

FORSCHUNGSBERICHT

Untersuchung und Bewertung des Einflusses von Nachbehandlungsverfahren auf die mechanischen Eigenschaften lasergesinterter Kunststoffbauteile

SLS Oberflächeneinfluss Mechanik

Britta Gerets, Kurt Engelsing, Ruben Schlutter, Giovanni Schober
Thomas Hochrein, Martin Bastian

Danksagung

Das Vorhaben 20820 N der Forschungsvereinigung Fördergemeinschaft für das Süddeutsche Kunststoff-Zentrum e.V. (FSKZ) wurde über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ (AiF) im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Die Forschungseinrichtung SKZ - KFE gGmbH dankt dem BMWK und der AiF für die Förderung. Der Forschungsvereinigung und den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses ist für die Unterstützung bei der Durchführung des Forschungsvorhabens gedankt. Ebenso allen die zum Gelingen beigetragen haben, insbesondere Malte Nebel und Michael Gawlinski.

Kurzfassung

Das Lasersintern etabliert sich zusehends als Produktionsverfahren zur additiven Fertigung funktioneller (Klein-)Serienbauteile aus Kunststoff. Voraussetzung dafür ist, dass neben den gewünschten optischen und haptischen Eigenschaften auch die funktionalen Anforderungen sicher erfüllt werden. Hinsichtlich der Bauteildimensionierung stehen die Festigkeit und Zähigkeit einschließlich der Kerb- bzw. Schlagempfindlichkeit häufig im Fokus. Inwieweit diese durch gängige (Oberflächen-)Nachbehandlungen wie Gleitschleifen, Verdichtungsstrahlen, chemisches Glätten, Laserglätten, Färben und Infiltrieren verändert werden, wurde systematisch untersucht. Dabei wurde das mechanische Verhalten in Abhängigkeit von den Einflussfaktoren Wanddicke, Baurichtung und Nachbehandlung untersucht sowie Wirkzusammenhänge betrachtet. Die an Polyamid 12 erarbeiteten Erkenntnisse wurden anschließend auf Polyamid 11 und glasgefüllte Polyamid 12 Lasersinterwerkstoffe übertragen und anhand dieser validiert. Während das grundlegende mechanische Verhalten durch die Nachbehandlungen weitestgehend unbeeinflusst blieb, konnte die Zugfestigkeit sehr dünnwandiger Lasersinterterteile durch die Oberfläche glättende Nachbehandlungsverfahren tendenziell verbessert werden. Dabei blieb die stark ausgeprägte Baurichtungsabhängigkeit des mechanischen Verhaltens erhalten. Aufgrund der zahlreichen Einflussfaktoren sollten die konstruktive Auslegung lasergesinterter Kunststoffbauteile ebenso wie die Wahl der Werkstoffe, Fertigungs- und Nachbehandlungs(verfahrens)parameter im Hinblick auf die geforderten Anwendungseigenschaften erfolgen. Deren Erfüllung sollte insbesondere bei sicherheitsrelevanten Bauteilen überprüft werden.

Abstract

Laser sintering is increasingly establishing itself as a serious option in the additive manufacturing of series components made of plastic. It is therefore mandatory to fulfil not only visual and haptic desires, but also functional requirements. Regarding component design the focus is often on strength and toughness, including notch or impact resistance. Whether these are affected by standard post-processing like vibratory grinding, blasting, chemical smoothing, laser polishing, colouring and infiltration was systematically investigated. Therefore, the mechanical behaviour was examined as a function of wall thickness, building direction and post-processing. The main results found for polyamide 12 were transferred to polyamide 11 and glass-filled polyamide 12 and validated against them. While the fundamental mechanical behaviour was not affected by the post-processing, the tensile strength of thin-walled laser sintered components tended to be improved by surface smoothing. Nevertheless, the strong influence of the initial building direction in that case remained. Due to the numerous influencing factors, the design of laser sintered plastic components as well as the choice of material, manufacturing technology and post-processing parameters should be made regarding to the required application properties. Their fulfilment should be finally checked, especially when it comes to safety-relevant components.

1	Einleitung.....	1
1.1	Anlass für das Forschungsvorhaben	1
1.2	Problemstellung	2
1.3	Zielsetzung.....	2
2	Stand der Technik.....	3
2.1	Herstellung von Lasersinterteilen	3
2.2	Verfahrensbedingte Eigenschaften von Lasersinterteilen.....	5
2.3	Nachbehandlung von Lasersinterteilen.....	7
3	Lösungsweg zur Erreichung des Forschungsziels	9
4	Durchgeführte Arbeiten	10
4.1	Materialauswahl.....	10
4.1.1	Musterwerkstoff	10
4.1.2	Weitere Werkstoffe	10
4.2	Herstellung der Lasersinterteile	11
4.3	Nachbehandlung der Lasersinterteile.....	14
4.3.1	Mechanisches Glätten.....	15
4.3.2	Chemisches Glätten	16
4.3.3	Laserglätten	16
4.3.4	Färben	17
4.3.5	Infiltrieren.....	17
4.4	Charakterisierung der Lasersinterteile	18
4.4.1	Optische Eigenschaften	18
4.4.2	Mechanische Eigenschaften	20
4.5	Untersuchungen zur Aufklärung von Wirkzusammenhängen.....	22
4.5.1	Topografiecharakterisierung.....	22
4.5.2	Mikroskopie.....	23
4.5.3	Dynamische Differenzkalorimetrie	24
4.6	Ableitung von Handlungsempfehlungen	24

5	Darstellung und Diskussion der Ergebnisse	25
5.1	Optische Eigenschaften in Abhängigkeit von der Baurichtung, Wanddicke und Nachbehandlung	25
5.1.1	Farbe	25
5.1.2	Glanz	34
5.2	Mechanische Eigenschaften in Abhängigkeit von der Baurichtung, Wanddicke und Nachbehandlung	38
5.2.1	Festigkeit	40
5.2.2	Zähigkeit	48
5.2.3	Kerbempfindlichkeit	54
5.3	Aufklärung von Ursachen und Wirkzusammenhängen	58
5.3.1	Äußere Struktur	58
5.3.2	Innere Struktur	63
5.3.3	Morphologische Struktur	70
6	Zusammenfassung und Handlungsempfehlungen	75
7	Literaturverzeichnis.....	77
8	Anhang	82
8.1	Untersuchung der Bauraumhomogenität.....	82
8.2	Zuordnung der Lasersinterenteile in Blöcke für die Nachbehandlung	88
8.3	Zuordnung der Lasersinterenteile zu den Charakterisierungsmethoden.....	90

1 Einleitung

1.1 Anlass für das Forschungsvorhaben

Additive Fertigungsverfahren werden zunehmend zur industriellen Produktion von gebrauchsfähigen Funktionsbauteilen aus Kunststoff eingesetzt [BMBF17, Fis15, Gab16, HO16, Laa15, Tre11]. Wie groß das gesamtwirtschaftliche Potenzial ist, belegen diverse Marktstudien. So konstatiert der Wohlers Report 2018 ein weltweites Wachstum von 21 % im gesamten 3D-Druckbereich für das Jahr 2017. Ein Ende dieses bereits einige Jahre anhaltenden Wachstums ist nicht absehbar, insbesondere für die kunststoffverarbeitenden Technologien, da der drastische Absatzanstieg an Druckern im letzten Jahr die metallverarbeitenden Technologien betraf und diese Phase der Kunststofftechnologie noch bevorsteht [Woh18]. So verwundert dann auch nicht, dass die additiven Fertigungstechnologien weltweit seit den 2010er Jahren auf den politischen Agenden stehen, Eingang in Regierungserklärungen sowie Investitionsprogramme gefunden haben und als Schlüsseltechnologie für eine positive, nachhaltige, wirtschaftliche sowie gesamtgesellschaftliche Entwicklung eingestuft werden [ALJ13, AS14, BMBF17, Laa15, SBW+18]. Dies ist auf die vielfältigen Vorteile der additiven Fertigungsverfahren zurückzuführen. So rentiert sich der Einsatz insbesondere bei der Fertigung geringer Stückzahlen, sodass dem Trend zu individualisierten Produkten Rechnung getragen werden kann [Lam15, May18]. Konstruktive Änderungen sind ohne Folgekosten jederzeit möglich, die Designfreiheit steigt, belastungsoptimierte Strukturen sowie eine zunehmende Funktionsintegration werden durch Wegfall einiger herstellverfahrensbedingter Restriktionen der etablierten Fertigungstechnologien ermöglicht. Damit sind häufig auch Gewichtseinsparungen realisierbar, was Ressourcen schont und zudem besonders für Leichtbauanwendungen interessant ist. [ALJ13, GH16, HO16, KPB15,]

Bei der industriellen Fertigung von Endprodukten aus Kunststoff mittels Lasersinterverfahren werden die Bauteile nach der Herstellung üblicherweise gereinigt. Anschließend erfolgt häufig eine Nachbehandlung der Oberfläche, welche oftmals als Postprocessing oder (Oberflächen)Finish(ing) bezeichnet wird. Dies geschieht zum einen, um dekorativen Anforderungen an die Optik und Haptik gerecht zu werden. Zum anderen ermöglicht die Nachbehandlung auch die Erfüllung funktioneller Anforderungen an die Rauheit, Härte, Festigkeit, Dichtheit, Leitfähigkeit, Gleiteigenschaften, Verschleiß- und Korrosionsbeständigkeit. [BBW+13, Sch15, SL10] Dies ist insbesondere für technische

Bauteile relevant, was die Bedeutung der Oberflächenbehandlung für konventionell, bspw. mittels Spritzguss, gefertigte Kunststoffbauteile belegt. Die Verfahren der Oberflächentechnik bieten damit das Potenzial den Einsatzbereich lasergesinterter Kunststoffbauteile beträchtlich zu erweitern [BBW+13]. Dies gelingt jedoch nur, wenn auch die Anforderungen an das mechanische Verhalten sicher erfüllt werden.

1.2 Problemstellung

Bei der Bauteildimensionierung werden Kennwerte, wie bspw. die Festigkeit, herangezogen. Für die mechanische Auslegung additiv gefertigter Bauteile ist eine Berücksichtigung fertigungsbedingter Einflüsse, insbesondere der Baurichtung, notwendig. Angaben hierzu können z. T. den Datenblättern der Material- bzw. Anlagenhersteller entnommen werden. Allerdings werden die Kennwerte i. d. R. an gereinigten, nicht aber an nachbehandelten Teilen ermittelt, sodass mögliche Auswirkungen der verschiedenen Oberflächennachbehandlungen unklar sind.

1.3 Zielsetzung

Ziel war daher eine systematische wissenschaftliche Untersuchung und Bewertung von Oberflächennachbehandlungsverfahren im Hinblick auf das mechanische Verhalten lasergesinterter Kunststoffteile. Hierbei wurden die folgenden Aspekte betrachtet:

- Mechanisches Verhalten
d. h. Festigkeit, Zähigkeit und Kerbempfindlichkeit in Abhängigkeit von den Einflussfaktoren Wanddicke, Baurichtung und Nachbehandlung
- Aufklärung der Wirkzusammenhänge
d. h. Interaktion der Einflussfaktoren sowie Ursachenaufklärung
- Verallgemeinerbarkeit der Erkenntnisse
d. h. Untersuchung der Übertragbarkeit auf weitere Werkstoffe

Ausgehend von den Ergebnissen wurde der Einfluss der Nachbehandlung bewertet, wobei mögliche negative Auswirkungen sowie Potenziale zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften betrachtet wurden.

2 Stand der Technik

2.1 Herstellung von Lasersinterteilen

Das Selektive Lasersintern (SLS[®]) wurde maßgeblich von der Fa. 3D Systems, Rock Hill (USA), entwickelt. Da die Bezeichnung geschützt ist und streng genommen nur den Prozess dieses einen Herstellers bezeichnet, wird nachfolgend der allgemeinere Begriff Lasersinterverfahren verwendet. Der deutsche Markt wird derzeit von der Fa. EOS, Krailling, dominiert. [Sch15] Weitere Firmen wie Farsoon Technologies, Changsha (PRC)/Stuttgart, Eplus3D, Beijing (PRC), Nexa3D, Ventura (CA USA), Prodways, Montigny-le-Bretonneux (FRA) etc. sind in den letzten Jahren zunehmend auf dem weltweiten Markt aktiv [H22, Sch15].

Der Herstellprozess besteht beim Lasersinterverfahren aus drei Schritten: Aufheizevorgang, Bauprozess und Abkühlvorgang. Im Bauprozess wird zunächst eine Schicht des pulverförmigen Ausgangsmaterials mittels Walze bzw. Rakel aufgetragen, welches dann durch einen Laser entlang der vorgegebenen x/y-Kontur lokal aufgeschmolzen wird. Dabei wird der gesamte Bauraum möglichst homogen auf einer Temperatur knapp unterhalb der Schmelztemperatur gehalten, sodass mit dem Laser lediglich die zum Aufschmelzen benötigte Differenzenergie eingetragen werden muss. Nachfolgend wird die Bauplattform um eine Schichtdicke in z-Richtung abgesenkt, die nächste Schicht aufgetragen und der Prozess beginnt erneut bis schließlich das gesamte Produkt fertiggestellt ist (vgl. Abbildung 2.1).

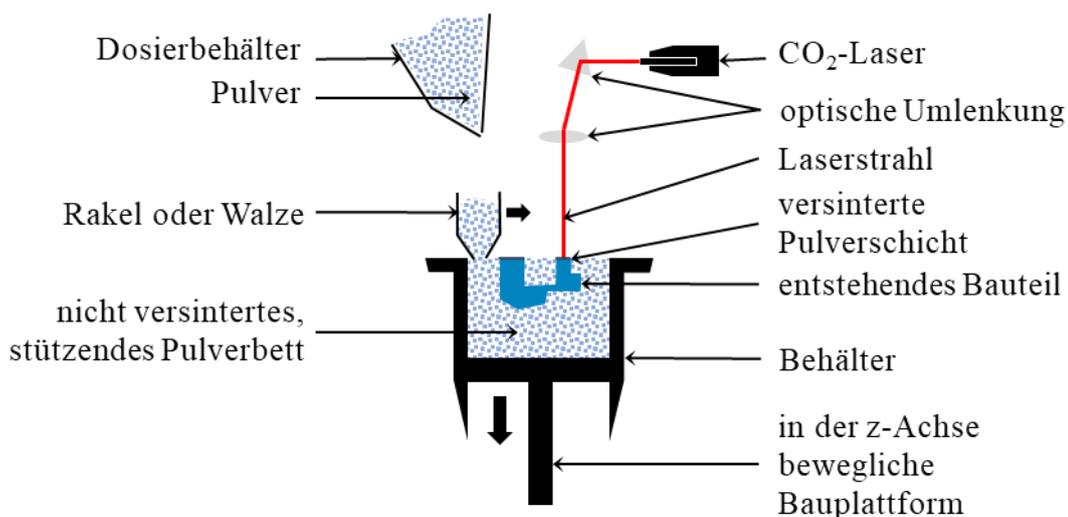


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung des Lasersinterverfahrens (angelehnt an [Ger18]).

Vor der abschließenden, langsamen Abkühlung werden üblicherweise noch weitere Pulverschichten zur Minimierung des Bauteilverzugs aufgetragen. Nicht versintertes Pulver übernimmt bei diesem Verfahren die Stützfunktion für nachfolgende Schichten. Folglich sind geschlossene Hohlräume bei der Bauteilkonstruktion zu vermeiden, da aus diesen das Stützmaterial am Ende (ohne Anbohren o. ä.) nicht entfernt werden kann. Nach der Abkühlung können die Bauteile aus dem Pulverbett (dem sogenannten Cake) entnommen werden. Üblicherweise erfolgt nach der Herstellung von Lasersinterteilen noch ein Reinigungsschritt zur Entfernung anhaftender loser Pulverpartikel sowie ggf. nachgeschaltet weitere Schritte der Oberflächennachbehandlung (vgl. Kapitel 2.3). [For23, Geb12, GH16, Rit19, Rot17].

Die eingesetzten Pulver sind bislang überwiegend Polyamide (PA), da diese bereits im Zuge der Polymersynthese pulverförmig anfallen und ein gutes Eigenschaftsspektrum aufweisen. Als Standardmaterial hat sich dabei in Europa Polyamid 12 (PA12) etablieren können. Insbesondere für technische Funktionsbauteile werden zusätzlich glas-, carbonfaser- oder auch aluminiumgefüllte PA12-Typen angeboten, um Anforderungen an das mechanische und/oder thermische Verhalten noch besser zu erfüllen. Darüber hinaus werden zunehmend weitere Thermoplaste wie z. B. Polypropylen (PP), thermoplastisches Polyurethan (TPU), Polyetheretherketon (PEEK) oder auch Polystyrol (PS) angeboten. [AMP23, Cir23, Dic23, EOS23, FKM23, GH16, GTH12, HH23, Mar10, Pro23, Teu23, WHWD15]

2.2 Verfahrensbedingte Eigenschaften von Lasersinterteilen

Die mittels Lasersintern additiv gefertigten Kunststoffbauteile weisen verfahrensbedingt eine typische innere und äußere Struktur auf, die deutlich von jener konventionell, bspw. mittels Spritzguss, gefertigter Kunststoffbauteile abweicht. Durch den schichtweisen Aufbau ist sie zudem anisotrop, sodass sich die inneren und äußeren Strukturmerkmale je nach Ausrichtung des Bauteils im Bauraum während der Fertigung unterscheiden. Diese Strukturmerkmale determinieren bestimmen neben den optischen und haptischen Eigenschaften auch das mechanische Verhalten. Abbildung 2.2 zeigt baurichtungsabhängig mittels Computertomographie gemessene tatsächliche Volumenfüllgrade. Diese weichen vom Volumenfüllgrad $FG_{\text{Spritzguss}} = 100\%$ ab. Die Poren, d. h. Lufteinschlüsse, sind dabei bereits optisch gut als dunkle Flecken in den Schnittbildern erkennbar. In konventionell mittels Spritzguss oder Extrusion gefertigten Kunststoffbauteilen werden Lufteinschlüsse als Schwachstellen angesehen, die sich infolge innerer Kerbwirkung negativ auf das mechanische Verhalten auswirken und vermieden werden sollten; sie werden auch mit dem gießereitechnischen Begriff Lunker bezeichnet. Eine vollständige Verhinderung ist bei lasergesinterten Kunststoffteilen nicht möglich. Im Rahmen der Forschungsarbeit wurde daher ein besonderes Augenmerk darauf gelegt, inwieweit die verfahrensbedingten Hohlräume durch Nachbehandlungsverfahren gefüllt und das mechanische Verhalten verändert werden kann.

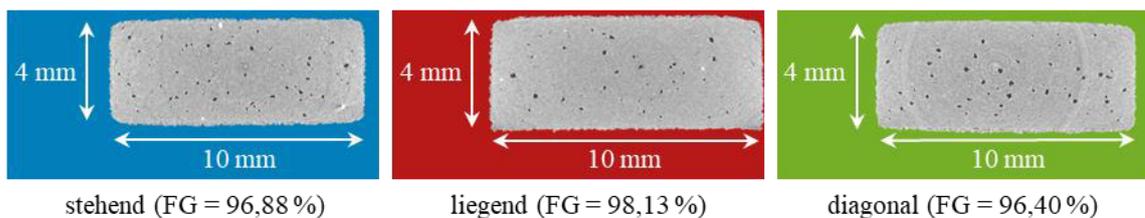


Abbildung 2.2: Computertomographieschnittbilder von PA12-Lasersinterteilen in Abhängigkeit von der Baurichtung (Daten und Bilder aus [Ger18]).

Abbildung 2.3 gibt die typische raue Oberfläche sowie die zugehörigen taktil ermittelten Oberflächenrauheitswerte R_a lasergesinterner Teile wieder. Diese verfahrenstypische Oberfläche entsteht dadurch, dass der geschmolzene Kunststoff (im Unterschied zu den konventionellen Kunststoffverarbeitungsverfahren) nicht an einer kalten Werkzeugwand zügig abgekühlt wird, sondern sehr langsam in einem Pulverbett. Bei der additiven Fertigung führt eine diagonale Ausrichtung im Bauraum überdies zum sogenannten Treppenstufeneffekt [Geb12, GH16, Sch15], der sich in dem mittleren Mikroskopiebild als Streifenstruktur zeigt.

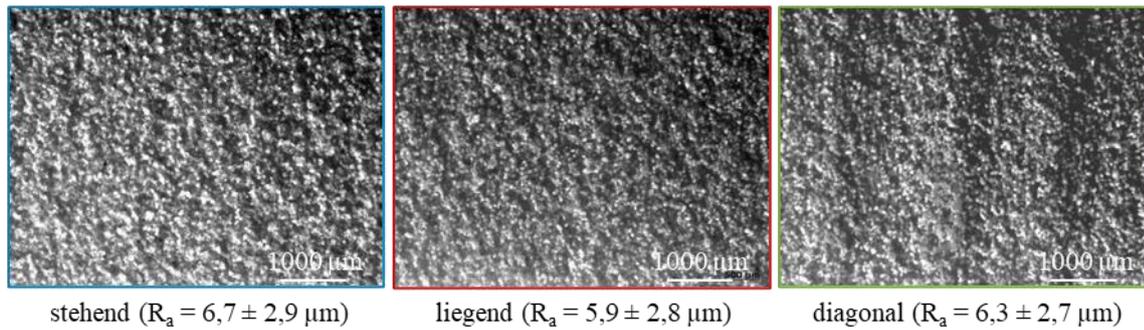


Abbildung 2.3: Mikroskopiebilder von PA12-Lasersinterteilen in Abhängigkeit von der Bau- richtung (Daten und Bilder aus [Ger18]).

Die deutlichen Auswirkungen der verfahrenstypischen inneren und äußeren Struktur auf das mechanische Verhalten von PA12-Lasersinterteilen zeigt der Vergleich mit spritzge- gossenen Teilen, die aus Lasersinterpulver derselben Charge gefertigt wurden (vgl. Abbildung 2.4). So liegt die Zähigkeit lasergesinterter Teile unter langsamer Verformung (Bruchdehnung im Zugversuch) und schneller Verformung (Schlagzähigkeit) nur bei einem Bruchteil der spritzgegossenen Referenz. Auf den ersten Blick verwundert, dass die Schlagzähigkeit der diagonal gebauten Lasersinterteile nicht zwischen der liegenden (optimalen) und stehenden (schlechtesten) Ausrichtung liegt. Dies ist jedoch als Folge der äußeren Kerbwirkung des bei diagonaler Ausrichtung auftretenden Treppenstufen- effekts erklärbar und belegt die deutliche Schlag- bzw. Kerbempfindlichkeit additiv gefertigter Teile. Die Zugfestigkeitswerte liegen hingegen in einer werkstofftypischen Größenordnung und ähneln denen spritzgegossener Teile.

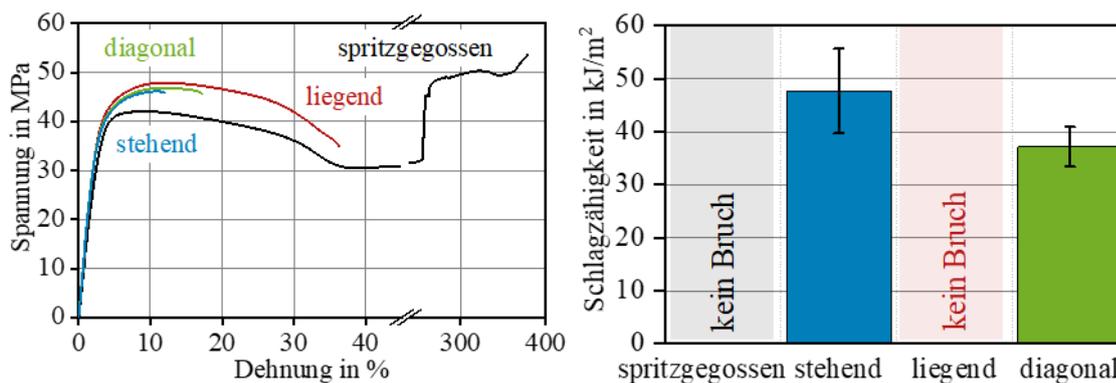


Abbildung 2.4: Mechanisches Verhalten von PA12-Lasersinterteilen unter statischer Zugbe- anspruchung (links) und unter Schlagbiegebeanspruchung (rechts) in Ab- hängigkeit von der Bau- richtung (Daten aus [Ger18]).

2.3 Nachbehandlung von Lasersinterteilen

Sofern die Oberflächen lasergesinterner Kunststoffteile nachbehandelt werden, kann dies auf unterschiedliche Art und Weise erfolgen. Einen Überblick möglicher Verfahren liefert bspw. Rother [Rot17]. Unter Nachbehandlung wird im Folgenden alles verstanden, was nach dem Bauprozess und der Entfernung von Pulverrückständen erfolgt. Grundsätzlich werden Oberflächennachbehandlungen aus zwei Motivationen heraus durchgeführt [BBW+13, Kad10, Sch15, SL10]:

- Erfüllung dekorativer Anforderungen, welche die Haptik/Optik betreffen und sich auf die Rauheit, Farb- und Glanzeigenschaften der Lasersinterteile beziehen.
- Erfüllung funktioneller Anforderungen, welche die Rauheit, Härte, Festigkeit, Flüssigkeits- und Gasdichtheit, Leitfähigkeit, Gleiteigenschaften, Verschleiß- und Korrosionsbeständigkeit betreffen können.

Nachfolgend sind diejenigen Nachbehandlungsverfahren kurz beschrieben, die im Rahmen des Forschungsvorhabens eingesetzt wurden [Dic23, HH23, Rap23, Tec23, Vis23, MCB23]; Erläuterungen zur praktischen Umsetzung finden sich in Kapitel 4.3.

Das **Glätten** wird üblicherweise genutzt, um eine Einebnung der rauen Oberflächen zur Veränderung von Optik und Haptik zu erzielen, die Reinigung der Oberflächen zu erleichtern und die Gleiteigenschaften zu verbessern. Hinsichtlich des mechanischen Verhaltens wird grundsätzlich eine Verbesserung erwartet, da eine glattere Oberfläche üblicherweise mit einer geringeren äußeren Kerbwirkung einhergeht. Zum Glätten der Oberflächen werden vor allem die **mechanischen** Verfahren Verdichtungsstrahlen und Gleitschleifen (auch unter dem Begriff Trowalisieren bekannt) sowie **chemisches** Glätten angeboten. Darüber hinaus konnte u. a. in eigenen Vorarbeiten gezeigt werden, dass auch das Glätten mittels **Laser** möglich ist (vgl. Abbildung 2.5). Das Laserglätten bewirkte für diagonal (45°) gefertigte Probekörper aus PA12 in Schlagbiegeversuchen eine Erhöhung der Schlagzähigkeit von 54 kJ/m² auf mindestens 69 kJ/m² und damit eine deutliche Verbesserung der mechanischen Eigenschaften. Auch seitens der anbietenden Dienstleister chemischer Glättung wird eine Verbesserung der Mechanik angegeben (bspw. [Lux23]) – weitergehende Untersuchungen dazu liefern z. B. Drummer et al. [DW20]. Die Notwendigkeit derartige Einflüsse im Zusammenspiel mit der Wanddicke zu betrachten, wurde von Crane et al. [CNEH17] demonstriert.

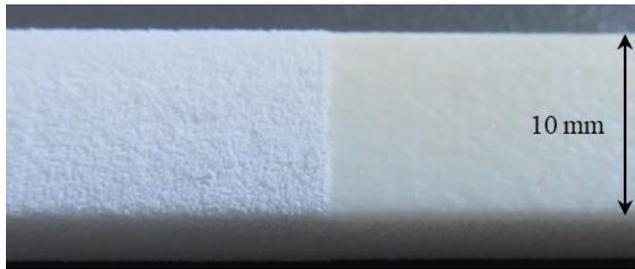


Abbildung 2.5: Foto eines PA12-Lasersinterteils vor/nach (links/rechts) dem Laserglätten.

Das **Färben** zielt i. d. R. auf eine Veränderung des optischen Erscheinungsbildes (Farbe) sowie zum Teil auf eine leichtere Reinigung der Teile. Da kein Materialauftrag erfolgt und die Abmaße der Teile nicht beeinflusst werden, wird das Verfahren häufig für Serien- und Funktionsteile verwendet. Je nach Oberflächentopografie und Bauteilgeometrie dringt die Farbe ca. 0,2 mm bis 0,3 mm in die Lasersinterteile ein [HH23, Vis23].

Das **Infiltrieren** wird zur Herstellung von Flüssigkeits- bzw. Gasdichtheit durchgeführt. Oftmals wird dabei auch eine Verbesserung der Chemikalien- und Temperaturbeständigkeit sowie Verfestigung angestrebt [Dic23, HH23, SL10]. Bei diesem Verfahren werden Poren im Bauteilinneren gefüllt [Vis23], sodass durch eine Reduktion innerer Kerben eine Verbesserung des mechanischen Verhaltens, insbesondere der Zähigkeit, erwartet wird.

3 Lösungsweg zur Erreichung des Forschungsziels

Um das Forschungsziel (vgl. Kapitel 1.3) zu erreichen, wurden zunächst Lasersinterteile aus einem Musterwerkstoff mittels Lasersinterverfahren hergestellt und deren Oberfläche mit unterschiedlichen Verfahren nachbehandelt. Anschließend erfolgte eine Charakterisierung der optischen und mechanischen Eigenschaften. Zur Aufklärung der Wirkzusammenhänge wurden die Einflussgrößen Wanddicke, Baurichtung und Nachbehandlung betrachtet sowie die innere und äußere Struktur herangezogen. Anschließend wurden die für den Musterwerkstoffe im Rahmen des beschriebenen Sceenings als relevant identifizierten Einflussfaktoren für weitere Werkstoffe betrachtet. Damit konnten die am Musterwerkstoff erzielten Erkenntnisse validiert und auf ihre Übertragbarkeit geprüft werden.

Basis für den Lösungsweg waren die folgenden Arbeitshypothesen:

- Lasergesinterte Kunststoffbauteile weisen verfahrensbedingt eine poröse innere und raue äußere Struktur auf, die zudem von der Baurichtung abhängen.
- Das mechanische Verhalten wird neben dem Material und dessen Morphologie auch von der inneren und äußeren Struktur sowie von der Wanddicke bestimmt.
- Die Nachbehandlungsverfahren verändern die innere und äußere Struktur.
- Mit etablierten Prüfmethode können die inneren und äußeren Eigenschaften ebenso wie das mechanische Verhalten erfasst und quantifiziert sowie Wirkzusammenhänge aufgeklärt werden, die sich anhand einer systematischen Betrachtung weiterer Werkstoffe überprüfen lassen.
- Eine vergleichende Untersuchung nachbehandelter und unbehauelter mittels Lasersinterverfahren hergestellter Kunststoffbauteile erlaubt die grundsätzliche Bewertung, sodass schlussendlich auf Basis einer Betrachtung der Einflussgrößen und Ursachenaufklärung konstruktions-, herstellungs- und nachbehandlungsverfahrensbezogene Handlungsempfehlungen abgeleitet werden können.

4 Durchgeführte Arbeiten

4.1 Materialauswahl

Die Materialauswahl wurde gemeinsam mit den Experten der Druckdienstleister, Material- und Anlagenherstellern getroffen. Dabei war die Praxisrelevanz das Hauptentscheidungskriterium, um die (unmittelbare) Nutzbarkeit der Forschungsergebnisse sicherzustellen.

4.1.1 Musterwerkstoff

Daher wurde als Musterwerkstoff für die systematischen Screeningversuche das Material PA2200 der Fa. EOS, Krailing, ausgewählt. Dieses PA12-Material ist laut Aussage der Unternehmensvertreter das von ihnen derzeit am häufigsten eingesetzte Produkt zur Herstellung von Lasersinterteilen.

4.1.2 Weitere Werkstoffe

Hinsichtlich ihres mechanischen Eigenschaftsspektrums werden für technische Anwendungen grundsätzlich gefüllte PA12-Materialien, weitere PA-Werkstoffe und andere teilkristalline Thermoplaste sowie thermoplastische Elastomere für besonders relevant erachtet. In Umfragen priorisierten die Unternehmensvertreter glasgefülltes PA12, PA11 und TPU. Da die weiteren Werkstoffe zur Validierung der am Musterwerkstoff PA12 identifizierten wesentlichen Einflussfaktoren und Wirkzusammenhänge dienen sollen, wurde TPU aufgrund des grundlegend abweichenden Verhaltens von den Untersuchungen ausgeschlossen – hierzu sollten ggf. eigene Forschungsarbeiten erfolgen, welche die besonderen Eigenschaften der Elastomere berücksichtigen. Es wurden die Materialien PA1101 (PA11) und PA3200GF (glasgefülltes PA12) der Fa. EOS, Krailing, ausgewählt.

4.2 Herstellung der Lasersintererteile

Um eine umfassende Betrachtung des mechanischen Verhaltens abhängig von Wanddicke und Baurichtung zu erlauben, wurden Probekörper vom Typ 1A nach DIN EN ISO 527-2 additiv gefertigt. Durch die Entfernung der Probekörperschulter können diese neben Zugversuchen auch für Biege- und/oder Schlagbiegeprüfungen verwendet werden. Da entsprechend der zweiten Arbeitshypothese (vgl. Kapitel 3) davon ausgegangen wird, dass sich Oberflächeneffekte umso stärker auswirken je geringer die Wanddicke ist, wurden verschiedene Wanddicken realisiert. Von den Unternehmensvertretern wurden Wanddicken von 1 mm bis 4 mm zu Beginn des Forschungsvorhabens als praxisrelevant eingestuft, sodass die genannten Minimal- und Maximalwerte im Rahmen der Forschungsarbeiten umgesetzt wurden. Zwischenwerte in der Wanddicke wurden für die Untersuchungen nicht berücksichtigt. Weil die Baurichtung bei Lasersintererteilen darüber hinaus einen erheblichen Einfluss hat, wurden die Probekörper in drei Baurichtungen – liegend, stehend und diagonal (45°) – gefertigt. Dabei ist liegend der aus mechanischer Sicht beste Fall und stehend der schlechteste, da die Schichthafung(sfestigkeit) bei stehender Ausrichtung entscheidend ist, welche verfahrenstypisch geringer als die Festigkeit innerhalb einer Schicht ist. In 45° -Ausrichtung diagonal gefertigte Teile weisen die stärkste Ausprägung des Treppenstufeneffektes auf und sind der bzgl. Kerbwirkung der Oberflächenstruktur ungünstigste Fall (vgl. Kapitel 2.2).

Die einzelnen Probekörper wurden für jede Baurichtung und Wanddicke auf einem Gitter positioniert und mit einem Beschriftungsfähnchen versehen (vgl. Abbildung 4.1).

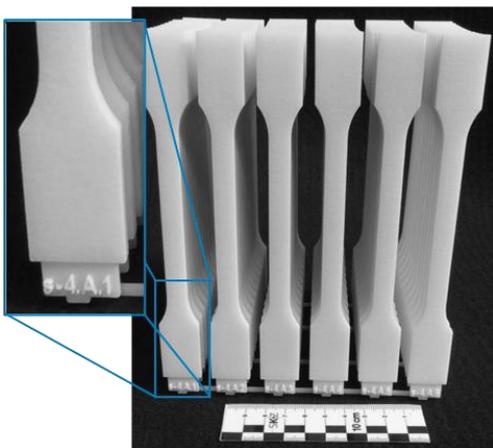


Abbildung 4.1: Foto der in einem Baujob stehend auf einem Gitter positionierten Probekörper vom Typ 1A nach DIN EN ISO 527-2 mit zusätzlichem Beschriftungsfähnchen (Detailansicht Probekörper s-4.A.1).

Die Benennung erfolgte dabei stets durch Kürzel in der Reihenfolge:

Baurichtung-Wanddicke in mm.Gitterposition

Hierbei wurde für die Baurichtung jeweils der erste Buchstabe verwendet (Tabelle 4.1):

Tabelle 4.1: Abkürzungen für die Baurichtung bei der Herstellung der Lasersintererteile.

s = stehend	l = liegend	d = diagonal (45°)
-------------	-------------	--------------------

Die Gitterposition wurde jeweils mit einer Kombination aus Buchstaben (A bis L) und Zahlen (1 bis 6) gekennzeichnet. Somit ist die Positionierung jedes einzelnen Probekörpers pro Baujob rückverfolgbar. Für die drei Baurichtungen wurden die in Abbildung 4.2 dargestellten Anordnungen umgesetzt. Die Drehung der stehend gebauten Probekörperpakete um 45° bzgl. der x-y-Ebene erfolgte zur Vermeidung zusätzlicher Effekte bei der Auftragung des Pulvers sowie beim Aufschmelzen mittels Laser.

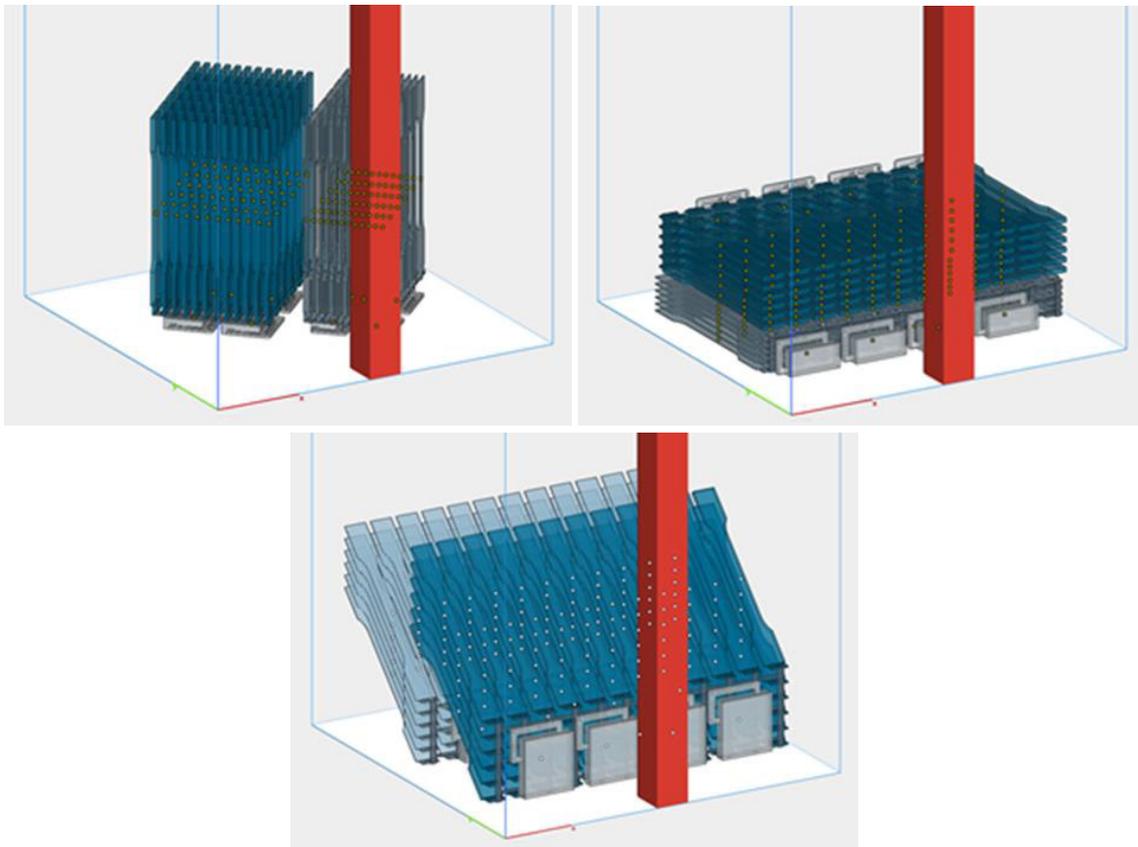


Abbildung 4.2: 3D-Bauraumansicht für die Fertigung der Probekörper Typ 1A nach DIN EN ISO 527-2 mit 1 mm (hellblau) und 4 mm (dunkelblau) Dicke bei stehender (oben links), liegender (oben rechts) und 45°-diagonaler (unten) Ausrichtung.

Für die Betrachtung des möglichen Einflusses der Nachbehandlung auf die Eigenschaften der Lasersintererteile ist essenziell, dass alle Probekörper vor der Nachbehandlung identische Eigenschaften, insbesondere im Hinblick auf die Mechanik, aufweisen. Die Bauraumhomogenität in entsprechenden Validierungsversuchen wurde als hinreichend bewertet (vgl. Anhang Kapitel 8.1).

