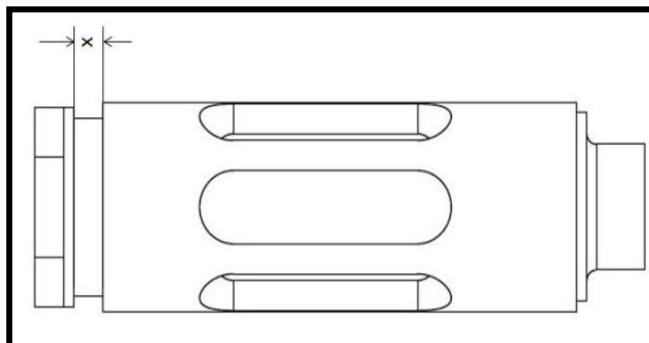


Abbildung 85: Gemessener Abstand 'x' zu der Schraubenkopfplatte

Ergebnisse der Gewindeprüfung

Zu dieser Gewindeprüfung sind nicht alle Deckel nach Hersteller, der Position im Bauraum oder dem Baujob sortierbar, da die Beschriftung nicht bei allen Proben lesbar ist. Es könnte sein, dass die eingebrachte Energiedichte für die eingestellte Textgröße zu groß war. Nur die Deckel von Festo können vollständig zugeordnet werden. Die Deckel von BMW und EOS können nur teilweise sortiert werden. Die nicht sortierbaren Deckel sind in die Gruppe „Sonstiges“ zugeordnet.

Während der Messung sind einige Beobachtungen gemacht worden. Einige Deckel können komplett mit der Hand oder dem Drehmomentschlüssel eingeschraubt werden („auf Block“), da der Ist-Nenndurchmesser nahe dem Soll-Nenndurchmesser ist. Die meisten Deckel können nur teilweise eingeschraubt werden. Bei näherer Betrachtung ist zu beachten, dass der Ist-Nenndurchmesser zu groß ist und die Flanken wegen dem geschmolzenen Pulver dazwischen nicht vollständig ausgeformt sind. Abbildung 86 zeigt die Auswertung der Gewindeprüfung nach den Projektpartnern.

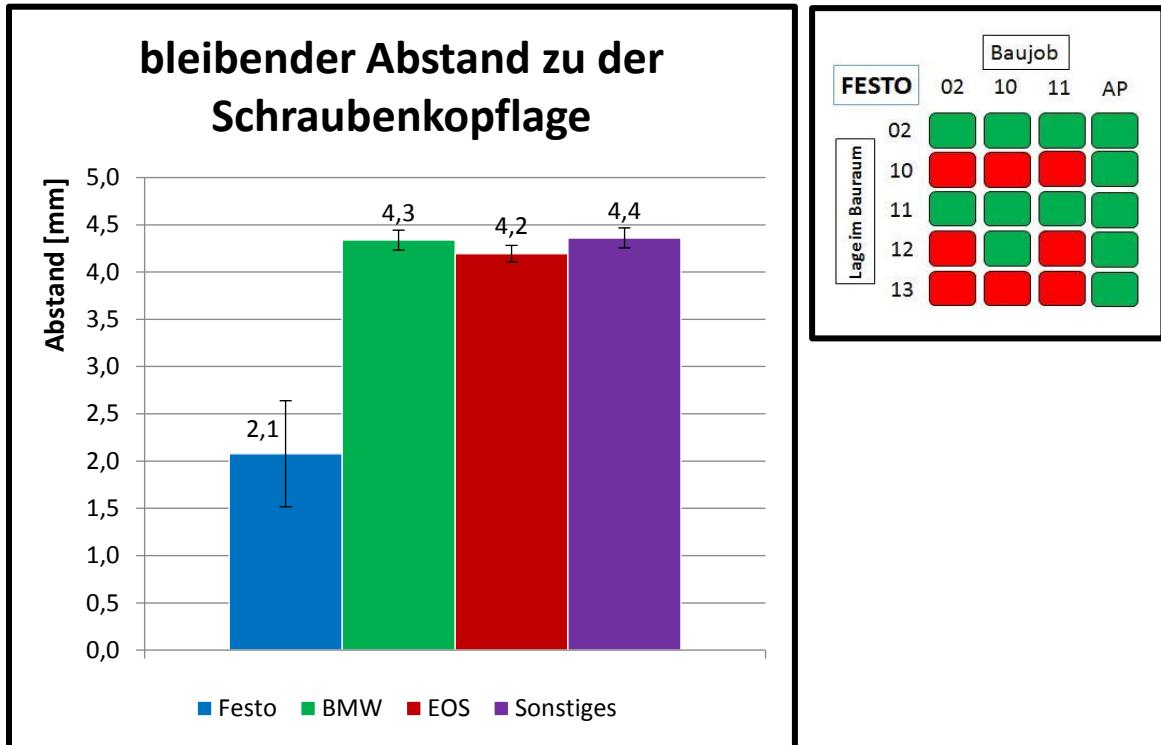


Abbildung 86: Auswertung der Gewindeprüfung

Bei der Gewindeprüfung sollen die Ergebnisse wie bei den anderen Untersuchungen auch nach bestimmten Kriterien ausgewertet werden. Aus diesem Bild ist zu erkennen, dass die Deckel von Festo den geringsten Abstand zu der Schraubenkopflage aufweisen. In dem Ausschnitt ist eine Detailübersicht der einzelnen Proben dargestellt. Die Spalte zeigt die von Festo hergestellten Baujobs, wobei die Zeile darstellt, in welcher Position die Deckel im Bauraum gebaut wurden. Der Wert von Festo errechnet sich nur von den rot markierten Deckeln. Die grün markierten Deckel können dagegen komplett ohne Schwierigkeiten in dem Schalldämpfer eingeschraubt werden.

Aus diesem Ergebnis ist auch zu sehen, dass die mit dem „Festo-TRU“-Belichtungsparametersatz gebaute Vergleichsproben (Spalte AP) gut angepasst sind. Obwohl die Deckel von den anderen Projektpartnern nur teilweise eingeschraubt werden können, haben sie kleinere Standardabweichungen als Festo.

Zusammenfassend ergibt sich, dass hier der Einfluss der Bauparameter größer erscheint als der des Anlagentypes.

AP G Anlagenintegration

Federführung: EOS GmbH, Krailling

Co-Federführung: Fraunhofer-Institut für Lasertechnik (ILT), Aachen; Lehrstuhl für Fertigungstechnik (IPE-FT), Universität Duisburg-Essen

Aufgrund des zeitlichen Verzuges wurde das Arbeitspaket G zugunsten von AP E gestrichen.

AP H Validierung

Federführung: Festo AG & Co. KG, Esslingen

Co-Federführung: Lehrstuhl für Fertigungstechnik (IPE-FT), Universität Duisburg-Essen

AP H.1 Benchmark Seriensysteme

Auswertung nach Lage und Partner

In der Abbildung 87 und Abbildung 88 sind die Werte für die Bruchdehnung ϵ_B aller 3 Baujobs von den jeweiligen Partnern in beide Aufbaurichtungen aufgetragen. Außerdem wird der Mittelwert der Bruchdehnung in Prozent % berechnet und verglichen. Die Werte sind unter den Balken in den Kästchen dargestellt.

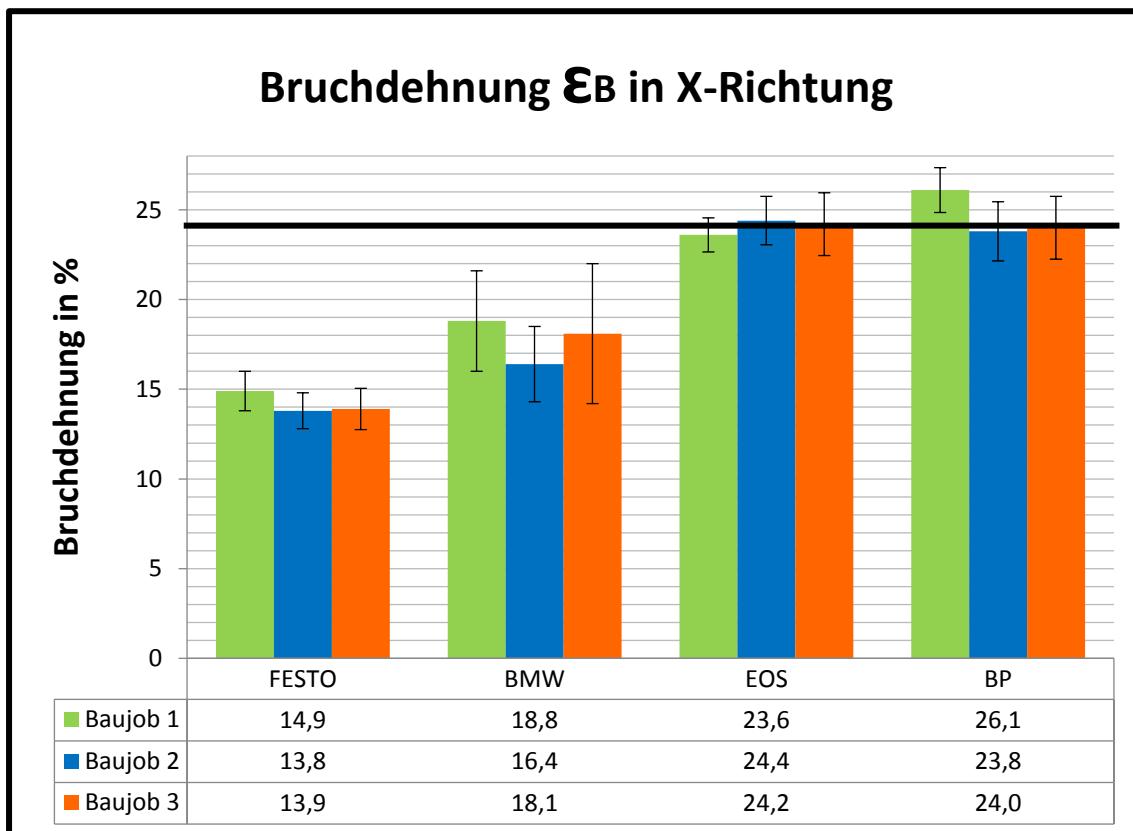


Abbildung 87: Auswertung der Bruchdehnung nach Partner und Baujob in X-Richtung

In der X-Richtung ist zu beachten, dass nur die Bruchdehnung der Proben von EOS und BP mit dem Datenblattwert des Pulverherstellers übereinstimmen und die Abweichungen der Werte sehr gering sind. Die Proben von Festo und BMW hingegen weisen geringere Bruchdehnungen auf.

