

**Entwicklung einer Methode zur systematischen Erarbeitung von Konstruktions-
richtlinien für eine fertigungsgerechte Stützstrukturkonstruktion im Laserstrahl-
schmelzen**

zur Erlangung des akademischen Grades
DOKTOR DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)
der Fakultät für Maschinenbau
der Universität Paderborn

genehmigte
DISSERTATION

von
Stefan Lammers, M.Sc.
aus Geseke

Tag des Kolloquiums: 30.09.2024

Referent: Prof. Dr.-Ing. Detmar Zimmer

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Roland Lachmayer

Vorwort

Diese vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Konstruktions- und Antriebstechnik (Kat) sowie am Direct Manufacturing Research Center (DMRC) an der Universität Paderborn verfasst.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Detmar Zimmer. Seine fachkundige Betreuung und konstruktive Kritik haben mir geholfen, meine Forschung auf ein höheres Niveau zu heben. Ich danke ihm für seine Zeit und sein Vertrauen in meine Arbeit. Herrn Prof. Dr.-Ing. Roland Lachmayer danke ich für die Übernahme des Korreferats sowie für die Unterstützung und die hilfreichen Diskussionen. Für ihr Mitwirken in der Promotionskommission danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Volker Schöppner sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Balázs Magyar.

Ein sehr großer Dank gebührt meinen Arbeitskollegen am Lehrstuhl für Konstruktions- und Antriebstechnik (Kat) sowie am Direct Manufacturing Research Center (DMRC), die nicht nur meine wissenschaftliche Neugierde geteilt haben, sondern auch inspirierende Diskussionen und Erkenntnisse beigetragen haben. Die Zusammenarbeit mit euch hat die Zeit der Dissertation umso lohnender gemacht, und ich bin dankbar für die gemeinsamen Erfahrungen, die wir geteilt haben.

Darüber hinaus möchte ich mich bei meinen Studentinnen und Studenten für ihre Unterstützung in Form von experimentellen Tätigkeiten und dem Verfassen von Studien- und Abschlussarbeiten bedanken, die zum Gelingen dieser Dissertation beigetragen haben.

Mein Dank gilt auch meinen Freunden, die mich mit aufmunternden Worten und aufbauender Energie unterstützt haben. Eure aufgeschlossene Haltung und eure aufbauende Gesellschaft haben mir geholfen, das Gleichgewicht zwischen Arbeit und Entspannung zu finden.

Besonders bedanken möchte ich mich bei Claudius Bambeck und meinem Onkel Karl Martin Rieger für das ausführliche Lektorat und die Unterstützung.

Mein größter Dank geht an meine Familie und Verwandten, insbesondere an meine Eltern Robert und Hildegard, und an meine Schwester Silvia, die mir auch in schwierigen Situationen stets Unterstützung und Kraft gaben, selbst wenn die Herausforderungen überwältigend schienen. Danke, dass ihr an mich geglaubt habt.

Stefan Lammers

Büren, Dezember 2024

Zusammenfassung

Additive Fertigungsverfahren, insbesondere das selektive Laserstrahlschmelzen, bieten ein großes technisches Potenzial, weisen aber auch Restriktionen auf. Eine dieser Restriktionen ist die unvermeidbare Verwendung von Stützstrukturen. Um bei der Stützstrukturkonstruktion zu unterstützen, wird im Rahmen dieser Arbeit eine Methode vorgestellt, die eine systematische Erarbeitung von quantifizierbaren Konstruktionsrichtlinien für Stützstruktur im Laserstrahlschmelzen ermöglicht. Dazu werden Grundlagen zu Stützstrukturen und Konstruktionsrichtlinien für die additive Fertigung recherchiert und der aktuelle Forschungsbedarf herausgestellt. Darauf basierend werden experimentelle Untersuchungsmethoden zur Stützstrukturqualitätsbeurteilung entwickelt und durchgeführt. Die Ergebnisse werden aufbereitet und anschließend in Konstruktionsrichtlinien für eine fertigungsgerechte Stützstrukturgestaltung überführt. Die Anwendbarkeit der Konstruktionsrichtlinien wird an einem Anwendungsdemonstrator nachgewiesen. Zusätzlich wird ein Vorschlag zur Spezifikation von Stützstrukturen in technischen Zeichnungen gemacht.

Summary

Additive manufacturing processes, especially selective laser beam melting, offer great technical potential, but also have restrictions. One of these restrictions is the unavoidable use of support structures. In order to support the design of support structures, a method is presented in the context of this thesis, which enables a systematic development of quantifiable design guidelines for support structures in laser beam melting. For this purpose, the basics of support structures and design guidelines for additive manufacturing are investigated and the current need for research is identified. Based on this, experimental investigation methods for support structure quality assessment are developed and carried out. The results are processed and then transferred into design guidelines for a support structure design suitable for production. The applicability of the design guidelines was demonstrated on an application demonstrator. In addition, a proposal is made for the specification of support structures in technical drawings.

Liste der Vorveröffentlichungen

LAMMERS, S.; KOERS, T.; MAGYAR, B.; ZIMMER, D.; LIENEKE, T.: Depiction of support structures in technical drawings, 32th Annual International Virtual Solid Freeform Fabrication (SFF) Symposium – An Additive Manufacturing Conference, Texas, Austin, USA, 14.08.2023 – 16.08.2023

LAMMERS, S.; LIENEKE, T.; ZIMMER, D.: Development of a Method to Derive Design Guidelines for Production-suitable Support Structures in Metal Laser Powder Bed Fusion, 32nd Annual International Virtual Solid Freeform Fabrication (SFF) Symposium – An Additive Manufacturing Conference, Texas, Austin, USA, 02.08.2021 - 04.08.2021. University of Texas, S. 224-239.

LIENEKE, T.; LAMMERS, S.; ZIMMER, D.: Geometrical Deviations In Additive Manufacturing Lammers– Influences On The Manufacturing Accuracy, 32nd Annual International Virtual Solid Freeform Fabrication (SFF) Symposium – An Additive Manufacturing Conference, Texas, Austin, USA, 02.08.2018 - 04.08.2018. University of Texas, S. 437-457

LAMMERS, S.; KRUSE A.; GIERSE J.: Konstruktionsrichtlinien in der Produktentwicklung In: KOCH R.; GRÄßLER I.; ZIMMER D.; TRÖSTER T. (HRSG.) : Mehrzieloptimierte und durchgängig automatisierte Bauteilentwicklung für Additive Fertigungsverfahren im Produktentstehungsprozess - Ergebnisbericht des BMBF Verbundprojektes OptiAMix, Paderborn, 2021, ISBN:978-3-8440-7932-6

LAMMERS, S.; TOMINSKI, J.; ZIMMER, D.: Guidelines for post processing oriented design of additive manufactured parts for use in topology optimization, In: Auricchio, Ferdinando; Rank, Ernst.; Kollmannsberger, Stefan.; Morganti, Simone: Proceedings of II. International Conference on Simulation for Additive Manufacturing Sim-AM 2019, Pavia, Italy, September 11-13, 2019, S. 174-185, ISBN: 978-84-949194-8-0

KÜNNEKE, T.; LIENEKE, T.; LAMMERS, S.; ZIMMER, D.: Design guidelines for post-processing of laser beam melting in context of support structures, In: Bernard, Alain; Leach, Richard; Pedersen, David Bue; Taylor, John: Proceedings of the Special Interest Group meeting on Advancing Precision in Additive Manufacturing, Ecole Centrale de Nantes, France, September 2019; S. 137-140, ISBN: 978-0-9957751-5-2

TOMINSKI, J.; LAMMERS, S.; WULF, C.; ZIMMER, D.: Method for a Software-Based Design Check of Additively Manufactured Components, 29th Annual International Solid Freeform Fabrication (SFF) Symposium – An Additive Manufacturing Conference, Texas, Austin, USA, 13.08.2018 - 15.08.2018. University of Texas, S. 69-79.

KÜNNEKE, T.; BÜCKER, S.; LIENEKE, T.; LAMMERS, S.; ZIMMER, D.: Ein Beitrag zur Anpassung bestehender Konstruktionsmethodiken an die additiven Fertigungsverfahren, In: Michael Kynast, Michael Eichmann und Gerd Witt (Hg.): Rapid.Tech. International Trade Show & Conference for Additive Manufacturing. Proceedings of the 15th Rapid.Tech Conference Erfurt, Germany, 05 - 07 June 2018, Rapid.Tech. Erfurt, 05.06. - 07.06.2018. 1. Aufl. München: Carl Hanser Verlag, S. 128–143, ISBN: 978-3-446-45812-3

URBANEK, S.; PONICK, B.; TAUBE, A.; HOYER, K.-P.; SCHAPER, M.; LAMMERS, S.; LIENEKE, T.; ZIMMER, D.: Additive Manufacturing of a Soft Magnetic Rotor Active Part and Shaft for a Permanent Magnet Synchronous Machine, In: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) (Hg.): Proceedings 2018 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), Long Beach, California, USA, 13.06.2018 – 15.06.2018, S. 668–674, IEEE Catalog Number: CFP18TEB-ART, ISBN: 978-1-5386-3048-8, DOI: 10.1109/ITEC.2018.8450250

LAMMERS, S.; TOMINSKI, J.; MAGERKOHL, S.; KÜNNEKE, T.; LIENEKE, T.; ZIMMER, D.: Design Guidelines for a Software-Supported Adaptation of Additively Manufactured Components with Regard to a Robust Production, 29th Annual International Solid Freeform Fabrication (SFF) Symposium – An Additive Manufacturing Conference, Texas, Austin, USA, 13.08.2018 - 15.08.2018. University of Texas, S. 527-540.

LAMMERS, S.; TOMINSKI, J.; MAGERKOHL, S.; KÜNNEKE, T.; LIENEKE, T.; ZIMMER, D.: Konstruktionsrichtlinien für eine softwaregestützte Anpassung von additiv gefertigten Bauteilen im Hinblick auf eine robuste Fertigung, In: Michael Kynast, Michael Eichmann und Gerd Witt (Hg.): Rapid.Tech. International Trade Show & Conference for Additive Manufacturing. Proceedings of the 15th Rapid.Tech Conference Erfurt, Germany, 05 - 07 June 2018, Rapid.Tech. Erfurt, 05.06. - 07.06.2018. 1. Aufl. München: Carl Hanser Verlag, S. 81–94, ISBN: 978-3-446-45812-3

LAMMERS, S.; QUATTRONE, F.; MROZEK, R.; ZIMMER, D.; SCHMID, H.-J.; PONICK, B.; HOFFMANN, M.: Entwicklung und additive Herstellung einer Leichtbau-Rotorwelle für eine permanentmagneterregte Synchronmaschine, In: Michael Kynast, Michael Eichmann und Gerd Witt (Hg.): Rapid.Tech. International Trade Show & Conference for Additive Manufacturing. Proceedings of the 14th Rapid.Tech Conference Erfurt, Germany, 20 - 22 June 2017, Rapid.Tech. Erfurt, 20.06. - 22.06.2017. 1. Aufl. München: Carl Hanser Verlag, S. 80–93, ISBN: 978-3-446-45460-6, DOI: 10.3139/9783446454606.006

LAMMERS, S.; ADAM, G.; SCHMID, H. J.; MROZEK, R.; OBERACKER, R.; HOFFMANN, M.; QUATTRONE, F.; PONICK, B.: Additive Manufacturing of a lightweight rotor for a permanent magnet synchronous machine In: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) (Hg.): Proceedings 2016 6th International Electric Drives Production Conference (EDPC), Nuremberg, Germany, 30.11.2016 – 01.12.2016, S. 41–45, DOI: 10.1109/EDPC.2016.7851312

Inhaltsverzeichnis	Seite
1 Einleitung.....	1
1.1 Problemstellung.....	1
1.2 Motivation und Zielsetzung	3
2 Stand der Technik und Wissenschaft.....	5
2.1 Terminologie.....	5
2.2 Grundlagen der additiven Fertigung	6
2.3 Selektives Laserstrahlschmelzen	8
2.3.1 Verfahrensablauf und Charakteristika	9
2.3.1.1 Preprocess	9
2.3.1.2 Inprocess.....	12
2.3.1.3 Postprocessing	15
2.3.2 Herausforderungen für den industriellen Einsatz von SLM	15
2.4 Stützstrukturen	17
2.4.1 Anforderungen an Stützstrukturen	19
2.4.2 Gängige Ausführungen von Stützstrukturen	20
2.4.2.1 Dünnwandige Stützstrukturen	21
2.4.2.2 Massive Stützstrukturen	25
2.4.2.3 Weitere Stützstrukturarten	30
2.4.3 Generierung von Stützstrukturen	31
2.4.4 Stützstrukturparameter.....	32
2.4.5 Stützstrukturen Forschungsbedarf.....	34
2.5 Konstruktionsrichtlinien für die additive Fertigung	35
2.5.1 Richtlinien für eine fertigungsgerechten Gestaltung	36
2.5.2 Richtlinien für eine nachbearbeitungsgerechte Gestaltung von AM-Bauteilen	37
2.5.3 Richtlinien für eine fertigungsgerechte Stützstrukturgestaltung	38
2.5.4 Konstruktionsrichtlinien Forschungsbedarf.....	39
3 Zielsetzung und weiteres Vorgehen	40
4 Aufbau der Methode.....	42
4.1 Identifikation von Stützstrukturqualitätskriterien	42
4.2 Entwicklung der Prüfkörper und statistische Versuchsplanung	44
4.2.1 Prüfkörper zur Vorsondierung	44
4.2.2 Anwendungsnahe Prüfkörper auf Basis von Standardelementen	46

4.2.3	Statistische Versuchsplanung	51
4.3	Herstellung der Prüfkörper	56
4.4	Versuchsdurchführung	60
4.4.1	Prüfmittel und Messmethoden	60
4.4.1.1	Abbildegenauigkeit an PK1.1	60
4.4.1.2	Form und Maßhaltigkeit in Z-Richtung an PK1.1.....	61
4.4.1.3	Form- und Maßhaltigkeit in der XY-Ebene an PK1.1	63
4.4.1.4	Ablösbarkeit an PK 1.1	64
4.4.1.5	Oberflächenrauheit an PK1.1	65
4.4.1.6	Datenvorbereitungszeit an PK 1.1	66
4.4.1.7	Datenvolumen an PK 1.1.....	66
4.4.1.8	Materialverbrauch an PK 2.1	67
4.4.1.9	Untersuchungen an PK3.1	68
4.4.1.10	Untersuchungen an PK3.2	70
4.4.1.11	Untersuchung an PK3.3	70
4.4.1.12	Untersuchungen an PK3.4	71
4.4.1.13	Untersuchungen an PK3.5	72
4.4.1.14	Untersuchungen der Toplänge an PK 3.6.....	73
4.4.1.15	Untersuchung der Ablösbarkeit bei eingeschränkter Zugänglichkeit an PK3.7.....	73
4.4.2	Auswertung der Ergebnisse der Vorsondierungsversuche.....	74
4.4.2.1	Auswertung der Abbildegenauigkeit.....	74
4.4.2.2	Auswertung der Form- und Maßhaltigkeit in Z-Richtung.....	78
4.4.2.3	Auswertung der Form- und Maßhaltigkeit in der XY-Ebene..	84
4.4.2.4	Auswertung der Ablösbarkeit	89
4.4.2.5	Auswertung der Oberflächenrauheit	94
4.4.2.6	Auswertung der Datenvorbereitungszeit.....	98
4.4.2.7	Auswertung des Datenvolumens.....	102
4.4.2.8	Auswertung des Materialverbrauchs.....	106
4.4.3	Auswertung der Ergebnisse der anwendungsnahen Prüfkörpern	110
4.4.3.1	Auswertung nicht gekrümmter, außenliegender Oberflächen an PK3.1.....	110
4.4.3.2	Auswertung nicht gekrümmter, innenliegender Oberflächen an PK3.2.....	114
4.4.3.3	Auswertung einfach gekrümmter, außenliegender Oberflächen an PK3.3.....	116
4.4.3.4	Auswertung einfach gekrümmter, innenliegender Oberflächen an PK3.4.....	120
4.4.3.5	Auswertung doppelt gekrümmten Oberflächen an PK3.5 ...	122
4.4.3.6	Auswertung der Toplänge an PK3.6	122
4.4.3.7	Auswertung der Ablösbarkeit bei eingeschränkter Zugänglichkeit.....	123

5	Herleitung von Konstruktionsrichtlinien	125
5.1	Aufbau der Richtlinien	125
5.2	Richtlinie 1.1: Abbildegenuauigkeit – Hatchabstand	127
5.3	Richtlinie 1.2: Abbildegenuauigkeit – Zahngeometrie	129
5.4	Richtlinie 2.1: Maßhaltigkeit Z-Richtung – Hatchabstand und Fragmentierung ..	131
5.5	Richtlinie 2.2: Maßhaltigkeit Z-Richtung – Hatchabstand und Toplänge	133
5.6	Richtlinie 3.1: Maßhaltigkeit XY-Richtung – Hatchabstand und Toplänge	134
5.7	Richtlinie 4.1: Ablösbarkeit – Hatchabstand und Fragmentierung	137
5.8	Richtlinie 4.2: Ablösbarkeit – Hatchabstand und Toplänge	139
5.9	Richtlinie 5.1: Oberflächenrauheit – Zahngeometrie	141
5.10	Richtlinie 5.2: Oberflächenrauheit – Hatchabstand und Fragmentierung	143
5.11	Richtlinie 5.3: Oberflächenrauheit – Orientierung Downskinfläche	145
5.12	Richtlinie 6.1: Datenvorbereitungszeit – Hatchabstand und Fragmentierung	146
5.13	Richtlinie 6.2: Datenvorbereitungszeit – Toplänge	148
5.14	Richtlinie 7.1: Datenvolumen – Hatchabstand	150
5.15	Richtlinie 8.1: Materialverbrauch – Hatchabstand, Zahngeometrie und Fragmentierung	152
6	Validierung	154
6.1	Fraktal-Schraubstock	154
6.2	Herstellung des Fraktal-Schraubstocks	155
6.3	Auswertung der Untersuchungen am Fraktal-Schraubstock	156
7	Vorschlag zur Spezifikation von Stützstrukturen in der technischen Dokumentation ..	159
7.1	Vorgehen Stützstrukturdarstellung	160
7.2	Anforderungen an die Stützstrukturdarstellung in technischen Zeichnungen	161
7.3	Darstellung der Stützstrukturen in technischen Zeichnungen	162
7.3.1	Darstellungsform der Konturen	162
7.3.2	Darstellungsform der Füllungen	162
7.3.3	Alternative vereinfachte Darstellungsform	163
7.4	Spezifizierung der Stützstruktureigenschaften	163
7.5	Spezifikationsfelder von dünnwandigen Stützstrukturen	165
7.6	Spezifikationsfelder von massiven Stützstrukturen	168
7.7	Fazit zur Spezifikation von Stützstrukturen in technische Zeichnungen	169
8	Interpretation der Ergebnisse	171
9	Zusammenfassung und Ausblick	173

9.1 Zusammenfassung.....	173
9.2 Ausblick.....	175
10 Literaturverzeichnis	177
11 Anhang	189

Verzeichnis der Abkürzungen

AM	Additive Manufacturing
Bsp.	Beispiel
CAD	Computer Aided Design
etc.	et cetera
FEM	Finite-Elemente-Methode
ggf.	gegebenenfalls
PDM	Product Data Management
s.a.	siehe auch
SLM	Selective Laser Melting
STL	Standard Triangulation Language
u.a.	unter anderem
z.B.	zum Beispiel

Verzeichnis der Formelzeichen

a_d	[mm]	Breite des unperforierten Bereichs zur Bauplatte
a_F	[mm]	Fragmentationsabstand
a_H	[mm]	Hatchabstand
a_t	[mm]	Breite des unperforierten Bereichs zum Bauteil
a_{Oxy}	[mm]	XY-Offset
a_{OZ}	[mm]	Z-Offset
b_P	[mm]	Perforationsbreite
b_{R+1}	[mm]	Perforationsabstand
b_S	[mm]	Stegbreite
b_W	[mm]	Wandstärke
h_P	[mm]	Perforationshöhe
h_{R+1}	[mm]	Perforationsabstand
h_Z	[mm]	Zahnhöhe
l_T	[mm]	Topplänge
l_B	[mm]	Basislänge
R_z	[μm]	Gemittelte Rautiefe
α_F	[$^\circ$]	Fragmentationswinkel
α_P	[$^\circ$]	Perforationswinkel
Δ_B	[mm]	Basisintervall
Δ_F	[mm]	Fragmentationsintervall

1 Einleitung

Um den gesellschaftlichen, politischen und produktionstechnischen Entwicklungen wie Globalisierung, ressourceneffizienter Fertigung, Mass Customization, Leichtbau, Energieeffizienz oder Industrie 4.0 gerecht zu werden, müssen Technologien gewinnbringend eingesetzt werden. Additive Fertigungsverfahren bieten ein großes Potenzial [BBW+13, GKS19, YHB+17, LFQ18-ol, GEK+11-ol]. Hierbei werden Bauteile auf Basis eines 3D-Modells schichtweise hergestellt [VDI3404, ASTM F2792]. Die Verfahren stehen an der Schwelle zur Anwendung in der Serienfertigung und es wird eine Verdopplung des Marktvolumens bis 2027 auf ca. 40Mrd USD prognostiziert, trotz einer möglichen Wachstumseinbuße von 39% durch die Covid 19-Pandemie [GKS19, Kar16, LLZ21a]. Der Anteil der Anwender additiver Fertigung ist insbesondere in deutschen Unternehmen sehr hoch. Die Integration additiver Verfahren in bestehende Prozessketten stellt jedoch eine große Herausforderung dar, da verfahrensinterne Restriktionen aufgrund fehlenden Know-Hows und fehlender Regelwerke nicht ausreichend berücksichtigt werden können [GKS19, Kar16, BBW+13]. Ein wichtiger Punkt ist in diesem Zusammenhang die Gestaltung der Stützstrukturen (engl.: Supports). Dabei handelt es sich um zusätzlich gefertigte Strukturen, die am Bauteil anhaften und unter anderem zur Ableitung der prozessinduzierten Wärme und zur mechanischen Verankerung und Stabilisierung des Bauteils während der Fertigung benötigt werden. Später werden diese Stützstrukturen wieder vom Bauteil entfernt und stellen, ähnlich wie Steiger und Angüsse bei Gussverfahren, einen unvermeidbaren Nachteil dar [Bod96]. Insbesondere im Bereich der laseradditiven Fertigung von Metallen spielen die Stützstrukturen eine bedeutende Rolle und sind unverzichtbar [YHB+17, JXS18, ABE21, LLZ21a].

1.1 Problemstellung

Bei der laseradditiven Fertigung von Metallen kommt es aufgrund des schichtweisen Aufbaus, des hohen Wärmeeintrags pro Schicht sowie durch Schrumpfungsprozesse beim Abkühlen zu wärmeinduzierten Eigenspannungen und Verzug. Stützstrukturen stellen eine wirksame Maßnahme dar, um diesen Nachteilen entgegenzuwirken. In der Praxis erweisen sie sich als unverzichtbar und nicht gänzlich vermeidbar [Cal14, HHY+13, LLW+18, JXS18, ABE21, BSM+11, CLB+19, Fer21, Kra17].

Der Einfluss der Stützstrukturen auf die prozessimmanenten Nachteile kann in Abhängigkeit von den gewählten Randbedingungen, wie der eingesetzten Fertigungsanlage, dem verwendeten Werkstoff und den vorgegebenen Prozessparametern stark variieren [JW17, Kra17, WMB+20]. Auch die Geometrie der Stützstrukturen hat einen massiven Einfluss auf die Bauteilqualität, die Prozessstabilität und die Kosten [Cal14, GBI+18, JBW+18, GKS19, STS21, Lan17, Lan19, MAH17, PYA+15]. Die Geometriegenerierung kann dabei parameterbasiert, automatisiert oder manuell erfolgen. Bei der parameterbasierten

Stützstrukturgeometriegenerierung können die variablen Parameter einen gravierenden Einfluss auf spätere Qualitätskriterien des Bauteils oder die Prozessstabilität haben [TMH+16]. Stützstrukturen sind einerseits unerlässlich, bergen jedoch auch einige Nachteile, wie einen erhöhten Nachbearbeitungsaufwand oder Materialbedarf. Die Auswahl der Stützstruktur kann die Nachteile und Vorteile massiv beeinflussen. Daher ist ein tiefes Verständnis für die bestmögliche Gestaltung der Stützstruktur von großer Bedeutung. Konstruktionsrichtlinien können hier Abhilfe schaffen und Leitlinie sein [GKS19, Kra17, LMP21].

Für konventionelle Fertigungsverfahren existiert eine Vielzahl von Konstruktionsrichtlinien [Bod96, Rot01]. Diese Richtlinien geben Hinweise zur Minimierung fertigungsbedingter Restriktionen bei der Bauteilgestaltung sowie zur Optimierung von Fertigungszeiten und -kosten. Für die additive Fertigung existieren ebenfalls Konstruktionsrichtlinien, die eine fertigungsgerechte Gestaltung von Bauteilen ermöglichen [Ada15, Tho09, ARS+19, LLF16]. Allerdings behandeln diese Richtlinien kaum die Konstruktion von Stützstrukturen [WMB+20, JXS18, YHB+17]. Des Weiteren fehlt bisher eine standardisierte Terminologie für Stützstrukturen und ein einheitlicher Ansatz für deren Darstellung in technischen Zeichnungen [WMB+20].

Aus diesen Gründen besteht ein deutlicher Bedarf an Konstruktionsrichtlinien für Stützstrukturen, um beispielsweise die Herstellbarkeit und die Entfernbarekeit von Stützstrukturen sowie deren Einfluss auf die Oberflächenqualität des Bauteils abschätzen zu können [Cal14, Lan19, GBI+18, JW17, Kra 17, JXS18]. Dabei sind Stützstrukturen auf den späteren Anwendungsfall des Bauteils anzupassen [JBW+18, JXS18].

Bekannte Ansätze zur Konstruktion von Stützstrukturen empfehlen häufig Stützstrukturen durch eine Anpassung der Bauteilgeometrie oder die supportreduzierende Orientierung während der Fertigung gänzlich zu vermeiden oder zu minimieren. Dies ist grundsätzlich richtig, kann aber zu Nachteilen bei der Wärmeabfuhr und damit zu einem instabilen Prozess und minderer Produktqualität führen. Außerdem ist die Abänderung der Bauteilgeometrie zur Minimierung der Stützstrukturen nicht immer möglich. In vielen Fällen ist Support somit unvermeidbar [YHB+17, PYA+15, Lan17]. Die bestehenden Konstruktionsrichtlinien sind nach JEE UND WHITERELL ungewollt implizit und beruhen auf den Beobachtungen, die der Autor oder die Quelle für einen bestimmten Fall gemacht haben. Zudem werden sie oft mit Bildern kommuniziert, die mehrdeutig sind und Interpretationsspielraum lassen [JW17]. Ein eindeutiges strukturiertes Vorgehen, das verschiedene Randbedingungen, wie die verwendete Anlage, den Werkstoff oder den Prozessparametersatz berücksichtigt, ist bisher nicht bekannt, obwohl hier erheblicher Bedarf besteht [LKM16, GBI+18, Cal14KZS+11, CUM+21, JW17, LMP21, Zen15].

Um Konstruktionsrichtlinien für Stützstrukturen zu ermitteln, gilt es technisch sinnvolle Stützstrukturen unter Variation der einstellbaren Stützstrukturparameter und der Randbedingungen (Fertigungsanlage, Werkstoff, Parametersatz) zu untersuchen. Auf den ersten

Blick scheint die Durchführung numerischer Simulationen unterschiedlicher Stützstrukturen eine geeignete Methode zu sein, um die experimentelle, kostenintensive Herstellung von unterschiedlichen Stützstrukturen zu vermeiden. Jedoch geraten numerische Simulationen schnell an ihre Leistungsgrenzen [LJG+18, TMH+16], da es sich um ein Multidomain-Simulationsmodell handelt, in dem sowohl mechanische als auch komplexe thermische Prozesse schichtweise zu betrachten sind. Die genaue Darstellung der tatsächlichen Stützstruktur, insbesondere bei großen Bauteilen, gestaltet sich schwierig und erfordert Vereinfachungen. Zudem führen die anisotropen Eigenschaften durch den schichtweisen Aufbau der Supportstrukturen zu zusätzlichen Komplikationen in der Simulation. Die thermische Simulation muss nicht nur den Wärmetransport durch Wärmeleitung im Inneren des Materials beschreiben, sondern auch Konvektionsvorgänge an der Oberfläche der einzelnen Schichten und die Wärmeableitung in das umgebende Pulvermaterial. Dadurch ergeben sich lange Rechenzeiten von mehreren Wochen oder sogar unmögliche Simulationen [TMH+16], weshalb ein experimenteller Ansatz zu bevorzugen ist.

1.2 Motivation und Zielsetzung

Zum Erreichen einer anwendungsangepassten Optimierung von Stützstrukturen und zur Reduzierung der durch Stützstrukturen verursachten Kosten [Lan19] sowie zur Verbesserung der Produkteigenschaften, deren Reproduzierbarkeit und der Sicherstellung eines robusten Prozesses [GBI+18, JML+14], ist es das **Ziel dieser Ausarbeitung eine Methode zu entwickeln, die die Erstellung quantifizierbarer Konstruktionsrichtlinien für Stützstrukturen ermöglicht**. Die entwickelte Methode zielt darauf ab, die optimalen Stützstrukturparameter für verschiedene Randbedingungen wie den verwendeten Werkstoff, die eingesetzte Anlagentechnik und die Prozessparameter zu ermitteln. **Die Stützstrukturparameter sollen hierzu für anwendungsspezifische Zielgrößen**, wie die erreichbare Oberflächenqualität, die Maßgenauigkeit oder die Ablösbarkeit der Stützstrukturen von den Bauteilen **ermittelt werden**. Die bestmöglichen Stützstrukturparameter für die einzelnen Zielstellungen sollen in einheitlich gestaltete, quantifizierte Konstruktionsrichtlinien überführt werden, um das generierte Wissen an Anwender oder zukünftige Ingenieure zu übermitteln.

Die Wissensvermittlung über eine erfolgreiche Konstruktion für die additive Fertigung und insbesondere für Stützstrukturen ist essenziell [GKS19, JW17, WMB+20]. Der direkte Zusammenhang zwischen den Stützstrukturparametern und den erreichbaren Zielgrößen ist jedoch nicht immer eindeutig und unterliegt einer Wechselwirkung zwischen den Stützstrukturparametern. So zeigte schon ASAMI, dass eine massivere Stützstruktur nicht zwangsläufig zu einer verbesserten Wärmeabfuhr führen muss, jedoch die Ablösbarkeit deutlich verschlechtert und mehr Material benötigt [ABE21]. Daher ist es wichtig die Wechselwirkungen der Stützstrukturparameter auf die Zielgrößen zu untersuchen [JBW+18].