Die Lasersinterteile aus dem Musterwerkstoff (PA12) wurden auf sieben verschiedenen Maschinen vom Typ P396 der Fa. EOS, Krailing, wie sie in der industriellen Praxis im Bereich der additiven Fertigung von (Klein)Serien eingesetzt werden, gefertigt. Dabei wurden auf jeder einzelnen Maschine alle drei in Abbildung 4.2 dargestellten Baujobs ausgeführt. Der Altpulveranteil lag bei 50 % und die Schichtdicke wurde mit 120 μm vorgegeben (in einem Fall wurde als Variation 100 μm gewählt). Die Kammertemperatur betrug jeweils 130 °C, während die Bauraumtemperatur zwischen 167,5 °C und 174,5 °C lag. Ausgepackt wurden die Lasersinterteile nach einem Auskühlen des Cakes auf 25 °C bis 60 °C, wobei die Abkühlauern zwischen 25 h und 72 h lagen. Die Bauzeiten betragen zwischen 13 h und 23 h.

Die Lasersinterteile aus PA11 wurden auf einer Maschine desselben Typs wie die Lasersinterteile aus dem Musterwerkstoff (PA12), ebenfalls mit einer Schichtdicke von 120 μm hergestellt. Im Unterschied dazu erfolgte die Fertigung der glasgefüllten PA12-Lasersinterteile mit einer Schichtdicke von 100 μm auf einer Formiga P100 der Fa. EOS, Krailing, sowie auf einer sPro60 der Fa. 3D Systems, Rock Hill (USA).

4.3 Nachbehandlung der Lasersinterteile

Die Nachbehandlung der Lasersinterteile erfolgte mit dem zum Zeitpunkt der Durchführung üblichen Stand der Technik von auf das jeweilige Nachbehandlungsverfahren spezialisierten Dienstleistern, Herstellern entsprechender Maschinentechnik sowie der Forschungseinrichtung. Damit wurden die Erfahrungswerte der industriellen Praxis genutzt und ein maximal mögliches Maß an Praxisrelevanz sichergestellt.

Die Lasersinterteile eines jeden Baujobs wurden dazu drei (Musterwerkstoff) bzw. vier (weitere Werkstoffe) Blöcken zugeordnet (vgl. Anhang Kapitel 8.2). Dabei diente Block 1 jeweils als Referenz, die nicht nachbehandelt wurde. Die Blöcke 2, 3 und ggf. 4 wurden jeweils nachbehandelt. Für den Fall der zweistufigen Nachbehandlung wurden im ersten Schritt zwei Blöcke eines Baujobs derselben Nachbehandlung unterzogen und im zweiten Schritt nur einer dieser Blöcke der zweiten Nachbehandlung (Färben) zugeführt. Hiermit konnte der Einfluss der einzelnen Nachbehandlungsverfahren und -schritte ausgewertet werden, da die Bewertung relativ zur Referenz bzw. dem vorhergehenden Teilschritt erfolgte.

Die Nachbehandlungsverfahren zur Glättung der herstellverfahrensbedingten rauen Oberflächen von Lasersinterteilen haben die größte Praxisrelevanz. Daher wurden diese am eingehendsten betrachtet, wobei eine Gewichtung entsprechend ihrer Verbreitung vorgenommen wurde. Im Unterschied zu zahlreichen Arbeiten anderer Arbeitsgruppen, die in ihren Arbeiten eine Verfahrensoptimierung im Hinblick auf die Reduzierung der Oberflächenrauheit adressieren (beispielsweise [BBW+13, IIG95, Kad10, KM16, SSL98]) wurde der Fokus auf die Interaktion mit dem mechanischen Verhalten gelegt. Die Verfahren werden nachfolgend entsprechend des zur Glättung der Oberflächenrauheit eingesetzten Mechanismus – mechanisch, chemisch und per Laser – gegliedert dargestellt.

4.3.1 Mechanisches Glätten

Das **Verdichtungsstrahlen** ist ein weit verbreitetes Verfahren, bei dem ein Strahlgut durch Druckluft beschleunigt wird. Dadurch erfolgt ein mechanischer Materialabtrag sowie eine Verdichtung der Oberfläche der Lasersinterteile. Die geometriebedingte Zugänglichkeit sowie die passende Wahl von Strahlgut und Strahlparametern beeinflussen das Ergebnis. Details, Ecken und Kanten werden ggf. verrundet. [AMS22, Dye23a, Kad10]

Das Verdichtungsstrahlen der Lasersinterteile erfolgte auf zum einen auf einer Maschine vom Typ S1 der Fa. AM Solutions, Untermerzbach, (PA12-Musterwerkstoff) bei ca. 21 °C für 20 Minuten unter Verwendung von Glasperlen mit 400 µm bis 600 µm Durchmesser. Zum anderen wurde eine Maschine vom Typ Powershot S, der Fa. DyeMansion, Planegg, (PA12-Musterwerkstoff und weitere Werkstoffe) eingesetzt. Hierbei erfolgte die Nachbehandlung bei 20 °C für 10 bis 19 Minuten unter Verwendung eines Strahlguts vom Typ PolyShot PS6 beads mit 600 µm Durchmesser.

Das **Gleitschleifen** ist ein ebenfalls häufig genutztes Verfahren, das abhängig von dem zum Transport der Schleifkörper genutzten Verfahren in die drei Gruppen Gleitschleifen mittels Rotation, Schleppen und Vibration unterteilt wird [AMS22, Kad10, Wal20]. Letzteres wurde für die Forschungsarbeiten eingesetzt. Dabei werden Lasersinterteile, Schleifkörper und Flüssigkeit gemeinsam in einem oszillierenden Behälter gegeben, wodurch ein mechanischer Abtrag an der Oberfläche der Lasersinterteile stattfindet. Aufgrund der Zugänglichkeit für die Schleifkörper ist die Glättung von Außenseiten i. d. R. besser als die der Innenseiten und Ecken bzw. Kannten werden verrundet [Sch15].

Das Gleitschleifen der Lasersinterteile erfolgte auf einer Maschine vom Typ R 320-Euro der Fa. AM Solutions, Untermerzbach. Dabei wurden kegelförmige Kunststoffschleifkörper vom Typ RPAM 04 12K, Trennkugeln vom Typ RAT G1 und Flüssigkeit vom Typ RAM C-23 der Fa. AM Solutions, Untermerzbach, eingesetzt. Die Durchlaufzeit betrug 3 h (PA12-Musterwerkstoff) bzw. 4 h bis 10 h (weitere Werkstoffe) bei einer Arbeitstemperatur von ca. 21 °C.

4.3.2 Chemisches Glätten

Das chemische Glätten nutzt Säuren zur Nachbehandlung, welche die Oberfläche der Lasersinterteile anlösen, plastifizieren und Fließvorgänge ermöglichen [Cip23a, Lux23]. Die Säure liegt dabei (abhängig vom eingesetzten chemischen Glättverfahren) flüssig oder gasförmig vor, wodurch feinere und innere Strukturen erreicht werden – Details jedoch verrundet werden. Das Glättergebnis hängt wesentlich von der eingesetzten Säure sowie insbesondere der Nachbehandlungsdauer ab. [Cip23a, Lux23]

Die Lasersinterteile wurden zum einen auf einer Maschine vom Typ Powerfuse S der Fa. DyeMansion, Planegg, (PA12-Musterwerkstoff) mit Vaporfuse VF47 EcoFuid für 100 Minuten bei einer maximalen Temperatur von 125 °C nachbehandelt. Die anschließende Trocknung erfolgte bei 115 °C für 20 h. Zum anderen wurden Lasersinterteile (PA12-Musterwerkstoff und weitere Werkstoffe) in einer Kabine mit LuxFlux PA, der Fa. LuxYours, Planegg, für zweimal 3 Minuten bei 110 °C nachbehandelt.

4.3.3 Laserglätten

Das Laserglätten bzw. Laserpolieren wird bislang vor allem zur Nachbehandlung additiv gefertigter Bauteile aus Metall genutzt [Wil12a]. Beim Einsatz für Kunststoffoberflächen wird i. d. R. ein CO₂-Laser verwendet. Mit diesem wird Energie in die Oberfläche eingetragen, sodass diese plastifiziert wird und durch Fließvorgänge eine neue Oberflächenstruktur ausbilden kann [Wil12b]. Da der Abstand des Lasers zur Oberfläche näherungsweise konstant gehalten werden sollte, lassen sich vor allem ebene Strukturen nachbehandeln.

Zum Glätten der Lasersinterteile (ausschließlich PA12-Musterwerkstoff) wurde ein CO₂-Laser vom Typ Speedy 100 C45 der Fa. Trotec Laser, Wels (A), verwendet, der eine Wellenlänge von 10,6 µm und Spotgröße von 0,05 mm bis 0,08 mm bietet. Die Laserleistung betrug 11,7 W und die Scangeschwindigkeit 0,84 m/s. Es wurde ausschließlich die Ober- und Unterseite behandelt (vgl. Abbildung 4.3) – eine Behandlung der schmalen Seitenflächen erfolgte nicht.



Abbildung 4.3: Foto eines PA12-Lasersinterteils während des Laserglätzens.

4.3.4 Färben

Bauteile, die mittels Lasersinterverfahren hergestellt werden, sind zunächst einmal uneingefärbt und typischerweise weiß bis cremefarbig. Ist eine andere Farbe gewünscht, müssen die Lasersinterenteile nachträglich gefärbt werden. Zum Färben werden die Lasersinterenteile bei erhöhter Temperatur in einem Färbebad eingelagert, anschließend abgespült und getrocknet. Dies kann in einem einfachen Topf auf einer Heizplatte erfolgen oder auf den mittlerweile am Markt erhältlichen Maschinen, welche eine Industrialisierung und Automatisierung des Topffärbens darstellen. [SD20a, CBG14, Dye23b]

Die Lasersinterenteile des PA12-Musterwerkstoffs wurden, sofern Färben die einzige Nachbehandlung war, mit der Farbe DM Black 01 auf einer Maschine vom Typ DM60 der Fa. DyeMansion, Planegg, schwarz eingefärbt. Die Maximaltemperatur von 115 °C wurde dabei für 30 Minuten gehalten, wobei die Durchlaufzeit insgesamt 2,5 h betrug. Bei der Kombination des Färbens mit je einem anderen Nachbehandlungsverfahren wurde zusätzlich auch mit einer Säure-Farbe (blau) bei 80 °C und einer Durchlaufzeit von 1 h im Topffärbe-Verfahren sowie mit einer Metallkomplexfarbe (schwarz) bei 96 °C und einer Durchlaufzeit von 3 h ebenfalls im Topffärbe-Verfahren gefärbt. Das letztgenannte Verfahren wurde auch zum Färben der glasgefüllten PA12Lasersinterenteile eingesetzt, die zudem mittels Verdichtungsstrahlen behandelt wurden. Die Arbeitstemperatur beim Färben betrug 120 °C und die Durchlaufzeit waren 2 h (reine Färbezeit: 40 Minuten).

4.3.5 Infiltrieren

Das Infiltrieren dient i. d. R. der Herstellung von Dichtheit gegenüber Gasen oder Flüssigkeiten. Dazu werden die porösen Lasersinterenteile in eine Flüssigkeit getaucht, die unter Vakuum oder Druck in die Bauteile eindringt, die inneren Hohlräume füllt und dort fest wird. Nach dem Infiltrieren werden die Lasersinterenteile getrocknet. [Cip23b, Tre00, Kad10]

Die Lasersinterenteile des PA12-Musterwerkstoffs wurden bei Raumtemperatur unter Vakuum 15 Minuten mit einem Nano-Polymer auf Lösungsmittelbasis infiltriert. Dasselbe Verfahren wurde auch zum Infiltrieren von glasgefüllten PA12-Lasersinterenteilen genutzt, die zudem verdichtungsgestrahlt und gefärbt wurden, die Durchlaufzeit betrug in diesem Fall 20 Minuten.

4.4 Charakterisierung der Lasersinterteile

Um die Auswirkungen der Konstruktion (Wanddicke), Herstellung (Baurichtung) und der Nachbehandlung im Hinblick auf die optischen und mechanischen Eigenschaften der Lasersinterteile quantifizieren zu können, wurden diese umfassend charakterisiert. Im Anhang (Kapitel 8.3) ist dargestellt, welche Probekörper (abhängig von der Positionierung im Bauraum bei der Herstellung der Lasersinterteile, vgl. Kapitel 4.2) für die jeweiligen Untersuchungen verwendet wurden. Da die optischen (Kapitel 4.4.1) und haptischen (Rauheit, Kapitel 4.5.1) Eigenschaften zerstörungsfrei ermittelt werden können, wurden diese als Erstes bestimmt. Für die nachbehandelten Teile erfolgte dies sowohl vor als auch nach der Nachbehandlung, sodass einige Lasersinterteile bis zu dreimal (im Fall der zweistufigen Nachbehandlung) untersucht wurden. Veränderungen durch die Nachbehandlung wurden jeweils in Relation zum Messwert am selben Probekörper ermittelt. Die mechanischen Eigenschaften (Kapitel 4.4.2) wurden anschließend ermittelt. Da deren Bestimmung nur zerstörend möglich ist, wurde als Referenz für Veränderungen jeweils die Messung an unbehandelten Teilen desselben Baujobs verwendet.

4.4.1 Optische Eigenschaften

Bislang werden Nachbehandlungen primär zur Veränderung der optischen (im Sinne dekorativer) Eigenschaften eingesetzt, was insbesondere dem Kontext der Prototypen-, Musterteile- und Vorserienfertigung als bisherigen Hauptanwendungsgebieten der additiven Fertigung geschuldet ist. Zur Erfassung dieser Eigenschaften wurden Farbe und Glanz der Lasersinterteile ermittelt. Dies ist insofern notwendig, als dass auch bei mechanisch beanspruchten Lasersinterteilen das optische und haptische Erscheinungsbild weiterhin (zumindest für einige Anwendungen) relevant bleibt.

Farb- und Glanzmessung

Die standardisierte, maschinelle Farb- und Glanzmessung ermöglicht eine reproduzierbare und objektive Erfassung. Zur Bewertung der Farbänderungen wurde der CIELab-Farbraum [Cie23] verwendet. Dabei beschreibt die a^* -Achse die Grün-Rot-Koordinaten und die b^* -Achse die Blau-Gelb-Koordinaten. Dabei stehen negative Werte für einen Grün- bzw. Blau-Anteil und positive Werte für einen Rot- bzw. Gelb-Anteil. Die L^* -Achse beschreibt die Helligkeit mit Werten zwischen 0 (schwarz) und 100 (weiß). [Bas10]

Die Farbe nach DIN EN ISO 5533-7 und der Glanz nach DIN EN ISO 2813 wurden an jeweils fünf (PA12-Musterwerkstoff) bzw. drei (weitere Werkstoffe) Probekörpern Typ 1A nach DIN EN ISO 527-2 je Block, Baurichtung und Probekörperdicke in Reflektion ermittelt. Dabei wurde der Messbereich stets identisch gewählt. Für die Untersuchungen der Lasersinterenteile aus dem PA12-Musterwerkstoff wurde ein Spektralphometer spectro-guide der Fa. BYK, Wesel (Abbildung 4.4 links) verwendet, welches bei der Farbmessung mit einer gerichteten $45^\circ/0^\circ$ -Geometrie arbeitet und den Glanz mit einem Winkel von 60° misst. Dabei wurden sowohl die Ober- als auch die Unterseiten der Lasersinterenteile charakterisiert. Für die weiteren Werkstoffe erfolgten die Messungen ausschließlich an der Oberseite mit dem Messgerät Ci7860 der Fa. Xrite, Grand Rapids (MI, USA). Hierbei wurde die Farbe mit einer $d/8^\circ$ -Geometrie im Modus SCI (engl. specular included) gemessen und der Glanz unter 60° bestimmt (Abbildung 4.4 rechts). Alle Messung der unbehandelten Referenzen sowie der nachbehandelten Lasersinterenteile, vor und nach der Nachbehandlung, erfolgten stets mit demselben Gerät.



Abbildung 4.4: Zur Farb- und Glanzmessung eingesetzte Messsysteme: spectro-guide der Fa. BYK, Wesel, (links) und Ci7860 der Fa. Xrite, Grand Rapids (MI, USA) (rechts).

4.4.2 Mechanische Eigenschaften

Für mechanisch beanspruchte Teile ist die Kenntnis der Festigkeit, Zähigkeit und Kerbempfindlichkeit entscheidend, um eine gezielte konstruktive Auslegung und damit einen sicheren Betrieb zu ermöglichen. Daher wurden Zug- und Schlagbiegeprüfungen durchgeführt. Ursprünglich waren auch Biegeprüfungen vorgesehen. Allerdings verformten sich die Probekörper unter 3-Punkt-Biegebeanspruchung so deutlich, dass die Festigkeit nicht sinnvoll bestimmt werden konnte (vgl. Anhang Kapitel 8.1). Da zudem auch unter Biegebeanspruchung i. d. R. die Zugbeanspruchung als versagenskritisch einzustufen ist, ist die Durchführung von Zugversuchen ausreichend.

Die **uniaxialen Zugversuche** nach DIN EN ISO 527 dienen der Charakterisierung des mechanischen Kurzzeitverhaltens unter langsamer Beanspruchung. Aus dem Spannungs-Dehnungs-Verhalten wurde die Maximalspannung als Maß für die Festigkeit sowie die Bruchdehnung als Zähigkeitsmaß ermittelt.

Je Block, Baurichtung und Probekörperdicke wurden fünf vorgetrocknete Probekörper Typ 1A nach DIN EN ISO 527-2 geprüft. Die Vortrocknung erfolgte durch Lagerung für 72 h bei 80 °C in einem Wärmeschrank Typ FED53 bzw. Typ FED240 der Fa. Binder, Tuttlingen. Sämtliche Untersuchungen erfolgten mit einer Universalprüfmaschine vom Typ Z010 der Fa. Zwick/Roell, Ulm, bei Normklima (23 °C, 50 % rel. Luftfeuchte) mit einer Dehngeschwindigkeit von 50 mm/min (vgl. Abbildung 4.5).

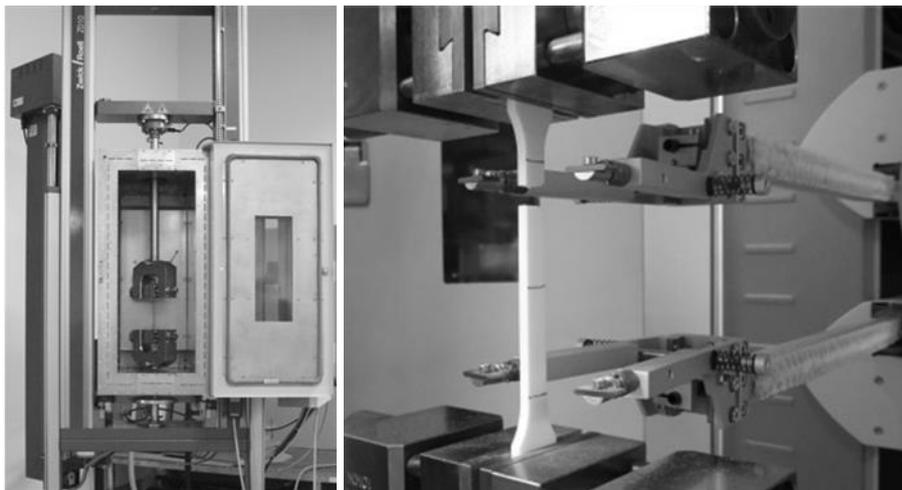


Abbildung 4.5: Für uniaxiale Zugversuche eingesetzte Universalprüfmaschine vom Typ Z010 der Fa. Zwick/Roell, Ulm, (links) und eingespannter Probekörper Typ 1A nach DIN EN ISO 527-2 (rechts).

Die **Schlagbiegeprüfungen** nach DIN EN ISO 179 dienen der Charakterisierung des mechanischen Kurzzeitverhaltens unter schneller Beanspruchung. Aus der verbrauchten Schlagenergie wurde die Schlagzähigkeit berechnet, welche die Fähigkeit des Materials beschreibt, Energie zu absorbieren, und ein Maß für die Kerbempfindlichkeit ist.

Für die Untersuchungen wurden je Block, Baurichtung und Probekörperdicke zehn vorgetrocknete Probekörper Typ 1A nach DIN EN ISO 527-2 verwendet, deren Probekörperschulter zuvor mechanisch entfernt wurde. Die Vortrocknung erfolgte durch Lagerung für 72 h bei 80 °C in einem Wärmeschrank Typ FED53 bzw. Typ FED240 der Fa. Binder, Tuttlingen. Die Schlagbiegeprüfungen erfolgten mit einem Schlagpendel HIT 50P der Fa. Zwick/Roell (vgl. Abbildung 4.6 links), Ulm, bei Normklima (23 °C, 50 % rel. Luftfeuchte). Auf eine Kerbung der Probekörper wurde verzichtet und die Beanspruchungsrichtung wurde breitseitig (engl. flatwise) gewählt (vgl. Abbildung 4.6 rechts). Hierdurch werden mögliche, aus der Herstellung und Nachbehandlung der Lasersintererteile resultierende, Struktureffekte hinsichtlich ihrer Kerbwirkung messtechnisch besser erfasst.

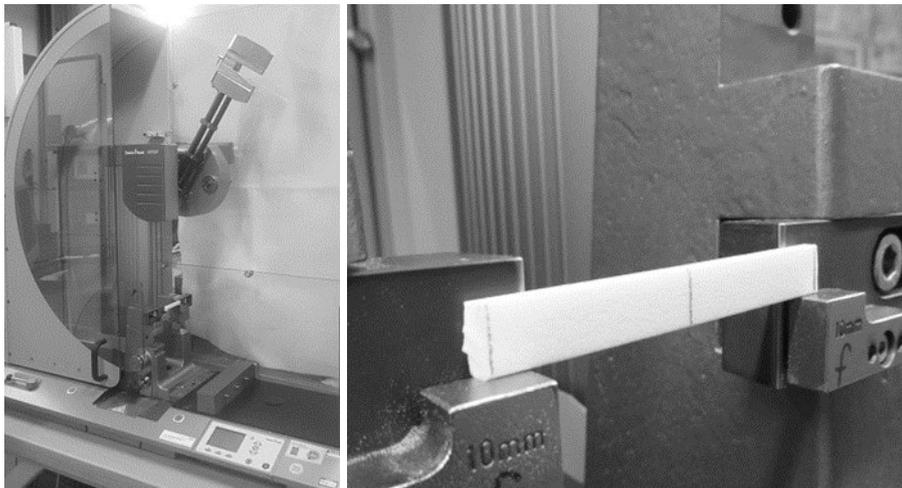


Abbildung 4.6: Für Schlagbiegeprüfungen eingesetztes Schlagpendel HIT 50P der Fa. Zwick/Roell, Ulm, (links) und aus eine Probekörper Typ 1A nach DIN EN ISO 527-2 entnommener Probekörper im Widerlager vor Start des Versuchs (rechts).

4.5 Untersuchungen zur Aufklärung von Wirkzusammenhängen

Zur Aufklärung der Wirkzusammenhänge wurden die Resultate der in Kapitel 4.4 beschriebenen Untersuchungen zur Charakterisierung der Lasersinterteile in Relation zu den Einflüssen der Konstruktion (Wanddicke), Herstellung (Baurichtung) und den Einflüssen der Nachbehandlungsverfahren gesetzt (Kapitel 5.1 und 5.2). Dazu wurde auch die Interaktion der verschiedenen Einflussgrößen in Bezug auf die mechanischen Eigenschaften systematisch betrachtet. Die Arbeiten erfolgten zunächst für den gewählten Musterwerkstoff und später mit reduziertem Umfang für die weiteren Werkstoffe.

Zur wissenschaftlichen Untersuchung und Aufklärung möglicher Ursachen wurden die nachfolgend beschriebenen Methoden genutzt. Dabei wurde insbesondere die erwartete Beeinflussung des mechanischen Verhaltens infolge einer Reduktion innerer und äußerer Kerben durch Reduktion der Rauheit (Glätten) und Auffüllen der verfahrensbedingt porösen Struktur (Infiltrieren) lasergesinteter Kunststoffbauteile überprüft (Kapitel 5.3).

4.5.1 Topografiecharakterisierung

Die Topografiecharakterisierung und Ermittlung von flächigen Rauheitskenngrößen wurde zur Betrachtung und Quantifizierung der äußeren Struktur eingesetzt. Dabei wurde die mittlere arithmetische Höhe der skalenbegrenzten Oberfläche S_a nach DIN EN ISO 25178-2 verwendet, die i. A. herangezogen wird, um die Oberflächenrauheit zu beurteilen. Sie entspricht dem Betrag des Höhenunterschiedes eines jeden Punktes im Vergleich zum arithmetischen Mittel der Oberfläche.

Für den PA12-Musterwerkstoff wurden je Block, Baurichtung und Probekörperdicke drei Probekörper Typ 1A nach DIN EN ISO 527-2 im unbehandelten Zustand sowie jeweils ein Probekörper Typ 1A nach DIN EN ISO 527-2 je Nachbehandlungsverfahren vermessen. Bei den weiteren Werkstoffen erfolgte in allen Fällen eine Dreifachbestimmung. Für die Messungen wurde der Messbereich stets identisch im parallelen Bereich gewählt und sowohl die Ober- als auch die Unterseite charakterisiert. Die Untersuchungen erfolgten mittels SurfScan-System, einem Eigenbau der Forschungseinrichtung, das mithilfe eines Lasers vom Typ LT-9010M der Fa. Keyence, Osaka (J), die Oberflächenstruktur eines Probekörpers über eine konfokale Messung erfasst (vgl. Abbildung 4.7 links). Die Auswertung der Messdaten erfolgte mit der Software Inspector der Fa. OPM Messtechnik, Ettlingen. Dabei erfolgte die Formentfernung mit einem Polynom dritten Grades. Für den S-Filter wurden 0,025 mm und für den L-Filter 2,0 mm verwendet. Die

am Prüfgerät einzustellenden Parameter wurden mit Blick auf die enorme Zahl zu charakterisierender Proben in umfangreichen Versuchsreihen hinsichtlich eines möglichst guten Verhältnisses aus Prüfgenauigkeit und Zeitbedarf optimiert [Kel21]. Gewählt wurden schließlich die nachfolgend in Tabelle 4.2 und Abbildung 4.7 dargestellten Parameter.

Tabelle 4.2: Zur Rauheitsmessung gewählte Einstellparameter des SurfScan-Systems der Forschungseinrichtung.

Messfeld	2 mm x 2 mm
Inkrement	8 μm
Geschwindigkeit	Stufe 5

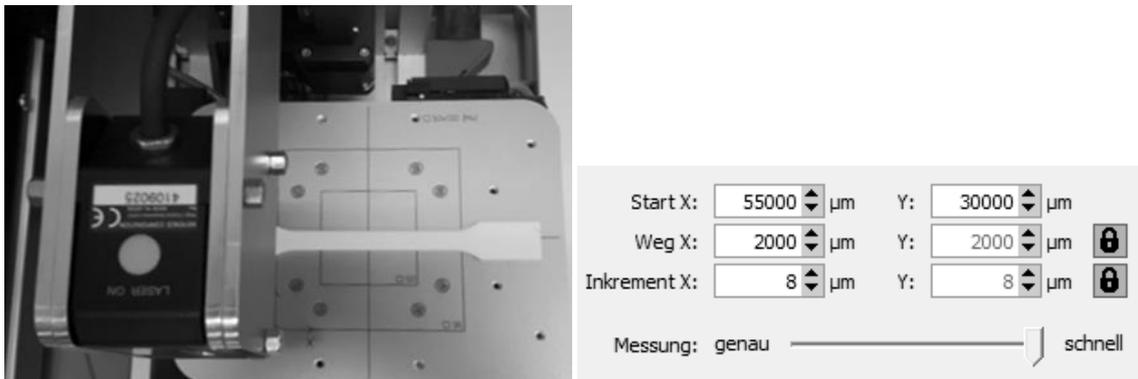


Abbildung 4.7: Zur Rauheitsmessung eingesetztes SurfScan-System der Forschungseinrichtung; Foto mit aufliegendem Probekörper Typ 1A nach DIN EN ISO 527-2 (links) und Screenshot der eingestellten Messparameter (rechts).

4.5.2 Mikroskopie

Die Lichtmikroskopie wurde zur Betrachtung der inneren Struktur eingesetzt. Dabei wurden zum einen die verfahrenstypische poröse innere Struktur erfasst und zum anderen die aus der Nachbehandlung resultierenden Faktoren Eindringtiefe/Schichtdicke und Füllung der porösen Struktur evaluiert.

Dazu wurden aus einem Probekörper je Block, Baurichtung und Probekörperdicke aus dem parallelen Bereich der Probekörper Typ 1A nach DIN EN ISO 527-2 50 μm dicke Dünnschnitte mithilfe eines Mikrotoms vom Typ Leica RM2255 der Fa. Leica Biosystems, Wetzlar, entnommen. Die Lichtmikroskopieaufnahmen erfolgten mit einer 20-fachen Vergrößerung mittels Digitalmikroskop VHX 600 der Fa. KEYENCE, Neu-Isenburg.

4.5.3 Dynamische Differenzkalorimetrie

Die dynamische Differenzkalorimetrie (engl. differential scanning calorimetry, DSC) wurde zur Überprüfung möglicher, durch die Nachbehandlung verursachten, Morphologieänderungen eingesetzt. Diese sind im ersten Heizlauf sichtbar, wohingegen mit dem zweiten Heizlauf potenziell irreversible Materialveränderungen detektierbar sind.

Für die Untersuchungen wurde Material aus einem liegend gefertigten Probekörper Typ 1A nach DIN EN ISO 527-2 je Block und Probekörperdicke entnommen. Die Messungen erfolgten auf einer DSC 204F1 Phoenix der Fa. Netzsch Gerätebau, Selb. Alle Proben wurden mit konstanten Aufheiz- und Abkühlraten von 10 K/min unter Stickstoffatmosphäre in zwei Heizläufen und einem Kühllauf (Temperaturbereich 0 °C bis 210 °C bzw. 230 °C) charakterisiert. Die Auswertung erfolgte mit der Software Proteus Analysis der Fa. Netzsch Gerätebau, Selb. Dabei wurden zur Berechnung des Kristallinitätsgrads, die in der Software hinterlegten Schmelzenthalpien der kristallinen Phase $\Delta H_{m,100\% \text{ kristallin}}$ von 210 J/g (PA12) bzw. 224 J/g (PA11) verwendet; die Auswertung erfolgte für den Temperaturbereich 160 °C bis 205 °C.

4.6 Ableitung von Handlungsempfehlungen

Auf Basis der in Kapitel 4.4 und 4.5 beschriebenen Arbeiten wurden jeweils Handlungsempfehlungen zur Auslegung und Nachbehandlung von Lasersinterteilen abgeleitet. So konnten mit Blick auf das mechanische Verhalten aus der Betrachtung der Dickenabhängigkeit Hinweise zur Konstruktion (d. h. Produktgestaltung), aus der Betrachtung der Baurichtungsabhängigkeit Hinweise für die Herstellung (d. h. Ausrichtung im Bauraum bei der additiven Fertigung) sowie Auswirkungen der Nachbehandlungsverfahren gewonnen werden (vgl. Kapitel 5.1 und 5.2).

5 Darstellung und Diskussion der Ergebnisse

5.1 Optische Eigenschaften in Abhängigkeit von der Baurichtung, Wanddicke und Nachbehandlung

5.1.1 Farbe

Einen ersten Eindruck zum typischen Erscheinungsbild der Lasersinterteile geben die Fotos in Abbildung 5.1. Dabei weisen die additiv gefertigten Probekörper Typ 1A nach DIN EN ISO 527-2 die typischen, verfahrensbedingten Strukturen auf: So entstehen die waagerechten Strukturen der stehend gebauten Lasersinterteile aus dem schichtweisen Aufbau in z-Richtung. Bei liegender Bauweise ergibt sich ein homogenes Erscheinungsbild, da die gesamte Oberfläche in der x-y-Ebene im gleichen Prozessschritt gefertigt wird. Deutlich erkennbar sind die aus dem Schichtaufbau resultierenden, waagrecht verlaufenden Strukturen bei stehender und insbesondere diagonaler (45°) Anordnung.

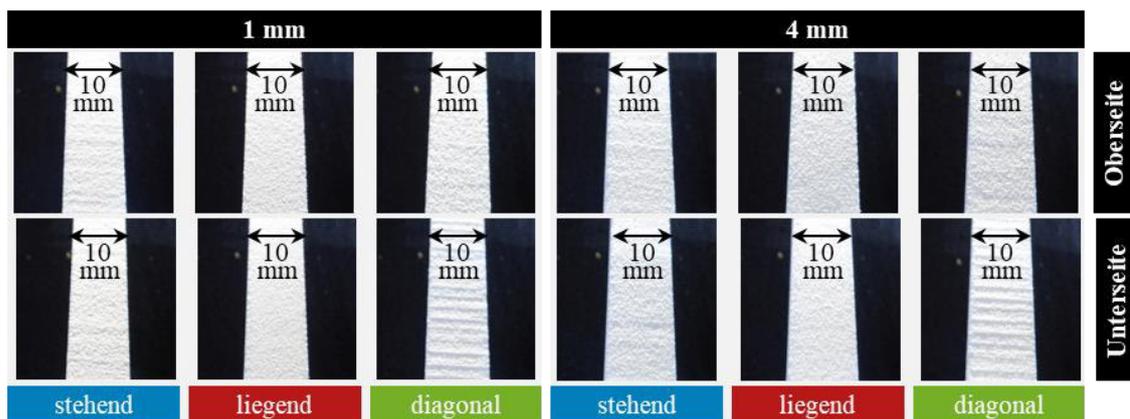


Abbildung 5.1: Fotos von PA12-Lasersinterteilen (Ausschnitt aus dem parallelen Bereich des Probekörpers Typ 1A nach DIN EN ISO 527-2) in Abhängigkeit von der Baurichtung und Wanddicke; Oberseite (oben) und Unterseite (unten).

Die gemessenen Farbwerte an der Oberseite (links) und Unterseite (rechts) der **unbehandelten Lasersinterteile** aus dem **PA12-Musterwerkstoff** sind in Abbildung 5.2 dargestellt. Da jeder Baujob auf sieben Lasersinteranlagen ausgeführt wurde (vgl. Kapitel 2.1), sind jeweils sieben Balken – einer je Baujob – zu sehen. Die Helligkeitswerte L^* sowie die Farbwerte a^* und b^* stimmen jeweils gut für die verschiedenen Baurichtungen sowie die Ober- und Unterseite der Lasersinterteile überein. Dabei liegt der Helligkeitswert L^* nahe 100, und die Farbwerte a^* und b^* nahe Null, was insgesamt einem näherungsweise weißen Erscheinungsbild entspricht. Die wanddickenabhängigen Unterschiede – etwas geringere Helligkeit, leichte rot- statt grün-Tendenz sowie minimal stärkere gelb-Tendenz der 1 mm dicken Lasersinterteile – sind darauf zurückzuführen,

dass die Lasersinterteile bei der Messung auf einer dunklen Unterlage positioniert waren und diese bei den dünneren Lasersinterteilen leicht durchschien. Insgesamt weisen alle aus dem PA12-Musterwerkstoff hergestellten Lasersinterteile eine vergleichbare Farbe auf; größere Unterschiede in Abhängigkeit von der verwendeten Maschine oder Materialcharge wurden nicht beobachtet.

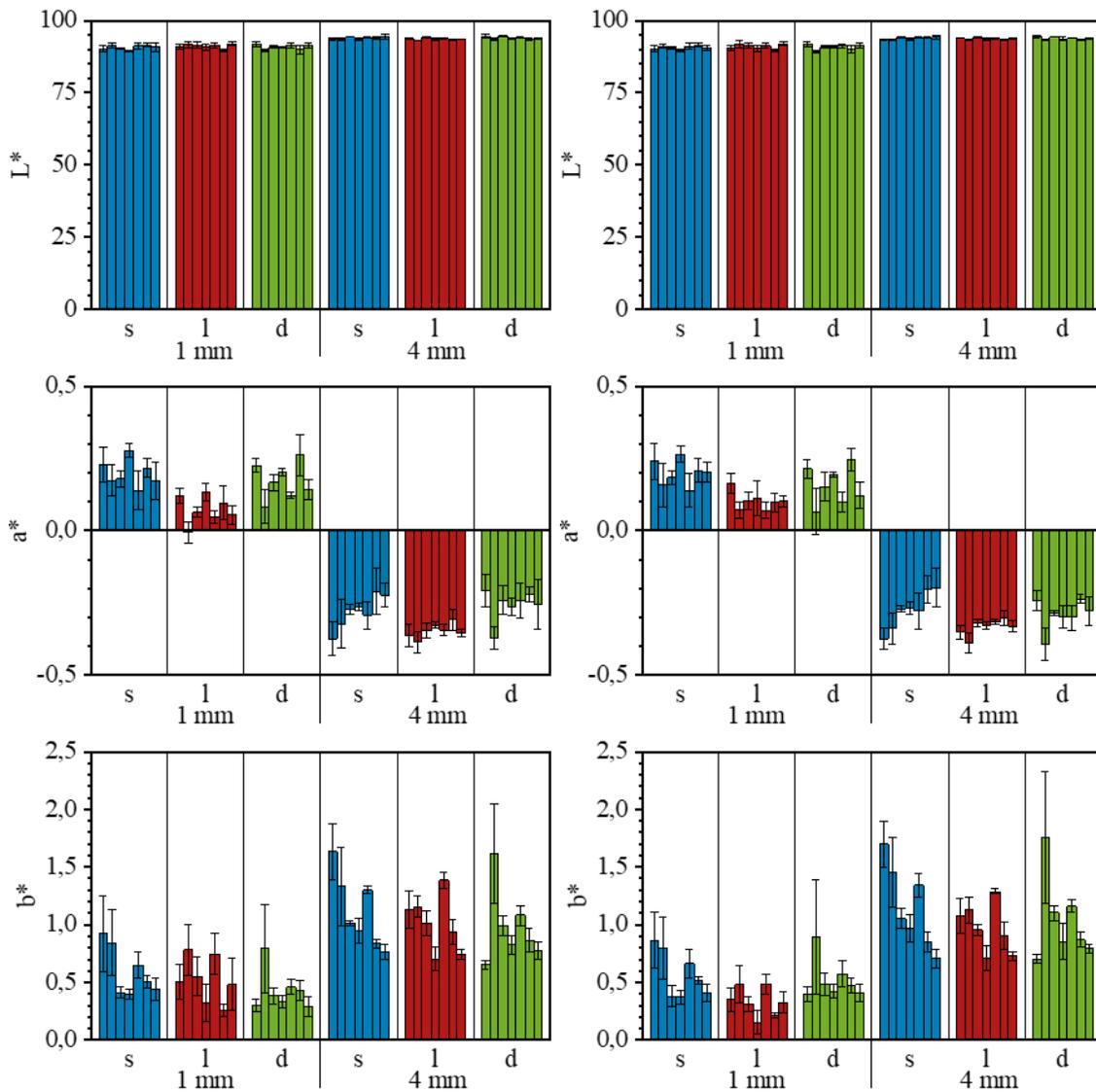


Abbildung 5.2: L*a*b*-Werte von PA12-Lasersinterteilen in Abhängigkeit von der Baurichtung und Wanddicke, gemessen an der Oberseite (links) und der Unterseite (rechts).

Die Änderung der Helligkeits- und Farbwerte, welche die aus dem **PA12-Musterwerkstoff** gefertigten Lasersinterteile durch die **einstufige Nachbehandlung** erfuhren, ist in Tabelle 5.1 bis Tabelle 5.4 als relative Veränderung des Absolutwertes angegeben. Dazu wurde die Differenz der Mittelwerte der Messungen an den nachbehandelten Lasersinterteilen und denselben Lasersinterteilen vor der Nachbehandlung gebildet. Positive bzw. negative Werte entsprechen demnach einer Zu- bzw. Abnahme des Messwertes durch die Nachbehandlung. Die Ergebnisse jeder Zeile gehören zum selben Block (vgl. Anhang Kapitel 8.2), d. h. die Lasersinterteile wurden auf derselben Maschine gefertigt und anschließend derselben Nachbehandlung unterzogen.

Die $L^*a^*b^*$ -Werte der Lasersinterteile aus dem PA12-Musterwerkstoff wurden durch die verschiedenen Nachbehandlungen kaum verändert, außer beim Färben wo dies explizit gewünscht ist. Dabei unterscheiden sich Messergebnisse für die Ober- und Unterseite kaum. Der Helligkeitswert L^* wurde durch die Nachbehandlungen tendenziell etwas reduziert. Dieser Effekt ist bei den 1 mm dicken Lasersinterteilen stärker ausgeprägt als bei den 4 mm Lasersinterteilen. Als Erklärung kommt daher auch eine Einflusszunahme des verwendeten (dunklen) Messhintergrundes in Betracht. Die Farbwerte a^* und b^* lagen auch nach der Nachbehandlung sehr nahe am Ursprung des Farbraumes. Interessanterweise gilt dies auch für die schwarze Einfärbung, wobei diese den Helligkeitswert erwartungsgemäß deutlich von 89,2 bis 94,0 auf Absolutwerte zwischen 15,9 und 25,2 reduziert.