Es kann festgestellt werden, dass sich die Werte der Bruchdehnung stark unterscheiden können, obwohl die Proben vergleichbare Zugfestigkeiten in der gleichen Aufbaurichtung zeigen. Wie bei der Auswertung der Zugfestigkeit weisen auch die Proben von BMW größere Standardabweichungen als bei den anderen Partnern auf.

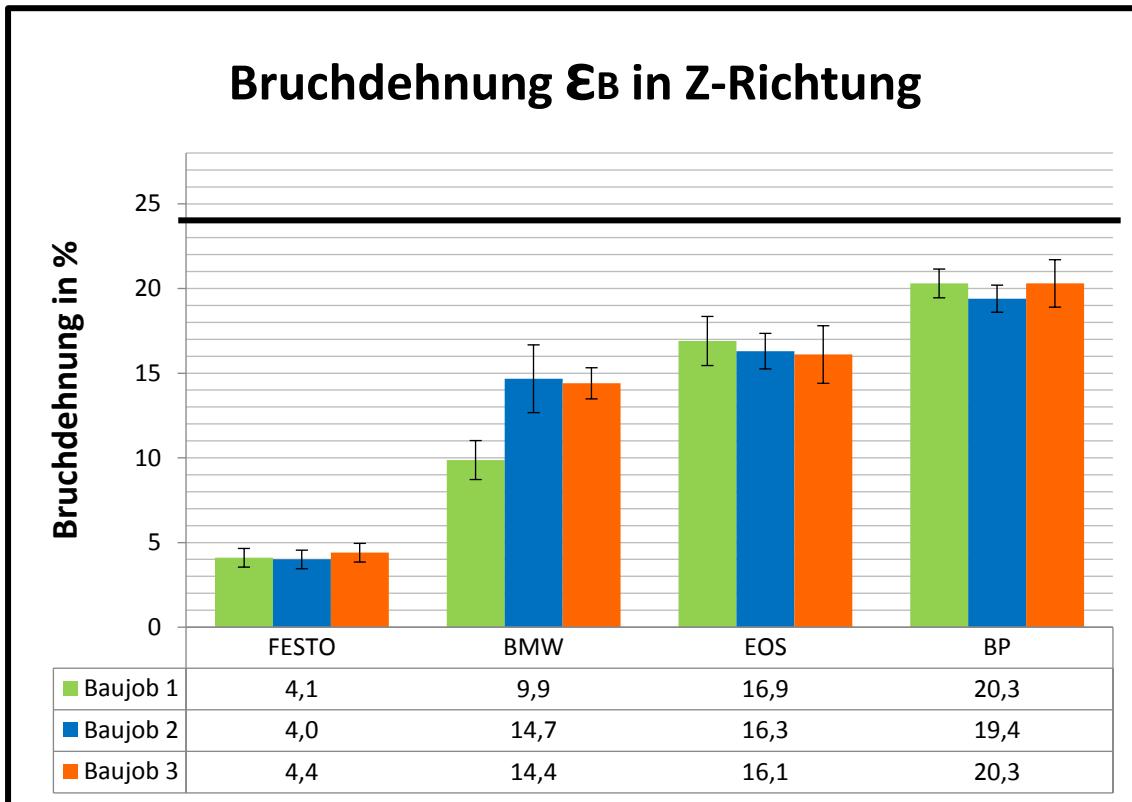


Abbildung 88: Auswertung der Bruchdehnung nach Partner und Baujob in Z-Richtung

Zu der Bewertung der Bruchdehnung in die Z-Richtung werden die Probe 51 und Probe 52 von BMW ausgelassen, da die Proben Ausreißer sind und gar keine bedeutende Bruchdehnung aufweisen. Hier weisen alle Proben unterschiedliche Werte auf und diese liegen alle weit unterhalb des Datenblattwertes. Interessanterweise zeigen die BP-Proben höhere Werte als EOS-Proben, obwohl die Herstellung der BP-Proben von EOS auf einer anderen P110 Anlage übernommen wurde. Die Bruchdehnungen der Proben von Festo sind im Vergleich zu den anderen am geringsten, zeigen aber reproduzierbare Ergebnisse innerhalb der drei Baujobs. Hier sind die Werte der Bruchdehnung von BMW fast dreimal höher als die von Festo, obwohl beide vergleichbare Zugfestigkeiten aufweisen.

Auswertung nach Lage im Bauraum

Hier werden die Proben in den Abbildungen 10 und 11 unabhängig vom Probenhersteller und Anlagentyp nach ihrer Lage im Bauraum betrachtet und die mittlere Zugfestigkeit dargestellt. In die X-Richtung sind insgesamt 7 Proben aufgebaut. Die Lage wird hier durch die Probennummerierung bezeichnet.

Aus Abbildung 89 ist zu erkennen, dass sich die Werte der Festigkeit in X-Richtung nur geringfügig unterscheiden, egal wo die Proben im Bauraum platziert waren. Bei der Probe 59 und 66 kann man feststellen, dass die Zugfestigkeit im Vergleich zu den anderen geringfügig niedriger ist. Die Standardabweichung bei der Probe 59 ist anscheinend etwas größerer als bei den anderen. Dies erklärt sich durch die Temperaturschwankungen im Türbereich, die zu Unzulänglichkeiten im Sinterprozess führen kann.

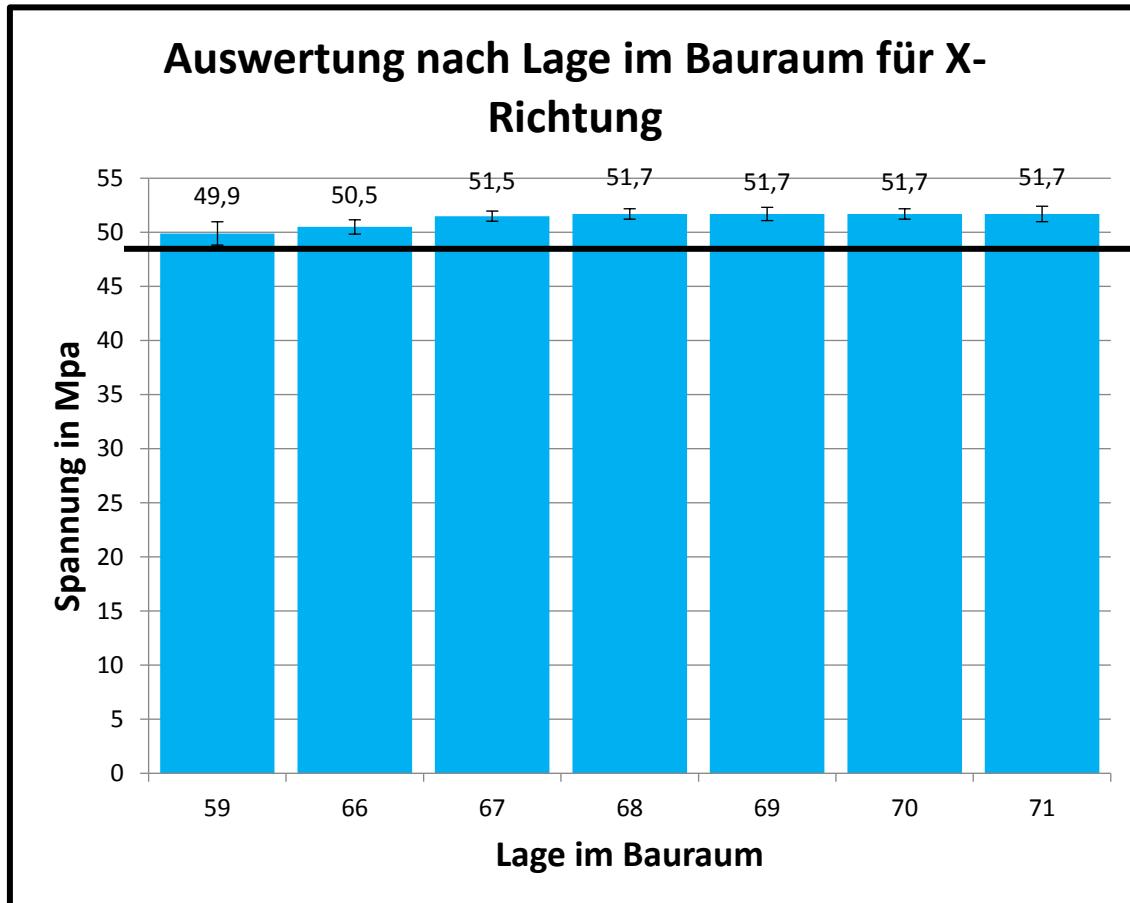


Abbildung 89: Auswertung der Zugfestigkeit nach Lage und Bauraum

In Abbildung 90 liegen die Werte der Zugfestigkeit von den Proben 53-58 auf dem gleichen Niveau mit dem Modellwert. Die Proben 51 und 52, die sich am nächsten zum Türbereich befanden, weisen allerdings auch eine niedrigere Zugfestigkeit und eine größere Standardabweichung auf. In dieser Aufbaurichtung hat die Temperaturschwankung im Türbereich einen noch größeren Effekt auf die mechanischen Kennwerte.

Dies lässt darauf schließen, dass die Proben in die X-Richtung bessere Zugfestigkeit als in die Z-Richtung aufweisen.