Bislang fehlt eine standardisierte Methode zur Untersuchung von Stützstrukturen unter Verwendung von standardisierten Prüfkörpern, obwohl einige Ansätze in dieser Richtung unternommen wurden [GBI+18, BOE20]. Zur Standardisierung soll die Methode zur Herleitung von Konstruktionsrichtlinien für Stützstrukturen **in Zukunft erweiterbar sein**, um andere Randbedingungen und zukünftige Stützstrukturarten quantifizieren zu können und vergleichbar zu machen. Die Standardisierung bietet darüber hinaus weitere Vorteile. So können Anwender die Kommunikation mit Kunden vereinfachen und auf eine umfangreiche Datenbank anwendungsangepasster Stützstrukturen mit entsprechenden Konstruktionsrichtlinien zurückgreifen. Dies erweitert nicht nur das aktuelle Anwendungswissen, sondern kann auch Kosten einsparen und einen technischen Produktmehrwert durch angepasste Stützstrukturkonstruktionen bieten [GBI+18, Fer21, BBW+13, MAH17]. Durch eine geeignete Stützstruktur können beispielsweise die Prozesszeit und der Materialbedarf verringert werden sowie unerwünschte Eigenspannungen im Bauteilmaterial durch eine verbesserte Wärmeabfuhr vermieden werden und die Prozesssicherheit und Produktqualität erhöht werden [YHB+15, TMH+16].

Die experimentellen Untersuchungen der Methode zur Herleitung von Konstruktionsrichtlinien werden mit dem weitverbreiteten und bewährten Blocksupport durchgeführt. Das Ziel ist jedoch, die Methode auch auf andere Arten von Stützstrukturen anwendbar zu machen, um in Zukunft eine umfangreiche Datenbasis zu generieren [TMH+16, ABE21]. Die Methode soll an dem Stahlwerkstoff 316L (1.4404) durchgeführt werden, da Stahlwerkstoffe aufgrund ihrer höheren Schmelztemperatur, des damit einhergehenden Wärmeeintrags im Laserschmelzprozess und der geringeren Wärmeleitfähigkeit besonders anfällig für Fehler durch unzureichend konstruierten Stützstrukturen sind [TMH+16]. Die Methode soll auf andere Materialien erweiterbar sein. Darüber hinaus sollen die experimentellen Untersuchungen kosteneffizient durchzuführen sein. Dazu werden Prüfkörper mit geringen Abmessungen verwendet und es wird versucht, die Anzahl der benötigten Prüfkörper durch den Einsatz statistischer Versuchsplanungsmethoden zu minimieren. Die Gestaltung der Prüfkörper orientiert sich an Standardelementen, die häufig in technischen Produkten zu finden sind [Ada15, BBW+13]. Zusätzlich wird die Methode auch auf reale Anwendungsbauteile übertragen, um die Validität der Ergebnisse zu überprüfen.

Durch die zukünftige Erweiterungsmöglichkeit für weitere Stützstrukturen, Materialien und Fertigungsanlagen und durch die quantifizierbaren Ergebnisse lässt sich eine breite Datenbasis ermitteln, die eine Einbindung in CAD-, Simulations- oder Jobvorbereitungstools ermöglicht. Ansätze hierzu haben bereits Bobbio und Gralow betrachtet [BQD+17, GBI+18].

2 Stand der Technik und Wissenschaft

Ausgehend von der Zielsetzung wird mittels einer umfassenden Literaturrecherche der aktuelle Stand der Technik hinsichtlich der Grundlagen der additiven Fertigung, des Laserstrahlschmelzens sowie gängiger Stützstrukturen und Konstruktionsrichtlinien für die laseradditive Fertigung präsentiert. Dabei werden relevante wissenschaftliche Arbeiten und Publikationen analysiert und ausgewertet, um den konkreten Forschungsbedarf feststellen zu können.

2.1 Terminologie

Die additive Fertigung (engl.: additive manufacturing, kurz: AM) ist in der DIN EN ISO/ASTM 52900 und der VDI 3405 als Oberbegriff für Fertigungsverfahren definiert, die Werkstoffe verbinden, um Bauteile auf Basis von 3D-Modelldaten herzustellen. Dies geschieht, im Gegensatz zu subtraktiven und urformenden Fertigungsverfahren schichtweise [DIN EN ISO/ASTM 52900, VDI 3405, LMP21, LTM+18]. Historische Begriffe wie „Schichtfertigung“, „additive Fabrikation“, „generative Fertigung“, „Festkörper-Freiform-Fertigung“, „Solid Free-form Fabrication“ oder „Freiform-Fertigung“ finden ebenfalls Verwendung [DIN EN ISO/ASTM 52900, BBW+13]. Des Weiteren zeichnet sich ab, dass der Begriff „3D Druck“ als generische Bezeichnung für alle automatisierten Schichtbauverfahren zukünftig Verwendung findet [Geb16]. Weitere Termini für die Gesamtheit von additive Fertigungsverfahren sind „Rapid Verfahren“ oder „Rapid Technologien“. Das Adjektiv „rapid“ suggeriert dabei eine schnelle Fertigung, was jedoch nicht in jedem Fall zutrifft und stark vom Prozess und dem gewählten Bauteil abhängt. Im Zusammenhang damit wird häufig zwischen „Rapid Prototyping“, „Rapid Tooling“ und „Rapid Manufacturing“ differenziert. Diese drei Begriffe geben einen Hinweis auf die spätere Anwendung der Bauteile, wie in Bild 2-1 dargestellt [Geb16, BBW+13, Ada15].

In dieser Ausarbeitung soll im Folgenden der normativ festgelegte Begriff „Additive Fertigung“ mit seiner Abkürzung „AM“ verwendet werden.

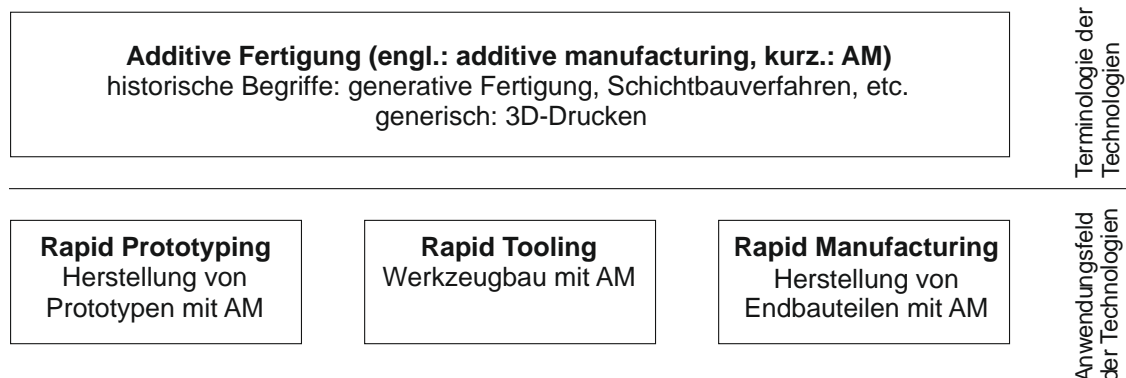


Bild 2-1: Einordnung der Begriffe [nach DIN EN ISO/ASTM 52900 und VDI 3405]

2.2 Grundlagen der additiven Fertigung

Im Gegensatz zu konventionellen, subtraktiven Fertigungsverfahren werden bei der additiven Fertigung Bauteile element- oder schichtweise aufgebaut [Geb13]. Da bei der Bauteilgenerierung auf formgebende Werkzeuge verzichtet werden kann, ist die gestalterische Freiheit deutlich weniger eingeschränkt. Der schichtweise Aufbau erfolgt dabei auf Basis des zugrundeliegenden dreidimensionalen CAD-Modells, welches in eine Sequenz zweidimensionaler Schichten konvertiert wird (s. Bild 2-3) [BHS17, CLL10].

Durch die Vereinfachung der dreidimensionalen Darstellung in viele zweidimensionale Schichten ergeben sich die erwähnten gestalterischen Freiheiten. Dadurch können Strukturen realisiert werden, die mit konventionellen Fertigungsverfahren gar nicht oder nur mit erheblichen Aufwand herstellbar sind [FP16]. Neben komplexen äußeren Freiformflächen können auch innenliegende Strukturen wie konturnahe Kühlkanäle, strukturoptimierende Gitterfüllungen oder kraftflussoptimierte Sandwichstrukturen mittels additiver Fertigungsverfahren eingebracht werden [KHE15]. Auch die Produktion leichtbauoptimierter, topologieoptimierter oder bionischer Strukturen ist möglich [CGE+17-ol; WGH+17]. Aus diesen Vorteilen ergibt sich ein beträchtliches Leichtbaupotenzial sowie die Möglichkeit zur ressourceneffizienten Produktion und einer nachhaltigen Nutzung additiv hergestellter Bauteile. Darüber hinaus kann durch Funktionsintegration die Bauteilanzahl zur Funktionserfüllung verringert und der Montageaufwand reduziert werden, was eine Kostensenkung und weitere Gewichtsreduktion ermöglicht [MAH17; Mil17; VDI 3405-3].

Additive Fertigungsverfahren weisen noch weitere wirtschaftliche Vorteile gegenüber konventionellen Verfahren auf. So ermöglicht der Verzicht auf formgebende Werkzeuge und die auf den CAD-Modell basierenden Fertigungsdaten einfache und schnelle Anpassungen. Durch diese hohe Flexibilität sind neben Serienbauteilen auch individualisierte Bauteile in kleinen Stückzahlen oder Einzelstücke und Varianten kosteneffizient herstellbar. Dabei ist die Bauteilkomplexität weitgehend unabhängig von den Stückkosten [SK17]. Darüber hinaus kann der Produktentstehungsprozess von der Idee zum Markteintritt mit Hilfe der additiven Fertigung vereinfacht und beschleunigt werden [CGE+17-ol].

Jedoch sind bei der additiven Fertigung auch verfahrensspezifische Restriktionen und Nachteile zu berücksichtigen. So sind additive Fertigungsverfahren noch durch einen hohen Anteil manueller, zeitintensiver Arbeitsschritte geprägt (s.a. Bild 2-3). Dazu zählen neben der Stützstrukturgenerierung und Datenaufbereitung für den Fertigungsprozess auch nachgelagerte Prozesse wie das Abkühlen, das Trennen von der Bauplattform, die Pulverentfernung sowie die Stützstrukturentfernung. Insbesondere die stützstrukturbedingten Arbeitsschritte sind besonders ineffizient, aber unvermeidlich, da Stützstrukturen bei manchen Verfahren für einen robusten Fertigungsprozess gebraucht werden, um Verzug zu minimieren, die Bauteile während des Prozesses zu fixieren und um die prozessinduzierte Wärme abzuleiten. Nach dem Fertigungsprozess sind Stützstrukturen größtenteils

unerwünscht und müssen aufwendig entfernt werden. Da sie darüber hinaus den Materialbedarf und die Fertigungszeiten erhöhen, gelten sie als unvermeidbarer Nachteil. Auch weitere Nachbearbeitungsverfahren wie eine Wärmebehandlung, spanende Nachbearbeitung oder Oberflächenveredelung können nötig sein, um verfahrensimplante Maßungenauigkeiten, Oberflächenqualitäten sowie die Porosität und mechanische Eigenschaften zu verbessern. Im Vergleich zu konventionellen Verfahren ist die geringe Produktionsgeschwindigkeit für Großserien ein limitierender Faktor. So kann eine CNC-Fräsbearbeitung deutlich schneller sein. Dies ist jedoch stark von der Bauteilkomplexität abhängig. Gilt es beispielsweise weniger komplex geformte Bauteile wie Quader herzustellen sind spanende Fertigungsverfahren deutlich schneller. Bei sehr komplex geformten Bauteilen kann jedoch die additive Fertigung effizienter sein, da zeitintensive Aufspan- und Rüstvorgänge entfallen. Darüber hinaus ist die Bauteilgröße durch den zur Verfügung stehenden Bauraum der additiven Fertigungsanlage limitiert [FP16, GRS15]. Wie lange diese Nachteile noch bestehen, ist unklar. Der hochdynamische Markt im Bereich der additiven Fertigung und umfangreiche Forschungsprojekte lassen aber auf eine deutliche Erweiterung des Anwendungsfelds hoffen [Woh22, LLZ21a, LTZ19].

Eine Klassifizierung der additiven Fertigungsverfahren kann anhand verschiedener Kriterien vorgenommen werden. In Bild 2-2 erfolgt diese Unterteilung zunächst anhand des Aggregatzustands des Ausgangsmaterials, gefolgt von dessen Verbindungsmechanismus. Alternativ ist auch eine Einteilung nach metall- und kunststoffverarbeitenden Verfahren möglich [Geb13]. Die dargestellte Übersicht gibt nur die weitverbreitetsten Verfahren wieder.

1					Flüssigkeit		Gas	
2	Draht	Pulver		Folie / Platten	Paste	Flüssigkeit	Aerosol	Gas
3	Aufschmelzen und Erstarren		Verkleben durch Binder	Ausschneiden und Fügen	Polymerisieren		Abscheiden	Chemische Reaktion
4	Extrudieren	Sintern, Schmelzen	3D Drucken	Schichtlaminat-Verfahren	Polymerisation, Stereolithographie		Aerosol-Drucken	-
5	Fused Deposition Modelling (FDM)	Selektives Laserstrahl-schmelzen (SLM)	Multi Jet Fusion (MJF)	Laminated Object Modelling (LOM)	Stereolithographie (SLA), Digital Light Projection (DLP)		Physical Vapor Deposition (PVD)	Laser Chemical Vapor Deposition (LCVD)

1: Aggregatzustand des Ausgangsmaterials

2: Erscheinungsform des Ausgangsmaterials

3: Physikalischer Mechanismus der Schichtbildung

4: Generische Bezeichnung des additiven Verfahrens

5: Beispielf Verfahren

Bild 2-2: Einteilung der additiven Fertigungsverfahren nach [BHS17; CGE+17-ol; Geb07]

2.3 Selektives Laserstrahlschmelzen

Gemäß der DIN EN ISO/ASTM 52900 wird das in dieser Ausarbeitung betrachtete Verfahren als pulverbettbasiertes Schmelzen (engl.: powder bed fusion; kurz: PBF) eingeordnet. Konkret handelt es sich um das pulverbettbasierte Laserstrahlschmelzen (en.: Laser Powder Bed Fusion; kurz: LPBF). Nach VDI 3405 ist es dem Laserstrahlschmelzen zuzuordnen (en.: Laser Beam Melting kurz: LBM). Weitere Bezeichnungen sind das Selektive Laserstrahlschmelzen (engl.: Selective Laser Melting, kurz: SLM), Direktes Metalllasersintern (engl.: Direct metal laser sintering; kurz: DMLS) sowie LaserCusing. Im Folgenden wird die Bezeichnung Selektives Laserstrahlschmelzen oder kurz SLM-Verfahren angewendet [ISO ASTM 52900, VDI 3405, GBK+10, HSW+16, LJG+18].

Das SLM-Verfahren zählt zu den pulverbettbasierten, additiven Fertigungsverfahren, die einen metallischen Ausgangswerkstoff verwenden [Son96]. Das Verfahren gliedert sich in das Pre-, In- und Postprocessing (s.a Bild 2-3). Das Preprocessing umfasst die Vorbereitung der Fertigungsanlage sowie die Aufbereitung der Fertigungsdaten. Das Inprocessing beinhaltet die eigentliche Fertigung mittels SLM-Verfahren. Das Postprocessing umfasst die verfahrensimmanenten Nachbearbeitungsschritte, wie das Lösen von der Bauplattform, die Pulverentfernung und die Stützstrukturentfernung. Darüber hinaus können konventionelle Nachbearbeitungsschritte folgen, wie die spanende Nachbearbeitung, Wärmebehandlung oder Beschichtung zur Verbesserung der Bauteileigenschaften. Diese separaten Nachbearbeitungsschritte werden im Folgenden Finishing-Prozessschritte genannt, um eine Abgrenzung zu den verfahrensimmanenten Postprocessingschritten zu ermöglichen [GKS19, LTZ19].

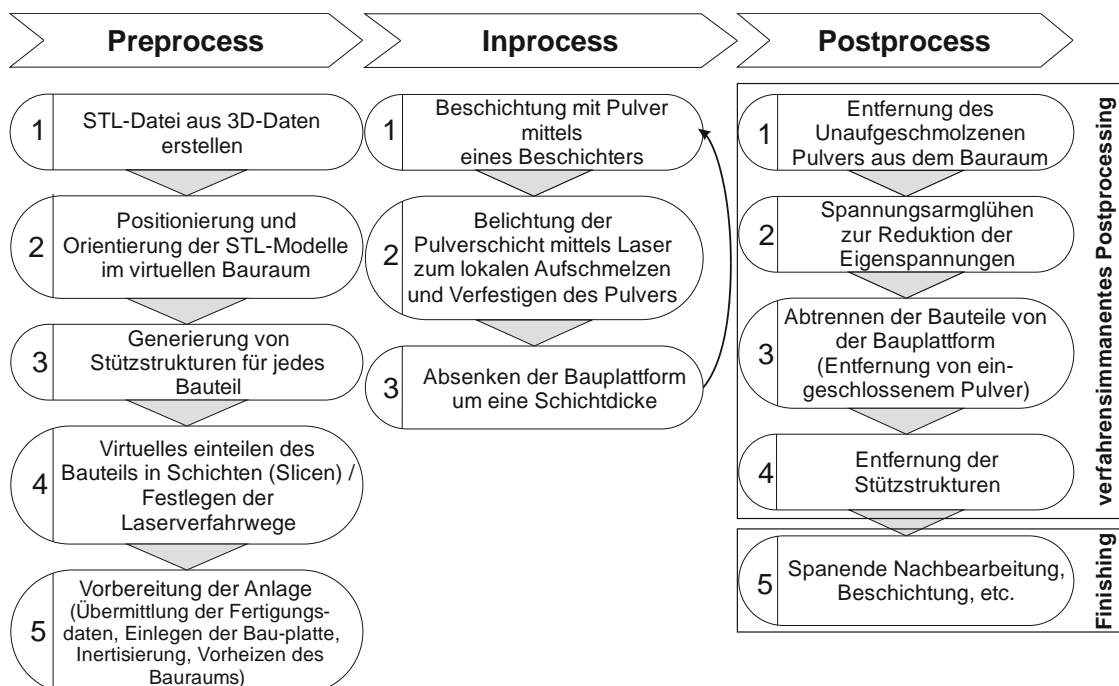


Bild 2-3: Gliederung des Verfahrens in Pre-, In- und Postprocess.

2.3.1 Verfahrensablauf und Charakteristika

2.3.1.1 Preprocess

Die Grundlage für das SLM-Verfahren ist ein vollständiges 3D-Volumenmodell des Bauteils, welches durch Methoden wie CAD, Topologieoptimierung oder 3D Scans erstellt wird. Im Preprocess werden die Positionierung und Orientierung des Bauteils im Bauraum definiert, die Stützstrukturen festgelegt, die einzelnen zu fertigenden Schichten virtuell generiert und der Laserverfahrweg festgelegt [JHF15]. Dazu werden die 3D-Daten in eine STL-Datei konvertiert. Dieses Format hat sich als Industriestandard für additive Fertigungsverfahren etabliert. STL steht hierbei für Standard Triangulation Language oder auch Standard Tessellation Language [GKS19]. Hierbei wird das Volumenmodell durch Dreiecke approximiert und in ein Oberflächenmodell transformiert. Bei dieser Oberflächentriangulation kann es bei stark gekrümmten Oberflächen zu Abweichungen des Modells von der Sollgeometrie kommen. Daher ist es je nach Bauteil wichtig, eine geeignete Triangulation anzustreben, indem die Größe und die Anzahl von Dreiecksflächen angepasst werden. Eine höhere Anzahl von Dreiecksflächen kann zu einem erhöhten Speicherbedarf führen. Die Standardeinstellungen des CAD-Programms zur Transformation in das STL-Format bieten hier meist einen guten Kompromiss zwischen dem Speicherbedarf und einer guten Triangulation des Bauteilmodells [GKS19, KMF+18, VDI 3405].

Bei der Triangulation können verschiedene Fehler auftreten, die die Bauteilqualität oder sogar die Prozessstabilität während der Fertigung gefährden können. Beispielsweise können Überlagerungen der Dreiecksfacetten auftreten oder Lücken in dem Dreiecksnetz entstehen. Zur Behebung solcher Probleme können die Reparaturfunktionen der Datenaufbereitungssoftware verwendet werden oder ggf. die 3D Volumen- Ausgangsmodelle angepasst werden [GKS19].

Aufgrund der Nachteile des STL-Formats sind weitere Datenformate entwickelt worden. Zu nennen sind hier das AMF-Format und das 3MF-Format. Diese Formate ermöglichen eine bessere Approximation gekrümmter Oberflächen sowie die Speicherung weiterer Informationen wie Farben, Gitterstrukturen und Werkstoffinformationen. Da diese Formate bisher noch nicht weit verbreitet sind, wird im Folgenden der weitere Prozess anhand des STL-Datensatzes beschrieben [GKS19, Rei19].

Die reparierte STL-Datei wird mithilfe einer Datenaufbereitungssoftware bearbeitet, welche oft eng mit dem Fertigungsanlagen verknüpft ist. Diese Software berücksichtigt beispielsweise die Abmessungen des Bauraums, die Bauplattform und Aufspannpunkte. Hierzu werden die herzustellenden Bauteile im virtuellen Bauraum auf der Bauplattform positioniert und orientiert. Die Positionierung beinhaltet die Platzierung des Bauteils auf der Bauplattform. Die Orientierung spiegelt den Winkel des Bauteils zur Bauplattform wider und hat

einen Einfluss auf die spätere Bauteilqualität, den Stützstrukturbedarf und die Bauzeit des Bauteils [DCS+15, PA15].

Der Einfluss des schichtweisen Aufbaus ist ebenfalls bei der Bauteilorientierung zu berücksichtigen, da durch die Orientierung die Auswirkungen des sogenannten Treppenstufeneffekts beeinflusst werden können. Der Treppenstufeneffekt tritt aufgrund der Unterteilung des Bauteils in Schichten während der Datenaufbereitung auf (s. Bild 2-4). Dieser Effekt entsteht an Flächen die zur Bauplattform geneigt oder gekrümmt sind, aufgrund der Approximation dieser Fläche durch die einzelnen Schichten. Um den Einfluss des Treppenstufeneffekts zu minimieren, sind möglichst dünne und ebene Schichten anzustreben. Allerdings führen dünnere Schichten zu längeren Fertigungszeiten und höheren Kosten (s. Bild 2-4). Für jede Schicht wird hierzu die Belichtungsfläche des Lasers festgelegt sowie die zu fertigende Schichtdicke. Eine größere Schichtdicke bei geneigten oder gekrümmten Flächen verstärkt den Treppenstufeneffekt, der sich negativ auf die Oberflächenqualität und die Maßgenauigkeit des Bauteils auswirkt [Cal14; KHE15]. Dieser Schichtungsvorgang wird auch als Slicing bezeichnet und im Folgenden genauer erörtert [GKS19, PA15].

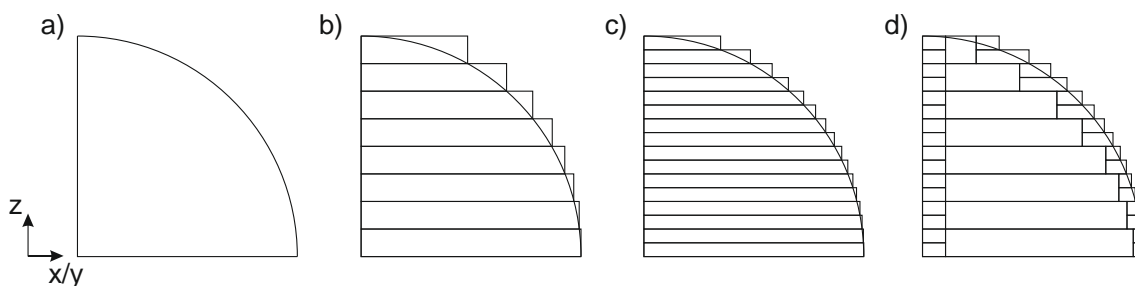


Bild 2-4: a) Sollgeometrie b) Treppenstufeneffekt bei großer Schichtdicke c) Treppenstufeneffekt bei dünner Schichtdicke d) Hülle-Kern-Prinzip.

Bei der Orientierung des Bauteils ist auch der Verfahrensweg des Beschichters zu berücksichtigen, welcher das Baumaterial auf die Bauplattform aufträgt. Eine ungeeignete Bauteilorientierung kann zu Schäden am Bauteil oder am Beschichter (s. Bild 2-6) führen. Geeignete Bauteilorientierungen in Bezug auf den Verfahrensweg des Beschichters sind beispielsweise der Norm VDI 3405-3 entnehmbar.

Nach der Orientierung im Bauraum werden im Bedarfsfall für jedes Bauteil die Stützstrukturen generiert, dies erfolgt ebenfalls über die Baujobvorbereitungssoftware. Dabei werden die zu supportierenden Bereiche entweder manuell vom Nutzer ausgewählt oder automatisch von der Software ermittelt und supportiert. Eine detailliertere Erklärung zur Erstellung von Stützstrukturen erfolgt in Kapitel 2.4.3 ausführlich.

Nach der Supportierung erfolgt das Slicen des Bauteils und der Stützstrukturen in die zu fertigenden Schichten. Dabei werden, unter Berücksichtigung der gewählten Scanstrategie gemäß Bild 2-5, die Verfahrensweg des Lasers für jede Schicht festgelegt. Zudem werden werkstoff- und anlagenspezifische Fertigungsprozessparameter, wie die Laserleistung,

Lasergeschwindigkeit und die Schichtdicken eingestellt. In der Regel wird für den gesamten Baujob eine einheitliche Schichtdicke festgelegt, obwohl es auch möglich ist, unterschiedliche Schichtdicken in einem Baujob zu verwenden, wie in Bild 2-3 d) anhand der Hülle-Kern-Strategie dargestellt. Dabei wird das Innere eines Bauteils mit dickeren Schichten aufgebaut und die äußere Hülle mit geringeren Schichtdicken. Dies ermöglicht im Inneren eine hohe Aufbaurate und in der Hülle eine hohe Oberflächenqualität mit geringeren Treppeneffekten. Die Schichtdicke im Inneren muss dabei dem ganzzahligen Vielfachen der äußeren Schichten entsprechen [GKS19, KMF+18, BMD12]. Die Festsetzung der Slicing-Parameter erfolgt in der Regel durch Auswahl eines herstellerseitig zur Verfügung gestellten Parametersatzes für die jeweilige Anlage und das verwendete Material. Dieser Parametersatz enthält die Belichtungsparameter (Laserleistung, Laserfokus, Lasergeschwindigkeit usw.) sowie die Definition der Scanstrategie. Dabei werden die Stützstrukturen mit anderen Parametern belichtet als das Bauteil. Der Belichtungsvorgang und seine Auswirkungen auf den Prozess werden im Detail in Kapitel 2.3.1.2 behandelt.

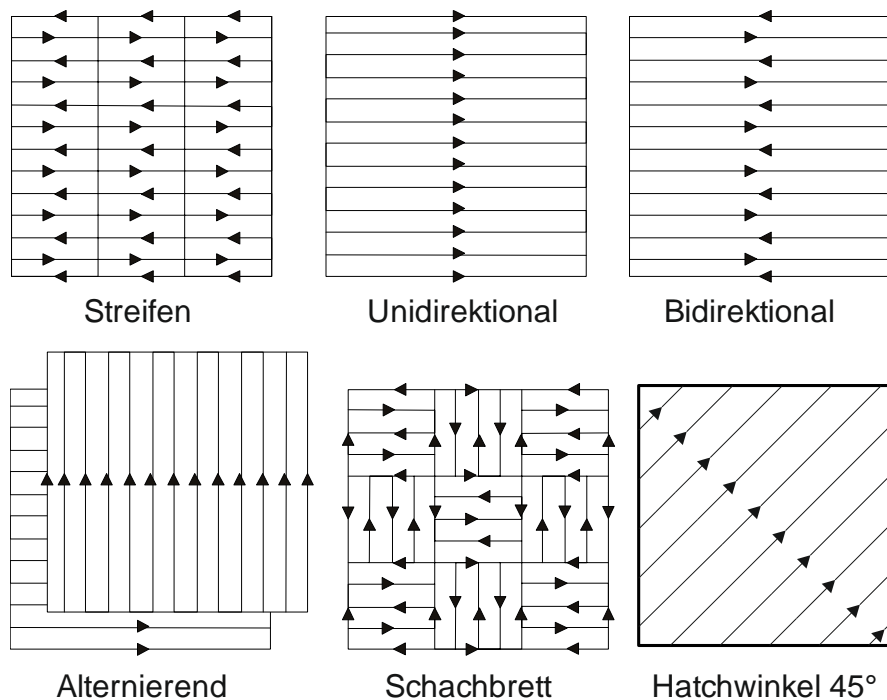


Bild 2-5: Unterschiedliche Scanstrategien nach [GKS19] und [Die20]

Die Slice-Datensätze werden schließlich an die Fertigungsanlage übergeben. Dieser Vorgang beinhaltet typischerweise die Generierung herstellereispezifischer Datenformate mithilfe einer Datenaufbereitungssoftware.

Die Vorbereitung der Fertigungsanlage wird ebenfalls zum Preprocess gezählt. Dabei wird die Anlage im Vorfeld mit einer ebenen Bauplattform, dem pulverförmigen Werkstoff und einer Beschichterklänge bestückt [GKS19, Kun19]. Im Anschluss wird die Anlage geschlossen, der Bauraum vorgeheizt und mit einem Schutzgas inertisiert [Kop18, TMH+16]. Die

Vorheizung des Bauraums zielt darauf ab, thermisch induzierte Spannungen und Verzug zu minimieren, indem der Temperaturgradient zwischen dem aufgeschmolzenen Pulver und der Umgebung reduziert wird. Die Vorheizung kann unter anderem über Heizpatronen unter der Plattform auf Temperaturen von bis zu 250°C erfolgen [Son96]. Neue Konzepte zur Bauraumheizung streben höhere Bauraumtemperaturen von 500°C an, um die Temperaturdifferenz weiter zu reduzieren. Dies entspricht einem Spannungsarmglühen während des Bauprozesses [KMF+18].

Die dargestellten Schritte des Preprocesses stellen lediglich eine mögliche Vorgehensweise dar. Es existieren weitere Optionen und Varianten der einzelnen Prozessschritte, die je nach Anwender, Fertigungsverfahren und verwendeter Software abweichen können. Zum Beispiel ist es möglich, den Support bereits im Vorfeld via CAD einzufügen oder die Erstellung der Slicedatensätze direkt auf Basis der CAD-Datei ohne Konvertierung in das STL-Format durchzuführen [Geb16].