Tabelle 5.1: Änderung der $L^*a^*b^*$ -Werte durch eine einstufige Nachbehandlung von 1 mm dicken PA12-Lasersinterteilen in Abhängigkeit von der Baurichtung, gemessen an der Oberseite.

1 mm Oberseite	L^*			a^*			b^*		
	s	l	d	s	l	d	s	l	d
Verdichtungs- strahlen	-1,3	-2,0	-1,7	+0,1	+0,1	±0,0	-0,1	-0,2	-0,1
	-4,6	-4,8	-4,6	-0,1	±0,0	-0,1	-0,3	-0,1	±0,0
Gleitschleifen	-0,9	-0,9	-0,1	+0,1	+0,1	+0,1	+0,1	±0,0	±0,0
	-1,1	-0,6	-1,8	+1,5	+0,7	+1,9	+1,0	+0,1	+1,1
	-0,5	-1,0	-0,1	+0,8	+1,0	+1,4	+0,5	+0,5	+1,1
Chemisches Glätten	-4,6	-4,4	-4,6	+0,3	+0,2	+0,3	+0,2	+0,1	±0,0
	-3,9	-2,4	-3,8	±0,0	±0,0	+0,2	-0,1	±0,0	-0,1
Laserglätten	-4,1	-3,0	-3,6	±0,0	-0,1	-0,2	+1,9	+1,3	+2,4
Färben	-73,0	-64,0	-72,8	+0,8	+1,0	+0,7	-0,8	-0,8	-0,8
Infiltrieren	-7,6	-6,4	-6,4	+0,2	+0,1	+0,1	+0,3	±0,0	+0,1

Tabelle 5.2: Änderung der L*a*b*-Werte durch eine einstufige Nachbehandlung von 1 mm dicken PA12-Lasersinterteilen in Abhängigkeit von der Baurichtung, gemessen an der Unterseite.

1 mm Unterseite	L*			a*			b*		
	s	l	d	s	l	d	s	l	d
Verdichtungs- strahlen	-1,4	-2,2	-1,6	+0,1	±0,0	+0,2	-0,1	-0,1	-0,2
	-4,1	-4,3	-4,3	-0,2	-0,1	-0,1	-0,3	+0,1	-0,1
Gleitschleifen	-0,8	-0,7	-0,2	+0,1	+0,1	+0,1	+0,2	+0,2	±0,0
	-1,2	-0,4	-0,5	+1,6	+0,6	+1,2	+1,1	+0,4	+0,6
	-0,1	-1,2	-0,3	+0,8	+1,2	+1,3	+0,5	+0,8	+0,7
Chemisches Glätten	-4,5	-3,8	-4,5	+0,3	+0,2	+0,2	+0,3	+0,3	-0,1
	-4,1	-2,4	-4,3	+0,1	±0,0	+0,1	±0,0	-0,1	+0,1
Laserglätten	-4,4	-3,2	-3,4	±0,0	-0,2	-0,2	+2,2	+2,1	+1,6
Färben	-74,7	-65,7	-71,9	+0,8	+0,9	+0,7	-0,8	-0,8	-0,9
Infiltrieren	-7,4	-6,0	-6,4	+0,2	+0,1	+0,1	+0,3	±0,0	+0,1

Tabelle 5.3: Änderung der L*a*b*-Werte durch eine einstufige Nachbehandlung von 4 mm dicken PA12-Lasersinterteilen in Abhängigkeit von der Baurichtung, gemessen an der Oberseite.

4 mm Oberseite	L*			a*			b*		
	s	l	d	s	l	d	s	l	d
Verdichtungs- strahlen	-0,9	-1,0	-1,1	±0,0	-0,1	±0,0	±0,0	+0,1	+0,1
	-3,2	-3,0	-4,0	±0,0	±0,0	±0,0	+0,2	+0,3	+0,3
Gleitschleifen	-0,3	±0,0	-0,3	±0,0	+0,1	+0,1	+0,3	+0,1	+0,4
	-0,4	-0,5	-0,6	+1,8	+0,7	+1,3	+1,4	+0,5	+0,9
	-1,1	-0,6	-1,4	+0,8	+0,7	+1,6	+0,6	+0,6	+1,2
Chemisches Glätten	-1,2	-0,6	-1,5	-0,1	-0,1	±0,0	+0,2	+0,3	+0,1
	-1,3	-0,7	-1,6	-0,1	±0,0	-0,1	+0,6	+0,6	+0,2
Laserglätten	-0,9	-0,5	-1,0	-0,6	-0,4	-0,5	+2,2	+1,2	+2,4
Färben	-76,6	-70,7	-73,5	+1,2	+1,3	+1,0	-1,2	-1,4	-1,5
Infiltrieren	-3,3	-2,8	-3,9	+0,1	+0,1	+0,2	-0,1	±0,0	+0,1

Tabelle 5.4: Änderung der L*a*b*-Werte durch eine einstufige Nachbehandlung von 4 mm dicken PA12-Lasersinterteilen in Abhängigkeit von der Baurichtung, gemessen an der Unterseite.

4 mm Unterseite	L*			a*			b*		
	s	l	d	s	l	d	s	l	d
Verdichtungs- strahlen	-0,9	-0,9	-0,9	±0,0	+0,2	-0,1	+0,1	±0,0	+0,1
	-3,3	-3,5	-3,5	±0,0	+0,1	±0,0	±0,0	+0,3	+0,2
Gleitschleifen	-0,2	-0,1	-0,7	±0,0	+0,2	+0,1	+0,2	+0,1	+0,2
	-0,6	-0,6	-0,7	+1,7	+0,8	+0,8	+1,2	+0,6	+0,6
	-0,8	-0,6	-0,9	+0,7	+0,8	+1,1	+0,8	+0,6	+0,8
Chemisches Glätten	-1,1	-1,0	-1,3	-0,1	±0,0	±0,0	+0,3	+0,2	+0,1
	-1,5	-1,1	-1,3	-0,1	±0,0	-0,1	+0,8	+0,6	+0,3
Laserglätten	-1,2	-0,6	-0,8	-0,6	-0,4	-0,4	+2,1	+1,5	+1,5
Färben	-77,1	-74,2	-74,4	+1,2	+1,4	+1,3	-1,1	-1,2	-1,2
Infiltrieren	-2,9	-2,3	-2,3	+0,1	±0,0	±0,0	-0,1	-0,1	-0,2

Analog zu der Darstellung für die einstufige Nachbehandlung sind in Tabelle 5.5 bis Tabelle 5.8 die Änderungen der Helligkeits- und Farbwerte durch die **zweistufige Nachbehandlung** der Lasersinterenteile aus dem **PA12-Musterwerkstoff** als Veränderung des Absolutwertes in Relation zum unbehandelten Zustand angegeben. Als zusätzliche Nachbehandlung erfolgte jeweils eine Einfärbung in schwarz bzw. blau im Fall der chemisch geglätteten Lasersinterenteile. Die verwendeten Lasersinterenteile stammten jeweils aus denselben Baujobs wie die einstufig nachbehandelten Lasersinterenteile, deren Ergebnisse in der ersten Zeile der entsprechenden Nachbehandlungsverfahren in Tabelle 5.1 bis Tabelle 5.4 aufgeführt wurden. Wunschgemäß reduziert das Färben den Helligkeitswert L^* deutlich, wobei die Veränderung in derselben Größenordnung wie beim einstufigen Färben liegt. Bei schwarzer Einfärbung veränderten sich die Farbwerte a^* und b^* erneut kaum. Die blaue Einfärbung reduzierte hingegen erwartungsgemäß den Farbwert b^* deutlich, wobei sich auch der Farbwert a^* änderte (Verschiebung Richtung rot). Insgesamt unterscheiden sich die Resultate der 1 mm und 4 mm dicken Lasersinterenteile an der Ober- und Unterseite kaum. Die Veränderung der $L^*a^*b^*$ -Werte durch das Färben liegt bei der ein- und zweistufigen Nachbehandlung in derselben Größenordnung.

Tabelle 5.5: Änderung der $L^*a^*b^*$ -Werte durch eine zweistufige Nachbehandlung von 1 mm dicken PA12-Lasersinterenteilen in Abhängigkeit von der Baurichtung, gemessen an der Oberseite.

1 mm Oberseite		L^*			a^*			b^*		
		s	l	d	s	l	d	s	l	d
Färben +	Verdichtungsstrahlen	-71,2	-69,9	-70,7	+0,3	+0,4	+0,2	-1,3	-1,6	-1,3
	Gleitschleifen	-67,9	-65,9	-65,7	-0,1	-0,1	-0,2	-2,9	-3,3	-3,2
	Chemisches Glätten	-70,2	-69,5	-71,2	+29,5	+31,4	+31,8	-53,1	-56,6	-55,7
	Infiltrieren	-74,6	-73,3	-75,2	+0,2	+0,5	+0,1	-1,1	-1,4	-1,2

Tabelle 5.6: Änderung der $L^*a^*b^*$ -Werte durch eine zweistufige Nachbehandlung von 1 mm dicken PA12-Lasersinterenteilen in Abhängigkeit von der Baurichtung, gemessen an der Unterseite.

1 mm Unterseite		L^*			a^*			b^*		
		s	l	d	s	l	d	s	l	d
Färben +	Verdichtungsstrahlen	-70,6	-71,3	-69,9	+0,3	+0,4	+0,3	-0,9	-1,3	-1,4
	Gleitschleifen	-66,2	-68,0	-65,7	-0,3	±0,0	±0,0	-3,2	-2,9	-2,9
	Chemisches Glätten	-69,8	-69,4	-72,0	+29,2	+32,4	+33,1	-52,5	-57,6	-56,6
	Infiltrieren	-75,6	-73,8	-74,4	+0,2	+0,4	+0,5	-1,1	-1,1	-1,2

Tabelle 5.7: Änderung der L*a*b*-Werte durch eine zweistufige Nachbehandlung von 4 mm dicken PA12-Lasersinterteilen in Abhängigkeit von der Baurichtung, gemessen an der Oberseite.

4 mm Oberseite		L*			a*			b*		
		s	l	d	s	l	d	s	l	d
Färben +	Verdichtungsstrahlen	-73,1	-72,7	-73,1	+0,5	+0,7	+0,6	-1,6	-2,3	-2,2
	Gleitschleifen	-69,1	-66,7	-68,4	+0,4	+0,3	+0,2	-3,2	-3,1	-3,9
	Chemisches Glätten	-70,4	-71,4	-72,0	+31,5	+34,4	+34,7	-57,8	-61,4	-60,6
	Infiltrieren	-73,0	-72,0	-73,8	+1,0	+1,1	+0,8	-2,0	-2,0	-2,1

Tabelle 5.8: Änderung der L*a*b*-Werte durch eine zweistufige Nachbehandlung von 4 mm dicken PA12-Lasersinterteilen in Abhängigkeit von der Baurichtung, gemessen an der Unterseite.

4 mm Unterseite		L*			a*			b*		
		s	l	d	s	l	d	s	l	d
Färben +	Verdichtungsstrahlen	-73,3	-73,5	-72,5	+0,6	+0,7	+0,7	-2,2	-2,3	-2,0
	Gleitschleifen	-69,4	-66,7	-68,6	+0,5	+0,3	+0,5	-3,2	-3,2	-3,7
	Chemisches Glätten	-70,5	-71,6	-72,1	+32,7	+35,1	+35,4	-59,6	-62,6	-61,8
	Infiltrieren	-73,0	-73,2	-73,0	+1,0	+1,1	+1,2	-2,2	-1,8	-2,0

Aufgrund der guten Übereinstimmung der Resultate von Ober- und Unterseite bei den Lasersinterteilen aus dem PA12-Musterwerkstoff, wurden die weiteren Werkstoffe ausschließlich an der Oberseite bzgl. ihrer L*a*b*-Werte charakterisiert.

Die an der Oberseite gemessenen Farbwerte der **unbehandelten Lasersinterteile** aus dem **PA11-Werkstoff** sind in Abbildung 5.3 dargestellt. Die Helligkeitswerte L* sowie die Farbwerte a* und b* stimmen jeweils gut für die verschiedenen Baurichtungen der Lasersinterteile überein. Dabei indizierten die relativ hohen Helligkeitswerte L* und die Farbwerte a* und b* nahe Null ein näherungsweise weißes Erscheinungsbild. Die wanddickenabhängigen Unterschiede – etwas größere Helligkeit, etwas schwächere grün-Tendenz sowie minimal stärkere gelb-Tendenz der 1 mm dicken Lasersinterteile – sind darauf zurückzuführen, dass die Lasersinterteile bei der Messung auf einer hellen Unterlage positioniert waren. Wie schon beim PA12-Musterwerkstoff schien der Untergrund bei den dünneren Lasersinterteilen leicht durch. Insgesamt weisen alle aus dem PA11-Werkstoff hergestellten Lasersinterteile vergleichbare L*a*b*-Werte auf.

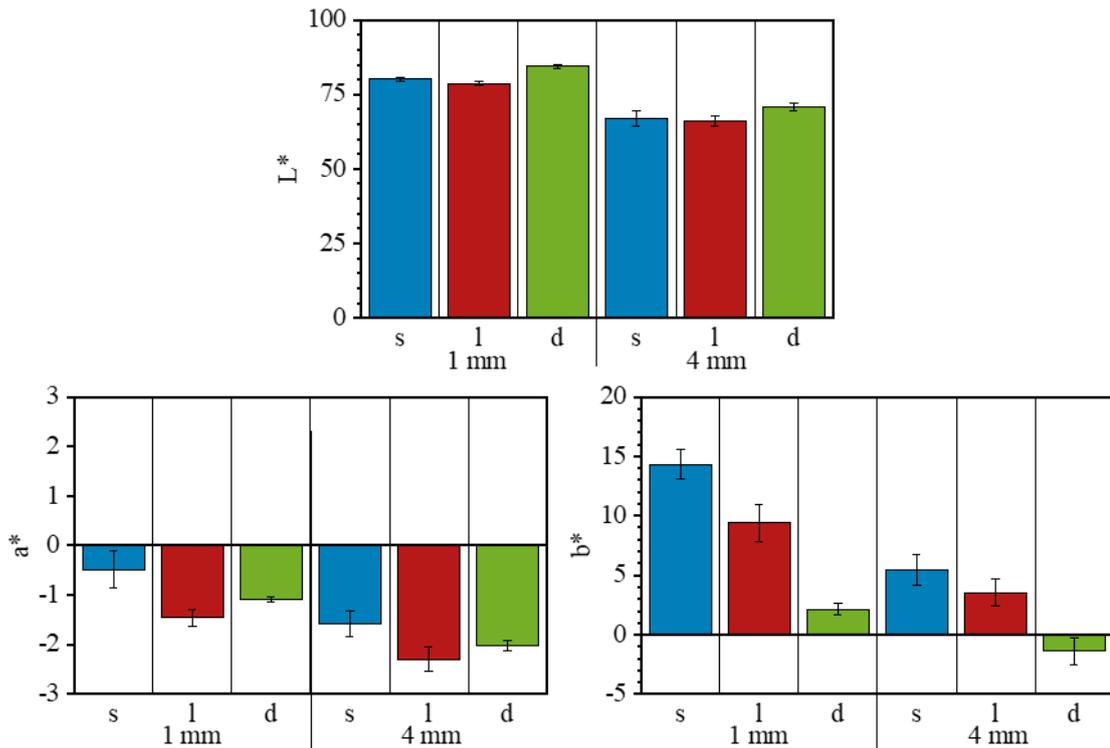


Abbildung 5.3: $L^*a^*b^*$ -Werte von PA11-Lasersinterteilen in Abhängigkeit von der Baurichtung und Wanddicke, gemessen an der Oberseite.

Tabelle 5.9 und Tabelle 5.10 geben die Veränderungen der $L^*a^*b^*$ -Werte durch die **einstufige Nachbehandlung** der Lasersinterteile aus dem **PA11-Werkstoff** an. Diese fallen unabhängig von der Wanddicke und Baurichtung gering aus. Mit einer leichten Reduzierung des Helligkeitswertes L^* hatte das chemische Glätten den größten Effekt.

Tabelle 5.9: Änderung der $L^*a^*b^*$ -Werte durch eine einstufige Nachbehandlung von 1 mm dicken PA11-Lasersinterteilen in Abhängigkeit von der Baurichtung, gemessen an der Oberseite.

1 mm Oberseite	L^*			a^*			b^*		
	s	l	d	s	l	d	s	l	d
Verdichtungsstrahlen	-0,1	-0,3	-0,9	-0,3	$\pm 0,0$	-0,1	-1,6	-1,6	+0,2
Gleitschleifen	+1,5	+1,1	-0,6	+0,1	+0,1	+1,0	-3,2	-2,9	+0,9
Chemisches Glätten	-3,6	-2,8	-4,4	-0,5	-0,1	-0,1	+3,0	-0,7	+0,9

Tabelle 5.10: Änderung der $L^*a^*b^*$ -Werte durch eine einstufige Nachbehandlung von 4 mm dicken PA11-Lasersinterteilen in Abhängigkeit von der Baurichtung, gemessen an der Oberseite.

4 mm Oberseite	L^*			a^*			b^*		
	s	l	d	s	l	d	s	l	d
Verdichtungsstrahlen	-1,0	-0,7	-5,2	-0,4	-0,1	-0,4	-1,1	-1,5	-0,8
Gleitschleifen	+0,6	+1,2	-4,6	-0,3	$\pm 0,0$	-0,2	-2,0	-2,8	-1,5
Chemisches Glätten	-7,1	-5,5	-8,8	-1,0	-0,8	-0,7	+0,6	-0,7	-1,2

Die an der Oberseite gemessenen Farbwerte der **unbehandelten Lasersinterteile** aus dem **glasgefüllten PA12-Werkstoff** sind in Abbildung 5.4 dargestellt. Da die Herstellung auf zwei unterschiedlichen Maschinen erfolgte, sind jeweils zwei Werte angegeben. Erneut stimmen die Helligkeitswerte L^* sowie die Farbwerte a^* und b^* jeweils gut für die verschiedenen Baurichtungen der Lasersinterteile überein und das Erscheinungsbild ist näherungsweise weiß. Die Wanddicken abhängigen Unterschiede sind, wie schon bei dem PA11-Werkstoff, der gewählten Messanordnung geschuldet. Insgesamt weisen alle aus dem glasgefüllten PA12-Werkstoff hergestellten Lasersinterteile vergleichbare $L^*a^*b^*$ -Werte auf.

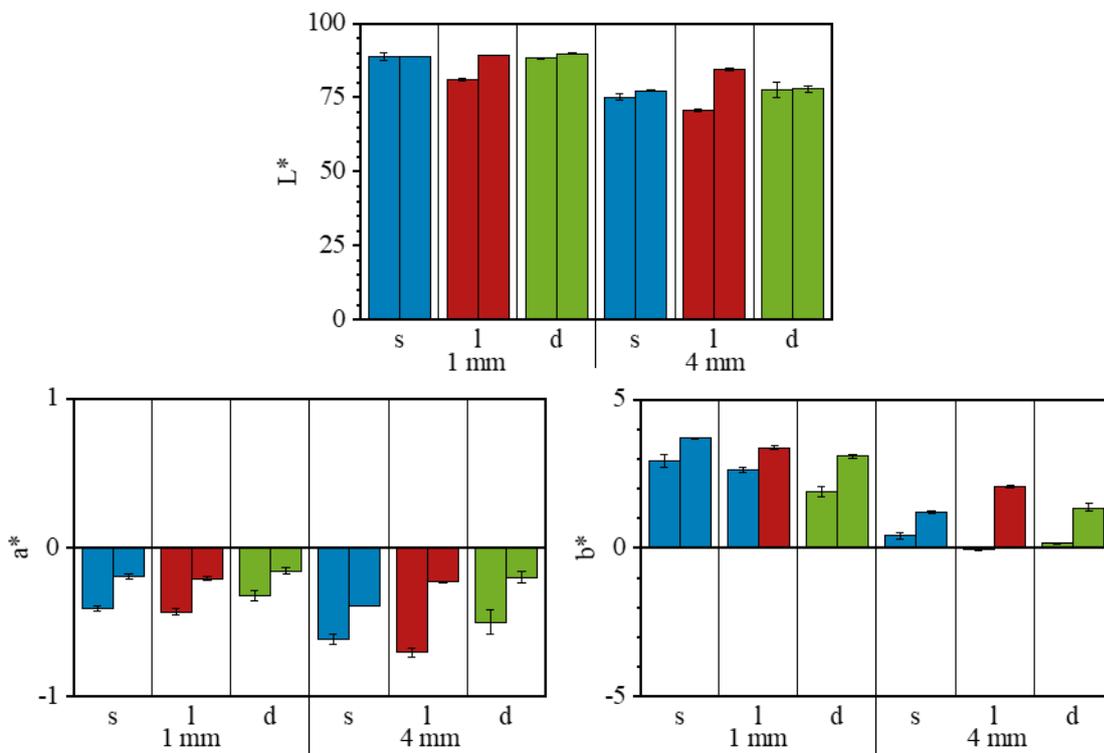


Abbildung 5.4: $L^*a^*b^*$ -Werte von glasgefüllten PA12-Lasersinterteilen in Abhängigkeit von der Baurichtung und Wanddicke, gemessen an der Oberseite.

Bei der **Nachbehandlung** der aus dem **glasgefüllten PA12-Werkstoff** hergestellten Lasersinterenteile wurden sowohl ein- als auch zwei- und dreistufige Verfahren realisiert. Die aus der Nachbehandlung resultierenden Veränderungen der Helligkeits- und Farbwerte sind als Differenz der Absolutwerte zwischen den an denselben Lasersinterenteilen nach und vor der Nachbehandlung ermittelten Messwerten in Tabelle 5.11 und Tabelle 5.12 angegeben. Mit Ausnahme der gewünschten Veränderung durch das Färben (schwarz) der Lasersinterenteile (deutliche Reduzierung des Helligkeitswertes L^*) beeinflussen die gewählten Nachbehandlungsverfahren die $L^*a^*b^*$ -Werte, unabhängig von der Baurichtung und Wanddicke, kaum.

Tabelle 5.11: Änderung der $L^*a^*b^*$ -Werte durch eine ein-, zwei- bzw. dreistufige Nachbehandlung von 1 mm dicken glasgefüllten PA12-Lasersinterenteilen in Abhängigkeit von der Baurichtung, gemessen an der Oberseite.

1 mm Oberseite	L^*			a^*			b^*		
	s	l	d	s	l	d	s	l	d
Verdichtungsstrahlen	-0,8	+0,4	-1,0	-0,1	-0,1	-0,1	+0,3	-0,2	+1,0
Verdichtungsstrahlen + Färben	-63,5	-65,8	-64,9	+0,3	+0,8	+0,5	-5,7	-4,3	-4,6
Verdichtungsstrahlen + Färben + Infiltrieren	-67,7	-67,1	-67,2	+0,7	+0,8	+0,7	-4,5	-4,2	-4,0
Gleitschleifen	+0,7	+2,0	±0,0	±0,0	+0,5	+0,8	+0,3	-0,3	+1,9
Chemisches Glätten	+0,2 +0,7	±0,0 +0,2	-0,8 -0,5	±0,0 +0,1	+0,1 +0,1	±0,0 +0,1	+0,7 +0,3	+0,2 +0,4	+1,2 +0,2

Tabelle 5.12: Änderung der $L^*a^*b^*$ -Werte durch eine ein-, zwei- bzw. dreistufige Nachbehandlung von 4 mm dicken glasgefüllten PA12-Lasersinterenteilen in Abhängigkeit von der Baurichtung, gemessen an der Oberseite.

4 mm Oberseite	L^*			a^*			b^*		
	s	l	d	s	l	d	s	l	d
Verdichtungsstrahlen	-0,3	+3,0	-3,2	-0,1	±0,0	-0,2	±0,0	+0,1	+0,2
Verdichtungsstrahlen + Färben	-49,8	-59,4	-49,0	+0,5	+0,8	+0,2	-3,7	-3,6	-4,0
Verdichtungsstrahlen + Färben + Infiltrieren	-55,5	-61,7	-53,8	+0,9	+1,0	+0,8	-2,2	-3,0	-2,6
Gleitschleifen	+2,5	+4,5	-1,8	-0,1	+0,2	-0,2	-0,2	+0,1	-0,1
Chemisches Glätten	-1,4 -0,5	+1,3 +0,9	-6,9 -3,9	-0,2 -0,1	+0,1 +0,1	-0,2 +0,1	+0,4 +0,4	+0,4 +0,3	+0,5 +0,7

5.1.2 Glanz

Die an der Ober- und Unterseite gemessenen die Glanzwerte der **unbehandelten Lasersinterenteile** aus dem **PA12-Musterwerkstoff** sind in Abbildung 5.5 dargestellt. Wie schon bei der Farbmessung (vgl. Kapitel 5.1.1) gehört jeder Balken zu einem Baujob bzw. zu einer zur Herstellung genutzten Maschine. Die Glanzwerte stimmen jeweils gut für die verschiedenen Baurichtungen, Ober- und Unterseite der Lasersinterenteile überein. Insgesamt weisen alle aus dem PA12-Musterwerkstoff hergestellten Lasersinterenteile, bedingt durch die verfahrenstypisch raue Oberfläche, einen geringen Glanz auf.

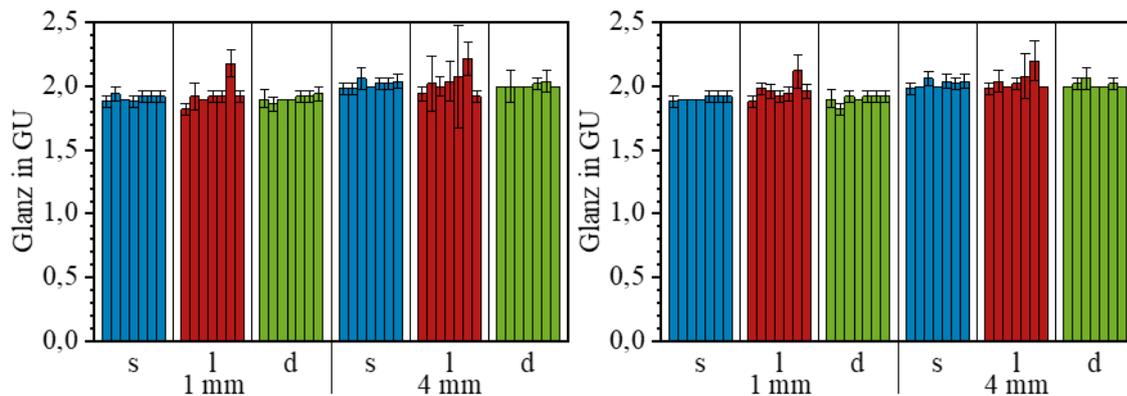


Abbildung 5.5: Glanz von PA12-Lasersinterenteilen in Abhängigkeit von der Baurichtung und Wanddicke, gemessen an der Oberseite (links) und der Unterseite (rechts).

Die Veränderung des Glanzes durch die **Nachbehandlung** der Lasersinterenteile aus dem **PA12-Musterwerkstoff** sind analog zu der Darstellung in Kapitel 5.1.1 als Veränderung der Absolutwerte in Tabelle 5.13 bis Tabelle 5.14 angegeben. Unabhängig von der Baurichtung und Wanddicke erhöhten die verschiedenen zum Glätten der Oberflächen genutzten Nachbehandlungsverfahren sowie das Infiltrieren den Glanz minimal. Beim chemischen Glätten war dieser Effekt am größten. Allerdings zeigen sich hier Unterschiede zwischen den verschiedenen Verfahrensvarianten. Sofern eine Glanzerhöhung das Ziel der Nachbehandlung darstellt (im Rahmen der durchgeführten Arbeiten nicht beabsichtigt), ist eine gezielte Verfahrensauswahl und-optimierung zu empfehlen. Dabei wären auch alternative Verfahren wie bspw. Lackieren oder Metallisieren in Betracht zu ziehen. Die dunkle Einfärbung reduziert sowohl bei ein- als auch bei zweistufiger Nachbehandlung den gemessenen Glanz etwas, wobei dunkle Farben tendenziell weniger reflektieren.

Aufgrund der guten Übereinstimmung der Resultate von Ober- und Unterseite bei den Lasersinterenteilen aus dem PA12-Musterwerkstoff wurden die weiteren Werkstoffe ausschließlich an der Oberseite hinsichtlich des Glanzes charakterisiert.

Tabelle 5.13: Änderung des Glanzes durch eine einstufige Nachbehandlung von 1 mm (links) und 4 mm (rechts) dicken PA12-Lasersinterteilen in Abhängigkeit von der Baurichtung, gemessen an der Oberseite (oben) und Unterseite (unten).

1 mm Oberseite		Glanz in GU			4 mm Oberseite		Glanz in GU		
		s	l	d			s	l	d
Verdichtungsstrahlen		+2,2	+2,4	+1,6	Verdichtungsstrahlen		+2,3	-2,4	+2,0
		+0,8	+0,7	+0,7			+0,6	+0,6	+0,6
Gleitschleifen		+1,0	+1,2	+1,2	Gleitschleifen		+1,3	+1,1	+1,6
		+0,5	+0,5	+0,3			+0,5	+0,4	+0,3
		+0,6	+0,3	+0,3			+0,8	+0,5	+0,4
Chemisches Glätten		+13,2	+11,0	+10,1	Chemisches Glätten		+11,2	+7,5	+10,4
		+2,4	+1,9	+1,3			+4,9	+2,8	+3,6
Laserglätten		+2,0	+3,0	+0,5	Laserglätten		+2,1	+2,7	+0,9
Färben		-1,8	-1,7	-1,7	Färben		-1,9	-1,8	-1,8
Infiltrieren		+0,6	+0,6	+0,7	Infiltrieren		+0,7	+0,6	+0,7

1 mm Unterseite		Glanz in GU			4 mm Unterseite		Glanz in GU		
		s	l	d			s	l	d
Verdichtungsstrahlen		+2,2	+2,3	-1,8	Verdichtungsstrahlen		+2,1	+2,3	+1,7
		+0,9	+0,6	+0,8			+0,8	+0,5	+0,7
Gleitschleifen		+1,0	+1,2	+1,1	Gleitschleifen		+1,5	+1,5	+1,6
		+0,5	+0,7	+0,6			+0,4	+0,5	+0,4
		+0,5	+0,3	+0,3			+0,7	+0,4	+0,4
Chemisches Glätten		+14,2	+20,2	+13,7	Chemisches Glätten		+8,9	+12,5	+12,3
		+2,4	+3,0	+2,3			+4,9	+3,1	+4,2
Laserglätten		+2,0	+3,6	+2,4	Laserglätten		+2,6	+3,0	+2,1
Färben		-1,8	-1,7	-1,7	Färben		-1,8	-1,9	-1,8
Infiltrieren		+0,5	+0,6	+0,8	Infiltrieren		+0,6	+0,7	+0,5

Tabelle 5.14: Änderung des Glanzes durch eine zweistufige Nachbehandlung von 1 mm (links) und 4 mm (rechts) dicken PA12-Lasersinterteilen in Abhängigkeit von der Baurichtung, gemessen an der Oberseite (oben) und Unterseite (unten).

1 mm Oberseite		Glanz			4 mm Oberseite		Glanz		
		s	l	d			s	l	d
Färben +	Verdichtungsstrahlen	-0,8	-0,4	-1,0	Färben +	Verdichtungsstrahlen	-0,2	±0,0	-0,4
	Gleitschleifen	-1,4	-1,1	-1,2		Gleitschleifen	-1,1	-1,1	-1,0
	Chemisches Glätten	+11,6	+10,5	+10,2		Chemisches Glätten	+8,7	+9,7	+8,6
	Infiltrieren	-1,1	-1,1	-1,3		Infiltrieren	-1,1	-0,8	-1,1

1 mm Unterseite		Glanz			4 mm Unterseite		Glanz		
		s	l	d			s	l	d
Färben +	Verdichtungsstrahlen	-0,6	-0,8	-0,4	Färben +	Verdichtungsstrahlen	-0,1	+0,1	-0,5
	Gleitschleifen	-1,3	-1,1	-1,1		Gleitschleifen	-1,1	-1,2	-0,8
	Chemisches Glätten	+11,6	+21,8	+12,3		Chemisches Glätten	+10,0	+15,3	+7,7
	Infiltrieren	-1,4	-0,9	-1,3		Infiltrieren	-1,1	-1,0	-1,2

In Abbildung 5.6 ist der an der Oberseite der Lasersinterteile gemessene Glanz der **unbehandelten Lasersinterteile** aus dem **PA11-Werkstoff** dargestellt. Unabhängig von der Baurichtung und Wanddicke stimmen die Werte auf niedrigem Niveau gut überein. Sie liegen in einer ähnlichen Größenordnung wie beim PA12-Musterwerkstoff; ein direkter Vergleich der Absolutwerte sollte aufgrund der Kennwertermittlung mit unterschiedlichen Messgeräten unterbleiben. Die durchgeführten **Nachbehandlungen** veränderten den Glanz nahezu nicht (vgl. Tabelle 5.15).

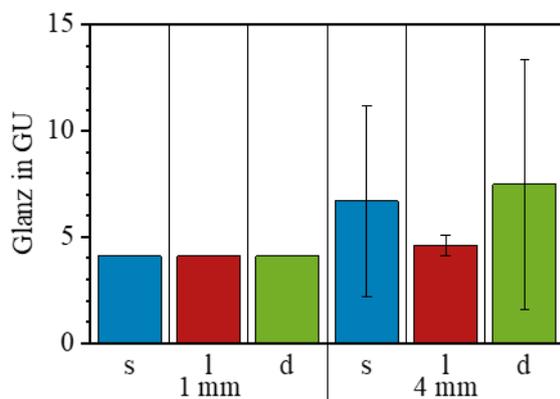


Abbildung 5.6: Glanz von PA11-Lasersinterteilen in Abhängigkeit von der Baurichtung und Wanddicke, gemessen an der Oberseite.

Tabelle 5.15: Änderung des Glanzes durch eine einstufige Nachbehandlung von 1 mm (links) und 4 mm (rechts) dicken PA11-Lasersinterteilen in Abhängigkeit von der Baurichtung, gemessen an der Oberseite.

1 mm Oberseite	Glanz			4 mm Oberseite	Glanz		
	s	l	d		s	l	d
Verdichtungsstrahlen	±0,0	±0,0	±0,0	Verdichtungsstrahlen	+0,1	±0,0	-0,8
Gleitschleifen	±0,0	±0,0	±0,0	Gleitschleifen	-0,1	-1,9	-4,0
Chemisches Glätten	±0,0	±0,0	-1,1	Chemisches Glätten	-0,5	+4,7	-0,8

Der Glanz, welcher an der Oberseite der **unbehandelten Lasersinterenteile** aus dem **glasgefüllten PA12-Werkstoff** mit demselben Messgerät wie beim PA11-Werkstoff ermittelt wurde, ist in Abbildung 5.7 dargestellt und liegt in derselben Größenordnung. Da die Herstellung auf zwei unterschiedlichen Maschinen erfolgte, sind jeweils zwei Werte angegeben. Eine signifikante Veränderung konnte nur für eine Verfahrensvariante der **Nachbehandlung** mittels chemischen Glättens beobachtet werden (vgl. Tabelle 5.16). In allen anderen Fällen blieb der Glanz von der Nachbehandlung nahezu unbeeinflusst.

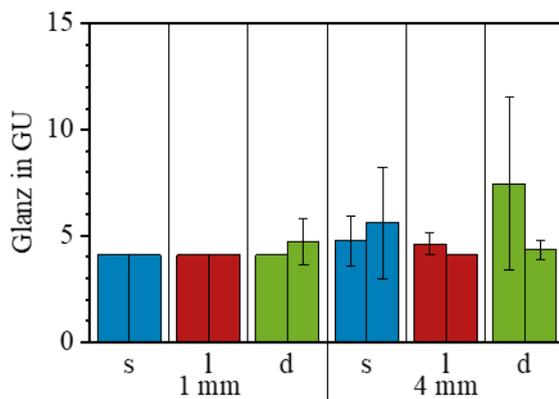


Abbildung 5.7: Glanz von glasgefüllten PA12-Lasersinterenteilen in Abhängigkeit von der Baurichtung und Wanddicke, gemessen an der Oberseite.

Tabelle 5.16: Änderung des Glanzes durch eine ein-, zwei- bzw. dreistufige Nachbehandlung von 1 mm (links) und 4 mm (rechts) dicken glasgefüllten PA12-Lasersinterenteilen in Abhängigkeit von der Baurichtung, gemessen an der Oberseite.

1 mm Oberseite	Glanz			4 mm Oberseite	Glanz		
	s	l	d		s	l	d
Verdichtungsstrahlen	±0,0	±0,0	±0,0	Verdichtungsstrahlen	-3,4	+0,8	±0,0
Verdichtungsstrahlen + Färben	±0,0	+0,8	+0,5	Verdichtungsstrahlen + Färben	-3,7	+1,0	+0,5
Verdichtungsstrahlen + Färben + Infiltrieren	±0,0	±0,0	±0,0	Verdichtungsstrahlen + Färben + Infiltrieren	-2,7	±0,0	-3,0
Gleitschleifen	±0,0	±0,0	+0,6	Gleitschleifen	+2,9	-1,6	-2,1
Chemisches Glätten	±0,0	±0,0	-0,1	Chemisches Glätten	-0,1	±0,0	-3,2
	+16,8	+22,2	+22,1		+11,4	+18,5	+8,4

5.2 Mechanische Eigenschaften in Abhängigkeit von der Baurichtung, Wanddicke und Nachbehandlung

In Abbildung 5.8 ist das Spannungs-Dehnungs-Verhalten der Lasersinterenteile aus dem **PA12-Musterwerkstoff** ohne Nachbehandlung unter Zugbeanspruchung exemplarisch dargestellt. Bei den 1 mm dicken Lasersinterenteilen (links) ist ein deutlicher Einfluss der Baurichtung zu erkennen: So erreichten die liegend gebauten Lasersinterenteile die höchsten Spannungs- und Dehnungswerte. Diese nahmen für die stehend und diagonal gefertigten Lasersinterenteile ab. Während bei den stehend gefertigten Lasersinterenteilen die Beanspruchung des Schichtverbundes für die Abnahme ursächlich war, kam bei den diagonal gefertigten Lasersinterenteilen zusätzlich die Auswirkung des Treppenstufeneffektes hinzu. Insgesamt zeigte sich die für Lasersinterenteile typische Baurichtungsabhängigkeit des mechanischen Verhaltens unter Zugbeanspruchung (vgl. Kapitel 2.2). Die 4 mm dicken Lasersinterenteile zeigten ähnliche Abhängigkeiten, wobei sich das Verhalten der stehend und diagonal gefertigten Teile kaum unterschied und die erreichten Spannungs- und Dehnungswerte grundsätzlich etwas höher als bei den 1 mm dicken Lasersinterenteilen waren. Ausgehend von der Annahme, dass die verfahrensbedingten porösen Strukturen sowie lokalen Defekte unabhängig von der Wanddicke in einer ähnlichen Größenordnung liegen, wirken sich diese bei geringerer Wanddicke stärker auf die Gesamteigenschaften aus. Hierbei ist entscheidend, dass beim mechanischen Verhalten stets die schwächste Stelle das Versagen bestimmt. Auch der Treppenstufeneffekt wirkt sich dementsprechend bei geringeren Wanddicken stärker aus. Zur quantitativen Betrachtung des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens unter Zugbeanspruchung wurden die Festigkeit und Zähigkeit als charakteristische Kennwerte bestimmt – sie werden in den Kapiteln 5.2.1 und 5.2.2 diskutiert.

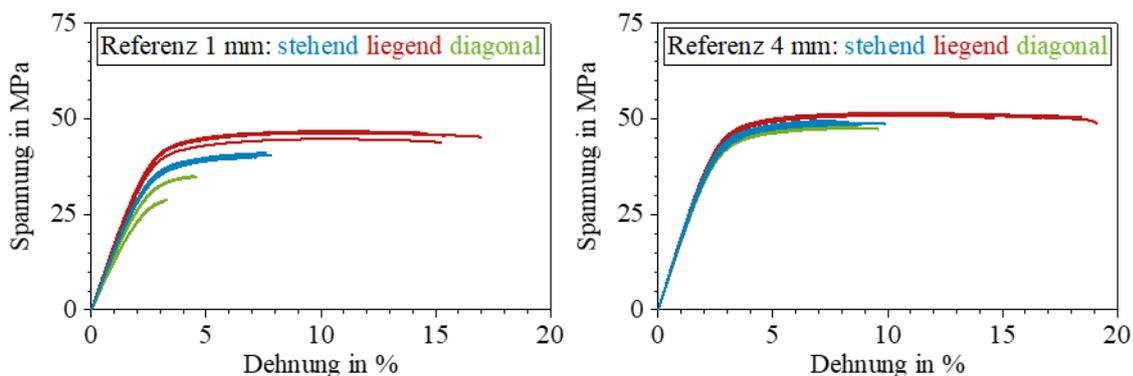


Abbildung 5.8: Mechanisches Verhalten unter statischer Zugbeanspruchung von 1 mm (links) und 4 mm (rechts) dicken PA12-Lasersinterenteilen in Abhängigkeit von der Baurichtung.