Auswertung nach Lage im Bauraum für Z-Richtung

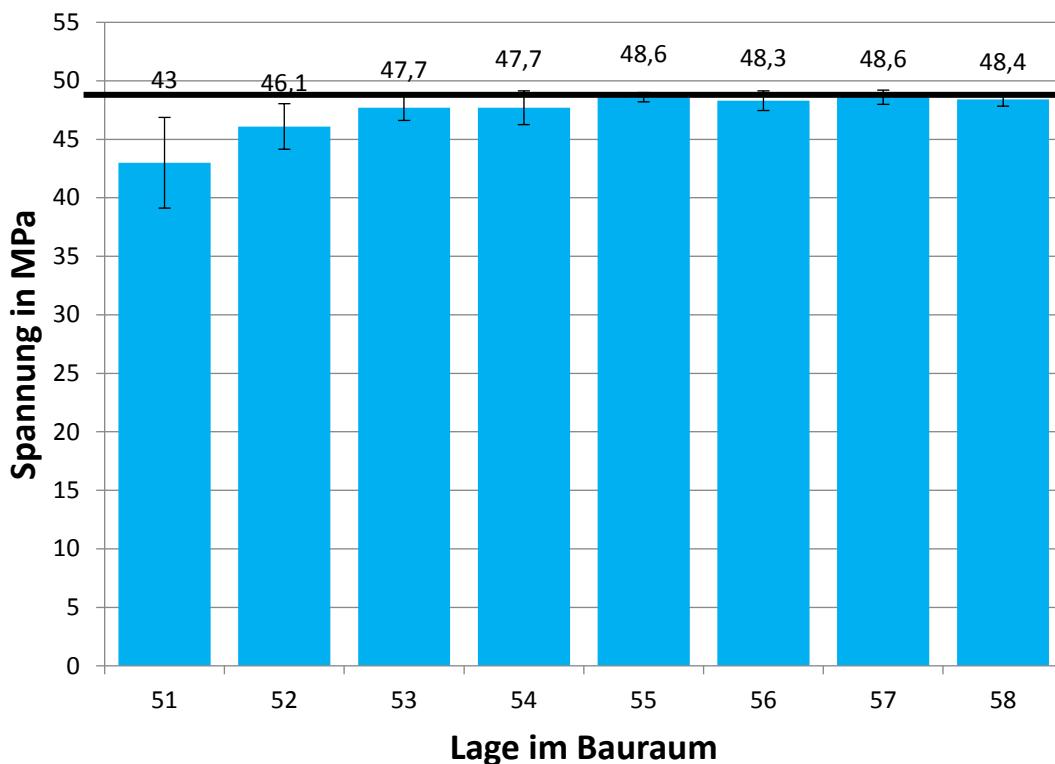


Abbildung 90: Auswertung der Zugfestigkeit nach Lage im Bauraum für Z-Richtung

Auswertung nach Anlagentyp

Zu der Auswertung nach Anlagentyp (EOS P100 und EOS P110) wird die Zugfestigkeit der Proben nach der jeweiligen Anlage sortiert und die Standardabweichung berechnet. Da zwischen den zwei Anlagen einige Unterschiede gegeben sind, sollen die Auswirkung in diesem Forschungsprojekt untersucht werden.

Die von EOS verwendete Formiga P110 ist das Nachfolgemodell von Formiga P100, die BMW und Festo besitzen. Die als BP bezeichneten Proben wurden ebenfalls von EOS auf einer weiteren P110 gebaut. Durch ein neues Temperaturregelungssystem bei der aktuellen Anlage verspricht der Hersteller eine bessere Prozessstabilität und Reproduzierbarkeit. Es waren also zwei P100 und zwei P110 im Test beteiligt.

Abbildung 91 und Abbildung 92 zeigen den Vergleich der Standardabweichung zwischen P100 und P110 für die Zugfestigkeit in den beiden Aufbaurichtungen.

Standardabweichung zwischen P100 und P110 für die Zugfestigkeit in X-Richtung

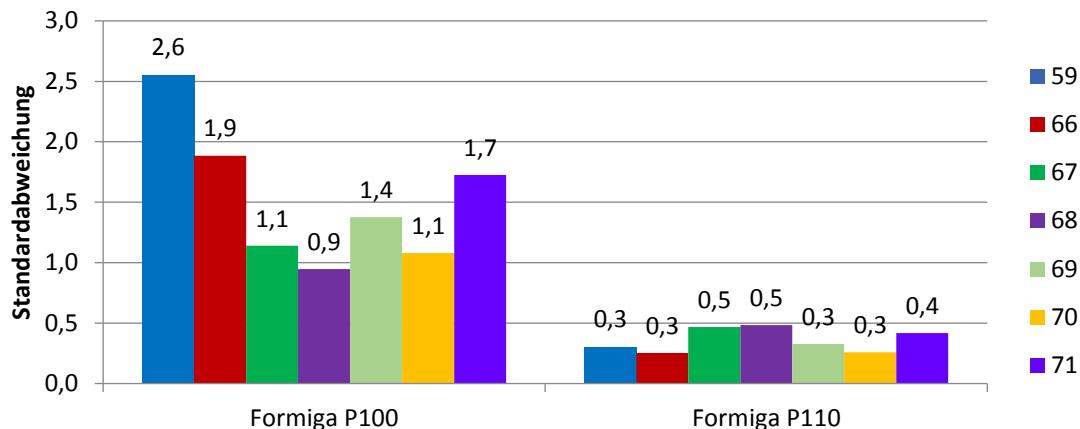


Abbildung 91: Standardabweichung der Zugfestigkeit zwischen den Anlagen in X-Richtung

Auf diesem Bild sind deutliche Unterschiede zwischen den zwei Anlagen zu sehen. Die Standardabweichungen bei der neueren Anlage (P110) sind viel geringer als bei dem Vorgängermodell. Die Werte liegen im Bereich 0,5 oder weniger. Bis heute existieren keine Veröffentlichungen zu der zulässigen Standardabweichung im LS-Prozess, aber der Sprung in der Prozessstabilität ist enorm.

Bei der Formiga P100 haben die in der Mitte des Bauraums hergestellten Proben eine bessere Reproduzierbarkeit als die aus dem Türbereich oder dem hinteren Bauraum, da in der Bauraummitte eine gleichmäßigere Temperaturverteilung zu sehen ist.

Standardabweichung zwischen P100 und P110 für Zugfestigkeit in Z-Richtung

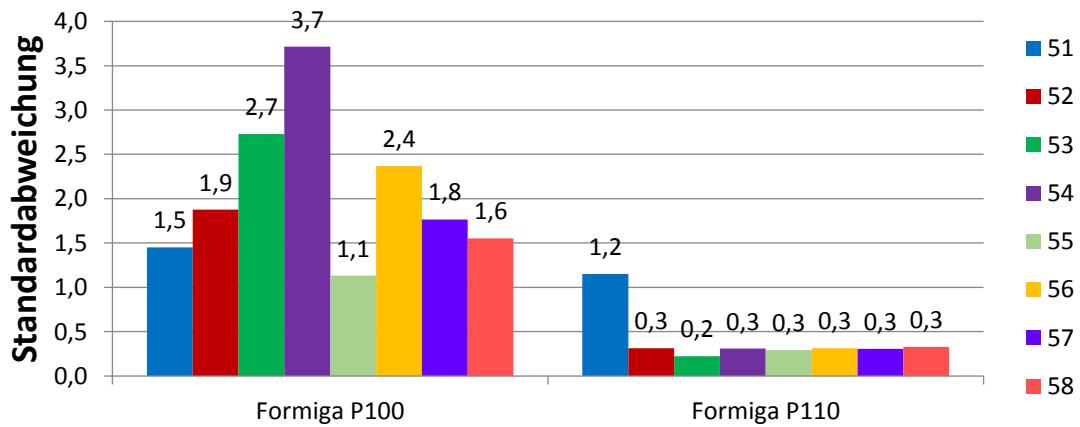


Abbildung 92: Standardabweichung der Zugfestigkeit zwischen den Anlagen in Z-Richtung

In Z-Richtung zeigt die Formiga P110 ähnlich geringere Standardabweichungen wie bei der X-Richtung. Auffällig ist, dass die Probe 51 eine größere Abweichung aufweist. Diese Anomalie kann bedeuten, dass die Teile im Türbereich trotz des Temperaturregelungssystems in der neuen Anlage noch für einen ungleichmäßigen Sinterprozess anfällig sind. Es kann aber auch sein, dass diese Probe einen Ausreißer darstellt oder beim Zugversuch nicht richtig eingespannt wurde. Bei der Berechnung der Standardabweichung der Formiga P100 wurden die Proben 51 und 52 von BMW nicht eingeschlossen, da die Proben Ausreißer sind. Die Werte dieser Anlage streuen deutlich größer und die Verteilung der Standardabweichung ist uneinheitlich.

Aus diesen Gründen kann der Schluss gezogen werden, dass die Formiga P100 die schlechtere Reproduzierbarkeit in die Z-Richtung aufweist.

Auswertung nach Lage im Bauraum

Hier werden die Proben von allen Partnern in der Abbildung 93 und Abbildung 94 nach ihrer Lage im Bauraum angeordnet und die mittlere Bruchdehnung berechnet. In der Z-Richtung sind insgesamt 8 Proben aufgebaut.

Da, wie schon erwähnt, die Proben 51 und 52 in die Z-Richtung von BMW als Ausreißer angesehen werden, werden die Werte in der Auswertung nicht berücksichtigt.

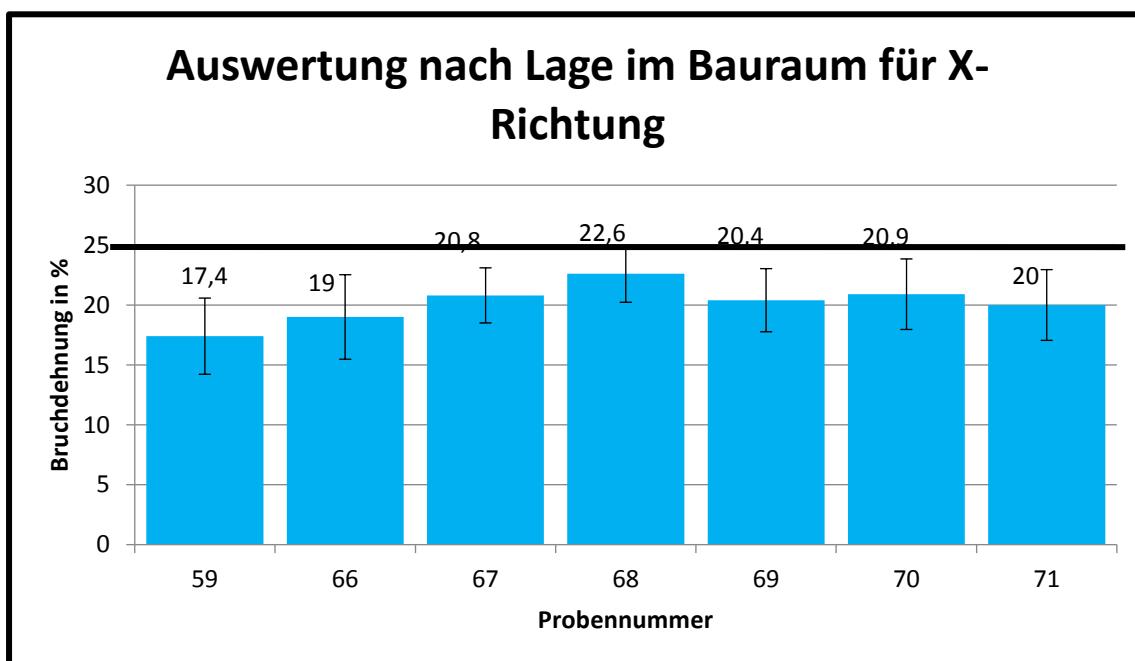


Abbildung 93: Auswertung der Bruchdehnung nach Lage im Bauraum für X-Richtung

Aus Abbildung 93 ist zu erkennen, dass die Bruchdehnung der Proben dann am besten ist, wenn die Proben in der Bauraummitte aufgebaut wurden. Wurden die Proben immer weiter in die Ecken des Bauraums platziert, sinken die Werte kontinuierlich. Dies lässt sich wieder durch die Temperaturschwankung am Rand und die höhere Temperaturstabilität in der Mitte des Bauraums begründen.