2.3.1.2 Inprocess

Der Inprocess ist in drei Hauptschritte unterteilt, die sich schichtweise wiederholen (s. Bild 2-6). Zunächst wird das Pulver in einer definierten Schichtdicke abgelegt. Dieses Beschichten erfolgt zu Beginn des Baujobs auf der Bauplattform und im weiteren Verlauf des Prozesses auf den zuvor aufgetragenen Schichten. Die Art der Beschichtung hängt vom Maschinenhersteller ab und kann mittels eines Schieber-, Wellen- oder Rakelbeschichters erfolgen. Das Pulver wird hierzu entweder von oben aus Vorratsbehältern in den Beschichter eingebracht oder aus einer Dosierkammer von unten neben dem Baubereich platziert und anschließend vom Beschichter gleichmäßig auf dem Baubereich verteilt. Die realisierbaren Schichtdicken liegen typischerweise in einem Bereich von 20 µm bis 100 µm [Yad09].

Im zweiten Schritt erfolgt die selektive Belichtung und Aufschmelzung des Bauteilquerschnitts in der jeweiligen Schicht mittels eines Lasers. Die Laserleistung, die Scangeschwindigkeit sowie die Wellenlänge und der Fokusbereich beeinflussen somit den Energieeintrag in das Metallpulver. Dabei kommen leistungsstarke Ytterbium-Laser mit einer Ausgangsleistung von 200 W bis 1000 W zum Einsatz. Das emittierte, monochromatische Licht variiert je nach Laser zwischen einer Wellenlänge von 500 bis 1100 nm. Der Fokusbereich liegt im Bereich von 70 µm bis 200 µm, während die Scangeschwindigkeit zwischen 2 m/s und 15 m/s liegt [BHS17]. Dadurch ergeben sich Aufbauraten von 2 bis 20 cm³/h. Bei der Belichtung werden zuerst die Konturen der Bauteilschicht abgefahren, die die Ränder der Bauteile definieren. Die Belichtung erfolgt unter Verwendung von Prozessparametern, die eine hohe Oberflächenqualität sicherstellen. Die Fläche innerhalb dieser Konturen, auch als „Hatch“ bezeichnet, wird in der Regel mit anderen Prozessparametern belichtet, die eine schnellere Belichtung ermöglichen und die Fertigungszeit reduzieren. Durch die Verfahrenswege bei der Schichtbelichtung, der sogenannten Scanstrategie

(s.a. Bild 2-5), werden thermisch induzierte Eigenspannungen und anisotrope Bauteileigenschaften positiv beeinflusst. Hierzu kommen beispielweise Streifen- oder Schachbrettmusterscanstrategien zum Einsatz oder die Variation von Belichtungsmustern zwischen Bauteilschichten. Dadurch wird die eingebrachte Wärme besser verteilt. Die Bewegung des Laserspots erfolgt mithilfe einer Scannereinheit, die eine präzise Positionierung des Laserspots ermöglicht [Ada15; KMF+18; Mil17]. Um entstehende Schweißspritzer und Rauch zu entfernen, erfolgt der Belichtungsprozess unter einem Schutzgasstrom, der zur Abfuhr dieser aus dem Aufschmelzbereich dient und die Verschmutzung des Laserstrahleintrittsfensters verhindert. Dadurch wird die Inertisierung des Bauraums aufrechterhalten und der Sauerstoffgehalt wird unter 1 % gehalten. Häufig verwendete Schutzgase sind Argon oder Stickstoff. Es sind auch Anlagen auf dem Markt, die unter Vakuum einen Sauerstoffabschluss gewährleisten [BHS17].

Für eine stoffschlüssige Verbindung zwischen der aktuell erzeugten Schicht und darunterliegenden Schichten sowie zwischen benachbarten Scanpfaden, wird eine Überlappung des Schmelzzone in benachbarte Bereiche sichergestellt. Dazu wird die Eindringtiefe des Lasers größer als die Schichtdicke gewählt, während der Hatchabstand kleiner als der Durchmesser des Schmelzbads ist. Da das Material im SLM-Prozess vollständig aufgeschmolzen wird, ist theoretisch die Herstellung dichter Bauteile mit sehr geringer Porosität möglich, deren mechanische Eigenschaften vergleichbar mit konventionell gefertigten Bauteilen sind [Cal14]. Nach dem Belichtungsvorgang wird die Bauplattform im dritten Schritt um eine Schichtdicke abgesenkt und die einzelnen Schritte des Prozesses beginnen erneut, bis die endgültige Höhe des Bauteils erreicht ist [Ada15; Mil17, Geb16; KMF+18, Kra17].

Die untere Grenze der Schichtdicke wird durch die erforderliche Partikelgröße bestimmt, die je nach Material zwischen 10 µm und 60 µm liegt. Die verwendeten Pulverpartikel müssen weitestgehend eine sphärische Partikelform aufweisen, um eine ausreichende Fließfähigkeit sicher zu stellen. Hierzu ist auch auf eine ausreichende Trockenheit des Pulvers zu achten, damit keine Verklumpungen entstehen [Geb11; GW16; Mil17]. Der Feuchtigkeitsgehalt des Pulvers ist zwischen 8% und 12% zu halten, um ein fließfähiges, gut auftragbares Pulver zu erhalten. Durch die geringe Partikelgröße und die große spezifische Oberfläche, verhält sich das Pulver pyrophor [Mil17].

Neben der aufwendigen Prozessierbarkeit des Pulverwerkstoffs müssen auch arbeitssicherheitsrelevante Faktoren berücksichtigt werden. So besteht eine erhöht Explosionsgefahr durch das pyrophore Pulver und die Partikel bei einer Größe von weniger als 2,5 µm sind lungengängig [CGE+17-ol; KMF+18]. Beiden Risikofaktoren ist durch geeignete persönliche Schutzmaßnahmen und Sicherheitsmechanismen an den Anlagen entgegenzuwirken.

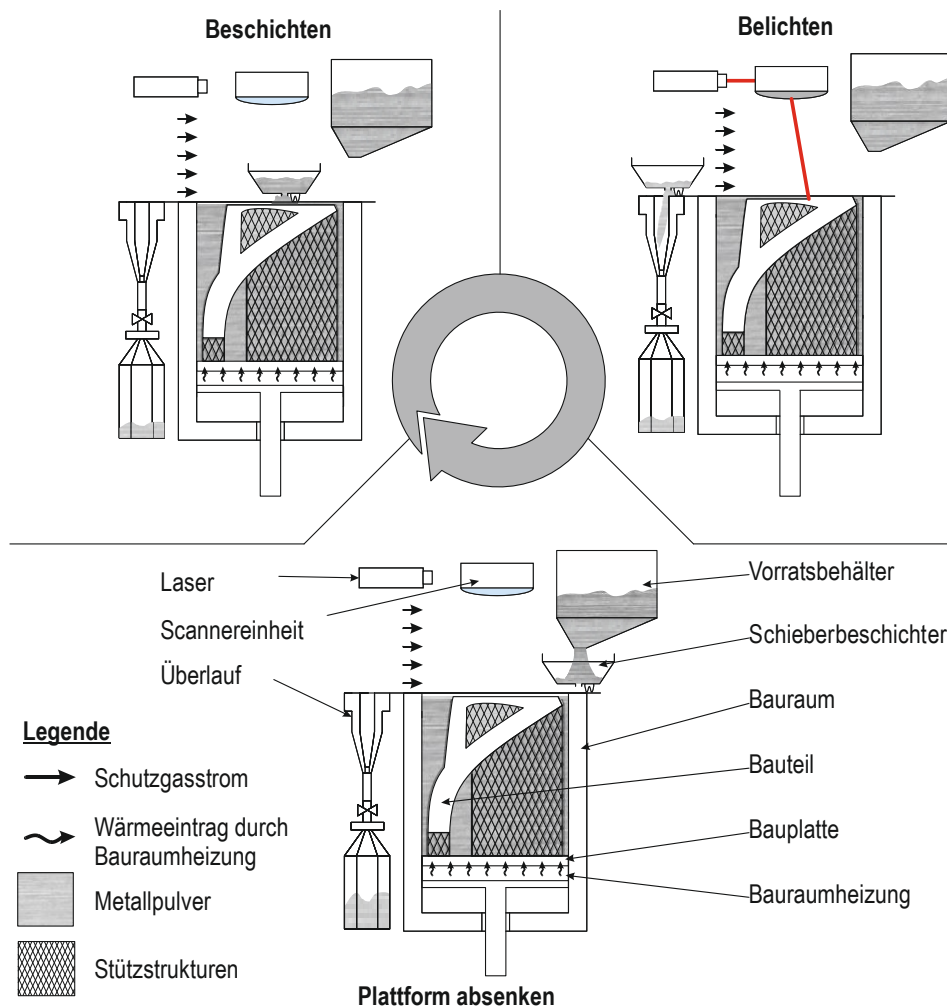


Bild 2-6: Zyklischer Verfahrensablauf des Selektiven Laserstrahlschmelzens (SLM) [nach GRS15; Aus19a; KMF+18].

Gängige SLM-Anlagen verfügen herstellerabhängig über einen zylindrischen oder quaderförmigen Bauraum. Die Bauraumgröße liegt dabei zwischen 100 mm x 100 mm x 100 mm bis zu 800 mm x 400 mm x 500 mm bei quaderförmigen Bauräumen und Ø 70 mm x 80 mm bis Ø 300 mm x 200 mm bei zylindrischen Bauräumen [CGE+17-ol; Woh22]. Aktuelle Entwicklungen zeigen dabei einen Trend zu größeren Bauräumen [Woh22].

Das Spektrum verarbeitbarer Materialien für den SLM-Prozess wächst. Zu den etablierten Materialien zählen Edelstähle, Aluminium-, Kobalt-Chrom-, Titan- und Nickelbasislegierungen [WGH+17]. Darüber hinaus sind auch Kupferlegierungen, Eisensiliziumlegierungen und Multi-Materialkombinationen verarbeitbar [BHS17; Yad09; AHD+21]. Im Vergleich zu konventionellen Verfahren ist die Werkstoffauswahl jedoch noch eingeschränkt, da die Sicherstellung der Prozessierbarkeit eines neuen Materials auf SLM-Anlagen ein aufwendiger Prozess ist [VDI 3405-3]. Dennoch werden ständig neue Materialien funktionsorientiert entwickelt und im SLM-Bereich eingesetzt.

2.3.1.3 Postprocessing

Das Postprocessing umfasst sämtliche Schritte, die nach Abschluss des SLM-Prozesses durchgeführt werden (s.a. Bild 2-3). Zu Beginn wird in der Regel überschüssiges loses Pulver entfernt. Dieses Pulver umgibt nicht nur die Bauteile, sondern ist auch in Hohlräumen, Kanälen und zwischen Stützstrukturen anzutreffen. Das entfernte Pulver kann gesiebt und erneut verwendet werden. Eine möglichst gründliche Pulverentfernung ist wünschenswert, um eine hohe Wiederverwertungsrate zu erreichen. Eine vollständige Entfernung von Restpulver ist jedoch nicht möglich, da kleinere Pulverrückstände zwischen den Stützstrukturen und in Hohlräumen verbleiben. Falls nötig kann im Anschluss ein Spannungsarmglühen der auf der Bauplattform befindlichen Bauteile erfolgen. Nach dem Spannungsarmglühen können die Bauteile mit Stützstrukturen von der Bauplattform getrennt werden. Dies geschieht in der Regel mit einer Bandsäge oder durch Drahterodieren, kann aber auch manuell mittels Handsäge oder Hammer und Meißel erfolgen. Hierbei wird in der Regel immer noch unaufgeschmolzenes Pulver freigesetzt, weswegen auf eine umfassende Arbeitssicherheit zu achten ist, um das Restpulver nicht zu inhalieren [GKS19, Han19-ol, Aus20].

Nachdem das Bauteil von der Bauplattform getrennt wurde, erfolgt die Entfernung der Stützstrukturen. Dies kann elektrochemisch, manuell mittels Handwerkzeugen oder durch Verwendung spanender Fertigungsverfahren geschehen [GKS19, Die20]. Je nach Erfolg der Supportentfernung können weitere Nachbearbeitungsschritte zur Oberflächenverbesserung erforderlich sein. Hierbei können abrasive Strahlverfahren, Gleitschleifprozesse oder Fräsvorgänge zur Realisierung von Funktions- und Passflächen eingesetzt werden. Hierbei handelt es sich um Finishing-Prozessschritte (s. Bild 2-3). Weitere Finishing-Prozessschritte können das Heißisostatische-Pressen zur Verringerung des Porenanteils in den Bauteilen, Wärmebehandlungen und Härtingsverfahren oder Oberflächenbeschichtungen umfassen, die je nach Bauteilanforderungen nötig sein können [Die20, GKS19].

2.3.2 Herausforderungen für den industriellen Einsatz von SLM

Die industrielle Anwendung des Laserstrahlschmelzens steht vor einer Vielzahl von Herausforderungen. Eine Wesentliche besteht darin, eine ausreichende Bauteilqualität im Hinblick auf Form- und Maßhaltigkeit, Oberflächenqualität und mechanischen Eigenschaften zu erreichen. Um gegenüber herkömmlichen Fertigungsverfahren wirtschaftlich konkurrenzfähig zu sein, müssen auch die Prozesssicherheit und -effizienz betrachtet werden. Ein robusten Prozessablauf erfordert beispielsweise die Vermeidung von Bauteilverzug, der zu Prozessabbrüchen führen kann [GKS19; JML+14]. Für die Effizienz sind die Datenvorbereitungs-, die Fertigungs- und Nachbearbeitungszeit sowie der Materialverbrauch zu berücksichtigen [FP16].

Ein grundlegendes Merkmal des selektiven Laserstrahlschmelzens ist das verfahrensimplizite Abkühlverhalten der Schmelze, das zu mikroskopischen plastischen und

elastischen Verformungen führen kann. Diese Verformungen können wiederum zu Eigenspannungen, Verzug und Mikrorissen führen [LJG+18, TMH+16]. Aufgrund des ungleichmäßigen Wärmeeintrags, der großen Temperaturgradienten und der geringen Wärmeleitfähigkeit des pulverförmigen Werkstoffs, kann bei dem SLM-Verfahren nicht auf solide Stützstrukturen verzichtet werden. Diese Stützstrukturen erfüllen verschiedene Funktionen, wie die Anbindung der Bauteile an die Bauplattform, die Vermeidung von Verzug und die Gewährleistung einer gleichmäßigen Wärmeabfuhr. Dennoch sind mit dem Einsatz von Stützstrukturen auch Nachteile verbunden [Mil17, BSM+11]. Neben der erhöhten Datenvorbereitungszeit stellen insbesondere der erhöhte personelle und zeitliche Aufwand für die Nachbearbeitung sowie der zusätzliche Materialverbrauch Herausforderungen dar [Cal14; GBI+18; KMF+18]. Darüber hinaus kann die Oberflächenqualität durch anhaftende Stützstrukturreste negativ beeinflusst werden. Auch unvollständig geschmolzene Pulverpartikel und der Treppenstufeneffekt (s. Bild 2-4) können sich negativ auf die Oberflächenqualität auswirken [Mil17; FHM20]. Mit einem erzielbaren Mittenrauwert R_a von circa $20\text{ }\mu\text{m}$ und einer gemittelten Rautiefe $R_z \geq 50\text{ }\mu\text{m}$, ist die Oberflächengüte der laserstrahlgeschmolzenen Bauteile vergleichbar mit dem Sand- oder Kokillenguss [FGK+11]. Für Funktions- und Passungsflächen sind in der Regel weitere Nachbearbeitungsschritte zur Verbesserung der Oberflächen vorzusehen [Ada15; BHS17; BMD12; Fer21; VDI 3405-3].

Neben der suboptimalen Oberflächenqualität führen der Treppenstufeneffekt, Anhaftungen, Stützstrukturreste und eine allgemeine prozessimmanente Positioniergenauigkeit von etwa $100\text{ }\mu\text{m}$ zu Form- und Maßabweichungen, die ebenfalls eine Nachbearbeitung erfordern [Mil17]. Der Toleranzbereich umfasst nach der DIN ISO 2768-1 mittel bis fein [DIN ISO 2768-1; TLZ20]. Die kleinste realisierbare Wandstärke liegt bei circa $180\text{ }\mu\text{m}$ [BHS17; FGK+11].

Das Ablösen der Bauteile von der Bauplattform erfolgt üblicherweise mittels einer Bandsäge, Drahterodierung oder manueller Verfahren. Nach dem Trennen von der Bauplattform wird das eingeschlossene, unverschmolzene Pulver sowie mögliche Stützstrukturreste von den Bauteilen entfernt. Diese zusätzlichen Arbeitsschritte während der Nachbearbeitung sind mit einer Zunahme der Fertigungszeit und -kosten verbunden [MAH17; BHS17; Cal14; CSW13-ol]. Auch die Kontamination durch das eingeschlossene Pulver bzw. das Handling der pulverförmigen Materialien im Allgemeinen stellen eine Herausforderung hinsichtlich der Arbeitssicherheit dar, bedingt durch die Lungengängigkeit des Pulvermaterials und die potentiell gesundheitsschädlichen Legierungselemente. Daher ist es erforderlich, die Entfernbarkeit des eingeschlossenen Pulvers zu optimieren und die Kontaktzeit mit dem Pulver zu reduzieren [CUM+21].

Aus wirtschaftlicher Sicht stellen insbesondere die Fertigungsgeschwindigkeit und Limitierungen der Bauraumgröße Herausforderungen dar. Zusätzlich sind hohe Materialkosten und die begrenzte Anzahl verfügbarer Legierungen nachteilig. Der limitierende Faktor

während der Fertigung ist im Falle des selektiven Laserstrahlschmelzens die Zeit zur Schichtgenerierung. Insbesondere der Anteil der Belichtungszeit ist aufgrund der Anlagentechnik limitiert, da die parallele Verwendung mehrerer Laser ihre Grenzen hat [Aus20, CGE+17-ol; FP16; Fas16].

Darüber hinaus können Anisotropie, Porosität und thermisch induzierte Eigenspannungen negativen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften der Bauteile haben. In solchen Fällen ist eine Nachbearbeitung in Form einer Wärmebehandlung erforderlich. Zusätzlich zu den Herausforderungen bei der Herstellung hochwertiger Bauteile besteht oft auch eine begrenzte Reproduzierbarkeit. Diese wird hauptsächlich durch den begrenzten Kenntnisstand über die physikalisch-mechanischen Zusammenhänge zwischen Werkstoff- und Prozessparametern und den resultierenden Bauteileigenschaften verursacht [CGE+17-ol; KMF+18; Mil17].

Zur Minimierung potenzieller Fehlerquellen und zur Verbesserung der Reproduzierbarkeit, existieren verschiedene wissenschaftliche Ansätze. Diese umfassen die Entwicklung von Konstruktionsrichtlinien [Ada15, Tho09], die Einführung von Normen [DIN EN ISO 52911-1, VDI 3405, ASTM F2971] sowie die Entwicklung von numerischen Simulationsprogrammen zur Verbesserung der Bauteilqualität und Prozessoptimierung [Lan17, Lan19]. Auch die Zertifizierung der Prozesse zur Erhöhung der Akzeptanz im industriellen Umfeld wird seit längerem gefordert [BBW+13, LKG21]. Ein Standard für die Qualifizierung von Stützstrukturen unter Berücksichtigung variierender Randbedingungen wie Materialien, Anlagen und Prozess- und Stützstrukturparametern existiert bisher nicht. Das Fehlen einer solchen Datengrundlage erschwert die Anwendbarkeit der Verfahren in vielen industriellen Sektoren [LJG+18, BBW+13]. Zur Gewinnung dieser Datengrundlage sind experimentelle Versuche unverzichtbar, da aufgrund der anisotropen Materialeigenschaften und des randbedingungsabhängigen Wärmeflusses simulationsbasierte Ansätze je nach Geometriekomplexität zum aktuellen Zeitpunkt nicht kosteneffizient sind [LJG+18].

Auch die Konstruktion von additiv zu fertigenden Bauteilen und von Stützstrukturen ist anwendungsangepasst auszulegen [BBW+13, KLL+19]. Dazu ist es notwendig, die Konstruktionsmethodik anzupassen und randbedingungsabhängige Konstruktionsrichtlinien für Bauteile und Stützstrukturen zu entwickeln. Ziel ist es einerseits, das volle Potenzial der additiven Fertigung auszuschöpfen und andererseits eine robuste und kosteneffiziente Fertigung zu ermöglichen [WMB+20; BBW+13; GKS19, PYA+15].

2.4 Stützstrukturen

Stützstrukturen auch bekannt als Supports oder Stützkonstruktionen dienen als mechanische Verbindung zwischen überhängenden Bauteilbereichen und der Bauplattform oder den darunterliegenden Bauteilbereichen [GKS19, VDI3405]. Sie sind unverzichtbar und spielen insbesondere beim Laserstrahlschmelzen eine entscheidende Rolle, weshalb eine

sorgfältig konstruierte und optimierte Stützstruktur von großer Bedeutung ist [Cal14, HHY+13, JML+14, PYA+15, YHB+17]. Die Gestaltung der Stützstrukturen hängt sowohl von der spezifischen Anwendung als auch von der Bauteilgeometrie ab [GKS19, MVH11]. Stützstrukturen werden in der Regel in Form von Gitterstrukturen oder dünnen Wänden ausgeführt, um eine effiziente und wirtschaftliche Herstellung zusammen mit dem eigentlichen Bauteil zu ermöglichen. Diese leichtgewichtigen Konstruktionen sind darauf ausgelegt, den Materialverbrauch zu minimieren und die Fertigungszeit zu verkürzen [Bod96]. Es ist jedoch zu beachten, dass Stützstrukturen nicht ausschließlich auf diese leichten Formen beschränkt sind. Je nach den Anforderungen der Bauteilgeometrie und der spezifischen Anwendung können auch massivere Stützstrukturen erforderlich sein.

Massive Stützstrukturen kommen zum Einsatz, wenn erhöhte Stabilität, Steifigkeit oder besondere Belastungsanforderungen gefordert sind. In solchen Fällen werden die Stützstrukturen als massives Volumenmaterial ausgeführt, um die erforderliche Unterstützung zu gewährleisten und potenzielle Verformungen oder Versagen während des Bauprozesses zu verhindern.

Nach Abschluss des Bauprozesses werden die Stützstrukturen, unabhängig von ihrer Ausführung als leichte Gitterstrukturen oder massive Volumenmaterialien, vom Bauteil entfernt. Dieser Schritt ist erforderlich, um die endgültige Bauteilgeometrie freizulegen und das Bauteil von unnötigem Material zu befreien. Ähnlich wie bei Angüssen und Steigern in Gussverfahren werden die Stützstrukturen als unvermeidbarer Nachteil betrachtet, da sie nach Abschluss der Fertigung entfernt werden müssen, um das fertige Bauteil zu erhalten und eventuelle Nachbearbeitungsschritte durchführen zu können.

Stützstrukturen dienen zur Abfuhr, der durch den Laser eingebrachten Wärme und reduzieren oder verhindern somit den wärmeeigenstanzungsinduzierten Verzug, was wiederum zu einem robusten Fertigungsprozess ohne Baujobabbruch führt. Darüber hinaus dienen sie zur Fixierung des Bauteils auf der Bauplattform und zu Aufnahme von Prozesskräften. In einigen Fällen werden Stützstrukturen in Form von Gitterstrukturen als Designelemente am Bauteil verwendet und sie können als Spannelement für eine spanende Nachbearbeitung dienen [KTN+18, Lan19, Qui18-ol].

Trotz der Notwendigkeit und der Vorteile von Stützstrukturen sind einige Nachteile zu beachten. Einer dieser Nachteile besteht darin, dass sie die Oberflächenqualität und Maßgenauigkeit des Bauteils im Bereich der Verbindung beeinträchtigen können. Dies liegt daran, dass nach der Entfernung der Stützstrukturen oft Supportfragmente am Bauteil zurückbleiben. Dabei ist der Grad des Einflusses auf die Oberflächenqualität und die Maßabweichungen gravierend von der gewählten Stützstrukturart abhängig aber auch von der Fertigungsanlage und den gewählten Prozessparametern [Kra17, MVH11].

Ein weiterer Nachteil ist, dass Stützstrukturen Kosten verursachen, da sie konstruiert, hergestellt und letztendlich wieder entfernt und entsorgt werden müssen [Kra17]. Bei der Konstruktion der Stützstrukturen ist zudem darauf zu achten, dass Passflächen oder optisch hochwertige Flächen idealerweise nicht mit Stützstrukturen versehen werden sollten. Dies kann Anpassungen am Bauteil erfordern und somit die Gestaltungsfreiheit einschränken [MVH11]. Ebenso beeinträchtigt die Berücksichtigung der Zugänglichkeit für die Entfernung der Stützstrukturen die Gestaltungsfreiheit. Darüber hinaus erfordert die Herstellung der Stützstrukturen Material, Zeit und Energie [STS21].

Diese Nachteile zeigen, dass die Verwendung von Stützstrukturen im additiven Fertigungsprozess eine Abwägung zwischen den gewünschten Vorteilen und den damit verbundenen Einschränkungen erfordert. Es ist wichtig, die Konstruktion und Platzierung der Stützstrukturen sorgfältig zu planen, um die negativen Auswirkungen zu minimieren und eine effiziente und wirtschaftliche Fertigung zu gewährleisten.

2.4.1 Anforderungen an Stützstrukturen

Aus den in Kapitel 2.4 genannten Gründen wird angestrebt, Stützstrukturen auf ein Minimum zu reduzieren [LBW+18, GKS19]. Ein gänzlicher Verzicht auf Stützstrukturen ist jedoch insbesondere im SLM-Verfahren nicht möglich. Hier ist immer eine Supportierung zur Bauplattform erforderlich, um den hohen Wärmeeintrag durch den Laser in die Bauplattform ableiten zu können. Die Erstellung der Stützstrukturen erfordert daher umfangreiche Fachkenntnisse des Anwenders, da nur gut konstruierte Stützstrukturen den Bauteilverzug und damit oft einhergehende Baujobabbrüche minimiert [JML+14, JXS18, KZS12]. Es ist daher ratsam, diese bereits während der Bauteilkonstruktion zu berücksichtigen, wie in früheren Studien empfohlen [Cal14, JML+14]. Stützstrukturen können die Oberflächenqualität beeinflussen und Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften des Bauteils haben [Tho09, JW17, KLL+19, KTN+18]. Eine sorgfältige Planung und Konstruktion dieser ist somit von großer Bedeutung, um die gewünschten Bauteileigenschaften zu erreichen und mögliche Probleme während des Fertigungsprozesses zu minimieren.

Gemäß verschiedenen Quellen [BQD+17, BSM+11, Fer21, JBW+18, STS21] erfüllt eine gute Stützstruktur die folgenden drei Hauptaufgaben:

- Abstützung überhängender Bauteilbereiche und Aufnahme von Prozesskräften, die durch die Bewegung des Beschichters und das Bauteileigengewicht entstehen.
- Ableitung von Wärme, die durch den Prozess entsteht, um Verzug und Verfärbungen des Bauteils zu vermeiden.
- Minimierung geometrischer Abweichungen, die durch wärmeinduzierte Eigenspannungen erzeugt werden.

Zusätzlich sollte eine Stützstruktur die folgenden Eigenschaften aufweisen:

- Geringer Materialverbrauch und Anknüpfung an möglichst wenige Bauteilbereiche [ABE21, JBW+18].
- Kurze Bauzeit [STS21].
- Gute Pulverentfernbarkeit aus den Zwischenräumen der Stützstruktur ermöglichen [JBW+18].
- Einfache Entfernbarkeit und ein einfaches Postprocessing des Bauteils ermöglichen [CSW13-ol, Fer21].
- Sicherstellung einer guten Bauteiloberfläche nach dem Entfernen der Stützstrukturen [JML+14].
- Geringer Konstruktions- und Datenvorbereitungsaufwand [ABE21].
- Geringer Speicherplatzbedarf bei der elektronischen Datenverarbeitung [Lan19].
- Geringe Kosten, die sich implizit aus der Erfüllung der vorherigen Punkte ergeben [HGM+18, KLL19, Fer21].

Bei der Erstellung von Stützstrukturen werden verschiedene, manchmal widersprüchliche Ziele verfolgt, was auf eine Mehrzieloptimierung bei der Stützstrukтураuswahl hindeutet. Es besteht immer ein Kompromiss zwischen verschiedenen Faktoren wie stabiler Anbindung, Materialbedarf und Ablösbarkeit. Die Auswahl einer bestimmten Stützstrukturart und deren Optimierung im Hinblick auf die definierten Ziele beeinflussen diese Mehrzieloptimierung [JML+14]. Weiter ist es sinnvoll, die Stützstrukturen entsprechend der späteren Anwendung des Bauteils zu konstruieren und angepasste Stützstrukturen in Bezug auf die Bauteilgeometrie zu verwenden [GKS19, HHS+19, MVH11, KZS+11]. Durch diese Anpassungen können die gewünschten Zielstellungen besser erreicht werden.

2.4.2 Gängige Ausführungen von Stützstrukturen

Um die Vielzahl der möglichen Stützstrukturen zu systematisieren, wurden Bemühungen unternommen, sie in Kategorien einzuteilen. Eine solche Einteilung wurde von GEBHARDT vorgenommen und umfasst die Kategorien "Solid" und "Non solid" Stützstrukturen. Bei den "Non solid" Stützstrukturen werden einzelne Stützstrukturwände mit einer Breite, die dem Laserstrahlfokus entspricht, erzeugt. Im Gegensatz dazu werden bei den "Solid" Stützstrukturen massive Volumenelemente verwendet [GKS19]. Eine alternative Kategorisierung von Stützstrukturen wurde von MORGAN vorgenommen, bei der zwischen aktiven und passiven Stützstrukturen unterschieden wird. Unter passive Stützstrukturen ist das lose Pulver zu verstehen, welches ein Bauteil umgibt und dort für eine Fixierung und Wärmeableitung des Bauteils sorgt. Diese Art von Stützstrukturen ist im Laserstrahlschmelzen nicht

gebräuchlich. Hier finden aktive Stützstrukturen Anwendung, die das Bauteil direkt mit der Bauplattform verbinden und als zusätzliche Elemente dienen, die später wieder entfernt werden müssen [MAH17]. SUBEDI hat Stützstrukturen in „solid based“ und „surface based“ unterteilt [STS21]. „Solid based“ Stützstrukturen werden als Volumenelemente mit explizit definierten Querschnitten klassifiziert, die mehrere laserspurbreite Schweißraupen pro Schicht erfordern, um hergestellt zu werden. Laut SUBEDI bieten diese Stützstrukturen eine bessere Wärmeabfuhr, sind jedoch schwieriger zu entfernen. Auf der anderen Seite werden "surface based" Stützstrukturen als solche mit einer einzigen laserfokusbreiten Schweißraupe definiert und weisen somit einen implizit definierten Querschnitt auf. Diese Stützstrukturen bieten eine bessere Entfernbareit, weisen jedoch schlechtere Wärmeableitungseigenschaften auf [STS21]. Im Kontext dieser Arbeit werden die deutschen Begriffe "dünnwandige Stützstrukturen" für "surface based-Stützstrukturen" und "massive Stützstrukturen" für "solid based-Stützstrukturen" verwendet. Stützstrukturen, die keiner dieser Kategorien zugeordnet werden können, werden unter "weitere Stützstrukturen" eingeordnet. Durch die Verwendung dieser Begriffe wird eine klare Unterscheidung und Klassifizierung der verschiedenen Stützstrukturtypen ermöglicht.