Ähnliche Effekte wurden auch für die Lasersintererteile aus dem **PA11-Werkstoff** beobachtet. Wie Abbildung 5.9 zeigt, wurden dabei werkstoffbedingt höhere Dehnungswerte als bei PA12 erreicht. Zudem deutete sich eine Streckgrenze an.

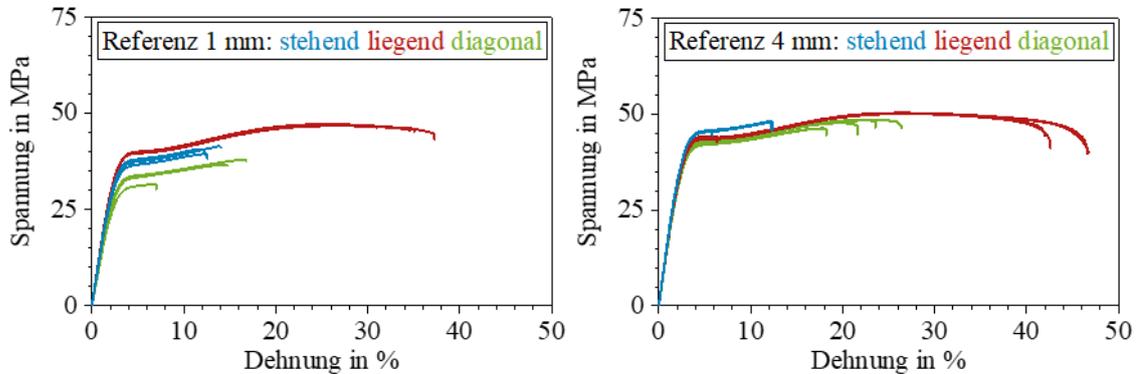


Abbildung 5.9: Mechanisches Verhalten unter statischer Zugbeanspruchung von 1 mm (links) und 4 mm (rechts) dicken PA11-Lasersintererteilen in Abhängigkeit von der Baurichtung.

Der Füllstoff führte bei den Lasersintererteilen aus dem **glasgefüllten PA12-Werkstoff** zu einer deutlichen Abnahme der Bruchdehnung und einem stärkeren Einfluss der Wanddicke auf die erreichbare Maximalspannung (vgl. Abbildung 5.10). Der Vergleich von Abbildung 5.10 oben und unten zeigt, dass neben dem Werkstoff und der Baurichtung auch die verwendeten Maschinen(parameter) das mechanische Verhalten beeinflussen.

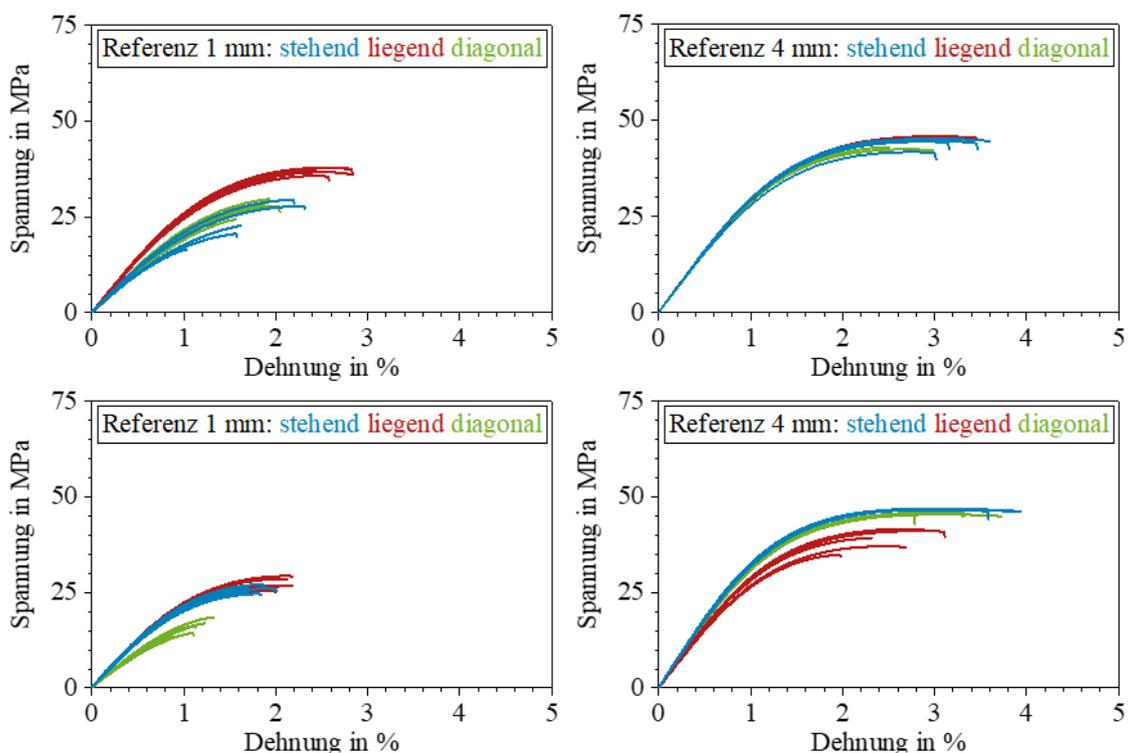


Abbildung 5.10: Mechanisches Verhalten unter statischer Zugbeanspruchung von 1 mm (links) und 4 mm (rechts) dicken glasgefüllten PA12-Lasersintererteilen in Abhängigkeit von der Baurichtung; gefertigt auf zwei unterschiedlichen Maschinen (oben/unten).

5.2.1 Festigkeit

Die in den Zugversuchen ermittelte Festigkeit der **unbehandelten Lasersintererteile** aus dem **PA12-Musterwerkstoff** sind abhängig von der Wanddicke und Baurichtung in Abbildung 5.11 dargestellt. Dabei ist für jede der sieben zur Herstellung eingesetzten Maschinen der Mittelwert als Symbol, das 0%/100%-Perzentil als Box sowie die Standardabweichung als Balken aufgetragen. Sowohl für die 1 mm dicken wie auch für die 4 mm dicken Lasersintererteile zeigte sich ein deutlicher Einfluss der Baurichtung. So ist die Zugfestigkeit der liegend gebauten und daher in der Schichtebene beanspruchten Lasersintererteile am größten – sie liegt in der Größenordnung der Werkstofffestigkeit. Die demgegenüber niedrigere Schichthaftungsfestigkeit wird bei der Prüfung der stehend gebauten Lasersintererteile erfasst. Der zusätzlich wirkende Treppenstufeneffekt führte bei den diagonal gefertigten Teilen zu einer weiteren Reduktion der Zugfestigkeit. Die bereits zu Beginn von Kapitel 5.2 erläuterte Relevanz lokaler Defekte führte zu einer deutlich stärkeren Baurichtungsabhängigkeit der Zugfestigkeit der 1 mm dicken Lasersintererteile verglichen mit den 4 mm dicken Lasersintererteilen. Zum anderen führt sie zu einer deutlich größeren Streuung der Messwerte bei den stehend und liegende gebauten 1 mm dicken Lasersintererteilen. Dies gilt sowohl für die Streuung der auf derselben Maschine im selben Baujob gefertigten Lasersintererteile (vgl. Streubalken und Perzentile in Abbildung 5.11) als auch für die Abweichungen zwischen auf verschiedenen Maschinen gefertigten Lasersintererteilen (vgl. Unterschiede der Mittelwerte). Insgesamt stimmten die erreichten Zugfestigkeitswerte maschinen- und baujobunabhängig, insbesondere bei den 4 mm dicken Lasersintererteilen, gut überein. Dabei erzielten die mit 100 μm statt 120 μm Schichtdicke gefertigten Lasersintererteile tendenziell etwas höhere Werte bei etwas geringerer Streuung, was mit einem besseren Wärmeeintrag und somit besseren Schichtenhaftung plausibel erscheint.

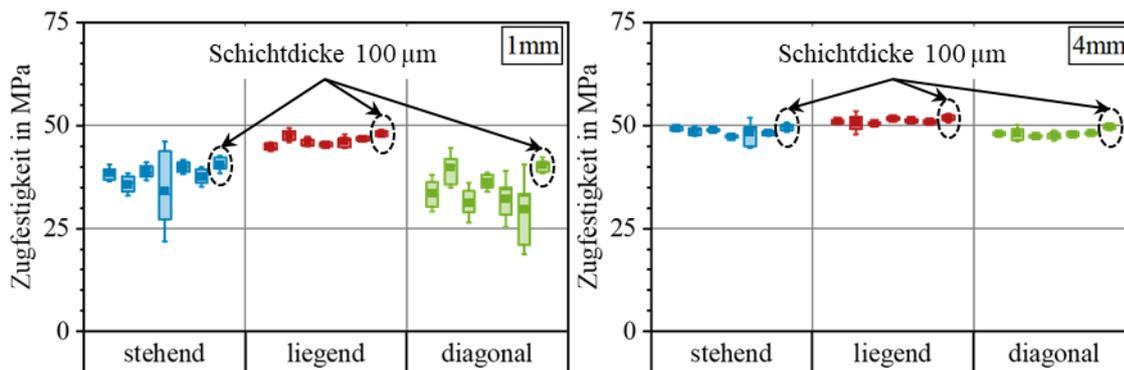


Abbildung 5.11: Zugfestigkeit von 1 mm (links) und 4 mm (rechts) dicken PA12-Lasersintererteilen in Abhängigkeit von der Baurichtung.

Zur Diskussion der Auswirkungen der **einstufigen Nachbehandlung** der **PA12-Lasersinterterteile**, wurden in Abbildung 5.12 und Abbildung 5.13 die in uniaxialen Zugversuchen ermittelten Festigkeiten vor der Nachbehandlung (Referenz, grau) und nach der Nachbehandlung (farbig) nebeneinander aufgetragen, welche im selben Baujob auf derselben Maschine gefertigt wurden. Sofern pro Baurichtung mehrere, durch gestrichelte Linien getrennte Werte zu sehen sind, wurden Lasersinterterteile aus verschiedenen Baujobs der entsprechenden Nachbehandlung unterzogen, bspw. erfolgte das Verdichtungsstrahlen in zwei Fällen und das Gleitschleifen in dreien.

Die zur Erzielung einer glatteren Oberfläche eingesetzten Nachbehandlungsverfahren Verdichtungsstrahlen, Gleitschleifen und chemisches Glätten (vgl. Abbildung 5.12) erhöhten tendenziell die Zugfestigkeit. Dabei erzielte das chemische Glätten den größten Effekt. Insbesondere bei den 1 mm dicken Lasersinterterteilen wurden deutlich höhere Zugfestigkeiten erreicht, wobei auch der Einfluss der Baurichtung abnahm. Bezogen auf die Absolutwerte sind die Änderungen bei den 4 mm dicken Lasersinterterteilen nahezu vernachlässigbar, was sich mit dem geringeren Anteil der Randschichten an dem mechanisch beanspruchten Gesamtquerschnitt erklären lässt. Beim Infiltrieren (Abbildung 5.12 unten) und Färben (Abbildung 5.13 unten) veränderte die Nachbehandlung die Zugfestigkeit hingegen kaum. Da diese Verfahren nicht auf eine Veränderung der Oberflächenrauheit abzielen, erscheint dies plausibel. Überraschend ist hingegen, dass auch das Laserglätten (Abbildung 5.13 oben) nahezu keine Veränderung der Zugfestigkeit bewirkte. Dies könnte einerseits mit der fehlenden Glättung der schmalen Kanten zusammenhängen, welche mit Blick auf typische Mechanismen unter Zugbeanspruchung ungünstig ist. So erfolgt i. A. sowohl der Beginn einer Rissbildung bei sprödem Versagen als auch eine Einschnürung bei duktileren Werkstoffen ausgehend von den Außenkanten. Andererseits wurden für das Laserglätten Lasersinterterteile mit einer Schichtdicke von 100 μm verwendet. Diese weisen bereits initial, d. h. im unbehandelten Zustand (vgl. Werte der Referenz), höhere Zugfestigkeitswerte bei geringerer Streuung auf, sodass das Verbesserungspotenzial durch die Nachbehandlung geringer ist.

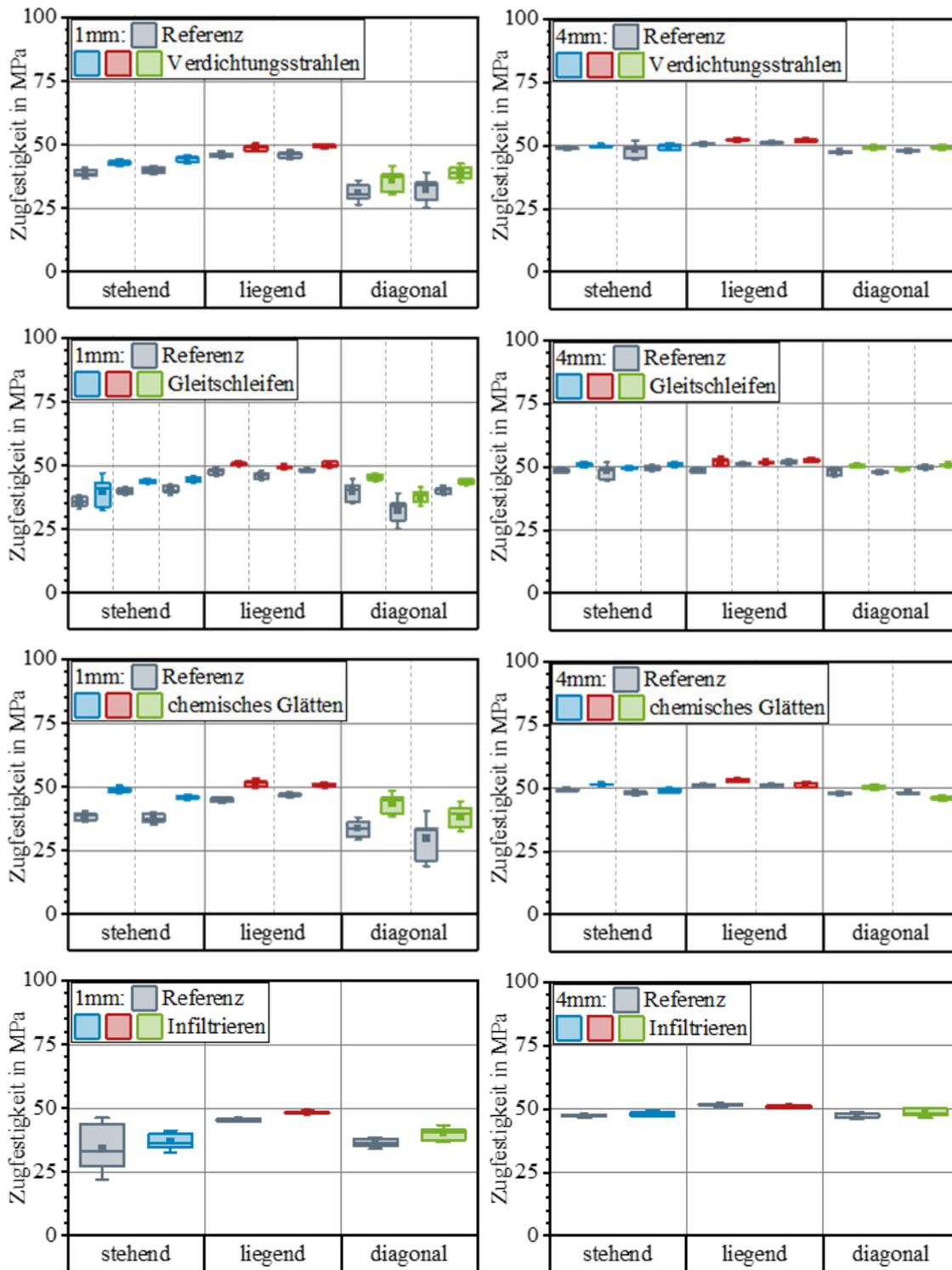


Abbildung 5.12: Zugfestigkeit von 1 mm (links) und 4 mm (rechts) dicken PA12-Lasersinterteilen vor und nach einstufiger Nachbehandlung (Verdichtungsstrahlen/Gleitschleifen/chemisches Glätten/Infiltrieren) in Abhängigkeit von der Baurichtung.

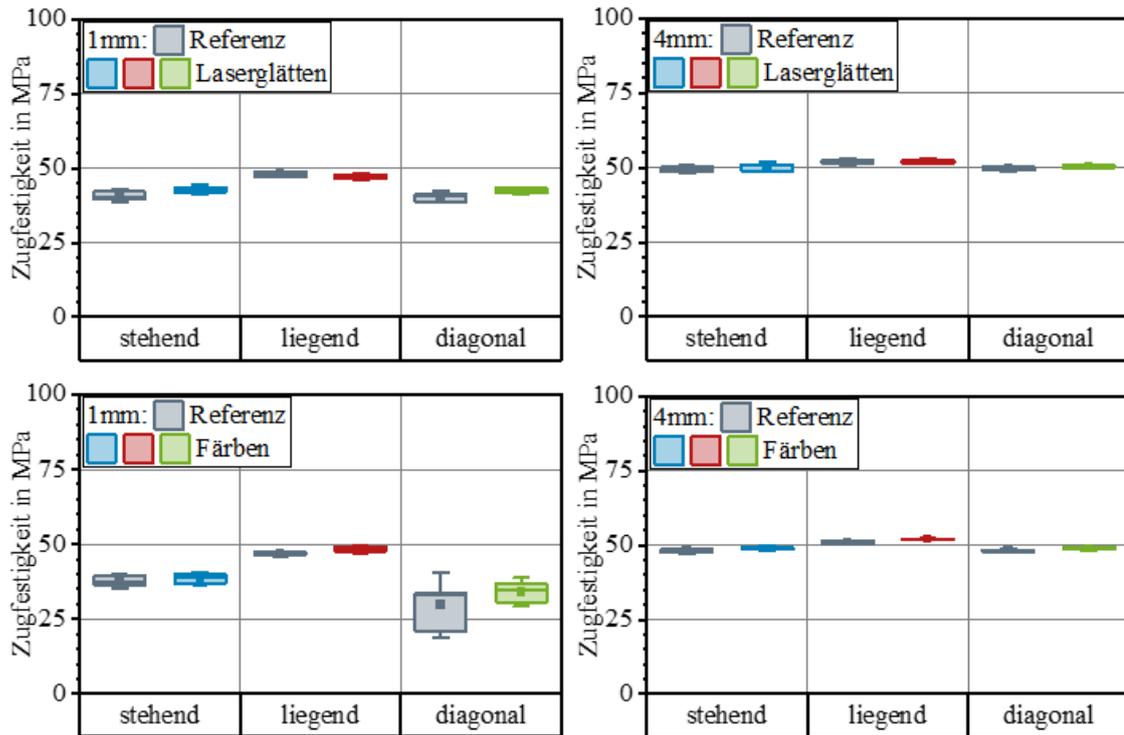


Abbildung 5.13: Zugfestigkeit von 1 mm (links) und 4 mm (rechts) dicken PA12-Lasersinterterteilen vor und nach einstufiger Nachbehandlung (Laserglätten/Färben) in Abhängigkeit von der Baurichtung.

Für die in Abbildung 5.12 aufgeführten Nachbehandlungsverfahren wurde zudem eine **zweistufige Nachbehandlung** der **PA12-Lasersinterterteile** realisiert (vgl. Kapitel 4.2), indem Lasersinterterteile je eines Baujobs (bei jeder Baurichtung und Wanddicke in der linken Spalte dargestellt) zusätzlich auch noch eingefärbt wurden. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5.14 analog zu Abbildung 5.12 dargestellt. Deren Vergleich zeigt, dass die Veränderungen im Fall der ein- und zweistufig nachbehandelten Lasersinterterteile nahezu identisch sind. Dementsprechend wurde die Zugfestigkeit durch das Färben bei der zweistufigen Nachbehandlung, unabhängig von dem jeweils anderen eingesetzten Nachbehandlungsverfahren, nicht verändert. Dies ist konsistent mit der Beobachtung, dass auch alleiniges Färben (vgl. Abbildung 5.13 unten) kaum Einfluss auf die ermittelte Zugfestigkeit der PA12-Lasersinterterteile hatte.

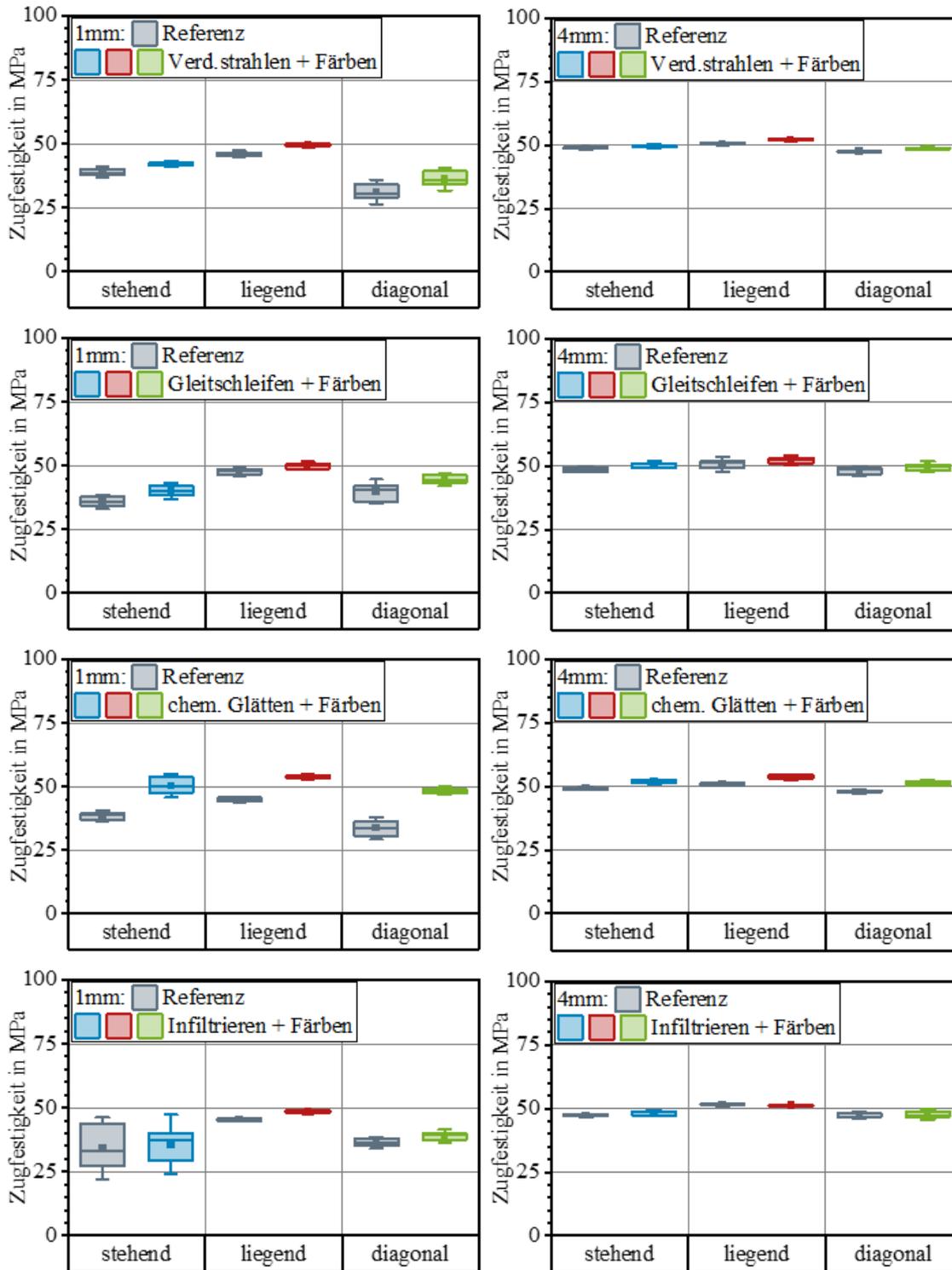


Abbildung 5.14: Zugfestigkeit von 1 mm (links) und 4 mm (rechts) dicken PA12-Lasersinter-
teilen vor und nach zweistufiger Nachbehandlung (Verdichtungsstrahlen/
Gleitschleifen/chemisches Glätten/Infiltrieren + Färben) in Abhängigkeit von
der Baurichtung.

In Abbildung 5.15 ist die Zugfestigkeit der Lasersinterterteile aus dem **PA11-Werkstoff** vor (Referenz, grau) und nach der Nachbehandlung abhängig von der Baurichtung und Wanddicke dargestellt. Wie schon bei dem PA12-Musterwerkstoff zeigten dabei die liegend gefertigten Lasersinterterteile die höchste Zugfestigkeit, gefolgt von den stehend und diagonal gebauten. Ebenfalls analog fielen die Werte der 4 mm dicken Lasersinterterteile größer aus als die der 1 mm dicken Lasersinterterteile. Dabei ist von denselben, aus dem Lasersintern resultierende Ursachen auszugehen. Für die PA11-Lasersinterterteile wurden ausschließlich Nachbehandlungsverfahren betrachtet, welche die verfahrenstypische Oberflächenrauheit reduzieren sollten. Während diese die Zugfestigkeit der 1 mm dicken Lasersinterterteile tendenziell verbesserten und den Werten der 4 mm dicken Lasersinterterteile, außer bei der diagonalen Fertigung, angleichen konnten, lagen die Änderungen bei den 4 mm dicken Lasersinterterteilen in einer vernachlässigbaren Größenordnung.

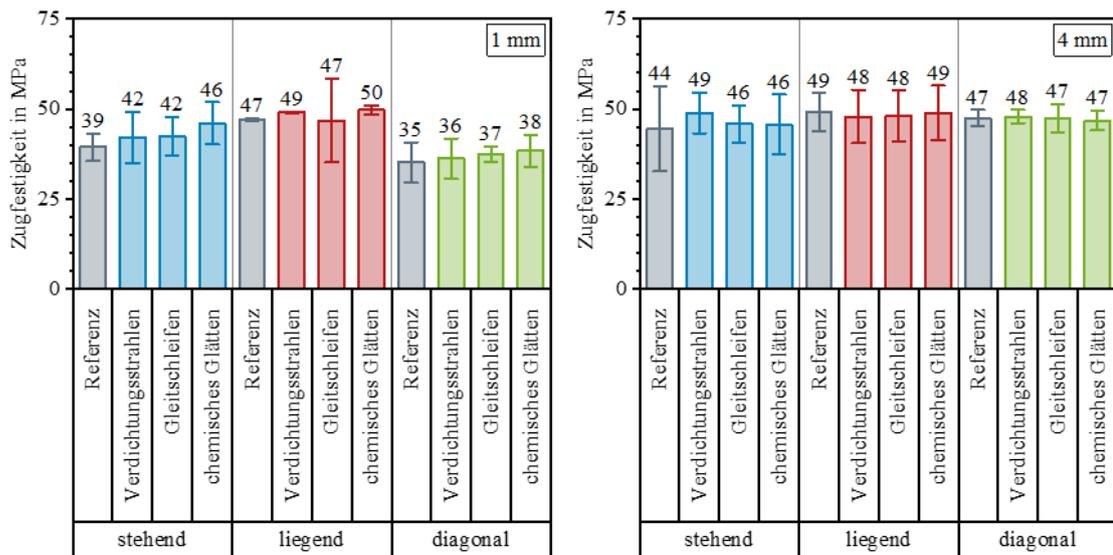


Abbildung 5.15: Zugfestigkeit von 1 mm (links) und 4 mm (rechts) dicken PA11-Lasersinterterteilen vor und nach einstufiger Nachbehandlung in Abhängigkeit von der Baurichtung.

Dieselben Nachbehandlungsverfahren wie bei den PA11-Lasersinterteilen wurden auch für die Nachbehandlung der Lasersinterteile aus dem **glasgefüllten PA12-Werkstoff** angewandt. Die resultierenden Zugfestigkeiten sind in Abbildung 5.16 dargestellt. Erneut zeigte sich für die 1 mm dicken Lasersinterteile die verfahrensbedingte Baurichtungsabhängigkeit der Zugfestigkeit. Diese konnte durch die Nachbehandlungen leicht erhöht werden. Eine Ursache für die Abweichung im Fall der stehend gebauten und chemisch geglätteten Lasersinterteile wurde nicht gefunden. Die Zugfestigkeit der 4 mm dicken Lasersinterteile unterschied sich vor und nach den Nachbehandlungen sowie für die verschiedenen Baurichtungen nahezu nicht.

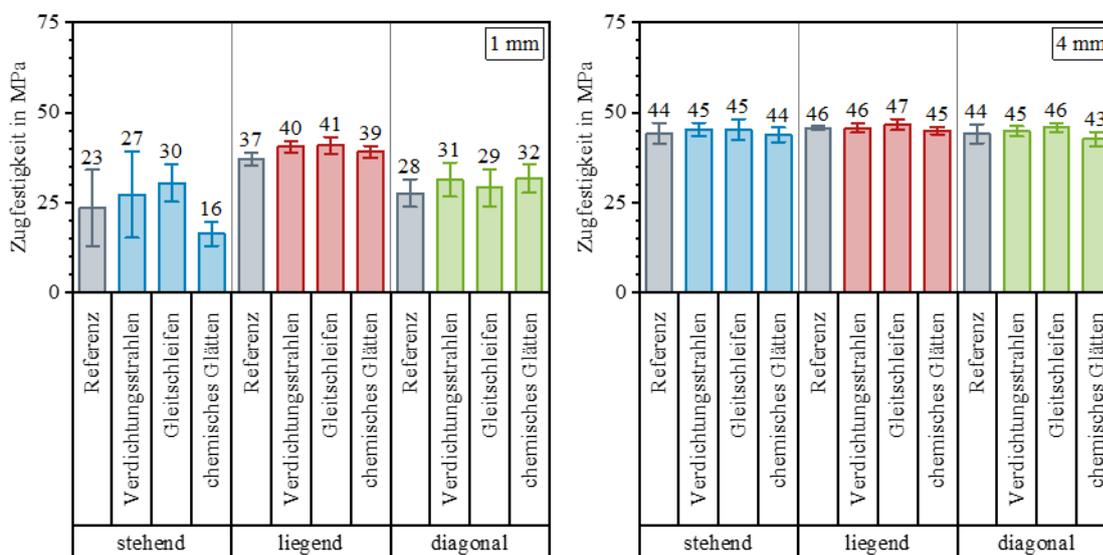


Abbildung 5.16: Zugfestigkeit von 1 mm (links) und 4 mm (rechts) dicken glasgefüllten PA12-Lasersinterteilen vor und nach einstufiger Nachbehandlung in Abhängigkeit von der Baurichtung.

Zusätzlich wurden auch mehrstufige Nachbehandlungen an glasgefüllten PA12-Lasersinterteilen durchgeführt (Resultate Abbildung 5.17). Die hierfür verwendeten Lasersinterteile wurden auf einer anderen Maschine gefertigt (vgl. Kapitel 4.2). Für die 1 mm dicken Lasersinterteile wurde eine deutliche Baurichtungsabhängigkeit festgestellt. Im Unterschied zu den zuvor gezeigten Ergebnissen (Abbildung 5.16) verbesserte sich die Zugfestigkeit durch die chemische Nachbehandlung deutlich. Dies ist kein unmittelbarer Widerspruch zu den zuvor diskutierten Ergebnissen, da sich die zur Nachbehandlung eingesetzten Verfahren unterschieden. Hiermit wird deutlich, wieviel Einfluss die Verfahrens(parameter)wahl haben kann – eine Überprüfung für den jeweiligen Anwendungsfall erscheint daher sinnvoll und notwendig. Die Nachbehandlung der 4 mm dicken glasgefüllten PA12-Lasersinterteile hatte, wie schon bei den zuvor diskutierten anderen

Werkstoffen, nahezu keinen Einfluss – daran änderte auch die mehrstufige Nachbehandlung nichts. Die zusehende Baurichtungsabhängigkeit hingegen widerspricht den übrigen Ergebnissen. Auffällig war, dass die liegend gebauten Lasersinterterte heller als die stehend und diagonal gebauten erscheinen (Abbildung 5.18, vgl. auch Kapitel 5.1.1). Unter der Annahme, dass eine dunklere Farbe auf eine höhere Temperatur des Schmelzebads hindeutet, wäre eine höhere Zugfestigkeit der dunkleren Lasersinterterte plausibel. Allerdings könnten auch unterschiedliche Materialchargen, verschiedene Auffrischraten bzw. thermische Vorgeschichte des Altpulveranteils etc. diese Phänomene erklären. Eine eindeutige Ursache konnte nicht identifiziert werden. Für die Praxis zeigt dieses überraschende Ergebnis, dass (zumindest mittels Stichproben) eine Überprüfung der mechanischen Eigenschaften erfolgen sollte, sofern diese für die Anwendung der Lasersinterterte relevant sind.

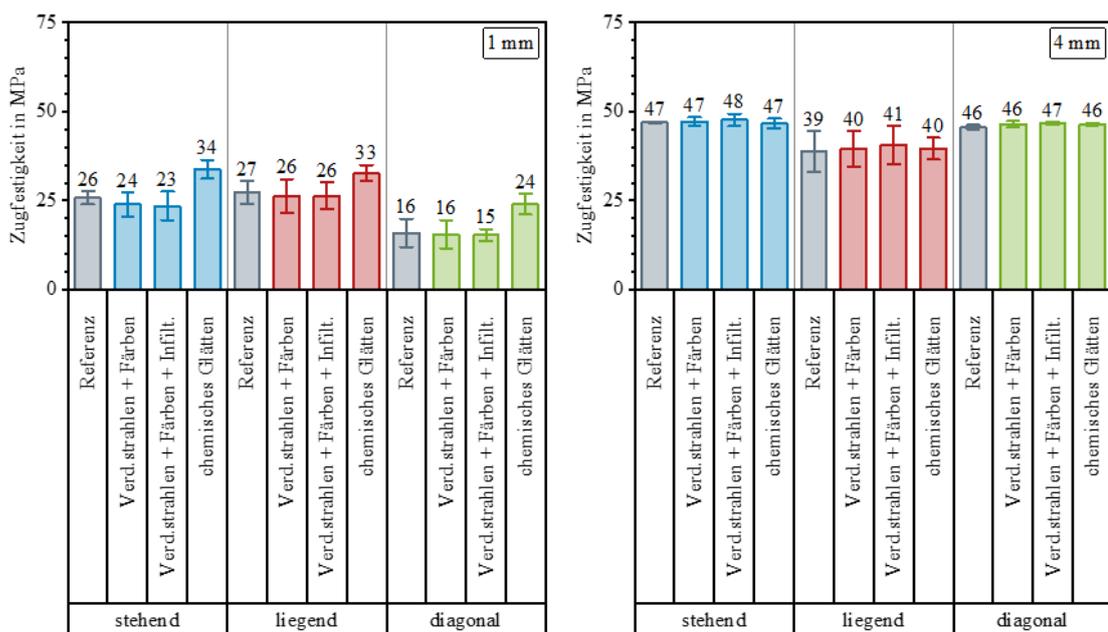


Abbildung 5.17: Zugfestigkeit von 1 mm (links) und 4 mm (rechts) dicken glasgefüllten PA12-Lasersinterterten vor und nach ein-, zwei- bzw. dreistufiger Nachbehandlung in Abhängigkeit von der Baurichtung.

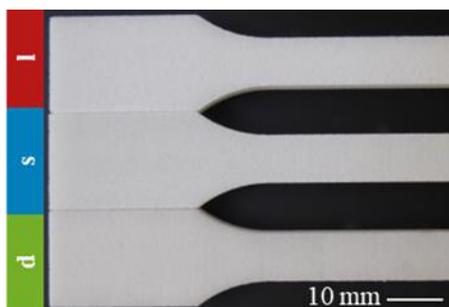


Abbildung 5.18: Foto von 4 mm dicken unbehandelten glasgefüllten PA12-Lasersinterterten in Abhängigkeit von der Baurichtung.

5.2.2 Zähigkeit

Die in den Zugversuchen ermittelte Bruchdehnung als Maß für die Zähigkeit der **unbehandelten Lasersinterterile** aus dem **PA12-Musterwerkstoff** ist abhängig von der Wanddicke und Baurichtung in Abbildung 5.19 dargestellt. Wie bei der Zugfestigkeit wurde für jede der sieben zur Herstellung eingesetzten Maschinen der Mittelwert als Symbol (Quadrat), die Median-Linie, das 0%/100%-Perzentil als Box sowie die Standardabweichung als Balken aufgetragen. Sowohl für die 1 mm dicken wie auch für die 4 mm dicken Lasersinterterile zeigte sich ein deutlicher Einfluss der Baurichtung. So ist die Bruchdehnung der liegend gebauten und daher in der Schichtebene beanspruchten Lasersinterterile am größten. Die Beanspruchung in Richtung des Schichtaufbaus bei den stehend und diagonal gebauten Lasersinterterilen führt zu einem früheren Versagen und somit auch einer geringeren Bruchdehnung. In diesen Fällen führte die Herstellung mit geringerer Schichtdicke zu höheren Bruchdehnungen, sodass erneut eine bessere Schichthaftung als Ursache angenommen werden kann (vgl. Kapitel 5.2.1). Unter Berücksichtigung der starken Streuung der Messwerte stimmten die Resultate maschinen- und baujobunabhängig gut überein. Die 4 mm dicken PA12-Lasersinterterile weisen dabei grundsätzlich höhere Bruchdehnungen auf. Dies ist mit der eingangs von Kapitel 5.2 erläuterten Relevanz lokaler Defekte erklärbar, da diese bei gleicher Größe umso eher zum Versagen führen, je geringer die Wanddicke ist.

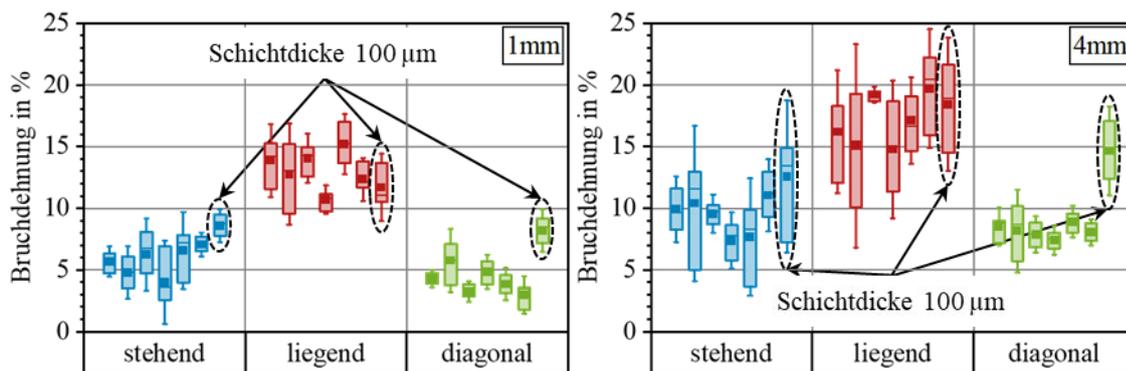


Abbildung 5.19: Bruchdehnung von 1 mm (links) und 4 mm (rechts) dicken PA12-Lasersinterterilen in Abhängigkeit von der Baurichtung.

Zur Diskussion der Auswirkungen der **einstufigen Nachbehandlung** der **PA12-Lasersinterterile** auf die Zähigkeit, wurden in Abbildung 5.19 und Abbildung 5.20 die in uniaxialen Zugversuchen ermittelten Bruchdehnungen vor der Nachbehandlung (Referenz, grau) und nach der Nachbehandlung (farbig), analog zu der Darstellung für die Zugfestigkeit in Kapitel 5.2.1, nebeneinander aufgetragen.

Im untersuchten Rahmen hatte die einstufige Nachbehandlung, unabhängig von der Baurichtung und Wanddicke, kaum Einfluss auf die Bruchdehnung. Auch das spröde Versagensverhalten wurde nicht verändert.