Wie aus Abbildung 94 ersichtlich, liegen die Werte der Bruchdehnung noch deutlicher unter dem Datenblattwert. Die höchsten Werte weisen die Probe 56 (14,6 %) und 57 (15 %) auf. Hieraus kann man schließen, dass die Bruchdehnung der Proben in die Z-Richtung am besten ist, wenn die Proben am hinteren Ende des Bauraums aufgebaut sind.

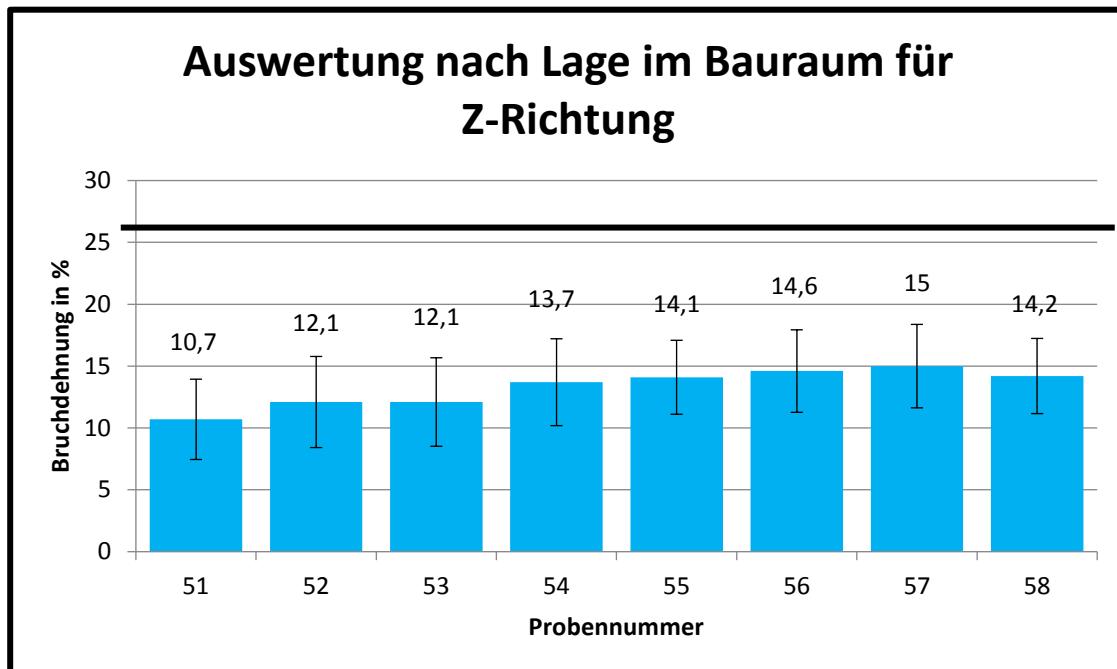


Abbildung 94: Auswertung der Bruchdehnung nach Lage im Bauraum für Z-Richtung

Auswertung nach Anlagentyp

Zu der Auswertung der Bruchdehnung nach Anlagentyp werden wie bei der Zugfestigkeit die Ergebnisse der Standardabweichung berechnet und dargestellt. Abbildung 95 und Abbildung 96 zeigen den Vergleich der Standardabweichung zwischen P100 und P110 für die Bruchdehnung in die beiden Aufbaurichtungen.

Im Vergleich zu den Ergebnissen der Zugfestigkeit weisen die Ergebnisse der Bruchdehnung zwischen den beiden Anlagen keine starken Unterschiede auf. Die einzelnen Werte, die die Lage der Proben im Bauraum repräsentieren, streuen auch stark voneinander. Bei der Formiga P100 zeigen die in der Mitte des Bauraums hergestellten Proben bessere Reproduzierbarkeit hinsichtlich der Bruchdehnung. Dahingegen ist bei der Formiga P110 keine ausgeprägte Trendlinie zu sehen.

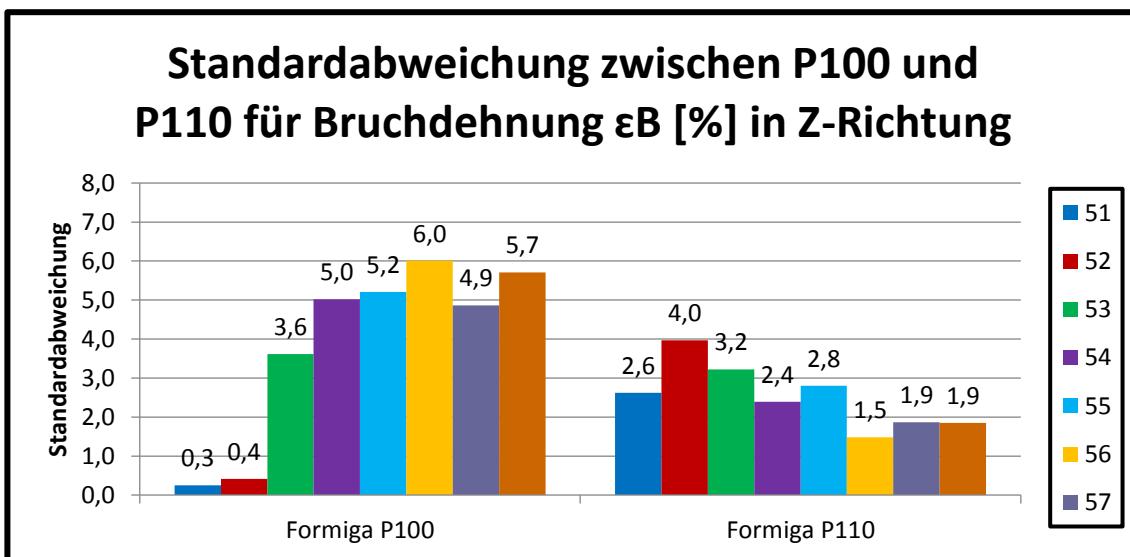


Abbildung 95: Standardabweichung der Bruchdehnung zwischen den Anlagen in Z-Richtung

In die Z-Richtung ist das gleiche Ergebnis wie bei der X-Richtung zu sehen. Die Probe 51 und 52 sind nur die Standardabweichungen der Proben von Festo, da die Proben von BMW Ausreißer sind. Deswegen sind die Werte im Gegensatz zu den anderen viel kleiner.

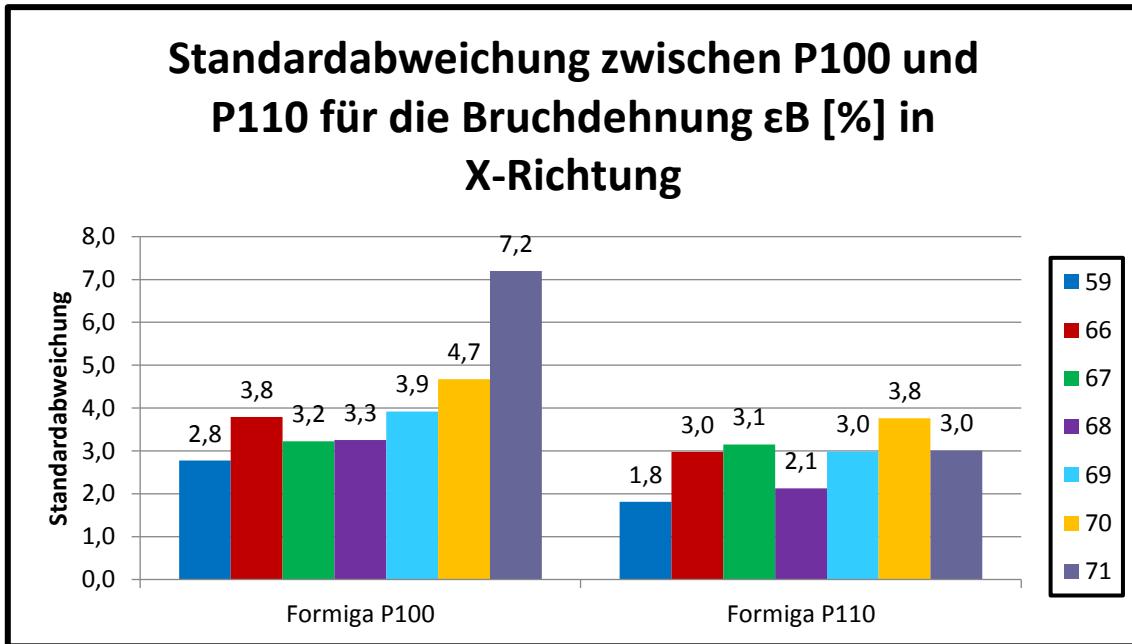


Abbildung 96: Standardabweichung der Bruchdehnung zwischen den Anlagen in X-Richtung

Allgemein sind die Standardabweichungen der ermittelten Bruchdehnungen für die Formiga P100 in die Z-Richtung größer als in die X-Richtung. Dahingegen ist der Unterschied zwischen den beiden Aufbaurichtungen bei der Formiga P110 kaum zu erkennen.

Geometrische Vermessung Kappe Zündspule

Zur Prüfung der Maßhaltigkeit werden die Zündspulenkappen mittels Steifenlichtprojektion vermessen und ausgewertet.

Abbildung 97 zeigt die relevanten, ausgewerteten Bauteilmaße.