Im Folgenden werden die am weitesten verbreiteten Stützstrukturen beschrieben. Diese sind in der Regel in Jobvorbereitungsprogrammen implementiert oder in wissenschaftlichen Publikationen zur additiven Fertigung weit verbreitet [LMS+19].

2.4.2.1 Dünnwandige Stützstrukturen

Die Wanddicke der dünnwandigen Stützstrukturen wird durch den Laserfokusbereich definiert und kann minimal eine Dicke von $180\mu\text{m}$ aufweisen [BHS17; FGK+11]. Die Anbindung an das Bauteil erfolgt durch mehrere linienförmige Kontaktstellen. Typische Vertreter dieser Supportgattung sind der Block-, Wand-, und Kontursupport.

Der **Blocksupport** (s. Bild 2-7) ist eine Stützstruktur, die sich aus schmalen Wänden der Wandstärke b_w ($=0,15\text{ mm bis }0,5\text{ mm}$) in einem rechteckigen Gitterschema zusammensetzt. Er wird sowohl zur Abstützung von voluminösen und massiven Bauteile verwendet als auch von kleineren Bauteilen [GKS19]. Ein Blocksupport besteht in der Regel aus einer äußeren Kontur und einem Raster von Liniensupports, das als Stützstrukturhatch bezeichnet wird, um Verwechselungen mit dem Hatch der Belichtung aus Kapitel 2.3.1.2 zu vermeiden. Der Blocksupport ermöglicht eine flächige Unterstützung an der Bauteilunterseite, der sogenannten Downskinfläche [GBI+18, GKS19]. Die Kontaktpunkte zwischen dem Blocksupport und dem Bauteil werden durch die Verwendung von trapezförmigen Verjüngungen, auch als Zähne bezeichnet, minimiert (s. Bild 2-7 a)). Diese spezielle Form ermöglicht eine einfache Entfernung der Stützstrukturen und gewährleistet gleichzeitig eine effiziente Ableitung der Prozesswärme [GKS19, LLZ21b]. In der Regel werden Blocksupports mit einer Fragmentierung versehen, um das Ablösen der Stützstruktur vom Bauteil zu

erleichtern. Dies wird erreicht, indem in vordefinierten Abständen Δ_F eine Lücke der Breite a_F in den Stützstrukturhatch eingefügt wird, wie auch in Bild 2-7 b) dargestellt. Durch diese Fragmentierung wird eine gezielte Schwächung der Stützstruktur erreicht, wodurch sie leichter entfernt werden kann. Eine detaillierte Beschreibung der einstellbaren Blocksupportparameter kann Bild 2-19 entnommen werden.

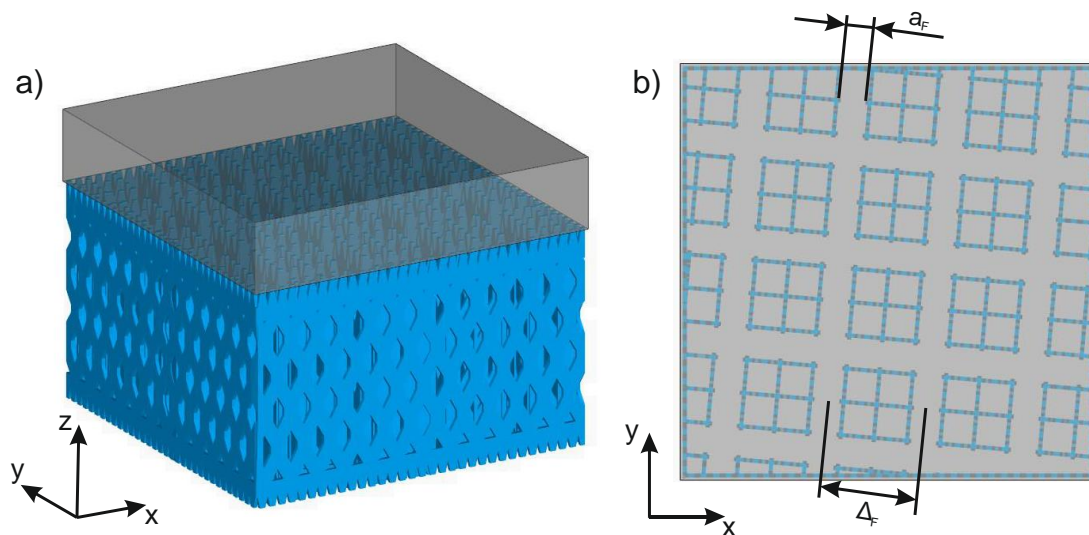


Bild 2-7: a) Blocksupport in der isometrischen Ansicht mit erkennbarer Perforation
b) Draufsicht auf den Blocksupport mit erkennbarer Fragmentierung.

Ein Nachteil des Blocksupports besteht darin, dass Pulver im Inneren zwischen den einzelnen Wänden eingeschlossen werden kann. Um eine erleichterte Entfernung des Restpulvers zu ermöglichen, kann in der Jobvorbereitungssoftware eine Perforation der Wände eingestellt werden [GBI+18].

Linien supports, auch bekannt als Linearsupports oder englisch Line Supports werden in der Regel an Bauteilen mit einer sehr schmalen Unterseite oder einer zur Bauplatte gerichteten Kante angebracht [Cal14]. Sie bestehen aus einer zentralen Supportwand, die wie in Abbildung 2-8 dargestellt, mit Querrippen verstärkt wird. Das Intervall der Querrippen kann eingestellt werden, um die Festigkeit und Stabilität der Linien supports anzupassen. Zur Verbesserung der Entfernbareit der Stützstrukturen können Zähne im Anbindungsbereich des Linien supports sowohl zum Bauteil als auch zur Bauplattform angebracht werden. Im Vergleich zum Blocksupport ist der Linien support aufgrund seiner spezifischen Konstruktion und der daraus resultierenden geringeren Anbindungsfläche leichter zu entfernen.

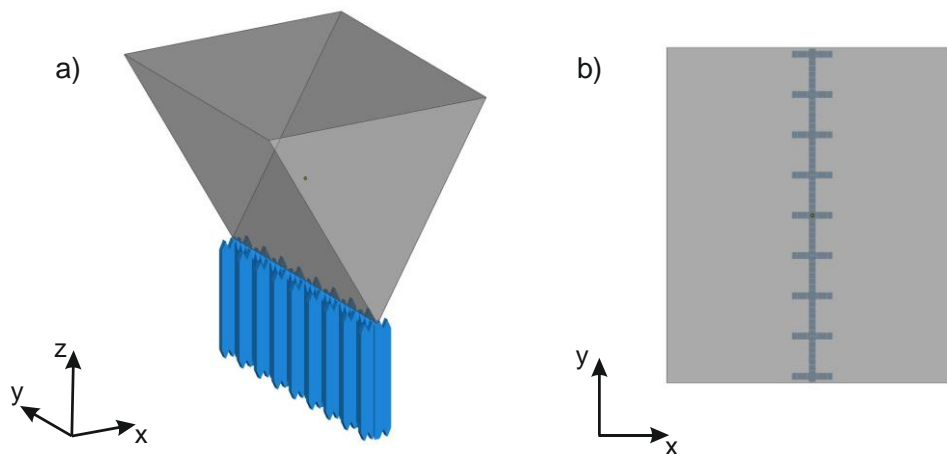


Bild 2-8: a) Liniensupport in der isometrischen Ansicht b) Draufsicht auf den Liniensupport.

Netzsupport besteht aus nach innen versetzten Konturen, die miteinander verbunden sind (s. Abbildung 2-9). Die Verbindungen zwischen den Konturen erfolgt durch auf den Mittelpunkt der Konturen ausgerichtete Querrippen, die eine stabile und gleichmäßige Unterstützung ermöglichen. Die Konfiguration des Netzsupports kann durch verschiedene Parameter angepasst werden. Dazu gehört die Geometrie der Zähne, der Abstand zwischen den Konturen, die Wandstärke und die Anordnung und Anzahl der Querrippen. Diese Parameter beeinflussen die Festigkeit, Stabilität und Entfernbarekeit des Netzsupports und sollten entsprechend den spezifischen Anforderungen des Druckprozesses und des Bauteils angepasst werden. Der Netzsupport ist ebenfalls als Websupport bekannt und wird beispielsweise beim Stützen von kleinen bis mittelgroßen, runden Flächen eingesetzt [GKS19].

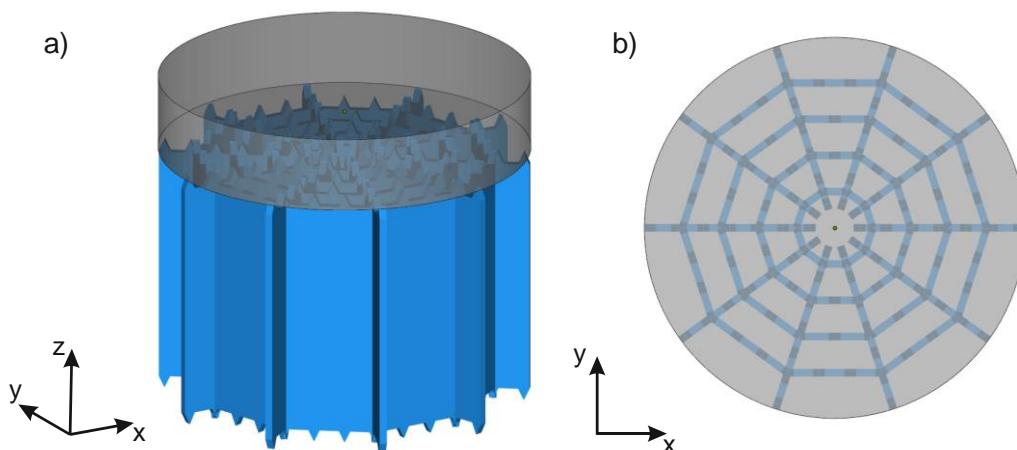


Bild 2-9: a) Netzsupport in der isometrischen Ansicht b) Draufsicht auf den Netzsupport.

Der **Kontursupport**, englisch Contour Support, zielt darauf ab die Konturerhaltung der abgestützten Fläche zu verbessern [GKS19]. Dazu greift diese Stützstruktur die Kontur des Bauteils auf und skaliert und dupliziert diese in einem definierten Abstand unterhalb der

Fläche des zu stützenden Bauteils. Dadurch entsteht eine konzentrische Wiederholung der Außenkontur vom Mittelpunkt aus, wie in Bild 2-10 dargestellt. Im Gegensatz zu anderen Stützstrukturen sind die Konturwände nicht miteinander verbunden [Cal14; Mat20-ol]. Zur Anbindung des Kontursupports an das Bauteil werden Zähne verwendet. Diese dienen dazu, die Stützstruktur leichter vom Bauteil entfernen zu können. Darüber hinaus kann eine Perforation der Stützstrukturwände vorgenommen werden, um eine bessere Entfernbareit von eingeschlossenem Pulver zu ermöglichen. Der Kontursupport eignet sich insbesondere für kleine bis mittelgroße Bauteile, bei denen eine präzise Konturerhaltung von großer Bedeutung ist. Durch die gezielte Unterstützung der Konturfläche wird eine verbesserte Druckqualität und eine geringere Verzerrung des Bauteils während des Druckprozesses erreicht [GKS19].

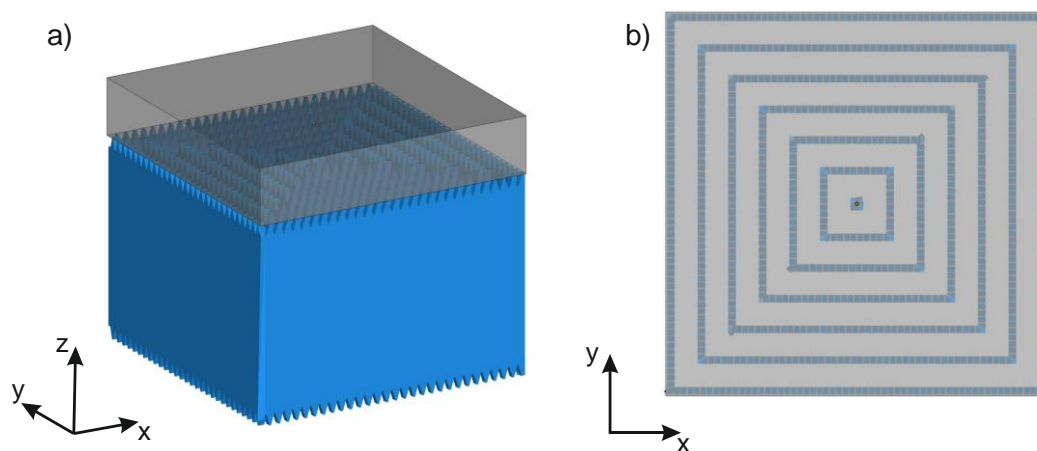


Bild 2-10: a) Kontursupport in der isometrischen Ansicht b) Draufsicht auf den Kontursupport.

Gussetsupports sind spezielle Stützstrukturen, die insbesondere für kleine Überhangbereiche geeignet sind. Ihr Zweck besteht darin, den überhängenden Bereich an vertikalen Bauteilflächen abzustützen [GKS19]. Bild 2-11 zeigt eine veranschaulichende Darstellung dieser Stützstruktur. Im Gegensatz zu anderen Stützstrukturen werden Gussetsupports direkt an vertikale Bauteilflächen angebunden und nicht an die Bauplattform. Dies ermöglicht es, dass sie nicht über die gesamte Bauhöhe des Bauteils gefertigt werden müssen. Dadurch werden der Materialverbrauch und die Bauzeit reduziert. Jedoch ist zu beachten, dass die Anwendung von Gussetsupports auch gewisse Nachteile mit sich bringt. Aufgrund ihrer Anbindung an die vertikale Bauteilfläche können sie die Oberflächenqualität negativ beeinflussen. Dies resultiert aus möglichen Rückständen, die bei der Entfernung der Stützstruktur auf der vertikalen Bauteiloberfläche zurückbleiben können. Um die Entfernbareit zu verbessern können Gussetsupports auch mit Zähnen ausgestattet werden. Des Weiteren weisen Gussetsupports im Vergleich zu anderen Stützstrukturen eine geringere Festigkeit auf [GKS19, LMS+19].

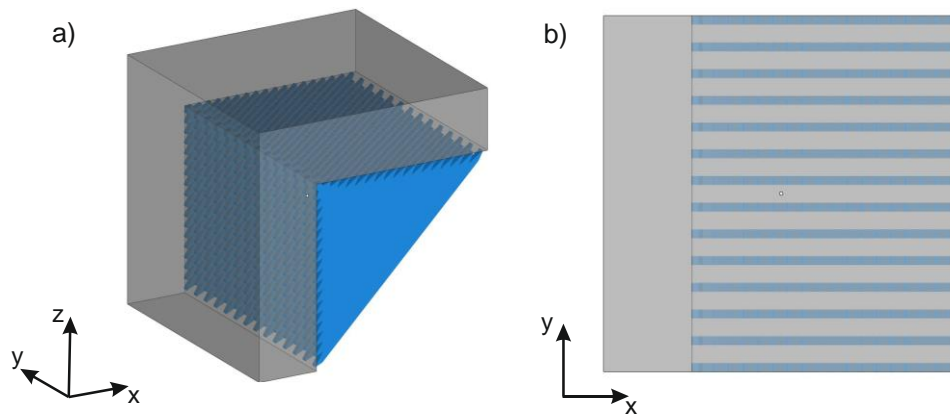


Bild 2-11: a) Gusset-support in der isometrischen Ansicht b) Draufsicht auf den Gusset-support.

Punktsupports, englisch Point Supports, werden an sehr kleine zu unterstützende Bauteilbereiche angebracht, unter denen die zuvor genannten Stützstrukturen keinen Platz finden. Sie haben lediglich eine punktförmige Anbindung an das Bauteil und zeichnen sich durch ihre einfache Entfernbareit aufgrund der geringen Anbindungsfläche aus. Die Größe der Anbindungsfläche kann durch Variation der Zahngeometrie vergrößert werden. Für größere Flächen können mehrere Punktsupports in einer gerasterten, rechteckigen Anordnung verwendet werden, um eine ausreichende Stützwirkung zu erzielen [GKS19, Cal14].

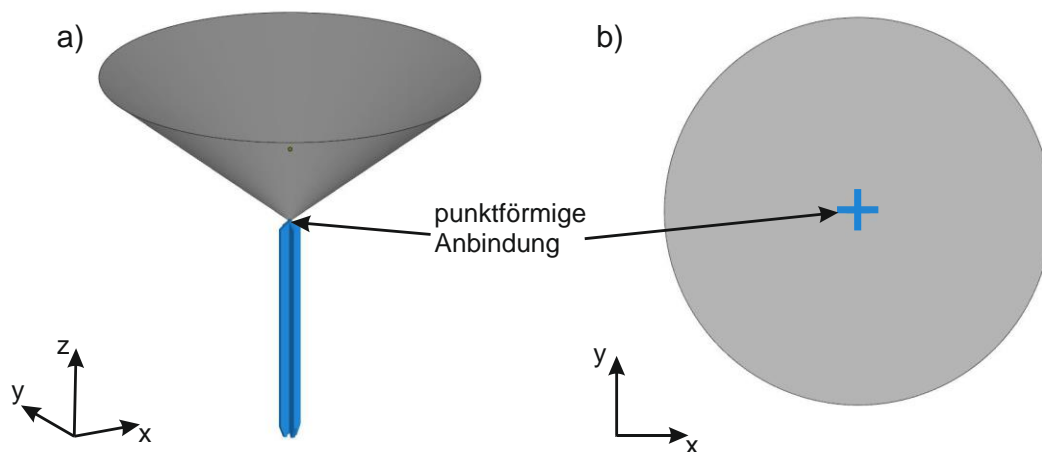


Bild 2-12: a) Punktsupport in der isometrischen Ansicht b) Draufsicht auf den Punktsupport.

2.4.2.2 Massive Stützstrukturen

Massive Stützstrukturen zeichnen sich im Unterschied zu dünnwandigen Stützstrukturen dadurch aus, dass sie nicht aus einzelnen Stützstrukturwänden bestehen, die die Dicke des Laserfokusdurchmessers aufweisen. Stattdessen werden sie wie auch ein additiv gefertigtes Bauteil schichtweise aus einer Kontur und der Füllung dieser Kontur aufgebaut. Es ist

jedoch zu beachten, dass sie mit anderen Prozessparametern belichtet werden als das eigentliche Bauteil. Bekannte Vertreter dieser Stützstrukturgattung sind der Volumensupport, der Gittersupport und der Kegelsupport.

Im Falle des **Volumensupports** werden die zu supportierenden Bereiche der Bauteilunterseite in der Regel komplett mit massivem Material an der Bauplattform angebunden. Andere Namen sind auch Solid-Support und Vollvolumensupport. Der Volumensupport kann mit Hilfe eines Jobvorbereitungsprogramms oder im Vorfeld im CAD-Programm erzeugt werden [Kra17]. Bei letzterem besteht die Möglichkeit den Volumensupport frei zu gestalten und als separates Bauteil an das zu fertigende Bauteil anzudocken, um eine Verbindung zwischen Bauplattform und Bauteil zu ermöglichen. Da die komplette Unterseite des Bauteils nach der additiven Fertigung spanend nachbearbeitet werden muss und der hohe Materialverbrauch sowie die langen Fertigungszeiten negativ sind, ist der Volumensupport für verzugsanfällige Teile zu empfehlen. Dabei handelt es sich oft um massive, großflächige Bauteile, die mit anderen Stützstrukturen nicht herstellbar sind. Hier bietet der Volumensupport eine ausgezeichnete Wärmeleitfähigkeit und sorgt für eine zuverlässige Fixierung [Die20, GKS19].

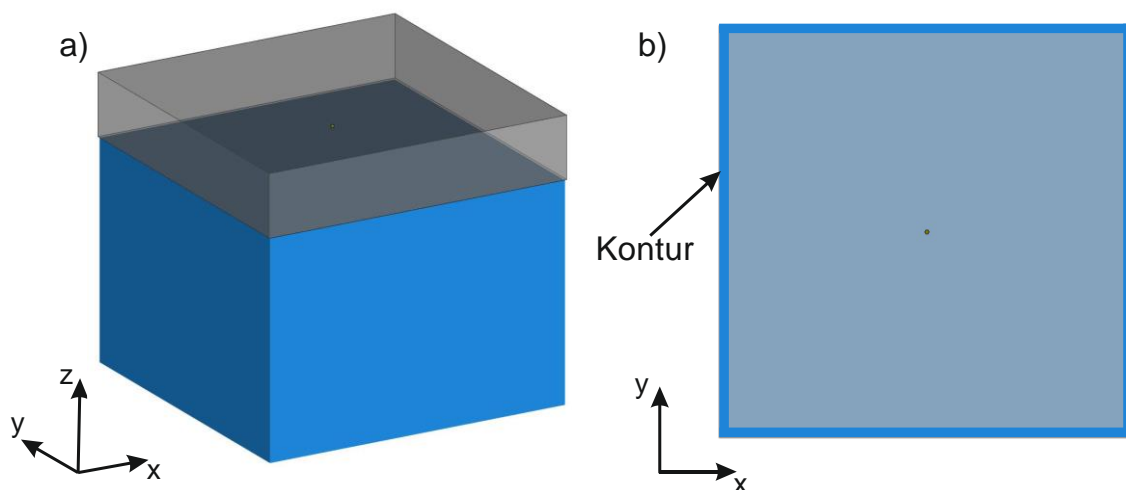


Bild 2-13: a) Volumensupport in der isometrischen Ansicht b) Draufsicht auf den Volumensupport.

Der **Kegelsupport**, auch als Cone Support oder Konussupport bekannt, besteht aus einer Anordnung kegelstumpfförmiger Säulen unter der zu supportierenden Fläche. Diese Stützstruktur ist in Bild 2-14 dargestellt. Die Kegelstümpfe weisen an der Bauplattform den größten Durchmesser auf und verjüngen sich zum Bauteil hin, sodass sie dort nahezu eine punktuelle Anbindung besitzen. Sie weisen einen geringen Materialverbrauch als Volumensupports auf und lassen sich durch die punktförmige Anbindung gut entfernen [GBI18]. Auch Pulver, welches zwischen den Stützen zurückbleibt, kann gut entfernt werden. Mit Zunahme der Kegeldurchmesser können auch verzugsanfällige, große Bauteile abgestützt werden [TMH+16]. Es ist jedoch zu beachten, dass der Einsatz massiver Kegelsupports,

im Vergleich zu dünnwandigen Stützstrukturen, einen höheren Materialbedarf und längere Belichtungszeiten erfordert. Eine Sonderform der **Kegelsupports** sind die Röhrensupports, bei denen die Kegelstümpfe hohl gestaltet sind. Die Außendurchmesser liegen typischerweise zwischen 1,3 mm und 2,0 mm [JML+14]. Sie eignen sich ebenfalls für verzugsanfällige große Bauteile und ermöglichen eine schnellere Belichtung als massive Kegelsupports. Nachteilig ist hingegen, dass Pulver in den Hohlräumen der Röhren eingeschlossen wird, welches beim Abtrennen von der Bauplattform freigesetzt wird [GW16, Ras19]. Eine weitere Sonderform sind die **Säulensupports**, bei denen der obere und untere Kegeldurchmesser den gleichen Wert haben, wodurch eine zylinderförmige Stütze entsteht.

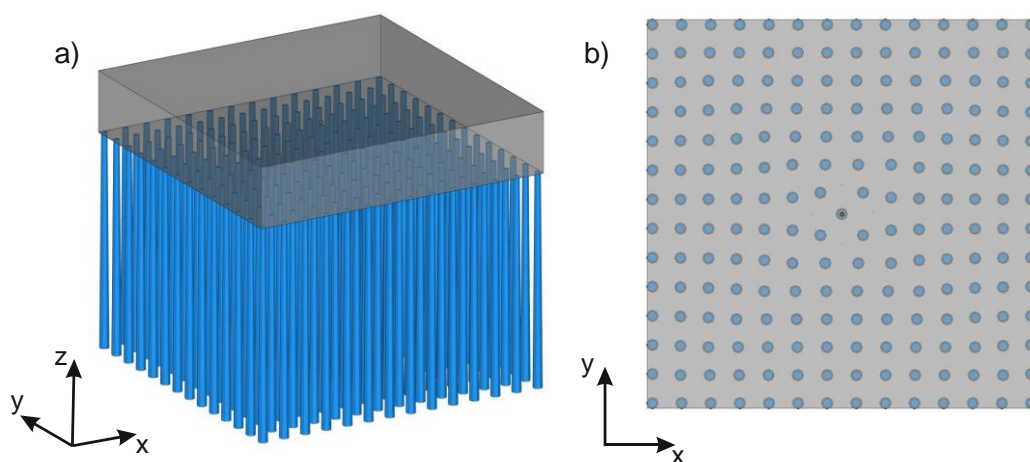


Bild 2-14: a) Kegelsupport in der isometrischen Ansicht b) Draufsicht auf den Kegelsupport.

Baumsupport besteht aus zwei Teilbereichen. Im unteren Bereich befindet sich ein zylinder- oder kegelförmiger Stamm, der als Anschluss zur Bauplattform dient und einen Durchmesser von einigen Millimetern aufweist. Ab einer definierten Höhe teilt sich dieser Stamm in dünnere Äste auf, die das Bauteil großflächig unterstützen. Ein Baumsupport ist in Bild 2-15 veranschaulicht. Die Verwendung von deutlich kleineren Ästen bei Baumsupport ermöglicht eine geringere Anbindungsfläche zum Bauteil, wodurch die Oberfläche des Bauteils weniger negativ beeinflusst wird und die Entfernbarkeit vereinfacht wird. Die einzelnen Baumsupports werden in einem definierbaren Abstand zueinander unter der zu stützenden Downskinfläche positioniert. Vorteile beim Baumsupport sind, dass die Belichtungszeit geringer ist als beim Volumensupport und der Materialverbrauch verringert wird. Des Weiteren kann Pulver zwischen den einzelnen Baumsupports gut entfernt werden. Baumsupports bieten sich für kleinere als auch großflächigere Bauteile an und werden auch als Tree Supports oder Branching Supports bezeichnet [GKS19, WMB+20, JXS18].

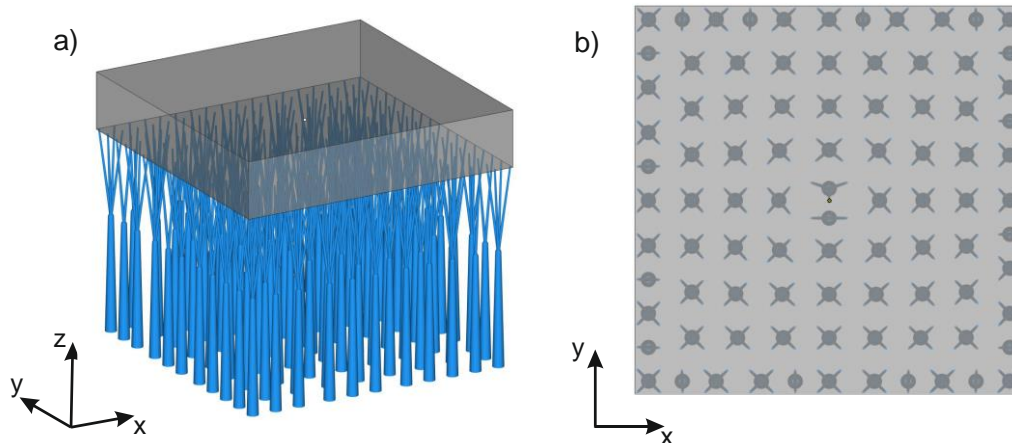


Bild 2-15: a) Baumsupport in der isometrischen Ansicht b) Draufsicht auf den Baumsupport.

Y-Supports und invertierte Y-Supports, auch als IY-Supports bezeichnet, sind spezielle Stützstrukturen, die insbesondere zur Supportierung von dünnen Platten verwendet werden. Sie sind ähnlich aufgebaut wie Baumsupports und bestehen aus einem zentralen Stammbereich, der sich in vier Äste aufteilt. Im Gegensatz zu herkömmlichen Baumsupports ist der Stamm bei Y-Supports und IY-Supports jedoch nicht dicker als die Äste. Bei IY-Supports ist der Stamm des Supports nach oben gerichtet, während die Äste sich nach unten erstrecken und eine Verbindung mit der Bauplatte eingehen. Durch diese invertierte Anordnung wird eine verbesserte Zugänglichkeit für die Nachbearbeitung und Entfernung der Supportstrukturen vom Bauteil ermöglicht. Die Y- und IY-Supports ermöglichen eine effektive Unterstützung, wobei die Belichtungszeit und der Materialverbrauch optimiert werden [GW16]. Der Aufbau von Y-Supports und IY-Supports ist in Bild 2-16 veranschaulicht

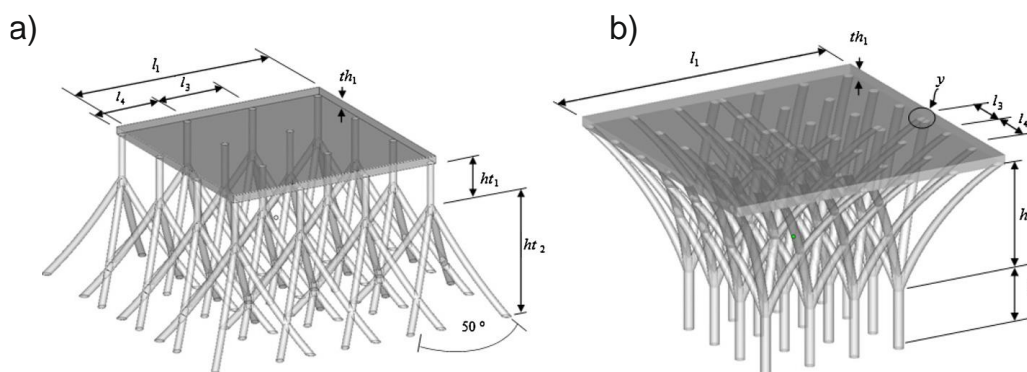


Bild 2-16: a) Aufbau des IY-Supports b) Aufbau des Y-Supports aus [GW16].