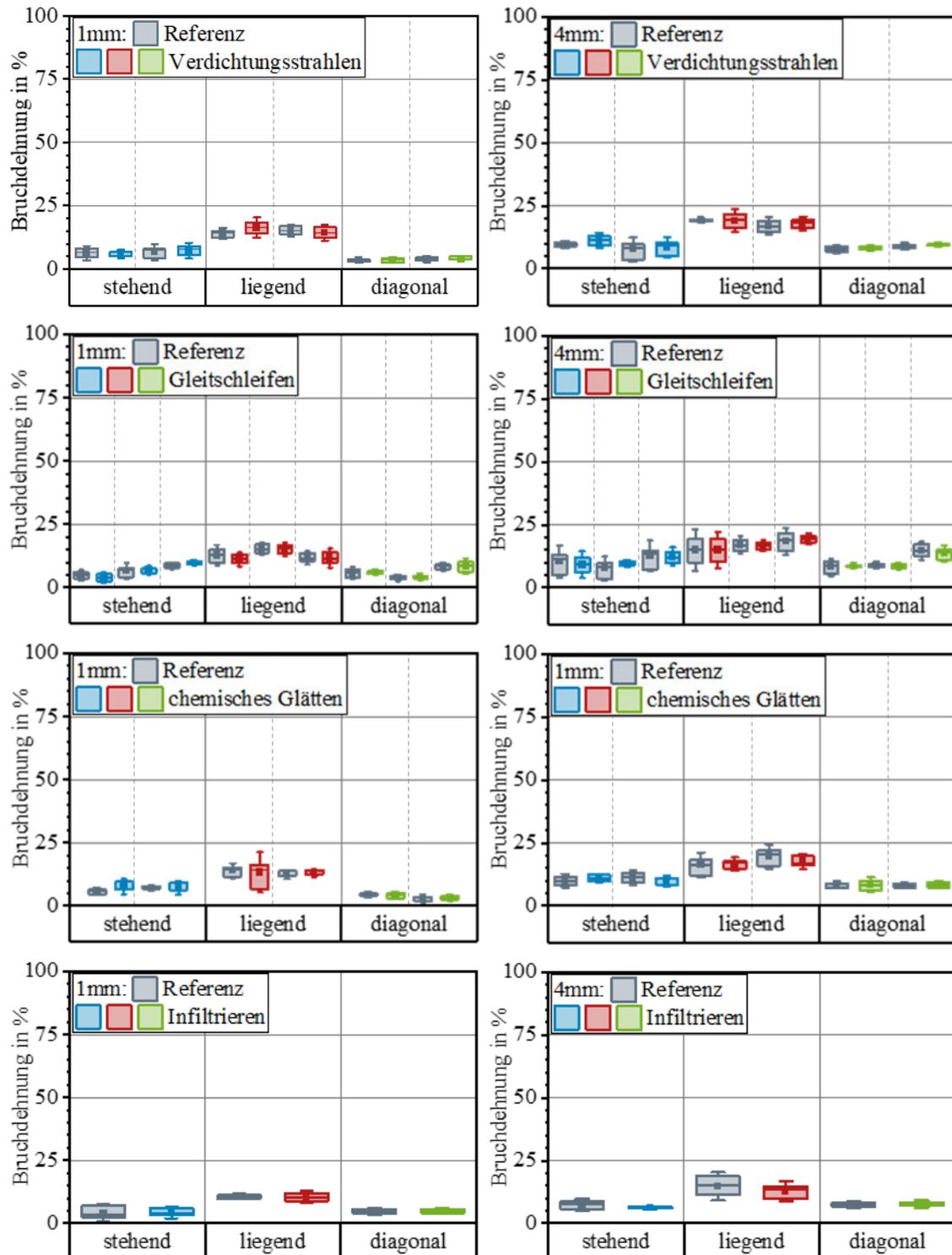


Abbildung 5.20: Bruchdehnung von 1 mm (links) und 4 mm (rechts) dicken PA12-Lasersinterteilen vor und nach einstufiger Nachbehandlung (Verdichtungsstrahlen/Gleitschleifen/chemisches Glätten/Infiltrieren) in Abhängigkeit von der Baurichtung.

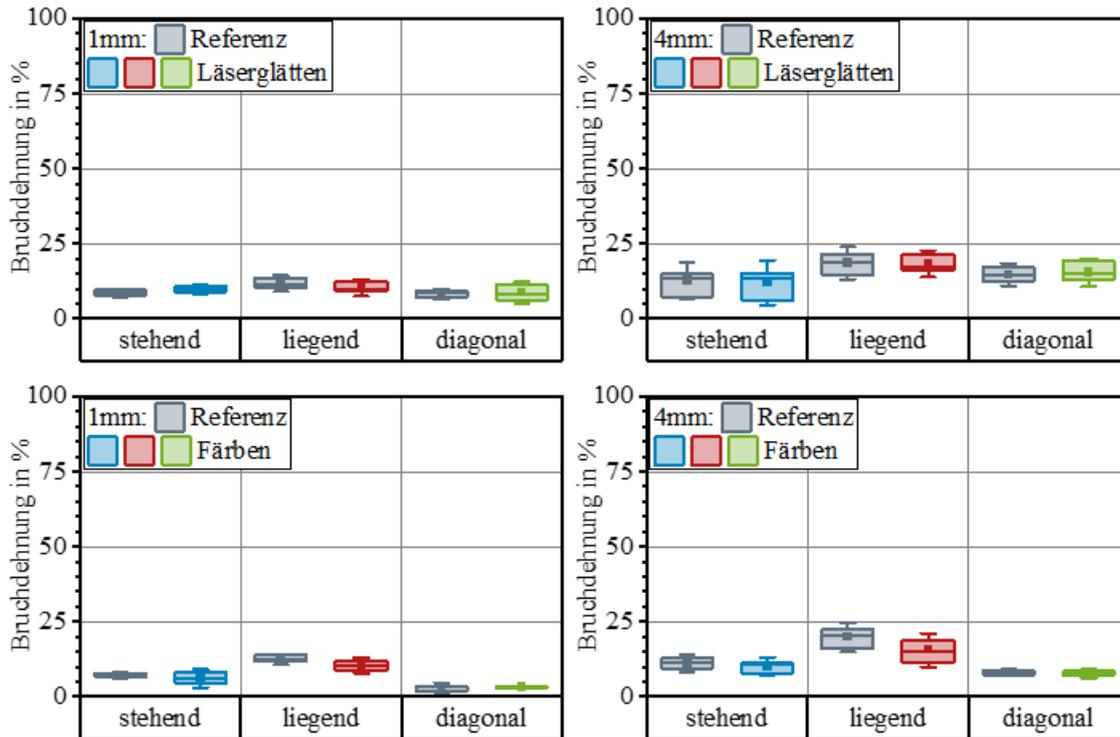


Abbildung 5.21: Bruchdehnung von 1 mm (links) und 4 mm (rechts) dicken PA12-Lasersinter-teilen vor und nach einstufiger Nachbehandlung (Laserglätten/Färben) in Abhängigkeit von der Baurichtung.

Für die in Abbildung 5.20 aufgeführten Nachbehandlungsverfahren sind die Resultate bei **zweistufiger Nachbehandlung** der **PA12-Lasersinter-teile** in Abbildung 5.22 dargestellt. Im Vergleich wird deutlich, dass auch das zusätzliche Färben die Bruchdehnung kaum verändert. Dies ist passt zu den Resultaten der einstufigen Nachbehandlungen, bei denen Färben ebenfalls kaum Einfluss auf die ermittelte Bruchdehnung der PA12-Lasersinter-teile hatte (vgl. Abbildung 5.20).

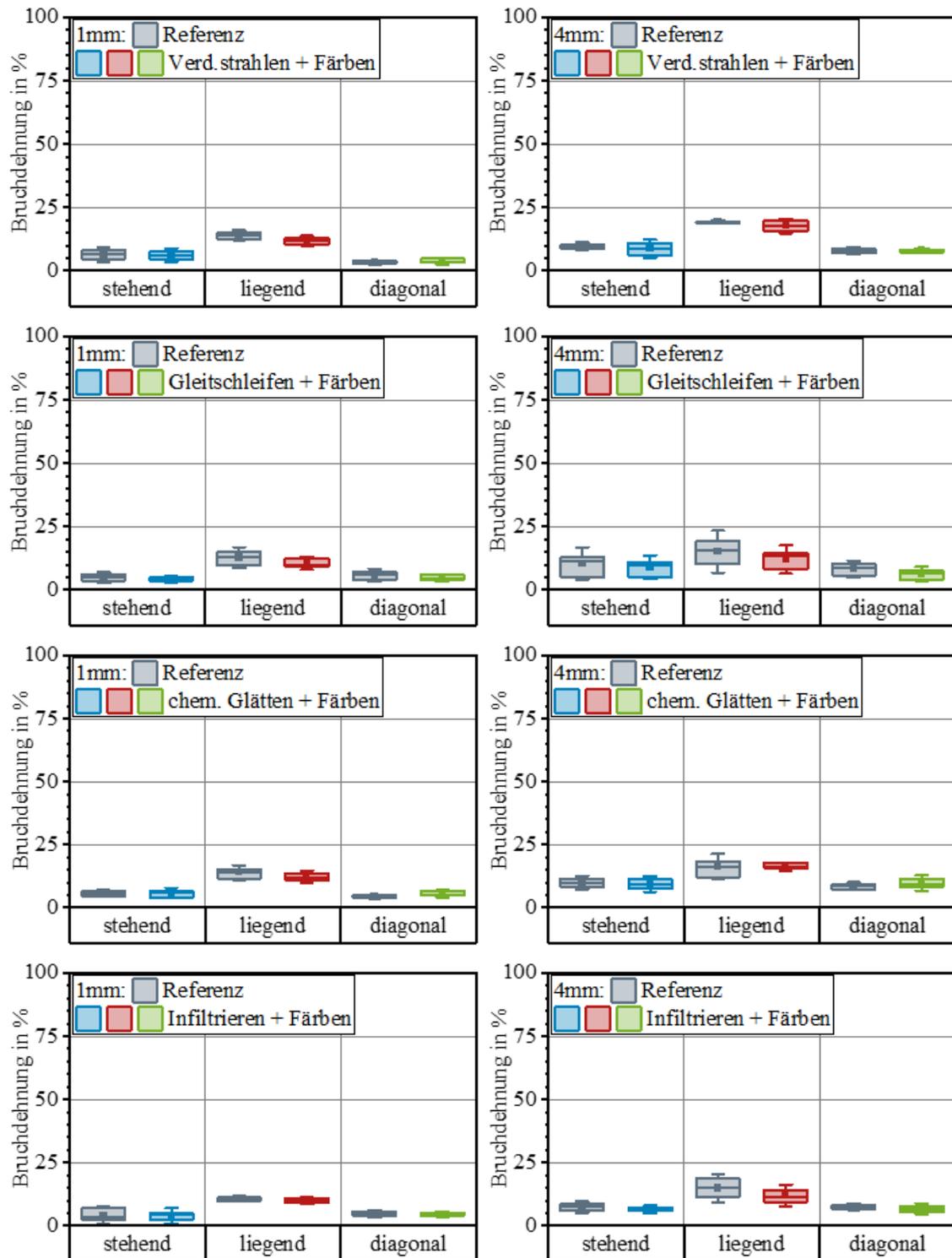


Abbildung 5.22: Bruchdehnung von 1 mm (links) und 4 mm (rechts) dicken PA12-Lasersinterteilen vor und nach zweistufiger Nachbehandlung (Verdichtungssstrahlen/Gleitschleifen/chemisches Glätten/Infiltrieren + Färben) in Abhängigkeit von der Baurichtung.

In Abbildung 5.23 ist die Bruchdehnung der Lasersinterterteile aus dem **PA11-Werkstoff** vor (Referenz, grau) und nach der Nachbehandlung abhängig von der Baurichtung und Wanddicke dargestellt. Auffallend ist auch hier die deutliche Streuung der Messwerte. Im Rahmen der Messgenauigkeit veränderten die durchgeführten Nachbehandlungen die Bruchdehnung kaum. Die Bruchdehnungen der stehend und diagonal gefertigten Lasersinterterteile war deutlich geringer als jene der liegend gefertigten Lasersinterterteile, sodass eine deutliche Baurichtungsabhängigkeit der Zähigkeit vorlag. Die Bruchdehnung der liegend gefertigten Lasersinterterteile war dabei größer als im Fall der PA12-Lasersinterterteile. Dies entspricht insofern der Erwartung, als dass bei diesen die Beanspruchungsrichtung dazu führt, dass (wie in Kapitel 5.2.1 diskutiert) der Werkstoff im Wesentlichen die erreichbaren Werte bestimmt. Wie schon bei den PA12-Lasersinterterteilen nahm die Bruchdehnung für die 4 mm dicken Lasersinterterteile gegenüber den 1 mm dicken Lasersinterterteilen etwas zu.

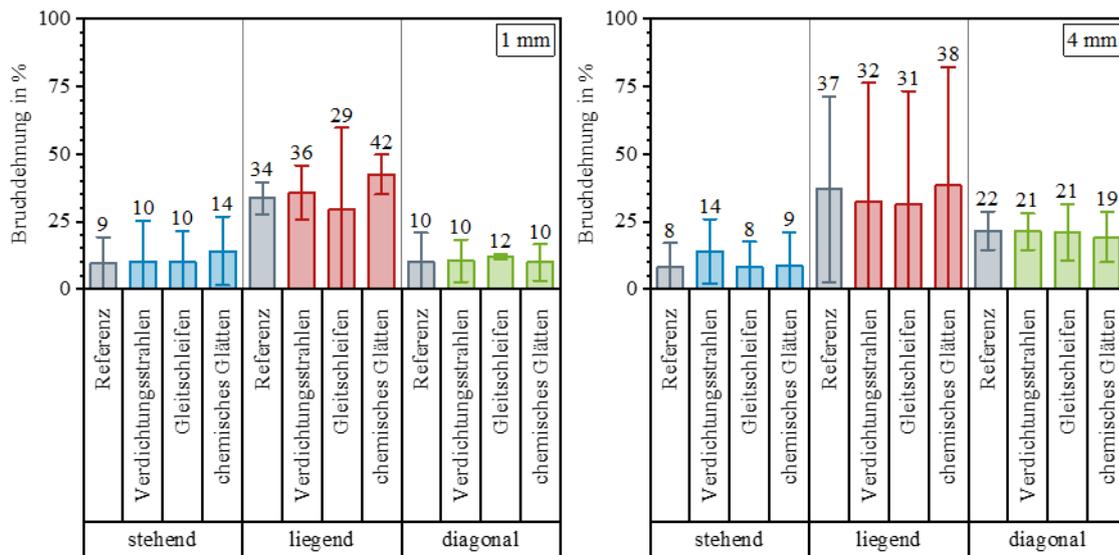


Abbildung 5.23: Bruchdehnung von 1 mm (links) und 4 mm (rechts) dicken PA11-Lasersinterterteilen vor und nach einstufiger Nachbehandlung in Abhängigkeit von der Baurichtung.

Die Resultate der mit denselben Verfahren wie die PA11-Lasersinterterteilen nachbehandelten Lasersinterterteile aus dem **glasgefüllten PA12-Werkstoff** sind in Abbildung 5.24 dargestellt. Infolge des verwendeten Füllstoffs reduziert sich die Bruchdehnung gegenüber den ungefüllten PA12-Lasersinterterteilen deutlich. Trotz des sehr niedrigen Niveaus ist eine klare Abhängigkeit von der Baurichtung sowohl bei den 1 mm dicken wie auch den 4 mm dicken Lasersinterterteilen zu erkennen. Daran konnten auch die durchgeführten einstufigen Nachbehandlungen kaum etwas ändern. Die zunehmende Wanddicke ging erneut mit einer verbesserten Bruchdehnung einher.

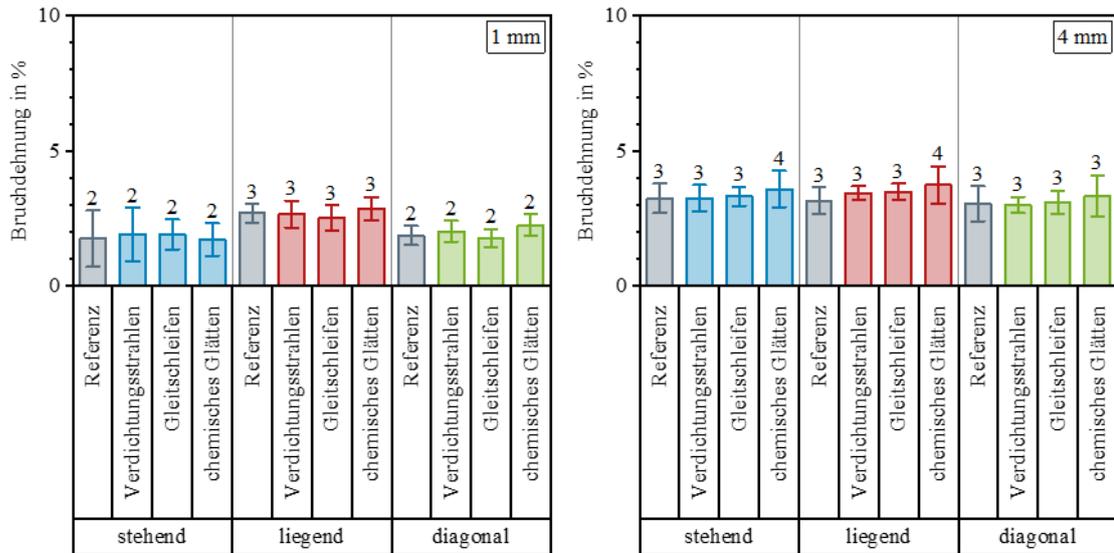


Abbildung 5.24: Bruchdehnung von 1 mm (links) und 4 mm (rechts) dicken glasgefüllten PA12-Lasersinterteilen vor und nach einstufiger Nachbehandlung in Abhängigkeit von der Baurichtung.

Für die auf einer anderen Maschine gefertigten glasgefüllten PA12-Lasersinterteile lagen die Bruchdehnungen in einer vergleichbaren Größenordnung (Abbildung 5.25). Sie zeigten zudem ebenfalls eine erkennbare Baurichtungsabhängigkeit sowie verbesserte Bruchdehnungswerte mit steigender Wanddicke. In guter Übereinstimmung mit den Resultaten der Zugfestigkeit, verbesserte das chemische Glätten auch die Bruchdehnung etwas. Auch der kontra-intuitive Baurichtungseinfluss bei den 4 mm dicken Lasersinterteilen (vgl. Kapitel 5.2.1) wurde bestätigt.

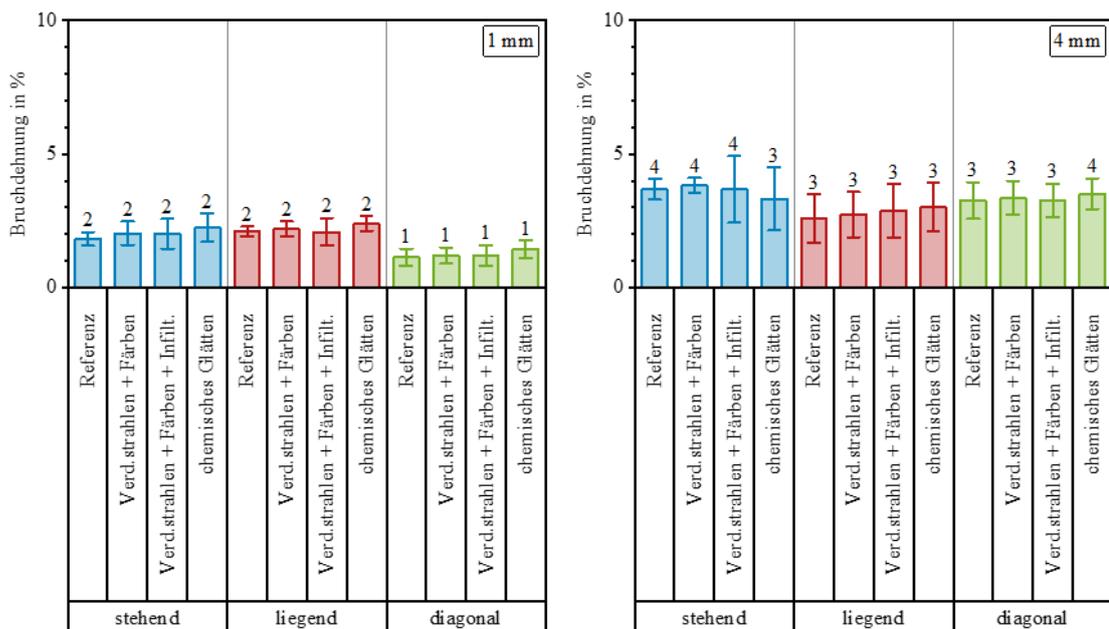


Abbildung 5.25: Bruchdehnung von 1 mm (links) und 4 mm (rechts) dicken glasgefüllten PA12-Lasersinterteilen vor und nach ein-, zwei- bzw. dreistufiger Nachbehandlung in Abhängigkeit von der Baurichtung.

5.2.3 Kerbempfindlichkeit

Die in den Schlagbiegeprüfungen ermittelte Schlagzähigkeit als Maß für die Kerbempfindlichkeit der **unbehandelten Lasersinterterile** aus dem **PA12-Musterwerkstoff** ist abhängig von der Baurichtung in Abbildung 5.26 dargestellt. Wie in Kapitel 5.2.1 und 5.2.2 wurde für jede der sieben zur Herstellung eingesetzten Maschinen der Mittelwert als Symbol (Quadrat), die Median-Linie, das 0 %/100 %-Perzentil als Box sowie die Standardabweichung als Balken aufgetragen. In allen Fällen zeigte sich ein deutlicher Einfluss der Baurichtung. So ist die Schlagzähigkeit der liegend gebauten Lasersinterterile am größten, wobei die Schlagbeanspruchung senkrecht auf die Schichtebene erfolgte. Die Beanspruchung parallel zur Schichtebene bei den stehend gebauten Lasersinterterilen führte zu deutlich geringeren Schlagzähigkeitswerten. Die Resultate der diagonal gefertigten Lasersinterterile lagen dazwischen. Unter Berücksichtigung der starken Streuung der Messwerte stimmten die Resultate maschinen- und baujobunabhängig gut überein. Wie schon bei der Zugfestigkeit und der Bruchdehnung erzielten die mit 100 μm statt 120 μm Schichtdicke fertigten Lasersinterterile tendenziell etwas höhere Werte. Erneut erscheint als Erklärung eine durch einen größeren Wärmeeintrag verbesserte Schichtenhaftung plausibel. Die für die liegende Baurichtung ebenfalls erhöhte Schlagzähigkeit spricht für eine möglicherweise verbesserte Homogenität bzw. geringere Mikrodefektanzahl, die ebenfalls aus einem größeren Energieeintrag resultieren könnten.

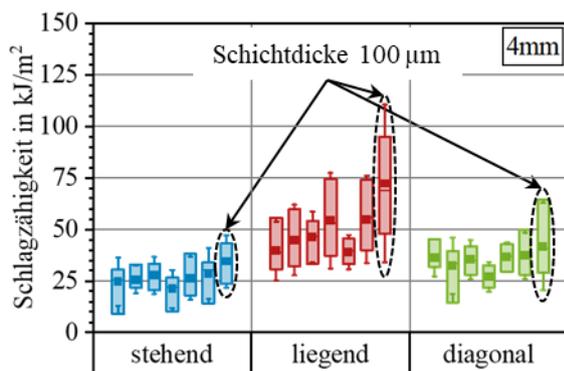


Abbildung 5.26: Bruchdehnung von 4 mm dicken PA12-Lasersinterterilen in Abhängigkeit von der Baurichtung.

Zur Diskussion der Auswirkungen der **einstufigen Nachbehandlung** der **PA12-Lasersinterterile** auf die Kerbempfindlichkeit, wurden in Abbildung 5.27 links und Abbildung 5.28 die in Schlagbiegeversuchen ermittelte Schlagzähigkeit vor der Nachbehandlung (Referenz, grau) und nach der Nachbehandlung (farbig), analog zu den Darstellungen in Kapitel 5.2.1 und 5.2.2 nebeneinander aufgetragen. Die Resultate für die **mehrstufig nachbehandelten PA12-Lasersinterterile** sind diesen in Abbildung 5.27

rechts gegenübergestellt. Im untersuchten Rahmen hatte die Nachbehandlung der 4 mm dicken Lasersinterenteile, unabhängig von der Baurichtung und Anzahl der Nachbehandlungsstufen, kaum Einfluss auf die Schlagzähigkeit.

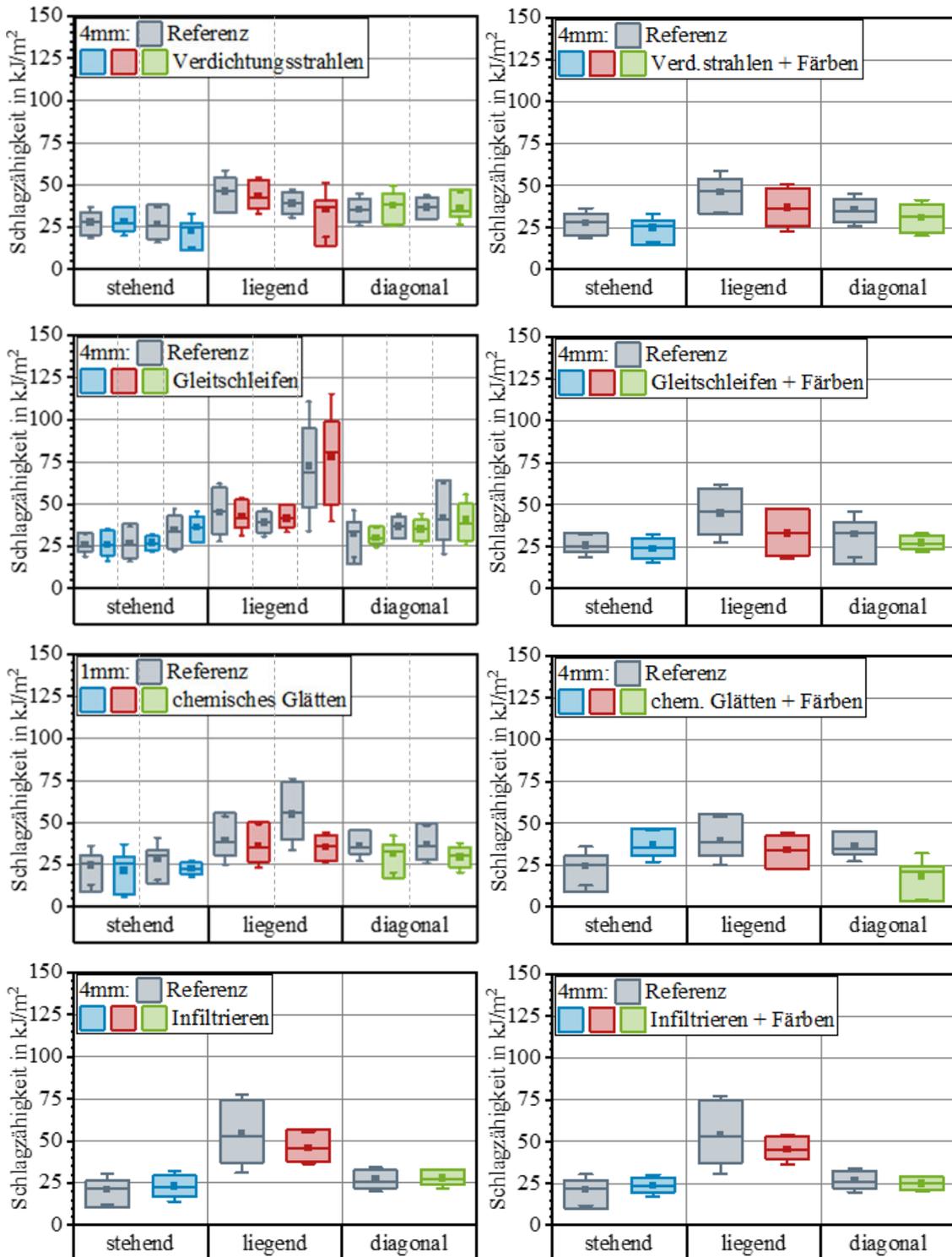


Abbildung 5.27: Schlagzähigkeit von 4 mm dicken PA12-Lasersinterenteilen vor und nach einstufiger (links) und zweistufiger (rechts) Nachbehandlung (Verdichtungsstrahlen/Gleitschleifen/chemisches Glätten/Infiltrieren) in Abhängigkeit von der Baurichtung.

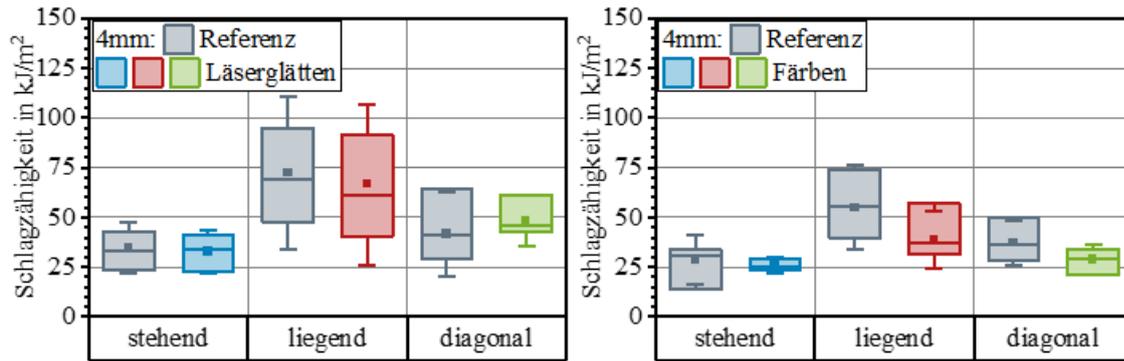


Abbildung 5.28: Schlagzähigkeit von 4 mm dicken PA12-Lasersinterteilen vor und nach einstufiger Nachbehandlung (Laserglätten/Färben) in Abhängigkeit von der Baurichtung.

In Abbildung 5.29 ist die Schlagzähigkeit der Lasersinterteile aus dem **PA11-Werkstoff** vor (Referenz, grau) und nach der Nachbehandlung abhängig von der Baurichtung dargestellt. Die farbige Zahl am Balkenende gibt jeweils an wie, viele gültige Versuche in die Kennwertbildung eingeflossen sind (maximal möglich 10). Hierbei gilt: je kleiner die Zahl ist, desto geringer ist die oberflächenbedingte Kerbempfindlichkeit, da als ungültig bezeichnete Prüfungen mit einem Durchziehen der Probekörper ohne Bruch gleichzusetzen ist. Im Vergleich zu den PA12-Lasersinterteilen wurde eine geringere Kerbempfindlichkeit festgestellt. Dies entspricht der Erwartung eines duktileren Verhaltens von PA11 verglichen mit PA12. Die Baurichtungsabhängigkeit der Schlagzähigkeit der 4 mm dicken PA11-Lasersinterteile indiziert, dass die Schichtenhaftung (siehe stehend in Abbildung 5.29) bei Schlagbeanspruchung als kritischste Größe anzusehen war. Die betrachteten Nachbehandlungen veränderten das Verhalten sowie die deutliche Messwertstreuung kaum.

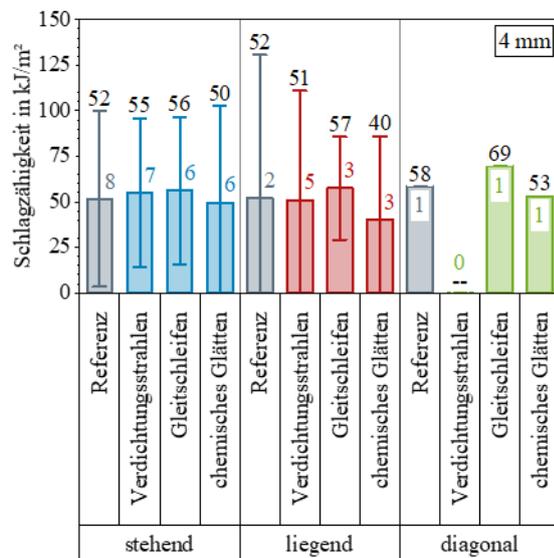


Abbildung 5.29: Schlagzähigkeit von 4 mm dicken PA11-Lasersinterteilen vor und nach einstufiger Nachbehandlung in Abhängigkeit von der Baurichtung.

Die Resultate der mit denselben Verfahren wie die PA11-Lasersinterterteile nachbehandelten Lasersinterterteile aus dem **glasgefüllten PA12-Werkstoff** sind in Abbildung 5.30 links dargestellt. Wie schon bei den ungefüllten PA12-Lasersinterterteilen wurde für alle Probekörper ein sprödes Versagen beobachtet. Die resultierende Schlagzähigkeit lag unabhängig von der Baurichtung und Nachbehandlung der glasgefüllten PA12-Lasersinterterteile näherungsweise auf einem konstant niedrigen Niveau. Die Größenordnung entsprach dabei dem der stehend gefertigten ungefüllten PA12-Lasersinterterteile. Es liegt daher die Annahme nahe, dass innerhalb einer Schicht sowie zwischen den verschiedenen Schichten die Verbindung gleich war und mithin die Füllstoff-Kunststoff-Anbindung eher schlecht. Hier bestünde ggf. werkstoffseitig Optimierungspotenzial.

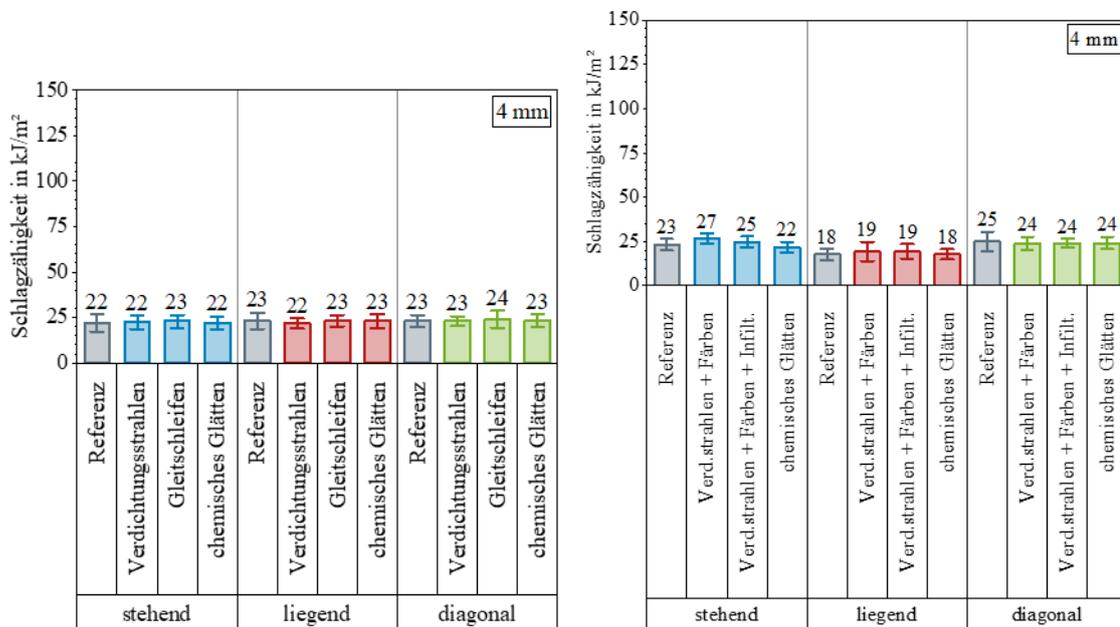


Abbildung 5.30: Schlagzähigkeit von 4 mm dicken glasgefüllten PA12-Lasersinterterteilen vor und nach einstufiger Nachbehandlung in Abhängigkeit von der Baurichtung.

Für die auf der anderen Maschine gefertigten glasgefüllten PA12-Lasersinterterteile lag die Schlagzähigkeit in einer vergleichbaren Größenordnung (Abbildung 5.30 rechts). Allerdings waren die erzielten Werte abhängig von der Baurichtung. Das dabei die liegend gefertigten Lasersinterterteile die größte Kerbempfindlichkeit aufwiesen, passt gut zu den Ergebnissen für die Zugfestigkeit und Bruchdehnung (vgl. Kapitel 5.2.1 und 5.2.2). Dies änderte sich durch die ein- bzw. mehrstufige Nachbehandlung kaum.

5.3 Aufklärung von Ursachen und Wirkzusammenhängen

5.3.1 Äußere Struktur

Zur Charakterisierung der äußeren Struktur wurde die Topografie analysiert und die Oberfläche anhand des S_a -Rauheitskennwertes verglichen. In Abbildung 5.31 sind die an den **unbehandelten Lasersinterteilen** aus dem **PA12-Musterwerkstoff** ermittelten Werte in Abhängigkeit von der Baurichtung und Wanddicke dargestellt. Erneut steht jeder Balken für den Mittelwert, der aus einem Baujob stammenden Lasersinterteile. Sowohl bei den 1 mm dicken wie auch bei den 4 mm dicken PA12-Lasersinterterteilen ist die Oberflächenrauheit bei liegender Fertigung am geringsten – hierbei wird die Oberflächenrauheit in der Schichtebene erfasst. Bei den stehend sowie diagonal gefertigten Lasersinterteilen wird die Oberflächenrauheit über die verschiedenen Schichten hinweg gemessen, die, verglichen mit den liegend gefertigten Lasersinterteilen, etwas größer ausfällt. Mit Ausnahme der diagonal gefertigten Lasersinterteile stimmen die an den Unterseiten gemessenen Werte gut mit den an den Oberseiten gemessenen Werten überein. Bei der diagonalen Anordnung im Bauraum kommt es verfahrenstypisch zu Unterschieden zwischen Ober- und Unterseite.

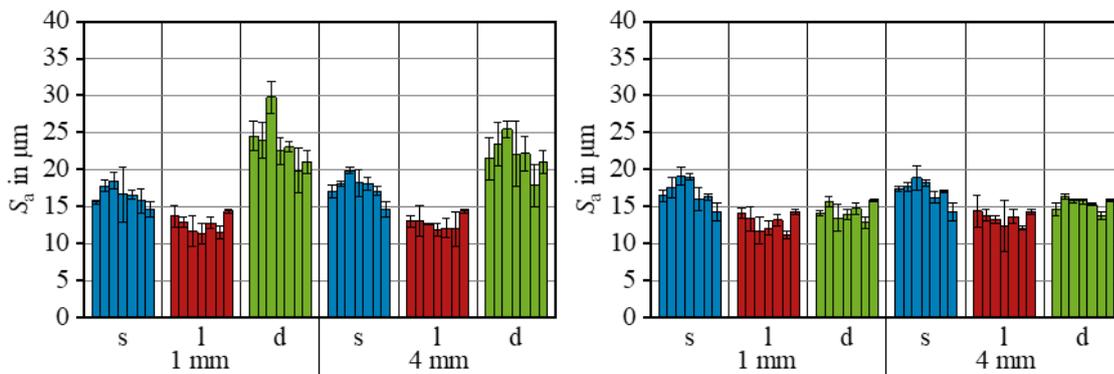


Abbildung 5.31: Rauheit von PA12-Lasersinterteilen in Abhängigkeit von der Baurichtung und Wanddicke, gemessen an der Oberseite (links) und der Unterseite (rechts).

Die Änderung der Oberflächenrauheit, welche die aus dem **PA12-Musterwerkstoff** gefertigten Lasersinterteile durch die **einstufige Nachbehandlung** erfahren, ist in Tabelle 5.17 als relative Veränderung des Absolutwertes angegeben. Dazu wurde die Differenz der Mittelwerte der Messungen an den nachbehandelten Lasersinterteilen und denselben Lasersinterteilen vor der Nachbehandlung gebildet. Positive bzw. negative Werte entsprechen demnach einer Zu- bzw. Abnahme der Oberflächenrauheit durch die Nachbehandlung. Die Ergebnisse jeder Zeile gehören zum selben Block (vgl. Anhang Kapitel 8.2), d. h., die Lasersinterteile wurden auf derselben Maschine gefertigt und

anschließend derselben Nachbehandlung unterzogen. Erwartungsgemäß wurde mit den auf das Glätten der Oberflächen ausgerichteten Nachbehandlungsverfahren (Verdichtungsstrahlen, Gleitschleifen, chemisches Glätten und Laserglätten) eine deutliche Reduktion der Oberflächenrauheit für alle Baurichtungen und Wanddicken sowohl an der Ober- als auch an der Unterseite der Lasersinterteile erzielt. Der Effekt war umso stärker ausgeprägt, je rauer die Oberflächen initial waren – die baurichtungsbedingten Unterschiede wurden näherungsweise aufgehoben. Das auf die Füllung der porösen inneren Strukturen der Lasersinterteile zielende Infiltrieren reduzierte gleichzeitig auch die Oberflächenrauheit etwas. Das Färben hatte erwartungsgemäß nahezu keinen Einfluss, da die Farbe von der Oberfläche aus eindringt und im Unterschied zum Lackieren keine neue Schicht an der Oberfläche erzeugt (vgl. Kapitel 5.3.2).

Tabelle 5.17: Änderung der Rauheit durch eine einstufige Nachbehandlung von 1 mm (links) und 4 mm (rechts) dicken PA12-Lasersinterteilen in Abhängigkeit von der Baurichtung, gemessen an der Oberseite (oben) und Unterseite (unten).