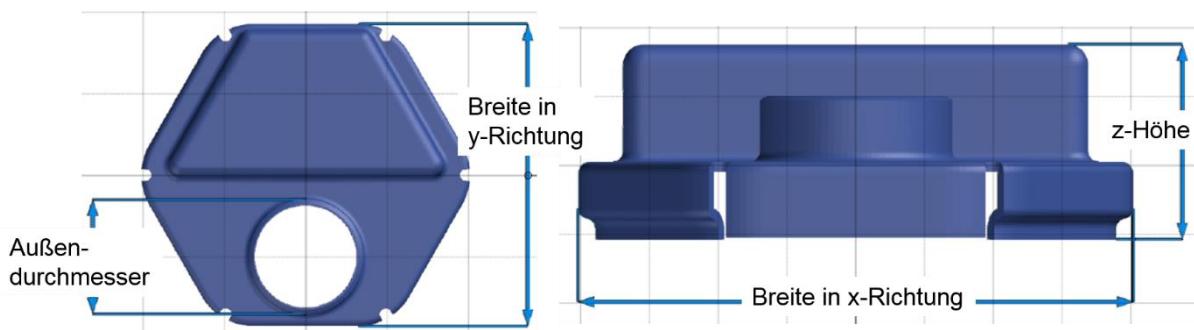


Abbildung 97: Vermessung der Zündspulkappe

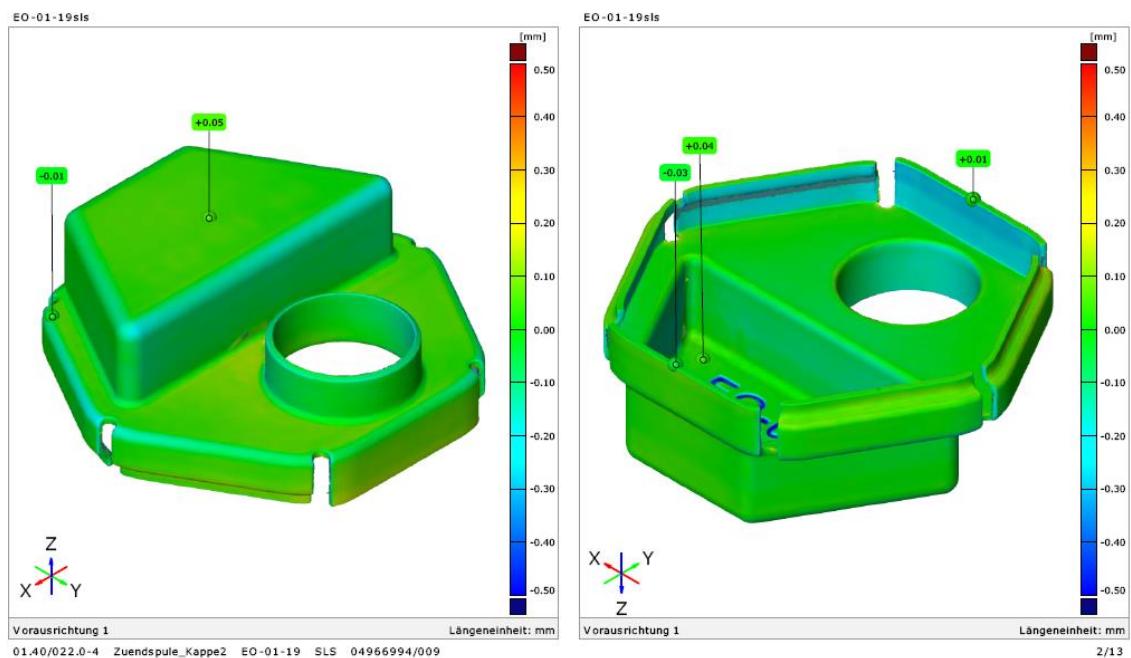


Abbildung 98: Fehlerfarbenbild Bauteilvermessung

Abbildung 98 stellt exemplarische ein Fehlerfarbenbild dar, welches normalerweise das Ergebnis der geometrischen Vermessung ist. In der Regel bekommt man dadurch einen guten Eindruck über die Maßhaltigkeit des Bauteils. Die Methode bildet einen Soll-Ist-Vergleich aus Soll CAD-Geometrie und digitalisierte Punktewolke. Die Punktewolke wird dann anhand zu definierender Merkmale am Soll-CAD-Datensatz ausgerichtet. Im Folgenden wird der Abstand der erzeugten Flächenelemente zueinander berechnet und in einer Farbskala graphisch dargestellt. In untenstehender Abbildung zeigt die Farbskala den Abstand normal zur Oberfläche an. Für eine weitere Detaillierung ist es zudem möglich Bauteilmerkmale, wie beispielsweise Zylinder zurückzuführend und deren Durchmesser zu bestimmen.

Nachfolgende Tabelle 8 und Tabelle 9 zeigt die den Soll-Ist Vergleich der ausgewerteten, relevanten Bauteilmaße, die in Abbildung 97 bereits definiert wurden. Die Kürzel stehen dabei für den herstellenden Projektpartner: BP: Blue Production (durch das Ausscheiden von BP bei EOS produziert); BM: BMW Group; EO: EOS GmbH; FE: Festo AG & Co. Kg.

Tabelle 8 – Auswertung der Vermessung des oberen Zündspulendeckels

| Prüfmerkmal | Sollmaß | Zulässige Toleranz | BP-01 | BP-02 | BM-01 | BM-02 | BM-03 |
|------------------|---------|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Außendurchmesser | 28 mm | +/- 0,15 mm | 27,97 | 27,96 | 27,91 | 27,87 | 27,86 |
| Max. x-Abmessung | 80,8 mm | +/- 0,3 mm | 80,58 | 80,6 | 80,81 | 80,49 | 80,4 |
| Max. y-Abmessung | 74 mm | +/- 0,3 mm | 74,2 | 74,16 | 74,2 | 74,06 | 74,02 |
| Max. Z-Abmessung | 28,3 mm | +/- 0,15 mm | 28,61 | 28,56 | 28,07 | 28,47 | 28,4 |
| Prüfmerkmal | Sollmaß | Zulässige Toleranz | FE-01 | FE-02 | FE-03 | EO-01 | EO-02 |
| | | | | | | EO-01 | EO-02 |
| | | | | | | EO-03 | |

| | | | | | | | | |
|----------------------|---------|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Außendurchmesser | 28 mm | +/- 0,15 mm | 27,75 | 27,75 | 27,76 | 27,85 | 27,86 | 27,86 |
| Max. x-Abmessung | 80,8 mm | +/- 0,3 mm | 80,31 | 80,22 | 80,34 | 80,5 | 80,62 | 80,63 |
| Max. y- Abmessung | 74 mm | +/- 0,3 mm | 73,74 | 73,76 | 73,83 | 74,22 | 74,15 | 74,19 |
| Max. Z-Abmessung | 28,3 mm | +/- 0,15 mm | 28,38 | 28,33 | 28,39 | 28,49 | 28,58 | 28,53 |

Tabelle 9 – Auswertung der Vermessung des unteren Zündspulendeckels

| Prüfmerkmal | Sollmaß | Zulässige Toleranz | BP-01 | BP-02 | BM-01 | BM-02 | BM-03 | |
|----------------------|---------|--------------------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|
| | | | | | | | | |
| Außendurchmesser | 28 mm | +/- 0,15 mm | 27,99 | 27,96 | 27,91 | 27,87 | 27,89 | |
| Max. x-Abmessung | 80,8 mm | +/- 0,3 mm | 80,65 | 80,81 | 80,57 | 80,51 | 80,49 | |
| Max. y- Abmessung | 74 mm | +/- 0,3 mm | 74,28 | 74,22 | 74,22 | 74,21 | 74,13 | |
| Max. Z-Abmessung | 28,3 mm | +/- 0,15 mm | 28,58 | 28,53 | 28,19 | 28,71 | 28,84 | |
| Prüfmerkmal | Sollmaß | Zulässige Toleranz | FE- 01 | FE- 02 | FE- 03 | EO-01 | EO-02 | EO-03 |
| Außendurchmesser | 28 mm | +/- 0,15 mm | 27,74 | 27,76 | 27,73 | 27,84 | 27,87 | 27,85 |
| Max. x-Abmessung | 80,8 mm | +/- 0,3 mm | 80,37 | 80,38 | 80,37 | 80,57 | 80,57 | 80,55 |
| Max. y- Abmessung | 74 mm | +/- 0,3 mm | 73,84 | 73,79 | 73,83 | 74,09 | 74,12 | 74,1 |
| Max. Z-Abmessung | 28,3 mm | +/- 0,15 mm | 28,47 | 28,46 | 28,43 | 28,56 | 28,53 | 28,46 |

Es zeigt sich, dass vor allem die Maschine bei Festo in X und Y Richtung stets mit Untermaß produziert. Für den Kennwert y-Abmessung gesamt liegt die Anlage aber innerhalb des festgelegten Toleranzfensters. Bemerkenswert ist weiterhin, dass die Streuung von Job zu Job gerade bei Festo am geringsten ist. Dies lässt darauf schließen, dass die Maschine zwar sehr reprozierbar arbeitet, aber die gewählten Skalierfaktoren nicht exakt zum vorgegebenen Parametersatz passen. Auch die Anlage bei EOS arbeitet sehr reproduzierbar und liefert weitgehend viele i.O. Maße. Die Maschine bei der BMW Group hingegen weist, gerade bei dem oberen Bauteil die größte Schwankung der überprüften Anlagen auf.

Es ist zudem festzustellen, dass die gewählte Toleranz mit +/- 0,15 mm, was etwas mehr als zwei Schichtstärken entspricht, wohl zu niedrig gewählt ist, um sie mit den allgemeingültigen Skalierfaktoren zu erreichen.

Funktionsprüfung Simkartenhalter

Zur Funktionsprüfung des Simkartenhalters ist zu prüfen, ob die SIM Karte in die vorgesehene Aussparung passt und dort sicher einrastet. Hier wird lediglich ein Verbauversuch mit dem Ergebnis i.O (In Ordnung) und n.i.O. (nicht in Ordnung) durchgeführt.

Das Ergebnis ist in nachfolgender Tabelle dargestellt.

Tabelle 10 – Ergebnis Verbauversuch Simkartenhalter

| Projektpartner | i.O. | n.i.O. |
|------------------------|------|--------|
| BMW | 8 | 1 |
| Blue Production | 6 | 3 |
| EOS | 9 | 0 |
| Festo | 9 | 0 |
| SUMME | 32 | 4 |

In Summe können fast 90 % aller produzierten Bauteile mit i.O bewertet werden. Eine Bewertung mit n.i.O. hatte bei drei der vier Bewertungen zugrunde liegen, dass die eingebaute Feder nicht ordnungsgemäß funktionierte und somit der Verbau der SIM-Karte nicht möglich ist. Bei einem Halter passte die Simkarte aufgrund maßlicher Abweichungen nicht in die vorgesehene Vertiefung. In Abbildung 99 sind jeweils ein Gut- sowie ein Schlechtteil dargestellt.

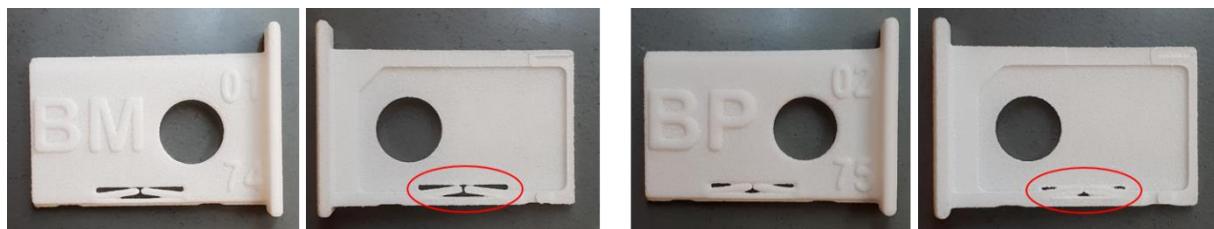


Abbildung 99: Bewertungskriterien Simkartenhalter

Sichtprüfung Narbplatte

Die produzierten Narbplatten der Projektpartner wurden in Abhängigkeit der Aufbaurichtung einer Sichtprüfung und anschließender Bewertung unterzogen. Die glatte Rückseite der Bauteile, welche, je nach Bauteil deutliche Schichtlinien aufzeigte wurde dabei nicht bewertet.