Feine **Gitterstrukturen**, auch als lattice structures oder zelluläre Stützstrukturen bezeichnet, können ebenso zur Supportierung genutzt werden [CSW13-ol, CLB+19, GKS19]. Diese Strukturen bestehen aus selbststützenden Einheitszellen, die in einem 3D-Raster angeordnet sind [CSW13, Die20, WT18]. Dabei können verschiedene Einheitszelltypen verwendet werden, wie zum Beispiel Schwartzzellen, Gyroidzellen oder einfache kubisch-

raumzentrierte Zellen. Je nach relativer Dichte und Größe der Einheitszellen weisen die Gitterstrukturen unterschiedliche Volumendichten auf [Krü18, YHB+17, SHE+13]. Die Anordnung der Zellen kann stochastisch oder periodisch erfolgen [GKS19].

Gitterstrukturen weisen üblicherweise einen punktförmige oder linienförmige Kontaktbereich zum Bauteil auf. Im Gegensatz zu dünnwandigen Supportstrukturen schließen sie kein Pulver ein und können sowohl vertikale als auch horizontale Kräfte aufnehmen [HYE+12, GW16, STS21]. Ihre Gestaltung erfolgt mit Hilfe von spezieller AM-Software und braucht ein fundiertes Wissen, da je nach Einstellung der Gitterstrukturparameter unterschiedliche Ergebnisse erreicht werden können. Gitterstrukturen eignen sich für jegliche Art von Bauteilgrößen [GKS19, KKK+18, MLL+19, YHB+17].

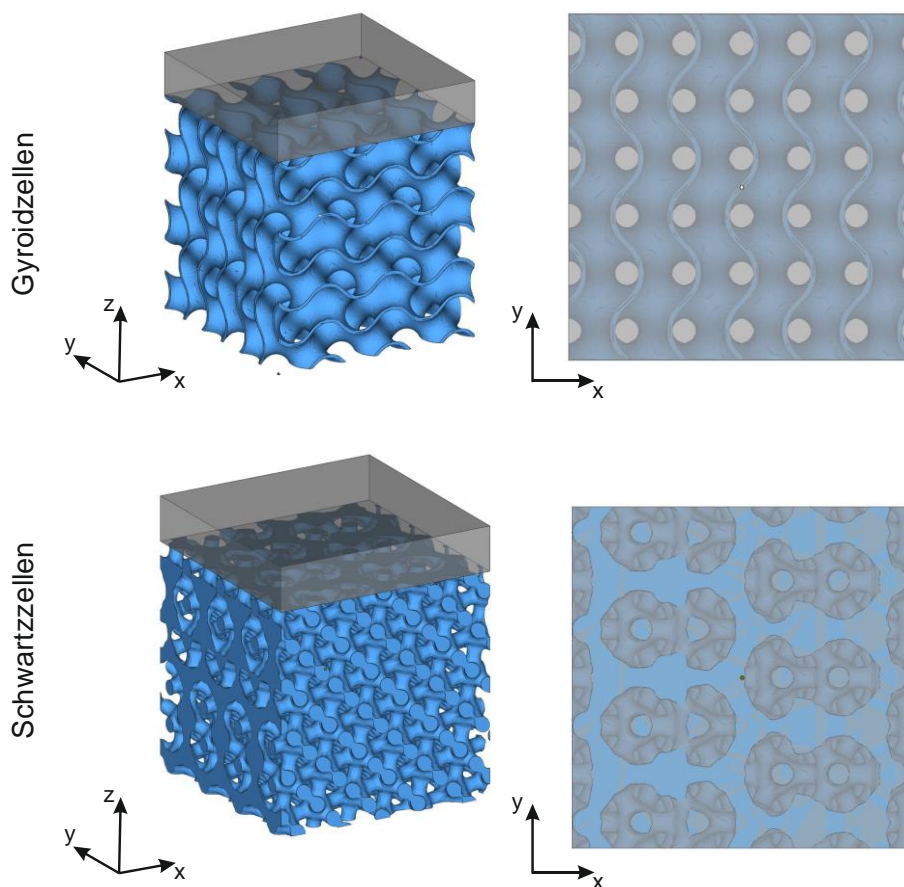


Bild 2-17: Gitterstrukturen als Supportstrukturen.

Bei gradierten Stützstrukturen handelt es sich um zelluläre Gitterstrukturen, die lokale Änderungen in ihrer Volumendichte aufweisen (s. Bild 2-18). So werden gering belastete Bereiche mit Einheitszellen, die eine geringe Volumendichte aufweisen, gestützt und stark belastete Bereiche mit Zellen, die eine höhere Volumendichte aufweisen. Die Generierung gradierten Stützstrukturen erfordert ein genaues Wissen über die zu unterstützenden Bereiche. In der Regel wird hierzu der schichtweise Aufbauprozess mittels Finite-Elemente-Methode (FEM) simuliert. Dabei wird auch die thermische Belastung der Stützstrukturen

bestimmt und hoch belastete Stellen mit mehr Stützstrukturen supportiert. Die Generierung der Stützstrukturen erfolgt dabei in der Regel computergestützt [Bha18, YHB+17, JXS18].

Gradierte Stützstrukturen bieten eine Reihe von Vorteilen. Sie ermöglichen eine bessere Kontrolle über den Supportprozess und können zur Reduzierung von Supportmaterial beitragen, was Zeit und Kosten spart. Zudem können sie dazu beitragen, die Oberflächenqualität des Bauteils zu verbessern und Verformungen während des Druckprozesses zu minimieren. Die Entwicklung gradierte Stützstrukturen ist ein aktives Forschungsfeld, das stetig weiterentwickelt wird, um den Supportierungsprozess bei der additiven Fertigung zu verbessern und die Einsatzmöglichkeiten der Technologie zu erweitern.

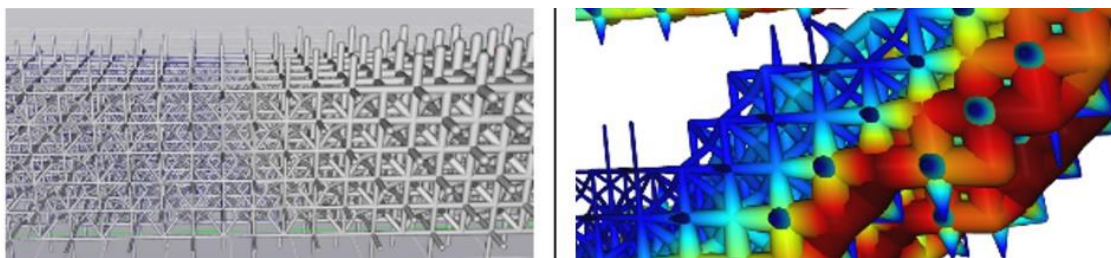


Bild 2-18: Gradierte Supportstrukturen mit belastungsangepassten Strebendicken [BHA18]

2.4.2.3 Weitere Stützstrukturarten

Im nachfolgenden Abschnitt werden Stützstrukturen vorgestellt, die weder den Kategorien aus Kapitel 2.4.2.1 noch denjenigen aus Kapitel 2.4.2.2 zugeordnet werden können oder als Sonderformen gelten. Diese umfassen hybride Stützstrukturen und lösliche Stützstrukturen.

Stützstrukturen, die eine Kombination aus dünnwandigen und massiven Stützstrukturen darstellen werden als **hybride Stützstrukturen** bezeichnet. Hierbei werden die Vorteile beider Stützstrukturtypen genutzt, indem über die Bauhöhe der Supporttyp geändert wird. Dazu werden beispielsweise Baumsupports zur Anbindung an die Bauplattform genutzt. Diese schließen weiter oben an einen Volumensupport an, auf dem wiederum ein Blocksupport angebracht ist, der den Kontakt zum Bauteil herstellt. Die Stützstrukturtypen werden somit in Reihe, nacheinander gefertigt. Auch eine parallele Anordnung ist möglich, so kann ein Bauteil mit Blocksupport gestützt werden und an kritischen verzugsgefährdeten Bereichen können zusätzliche Kegelsupports angebracht werden [GKS19].

Lösliche Stützstrukturen finden hauptsächlich Anwendung bei additiven Kunststoffverfahren. Hier wird parallel mit zwei unterschiedlichen Werkstoffen gebaut. Das Bauteil wird aus dem Grundmaterial gefertigt und der Support aus einem anderem Material, das später, weitestgehend rückstandslos durch eine Lauge aufgelöst wird. Dieses Verfahren ermöglicht die Herstellung von komplexen Geometrien und Hohlräumen ohne die Notwendigkeit

manueller Entfernung der Stützstrukturen. Hierbei ist eine Zugänglichkeit der Laugenflüssigkeit zu den Stützstruktur zu gewährleisten [GKS19, Die20, JXS19]. Für metallische Werkstoffe gibt es ebenfalls Bestrebungen die Stützstrukturen löslich zu gestalten. Dies wird durch die Anwendung eines elektrochemischen Prozesses erreicht, der die feinen Stützstrukturen im Kontaktbereich zum Bauteil auflöst. Dabei erfolgt auch eine geringfügige Abtragung des Bauteils, was im Vorfeld berücksichtigt werden muss [HNC+16, JXS18]. Diese Methode ermöglicht die Entfernung der Stützstrukturen ohne manuellen Aufwand, was insbesondere bei komplexen Geometrien und empfindlichen Bauteilen von Vorteil ist.

2.4.3 Generierung von Stützstrukturen

Eine effektive Stützstrukturgenerierung ist von entscheidender Bedeutung für die erfolgreiche Herstellung eines funktionsfähigen Bauteils [JHF15]. Dabei spielt die Expertise des Anwenders eine wichtige Rolle [JXS18]. Bisher gibt es keine allgemeingültige Systematik zur Erzeugung von Stützstrukturen [GKS19]. Im Folgenden wird das gängigste Vorgehen beschrieben.

Die Erzeugung von Stützstrukturen kann weitgehend automatisiert durch verschiedene Jobvorbereitungsprogramme erfolgen. Zu den bekannten Programmen gehören Magics von Materialise, Bridgeworks von Solid Concepts, Netfabb von Autodesk, Amphyon von Additive Works, 3Data Expert von DeskArtes, NX Additive Manufacturing von Siemens und Additive von Simufact [3D19-ol, ANS20a-ol, GKS19, JML+14, Mat20-ol; Sim18-ol, Zen15, Die20].

Als Basis dient in der Regel ein fehlerfreier STL-Datensatz der zu bauenden Bauteile (s.a. Kapitel 2.3.1) [GKS19]. Diese STL-Daten werden virtuell im Bauraum der Maschine positioniert und orientiert. Dabei wird schon bei der Orientierung darauf geachtet, dass möglichst wenig Support benötigt wird. Das heißt, das überhängende Bereiche, die den Downskinwinkel unterschreiten, vermieden werden. Der Downskinwinkel ist der Winkel, den ein Bauteilbereich zur Bauplattform haben darf, ohne supportiert werden zu müssen. Dieser Winkel wird oft mit 45° angegeben, kann aber auch je nach Werkstoff und verwendetem Prozessparametersatz andere Geometrien annehmen [GKS19, Kra17, Lan17]. Die Orientierung kann automatisiert durch eine Hilfsfunktion in der Software, die auf die entsprechenden Winkel achtet oder manuell durch einen versierten Anwender erfolgen [CLB+19, VA16]. Anschließend werden die Stützstrukturen generiert. Auch hier können automatische Funktionen des Jobvorbereitungsprogramms genutzt werden, um alle Flächen zu unterstützen, die den Downskinwinkel unterschreiten. Standardmäßig wird dabei Block Support verwendet, der in der Software hinterlegt ist und sich bei verschiedenen Werkstoffen bewährt hat. Der Blocksupport ermöglicht eine zufriedenstellende Wärmeabfuhr und Stabilität während des Prozesses bei gleichzeitig guter Entfernbarkeit. Wenn jedoch der Support an die konkreten Zielvorgaben wie Entfernbarkeit, stabile Anbindung oder Materialbedarf angepasst

werden soll, können manuelle Änderungen an den Supportparametern erforderlich sein. Der Anwender kann je nach Supportart beispielsweise die Wanddicke, die Zahngeometrie oder die Volumendichte anpassen, um den unterschiedlichen Anforderungen gerecht zu werden. Im genaueren wird auf Stützstrukturparameter im Kapitel 2.4.4 eingegangen. Auch die zu supportierenden Bauteilbereiche können manuell festgelegt werden, falls der Anwender der Meinung ist, dass die automatisiert generierten Stützstrukturen nicht genügen. Hierzu können Bauteilbereiche markiert und Stützstrukturen manuell hinzugefügt werden. Es ist auch möglich massive Stützstrukturen einzufügen, um besonders verzugsanfällige Bereiche zu supportieren.

Anschließend erfolgt das Slicen der Bauteile und Stützstrukturen, wobei den Stützstrukturen andere Belichtungsparameter zugewiesen werden als dem Bauteil. Dies hat den Hintergrund, dass das Material der Stützstrukturen oft so belichtet wird, dass es poröser ist als das Bauteilmaterial und somit leichter entfernt werden kann.

Bei diesem beschriebenen Vorgehen bleibt das Bauteil unverändert, lediglich die Orientierung im Bauraum sowie die Stützstrukturen werden angepasst. In anderen Vorgehensweisen wird das Bauteil angepasst und im Hinblick auf den Downskinwinkel und den einhergehenden Stützstrukturbedarf optimiert. Hierzu kommen oft Topologieoptimierungsverfahren zum Einsatz. Dieser Ansatz ist im Hinblick auf eine robuste Fertigung nachvollziehbar, jedoch ist es nicht immer möglich, das Bauteil vollständig an das Fertigungsverfahren anzupassen [LLW+18].

2.4.4 Stützstrukturparameter

Stützstrukturen können in drei Bereiche unterteilt werden, nämlich die untere Anbindung an die Bauplatte oder das Bauteil, den Kernbereich und die obere Anbindung an das Bauteil [GKS19, JBW+18]. Die obere und untere Anbindung werden in der Regel mit Sollbruchstellen in Form von Zähnen ausgeführt. Die Form dieser Zähne kann variieren, was wiederum Auswirkungen auf die Eigenschaften der Bauteile hat. Stützstrukturen mit fein konstruierten Zähnen lassen sich in der Regel besser entfernen und bieten eine höhere Qualität der Bauteiloberfläche, während massive Zähne eine bessere Verbindung und Wärmeableitung ermöglichen. Der Kernbereich ist in der Regel robuster als die Anbindungsbereiche ausgeführt und kann ebenfalls durch die gewählten Stützstrukturparameter Einfluss auf die gewünschte Bauteilqualität oder den Prozess ausüben. Ziel bei der Stützstrukturparameterwahl ist es, eine Stützstruktur zu konstruieren, die ausreichenden Widerstand gegenüber Eigenspannungen und Prozesskräften aufweist und gleichzeitig eine gute Ablösbarkeit und Pulverentfernbarkeit ermöglicht. Dabei ist zu beachten, dass die Stützstruktur immer an den Werkstoff, die verwendeten Prozessparameter, die Fertigungsanlage und sogar individuell an das Bauteil anzupassen ist [TMH+16]. Im Folgenden werden die einstellbaren Stützstrukturparameter am Beispiel des Blocksupports aufgeführt. Dieser wurde

ausgewählt, da er die am weitesten verbreitete Art von Stützstruktur darstellt und in den meisten Jobvorbereitungsprogrammen verfügbar ist [LMS+19].

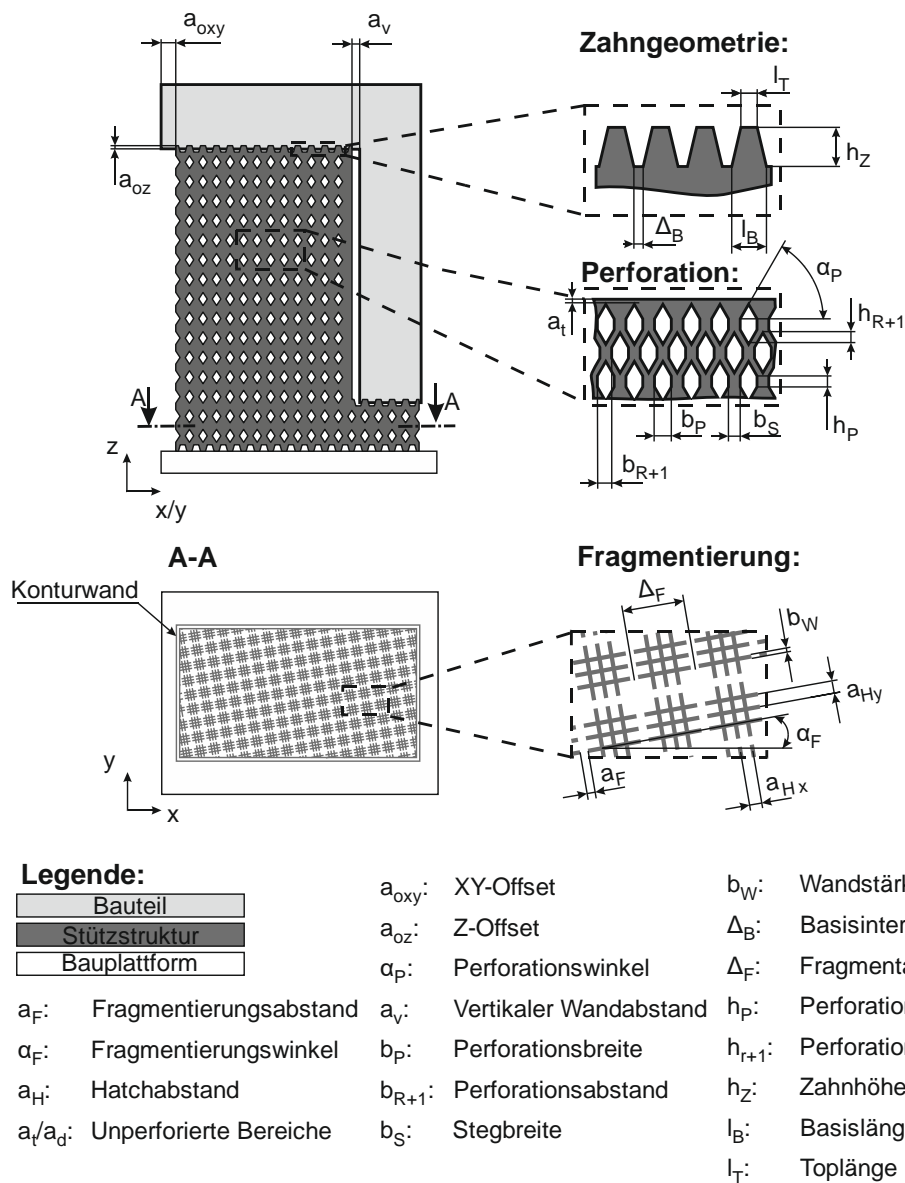


Bild 2-19: Relevante Blocksupportparameter in der Seitenansicht (oben) sowie in der Draufsicht (unten).

Die Zähne im oberen und unteren Anbindungsbereich der Stützstrukturen können durch verschiedene Parameter beschrieben werden. Dazu gehören die Topplänge l_T , die Basislänge l_B , der Z-Offset a_{OZ} , die Zahnhöhe h_Z sowie das Basisintervall Δ_B (s.a. Bild 2-19). Der Kernbereich wird durch die Wandstärke b_W , den Stützstrukturhatchabstand a_H , der den Abstand benachbarter Stützstrukturwände in x und y Richtung angibt sowie den XY-Offset a_{Oxy} bestimmt. Die Fragmentierung ist optional und kann durch den Fragmentationswinkel α_F den Fragmentationsabstand a_F und das Fragmentationsintervall Δ_F beschrieben werden. Durch die Fragmentierung wird eine Lücke zwischen den Blocksupportwänden

eingbracht, was die Ablösbarkeit und die Entfernung eingeschlossenen Pulvers verbessert. Es sollte jedoch darauf geachtet werden, dass die Lücke nicht zu groß gewählt wird, um eine ausreichende Festigkeit und Wärmeabfuhr zu gewährleisten [Cal14]. Eine weitere optionale Einstellung für den Kernbereich ist die Perforation. Durch diese lassen sich in die Blocksupportwände Ausschnitte einbringen, um die Pulverentfernung zu erleichtern. Jedoch wird dadurch die Festigkeit verringert. Die aufgeführten Parameter können separat für die Konturbahnen der Stützstrukturen und das Stützstrukturhatching eingestellt werden. Der Hatchabstand a_H , der Fragmentierungsintervall Δ_F , die Toplänge l_T und die Zahnhöhe h_z haben den größten Einfluss auf diese Bauteileigenschaften und die Prozessstabilität [Cal14, CSW13-ol, Mat18].

2.4.5 Stützstrukturen Forschungsbedarf

Bereits in der Arbeit von JIANG wurde festgestellt, dass Veröffentlichungen zu Stützstrukturen im Vergleich zu der Gesamtanzahl an Veröffentlichungen im Themenfeld additive Fertigung nur einen geringen Anteil ausmachen [JXS18]. In diesen Veröffentlichungen werden hauptsächlich Ansätze betrachtet, bei denen das Bauteil selbst oder die Bauteilorientierung geändert werden, um Stützstrukturen zu vermeiden. JIBIN UND PAUL schlugen beispielsweise vor, die optimale Bauteilorientierung computergestützt zu ermitteln, was sich allerdings als zu rechenintensiv erwies [Jib05, PA15]. Ähnliche Ergebnisse wurden auch von KROL UND ZÄH erzielt, die die Vielfalt der möglichen Stützstrukturgeometrien als Hindernis für eine computergestützte Simulation von Stützstrukturen ansahen [KZS+11].

Bisher ist keine einheitliche Methode zur vergleichenden Bewertung von Stützstrukturen für das SLM-Verfahren bekannt, die einen Kompromiss aus Stützstrukturnutzung und Bauteilqualität herstellt [JXS18, BQD+17]. Es gibt zwar Bestrebungen den Einfluss von Supportstrukturen auf die späteren Bauteileigenschaften zu ermitteln, jedoch werden dabei oft nur Kunststoffverfahren betrachtet, topologieoptimierte Stützstrukturen berücksichtigt oder der Fokus liegt nur auf einer bestimmten Bauteileigenschaft oder einem bestimmten Stützstrukturtyp [JSX+18, LMS+19, ABE21, CLB+19]. Bereits MORGAN bemängelte das Fehlen von Quantifizierungsmethoden zur Bewertung von Stützstrukturen [MAH17]. Zwar gibt es erste Ansätze mit Benchmark-Bauteilen zur Bewertung von Stützstrukturen von BARTSCH ET AL., die eine Quantifizierung der Stützstruktureigenschaften vorsehen, jedoch wird hier nur ein Prozessparametersatz für eine Anlage und den Werkstoff Ti6Al4V betrachtet [BOE20]. Auch GRALOW ET. AL. stellen ein Verfahren zum Benchmarking und Quantifizieren unterschiedlicher Stützstrukturen vor. Allerdings wird hier nur das weniger verzugsanfällige Material AlSi10Mg betrachtet, und es ist unklar, ob die Prüfkörper auch aus anderen Materialien, die verzugsanfälliger sind, hergestellt werden können [GBI+18].

Aus diesen Beobachtungen lässt sich die Notwendigkeit einer Methode erkennen, die die Erstellung von quantifizierbaren Konstruktionsrichtlinien für Stützstrukturen ermöglicht, mit dem Ziel anwendungsangepasste Stützstruktur auswählen zu können.

2.5 Konstruktionsrichtlinien für die additive Fertigung

Die aktuell vorliegenden Konstruktionsrichtlinien sind hauptsächlich auf konventionelle Fertigungsverfahren, wie spanende, ur- oder umformende Fertigung ausgelegt. Diese herkömmlichen Richtlinien verfolgen zwei Hauptziele. Erstens zeigen sie, wie die Fertigung mithilfe des betrachteten Verfahrens grundsätzlich möglich ist, und zweitens geben sie eine Hilfestellung, wie die Kosten, die Fertigungszeit und der Materialbedarf minimiert werden können [BBW+13, Gau11-ol]. Im Gegensatz dazu verhalten sich additive Fertigungsverfahren völlig anders, da die Kosten, Fertigungszeit und der Materialbedarf von der Bauteilkomplexität entkoppelt sind. Beispielsweise können eine erhöhte Komplexität, die Integration von Funktionen oder die Individualisierung von Bauteilen sogar zu geringeren Kosten führen [BBW+13]. Aufgrund des Mangels an Konstruktionsrichtlinien für additive Fertigungsverfahren stellt die Verbreitung dieses Wissens über die additive Fertigung in der Industrie ein Hindernis dar. Daher ist es erforderlich, spezifische Konstruktionsrichtlinien zu erarbeiten, um das Wissen und die Best Practices in diesem Bereich weitergeben zu können. Die Entwicklung solcher Richtlinien ist von besonderer Relevanz, um die Anwendung von additiven Fertigungsverfahren zu fördern [Tho09]. Die bestehenden Konstruktionsrichtlinien für die additive Fertigung lassen sich in drei Hauptgruppen einteilen.

1. Konstruktionsrichtlinien für eine erfolgreiche additive Fertigung, die auch als Design for AM (DfAM) oder Konstruktionsrichtlinien für eine fertigungsgerechte Gestaltung bezeichnet werden [DNM19]. Diese Richtlinien legen fest, wie ein Bauteil angepasst werden muss, dass es robust mittels eines additiven Fertigungsverfahrens hergestellt werden kann.
2. Konstruktionsrichtlinien für eine nachbearbeitungsgerechte Gestaltung. In diesen wird festgelegt, wie ein additives Bauteil zu konstruieren ist, damit es erfolgreich nachbearbeitet werden kann.
3. Konstruktionsrichtlinien für Stützstrukturen, die eine prozess- oder anwendungsangepasste Konstruktion von Stützstrukturen ermöglichen sollen [GKS19].

Die Konstruktionsrichtlinien sind meist spezifisch für ein additives Fertigungsverfahren und stark vom verwendeten Verfahren abhängig. In dieser Ausarbeitung liegt der Fokus auf Konstruktionsrichtlinien für das SLM-Verfahren.

2.5.1 Richtlinien für eine fertigungsgerechten Gestaltung

Wie bereits erwähnt, existiert keine einzige umfassende Konstruktionsrichtlinie für die additive Fertigung, sondern vielmehr eine Vielzahl von verfahrensspezifischen Richtlinien. Hier ist die Arbeit des VDI-Fachausschuss 105.3 „Additive Manufacturing – Konstruktionsempfehlungen“ zu erwähnen, der die Richtlinie VDI 3405, Blatt 3 erarbeitet hat, welche grundlegende Konstruktionsrichtlinien für eine erfolgreiche, additive Fertigung aufführt [GKS19].

ADAM entwickelte eine Methode zur Herleitung von Konstruktionsrichtlinien für eine fertigungsgerechte Gestaltung auf Basis von Standardelementen. Standardelemente sind mathematisch beschreibbare Formen, aus denen sich Bauteile zusammensetzen. *ADAM* ermittelte für diese Standardelemente Grenzwerte innerhalb derer sie robust gefertigt werden können. Diese Grenzwerte kombinierte *ADAM* mit erklärenden Texten und einer graphischen Gegenüberstellung zwischen einer fertigungsgerechten und einer nicht fertigungsgerechten Gestalt, um Konstruktionsrichtlinien abzuleiten. Auf dieser Basis wurden auch Konstruktionsrichtlinien für eine nachbearbeitungsgerechte Gestaltung sowie Richtlinien zur Vermeidung von Stützstrukturen entwickelt [Ada15].

KRANZ, HERZOG UND EMMELMANN haben Konstruktionsrichtlinien für eine fertigungsgerechte Gestaltung für das Material TiAl6V4 entwickelt, wobei sie sich auf die Leichtbauoptimierung konzentrierten. Um dies zu erreichen, fertigten sie Prüfkörper an, die die Bewertung der Teilegenauigkeit oder Oberflächenqualität ermöglichten. Die Ergebnisse ihrer Untersuchungen fassten sie in einem Konstruktionskatalog zusammen [KHE15].

THOMAS sammelte Informationen über die Konstruktion von Bauteilen mittels SLM von Anwendern. Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen leitete er Prüfkörper ab und führte experimentelle Studien durch, um die Verfahrensgrenzen für das Material 316L zu ermitteln. Aus den Ergebnissen der experimentellen Untersuchungen leitete er Konstruktionsrichtlinien für eine fertigungsgerechte Gestaltung ab, die er in Form von Texten, Tabellen und Abbildungen präsentierte [Tho09].

KRUTH ET AL. konzipierten und produzierten Prüfkörper, um geometrische Strukturen wie dünne Wandungen, Bohrungen und Überhänge zu untersuchen. Durch die systematische Analyse der Prozessgrenzen für diese geometrischen Strukturen konnten sie Konstruktionsrichtlinien zur fertigungsgerechten Gestaltung ableiten [KFv+04, Kra17].

KUMKE ET AL. führten eine umfangreiche Zusammenstellung von Konstruktionsrichtlinien durch, die auf eine fertigungsgerechte Gestaltung im Rahmen eines speziell für die additive Fertigung angepassten Konstruktionsprozesses abzielen. Diese Konstruktionsrichtlinien wurden in einem Softwaretool gesammelt und sowohl durch textuelle Erklärungen als auch durch graphische Darstellungen veranschaulicht [KWV16].

LEUTENECKER ET AL. präsentierten in ihrer Arbeit eine Methode zur Entwicklung von Konstruktionsrichtlinien, die es ermöglicht, Bauteile ähnlich wie bei ADAM in standardisierte Elemente aufzuteilen. Für diese Standardelemente wurden Grenzwerte ermittelt, die eine robuste Fertigung gewährleisten. Dabei wurde auch die Orientierung der Elemente berücksichtigt [LKM16].

LACHMEYER UND LIPPERT sammelten Richtlinien für eine fertigungsgerechte Gestaltung von additiven Bauteilen und zeigten auf, wie diese in einer Entwicklungsmethodik einzusortieren sind. Darüber hinaus führten sie auch Konstruktionsrichtlinien für eine nachbearbeitungsgerechte Gestaltung auf [LL20].

2.5.2 Richtlinien für eine nachbearbeitungsgerechte Gestaltung von AM-Bauteilen

GEBHARDT ET AL. betonen in ihrer Studie, dass eine frühzeitige Optimierung der Konstruktion additiv gefertigter Bauteile im Hinblick auf spätere Nachbearbeitungsprozesse von großer Bedeutung ist. Dabei geben sie detaillierte Hinweise zur Integration von Bohrungen in additiv gefertigte Bauteile. Allerdings fehlen in ihrer Arbeit eine graphische Darstellung sowie eine Quantifizierung dieser Optimierungshinweise [GKS19].

LANGELAAR entwickelte ein Softwaretool, das Konstruktionsrichtlinien für eine zuverlässige Nachbearbeitung berücksichtigt. Dieses Tool basiert auf festgelegten realisierbaren Überhangwinkeln und berücksichtigt die Zugänglichkeit für nachträgliche Bearbeitungsprozesse [Lan17].