1 mm Oberseite	S _a in µm		
	s	l	d
Verdichtungsstrahlen	-10,1	-4,9	-16,0
	-10,4	-6,1	-14,8
Gleitschleifen	-8,9	-2,1	-10,3
	-9,7	-6,1	-14,6
	-10,7	-6,3	-13,3
Chemisches Glätten	-12,1	-11,4	-20,4
	-9,5	-9,7	-10,2
Laserglätten	-7,4	-4,3	-9,9
Färben	-0,2	±0,0	-2,2
Infiltrieren	-5,8	-2,9	-8,4

4 mm Oberseite	S _a in µm		
	s	l	d
Verdichtungsstrahlen	-10,2	-4,2	-17,9
	-10,9	-6,6	-17,2
Gleitschleifen	-8,9	-4,7	-13,8
	-6,7	-3,1	-10,8
	-8,3	-6,1	-10,6
Chemisches Glätten	-12,1	-7,8	-15,1
	-13,7	-9,9	-16,7
Laserglätten	-8,2	-4,3	-10,1
Färben	-0,7	-0,1	±0,0
Infiltrieren	-10,3	-2,6	-13,8

1 mm Unterseite	S _a in µm		
	s	l	d
Verdichtungsstrahlen	-10,3	-4,3	-5,5
	-8,1	-8,4	-7,4
Gleitschleifen	-7,7	-2,8	-3,8
	-11,7	-8,4	-7,4
	-9,9	-7,3	-6,7
Chemisches Glätten	-14,2	-11,7	-10,1
	-9,7	-7,3	-7,4
Laserglätten	-8,4	-7,2	-7,1
Färben	-0,5	+0,8	+0,9
Infiltrieren	-8,3	-4,8	-4,2

4 mm Unterseite	S _a in µm		
	s	l	d
Verdichtungsstrahlen	-9,2	-6,2	-6,4
	-10,1	-8,0	-7,4
Gleitschleifen	-10,3	-3,7	-3,9
	-7,6	-6,2	-5,3
	-8,7	-7,5	-3,9
Chemisches Glätten	-10,8	-8,3	-10,6
	-13,3	-9,1	-11,2
Laserglätten	-8,2	-7,2	-7,0
Färben	+0,8	+0,2	+0,8
Infiltrieren	-9,2	-4,7	-3,9

Analog zu der Darstellung für die einstufige Nachbehandlung sind in Tabelle 5.18 die Änderungen der Oberflächenrauheit durch die **zweistufige Nachbehandlung** der Lasersinterteile aus dem **PA12-Musterwerkstoff** als Veränderung des Absolutwertes in Relation zum unbehandelten Zustand angegeben. Für alle Verfahrenskombinationen führte das zusätzliche Färben zu keiner zusätzlichen Verringerung der Oberflächenrauheit, sodass (in guter Übereinstimmung mit den Resultaten der einstufig nachbehandelten PA12-Lasersinterteilen) die Reduktion der Oberflächenrauheit in derselben Größenordnung wie zuvor diskutiert lag.

Tabelle 5.18: Änderung der Rauheit durch eine zweistufige Nachbehandlung von 1 mm (links) und 4 mm (rechts) dicken PA12-Lasersinterteilen in Abhängigkeit von der Baurichtung, gemessen an der Oberseite (oben) und Unterseite (unten).

1 mm Oberseite		S_a in μm			4 mm Oberseite		S_a in μm		
		s	l	d			s	l	d
Färben +	Verdichtungsstrahlen	-3,9	-1,2	-10,0	Färben +	Verdichtungsstrahlen	-9,0	-3,9	-13,5
	Gleitschleifen	-7,6	-1,7	-8,7		Gleitschleifen	-9,4	-4,7	-12,9
	Chemisches Glätten	-13,1	-10,3	-21,4		Chemisches Glätten	-14,1	-9,9	-18,2
	Infiltrieren	-6,1	-1,1	-9,6		Infiltrieren	-6,7	-3,0	-13,7
1 mm Unterseite		S_a in μm			4 mm Unterseite		S_a in μm		
		s	l	d			s	l	d
Färben +	Verdichtungsstrahlen	-5,3	-2,8	-3,1	Färben +	Verdichtungsstrahlen	-8,6	-4,6	-3,8
	Gleitschleifen	-8,3	-3,7	-3,4		Gleitschleifen	-10,4	-7,4	-5,8
	Chemisches Glätten	-13,8	-10,3	-11,3		Chemisches Glätten	-13,3	-9,2	-9,7
	Infiltrieren	-2,5	-5,6	-2,8		Infiltrieren	-5,8	-5,8	-1,3

Die an der Ober- und Unterseite ermittelte Oberflächenrauheit der **unbehandelten Lasersinterteile** aus dem **PA11-Werkstoff** sind in Abbildung 5.32 abhängig von der Baurichtung und Wanddicke dargestellt. Analog zu den Resultaten der PA12-Lasersinterteile unterschieden sich die Ober- und Unterseite der diagonal und liegend gefertigten PA11-Lasersinterteile deutlich.

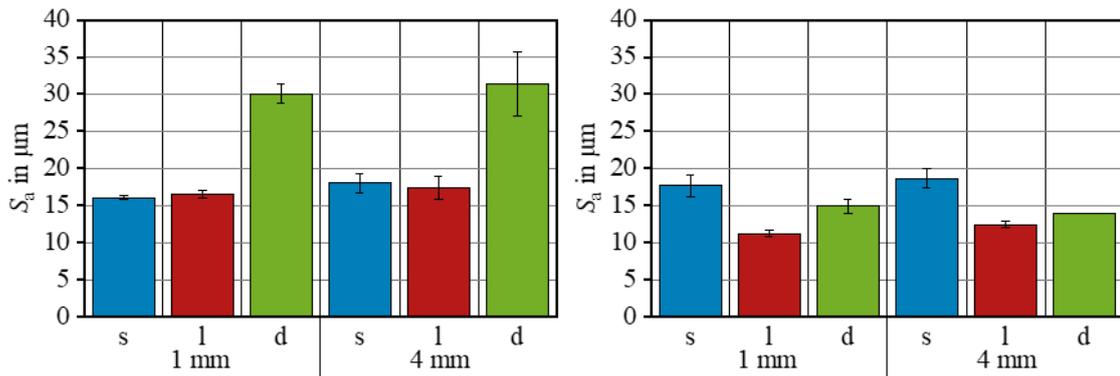


Abbildung 5.32: Rauheit von PA11-Lasersinterteilen in Abhängigkeit von der Baurichtung und Wanddicke, gemessen an der Oberseite (links) und Unterseite (rechts).

Durch die **einstufige Nachbehandlung** konnte die Oberflächenrauheit reduziert werden (vgl. Tabelle 5.19), wobei die sich die Werte der verschiedenen Baurichtung angleichen. Dies stimmt gut mit den zuvor für die PA12-Lasersinterenteile gemachten Beobachtungen überein.

Tabelle 5.19: Änderung der Rauheit durch eine einstufige Nachbehandlung von 1 mm (links) und 4 mm (rechts) dicken PA11-Lasersinterenteilen in Abhängigkeit von der Baurichtung, gemessen an der Oberseite (oben) und Unterseite (unten).

1 mm Oberseite	S_a in μm			4 mm Oberseite	S_a in μm		
	s	l	d		s	l	d
Verdichtungsstrahlen	-7,9	-3,7	-15,7	Verdichtungsstrahlen	-7,8	-5,9	-17,0
Gleitschleifen	-5,1	-2,3	-7,9	Gleitschleifen	-5,6	-2,2	-12,7
Chemisches Glätten	-12,1	-10,1	-21,0	Chemisches Glätten	-14,2	-11,8	-22,1
1 mm Unterseite	S_a in μm			4 mm Unterseite	S_a in μm		
	s	l	d		s	l	d
Verdichtungsstrahlen	-8,5*	-3,5	-3,4	Verdichtungsstrahlen	-7,1	-4,7	-2,3
Gleitschleifen	-7,9	-2,8	-3,2	Gleitschleifen	-6,5	-4,3	-4,3
Chemisches Glätten	-10,3	-6,9	-8,7	Chemisches Glätten	-12,0	-8,9	-7,4

Die Resultate für die **unbehandelten Lasersinterenteile** aus dem **glasgefüllten PA12-Werkstoff** sind in Abbildung 5.33 abhängig von der Baurichtung und Wanddicke dargestellt. Da die Herstellung auf zwei unterschiedlichen Maschinen erfolgte, sind jeweils zwei Werte angegeben. Während die Oberflächenrauheit für die liegend gefertigten Lasersinterenteile an der Oberseite etwas größer ausfiel als an der Unterseite, ist dieser Effekt bei den diagonal gefertigten Lasersinterenteilen erneut deutlich ausgeprägt. Insgesamt lagen die Werte zudem etwas höher als bei den ungefüllten Materialien, sodass der Füllstoff als Ursachen naheliegt.

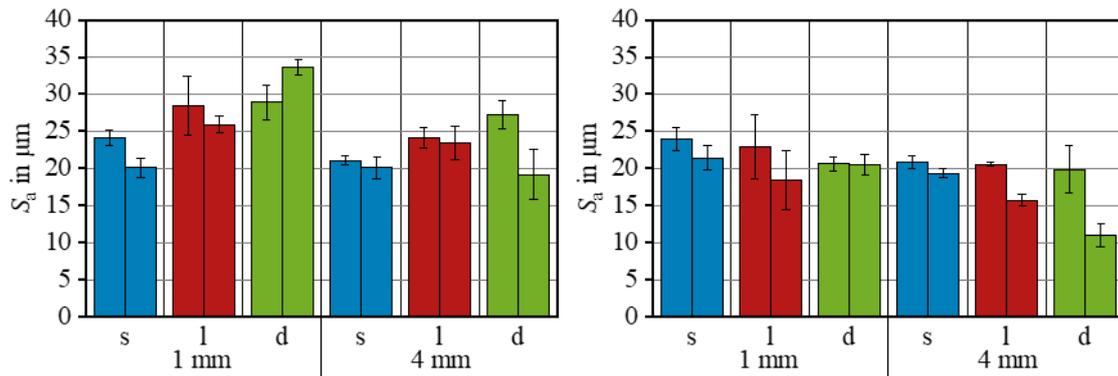


Abbildung 5.33: Rauheit von glasgefüllten PA12-Lasersinterteilen in Abhängigkeit von der Baurichtung und Wanddicke, gemessen an der Oberseite (links) und Unterseite (rechts).

Die aus dem **glasgefüllten PA12-Werkstoff** hergestellten Lasersinterteile wurden sowohl **ein- als auch zwei- und dreistufigen Nachbehandlungen** unterzogen. Das Verdichtungsstrahlen, Gleitschleifen und chemische Glätten reduzierte die Oberflächenrauheit (unter Angleichung der verschiedenen Baurichtung).

Tabelle 5.20: Änderung der Rauheit durch eine ein-, zwei- bzw. dreistufige Nachbehandlung von 1 mm (links) und 4 mm (rechts) dicken glasgefüllten PA12-Lasersinterteilen in Abhängigkeit von der Baurichtung, gemessen an der Oberseite (oben) und Unterseite (unten).

1 mm Oberseite	S_a in μm			4 mm Oberseite	S_a in μm		
	s	l	d		s	l	d
Verdichtungsstrahlen	-13,4	-10,4	-16,0	Verdichtungsstrahlen	-13,3	-12,2	-13,8
Verdichtungsstrahlen + Färben	-6,1	+4,5	-9,7	Verdichtungsstrahlen + Färben	-6,9	-0,1	-4,2
Verdichtungsstrahlen + Färben + Infiltrieren	-6,5	+0,4	-12,5	Verdichtungsstrahlen + Färben + Infiltrieren	-5,8	-5,2	-8,2
Gleitschleifen	-5,0	-0,5	-13,6	Gleitschleifen	-8,5	-3,0	-11,8
Chemisches Glätten	-13,2 -9,0	-9,8 -9,6	-15,1 -17,3	Chemisches Glätten	-15,5 -14,0	-17,6 -16,3	-19,9 -12,9
1 mm Unterseite	S_a in μm			4 mm Unterseite	S_a in μm		
	s	l	d		s	l	d
Verdichtungsstrahlen	-10,2	-12,9	-10,6	Verdichtungsstrahlen	-13,6	-9,7	-7,0
Verdichtungsstrahlen + Färben	-4,8	+3,7	+0,5	Verdichtungsstrahlen + Färben	-6,9	+2,0	-0,6
Verdichtungsstrahlen + Färben + Infiltrieren	-5,8	+2,2	-1,1	Verdichtungsstrahlen + Färben + Infiltrieren	-2,9	-1,1	-2,4
Gleitschleifen	-6,4	-11,3	-9,7	Gleitschleifen	-10,1	-8,6	-8,2
Chemisches Glätten	-14,7 -10,4	-13,0 -7,9	-14,5 -8,2	Chemisches Glätten	-13,9 -13,9	-14,2 -9,0	-10,9 -5,8

5.3.2 Innere Struktur

In Abbildung 5.34 sind Mikroskopiebilder der aus dem parallelen Bereich der laser- gesinterten Probekörper Typ 1A nach DIN EN ISO 527-2 entnommenen Dünnschnitte in Abhängigkeit von der Baurichtung und Wanddicke für die **unbehandelten Lasersinter- teile** aus dem **PA12-Musterwerkstoff** dargestellt. Die Detailaufnahmen mit identischer Vergrößerung zeigen die verfahrensbedingt entstehende innere Struktur. Diese erscheint inhomogen und, wie die Poren belegen, porös. Dabei ist die Porengröße näherungsweise unabhängig von der Wanddicke der Lasersinterenteile. Während die Ober- und Unterseite bei den stehend und liegend gefertigten 1 mm dicken Lasersinterenteilen sehr ähnlich aussehen, erscheint bei den diagonal gefertigten 1 mm dicken Lasersinterenteilen stets eine Seite deutlich glatter. Dieser optische Eindruck passt zu den Resultaten der Rauheitsmessungen (vgl. Kapitel 5.3.1). Bei den liegend gefertigten Lasersinterenteilen ist im Randbereich (links) z. T. auch der Schichtaufbau erkennbar, da in diesen Fällen die Dünnschnitte senkrecht zu den Schichten erfolgten.

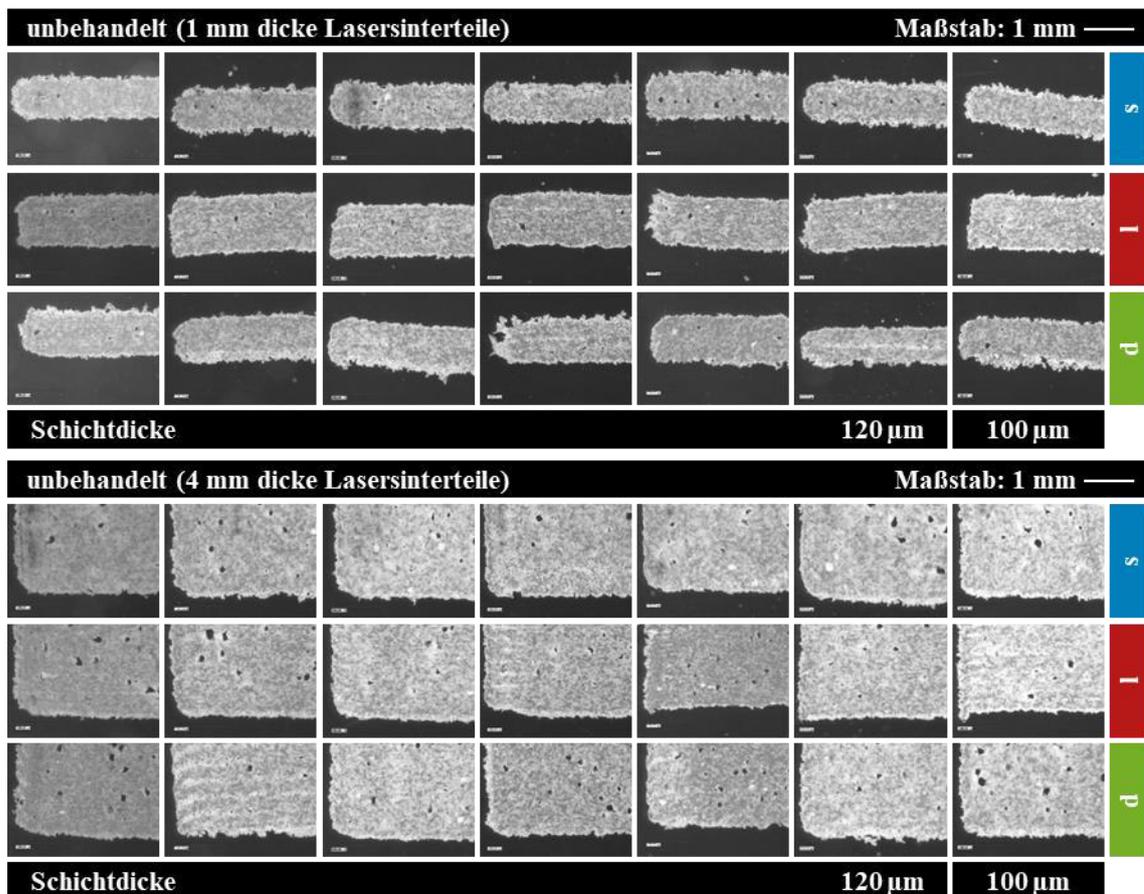


Abbildung 5.34: Mikroskopiedünnschnittbilder von 1 mm (oben) und 4 mm (unten) dicken PA12-Lasersinterenteilen in Abhängigkeit von der Baurichtung.

Abbildung 5.35 zeigt Detailaufnahmen der **mittels Glätten einstufig nachbehandelten Lasersinterteile** aus dem **PA12-Musterwerkstoff**. Beim Verdichtungsstrahlen und Gleitschleifen sind nur leichte Veränderungen an den Oberflächen im Vergleich zu den unbehandelten Lasersinterteilen sichtbar. Der Dünnschnitt der lasergeglätteten Probe hingegen zeigt deutlich den Einflussbereich des Lasers. Bei allen drei Verfahren bleibt die innere Struktur durch die Nachbehandlung unverändert. Demgegenüber veränderte das chemische Glätten diese deutlich, wobei auch die Oberflächen deutlich glatter werden. Die Mikroskopiebilder bestätigen damit zum einen die Ergebnisse der Rauheitsmessungen, zum anderen erklären sie das mechanische Verhalten: So gehen die geringen Änderungen der Struktur mit einer geringen Änderung des mechanischen Verhaltens einher und die deutlichere Veränderung im Fall des chemischen Glättens mit einer stärkeren Veränderung des mechanischen Verhaltens, insbesondere der Zugfestigkeit (vgl. Kapitel 5.2.1).

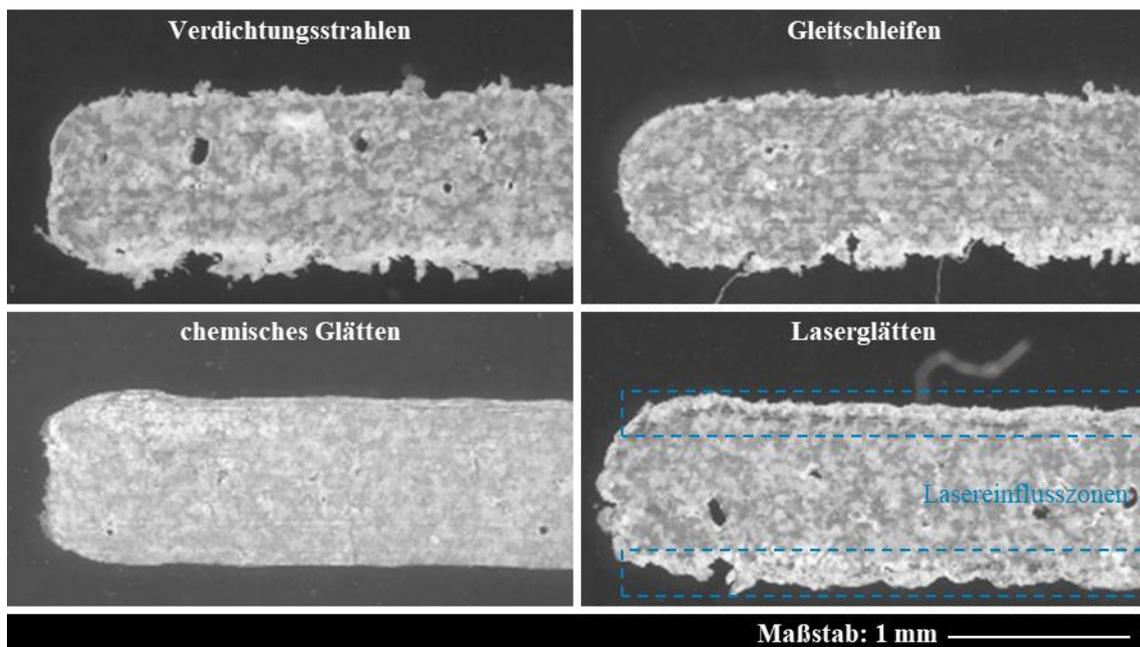


Abbildung 5.35: Vergrößerte Mikroskopiedünnschnittbilder von 1 mm dicken, diagonal gefertigten PA12-Lasersinterteilen nach einstufiger Nachbehandlung (Glätten).

Abbildung 5.36 zeigt Detailaufnahmen der **mittels Färben ein- und zweistufig nachbehandelten** Lasersinterteile aus dem **PA12-Musterwerkstoff**. Dabei unterscheidet sich das Erscheinungsbild zwischen einstufigem Färben und zweistufigem Färben in der Kombination mit Verdichtungsstrahlen, Gleitschleifen oder Infiltrieren kaum. Im Vergleich zu den ungefärbten Lasersinterteilen (vgl. Abbildung 5.34) ist keine Veränderung der Oberflächenstruktur sichtbar. Die Farbe bildete keine eigene Schicht an der Oberfläche, sondern dringt in diese ein. Die Farbeindringtiefe lag bei ca. 0,1 mm bis 0,2 mm – dies ist in der für Lasersinterteile typischen Größenordnung. Durch die beim chemischen Glätten deutlich veränderte Oberflächenstruktur fiel die Farbeindringtiefe geringer aus.

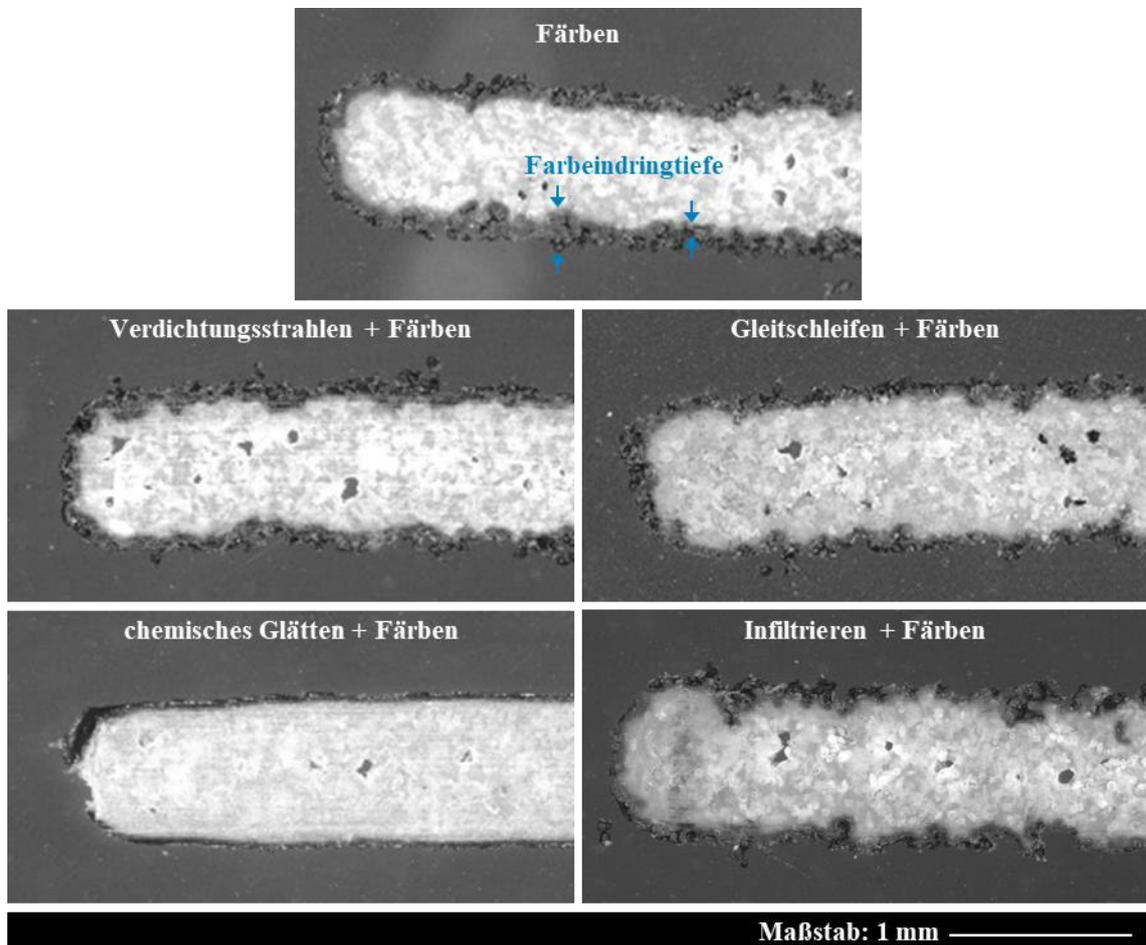


Abbildung 5.36: Vergrößerte Mikroskopiedünnschnittbilder von 1 mm dicken, stehend gefertigten PA12-Lasersinterteilen nach ein- bzw. zweistufiger Nachbehandlung (Färben).

In Abbildung 5.37 und Abbildung 5.38 sind die Mikroskopiedünnschnittbilder aller zur Nachbehandlung der PA12-Lasersintererteile verwendeten Verfahren dargestellt:

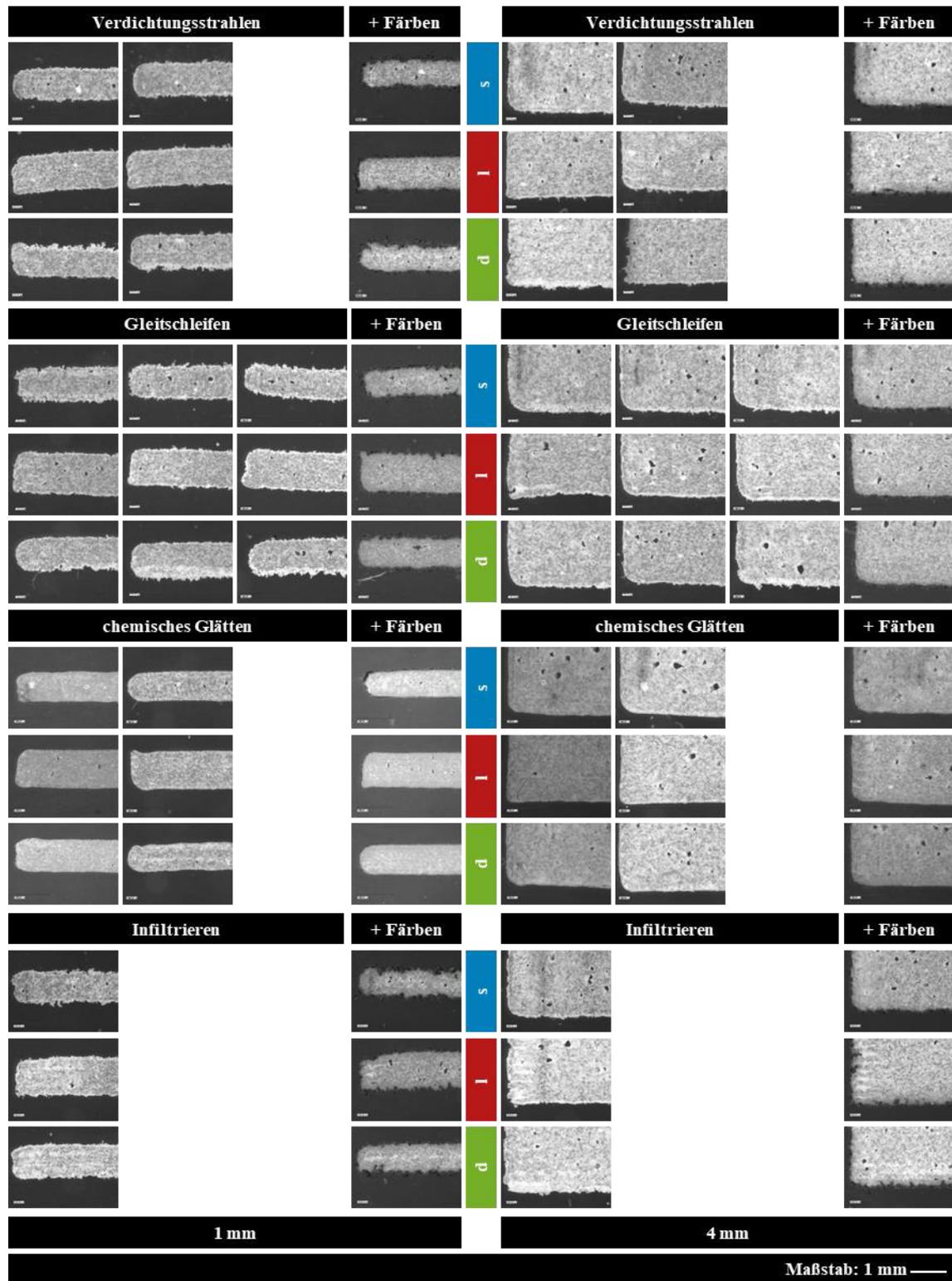


Abbildung 5.37: Mikroskopiedünnschnittbilder von 1 mm (links) und 4 mm (rechts) dicken PA12-Lasersintererteilen nach ein- bzw. zweistufiger Nachbehandlung (Verdichtungsstrahlen/Gleitschleifen/chemisches Glätten/Infiltrieren) in Abhängigkeit von der Baurichtung.

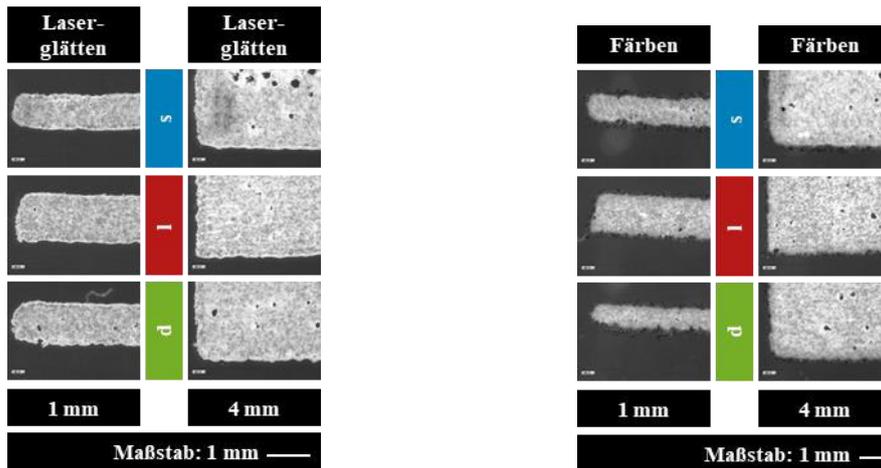


Abbildung 5.38: Mikroskopiedünnschnittbilder von 1 mm und 4 mm dicken PA12-Lasersinterteilen nach einstufiger Nachbehandlung (Laserglätten – links/Färben – rechts) in Abhängigkeit von der Baurichtung.

Die Resultate unterscheiden sich bei allen Nachbehandlungsverfahren für die in verschiedenen Baurichtungen gefertigten Lasersinterteile unabhängig von der Wanddicke kaum. Interessanterweise sind bei den infiltrierten Lasersinterteilen weiterhin Poren im Inneren erkennbar, sodass von einer begrenzten Eindringtiefe ausgegangen werden kann. Da Infiltrieren i. d. R. zur Oberflächenversiegelung/-abdichtung eingesetzt wird, stellt dies jedoch kein Problem dar.

In Abbildung 5.39 sind die Mikroskopiebilder der **unbehandelten und einstufig nachbehandelten Lasersinterteile** aus dem **PA11-Werkstoff** für die verschiedenen Baurichtungen und Wanddicken dargestellt. Die waagerechten Linien resultieren aus der Dünnschnittherstellung. Auch wenn Poren zu sichtbar sind, fällt auf, dass die innere Struktur deutlich homogener als bei den PA12-Sinterteilen erscheint. Entsprechend der Resultate in Kapitel 5.3.1 erzielte das chemische Glätten die deutlichste Veränderung.

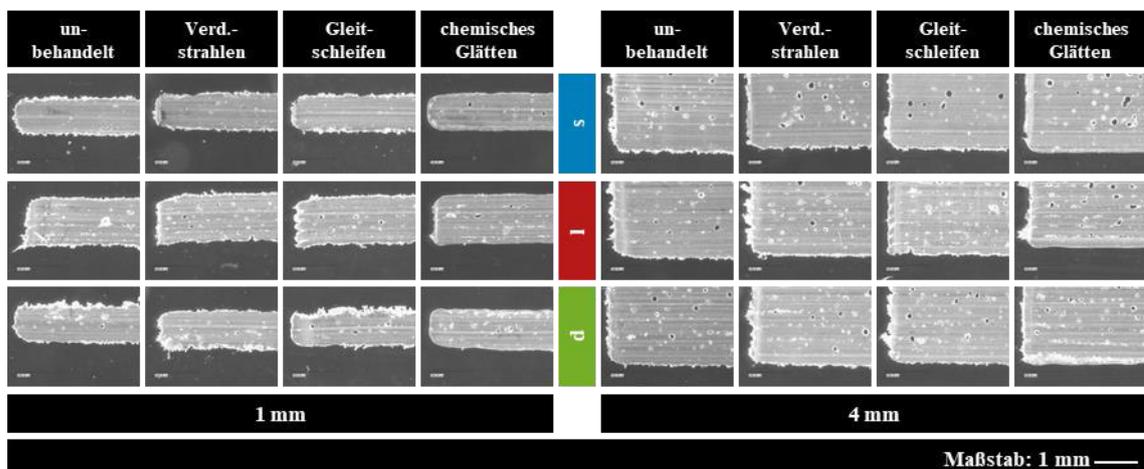


Abbildung 5.39: Mikroskopiedünnschnittbilder von 1 mm und 4 mm dicken PA11-Lasersinterteilen vor und nach einstufiger Nachbehandlung in Abhängigkeit von der Baurichtung.

Aufgrund des sehr spröden Verhaltens (vgl. Kapitel 5.2) der Lasersinterteile aus dem **glasgefüllten PA12-Werkstoff** rissen und verformten sich insbesondere die Dünnschnitte bei der Herstellung, insbesondere bei den 1 mm dicken Lasersinterteilen. In Abbildung 5.40 sind die Resultate für die unbehandelten und mit denselben Verfahren wie die PA11-Lasersinterteile nachbehandelten Lasersinterteile in Abhängigkeit von der Baurichtung und Wanddicke dargestellt. Gut erkennbar ist der zusätzliche Füllstoff als runde Strukturen in Abbildung 5.40 sowie im Vergleich zum ungefüllten Material in Abbildung 5.41. Dabei fällt auf, dass keine bzw. zumindest keine größeren Poren sichtbar sind.

Auch für die glasgefüllten PA12-Lasersinterteile passt das optische Erscheinungsbild zu den quantitativen Messwerten der Oberflächencharakterisierung. So ist erneut die deutlich unterschiedliche Rauheit der beiden Oberflächen bei den diagonal gefertigten Lasersinterteilen erkennbar. Die stärkste Veränderung der Randbereiche wurde mit dem chemischen Glätten erzielt.

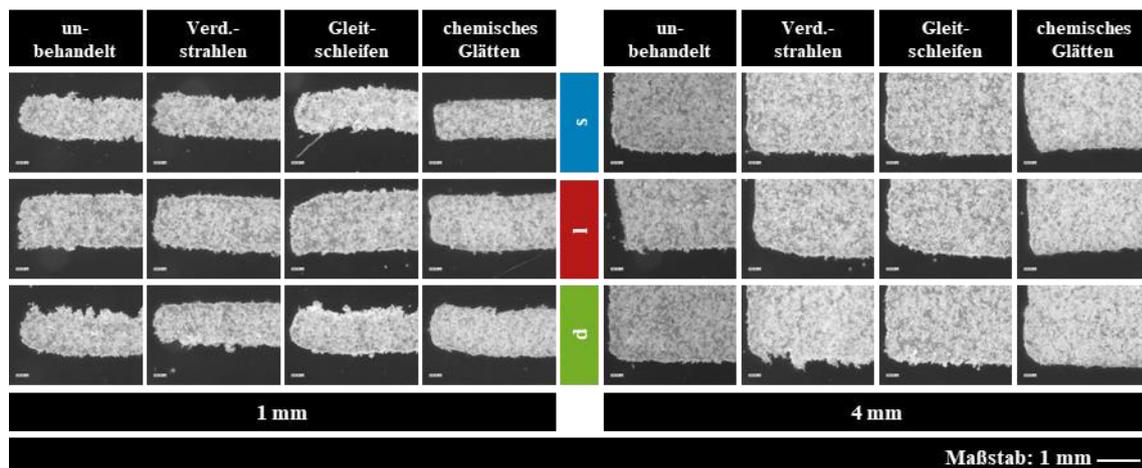


Abbildung 5.40: Mikroskopiedünnschnittbilder von 1 mm und 4 mm dicken glasgefüllten PA12-Lasersinterteilen vor und nach einstufiger Nachbehandlung in Abhängigkeit von der Baurichtung.

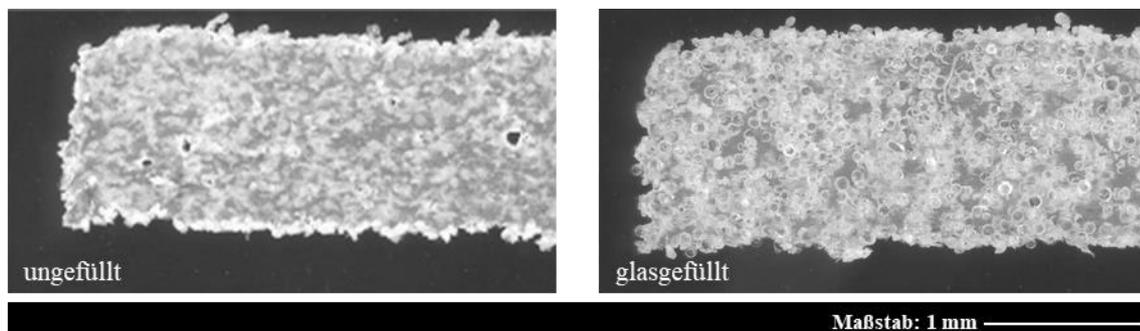


Abbildung 5.41: Vergrößerte Mikroskopiedünnschnittbilder von 1 mm dicken ungefüllten (links) und glasgefüllten (rechts) PA12-Lasersinterteilen, die liegend mit einer Schichtdicke von 100 µm gefertigt wurden.

Für die auf der anderen Maschine gefertigten glasgefüllten PA12-Lasersinterterteile sind die Mikroskopiebilder der Dünnschnitte in Abbildung 5.42 dargestellt. Die inneren Strukturen stimmen gut mit der zuvor gezeigten überein. Zum Teil ist bei den liegend gefertigten Lasersinterterteilen die in der Schnittebene liegende Schichtstruktur als waagerechte Linien (bspw. bei der unbehandelten 4 mm dicken Probe, Abbildung 5.43) erkennbar. Auch bei den glasgefüllten PA12-Lasersinterterteilen veränderte die Einfärbung die Oberflächenstruktur kaum, da im Wesentlichen ein Eindringen (und kein Auftrag) der Farbe erfolgte. Insgesamt passen auch hier die Ergebnisse zu jenen der Oberflächencharakterisierung (vgl. Kapitel 5.3.1) und dem erfassten mechanischen Verhalten (vgl. Kapitel 5.2).