In Tabelle 11 ist das Ergebnis der Sichtprüfung tabellarische aufgeführt.

Tabelle 11 – Ergebnis Sichtprüfung Narbplatte

| Projektpartner | Orientierung | i.O. | n.i.O. |
|------------------------|--------------|------|--------|
| BMW | 0° | 0 | 3 |
| | 45° | 2 | 1 |
| | 90° | 2 | 1 |
| Blue Production | 0° | 2 | 1 |
| | 45° | 0 | 2 |
| | 90° | 3 | 0 |
| EOS | 0° | 2 | 1 |
| | 45° | 3 | 0 |
| | 90° | 3 | 0 |
| Festo | 0° | 1 | 2 |
| | 45° | 3 | 0 |
| | 90° | 3 | 0 |
| SUMME | | 24 | 11 |

Die subjektive Ausschussrate der Bauteile liegt bei 30 %, wobei vermehrt Bauteile aus nicht akzeptabel bewertet wurde, welche liegend produziert wurden. Abbildung 100 zeigt zwei Bauteile, welche liegend, also parallel zur Bauplattform in den Anlagen hergestellt wurden.

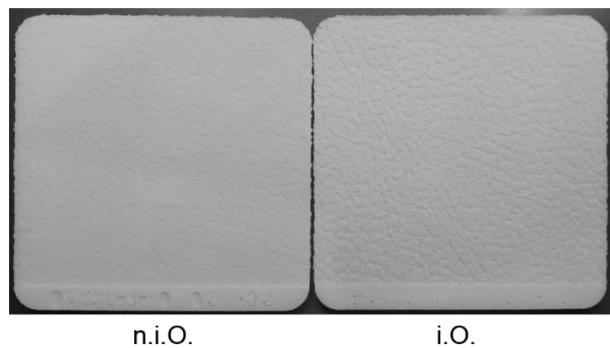


Abbildung 100: Bauteile in liegender Aufbaurichtung

Gut zu erkennen sind die Bauteile trotz gleicher Aufbaurichtung und Position optisch deutlich unterschiedlich. Das Bauteil, welches mit n.i.O. bewertet wurde stammt aus einer P100, das Bauteil auf

der rechten Seite entstammt einer P110. Die feine Bauteilstruktur der Narbung ist auf der rechten Narbplatte deutlich besser abgebildet.

In Abbildung 101 ist eine Übersicht der besten Narbplatten dargestellt.

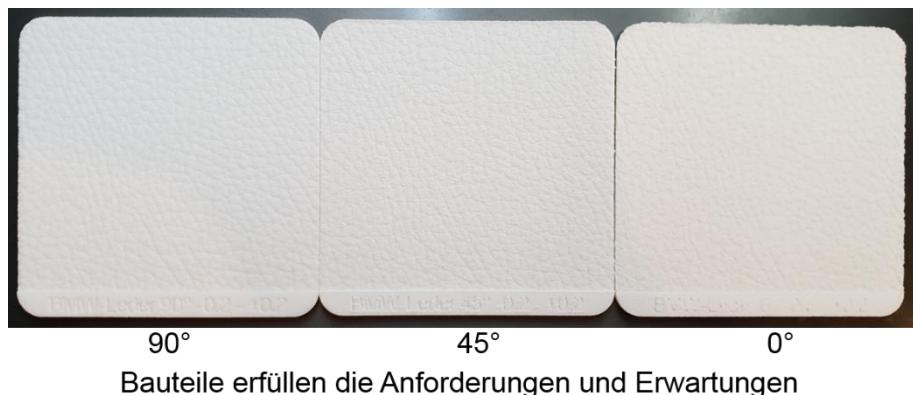


Abbildung 101: Übersicht über die erreichbaren Oberflächenqualitäten

Es ist deutlich zu erkennen, dass die Narbplatten mit sinkendem Aufbauwinkel, also je mehr sich die Orientierung der Bauplattform annähert immer schlechtere Ergebnisse liefern. Die stehend, 90° orientiert, aufgebauten Platten bilden gesamthaft die beste, homogenste Narbung aus.

Würden normale Qualitätskriterien angelegt und keine Berücksichtigung des schichtweisen Fertigungsverfahrens und der Aufbaurichtung stattfinden, so wären aufgrund der Abbildung des Narbmusters alle liegenden Platten mit n.i.O. zu bewerten.

Prüfung der Schlagzähigkeit

Die Schlagzähigkeitsprüfung des Ringversuchs konnte nicht ordnungsgemäß und nach Norm DIN EN ISO 179 durchgeführt werden. Der Grund dafür war die aufgebrachte/eingebrachte Schrift zur Bauteilidentifizierung. Zur besseren Nachvollziehbarkeit ist die Situation in den folgenden Bildern exemplarisch dargestellt. Abbildung 102 zeigt deutlich den Verlauf des Bruches nach der Belastung durch die Beschriftung. Dies war auf nahezu allen Probekörpern der Fall, da die Beschriftung bis in die direkte Einflusszone des Schlagpendels reichte. Weiterhin war die Beschriftung vertiefend eingebracht und schwächt an diesen Stellen somit das Material. Abbildung 90 zeigt die Oberflächenqualität einiger Probekörper, gerade aus dem BMW Baujob 1. Diese ist als eher mangelhaft einzustufen und deutet auf hohe Porosität innerhalb der Bauteile hin. Diese, so identifizierbaren Probekörper wurden direkt vor der Prüfung ausgeschlossen. Es ist davon auszugehen, dass hier eine lokale Prozessschwankung beispielsweise infolge mangelhaftem Materialauftrags ursprünglich war.



Abbildung 102: Geringe Oberflächenqualitäten und Bruchflächenverlauf durch Beschriftung

Eine wahrheitsgemäße Bestimmung der benötigten Energie zum schlagartigen Versagen und somit der Schlagzähigkeit ist dadurch nicht möglich.

AP H.2 Maximale Aufbauraten

Die Maximalen Aufbauraten des Versuchsstandes wurden sowohl experimentell, als auch theoretisch im AP E betrachtet. Aufgrund des Entfalles des AP G, konnten diese Werte nicht innerhalb eines bestehenden Anlagentyps getestet werden. Ebenfalls konnten durch die strukturelle Änderung des Projektes die AP H.3 (Validierung) und H.4 (Verifizierung) nicht durchgeführt werden.

AP I Projektmanagement

EOS GmbH, Krailling

Die durch die Struktur des Förderprojekts gegebene räumliche Trennung der Projektpartner bedingte einen regelmäßigen Austausch. Neben den halbjährlichen Statustreffen aller Partner inkl. Projektträger, gab es in den Arbeitspaketen einen intensiven Austausch über die fachliche Arbeit in sehr regelmäßigem Abstand, um den Fortschritt des Projektes zu sichern. Dies geschah zum Großteil über virtuelle Räume und Telefonkonferenzen sowie E-Mails. In fast allen Arbeitspaketen wurden zudem unterjährige physische Treffen durchgeführt. Auch durch die verschiedenen Standorte an denen die Versuche in den einzelnen Arbeitspaketen durchgeführt wurden, wurden Arbeitstreffen vor Ort durchgeführt. Die Leitung der Arbeitspakete wurde, wie im Rahmenplan beschrieben, durch die entsprechenden Partner wahrgenommen, wobei die Gesamtkoordination des Förderprojekts von EOS mit Unterstützung der Universität Duisburg-Essen durchgeführt wurde.

Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel des Verbundprojektes war es, neue Ansätze zur Steigerung der Produktivität und Wirtschaftlichkeit von Laser-Sinter-Anlagen zu erarbeiten. Im Fokus standen dabei Produktivitätssteigerungen um einen Faktor von 5-10 bei einer höchstmöglichen Reproduzierbarkeit der Bauteileigenschaften. Eine Verbesserung der Prozesssicherheit sowie eine optimierte Ressourceneffizienz waren ebenfalls ein Bestandteil des Projektes.

Die definierten Anforderungen lieferten Grundlagen zur Entwicklung eines Versuchsstandes, der den Anforderungen zukünftiger Anlagengenerationen gerecht werden konnte. Die Anforderungen enthielten Zielgrößen, die mit der aktuellen Anlagentechnologie nicht erreicht werden können. Beispielhaft seien hier die gesteigerte Reproduzierbarkeit abhängig von der Orientierung im Bauraum sowie der Lage genannt. Durch die Erstellung der Anforderungen wurden die notwendigen Handlungsfelder der Anlagen- und Prozessentwicklung verdeutlicht.

Ausgehend von den erstellten Anforderungen wurde ein Versuchsstand entwickelt, an dem neu erarbeitete Lösungsansätze, die zur Erfüllung der Anforderungsliste in Frage kommen, erprobt werden konnten. Entwickelt wurden die Systeme am Fraunhofer ILT und am Rapid Technology Center der Universität Duisburg-Essen. Aufgrund der hohen Komplexität der Aufgabe sowie keiner Eignung der angedachten Hardware, wurde die Inbetriebnahme des Versuchsstandes zeitlich verzögert durchgeführt. Realisiert wurden innovative Pulverauftragssysteme, ein auf 34 Zonen differenzierbares Temperaturmanagement und eine kontrollierte Defokussierung, die zur Erzeugung großer Querschnittsflächen dient. Diese neu einstellbaren Parameter mussten nach der Inbetriebnahme aller Komponenten zunächst in die Steuerungssoftware von EOS integriert und an der Universität Duisburg-Essen für den Laser-Sinter-Prozess qualifiziert werden. Mit der aufgebauten Versuchsanlage konnten neue Parameter erprobt und Bauprozesse mit einer Gesamthöhe von über 220 mm erfolgreich gefertigt werden.

Parallel zur Steigerung der Produktivität wurden Systeme entwickelt, welche zukünftig für eine Online-Qualitätskontrolle verwendet werden können. Hierzu wurden Thermografie-Aufnahmen zur flächendeckenden thermischen Erfassung der Gegebenheiten im Baufeld durchgeführt. Unter Einbindung der Messbedingungen wurden die Möglichkeiten und Grenzen des verwendeten Thermografie-Systems ermittelt und in ein Klassifizierungssystem zur Fehleridentifikation implementiert.