KOCH ET AL. präsentierten ein Verfahren zur Herleitung von Konstruktionsrichtlinien für eine nachbearbeitungsgerechte Gestaltung. Dabei wurden verschiedene Aspekte berücksichtigt, wie beispielsweise erforderliche Bearbeitungszugaben und Werkzeugzugänglichkeiten. Außerdem wurden quantifizierbare Grenzwerte festgelegt [KGZ+21, LTZ19].

FERCHOW ET AL. präsentieren in ihrer Arbeit Gestaltungshinweise für additiv gefertigte Bauteile aus dem Material 316L, die eine nachträgliche Elektropolitur durchlaufen sollen. Diese Gestaltungshinweise bieten Empfehlungen und Leitlinien für die Konstruktion von Bauteilen, um optimale Ergebnisse beim Elektropolieren zu erzielen [FHM20].

KRANZ betont in seiner Arbeit die Bedeutung von Aufnahmen zur sicheren Fixierung von additiv gefertigten Bauteilen während der Nachbearbeitung. Zusätzlich präsentiert er Konstruktionsrichtlinien, die die Positionierung von Bearbeitungsflächen definieren. Diese Konstruktionsrichtlinien werden sowohl textlich erläutert als auch graphisch veranschaulicht [Kra17].

2.5.3 Richtlinien für eine fertigungsgerechte Stützstrukturgestaltung

DAS ET AL. haben Konstruktionsrichtlinien entwickelt, die darauf abzielen, die Notwendigkeit einer Stützstruktur bei der additiven Fertigung zu minimieren. Dies wird durch die Anpassung der Überhänge und der damit verbundenen Downskinwinkel erreicht. Anstatt den Support selbst zu verändern, wird die Geometrie des Ausgangsbauteils angepasst [DCS+15, DMC+17].

KRANZ stellte Konstruktionsrichtlinien auf, die darauf abzielen, die Zugänglichkeit von Stützstrukturen sicherzustellen, um sie effektiv entfernen zu können. Darüber hinaus identifiziert er kritische Überhangwinkel, die eingehalten werden müssen, um Stützstrukturen zu vermeiden. In seiner Arbeit verwendet er graphische Darstellungen, um diese Konzepte zu veranschaulichen. Allerdings werden keine spezifischen Grenzwerte für Material, Anlagen und Prozessparameter angegeben. Es wird auch keine Methode vorgestellt, um weitere Konstruktionsrichtlinien für unterschiedliche Randbedingungen zu definieren [Kra17].

LACHMEYER UND LIPPERT führten Konstruktionsrichtlinien auf, die eine einfache Entfernung von Stützstrukturen ermöglichen sowie eine Minimierung von Stützstrukturen sicher stellen [LL20].

YANG ET AL. und GEBHARDT ET AL. präsentieren in ihren Arbeiten Hinweise zur optimalen Orientierung von Bauteilen, um den Bedarf an Stützstrukturen zu minimieren. Sie bieten jedoch keine spezifischen Empfehlungen zur Gestaltung von unvermeidbaren Stützstrukturen [YHB+17, GKS19].

CALIGNANO untersucht in seiner Arbeit die Stützstrukturparameter für Aluminiumlegierungen und Titan, um eine zuverlässige Fertigung zu gewährleisten. Allerdings verzichtet er auf eine Darstellung dieser Parameter in Form von Konstruktionsrichtlinien [Cal14].

GAN UND WONG beobachten in ihrer Studie, dass thermisch bedingte Verfärbungen des Bauteils durch den Einsatz von Stützstrukturen vermieden werden können. Sie geben eine Handlungsempfehlung dazu, jedoch stellen sie keine detaillierten Konstruktionsrichtlinien auf [GW16].

GRALOW ET. AL entwickelten ein Vorgehen zur systematischen Herleitung von anwendungsangepassten Stützstrukturparametern. Dieses Vorgehen ermöglicht eine geeignete Auswahl von Stützstrukturen hinsichtlich ihrer Entfernbarkeit und des Materialverbrauchs. Die Stützstrukturparameter zur fertigungsgerechten Stützstrukturgestaltung werden dabei in Form einer Matrix ausgegeben und somit quantifiziert. Eine graphische Abbildung, sowie eine Aufbereitung für Anwender fehlt. Der Fokus liegt auf der elektronischen Datenverarbeitung und der Anwendung in numerischen Softwarelösungen. Es wird ausschließlich das Material AlSi10Mg betrachtet [GBI+18].

JOHANNES ET AL. haben die Zugfestigkeit von Stützstrukturen untersucht und geben in textueller Form Konstruktionshinweise, wie Stützstrukturen angepasst werden sollten, um optimale Ergebnisse zu erzielen [JBW+18]. Es fehlen jedoch spezifische Konstruktionsrichtlinien, wie sie in Konstruktionskatalogen üblicherweise zu finden sind.

2.5.4 Konstruktionsrichtlinien Forschungsbedarf

Den in Kapitel 2.5.1 bis 2.5.3 aufgeführten Arbeiten zu Konstruktionsrichtlinien ist zu entnehmen, dass es noch immer an einer einheitlichen Formulierung von Konstruktionsrichtlinien für das Laserstrahlschmelzen insbesondere für Stützstrukturen fehlt [JW17]. Konstruktionsrichtlinien sind zurzeit häufig implizit und basieren auf der Interpretation einzelner Beobachtungen durch den Autor. Erschwerend kommt hinzu, dass die Richtlinien nach JEE UND WHITERELL oft durch unstrukturierte Texte oder undetaillierte Bilder vermittelt werden, sodass die Interpretation dem Endnutzer überlassen wird [JW17]. Es gibt also noch kein einheitliches Vorgehen zur Herleitung von anwendungsangepassten Konstruktionsrichtlinien für Stützstrukturen, das auch verschiedene Randbedingungen, wie die verwendete Anlage, den Werkstoff oder den Prozessparametersatz berücksichtigt, obwohl hier großer Bedarf besteht, wie auch schon LEUTENECKER ET AL feststellten [LKM16].

Um die Nachteile des SLM-Verfahrens und der Stützstrukturen möglichst gering zu halten oder sogar zu eliminieren, ist ein fundiertes Grundlagenwissen erforderlich. In der Literatur sind allerdings nur teilweise Konstruktionsrichtlinien zu finden, die sich gezielt auf die fertigungsgerechte Gestaltung von Stützstrukturen konzentrieren [KLL+19, GBI+18, JML+14, KMF+18]. Diese Richtlinien beziehen sich häufig nur auf die Variation eines einzelnen Stützstrukturparameters und dessen Auswirkungen auf die Bauteileigenschaften oder den Fertigungsprozess.

3 Zielsetzung und weiteres Vorgehen

In der vorliegenden Forschungsarbeit liegt der Fokus auf der Entwicklung einer Methode zur systematischen Qualitätsbeurteilung von Stützstrukturen im Hinblick auf unterschiedliche Bauteil- und Prozesseigenschaften. Ziel dieser Methode ist es, dem Anwender die Möglichkeit zu bieten, den Einfluss verschiedener Stützstrukturparameter auf die Bauteileigenschaften und den Fertigungsprozess zu ermitteln. Als Resultat sollen Konstruktionsrichtlinien hergeleitet werden, die eine zielorientierte Gestaltung von Stützstrukturen ermöglichen, und es soll ein qualifizierter Vergleich verschiedener Stützstrukturen ermöglicht werden. Die Methode gliedert sich dabei in die in Bild 3-1 aufgezeigten Schritte.

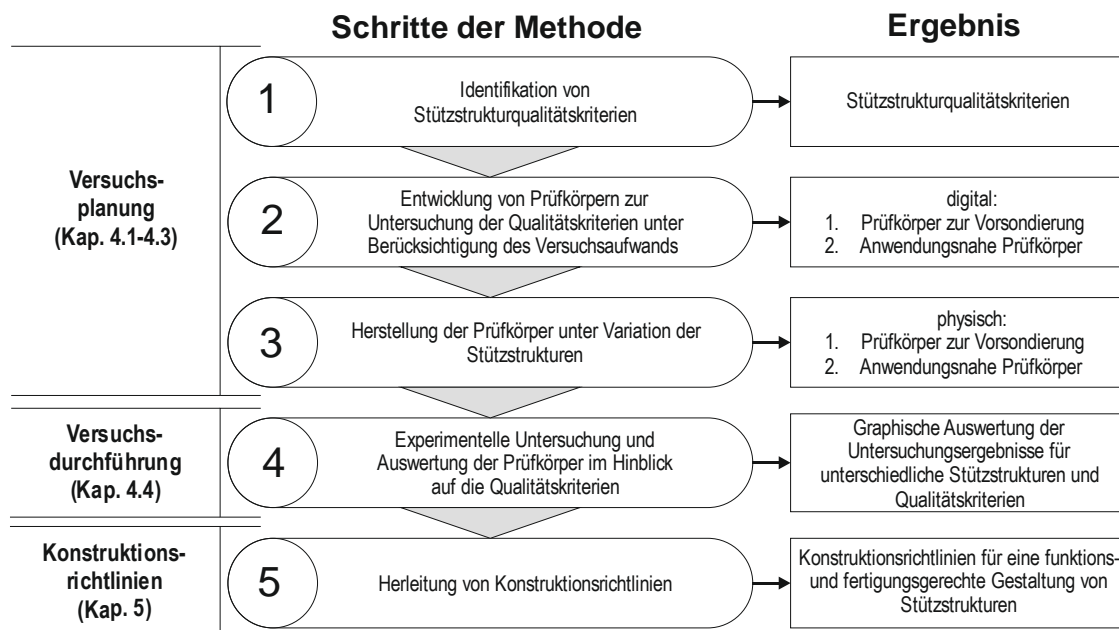


Bild 3-1: Schritte der Methode zur Herleitung von Konstruktionsrichtlinien für eine fertigungsgerechte Stützstrukturkonstruktion.

Schritt 1: Identifikation relevanter Qualitätskriterien für Stützstrukturen, die einen Einfluss auf die Bauteilqualität, Prozesseffizienz und -sicherheit haben (Kapitel 4.1). Diese Kriterien gilt es für unterschiedliche Stützstrukturen zu quantifizieren, um eine Qualitätsbeurteilung durchführen zu können.

Schritt 2: Entwicklung von Prüfkörpern, die mit verschiedenen Stützstrukturen supportierbar sind und eine Untersuchung der relevanten Qualitätskriterien ermöglichen (Kapitel 4.2). Um den experimentellen Aufwand zu minimieren, werden zunächst kleine, materialsparende Prüfkörper zur Vorsondierung entworfen. Mit diesen Prüfkörpern kann eine effiziente Untersuchung einer großen Anzahl verschiedener Stützstrukturen in wenigen Baujobs durchgeführt werden. Um anwendungsnahe Geometrien beurteilen zu können, werden weitere Prüfkörper entwickelt. Diese basieren auf Standardelementen, wie sie bereits bei ADAM [Ada15] Anwendung fanden. Die experimentellen Untersuchungen an diesen anwendungsnahe Prüfkörpern werden auf Stützstrukturen beschränkt, für die eine

grundsätzliche Eignung während der Vorsondierung nachgewiesen wurde. Die Prüfkörper werden so dimensioniert, dass sie auf gängigen Anlagen mit einer Bauplattformgröße von mindestens 250 x 250 mm hergestellt werden können. Um den experimentellen Aufwand zu minimieren und die Versuche systematisch durchzuführen, werden Methoden der statistischen Versuchsplanung angewendet (Kapitel 4.3).

Schritt 3: Herstellung der Prüfkörper mittels SLM-Verfahren (Kapitel 4.4).

Schritt 4: Die hergestellten Prüfkörper werden hinsichtlich der in Schritt 1 (Kapitel 4.1) identifizierten Qualitätskriterien für Stützstrukturen untersucht. Die Untersuchungsergebnisse werden in eine graphische Auswertung überführt, die die Effekte und die Wechselwirkungen verschiedener Stützstrukturparameter auf die Qualitätskriterien veranschaulicht.

Schritt 5: Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen werden Konstruktionsrichtlinien hergeleitet, die KonstrukteurInnen eine fundierte Grundlage für eine anwendungsangepasste Stützstrukturkonstruktion bieten (Kapitel 6). Die entwickelte Methode ist so konzipiert, dass sie die Berücksichtigung weiterer Randbedingungen ermöglicht, wie beispielsweise spezifische Fertigungsanlagen, Materialien, Prozessparametersätze oder Stützstrukturparameter.

4 Aufbau der Methode

Im vorliegenden Kapitel werden die einzelnen Schritte (s. Bild 3-1) der entwickelten Methode zur Ermittlung von Konstruktionsrichtlinien für eine fertigungsgerechte Stützstrukturgestaltung detailliert dargestellt. Zunächst werden die Stützstrukturqualitätskriterien definiert, mit deren Hilfe man die Güte von Stützstrukturen untersuchen und vergleichbar machen kann. Daraufgehend werden die verwendeten Prüfkörper präsentiert, die zur Ermittlung der Qualitätskriterien dienen und die angewendete statistische Versuchsplanung wird erläutert. Zudem wird die Herstellung der Prüfkörper ausführlich beschrieben. Die Beschreibung der Messmethoden und Prüfmittel sowie die Versuchsauswertung erfolgt in Kapitel 5.

4.1 Identifikation von Stützstrukturqualitätskriterien

Im ersten Schritt der in Kapitel 3 dargestellten Methode liegt der Fokus auf der Identifikation von Qualitätskriterien zur Beurteilung der Stützstruktur Güte. Die Kriterien wurden auf Basis relevanter wissenschaftlicher Veröffentlichungen aus dem Stand der Technik (Kapitel 2) sowie durch Befragung von Anwendern des SLM-Verfahrens ausgewählt. Die identifizierten Qualitätskriterien sind:

Abbildegengenauigkeit: Diese wird durch die visuelle Überprüfung der Stützstrukturen ermittelt. Hierbei erfolgt ein Vergleich zwischen der tatsächlichen Geometrie (Ist-Geometrie) und der vorgesehenen Geometrie (Soll-Geometrie), wobei Pulveranlagerungen, Verformungen und Brüche dokumentiert werden.

Form- und Maßhaltigkeit in Z-Richtung: Bei der Formhaltigkeit in Z-Richtung (Aufbau-richtung) wird der maximale Verzug an der Prüfkörperunterseite ermittelt. Die stärkste Verformung tritt an der Bauteilunterseite auf, da dort eine Querschnittsänderung der Belichtungsfläche aufgrund des Wechsels von einer Stützstrukturschicht in eine Bauteilschicht stattfindet. Dieser Wechsel ist besonders kritisch während der Fertigung und kann bei einer signifikanten, wärmeinduzierten Verformung zu einem Abbruch des Bauprozesses führen. Kleinere Verformung führen zwar nicht zwangsläufig zu einem Baujobabbruch, können jedoch ebenfalls zu einer Formabweichung der Unterseite führen. Im weiteren Verlauf des Bauprozesses können solche Abweichungen ausgeglichen werden, so dass es an der Oberseite zu keiner Verformung mehr kommt [KMF+18, GBI+18].

Mit Hilfe der Maßhaltigkeit in Z-Richtung kann ein Absinken der untersten Bauteilschicht erfasst werden. Voruntersuchungen haben gezeigt, dass bei bestimmten Stützstrukturen eine Verschiebung der Bauteilunterseite in Z-Richtung auftritt [Aus19b]. Dies führt zu einer Maßüberschreitung am Bauteil und zu einer Maßunterschreitung an den Stützstrukturen. Diese Beobachtung lässt sich darauf zurückführen, dass die Schmelze in das Pulverbett einsinkt und Pulverpartikel an der Bauteilunterseite anschmelzen. An der Oberseite des Bauteils wird durch die fortlaufende Beschichtung ein Ausgleich erreicht [Mil17, GBI+18].

Aufgrund der Kontraktion des Materials während des Abkühlungsprozesses ist es erforderlich, auch die

Form- und Maßhaltigkeit in der XY-Ebene: Aufgrund der Kontraktion des Materials während des Abkühlungsprozesses ist es erforderlich, auch die Form- und Maßhaltigkeit in der XY-Ebene zu untersuchen. Im Rahmen der Untersuchung werden sowohl die Prüfkörperbreite als auch die Prüfkörpertiefe analysiert, da verschiedene Stützstrukturen zu unterschiedlichem Abkühlverhalten führen können, was wiederum zu verschiedenen Verzugerscheinungen führt. Das Material kontrahiert bei der Abkühlung, wodurch Zugspannungen in der obersten Schicht und Druckeigenstressungen in der darunterliegenden Schicht entstehen. Dies führt zu Verzügen im Bauteil und kann zu einer schlechteren Verbindung mit den Stützstrukturen oder sogar zum vollständigen Verlust des Kontakts führen [KMF+18, GBI+18].

Oberflächenrauheit: Diese wird durch Anhaftungen von Pulverpartikeln an der Unterseite des Bauteils sowie durch Rückstände von Stützstrukturen negativ beeinflusst [JML+14]. Diese negativen Effekte erfordern häufig einen abschließenden Bearbeitungsprozess, um die gewünschte Oberflächenrauheit zu erreichen [JML+14]. Zur Erreichung der gewünschten Oberflächenrauheit werden in der Regel Finishing-Prozesse, wie in Kapitel 2.3.1.3 aufgeführt, angewendet [KHE15; Mil17; VDI 3405-3].

Ablösbarkeit der Stützstrukturen: Es ist ein Kompromiss zwischen ausreichender Festigkeit der Stützstrukturen und einer guten Ablösbarkeit zu finden. Eine vereinfachte Ablösbarkeit erleichtert das anschließende Postprocessing [MAH17, Cal14, FP16, CSW13-ol].

Datenvorbereitungszeit: Je nach verwendetem Vorgehen bei der Stützstrukturgenerierung (s. Kapitel 2.3.1.1) kann diese erheblich variieren. Wenn beispielsweise Stützstrukturen vollständig manuell erstellt oder zelluläre Stützstrukturen konstruiert werden, ist ein größerer Zeitaufwand zu erwarten. Im Folgenden liegt der Fokus auf einer halbautomatischen Stützstrukturgenerierung mittels Materialise Magics. Unter halbautomatisch versteht man, dass die Stützstrukturen automatisch mit den Standardparametern des Programms generiert werden und anschließend manuelle Anpassungen an bestimmten Stützstrukturparametern vorgenommen werden.

Datenvolumen: Je nach Stützstruktur können die zu verarbeitenden STL-Daten eine Größe von mehreren Gigabyte aufweisen, was die Handhabung erschwert und zusätzliche Rechenleistung erfordert. Dies führt zu Verzögerungen während des Preprocessings (Kapitel 2.3.1.1) aufgrund eines erhöhten Zeitaufwands beim Slicen und Konvertieren des Baujobs für die SLM-Anlage.

Materialverbrauch: Dieser verhält sich konträr zur Stützstrukturfestigkeit in Bezug auf Prozesskräfte und thermisch induzierte Eigenstressungen [KMF+18]. Es ist nicht nur der Materialverbrauch zu ermitteln, der für die Herstellung der Stützstrukturen benötigt wird,

sondern auch der Materialverbrauch an losem Restpulver, welches zwischen den Stützstrukturen eingeschlossen ist. Durch die Anpassung der Stützstrukturparameter kann erreicht werden, dass das Restpulver leichter entfernt werden kann und nicht als Ausschuss endet. Darüber hinaus stellt Restpulver eine potenzielle Gefahr für die Arbeitssicherheit dar und sollte bereits beim Auspacken in der additiven Fertigungsanlage weitestgehend entfernt werden können, um eine Kontamination der Arbeitsumgebung während des Postprocessings und des Finishings zu vermeiden [CGE+17-ol].

4.2 Entwicklung der Prüfkörper und statistische Versuchsplanung

Im folgenden Kapitel werden die verwendeten Prüfkörper vorgestellt. Zur Vorsondierung einer Vielzahl verschiedener Parameterkombinationen für Stützstrukturen werden zwei unterschiedliche Prüfkörpergeometrien eingesetzt. Diese Prüfkörper werden im Folgenden als Prüfkörper 1.1 (kurz: PK1.1) und Prüfkörper 2.1 (kurz: PK2.1) bezeichnet. Mithilfe dieser Prüfkörper können die grundlegenden Qualitätskriterien für Stützstrukturen, die im ersten Schritt der Methode definiert wurden (Kapitel 4.1), untersucht werden. Die Prüfkörper dienen dazu, geeignete Parameterkombinationen für Stützstrukturen vorab zu beurteilen und werden durch anwendungsnahe Prüfkörper ergänzt. Die anwendungsnahen Prüfkörper ermöglichen die Bewertung der Stützstrukturgüte in praxisrelevanten Situationen, in denen Stützstrukturen benötigt werden, beispielsweise bei verschiedenen Downskin-Winkeln. Die entsprechenden Prüfkörper werden mit den Bezeichnungen PK3.1 bis PK3.7 versehen. Im Anschluss werden die Grundlagen der statistischen Versuchsplanung erörtert und die angewendete Versuchsplanung vorgestellt. Dabei wird auf Erfahrungen von AUSTERMANN [Aus20] und KALESSE [Kal19] zurückgegriffen.

4.2.1 Prüfkörper zur Vorsondierung

PK1.1 besteht aus einer einfachen quaderförmigen 12 x 12 x 5 mm Grundgeometrie, die in Bild 4-1 dargestellt ist. Die einfache Prüfkörpergeometrie soll dabei den Einfluss der Geometrie auf die Stützstrukturen minimieren. Darüber hinaus sind die geringen Prüfkörperabmaße geeignet, um eine große Anzahl von Prüfkörpern in einem Baujob auf gängigen Anlagen mit einer minimalen Bauebene von 250 x 250 mm herstellen zu können. Auf eine Bauplatzform passen insgesamt 81 solcher Prüfkörper, was die Durchführung eines vollständig faktoriellen Versuchsplans mit vier variablen Faktoren und drei Faktorstufen ermöglicht. Die quadratische Grundfläche der PK1.1 weist, trotz ihrer geringen Abmessungen, eine erhöhte Anfälligkeit für Verzug auf. So treten die zu erwartenden Verformungen an den Ecken des Prüfkörpers auf, da diese Bereiche besonders exponiert sind und die Wärmeabfuhr durch das umgebende Pulver erschweren [GW16].

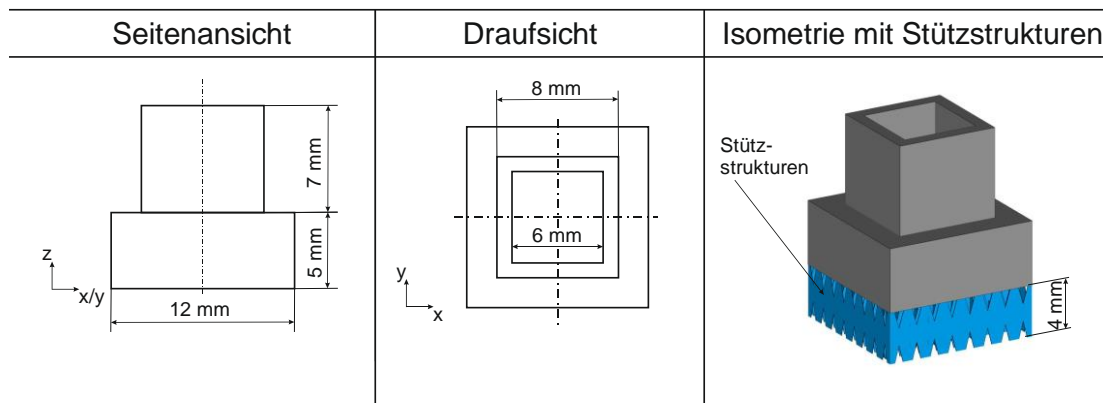


Bild 4-1: Aufbau des Prüfkörpers PK1.1.

Dadurch sind aussagekräftige Ergebnisse für verschiedene Kombinationen von Stützstrukturparametern erwarten. Die zu untersuchende Stützstruktur wird unterhalb des Prüfkörpers mit einer Höhe von 4 mm platziert, was einer gängigen Mindesthöhe für Stützstrukturen entspricht. Für die Messungen an den Prüfkörpern ist eine Einspannung in Form eines 8 x 8 mm großen Quaders an der Oberseite des Prüfkörpers vorgesehen. PK1.1 ermöglicht die Messung der Abbildegengenauigkeit der Stützstrukturen sowie ihren Einfluss auf die Maß- und Formhaltigkeit in der XY-Ebene und in Z-Richtung. Darüber hinaus kann an ihnen die Ablösbarkeit der Stützstrukturen untersucht werden. Anschließend kann die Oberflächenrauheit an der Prüfkörperunterseite ermittelt werden und es können die Datenaufbereitungszeit und das Datenvolumen bestimmt werden.

Zur Untersuchung des Materialverbrauchs wird der in Bild 4-2 dargestellte Prüfkörper PK2.1 verwendet. Diese Grundgeometrie wurde von GRALOW ET AL. für entsprechende Versuche ausgewählt und hat sich als geeignet erwiesen [GBI+18]. Der Prüfkörper besitzt eine pyramidenförmige Basis, die eine Sollbruchstelle im Kontaktbereich mit der Bauplattform aufweist. Auf diese Weise wird vermieden, dass es aufgrund einer unterschiedlichen Trennung des Prüfkörpers von der Bauplattform zu einer signifikanten Abweichung des Gesamtgewichts aufgrund von Schwankungen im Prüfkörpervolumen kommt. Die pyramidenförmige Basis weist die größten Abmaße in voranschreitender Z-Höhe auf und spannt eine rechteckige Grundplatte auf, die über rechteckige Säulen mit einer Deckplatte verbunden ist. Der Bereich zwischen der Deckplatte und der rechteckigen Grundplatte wird mit Stützstrukturen unterschiedlicher Parameterkombinationen gefüllt (s. Bild 4-2). Die Deckplatte simuliert somit das zu stützende Bauteil und die rechteckige Grundplatte die Bauplattform. In Abhängigkeit von den verwendeten Stützstrukturen weist der mit Stützstrukturen gefüllte Bereich unterschiedliche Entfernbarekeiten des eingeschlossenen Restpulvers auf, was die Ermittlung des Materialverbrauchs unter Berücksichtigung verschiedener Zahngeometrien, Perforationen oder Fragmentierungen ermöglicht. Zwischen den Stützstrukturen und den vertikalen Stützen der Deckplatte besteht ein XY-Offset von 0,1 mm. Die PK2.1 können,

ähnlich wie die PK1.1, in 81 verschiedenen Parameterstufenkombinationen auf einer Anlage mit einer minimalen Bauraumplattformgröße von 250 x 250 mm hergestellt werden.

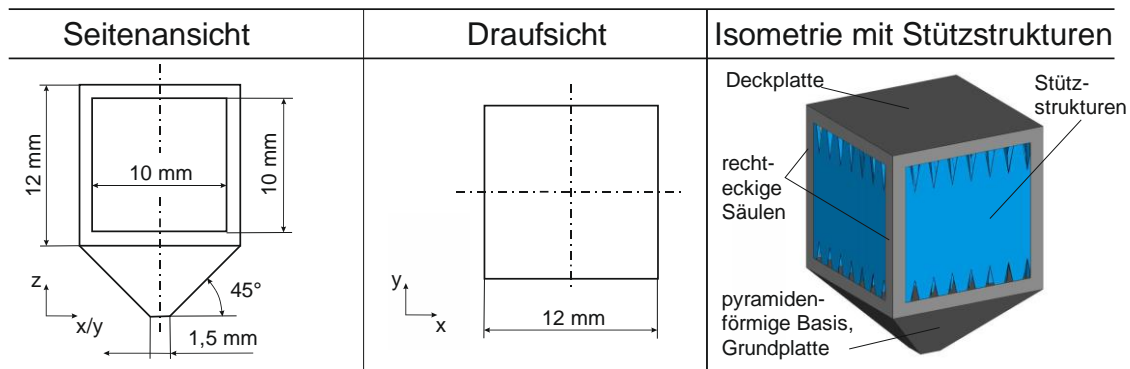


Bild 4-2: Aufbau des Prüfkörpers PK2.1.

4.2.2 Anwendungsnahe Prüfkörper auf Basis von Standardelementen

Basierend auf den Ergebnissen der Vorsondierungsuntersuchungen an den 81 Stützstrukturparameterkombinationen mit Hilfe der Prüfkörper PK1.1 und PK2.1 wird die vielversprechendste Stützstrukturparameterkombination ausgewählt und weiteren Untersuchungen an den Prüfkörpern PK3.1 bis PK3.7 unterzogen. Die Prüfkörper PK3.1 bis PK3.5 setzen sich aus Standardelementen zusammen, die bereits in früheren wissenschaftlichen Arbeiten erfolgreich eingesetzt wurden und typische geometrische Merkmale von Bauteilen repräsentieren [Ada15, LTZ19, LKG+21]. Bauteilgeometrien lassen sich somit aus Standardelementen zusammensetzen, wie bereits ADAM feststellte [Ada15]. Zu diesem Zweck definierte ADAM nicht gekrümmte, einfach gekrümmte und doppelt gekrümmte, eindeutig mathematisch beschreibbare Standardelemente, die durch ein Attribut, wie beispielsweise den Downskinwinkel oder ihre Länge quantifizierbar sind. Das Attribut wurde bei ADAM variiert und auf Auswirkungen auf eine robuste Fertigung hin untersucht. Dieser Ansatz wird auch hier angewendet, wobei jedoch der Fokus auf den Stützstrukturqualitätskriterien (Kapitel 4.1) liegt. Der Prüfkörper PK3.6 ermöglicht zusätzliche Untersuchungen zur Toplängenänderung der Zahngeometrie an geneigten Oberflächen, während Prüfkörper 3.7 zur Untersuchung der Ablösbarkeit der Stützstrukturen unter eingeschränkter Zugänglichkeit dient.

Der in Bild 4-3 gezeigte Prüfkörper PK3.1 wurde entwickelt, um die Auswirkungen von Stützstrukturen auf nicht gekrümmte von außen supportierte Standardelemente abzubilden. Er besteht aus Überhängen mit unterschiedlichen Neigungen sowie zwei Längen- und Breitenstufen. Die nicht gekrümmten Überhänge stellen somit anwendungsnahe Geometrien dar, die Downskinflächen abbilden, bei denen jeder Punkt denselben Normalenvektor besitzt. Die Neigung der Überhänge zur Bauplattform variiert zwischen 0°, 20° und 40°, wodurch der Bereich von horizontaler Ausrichtung bis zum selbsttragenden Winkel abgedeckt wird. Es gibt verschiedene Literaturquellen, die den selbsttragenden Winkel angeben,

ab dem keine Stützstrukturen mehr erforderlich sind, um das Bauteil robust herzustellen. CALIGANO empfiehlt beispielsweise einen relativen Winkel von 30° , GRALOW ET AL. geben einen Wert von 40° an, und laut ADAM liegt der Grenzwert bei 45° [Ada15, GBI+18, Cal14].