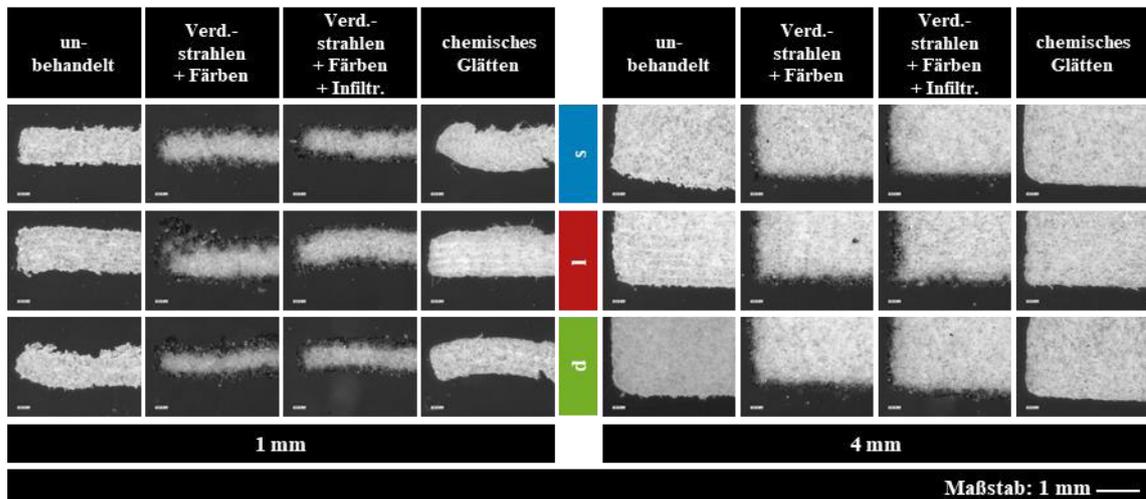


Abbildung 5.42: Mikroskopiedünnschnittbilder von 1 mm und 4 mm dicken glasgefüllten PA12-Lasersinterterteilen vor und nach ein-, zwei- bzw. dreistufiger Nachbehandlung in Abhängigkeit von der Baurichtung.

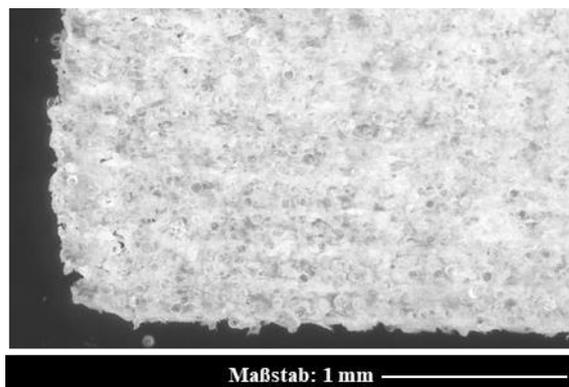


Abbildung 5.43: Vergrößertes Mikroskopiedünnschnittbild eines 4 mm dicken glasgefüllten PA12-Lasersinterterteils, das liegend mit einer Schichtdicke von 100 µm gefertigt wurde.

5.3.3 Morphologische Struktur

Zur Erfassung und Beurteilung von Materialveränderungen durch die Herstellung und Nachbehandlung wurden jeweils die 1 mm dicken, liegend gefertigten Lasersinterteile mittels DSC charakterisiert.

In Abbildung 5.44 sind die Thermogramme der auf sieben unterschiedlichen Maschinen hergestellten **unbehandelten Lasersinterteile** aus dem **PA12-Musterwerkstoff** dargestellt. Die leicht unterschiedlichen Kurvenverläufe des ersten Heizlaufs (Abbildung 5.44 oben links) spiegeln fertigungsbedingte Schwankungen wider. Dies umfasst neben den Maschinen- bzw. Herstellungsparametern auch Chargenschwankungen des verwendeten Materials, einschließlich des eingesetzten Altpulvers. Die sehr gut übereinstimmenden Kurvenverläufe des zweiten Heizlaufs (Abbildung 5.44 oben rechts) indizieren sehr ähnliche Materialeigenschaften. Daher können die im ersten Heizlauf beobachteten Unterschiede vor allem den Maschinen- bzw. Herstellungsparametern sowie möglichen Unterschieden in der Bauraumposition der untersuchten Proben zugeordnet werden.

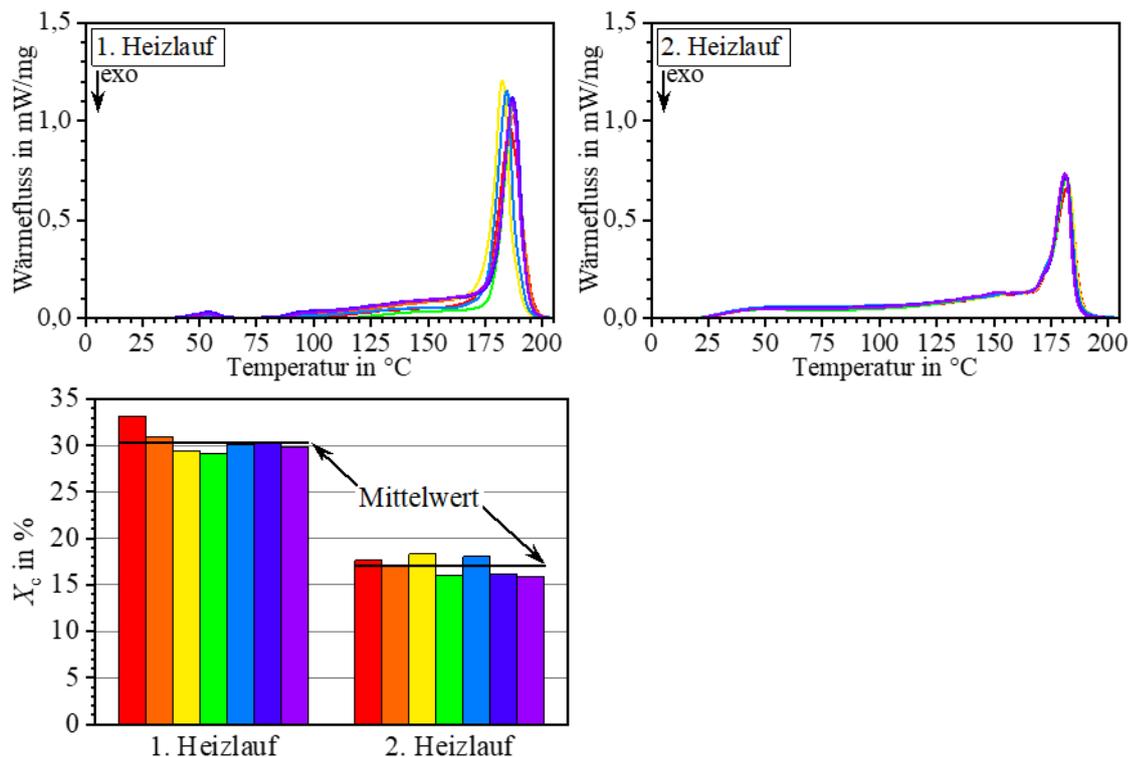


Abbildung 5.44: Thermogramme (oben) und Kristallinitätsgrad (unten) von 1 mm dicken PA12-Lasersinterteilen; erster Heizlauf (links) und zweiter Heizlauf (rechts).

Auch die Kristallinitätsgrade (Abbildung 5.44 unten) der auf unterschiedlichen Maschinen gefertigten PA12-Lasersinterteile unterscheiden sich nur wenig. Bedingt durch die unterschiedlichen Abkühlbedingungen beim Lasersintern (im ersten Heizlauf sichtbar) und bei den DSC (im zweiten Heizlauf sichtbar) unterscheiden sich die Resultate deutlich.

Um die Auswirkungen der **ein- und zweistufigen Nachbehandlung** der **PA12-Lasersinterterteile** bewerten zu können, wurden in Abbildung 5.45 die Kurvenverläufe der ersten Aufheizung aufgetragen. Dabei wurde jeweils zusätzlich der Kurvenverlauf der unbehandelten Lasersinterterteile desselben Baujobs aufgetragen (gestrichelte schwarze Linie). Im Fall der zweistufigen Nachbehandlungen wurde zudem der Verlauf der zugehörigen einstufigen Nachbehandlung (graue Linie) gezeigt. Insgesamt sind die Kurvenverläufe sehr ähnlich. Demnach wurde die Morphologie durch die Nachbehandlungen nur wenig verändert – eine relevante Materialschädigung durch die Nachbehandlungen ist demnach unwahrscheinlich.

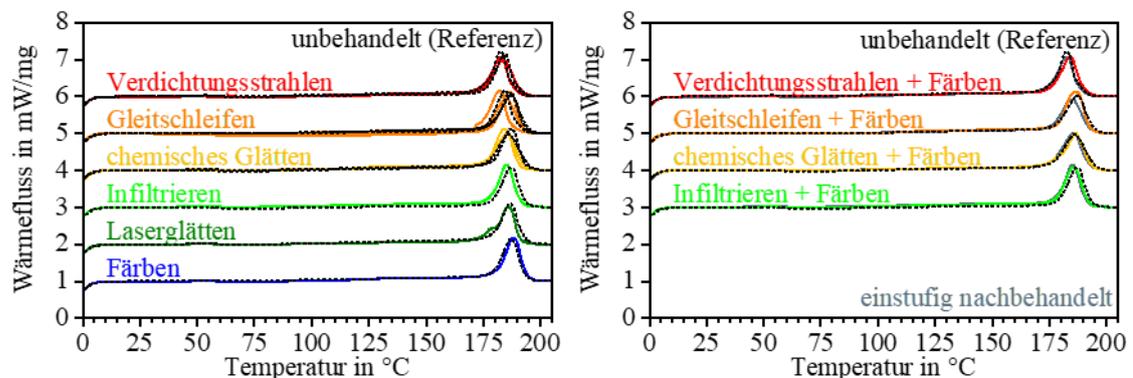


Abbildung 5.45: Thermogramme von 1 mm dicken PA12-Lasersinterterteilen nach einstufiger (links) und zweistufiger (rechts) Nachbehandlung; erster Heizlauf.

Insbesondere die z. T. nahezu perfekte Übereinstimmung der Thermogramme von zweistufig nachbehandelten PA12-Lasersinterterteilen und deren unbehandelten Referenzen weisen darauf hin. Dies spiegeln auch die in Tabelle 5.21 dargestellten, nahezu vernachlässigbaren bzw. im Bereich der Messgenauigkeit liegenden Veränderungen des Kristallinitätsgrads durch die ein- und zweistufigen Nachbehandlungen wider. Dies ist besonders bedeutsam, da die teilweise beobachteten Verbesserungen der Zugfestigkeit durch die Nachbehandlungen (vgl. Kapitel 5.2.1) mit einer veränderten Morphologie, insbesondere einer Kristallinitätsgraderhöhung, Veränderung der Oberfläche, Reduktion von fertigungsbedingten Eigenspannungen und/oder Reduktion von Inhomogenitäten der inneren Struktur grundsätzlich zu erklären sind. Gerade für die chemisch geglätteten PA12-Lasersinterterteile, welche mit die größte Zugfestigkeitserhöhung aufwiesen, verändert sich der Kristallinitätsgrad kaum. Wie in Kapitel 5.3.1 und 5.3.2 diskutiert, scheinen demnach die Veränderungen der Oberfläche und inneren Struktur, möglicherweise im Zusammenspiel mit den anderen genannten Einflüssen, für die Veränderungen der Zugfestigkeit ursächlich zu sein.

Tabelle 5.21: Veränderung des Kristallinitätsgrads von 1 mm dicken PA12-Lasersinter-teilen nach einstufiger (links) und zweistufiger (rechts) Nachbehandlung; erster und zweiter Heizlauf.

	1. Heizlauf	2. Heizlauf
Verdichtungsstrahlen	-1,6 -0,2	-1,0 -1,1
Gleitschleifen	-3,4 +2,8 -0,6	+1,3 -1,4 ±0,0
Chemisches Glätten	-2,2 -1,2	+0,2 +1,2
Laserglätten	-0,8	+1,1
Färben	+0,8	-0,2
Infiltrieren	+1,9	±0,0

		1. Heizlauf	2. Heizlauf
Färben +	Verdichtungsstrahlen	-1,0	-0,4
	Gleitschleifen	+0,3	+0,1
	Chemisches Glätten	-3,0	+0,5
	Infiltrieren	-0,4	+0,4

Die Thermogramme des ersten und zweiten Heizlaufs der **unbehandelten und einstufig nachbehandelten Lasersinter-teile** aus dem **PA11-Werkstoff** sind in Abbildung 5.46 dargestellt. Für die nachbehandelten PA11-Lasersinter-teile wurde jeweils zusätzlich der Kurvenverlauf der unbehandelten Lasersinter-teile desselben Baujobs mit aufgetragen (gestrichelte schwarze Linie). Dabei sind im ersten Heizlauf leichte Abweichungen zu erkennen, die sich auch im aus den Thermogrammen abgeleiteten Kristallinitätsgrad (vgl. Abbildung 5.47) zeigen. Diese sind auf die durchgeführten Nachbehandlungen zurückzuführen. Da im zweiten Heizlauf alle Kurven sehr gut übereinstimmen, ist eine irreversible Materialveränderung bzw. -schädigung durch die Nachbehandlungen auszuschließen.

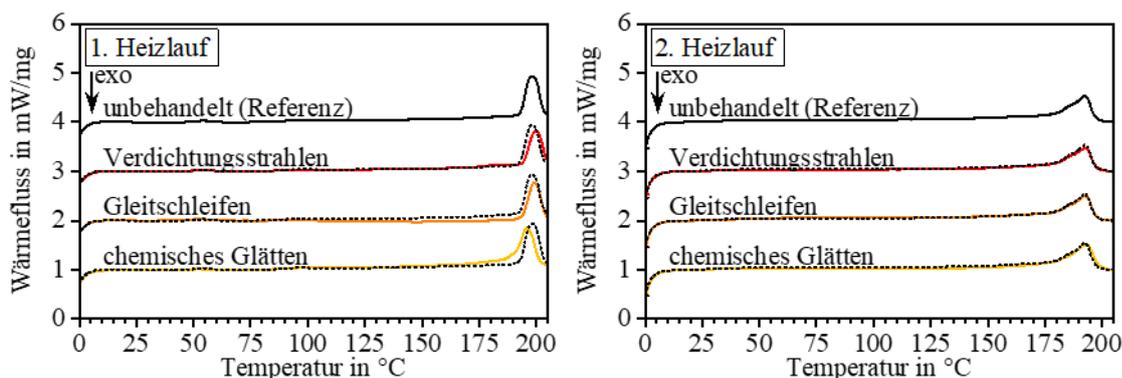


Abbildung 5.46: Thermogramme von 1 mm dicken PA11-Lasersinter-teilen vor und nach einstufiger Nachbehandlung; erster Heizlauf (links) und zweiter Heizlauf (rechts).

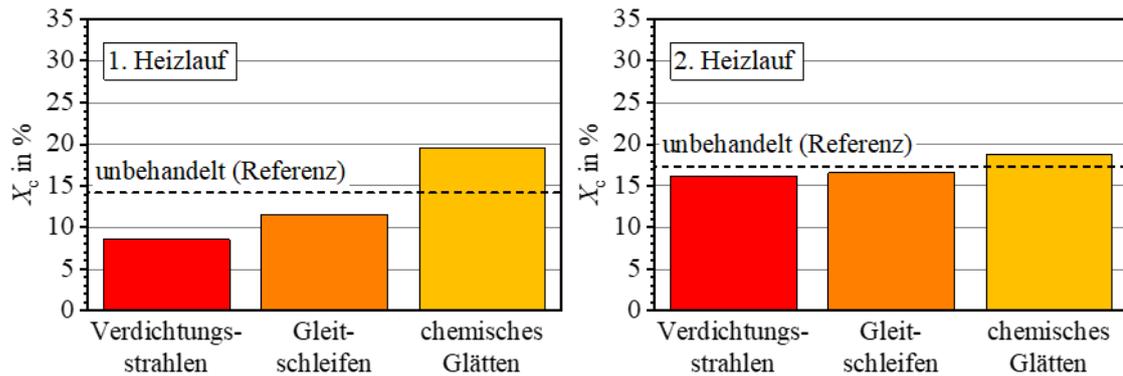


Abbildung 5.47: Thermogramme und Kristallinitätsgrad von 1 mm dicken PA11-Lasersinterteilen nach einstufiger Nachbehandlung in Relation zur unbehandelten Referenz (gestrichelte Linie); erster Heizlauf (links) und zweiter Heizlauf (rechts).

Die Thermogramme der mit denselben Verfahren wie die PA11-Lasersinterteilen nachbehandelten Lasersinterteile aus dem **glasgefüllten PA12-Werkstoff** sind in Abbildung 5.48 dargestellt. Mit Ausnahme des chemischen Glättens stimmen die Kurvenverläufe bereits im ersten Heizlauf gut überein. Eine leichte Veränderung der Morphologie durch die Nachbehandlung wurde demnach nur in dem genannten Fall mittels DSC detektiert – dies passt gut zu den Beobachtungen bzgl. der Änderungen der inneren Struktur (vgl. Kapitel 5.3.2). Von einer irreversiblen Materialschädigung durch die durchgeführten Nachbehandlungen ist auf Basis der DSC-Resultate nicht auszugehen, da die Thermogramme des zweiten Heizlaufs der glasgefüllten PA12-Lasersinterteile mit und ohne Nachbehandlung sehr gut übereinstimmen.

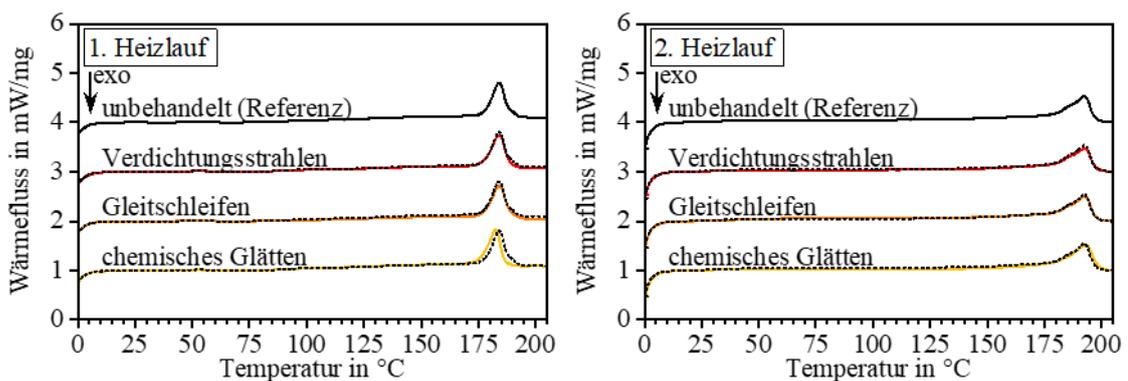


Abbildung 5.48: Thermogramme von 1 mm dicken glasgefüllten PA12-Lasersinterteilen vor und nach einstufiger Nachbehandlung; erster Heizlauf (links) und zweiter Heizlauf (rechts).

Die in allen Fällen nahezu identischen Kristallinitätsgrade (vgl. Abbildung 5.49) sprechen für eine näherungsweise gleiche Morphologie der unbehandelten sowie nachbehandelten glasgefüllten PA12-Lasersinterteile im untersuchten Rahmen.

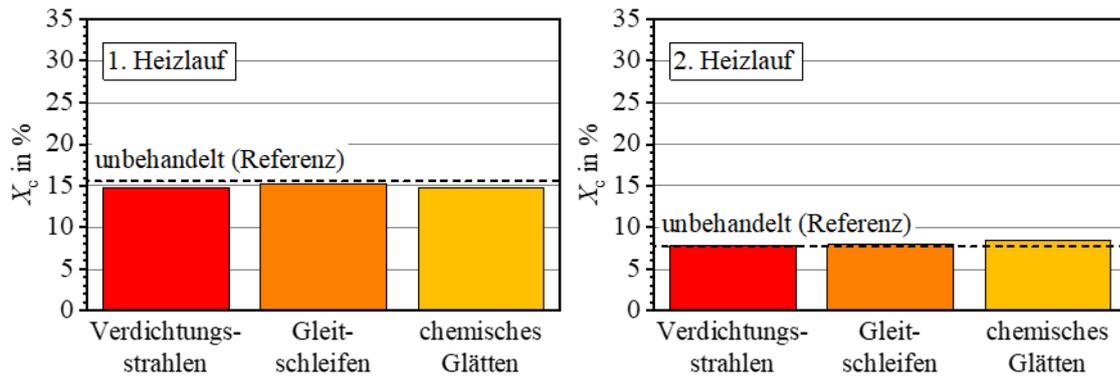


Abbildung 5.49: Kristallinitätsgrad von 1 mm dicken glasgefüllten PA12-Lasersinterteilen nach einstufiger Nachbehandlung in Relation zur unbehandelten Referenz (gestrichelte Linie); erster Heizlauf (links) und zweiter Heizlauf (rechts).

Für die auf einer anderen Maschine gefertigten glasgefüllten PA12-Lasersinterteile stimmen sowohl die Thermogramme (Abbildung 5.50) als auch die daraus ermittelten Kristallinitätsgrade (Abbildung 5.51) unabhängig von den erfolgten Nachbehandlungen für den ersten und zweiten Heizlauf sehr gut überein. Ein Hinweis auf irreversible Materialschädigungen wurde nicht gefunden, wie der zweite Heizlauf belegt.

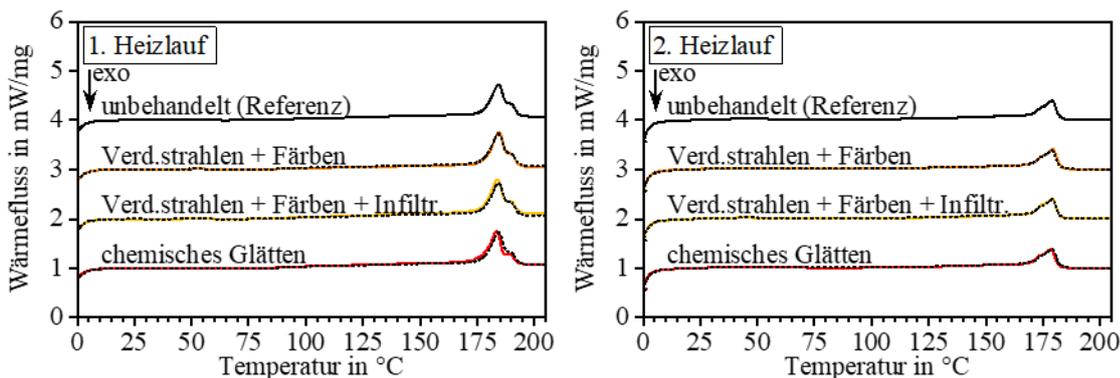


Abbildung 5.50: Thermogramme von 1 mm dicken glasgefüllten PA12-Lasersinterteilen vor und nach ein-, zwei- und dreistufiger Nachbehandlung; erster Heizlauf (links) und zweiter Heizlauf (rechts).

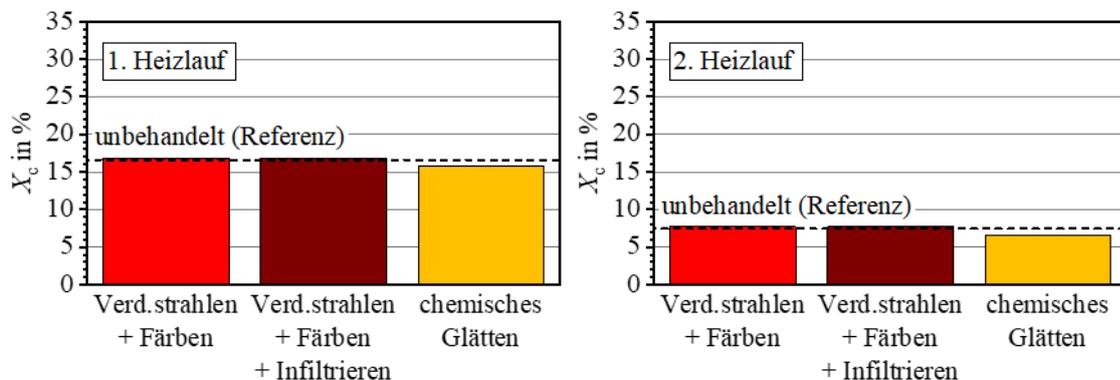


Abbildung 5.51: Kristallinitätsgrad von 1 mm dicken glasgefüllten PA12-Lasersinterteilen nach ein-, zwei- und dreistufiger Nachbehandlung in Relation zur unbehandelten Referenz (gestrichelte Linie); erster Heizlauf (links) und zweiter Heizlauf (rechts).

6 Zusammenfassung und Handlungsempfehlungen

Im Rahmen der Forschungsarbeiten wurden zunächst Lasersinterteile aus PA12 unter Variation der Wanddicke und Baurichtung hergestellt. Die lasergesinterten Kunststoffbauteile wiesen erwartungsgemäß eine poröse innere und äußere Struktur auf, die zudem von der Baurichtung abhing. Das mechanische Verhalten wurde neben dem Material und dessen Morphologie auch von der inneren und äußeren Struktur sowie der Wanddicke bestimmt. Die PA12-Lasersinterteile wurden mit einer Vielzahl an Verfahren nachbehandelt. Die Charakterisierung der mechanischen und optischen Eigenschaften ermöglichte die Untersuchung und Bewertung des Einflusses der Nachbehandlungsverfahren auf die mechanischen Eigenschaften der lasergesinterten Kunststoffbauteile. Hierbei waren die eingesetzten etablierten Prüfmethoden geeignet, um die inneren und äußeren Eigenschaften sowie das mechanische Verhalten quantitativ zu erfassen sowie Wirkzusammenhänge aufzuklären. Abschließend wurden die folgenden Erkenntnisse anhand weiterer Werkstoffe (PA11 und glasgefülltes PA12) validiert:

- Mit Ausnahme der gewünschten Veränderungen beim Färben, beeinflussen die Nachbehandlungen die Helligkeits- und Farbwerte der Lasersinterteile kaum. Bestehen diesbezüglich sehr enge Vorgaben, ist zu überprüfen, inwiefern diese eingehalten werden können.
- Verfahrensbedingt weisen die Lasersinterteile einen geringen Glanz auf. Während das Färben eine leichte Reduktion bewirken kann, erzielen auf eine Glättung der Oberflächen ausgerichtete Verfahren tendenziell eine leichte Erhöhung. Diese fiel beim chemischen Glätten am größten aus. Sind Oberflächen mit hohen Glanzwerten gefordert, so ist der Einsatz anderer Nachbehandlungsmethoden (bspw. Lackieren oder Metallisieren) oder die Verwendung eines anderen Fertigungsverfahrens notwendig.
- Das mechanische Verhalten der Lasersinterteile ist verfahrensbedingt makroskopisch spröde, obwohl mit PA ein eigentlich duktiler Werkstoff eingesetzt wurde – daran ändern auch die untersuchten Nachbehandlungsverfahren nichts. Ein Bruchversagen erfolgt somit spontan, d. h. ohne nennenswerte vorherige Verformung über einen längeren Zeitraum.

- Das mechanische Verhalten unter Zugbeanspruchung ist abhängig von der Baurichtung und Wanddicke: Die Zugfestigkeit und Bruchdehnung der 1 mm dicken Lasersinterteile ist dabei geringer als die der 4 mm dicken Lasersinterteile. Während die Bruchdehnung von den untersuchten Nachbehandlungsverfahren wanddickenunabhängig wenig beeinflusst wird, kann die Zugfestigkeit der 1 mm dicken Lasersinterteile, durch die Oberflächen glättende Nachbehandlungsverfahren erhöht werden. Dabei bleiben baurichtungsabhängige Unterschiede bestehen, obwohl die Oberflächenrauheit angeglichen wird. Folglich bestimmt, neben der Oberflächenstruktur, die innere Struktur das Verhalten. Demnach sollte die Baurichtungsabhängigkeit des mechanischen Verhaltens bei der Herstellung, d. h., die Ausrichtung im Bauraum, berücksichtigt werden. Dies gilt insbesondere für dünnwandige Lasersinterteile, für die eine Verbesserung der Zugfestigkeit durch eine Nachbehandlung der Oberflächen möglich erscheint.
- Das mechanische Verhalten der untersuchten 4 mm dicken Lasersinterteile unter Schlagbeanspruchung ist ebenfalls deutlich baurichtungsabhängig und kann durch die Nachbehandlung kaum verändert werden. Dabei streuen die Messwerte, wie schon die Bruchdehnung unter Zugbeanspruchung, deutlich. Beides sollte durch angemessene Sicherheitsfaktoren bei der Konstruktion berücksichtigt werden.

Die Bewertung erfolgte auf Basis einer vergleichenden Untersuchung nachbehandelter und unbehalteter mittels Lasersinterverfahren hergestellter Kunststoffbauteile. Da die Untersuchungen an einer einfachen Bauteilgeometrie durchgeführt wurden, blieben Änderungen des mechanischen Verhaltens durch nachbehandlungsbedingte Geometrieänderungen (bspw. Ecken-/Kantenverrundung) unberücksichtigt. Eine Auslegung anhand der Kennwerte unbehalteter Lasersinterteile als erste Abschätzung erscheint dennoch möglich. Hierbei stellen die Werkstoffeigenschaften den theoretischen Maximalwert dar. Die tatsächlich erreichbaren Werte sind bei Lasersinterteilen jedoch abhängig von der Baurichtung und Wanddicke zu ermitteln. Im Rahmen der Forschungsarbeiten wurden ausschließlich Polyamide untersucht – die Anwendbarkeit für andere Thermoplaste sollte ebenso wie die Auswirkungen auf die Langzeiteigenschaften (wie bspw. in [DW20] untersucht) in weiteren Arbeiten betrachtet werden. Aufgrund der Vielzahl an Nachbehandlungsverfahren und -parametern sollte am nachbehandelten Bauteil überprüft werden, ob die anwendungsspezifischen Anforderungen erfüllt werden; dies erscheint insbesondere für sicherheitsrelevante Bauteile notwendig.

7 Literaturverzeichnis

- [ALJ13] Astor, M., von Lukas, U., Jarowinsky, M.: *Marktperspektiven von 3D in industriellen Anwendungen*. Abschlussbericht, Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie, Berlin, **17.01.2013**
- [AMP23] N. N.: *Our Products*. online Information, AM POLYMERS GmbH, Willich, URL: <https://www.am-polymers.de/>, Abruf: **25.07.2023**
- [AMS22] N. N.: *Ihr Partner für industrielle 3D Post Processing-Lösungen*. Firmenbroschüre, AM Solutions / Rösler Oberflächentechnik GmbH, Untermerzbach, **2022**
- [AS14] Allison, A., Scudamore, R.: *Additive Manufacturing: Strategic Research Agenda*. www.AM-platform.com, **2014**
- [Bas10] Bastian, M.: *Einfärben von Kunststoffen*. Carl Hanser Verlag, München, **2010**
- [BBW+13] Breuninger, J., Becker, R., Wolf, A., Rommel, S., Verl, A.: *Generative Fertigung mit Kunststoffen – Konzeption und Konstruktion für Selektives Lasersintern*. Springer Vieweg Verlag, Berlin Heidelberg, **2013**
- [Beu23] Beuth Verlag: *Additive Fertigung, AM-Normen und -Standards – Kunststoffe und Elastomere*. URL: <https://www.beuth.de/de/additive-fertigungsverfahren>, Abruf: **25.07.2023**
- [BMBF17] Bundesministerium für Bildung und Forschung: *Deutschland druckt dreidimensional – Additive Fertigung revolutioniert die Produktion, Die neue Hightech Strategie – Innovationen für Deutschland*. Rostock, **August 2017**
- [CBG14] Cameron, D., Boucher, A., Gaver, B., *Dyeing SLS Parts*. Interaction Research Studio, **2014**
- [Cie23] N. N.: *Wie ist CIELab aufgebaut?*. CIELab, URL: <http://www.cielab.de/>, Abruf: **25.07.2023**
- [Cip23a] N. N.: *Chemische Glättung*. online Information, CIPRES GmbH, Ahorn, URL: <https://www.cipres.biz/de/portfolio/chemische-glaettung/>, Abruf: **25.07.2023**
- [Cip23b] N. N.: *Infiltration*. online Information, CIPRES GmbH, Ahorn, URL: <https://www.cipres.biz/de/portfolio/infiltration/>, Abruf: **25.07.2023**
- [Cir23] N. N.: *Selektives Lasersintern (SLS)*. online Information, Cirp GmbH, Heimsheim, URL: <https://www.cirp.de/verfahren/lasersintern.php5>, Abruf: **25.07.2023**
- [CNEH17] Crane, N. B., Ni, Q., Ellis, A., Hopkinson, N.: Impact of chemical finishing on laser-sintered nylon 12 materials. *Additive Manufacturing*, Vol. 13, pp. 149-155, **2017**
- [Dic23] N. N.: *Selektives Lasersintern (SLS)*. online Information, Dick & Dick Laserschneid- und Systemtechnik GmbH, Leipzig, URL: <https://www.dick-dick.de/technologien/selektives-lasersintern>, Abruf: **25.07.2023**

- [DW20] Drummer, D., Witt, G.: *Ressourcenschonende Kleinserienproduktion durch Kunststoff-Laser-Sintern – Einfluss der Anisotropie und Oberflächenstruktur auf die statischen und dynamischen Langzeiteigenschaften von laser-gesinterten Bauteilen (LZE-LS II)*. Schlussbericht IGF-Nr. 19623 N, Duisburg/Essen, Erlangen/Nürnberg, **2020**.
- [Dye23a] N. N.: *POWERSHOT PERFORMANCE SERIE*. online Information, DyeMansion GmbH, Planegg, URL: <https://dyemansion.com/de/produkte/performance-serie/>, Abruf: **25.07.2023**
- [Dye23b] N. N.: *DM60 SERIE*. online Information, DyeMansion GmbH, Planegg, URL: <https://dyemansion.com/produkte/dm60>, Abruf: **25.07.2023**
- [EOS23] N. N.: *Materials for Industrial 3D Printing*. online Information, EOS GmbH, Krailing, URL: <https://www.eos.info/en/3d-printing-materials>, Abruf: **25.07.2023**
- [Fis15] Fischer, A.: 3D-Druck für die Produktion. *Kunststoffe*, **11/2015**
- [FKM23] N. N.: *3D-Druck-Material*. online Information, FKM Sintertechnik GmbH, Biedenkopf, URL: <https://www.fkm.net/werkstoffe/>, Abruf: **25.07.2023**
- [For23] N. N.: *Lasersintern*. online Information, Formrise GmbH, Töging am Inn, URL: <https://formrise.com/lasersintern>, Abruf: **25.07.2023**
- [Gab16] Gabler, T.: Generative Fertigung wird praxistauglich. *K-Profi*, **3-4/2016**
- [Geb12] Gebhardt, A.: *Understanding Additive Manufacturing*. Carl Hanser Verlag, Munich, **2012**
- [Ger18] Gerets, B.: *Mechanisches Langzeitverhalten additiv gefertigter Kunststoffbauteile*. Schlussbericht zu IGF-Vorhaben Nr. 19020 N, Würzburg, **2018**
- [GH16] Gebhardt, A., Hötter, J.-S.: *Additive Manufacturing*. Carl Hanser Verlag, Munich, **2016**
- [GTH12] Goodridge, R.D., Tuck, C.J., Hague, R.J.M.: Laser sintering of polyamides and other polymers. *Progress in Materials Science*, Vol. 57, pp. 229-267, **2012**
- [H22] H., A.: *Die wichtigsten SLS-Drucker auf dem 3D-Druck-Markt*. online Information, 3Dnatives, URL: <https://www.3dnatives.com/de/sls-drucker-220320181/#!>, Abruf: **25.07.2023**
- [HH23] N. N.: *Additive Fertigung*. online Information, Hasenauer & Hesser GmbH, Mühlacker, URL: <https://hasenauer-hesser.de/additive-fertigung>, Abruf: **25.07.2023**
- [HO16] Hofmann, E., Oettmeier, K.: 3-D-Druck – Wie additive Fertigungsverfahren die Wirtschaft und deren Supply Chains revolutionieren. *Zeitschrift für Führung und Organisation*, Vol. 85, Heft 02, **2016**
- [IIG95] Ippolito, R., Iuliano, L., Gatto, A.: Benchmarking of Rapid Prototyping Techniques in Terms of Dimensional Accuracy and Surface Finish. *CIRP Annals*, Vol. 1, Issue 1, pp. 157-160, **1995**

- [Kad10] Kaddar, W.: *Die generative Fertigung mittels Laser-Sintern: Scanstrategien, Einflüsse verschiedener Prozessparameter auf die mechanischen und optischen Eigenschaften beim LS von Thermoplasten und deren Nachbearbeitungsmöglichkeiten*. Dissertation, Universität Duisburg-Essen, **2010**
- [Kel21] Keller, J.: *Einfluss von Nachbehandlungsverfahren auf Eigenschaften von Lasersinter-Bauteilen aus PA12*. unveröffentlichte Bachelorarbeit, Hochschule für angewandte Wissenschaften Würzburg-Schweinfurt, Betreuer: Prof. Dr.-Ing. L. Schlenk/B. Gerets (SKZ), **06/2021**
- [KM16] Kumbhar, N. N., Mulay, A. V.: Post Processing Methods used to Improve Surface Finish of Products which are Manufactured by Additive Manufacturing Technologies: A Review. *Journal of The Institution of Engineers (India) Series C*, Springer Verlag online, **2016**
- [KPB15] Kietzmann, J., Pitt, L., Berthon, P.: *Disruptions, descisions and destinations: Enter the age of 3-D printing and additive manufacturing*. Business Horizons, Vol. 58 (2015), 209-**2015**
- [Laa15] Laabs, H.-J.: Ist der 3D-Drucker die „Dampfmaschine“ der digitalen Revolution oder eine überschätzte Innovation?. *Sitzungsberichte der Leibnitz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin*, Vol. 122, S. 177-189, **2015**
- [Lam15] Lamack, F.: Customized Fabrication – Mass Customizing mit 3D-Druck. *Wirtschaftsinformatik & Management*, **06/2015**
- [Lux23] N. N.: *Der LUX-Prozess*. online Information, LuxYours GmbH, Planegg, URL: <https://www.luxyours.com/lux-prozess/>, Abruf: **25.07.2023**
- [Mar10] Martínez, A.: Properties comparison of Injected and SLS material. *Rtejournal – Forum für Rapid Technologie*, Vol. 7, ISSN 1614-0923, urn:nbn:de:0009-2-24125, **2010**
- [May18] Mayer, R.: Produkte mit Personality - – Trends der additiven Fertigung mit Kunststoffen. *Plastverarbeiter*, **11/2018**
- [MCB23] N. N.: *Additive Manufacturing – Nachbearbeitung*, online Information. MCB Additive Manufacturing GmbH, Dollern, URL: <http://mcb-group.com/additive-manufacturing/oberflaechenbehandlung/>, Abruf: **25.07.2023**
- [Pro23] N. N.: *Selektives Lasersintern (SLS) – Materialoptionen*. online Information, Proto Labs Germany GmbH, Putzbrunn, URL: <https://www.protolabs.com/de-de/services/3d-druck/selektives-lasersintern/#Materialoptionen>, Abruf: **25.07.2023**
- [Rap23] N. N.: *Das richtige Finish für Ihr 3D-Druck Bauteil*. online Information, rapidobject GmbH, Leipzig, URL: <https://www.rapidobject.com/3d-druck-oberflaechenfinish/>, Abruf: **25.07.2023**
- [Rit18] Ritter-Lenzing, B.: *Wenn wir es richtig angehen, dann wird Additive Manufacturing den deutschen und europäischen Maschinenbau stärken*. VDMA AG Additive Manufacturing, 23.08.**2018**
- [Rit19] Ritter, S.: *formnext AM Field Guide 2019*. Messago Messe Frankfurt GmbH, Frankfurt a. M., **2019**

- [Rot17] Rother, H.: *3D-Drucken... und dann?– Weiterverarbeitung, Verbindung & Veredelung von 3D-Druck-Teilen*. Carl Hanser Verlag, München, **2017**
- [SBW+18] Seifert, I., Bürger, M., Wangler, L., Christmann-Budiean, S., Rohde, M., Gabriel, P., Zinke, G.: *Potenziale der Künstlichen Intelligenz im produzierenden Gewerbe in Deutschland*. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) im Rahmen der Begleitforschung zum Technologieprogramm PaiCE – Platforms | Additive Manufacturing | Imaging | Communication | Engineering, Berlin, **Juli 2018**
- [Sch15] Schmid, M.: *Selektives Lasersintern (SLS) mit Kunststoffen – Technologie, Prozesse und Werkstoffe*. Carl Hanser Verlag, München, **2015**
- [SD20a] N. N.: *Manuelle Topffärbung vs. industrielles DeepDye Coloring*. online Information, Solidpro GmbH, Langenau/DyeMansion, Planegg, **2020**
- [SL10] Schmid, M., Levy, G.N.: Finishing und Coating von SLS-Teilen für Additive Manufacturing. *Rtejournal (urn:nbn:de:0009-2-26364)*, **2010**
- [SSL98] Schmid, M., Simon, C., Levy, G. N.: *Finishing of SLS-Parts for Rapid Manufacturing (RM) – A Comprehensive Approach –*. Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin (USA / TX), **1998**
- [Tec23] N. N.: *Oberflächenbehandlung*. online Information, Techno-Grafica GmbH, Kämpfelbach, URL: <https://techno-grafica.de/oberflaechenbehandlung-lasersintern.html>, Abruf: **25.07.2023**
- [Teu23] N. N.: *Selektives Lasersintern, online Information*. Teufel Prototypen GmbH, Unterfahlheim, URL: <https://www.teufel-prototypen.de/de/2014-12-11-13-45-40/selektives-laser-sintern.html>, Abruf: **25.07.2023**
- [Tre00] Trenke, D.: Infiltration von lasergesinterten Bauteilen. *Mitteilungen aus dem Institut für Maschinenwesen der Technischen Universität Clausthal*, Nr. 25, **2000**
- [Tre11] Treffert, C.: Mehr Serie anstatt Prototypen. *Laser Technik Journal*, Nr. 6, **2011**
- [VDI23] Verein Deutscher Ingenieure: *GPL FBI FA105.1 Additive Manufacturing – Kunststoffe*. URL: <https://www.vdi.de/tg-fachgesellschaften/vdi-gesellschaft-produktion-und-logistik/produktionstechnik-und-fertigungsverfahren>, Abruf: **25.07.2023**
- [Vis23] N. N.: *Oberflächentechnik*. online Information, VISIOTECH GmbH, Leonberg, URL: <https://www.visiotech-gmbh.de/visio-o-oberflaechentechnikauswahl-traegermaterial/oberflaechentechnik-fuer-kunststoffteile/>, Abruf: **25.07.2023**
- [Wal20] N. N.: *Gleitschleifen: So funktioniert es*. WALTER TROWAL!, Haan, online Information, **2020**
- [WHWD15] Wegner, A., Harder, R., Witt, G., Drummer, D.: Determination of Optimal Processing Conditions for the Production of Polyamide 11 Parts using the Laser Sintering Process. *International Journal of Recent Contributions from Engineering, Science & IT (iJES)*, Vol. 3/1, **2015**
- [Wil12a] Willenborg, E.: *Laserpolieren von Metallen*. Fraunhofer ILT, Aachen, **2012**

-
- [Wil12b] Willenborg, E.: *Laserpolieren von Glas und Kunststoff*. Fraunhofer ILT, Aachen, **2012**
- [Woh18] Wohlers, T.: *Wohlers Report 2018 Shows Dramatic Rise in Metal Additive Manufacturing and Overall Industry Growth of 21%*. Wohlers Associates, Colorado (USA), press release, **27.03.2018**

8 Anhang

8.1 Untersuchung der Bauraumhomogenität

Vor der für die Untersuchungen des Nachbehandlungseinflusses verwendeten Lasersinterteile aus dem PA12-Musterwerkstoff, wurde die Bauraumhomogenität untersucht. Dazu wurden in jeder Baurichtung – stehend, liegend und diagonal, 1 mm und 4 mm dicke Lasersinterteile, wie in Kapitel 4.2 beschrieben, additiv gefertigt. Anschließend wurde jeweils die eine Hälfte der PA12-Lasersinterteile einer 3-Punkt-Biegeprüfung unterzogen und die andere Hälfte einer Zugprüfung – die PA12-Lasersinterteile wurden vorab getrocknet (vgl. Kapitel 4.4.2).