Die Experimente, die mit der Versuchsanlage durchgeführt wurden, befassten sich mit den Grundlagen der Qualifizierung der innovativen Parameter. Der resultierende Fokusdurchmesser beläuft sich dabei auf der höchsten Fokusstufe auf ca. 2 mm und beschreibt in der Nullstellung in etwa den Stand der Technik mit 0,4 mm. Um die technischen Möglichkeiten der Anlage zu erschließen, musste eine ausführliche Parameterstudie in Abhängigkeit zur Fokusstufenvariation durchgeführt werden. Zu diesem Zweck wurden neue Probekörper entwickelt, die die Laser-Pulver-Wechselwirkung in Abhängigkeit zur Fokusstufenvariation aufdecken. Die Versuche zur Laser-Pulver-Wechselwirkung konnten erfolgreich mit einer High-Speed-Thermografiekamera aufgezeichnet werden und liefern zukünftig Aufschlüsse über die Heizraten im Material. Nach der Ermittlung geeigneter Schichtparameter, wurden dreidimensionale Bauteile auf ihre Bauteildichte mit unterschiedlichen Fokusdurchmessern gefertigt und analysiert.

Über Schichtbelichtungen, resultierenden Bauteil- und Pulverpackungsdichten sowie einer Anpassung der Scanstrategien konnten Parameter für die Generierung von Zugproben in allen Fokusstufenvariationen qualifiziert werden. Diese wurden in x/y- sowie in z-Richtung gebaut und liefern die mechanischen Kennwerte der Bruchdehnung, des E-Moduls und der Zugfestigkeit. Erste Auswertungen haben dabei gezeigt, dass eine Homogenisierung der Anisotropie lasergesinterter Bauteile erfolgen konnte.

Zudem wurden Zusammenhänge der im Prozess vorherrschenden Packungsdichte mit der Reproduzierbarkeit der Oberflächengüte korreliert. Dabei erzeugten verschiedene

Auftragsmechanismen und variierende Pulverauftragswalzendrehzahlen unterschiedliche Packungsdichten im Prozess. Die Resultate zeigen, dass eine höchste Reproduzierbarkeit der Oberflächenrauheit bei höheren Packungsdichten vorzufinden ist. Zusätzlich wird die Notwendigkeit der Anpassung des Pulverauftragsmechanismus in Abhängigkeit zum verwendeten Material aufgezeigt.

Ein umfassendes Benchmark wurde in diesem Projekt auf vier Laser-Sinter-Anlagen vom Typ EOS Formiga P 100/110 mit Prüfkörpern, die verschiedenste Anforderungen erfüllen müssen, durchgeführt. Ausgewertet wurden die Bauteile nach Maßhaltigkeit, Funktionalität mechanischen Eigenschaften und Reproduzierbarkeit. Differenziert wurde bei der Auswertung zwischen den Anlagentypen und der Position der Bauteile im Bauraum. Die Ergebnisse zeigen, dass eine neue Anlagentechnik, wie sie beispielsweise in der Formiga P 110 zu finden ist, signifikante Einflüsse auf die Reproduzierbarkeit, aber auch auf einzelne mechanische Kennwerte hat.

Abschließend wurde in diesem Projekt die Produktivitätssteigerung des Versuchsstandes im Vergleich zur konventionell angewendeten Formiga P 100 ermittelt und bewertet. Der aufgebaute Versuchsstand erlaubte eine Produktivitätssteigerung von 2,27. Durch eine detaillierte Diskussion konnten Potenziale aufgedeckt werden, die verhältnismäßig leicht zu realisieren sind. Hierzu gehören beispielsweise Delay-Optimierungen im Anlagen-Code, die zu einer errechneten Produktivitätssteigerung von 3,74 in Bezug auf die Vergleichsanlage führen würden. Damit konnte ein hohes Potenzial der Anlagentechnik bezogen auf die Produktivitätssteigerung aufgedeckt werden. Der in den Anforderungen genannte Faktor von 5-10 konnte jedoch nicht erreicht werden. Gründe liegen in den Grenzen der technischen Machbarkeit innerhalb dieses Projektes.

Der Ausblick, den dieses Projekt ermöglicht, wird durch eine verbesserte Generation von Laser-Sinter-Anlagen beschrieben. Für die Einführung des Laser-Sinters in eine Serienfertigung von additiv gefertigten Kunststoffbauteilen ist es zielführend, die in diesem Projekt gewonnenen Erkenntnisse weiter zu führen und in die zukünftige Anlagenentwicklung zu integrieren. Aufgrund interner Projektverzögerungen konnten noch nicht alle gesammelten Daten ausgewertet werden. Diese werden jedoch nach erfolgreicher Auswertung in wissenschaftlichen Veröffentlichungen publik gemacht. Das hohe Potenzial der Prozessbeschleunigung und alle damit einhergehenden positiven Synergieeffekte können dazu führen, dass das Laser-Sintern zukünftig auch bei höheren Stückzahlen wirtschaftlich einzusetzen ist. Dazu gehören die Vermeidung von anisotropen Bauteileigenschaften, eine verbesserte Auffrischrate des Ausgangsmaterials und eine unabhängige Lage im Bauraum der Laser-Sinter-Anlage. Dies bildet die Grundlage, um Szenarien, die heute noch am wirtschaftlichsten mittels konventioneller Fertigung realisiert werden, zukünftig mittels additiver Fertigung bedient werden können. Potenziell geeignete Messmittel und Methoden wurden erörtert, die ergänzend zum wirtschaftlich verbesserten Prozess neue Anwendungsfelder und Märkte erschließen können. Eine durchgängige Online-Qualitätskontrolle mit Regelung der Prozessführung ist zukünftig zur Sicherstellung der Bauteileigenschaften für sicherheitsrelevante Bauteile inklusive einer Nachverfolgbarkeit zwingend notwendig.

Literaturangaben

- [1] Philippi, J.: Verfahren zum Herstellen eines dreidimensionalen Objekts mittels Lasersintern, Patent-Nr.: DE102007056984A1
- [2] Wegner, A. u. Witt, G.: Ursachen für eine mangelnde Reproduzierbarkeit beim Laser-Sintern von Kunststoffbauteilen. Rapidtech 2013. 2013
- [3] Zur Jacobsmühlen, J., Kleszczynski, S., Schneider, D. u. Witt, G.: High Resolution Imaging for Inspection of Laser Beam Melting Systems. n: Bourell, D. (Hrsg.): Proceedings of the 23rd International Solid Freeform Fabrication Symposium (SFF 2012), The University of Texas at Austin, 2012, S. 999–1014.
- [4] Kleszczynski, S., Zur Jacobsmühlen, J., Sehrt, J. T. u. Witt, G.: Error Detection in Laser Beam Melting Systems by High-Resolution Imaging. n 23rd Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium. Ed. Bourell, D., Austin, TX, USA, 2012
- [5] Reinhardt, T. u. Witt, G.: Optimierung der Oberflächengüte lasergesinterter Bauteile aus Polypropylen durch individuelle Flächenbelichtung in Abhängigkeit von deren Orientierung. Rapidtech 2013. 2013
- [6] Reinhardt, T., Martha, A., Witt, G. u. Köhler, P.: Preprocess-Optimization for Polypropylene Laser Sintered Parts. Computer-Aided Design and Applications 11 (2013) 1, S. 49–61.
- [7] Schleifenbaum, J. H.: Verfahren und Maschine zur Individualisierten Produktion mit High Power Selective Laser Melting. Dissertation, RWTH Aachen, 2012
- [8] Buchbinder, D.: Selective Laser Melting von Aluminiumgusslegierungen. Dissertation, RWTH Aachen, 2013
- [9] Buchbinder, D., Meiners, W., Hinke, C. u. Merkt, S.: Generative Fertigung mit Selective Laser Melting auf dem Weg zur Serienproduktion? In: Tagungsband DVS Congress 2013, Düsseldorf, DVS-Berichte Band 296, 2013.
- [10] Müller-Lohmeier, K. u. Speckle, M.-M.: Licht und Schatten beim industriellen Einsatz des Kunststoff-Lasersinterns
- [11] Müller-Lohmeier, K.: Perspektiven und Herausforderungen - Direct Manufacturing aus Industriesicht. Deutsches Anwendertreffen 2010 bei EOS. Agenda
- [12] Müller-Lohmeier, K.: Willkommen beim Rapid Manufacturing ?! Industrielle Praxis: Fallbeispiele und gegenwärtige Hürden. Stuttgart 2009.
- [13] Blattmeier, M., Witt, G. u. Töpker, J.: Technologische Reife von generativen Herstellungsverfahren für Endanwendungen im Automobilbau. Rapid Tech. 2009
- [14] Skrynecki, N., Witt, G. u. Töpker, J.: Kundenorientierte Optimierung generativer Herstellungsprozesse. Rapid Tech. 2008
- [15] Töpker: Gegenwart und Zukunft der Generativen Fertigungsverfahren im Automobilbau. Rapid Tech - Einleitung [2006]. 2006
- [16] Vasquez, M., Haworth, B. u. Hopkinson, N.: Optimum Sintering Region for Laser Sintered Nylon-12, In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part B: Journal of Engineering Manufacture, Bd. 225 (2011) Nr. 12, S. 2240–2248.
- [17] Vasquez, M., Haworth, B. u. Hopkinson, N.: Methods for Quantifying the Stable Sintering Region in Laser Sintered Polyamide-12. In: Polymer Engineering and Science, Bd. 53 (2012) Nr. 3, S. 1-11.
- [18] Wegner, A. u. Witt, G.: Correlation of Process Parameters and Part Properties in Laser Sintering using Response Surface Modeling. In: Physics Procedia, Bd. 39 (2012), S. 480-490
- [19] Kim, D. S., Bae, S. W. u. Choi, K. H.: Development of Industrial SFF System using Dual Laser and Optimal Process. In: Robotics and Computer-Integrated Manufacturing Bd. 23 (2007), S. 659-666
- [20] Laumer, T., Karg, M. u. Schmidt, M.: Neue Prozessstrategie zur Herstellung von Multi-Material-Bauteilen und Gradientenwerkstoffen. In: Drummer, D. (Hrsg.): Industrikolloquium des Sonderforschungsbereichs 814 - Additive Fertigung, Erlangen, Sonderforschungsbereich 814 - Additive Fertigung, 2012, S. 101-115
- [21] Laumer, T., Stichel, T., Amend, P., Roth, S. u. Schmidt, M.: Neue Prozessstrategien zur Herstellung von Multi-Material-Bauteilen. In: Drummer, D. (Hrsg.): 2. Industrikolloquium des Sonderforschungsbereichs 814 - Additive Fertigung, Erlangen, Sonderforschungsbereich 814 - Additive Fertigung, 2013, S. 103-119.
- [22] Schwarze, D., Schoeneborn, H. u. Wiesner, A.: Optische Bestrahlungseinheit für eine Anlage zur Herstellung von Werkstücken durch Bestrahlen von Pulverschichten mit Laserstrahlung, Patent-Nr.: WO2011066989A1, 2011.