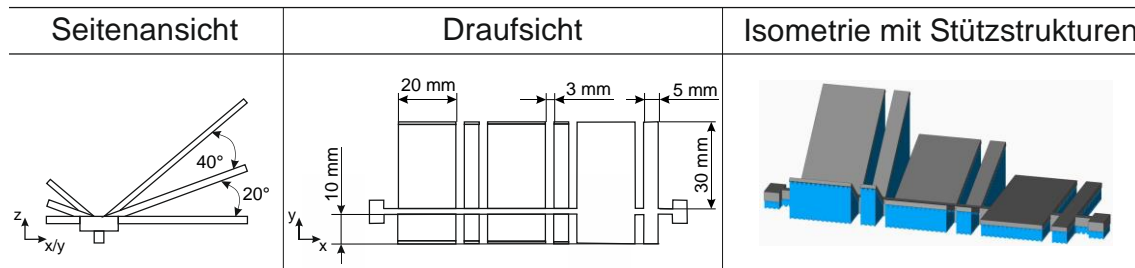


Bild 4-3: Aufbau des Prüfkörpers PK3.1.

Es ist jedoch zu beachten, dass der genaue Wert des selbsttragenden Winkels von den verwendeten Maschinen, Materialien, und Prozessparametern abhängig sein kann. In dieser Ausarbeitung wurde ein selbsttragender Winkel von 40° als Mindestwert betrachtet, der durch Befragung von Anwendern und basierend auf den Erfahrungen des Autors als geeignet identifiziert wurde. Neben dem Downskinwinkel wurden auch die Breite und Länge der Überhänge variiert. Mit zunehmender Länge der Überhänge vergrößert sich der Weg, auf dem prozessinduzierte Wärme abgeführt werden kann [Ada15]. Dadurch werden negative Auswirkungen der Schwerkraft und thermisch induzierten Eigenspannungen während des Fertigungsprozesses verstärkt beobachtet [JML+14]. Mit dem Prüfkörper PK3.1 lassen sich auf die Bauplattform projizierte Überhänge mit Längen von 10 mm und 30 mm untersuchen. Die Breite der Überhänge spielt ebenfalls eine entscheidende Rolle bei der Untersuchung der Stützstrukturqualitätskriterien und wird zwischen 5 mm und 20 mm variiert. Der solide Mittelsteg des Prüfkörpers verhindert ein Kippen und gewährleistet die spätere Einspannung in eine Vorrichtung für die Durchführung der Messungen. Nach der Fertigung des Prüfkörpers werden Form- und Maßhaltigkeitsmessungen durchgeführt. Anschließend werden die Stützstrukturen durchtrennt und somit von der Bauplattform separiert. Daraufhin wird erneut eine Form- und Maßhaltigkeitsmessung durchgeführt. Zusätzlich wird die Oberflächenrauheit der Downskinflächen nach der Stützstrukturentfernung und die Abbildegenauigkeit der Querschnittsfläche der Überhänge untersucht.

Auch die Untersuchung von innenliegenden, nicht gekrümmten Standardelementen erfolgt mithilfe der Prüfkörper PK3.2. Diese sind in drei Varianten, PK3.2.1, PK3.2.2 und PK3.2.3, aufgeteilt, wie in Bild 4-4 dargestellt. Diese Varianten stellen Anwendungsfälle wie Hohlräume oder Kühlkanäle mit rechteckiger Querschnittsfläche dar [KHE15]. Die betrachteten Ausrichtungen von 0° , 20° und 40° entsprechen denen der PK3.1. Die projizierte Länge der zu stützenden Fläche zur Bauplattform ist mit 10 mm bzw. 30 mm identisch zu den Längen von PK3.1. Für die innen zu supportierenden Flächen wurden Bereiche von 10 mm und 20 mm zwischen den vertikalen Wänden vorgesehen. Die Wanddicke beträgt 2 mm. An den Prüfkörpern wird unter anderem die Entfernbarkeit der Stützstrukturen in den

rechteckigen Kanälen untersucht. Nach dem Entfernen der Stützstrukturen wird eine Messung des Querschnittsprofils vorgenommen und die Oberflächenrauheit der gestützten innen liegenden Fläche untersucht.

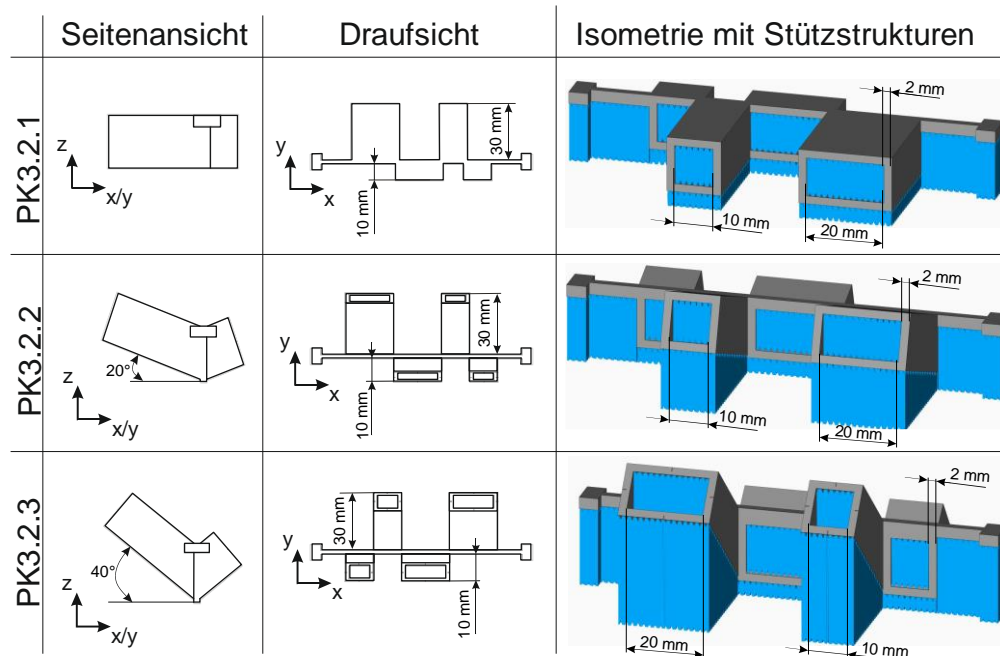


Bild 4-4: Aufbau der Varianten des Prüfkörpers PK3.2.

Mit dem in Bild 4-5 dargestellten Prüfkörper PK3.3 können einfach gekrümmte, außen liegende Standardelemente untersucht werden. Dieser Prüfkörper umfasst analog zu PK3.1 Überhänge mit einer Orientierung von 0°, 20° und 40° bei einer projizierten Länge von 10 mm oder 30 mm. Anstelle der Überhangbreite wird der Durchmesser der einfach gekrümmten Überhänge zwischen 5 mm und 20 mm variiert. PK3.3 weist ebenfalls einen massiven Mittelsteg auf, um ein Verkippen zu vermeiden, und Einspannstellen für die spätere Vermessung. An den Prüfkörpern wird die Form- und Maßhaltigkeit der Überhänge vor und nach dem Ablösen von der Bauplattform sowie die Formhaltigkeit der Querschnittsfläche untersucht.

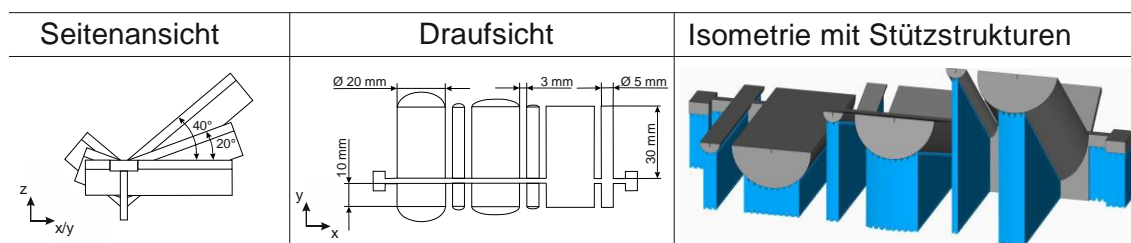


Bild 4-5: Aufbau des Prüfkörpers PK3.3.

Zur Darstellung unterschiedlich geneigter, innen liegender, einfach gekrümmter Standardelemente wurden die Prüfkörper PK3.4.1, PK3.4.2 und PK3.4.3 entwickelt. Diese

ermöglichen die Untersuchung von Anwendungsfällen wie Bohrungen oder Kühlkanälen mit kreisförmigen Querschnitten. Ähnlich wie bei den Prüfkörpern PK3.2.1 bis PK3.2.3 stellt die Entfernbarekeit der Stützstrukturen aus den innen liegenden Bereichen eine Herausforderung dar und wird an den Prüfkörpern analysiert. Die Prüfkörper setzen sich aus geeigneten Standardelementen zusammen. Der Downskinwinkel wird auch hier zwischen 0° , 20° und 40° variiert. Die abgestützte Länge beträgt 10 mm und 30 mm. Darüber hinaus wird der Durchmesser der einfach gekrümmten Standardelemente zwischen 10 mm und 30 mm variiert. Die Wandstärke der rohrförmigen Standardelemente beträgt 2 mm.

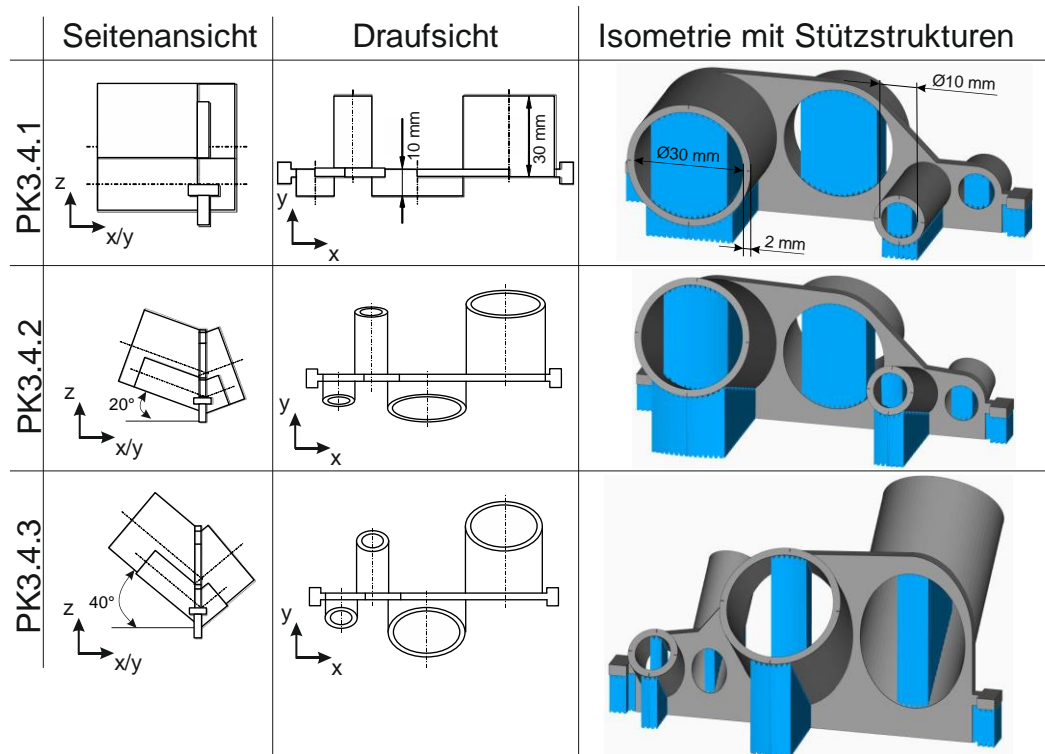


Bild 4-6: Aufbau der Varianten des Prüfkörpers PK3.4.

Die Stützstrukturen werden in den Bereichen der Radien platziert, in denen der Downskinwinkel unter 40° fällt. Neben der Evaluierung der Entfernbarekeit der Stützstrukturen werden an den Prüfkörpern auch die Form- und Maßhaltigkeit des Querschnittsprofils sowie die Oberflächenrauheit an den innenliegenden supportierten Flächen analysiert.

Zur Untersuchung von doppelt gekrümmten Standardelementen gemäß der Methode nach ADAM wurde der in Bild 4-7 abgebildete Prüfkörper PK 3.5 entwickelt [Ada15]. Dabei werden sowohl nach innen gewölbte (konkave) als auch nach außen gekrümmte (konvexe) Oberflächen abgebildet. Hierfür werden Kugelsegmente mit Durchmessern von 5 mm, 10 mm und 20 mm verwendet. Stützstrukturen werden in den Bereichen angebracht, in denen der Downskinwinkel kleiner als 40° ist. Die Untersuchungen an den Prüfkörpern umfassen eine qualitative Bewertung der Oberflächenrauheit sowie eine Beurteilung der verbleibenden

Stützstrukturreste. Zur Beurteilung der Oberflächenqualität wird ein Höhenbild der supportierten Bereiche erstellt.

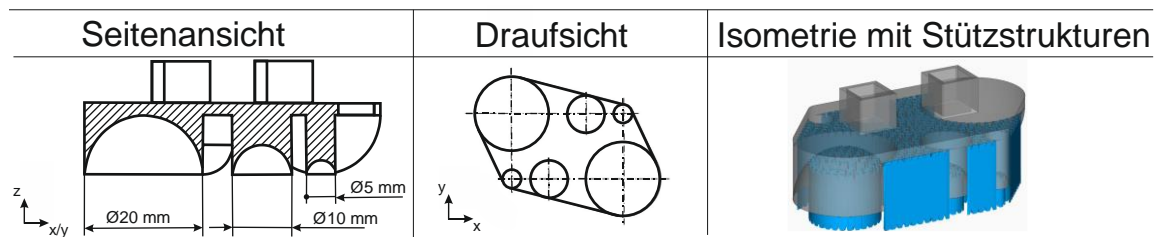


Bild 4-7: Aufbau des Prüfkörpers PK3.5.

Der Prüfkörper PK3.6 stellt eine Erweiterung der Versuche des PK3.1 dar, bei dem nicht gekrümmte, außen liegende Standardelemente untersucht werden. Im Unterschied zu PK3.1 wird hier der Einfluss des Downskinwinkels auf die Toplänge untersucht (s. Bild 4-8). Dazu werden Downskinflächen von 10° , 20° , 30° und 40° in PK3.6 abgebildet. Die Breite des Prüfkörpers beträgt 5 mm. Nachdem der Prüfkörper von der Bauplattform abgetrennt wurde, wird die Toplänge an den verschiedenen Downskinflächen untersucht. Dies geschieht, da sich durch die Änderung des Downskinwinkels die Schnittebene des Bauteils zu den Zähnen der Stützstruktur ändert und somit die Toplänge variiert.

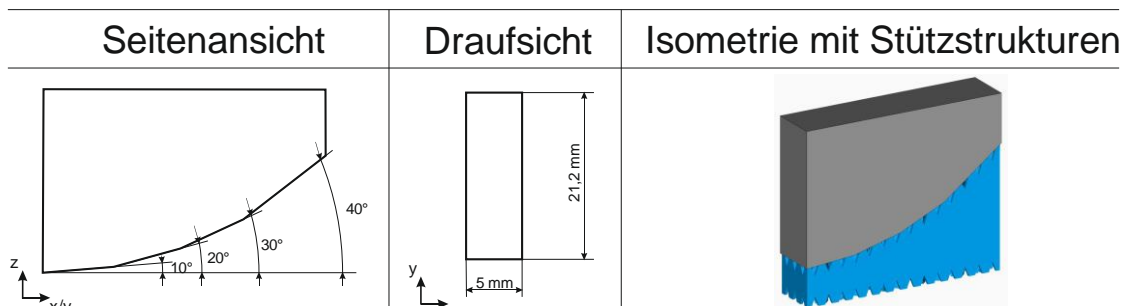


Bild 4-8: Aufbau des Prüfkörpers PK3.6.

Zur Simulation der Ablösbarkeit von Stützstrukturen an schwer zugänglichen Stellen wurde der Prüfkörper PK3.7 entwickelt. Die Zugänglichkeit hat einen direkten Einfluss auf die Entfernbarekeit der Stützstrukturen und damit auf den Zeitbedarf und die Kosten beim Entfernen der Stützstrukturen [FP16]. Der in Bild 4-9 dargestellte Prüfkörper ist zweigeteilt. Im ersten Bereich besteht eine zweiseitige Zugänglichkeit zu den Stützstrukturen, während im zweiten Bereich nur eine einseitige Zugänglichkeit gegeben ist. Die mit Stützstrukturen gefüllte Bereiche haben ein würfelförmiges Volumen mit einer Kantenlänge von 15 mm auf. Die Wandstärke ist auf 1,5 mm festgelegt. Unterhalb des Prüfkörpers sind in 4 mm Höhe ebenfalls Stützstrukturen angebracht.

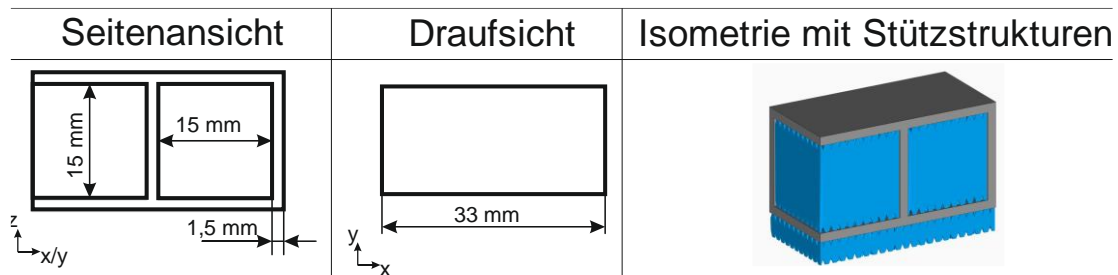


Bild 4-9: Aufbau des Prüfkörper PK3.7.

4.2.3 Statistische Versuchsplanung

Um eine umfassende Analyse der Auswirkungen verschiedener Faktoren auf die Stützstrukturqualitätskriterien gemäß Kapitel 4.1 zu ermöglichen und um die Möglichkeit einer späteren Erweiterung des Versuchsplans sicher zu stellen, werden die Prüfkörper PK1.1 und PK2.1 anhand eines vollfaktoriellen Versuchsplans untersucht. Die Durchführung der Versuche an PK1.1 und PK2.1 soll dabei möglichst wirtschaftlich und mit einem vertretbaren Versuchsaufwand erfolgen. Im folgenden Abschnitt werden daher die statistischen Grundlagen zur Versuchsplanung erörtert und die Vorsondierung anhand der Prüfkörper PK1.1 und PK2.1 vorgestellt. Die Vorsondierung dient dazu, den Versuchsumfang für die Prüfkörper PK3.1 bis PK3.7, die einen deutlich höheren Materialaufwand erfordern, zu reduzieren. Dabei werden nur diejenigen Stützstrukturparameterkombinationen untersucht, die in der Vorsondierung die beste Bewertung im Hinblick auf die Qualitätskriterien aufwiesen. Die Auswahl erfolgte durch eine Optimumsidentifikation der verwendeten Versuchsplanungssoftware Minitab 18.0. Die Ergebnisse der Vorsondierung sollen graphisch aufbereitet werden, um aus einem Diagramm Grenzwerte für die Stützstrukturparameter ablesen zu können. Als Faktoren für den Versuchsplan wurden die Stützstrukturparameter Toplänge der Zähne l_T , Zahnhöhe h_Z , Stützstrukturhatchabstand a_H und Fragmentierungsintervall Δ_F (kurz: Fragmentierung) festgelegt (s.a. Kapitel 2.4.4). Diese Faktoren wurden aus der Literatur und Voruntersuchungen als relevante Einflussfaktoren auf die Stützstrukturgüte identifiziert. Diese Faktoren werden mit den Buchstaben A, B, C, D abgekürzt und sind in Tabelle 4-1 ersichtlich. Jeder dieser Faktoren kann drei verschiedene Werte, sogenannte Faktorstufen, annehmen. Die mittlere Faktorstufe entspricht dabei dem Standardparameter aus der Datenvorbereitungssoftware Magics 25.0. Die anderen Faktorstufen repräsentieren jeweils einen geringeren und einen höheren Wert, um einen größeren Wertebereich abzudecken. Die zu ermittelnden Zielgrößen sind die acht Stützstrukturqualitätskriterien, die in Kapitel 4.1 identifiziert wurden. Um einen vollfaktoriellen Versuchsplan zu erhalten, müssen alle möglichen Faktorstufenkombinationen m betrachtet werden. Daraus ergibt sich nach Gleichung 4.1 ein Versuchsumfang von 81 möglichen Faktorstufenkombinationen m . Hierbei entspricht k der Anzahl an Faktoren ($k=4$) und f_{ST} der Anzahl an Faktorstufenkombinationen je Faktor ($f_{ST}=3$).

$$m = f_{ST}^k \quad (4.1)$$

Tabelle 4-1: Verwendte Faktorstufen.

Stützstrukturparameter / Faktoren	Untere Faktorstufe	Mittlere Faktorstufe	Obere Faktorstufe
A: Stützstrukturhatching a_H in mm	1,3	1,5	1,7
B: Fragmentierung Δ_F in mm	4,0	4,5	5,0
C: Toplänge l_T in mm	0,5	0,7	0,9
D: Zahnhöhe h_Z in mm	0,7	1,0	1,3

Die 81 verschiedenen Faktorstufen wurden jeweils in fünf Realisierungen hergestellt, was insgesamt zu 405 Prüfkörpern führt. Jeder betrachtete Prozessparametersatz (PS1, PS2, PS3 gemäß Tabelle 4-2) umfasst somit 405 Prüfkörper, an denen die acht Zielgrößen untersucht werden. In Summe ergeben sich somit insgesamt 1.215 Prüfkörper, die für die Vorsondierung verwendet wurden. Die Versuchsplanerstellung erfolgte mithilfe von Minitab 18. Dabei wurden die Versuche randomisiert durchgeführt, um sicherzustellen, dass die Ergebnisse der Experimente nicht durch irrelevante oder nicht steuerbare Bedingungen beeinflusst werden. Zusätzlich wurden die fünf Realisierungen als separate Blöcke hergestellt und untersucht, um Verzerrungen durch Störfaktoren zu minimieren. Um die signifikanten Effekte zu ermitteln, wurde für die Zielgrößen ein Pareto-Diagramm erstellt (s. Bild 4-10).

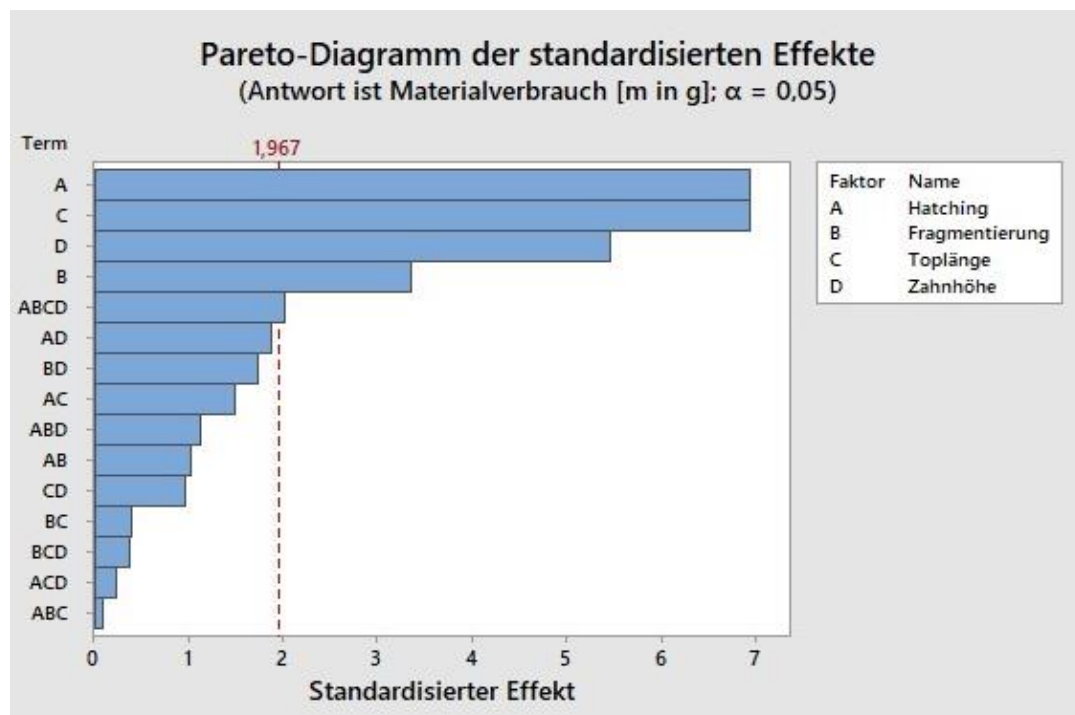


Bild 4-10: Beispiel für ein Pareto-Diagramm der Zielgröße Materialverbrauch.

In diesem Diagramm werden die Absolutwerte der standardisierten Effekte der Faktoren A, B, C, D sowie ihrer Wechselwirkungen AB, AC, AD, BC, BD, CD, ABC, BCD, ACD und ABCD angeordnet. Die Effekte werden vom größten zum kleinsten hin geordnet. Durch eine rote Referenzlinie wird dargestellt, ob der Effekt des jeweiligen Faktors für die Zielgröße statistisch signifikant ist. Wenn der Balken des standardisierten Effekts über der roten Referenzlinie liegt, wird der Effekt als statistisch signifikant betrachtet.

Zur Veranschaulichung der Versuchsplanung wird im Folgenden der Versuchsplan auf ein 3^3 -Versuchsplanbeispiel reduziert, um die graphische Darstellung zu vereinfachen. Basierend darauf wird eine Darstellungsform beschrieben, die auch den 3^4 Versuchsplan abbildet.

Um einen 3^3 Versuchsplan mit drei Faktoren A, B und C und jeweils drei Faktorstufen graphisch darzustellen, bietet sich ein Würfel als Darstellungsform an, wie in Bild 4-11 dargestellt. In diesem Würfel können alle möglichen Faktorstufenkombinationen als Punkte eingetragen werden. Die Faktoren werden entlang der drei Raumachsen abgebildet. Die mittlere Faktorstufe, die Standardstufe, entspricht dabei der Mitte einer Würfelkante. Mit den Symbolen "+" und "-" werden die Faktorstufen bezeichnet, die in positiver bzw. negativer Richtung von der Standardstufe abweichen. Das Zentrum des Würfels repräsentiert somit die globale Standardvariante, bei der alle drei Faktoren ihren Standardwert (mittlere Faktorstufe) aufweisen.

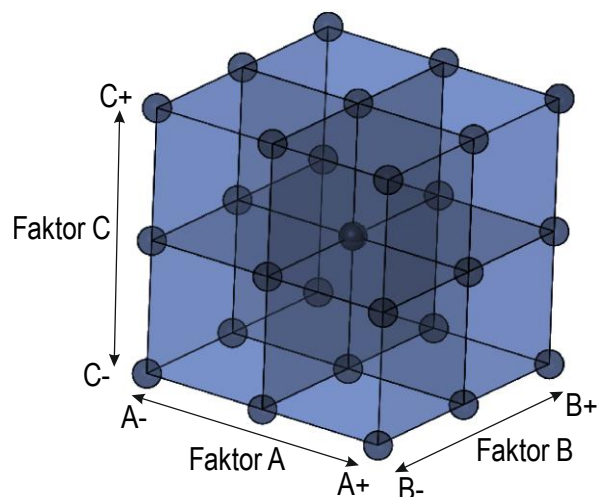


Bild 4-11: Darstellung der Faktoren und Faktorstufen eines 3^3 Versuchsplans [nach Kle16]

Um einen 3^4 Versuchsplan darzustellen, wird ein zusätzlicher Faktor D eingeführt, der nicht mehr in einem dreidimensionalen Objekt wie einem Würfel dargestellt werden kann. Stattdessen wird das in Bild 4-12 gezeigte Diagramm verwendet, das aus neun Konturdiagrammen besteht. Dieses Diagramm dient der graphischen Darstellung der Zielgröße in Abhängigkeit der vier Faktoren. Das Diagramm wird im Folgenden als

"Gesamtergebnisdarstellung" bezeichnet. Es ermöglicht die Analyse der Wechselwirkungen zwischen den Faktoren und die Ableitung von Erkenntnissen bezüglich der Einflüsse der Stützstrukturparameter auf die Stützstrukturqualitätskriterien.

Jedes der neun Konturdiagramme ergibt sich aus neun Faktorstufenkombinationen der Topplänge und der Zahnhöhe. Sie werden entsprechend den anderen beiden Faktoren, dem Hatchabstand und der Fragmentierung, in einem 3x3 Raster angeordnet. Die zugehörigen Hatching- und Fragmentierungswerte sind den Achsen des Rasters aus neun Einzeldiagrammen zu entnehmen. Für jede der acht Zielgrößen aus Kapitel 4.1 wurde ein eigenes Diagramm erstellt. Bläuliche und grüne Bereiche sind positiv zu bewerten und geben Parameterstufenkombinationen an in denen die Zielgröße geeignete Werte annimmt. Gelbliche und rote Bereiche geben hingegen Bereiche an, in denen die Zielgröße weniger geeignete Werte annimmt. Faktorstufenkombinationen, die in diesen Bereichen liegen sind zu vermeiden. Die 81 unterschiedlichen Faktorstufenkombinationen sind dabei wie in Bild 4-12 dargestellt als ein Punkt im Diagramm wiederzufinden.

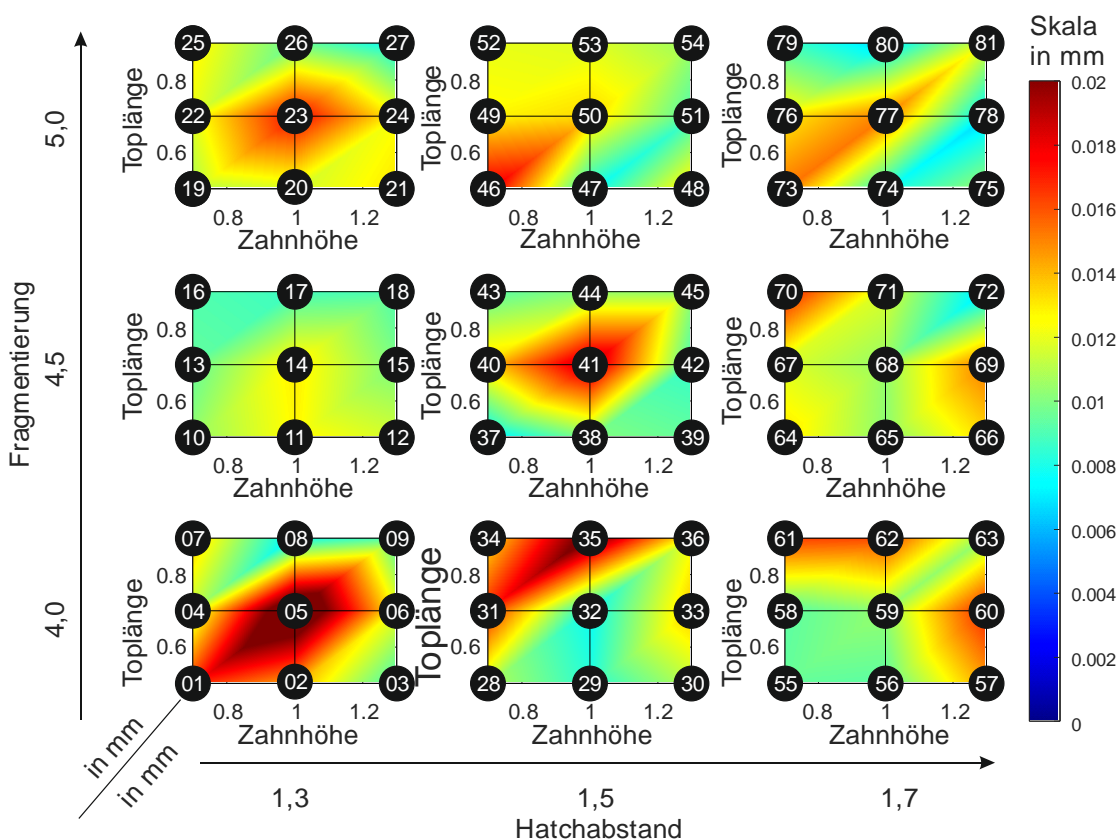


Bild 4-12: Darstellung der Faktoren und Faktorstufen eines 3^4 Versuchsplans in der Gesamtergebnisdarstellung.