Die Resultate der Zugversuche sind nachfolgend für jede Baurichtung dargestellt. Dabei markieren die schwarzen Punkte die Position der geprüften PA12-Lasersinterteile im Bauraum. In Abbildung 8.1 ist der E-Modul aufgetragen. Deutlich zeigt sich der Einfluss der Baurichtung, da die diagonal gefertigten PA12-Lasersinterteile wanddickenunabhängig niedrigere E-Moduli aufweisen. Die E-Moduli der 1 mm dicken PA12-Lasersinterteile war grundsätzlich niedriger als jene der 4 mm dicken PA12-Lasersinterteile. Insgesamt werden unabhängig von der Position im Bauraum jeweils nahezu identische Resultate erzielt, was für eine gute Homogenität spricht. In Abbildung 8.2 sind die Resultate der aus den Zugversuchen ermittelten Festigkeiten dargestellt, als Maß dafür wurde die Maximalspannung herangezogen. Bei insgesamt guter Bauraumhomogenität zeigen sich erneut die Einflüsse der Baurichtung und Wanddicke. So ist die Festigkeit der liegend gefertigten PA12-Lasersinterteile am größten und für die 4 mm dicken PA12-Lasersinterteile höher als bei den 1 mm dicken PA12-Lasersinterteilen. Für die in den Zugversuchen bestimmten Bruchdehnungen als Maß für die Zähigkeit wurden ebenfalls recht homogene Resultate erzielt (vgl. Abbildung 8.3), beachtet man die typischerweise etwas größere, zu erwartende Messwertstreuung bei sprödem Werkstoffversagen, da stets die schwächste Stelle über das Versagen entscheidet. Hierbei sollte zudem berücksichtigt werden, dass die Messwerte aus Einfachbestimmungen stammen, da ansonsten jeder Baujob mehrfach gefertigt werden müsste. Insgesamt sind die beobachteten Bruchdehnungen sehr niedrig und die Unterschiede zwischen den verschiedenen Baurichtung fallen eher gering aus.

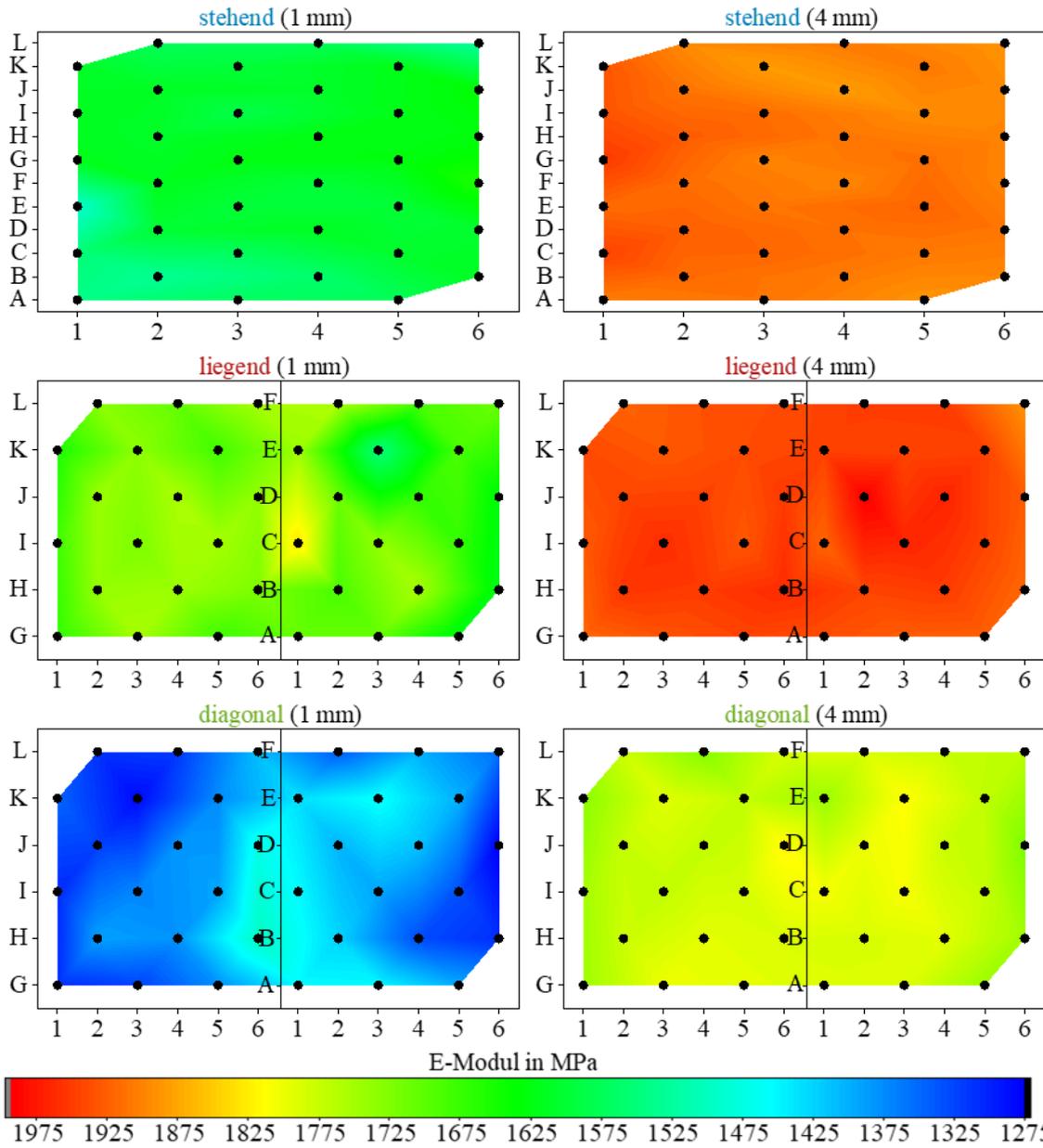


Abbildung 8.1: Zug-E-Modul von 1 mm (links) und 4 mm (rechts) dicken PA12-Lasersinterteilen in Abhängigkeit von der Baurichtung und Position im Bauraum.

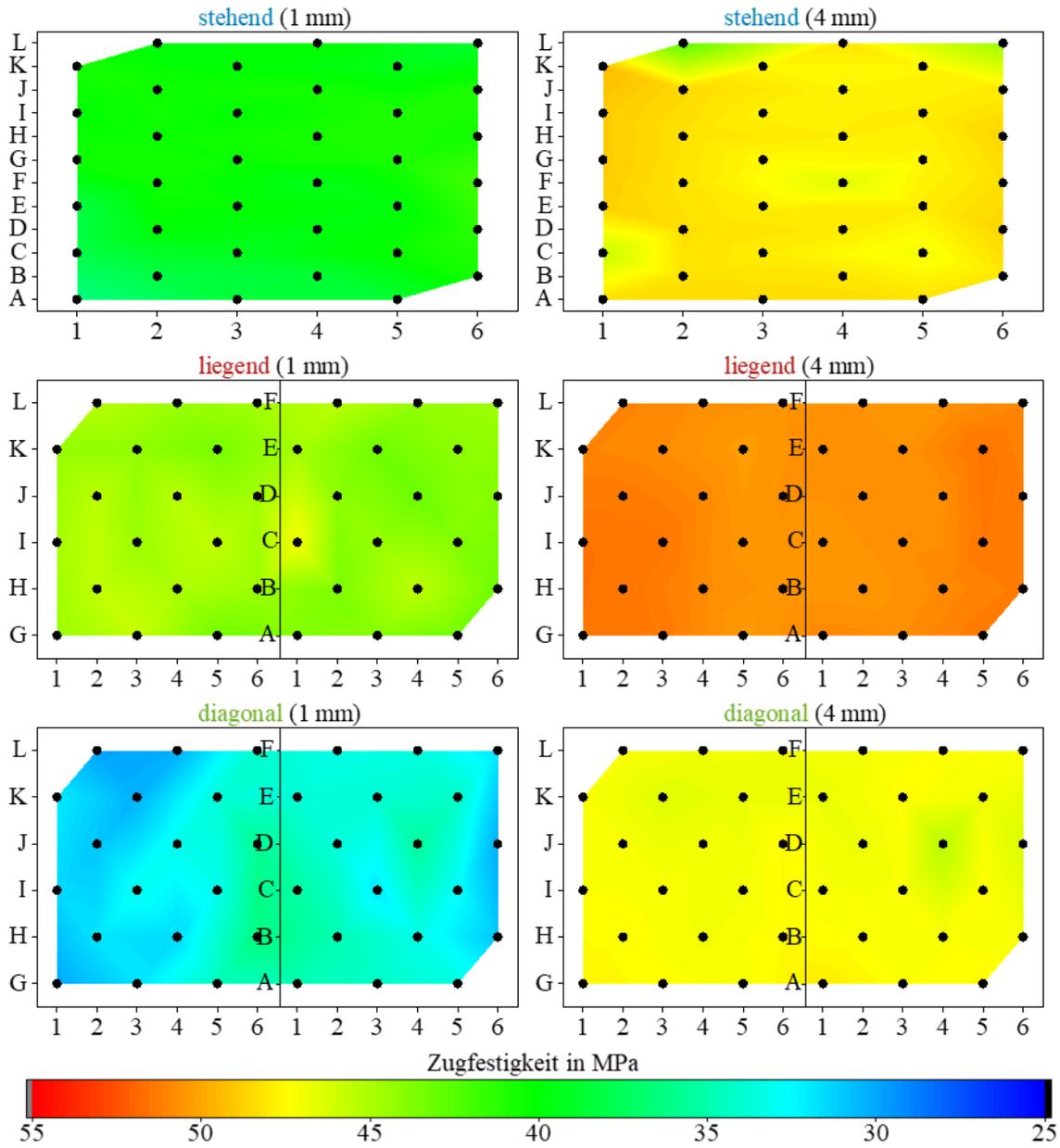


Abbildung 8.2: Zugfestigkeit von 1 mm (links) und 4 mm (rechts) dicken PA12-Laser-sinterteilen in Abhängigkeit von der Baurichtung und Position im Bauraum.

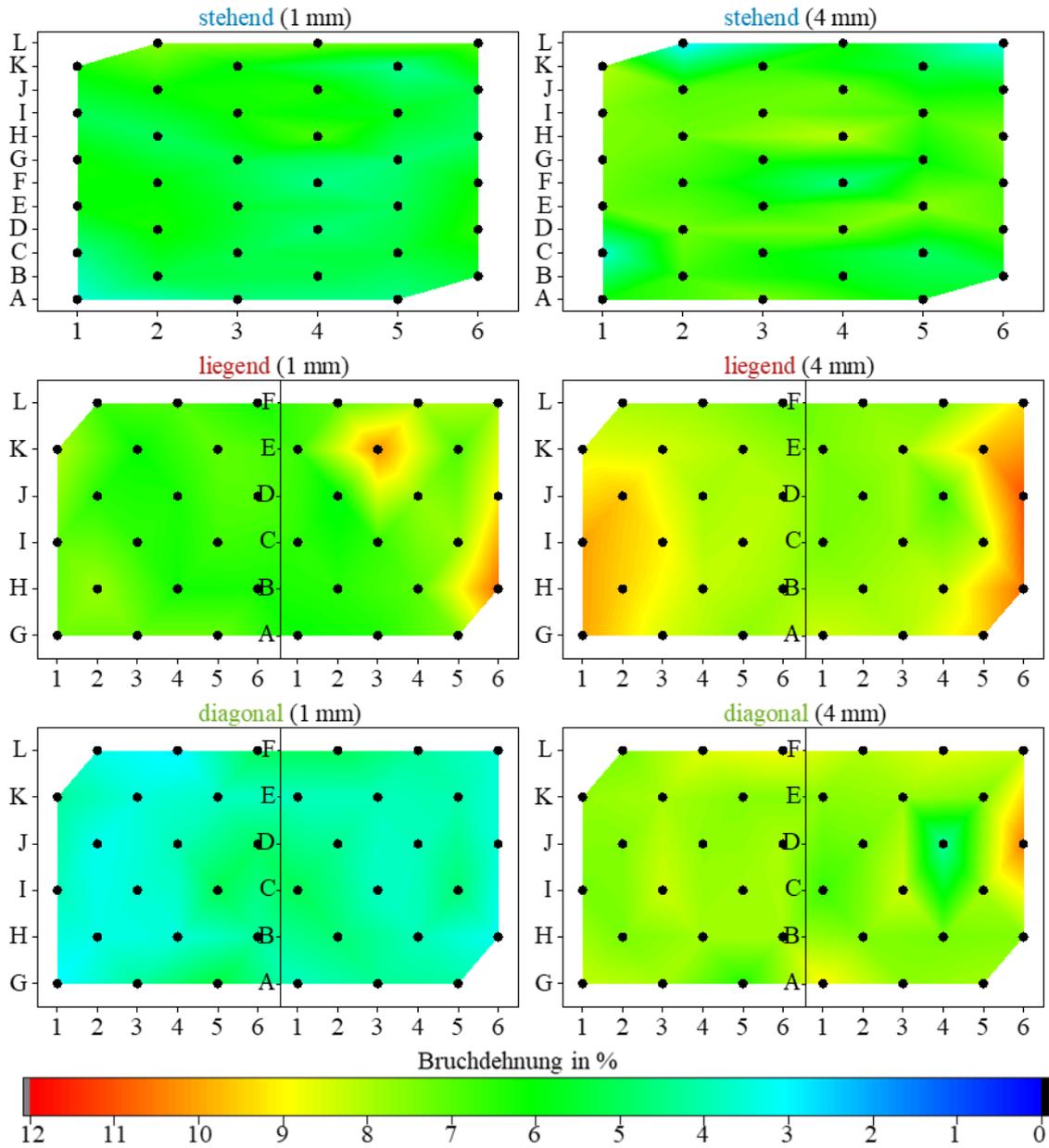


Abbildung 8.3: Bruchdehnung unter Zugbeanspruchung von 1 mm (links) und 4 mm (rechts) dicken PA12-Lasersinterteilen in Abhängigkeit von der Baurichtung und Position im Bauraum.

In den Biegeprüfungen traten technische Probleme bei der Durchführung auf. So berühren die Schultern der Probekörper Typ 1A nach DIN EN ISO 527-2 bei Erreichen einer bestimmten Durchbiegung das Prüfequipment, sodass keine freie Verformung mehr stattfinden kann (vgl. Abbildung 8.4 links). Dieses Problem konnte durch Entfernung der Probekörperschultern und einer ausschließlichen Prüfung des parallelen Bereichs gelöst werden (vgl. Abbildung 8.4 rechts). Allerdings verformten sich die 1 mm dicken PA12-Lasersinterbauteile unter Biegebeanspruchung so stark, dass sie zwischen Widerlager und Druckfinne eingeklemmt wurden. Dadurch sind die ermittelten Kräfte und Bruchdehnungen nicht sinnvoll ermittelbar. Bei den 4 mm dicken PA12-Lasersinterbauteilen wurde z. T. das Abbruchkriterium von 13 % Dehnung erreicht.



Abbildung 8.4: 1 mm dicke PA12-Lasersinterbauteile während der 3-Punkt-Biegeprüfung; Probekörper Typ 1A nach DIN EN ISO 527-2 in kompletter Länge (links) und auf den parallelen Bereich gekürzt (rechts).

In Abbildung 8.5 ist daher ausschließlich der unter Biegebeanspruchung ermittelte E-Modul gezeigt. Dabei wurde die Darstellung analog zu der in Abbildung 8.1 gewählt. Wie schon unter Zugbeanspruchung zeigt sich auch unter Biegebeanspruchung der Einfluss der Baurichtung mit niedrigeren Werten für die diagonal gefertigten PA12-Lasersinterbauteile und der Wanddickeneinfluss mit höheren Werten für die 4 mm dicken PA12-Lasersinterbauteile. Dabei sind die Absolutwerte unter Biegebeanspruchung etwas niedriger als unter Zugbeanspruchung. In allen Fällen ist die Bauraumhomogenität gut.

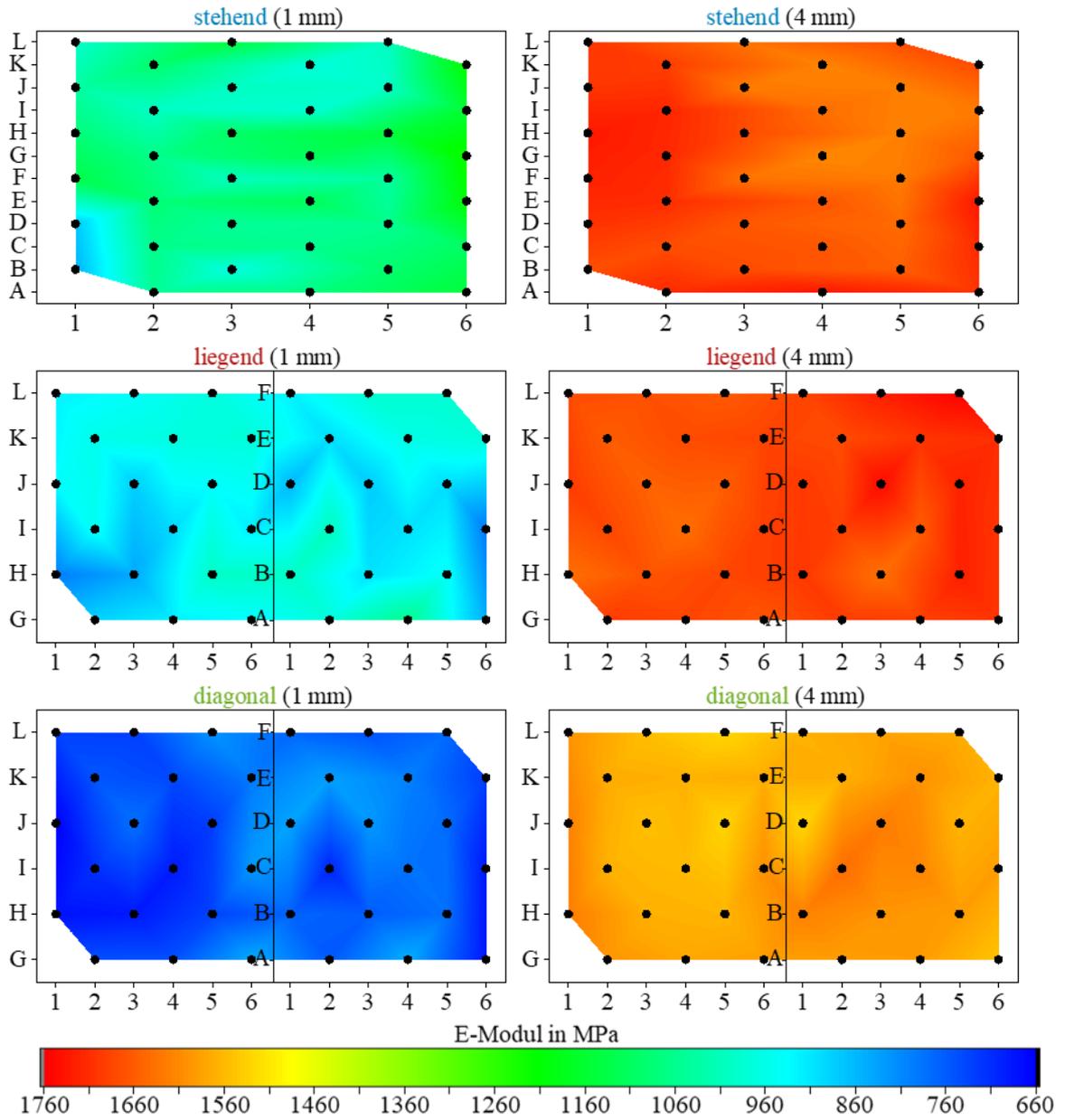


Abbildung 8.5: Biege-E-Modul von 1 mm (links) und 4 mm (rechts) dicken PA12-Lasersinterteilen in Abhängigkeit von der Baurichtung und Position im Bauraum.

8.2 Zuordnung der Lasersinterteile in Blöcke für die Nachbehandlung

Die Lasersinterteile aus dem PA12-Musterwerkstoff wurden für jeden Baujob in drei Blöcke unterteilt (vgl. Abbildung 8.6). Block 1 blieb jeweils unbehandelt und diente als Referenz, wohingegen Block 2 und Block 3 verschiedenen Nachbehandlungsverfahren unterzogen wurden. Insgesamt wurde jede Baurichtung auf sieben verschiedenen Maschinen desselben Typs (vgl. Kapitel 4.2) gefertigt.

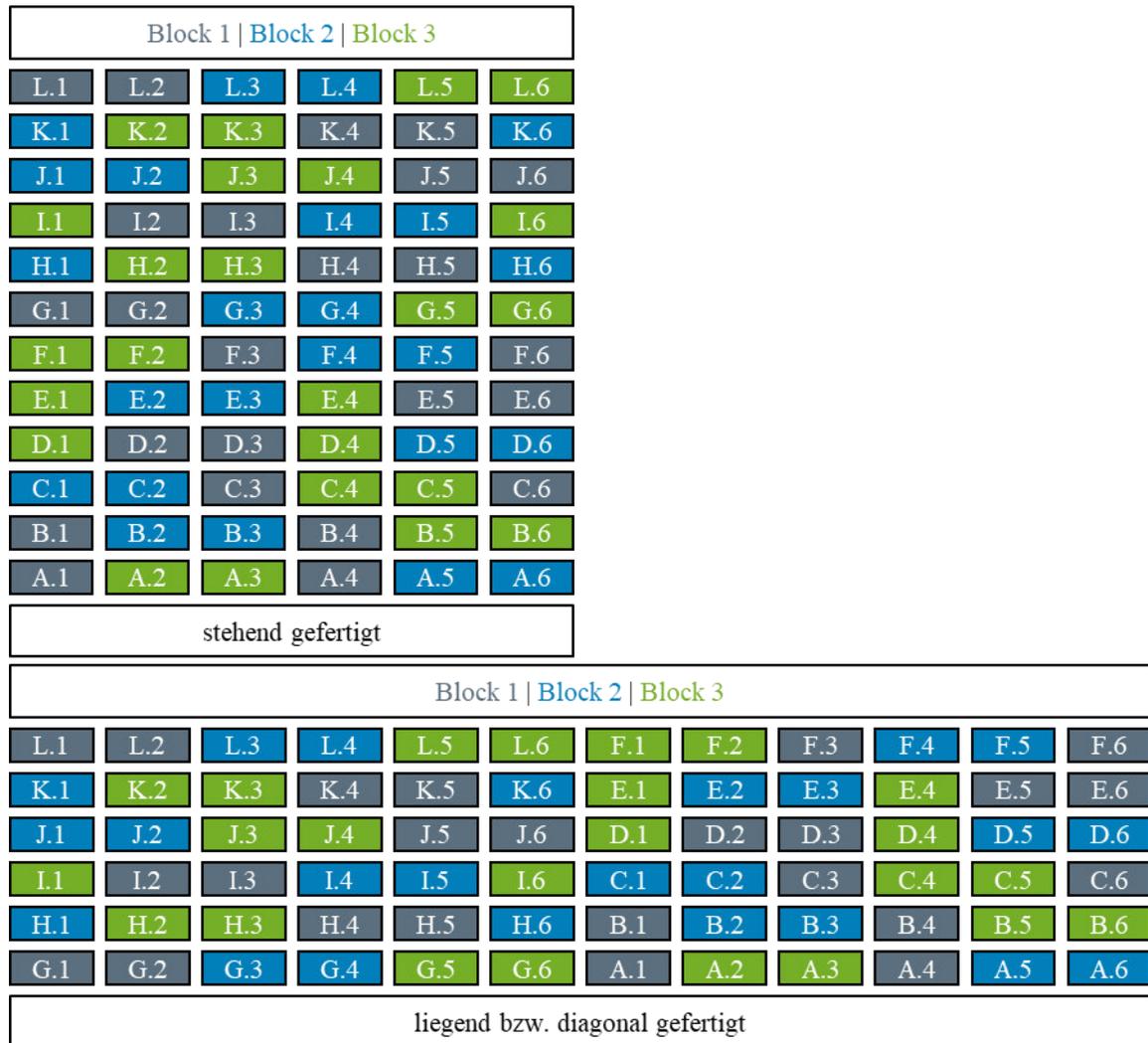


Abbildung 8.6: Zuordnung der Lasersinterteile aus dem PA12-Musterwerkstoff zu Blöcken abhängig von der Baurichtung.

Die Lasersinterteile aus dem PA11-Werkstoff bzw. glasgefüllten PA12-Werkstoff wurden für jeden Baujob in vier Blöcke unterteilt (vgl. Abbildung 8.7). Block 1 blieb jeweils unbehandelt und diente als Referenz, wohingegen die Blöcke 2 bis 4 verschiedenen Nachbehandlungsverfahren unterzogen wurden. Insgesamt wurde jede Baurichtung auf einmal aus dem PA11-Werkstoff gefertigt sowie zweimal aus dem glasgefüllten PA12-Werkstoff, wobei zwei Maschinen unterschiedlichen Typs verwendet wurden (vgl. Kapitel 4.2).

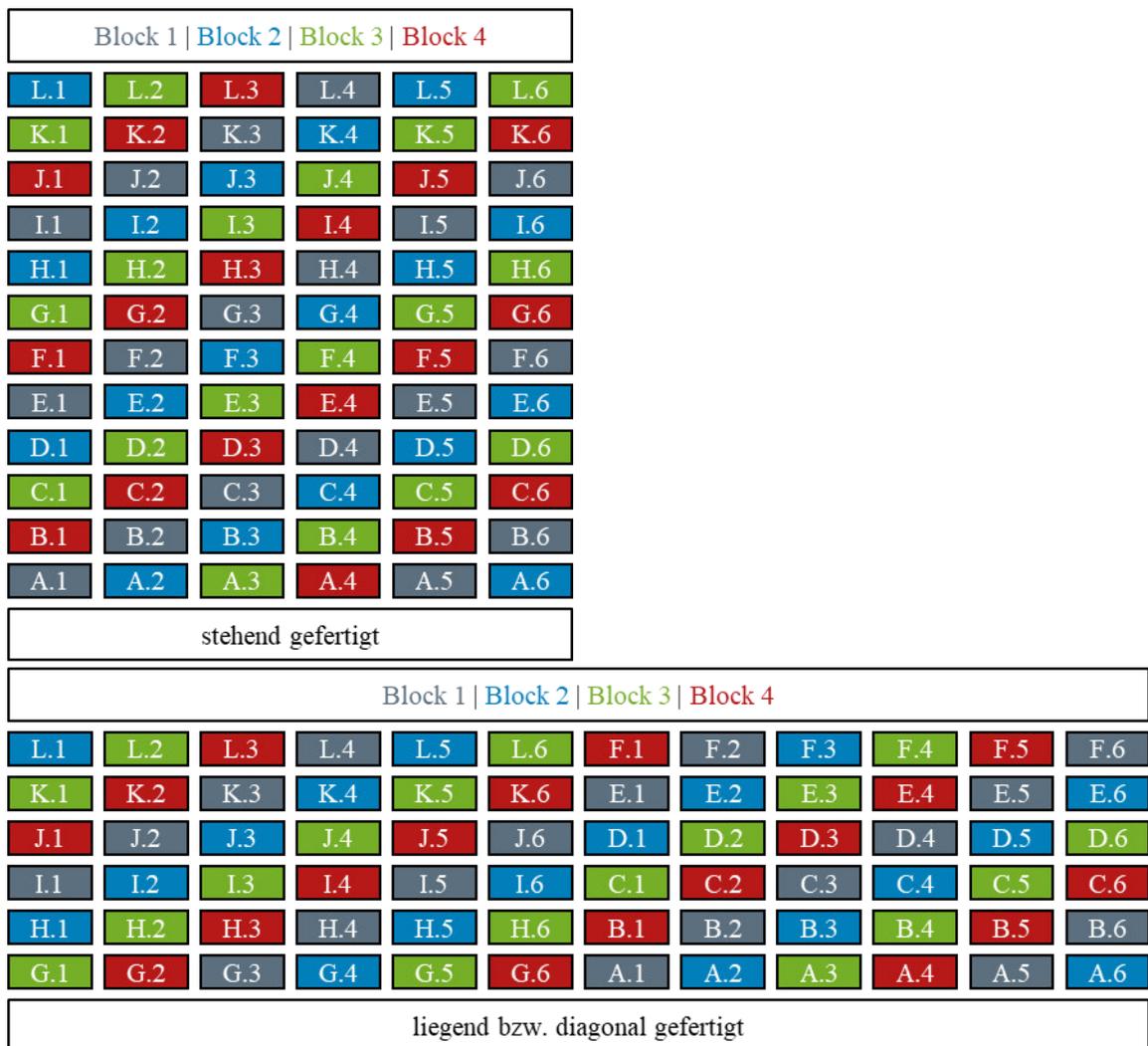


Abbildung 8.7: Zuordnung der Lasersinterteile aus dem PA11-Werkstoff bzw. glasgefüllten PA12-Werkstoff zu Blöcken abhängig von der Baurichtung.

8.3 Zuordnung der Lasersinterteile zu den Charakterisierungsmethoden

Die Lasersinterteile aus dem PA12-Musterwerkstoff jedes Baujobs und Blocks (vgl. Kapitel 8.2) wurden den zur Charakterisierung eingesetzten mechanischen Prüfungen (vgl. Kapitel 4.4.2) sowie Untersuchungen der optischen Eigenschaften (vgl. Kapitel 4.4.1) und der Topografiecharakterisierung (vgl. Kapitel 4.5.1) systematisch zugeordnet. Die Zuordnungen sind Abbildung 8.8 zu entnehmen. Da zum Planungszeitpunkt noch Biegeprüfungen vorgesehen waren, wurden dafür ebenfalls Probekörper vorgesehen.

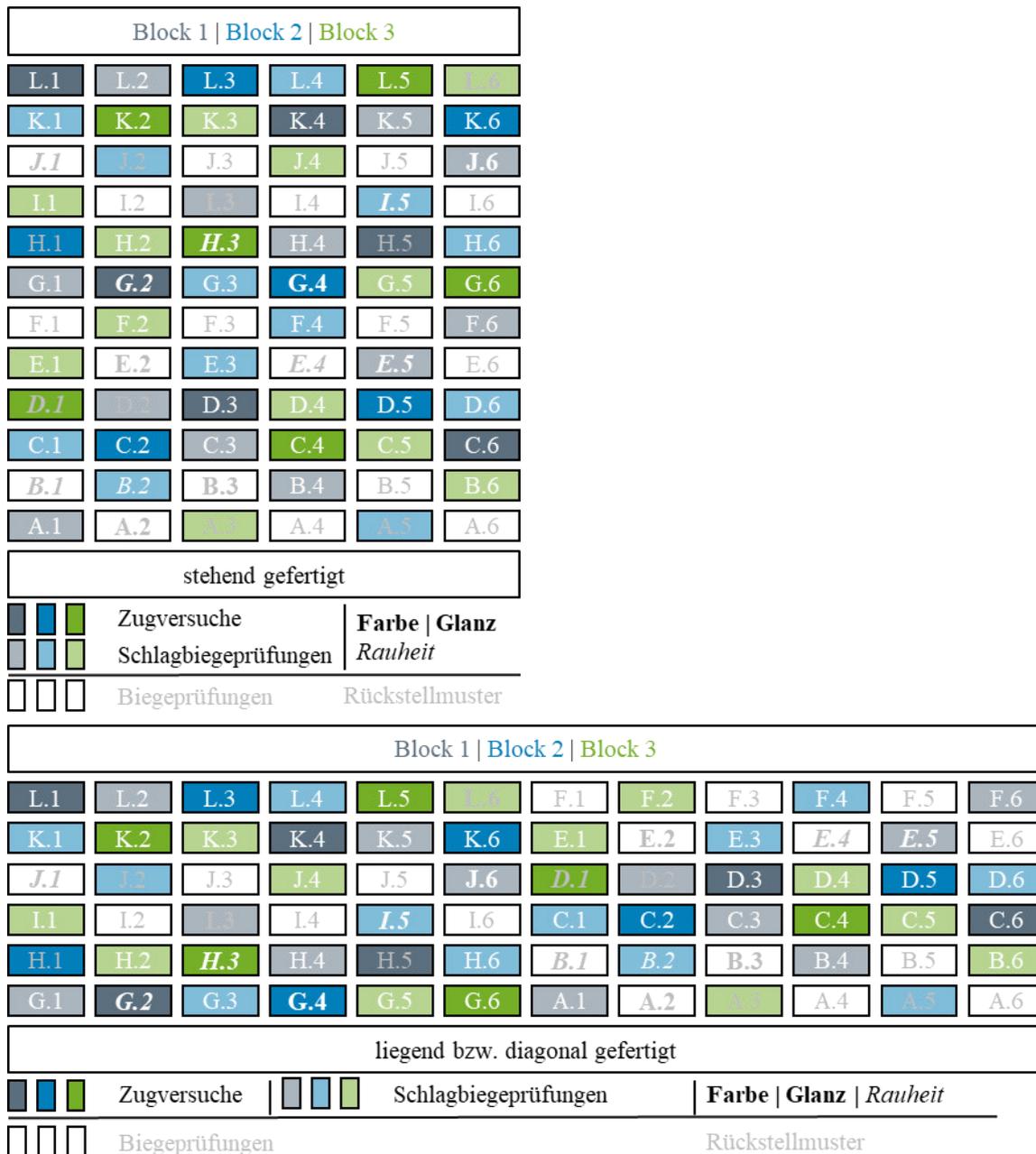


Abbildung 8.8: Zuordnung der Lasersinterteile aus dem PA12-Musterwerkstoff zu Blöcken abhängig von der Baurichtung.

Die Lasersinterteile aus dem PA11-Werkstoff bzw. glasgefüllten PA12-Werkstoff jedes Baujobs und Blocks (vgl. Kapitel 8.2) wurden den zur Charakterisierung eingesetzten mechanischen Prüfungen (vgl. Kapitel 4.4.2) sowie Untersuchungen der optischen Eigenschaften (vgl. Kapitel 4.4.1) und der Topografiecharakterisierung (vgl. Kapitel 4.5.1) ebenfalls systematisch zugeordnet. Die Zuordnungen sind Abbildung 8.9 zu entnehmen.

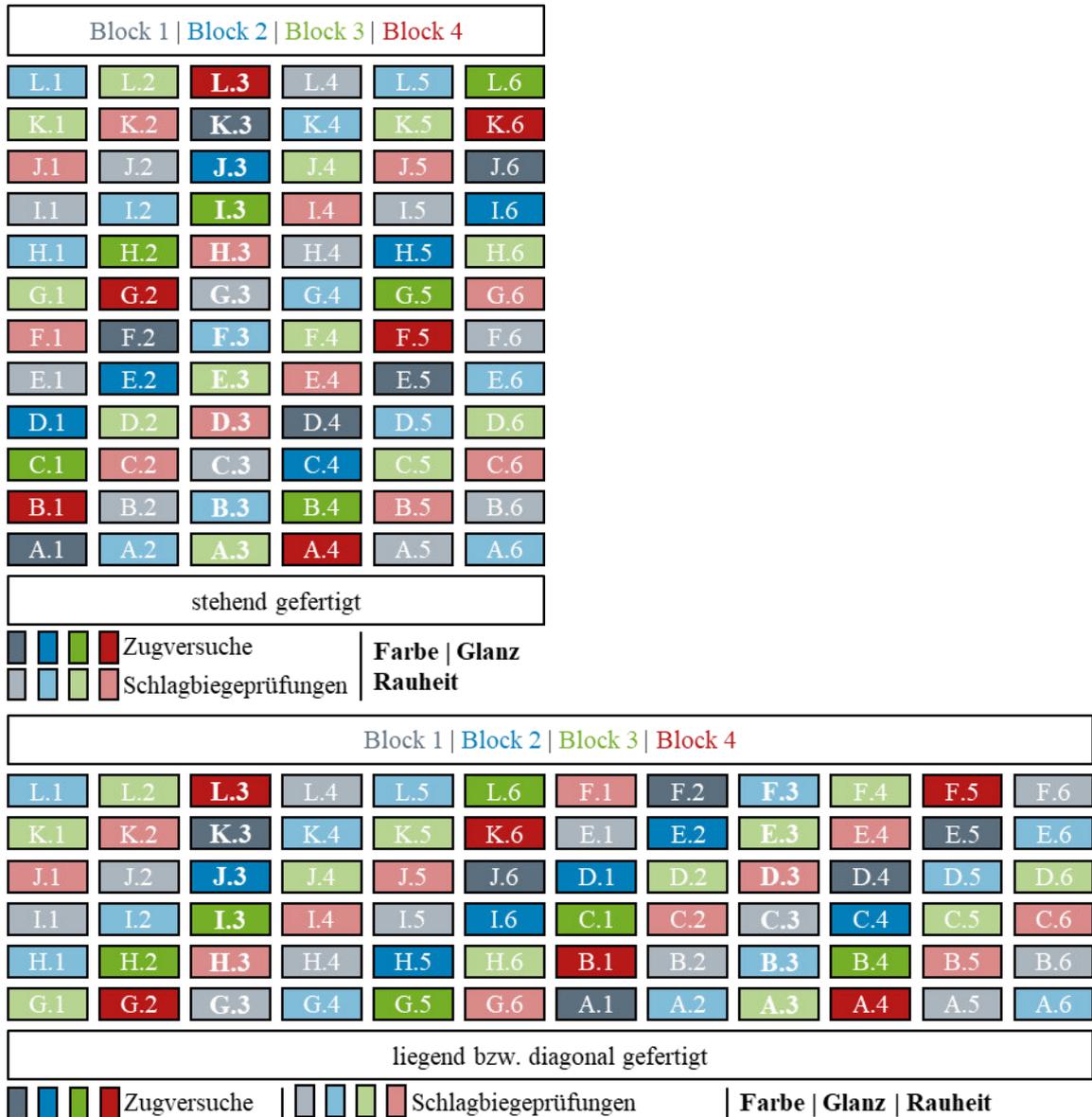


Abbildung 8.9: Zuordnung der Lasersinterteile aus dem aus dem PA11-Werkstoff bzw. glasgefüllten PA12-Werkstoff zu Blöcken abhängig von der Baurichtung.