- [23] Otsuka, Y. u. Ozaki, M.: Method for Producing a Layered Component, Patent-Nr.: DE19818469, 1998.
- [24] Williams, J. D. u. Deckard, C. R.: Advances in Modeling the Effects of Selected Parameters on the SLS Process. In: *Rapid Prototyping Journal*, Bd. 4 (1998) Nr. 2, S. 90-100.
- [25] Serbin, J., Reichle, J. u. Langer, H. J.: Vorrichtung und Verfahren zum Herstellen eines dreidimensionalen Objekts, Patent-Nr.: DE4416901, 1994.
- [26] Grebe, M., Monsheimer, S., Diekmann, W. u. Kreutz, J.: Apparatus and Method for Layered Laser Sintering of Three-Dimensional Objects and Object Obtained Thereby, Patent-Nr.: DE102011079521, 2011.
- [27] *VDI 3405 - Blatt 1 Additive Fertigungsverfahren, Rapid Manufacturing – Laser-Sintern von Kunststoffbauteilen*, 2012
- [28] Wegner, A., Witt, G. u. Karg, W.: Auffrischstrategien für Polyamid 12-Pulver. *Kunststoffe*, Bd. 11 (2013), S. 76–78.
- [29] Wegner, A. u. Witt, G.: Betrachtung zur Pulvernutzungsdauer beim Laser-Sintern und Einfluss der Prozessführung auf die Entstehung von Ausschussbauteilen. *Rapidtech 2012*. 2012
- [30] Rüsenberg, S., Weiffen, R., Knoop, F. u. Schmid, H.-J., et al.: Controlling the Quality of Laser-Sintered Parts along the Process Chain. In: Bourell, D. (Hrsg.): *Proceedings of the 23rd International Solid Freeform Fabrication Symposium (SFF 2012)*. 2012
- [31] Dotchev, K. u. Yusoff, W.: Recycling of Polyamide 12 based Powders in the Laser Sintering Process. In: *Rapid Prototyping Journal*, Bd. 15 (2009) Nr. 3, S. 192-203
- [32] Josupeit, S., Rüsenberg, S. u. Schmid, H.-J.: A Material-based Quality Concept for Polymer Laser Sintering, In: Bourell, D. (Hrsg.): *Proceedings of the 24th International Solid Freeform Fabrication Symposium (SFF 2013)*. 2013, S. 44–54.
- [33] Goodridge, R. D., Hague, R. u. Tuck, C. J.: An Empirical Study into Laser Sintering of Ultra-High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE). In: *Journal of Materials Processing Technology*, S. 72–80.
- [34] Zarringhalam, H., Hopkinson, N., Kamperman, N. F. u. Vlieger, J. J. de: Effects of Processing on Microstructure & Properties of SLS Nylon 12. In: *Materials Science and Engineering A*, S. 172–180.
- [35] Wegner, A. u. Witt, G.: Laser Sintered Parts with Isotropic Mechanical Properties. In: *echnical Paper - Society of Manufacturing Engineers*, S. 1–16.
- [36] Kruth, J. P., Mercelis, P., van Vaerenbergh, J. u. Craeghs, T.: Feedback Control of Selective Laser Melting. In: Bartolo, P.J., Jorge, M.A., Batista, F.d.C., et al. (Hrsg.): *Virtual and Rapid Manufacturing - Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping*. Taylor and Francis 2007, S. 521–527.
- [37] Mercelis, P.: Control of Selective Laser Sintering and Selective Laser Melting Processes. Dissertation. 2007.
- [38] Berumen, S., Bechmann, F., Lindner, D., Kruth, J.-P. u. Craeghs, T.: Quality Control of Laser- and Powder Bed-Based Additive Manufacturing (AM) Technologies. In: *Physics Procedia*, S. 617–622.
- [39] Craeghs, T., Bechmann, F., Berumen, S. u. Kruth, J.-P.: Feedback Control of Layerwise Laser Melting Using Optical Sensors. In: *Physics Procedia*, S. 505–514.
- [40] Andersson, L.-E. u. Larsson, M.: Vorrichtung und Anordnung zur Herstellung eines dreidimensionalen Objekts, Patent-Nr.: DE60108390T2, 2001.
- [41] Benda, J. A. u. Parasco, A.: Method for Performing Temperature-Controlled Laser Sintering, Patent-Nr.: US5427733, 1993.
- [42] Benda, J. A. u. Parasco, A.: Apparatus for Temperature Controlled Laser Sintering, Patent-Nr.: US5530221, 1994.
- [43] Kleszczynski, S., Sehrt, J. T., Witt, G. u. Zur Jacobsmühlen, J.: Error Detection in Laser Beam Melting Systems by High Resolution Imaging. In: Bourell, D. (Hrsg.): *Proceedings of the 23rd International Solid Freeform Fabrication Symposium (SFF 2012)*. 2012, S. 975–987.
- [44] Zur Jacobsmühlen, J., Kleszczynski, S., Schneider, D. u. Witt, G.: High Resolution Imaging for Inspection of Laser Beam Melting Systems. In: *Proceedings of the I2MTC 2013*, Minneapolis, MN, USA, 2013.
- [45] Krauss, H., Eschey, C. u. Zaeh, M. F.: Thermography for Monitoring the Selective Laser Melting Process. In: Bourell, D. (Hrsg.): *Proceedings of the 23rd International Solid Freeform Fabrication Symposium (SFF 2012)*. 2012, S. 999–1014.
- [46] Schwerdtfeger, J., Singer, R. F. u. Körner, C.: In Situ Flaw Detection by IR-Imaging during Electron Beam Melting. In: *Rapid Prototyping Journal*, S. 259–263.
- [47] Dusel, K.-H., Hertter, M., Heß, T. u. Jakimov, A., et al.: Verfahren und Vorrichtung zur Prozessüberwachung, Patent-Nr.: DE102011009624A1, 2011.
- [48] Hartmann, W., Hausotte, T., Kühnlein, F. u. Drummer, D.: Incremental In-line Measurement Technique for Additive Manufacturing. *DDMC 2012*. 2012

- [49] Diller, T. T., Sreenivasan, R., Beaman, J., Bourell, D. u. LaRocco, J.: Thermal Model of the Build Environment for Polyamide Powder Selective Laser Sintering. Solid Freeform Fabrication. Proceedings. 2010
- [50] Rietzel, D., Drexler, M., Kühlein, F. u. Drummer, D.: Influence of Temperature Fields on the Processing of Polymer Powders by Means of Laser and Mask Sintering Technology. In: Bourell, D. (Hrsg.): Proceedings of the 22nd International Solid Freeform Fabrication Symposium (SFF 2011). 2011, S. 252–262.
- [51] Chung, M. u. Allanic, A.-L.: Sintern unter Verwendung von Thermobild-Rückkopplung, Patent-Nr.: DE102004017769B4, 2004.
- [52] Huskamp, C. S.: Methods and Systems for Controlling and Adjusting Heat Distribution over a Part Bed, Patent-Nr.: US 7515986 B2, 2007.
- [53] VDI Richtlinie VDI 2221; 1993/03. *Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*. www.vdi-richtlinien.de, abgerufen am: 2009/03
- [54] Juni 1997. *Konstruktionsmethodik VDI 2222 - Blatt 1 Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien*
- [55] Gebhardt, A.: Grundlagen des Rapid Prototyping. RTejournal (2004)
- [56] Schmid, M.: Selektives Lasersintern (SLS) mit Kunststoffen. Technologie Prozesse und Werkstoffe. München: Hanser 2015.
- [57] Persönliche Mitteilung
- [58] Oettinger, M.: Data Science. Eine praxisorientierte Einführung im Umfeld von Machine Learning künstlicher Intelligenz und Big Data. 2017.
- [59] Miller, T. W.: Modeling techniques in predictive analytics. Business problems and solutions with R. 2014.
- [60] Polifke, W. u. Kopitz, J.: Wärmeübertragung. Grundlagen, analytische und numerische Methoden. München [u.a.]: Pearson Studium 2009.
- [61] van den Akker, H. E. A. u. Mudde, R. F.: Transport phenomena. The art of balancing. Delft: Delft Academic Press 2014.
- [62] Drexler, M., Drummer, D., Wudy, K. u. Kühlein, F.: Einfluss der Scangeschwindigkeit auf die Bauteileigenschaften pulver- und strahlbasierter Verfahren. Rapidtech 2013. 2013
- [63] Reinhardt, T.: Entwicklung einer ganzheitlichen Verfahrenssystematik bei der Qualifizierung neuer Werkstoffe für das Laser-Sintern am Beispiel Polypropylen. 2016.
- [64] Kaddar, W.: Die generative Fertigung mittels Laser-Sintern - Scanstrategien, Einflüsse und deren Nachbearbeitungsmöglichkeiten, Dissertation 2010
- [65] EOS: Materialdatenblatt Feinpolyamid PA 2200 für EOSINT P [2002] (EOS), 2002
- [66] Rietzel, D.: Werkstoffverhalten und Prozessanalyse beim Laser-Sintern von Thermoplasten. Technisch-wissenschaftlicher Bericht. Erlangen: Lehrstuhl für Kunststofftechnik 2011.
- [67] Wegner, A.: Theorie über die Fortführung von Aufschmelzvorgängen als Grundvoraussetzung für eine robuste Prozessführung beim Laser-Sintern von Thermoplasten. 2015.
- [68] Sauer, A.: Optimierung der Bauteileigenschaften beim Selektiven Lasersintern von Thermoplasten, Universität Duisburg-Essen genehmigte Dissertation. Duisburg 2005
- [69] n.n.: Produktdatenblatt Farsoon 403 P, abgerufen am: Juni 2018
- [70] Kühlein, F., Drummer, D., Wudy, K. u. Drexler, M.: Alterungsmechanismen von Kunststoffpulvern bei der Verarbeitung und deren Einfluss auf prozessrelevante Materialeigenschaften. In: Drummer, D. (Hrsg.): Industriekolloquium des Sonderforschungsbereichs 814 - Additive Fertigung. 2012, S. 49–66.
- [71] Wegner, A. u. Witt, G.: Betrachtung zur Pulvernutzungsdauer beim Laser-Sintern und Einfluss der Prozessführung auf die Entstehung von Ausschussbauteilen, 2012