Da jeweils fünf Realisierungen zu jedem Punkt untersucht wurden handelt es sich bei den konkreten Werten der Zielgröße um den arithmetischen Mittelwert aus fünf Einzelmessungen. Die Bereiche zwischen den einzelnen Punkten werden interpoliert.

Um den Einfluss der Effekte der vier Faktoren zu veranschaulichen, wurden zusätzlich die in Bild 4-13 dargestellten Haupteffektdiagramme mittels Minitab erstellt. In diesen Diagrammen lässt sich ablesen, wie sich die Zielgröße verhält, wenn man einen Faktor beispielsweise von der unteren Faktorstufe auf die mittlere Faktorstufe erhöht. In dem Beispiel in Bild 4-13 ist zu erkennen, dass ein Sprung von der unteren Faktorstufe des Stützstrukturhatchings von 1,3 mm auf die mittlere Faktorstufe 1,5 mm zu einer Reduktion der Zielgröße Datenvolumen von 1234 KB auf 1222 KB führt.

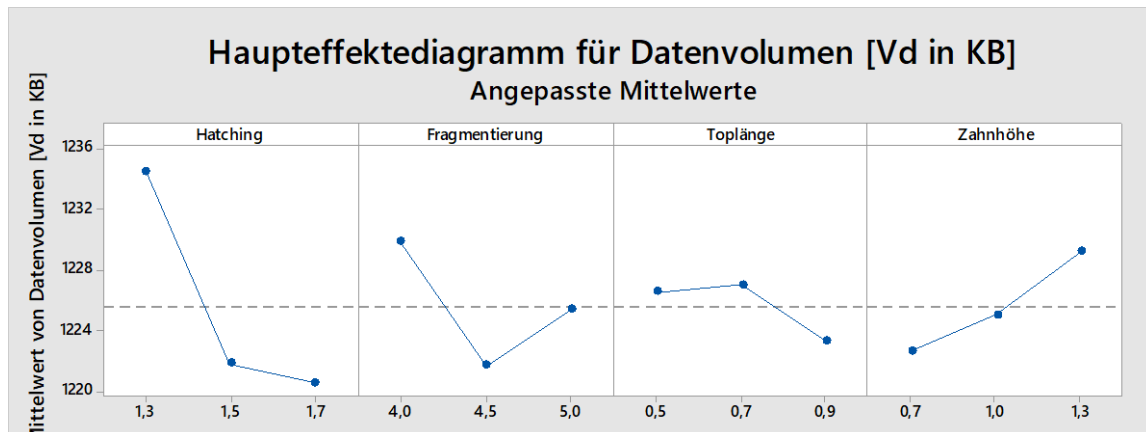


Bild 4-13: Beispiel eines Haupteffektdiagramms.

Des Weiteren werden die Zweifaktorwechselwirkungen mithilfe der in Bild 4-14 abgebildeten Wechselwirkungsdiagramme betrachtet. In diesen Diagrammen können die Einflüsse der Wechselwirkungen mehrere Faktoren auf eine Zielgröße abgelesen werden. Dabei wird, wie bei den Haupteffektdiagrammen, der Sprung von einer Faktorstufe auf die andere betrachtet und die Auswirkung auf die Zielgröße untersucht.

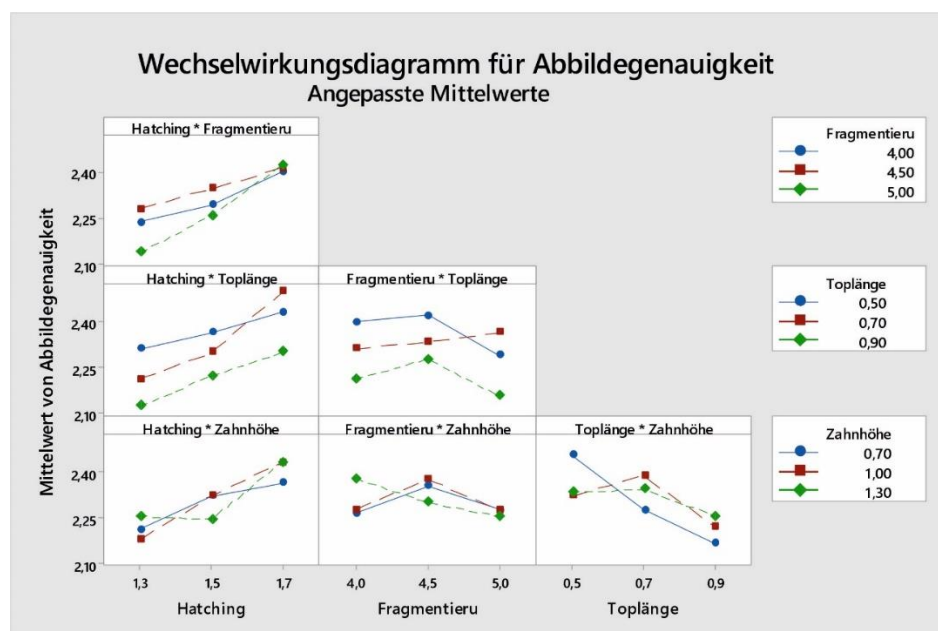


Bild 4-14: Beispiel für ein Wechselwirkungsdiagramm.

Die Analyse dieser Diagramme ermöglicht es, die Auswirkungen der Faktoren, nämlich der Stützstrukturparameter, auf die Zielgrößen, also die Stützstrukturqualitätskriterien, abzulesen und daraus Konstruktionsrichtlinien abzuleiten. Die Erkenntnisse aus den Diagrammen werden in Kapitel 4.4.1 diskutiert und die ableitbaren Konstruktionsrichtlinien werden in Kapitel 5 aufgeführt.

4.3 Herstellung der Prüfkörper

Die Herstellung der Prüfkörper erfolgte auf zwei unterschiedlichen Anlagen, um eine breite Übertragbarkeit auf weitere Anlagen sicher zu stellen. Dabei handelt es sich um unmodifizierte, durch den Hersteller gewartete Anlagen vom Typ SLM 250 HL und SLM 280 HL 2.0. Die verwendeten Prozessparametersätze sind in Tabelle 4-2 aufgeführt. Dabei wurden zwei Parametersätze (PS1 und PS2) auf der SLM 280 HL 2.0 und einer (PS3) auf der SLM 250 HL eingesetzt, um die Methode auch bei unterschiedlichen Parametersätzen anwendbar zu machen. Die verwendeten Anlagen sind mit Ytterbium-Faserlasern der Firma IPG ausgestattet, die eine Leistung von bis zu 400 W für das Aufschmelzen des Pulvers ermöglichen. Die Prozessparametersätze sind in Tabelle 4-2 angegeben.

Tabelle 4-2: Eingestellte Prozessparameter bei den unterschiedlichen, verwendeten Parametersätzen (PS).

Fertigungsanlage	SLM 280HL 2.0						SLM 250HL		
Prozessparameter	PS1: 316L_SLM_MBP3.0_30_C E2_400W_Stripes_V3.0			PS2: 316L_SLM_MBP3.0_50_C E2_400W_Stripes_V3.0			PS3: 316L_SLM_MBP3.0_50_C E2_400W_Stripes_V2.0		
	Support	Hatch	Kontur	Support	Hatch	Kontur	Support	Hatch	Kontur
Scangeschw. In mm/s	1300	800	500	650	950	450	625	400	300
Laserleistung in W	200	200	150	200	250	150	150	150	100
Schichtdicke in µm	30			50			50		
Fokusedurchm. in µm	70								
Plattformtemp. in °C	200								
Belichtungsstrategie	Streifen, 67° Rotation bei aufeinanderfolgenden Schichten								

Die Fertigung erfolgt unter einer Stickstoffinertgasatmosphäre, da das pulverförmige Ausgangsmaterial pyrophor reagiert [Mil17]. Der Restsauerstoffgehalt beträgt weniger als

0,5%. Die Richtung der Streifen-Scanstrategie wird von Schicht zu Schicht um 67° gedreht und die Temperatur der Bauplattform wird bei allen Prozessparametersätzen auf 200°C gehalten.

Als Werkstoff wurde der hochlegierte, nichtrostende Austenitstahl 316L (1.4404) verwendet. Die Wahl dieses Werkstoffs basiert unter anderem auf seiner weiten Verbreitung in der additiven Fertigungsbranche. Darüber hinaus zeigt er im Gegensatz zum ebenfalls weit verbreiteten AlSi10Mg wärmespannungsbedingte, stärkere Verzugphänomene, deren Effekt durch eine angepasste Stützstrukturkonstruktion beeinflusst werden kann. Im Vergleich dazu sind beim AlSi10Mg die Auswirkungen von Verzugphänomenen aufgrund seiner guten Wärmeleitfähigkeit weniger ausgeprägt.

Der pulverförmige, gasverdünste 316L-Ausgangswerkstoff weist eine sphärische Morphologie auf und eine Partikelgrößenverteilung von $10\text{--}45\mu\text{m}$. Die Thermische Leitfähigkeit des Pulvers beträgt ein Hundertstel des soliden Materials, welches eine thermische Leitfähigkeit von $15\text{ W/m}\cdot\text{K}$ aufweist. Die chemische Zusammensetzung des verarbeiteten Materials, die Pulvereigenschaften sowie die Materialkennwerte sind in Tabelle 4-3 detailliert aufgeführt. Der Einsatzbereich des 316L umfasst die Lebensmittelindustrie, die Automobil- und Luftfahrtindustrie, den Offshorebereich sowie die Medizintechnik und den allgemeinen Maschinenbau [GKS19].

Tabelle 4-3: Werkstoffeigenschaften des 316L (1.4404).

Chemische Zusammensetzung [m4p19-ol]							
Element	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Fe
Massenanteil (%)	<0,03	<1,0	<2,0	16,0-18,0	11,0-14.0	2,0-3,0	Basis
Pulvereigenschaften [SLM19b-ol]							
Partikelgröße	Partikelform		Massedichte		Wärmeleitfähigkeit		
10-45µm	Sphärisch		Ca. 7,95g/cm³		0,15 W/(m*K)		
Materialkennwerte, as-built, 99,95% Bauteildichte [m4p19-ol]							
Zugfestigkeit R _m	Streckgrenze R _e		Bruchdehnung A		E-Modul		Vickerhärte (HV10)
574 N/mm²	428 N/mm²		52%		178 GPa		211

Für die Generierung der Supportstrukturen der Prüfkörper wurde die Magics 24.0 Software von Materialise verwendet. Zum Slicen wurde bei der SLM 280 HL 2.0 der Metalbuildprozessor 3.0 verwendet, während bei der SLM 250 HL die Software Autofab 1.8 verwendet wurde. Die Vorsondierungsprüfkörper PK1.1 und PK2.1 wurden in 81 verschiedenen Parameterstufenkombinationen hergestellt. Diese Kombinationen wurden gemäß eines vollfaktoriellen Versuchsplans mit vier Faktoren und drei Faktorstufen erstellt, wie in Kapitel 4.2.3 beschrieben. Die vier Faktoren sind der Stützstrukturhatchabstand a_H , die Zahnhöhe h_Z , die Toplänge l_T und Fragmentierungsintervall Δ_F , wie in Tabelle 4-4 aufgeführt. Die Stützstrukturwandstärke b_w wurde konstant gehalten und entspricht der Standardwandstärke des

Jobvorbereitungsprogramms. Diese Entscheidung wurde getroffen, um die Wanddicke mit dem Laserfokussdurchmesser gleichzusetzen und auf ein Minimum zu reduzieren. Dünnere Wände sind aus fertigungstechnischer Sicht nicht realisierbar, da sie den Durchmesser des Laserfokus unterschreiten. Dagegen führen dickere Wände zu einer starken Verbindung mit dem Bauteil und erschweren die Entfernung der Stützstrukturen in einem Maße, das eine sinnvolle Auswertung und Vergleichbarkeit verschiedener Stützstrukturen nicht ermöglicht [JBW+18, YHB+17].

Die 81 verschiedenen Stützstrukturen werden unter den Vorsondierungsprüfkörpern PK1.1 angebracht und die Prüfkörper auf den in Bild 4-15 a) aufgezeigten Positionen im Bauraum positioniert. Um statistisch aussagefähige Ergebnisse zu gewährleisten, wird der Baujob in fünf Realisierungen hergestellt. Diese Wiederholungen ermöglichen eine Überprüfung der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse und helfen, eventuelle Varianzen zwischen den einzelnen Durchläufen zu identifizieren.

Tabelle 4-4: Verwendete Stützstrukturparameter (s.a. Bild 2-19).

Supportparameter		SLM280: PS1/PS2	SLM250: PS3
Supporthatching X-, Y-Richtung a_H in mm		1,3/1,5/1,7	1,3/1,5/1,7
XY-Offset a_{XY} in mm		0	0
Z-Offset a_{OZ} in mm		0,15	0,15
Vert. Wandoffset a_V in mm		0,4	0,4
Wandstärke b_W in mm		0,2	0,2
Zahngeometrie	Höhe h_Z in mm	0,7/1,0/1,3	0,7/1,0/1,3
	Toplänge l_T in mm	0,5/0,7/0,9	0,5/0,7/0,9
	Basislänge l_B in mm	1,5	1,5
	Basisintervall Δ_B in mm	0	0
Fragmentierung X-, Y-Intervall Δ_F in mm		4,0/4,5/5,0	4,0/4,5/5,0
Perforation		keine	keine

In jeder einzelnen Realisierung werden die Positionen der jeweiligen Parameterstufenkombinationen variiert. Dadurch wird eine Randomisierung erreicht, die es ermöglicht, lokale Unterschiede auf der Bauplattform zu eliminieren. Zusätzlich sollen Einflussfaktoren wie die Pulveralterung oder die Umgebungstemperatur ausgeschlossen werden. Aus diesem Grund werden die fünf Baujobs an verschiedenen Tagen durchgeführt, um mögliche Schwankungen im Zeitverlauf zu berücksichtigen. Dieses Vorgehen wird als Blockbildung bezeichnet. Die in Bild 4-15 a) dargestellte Positionierung der 81 Prüfkörper kann auf Maschinen mit einer Bauplattformgröße von mindestens 250 x 250 mm realisiert werden.

Die Prüfkörper werden nicht zum Beschichter gedreht. Dies führt dazu, dass eine lange Bauteilseite parallel zum Beschichter steht. Diese Orientierung bietet einerseits den Vorteil einer einfacheren späteren messtechnischen Untersuchung. Andererseits ermöglicht sie auch, die Prüfkörper der maximalen mechanischen Belastung durch den Beschichter auszusetzen, um mögliche Effekte auf die Stabilität der Stützstrukturen beobachten zu können. Der Abstand zwischen den Prüfkörpern beträgt 10 mm, um sowohl die Vermessung als auch das Ablösen von der Bauplattform zu erleichtern und eine gegenseitige Beeinflussung durch zu enges Nebeneinanderliegen zu vermeiden. Um die Messungen mit einer Koordinatenmessmaschine durchführen zu können, wird ein Referenzblock zur Vermessung eingeführt. Die Herstellung der Prüfkörper PK2.1 erfolgt ebenfalls nach dem gleichen Verfahren wie bei den Prüfkörpern PK1.1.

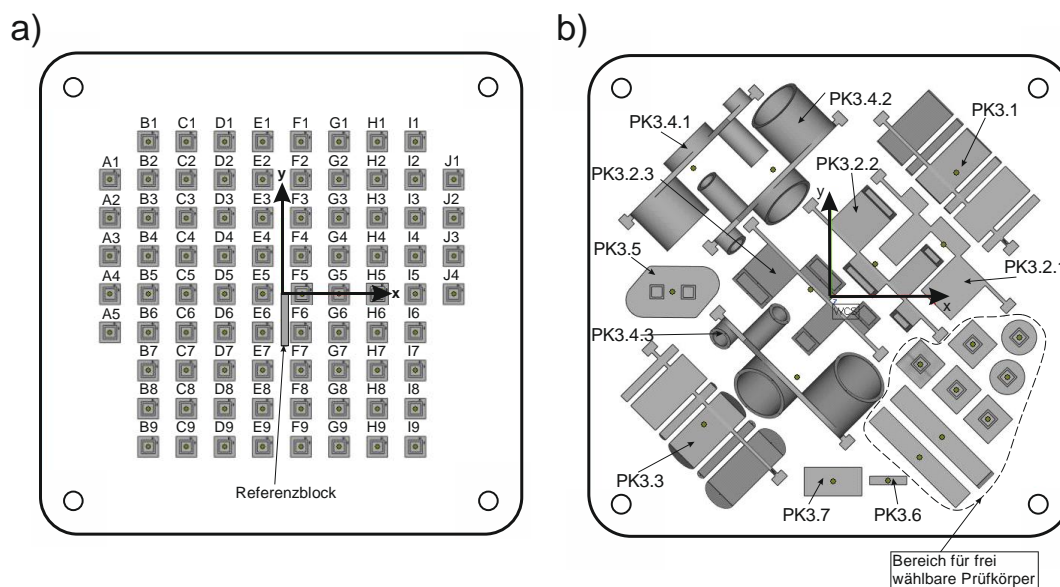


Bild 4-15: Verteilung der Prüfkörper auf der Bauplattform. a) für die Prüfkörper PK1.1 und PK2.1 b) für die Prüfkörper 3.1-3.7

Die anwendungsnahen Prüfkörper PK3.1 bis PK3.7 werden in einem separaten Baujob hergestellt. Für die Supportierung der Prüfkörper wird auf die Parameterstufenkombination zurückgegriffen, die sich in den Vorsondierungsversuchen als vielversprechend im Hinblick auf die untersuchten Zielgrößen erwiesen hat. Die Auswahl der Parameterstufenfunktion erfolgte auf Grundlage der Versuchsplanung. In diesem Fall wurden die in Tabelle 4-4 aufgeführten Stützstrukturparameter für die jeweiligen Parametersätze (PS) durch die Optimierung der Zielgrößen mit Hilfe des Versuchsplanungsprogramms Minitab ermittelt.

Die Anordnung der PK 3.1 bis PK3.7 ist in Bild 4-15 b) dargestellt. Zusätzlich ist ein Bereich für frei wählbare Prüfkörper vorgesehen. In diesem Bereich können Prüfkörper für die Kalibrierung und Verifikation einer numerischen Simulation oder Zugprüfkörper platziert werden.

Tabelle 4-5: Verwendete Stützstrukturparameter für die Herstellung der anwendungsnahen Prüfkörper.

Parameter-satz	Supportparameter			
	a_H in mm	Δ_F in mm	h_z in mm	l_T in mm
PS1	1,7	4,5	1,0	0,7
PS2	1,7	4,5	1,0	0,5
PS3	1,7	5,0	0,7	0,9

4.4 Versuchsdurchführung

In diesem Kapitel wird der Schritt 4 der Methode aus Bild 3-1 beschrieben: Hierzu werden zuerst die Prüfmittel und Messmethoden vorgestellt, die zur Erfassung der Stützstrukturqualitätskriterien verwendet werden. Daraufgehend werden die Versuchsergebnisse präsentiert und die Auswertung sowie die graphische Aufbereitung der Versuchsergebnisse beschrieben. Die für dieses Kapitel verwendeten Versuchsergebnisse sind in Teilen den studentischen Arbeiten von AUSTERMANN [Aus20], MANN [Man22], PAULUS [Pau21] und JOOSTEN [Joo21] entnommen worden.

4.4.1 Prüfmittel und Messmethoden

In diesem Abschnitt werden die Messmethoden und Prüfmittel für die Untersuchungen der einzelnen Qualitätskriterien gemäß Kapitel 4.1 vorgestellt. Zunächst werden die Untersuchungen an den Vorsondierungsprüfkörpern PK1.1 und PK2.1 behandelt, wobei die verwendeten Prüfmittel sowie die genauen Messpunkte und Messhilfsmittel erläutert werden. Anschließend werden die Untersuchungen an den anwendungsnahen Prüfkörpern PK3.1 bis PK3.7 erörtert.

4.4.1.1 Abbildegenauigkeit an PK1.1

Zusätzlich zur visuellen Überprüfung der Abweichung der Stützstruktur von der Sollgeometrie werden Verformungen, Verfärbungen und Brüche im Kontaktbereich zwischen den Stützstrukturen und dem Prüfkörper PK1.1 erfasst und gemäß Tabelle 4-6 kategorisiert. Diese Fehlerbilder sind Anzeichen für ein Versagen der Stützstruktur, was zu einer Beeinträchtigung der Abbildegenauigkeit führen kann. Die Brüche, die zwischen der Bauplattform und der Stützstruktur auftreten, deuten hingegen eher auf eine unzureichende Anbindung während der Baujobgenerierung hin. Durch die frühzeitige Identifizierung und Vermeidung solcher Brüche können potenzielle Probleme im späteren Fertigungsprozess vermieden werden. Verfärbungen, obwohl sie eine suboptimale Wärmeableitung widerspiegeln, stellen

nicht zwangsläufig eine unmittelbare Gefährdung für den Baujob dar. Sie dienen jedoch als Indikator für mögliche Schwachstellen in der Stützstruktur. Diese Kategorisierung ermöglicht eine objektive Bewertung der Abbildegengenauigkeit, wobei eine höhere Kategorie auf eine schlechtere Abbildegengenauigkeit der betrachteten Stützstruktur hinweist. Bei der Kategorisierung liegt ein besonderer Fokus auf den Brüchen zwischen der Stützstruktur und dem Prüfkörper sowie auf der Schrägstellung der äußeren Stützstrukturwände.

Tabelle 4-6: Kategorisierung zur Bewertung der Brüche zwischen Prüfkörper und Stützstruktur und der Schrägstellung der Stützstrukturen [nach Aus20].

Brüche zwischen Prüfkörper und Stützstruktur

Beschreibung	Keine Brüche	Risse, vereinzelte Brüche an Prüfkörperecken	Mehr als die Hälfte der Zähne gebrochen	Alle Zähne an der Prüfkörperaußenkante gebrochen
Fehlerbild				
Kategorie	1	2	3	4

Schrägstellung der äußeren Stützstrukturwände

Beschreibung	Keine Schrägstellung	Leichte Schrägstellung	Deutliche Schrägstellung	Extreme Schrägstellung
Fehlerbild				
Kategorie	1	2	3	4

4.4.1.2 Form und Maßhaltigkeit in Z-Richtung an PK1.1

Zunächst erfolgt die Untersuchung der Prüfkörper PK1.1 unmittelbar nach ihrer Fertigung, noch bevor sie von der Bauplattform abgetrennt werden. Hierfür wird ein Koordinatenmessgerät vom Typ Nikon Altera 8.7.6 eingesetzt. Das Messgerät ist mit einem Drehschwenkkopf Renishaw PH10M Plus, einer Tasteraufnahme Renishaw SP25M und einem Messtaster vom Typ Renishaw SP25_L40_D2 ausgestattet. Mit diesem Messaufbau wird die kombinierte Höhe der Stützstruktur und des Prüfkörpers gemessen.

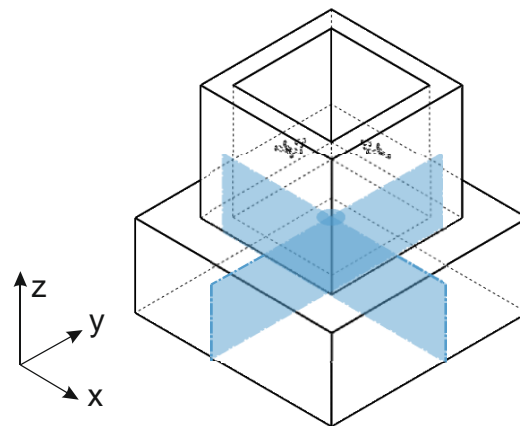


Bild 4-16: Messpunkt an der Oberseite von PK1.1.

Im ersten Schritt der Untersuchung wird, gemäß Bild 4-16, die Z-Koordinate des Flächenmittelpunkts innerhalb der Einspannstelle gemessen. Dies ermöglicht die Erfassung einer eventuellen Absenkung der Oberseite des Prüfkörpers. Im zweiten Schritt werden die Prüfkörper PK1.1 nach dem Ablösen von der Bauplattform und der vollständigen Entfernung der Stützstrukturen in die Messvorrichtung eingespannt, wie in Abbildung 4-17 dargestellt. Dabei wird die Unterseite der Prüfkörper nach oben gerichtet, und die Einspannstelle wird in der Messvorrichtung fixiert.

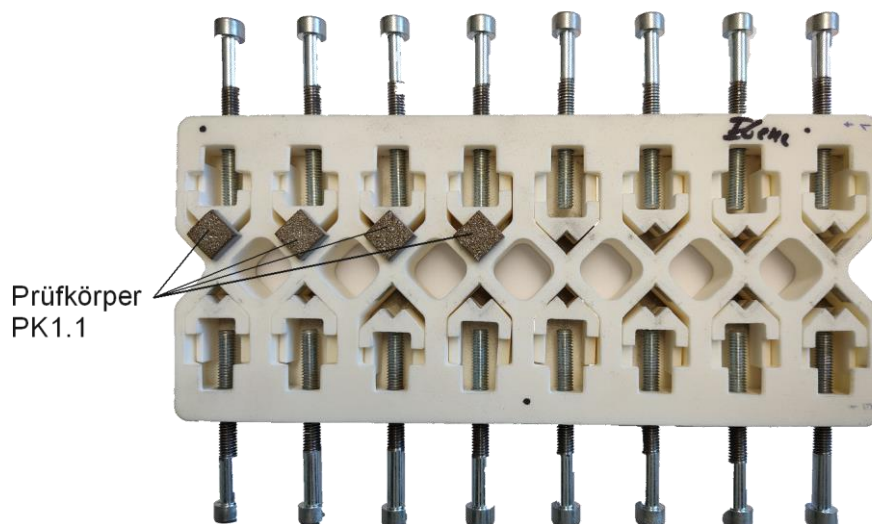


Bild 4-17: Messvorrichtung für den Prüfkörper PK1.1

Es werden die fünf in Bild 4-18 dargestellten Messpunkte mithilfe der Koordinatenmessmaschine aufgenommen. Der Flächenmittelpunkt und der im ersten Schritt ermittelte Messpunkt werden verwendet, um die Höhe des Prüfkörpers und somit die Abweichung in z-Richtung zu bestimmen. Die vier Messpunkte, die sich an den Ecken befinden, ermöglichen

die Messung der Formhaltigkeit der Unterseite des Prüfkörpers, indem der maximale Versatz in Z-Richtung relativ zum Flächenmittelpunkt ermittelt wird. Auf diese Weise können beispielsweise Verformungen an den Prüfkörpern, wie ein Aufschüsseln, festgestellt werden. Die Messpunkte sind jeweils 1 mm vom Rand des Prüfkörpers entfernt angeordnet, um eine zuverlässige Messung auch bei starken Verzügen zu ermöglichen.

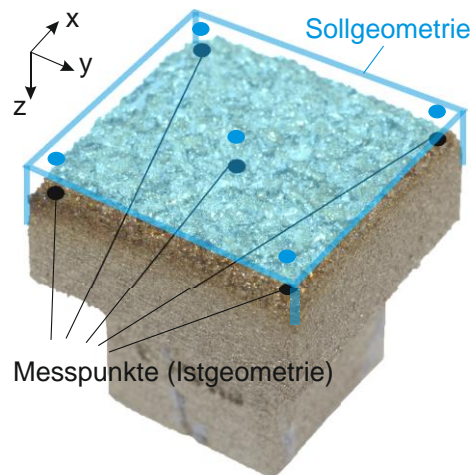


Bild 4-18: Messpunkte an der Unterseite der Prüfkörper PK1.1.

4.4.1.3 Form- und Maßhaltigkeit in der XY-Ebene an PK1.1

Die Messungen in der xy-Ebene werden parallel zu den Messungen aus Kapitel 4.4.1.2 durchgeführt. Erfasst werden die Breite und Tiefe der Prüfkörper im angebundenen Zustand zur Bauplatzform. Zur Durchführung dieser Messungen wird ebenfalls das Koordinatenmessgerät Nikon Altera 8.7.6 in Kombination mit dem Dreh-/Schwenkkopf Renishaw PH10M Plus, der Tasteraufnahme Renishaw SP25M und dem Messtaster SP25_L40_D2 verwendet. Die Messpunkte sind in Bild 4-19 dargestellt und werden senkrecht zu Messfläche angetastet.

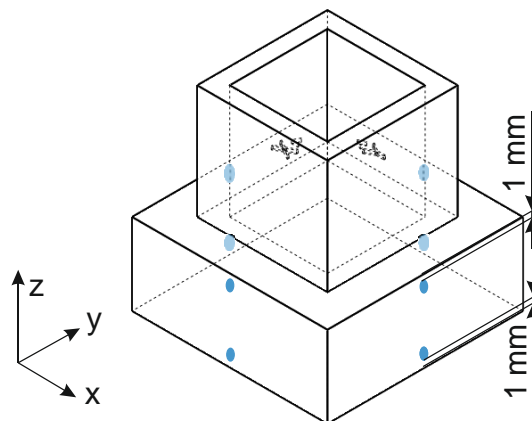





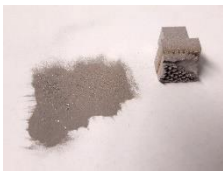
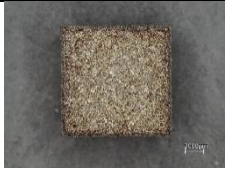



Bild 4-19: Messpunkte an den Seitenflächen des Prüfkörpers PK1.1

An jeder Seitenfläche befinden sich zwei Messpunkte mit einem Abstand von 1 mm zum oberen bzw. unteren Rand. Auf diese Weise werden die Breite und Tiefe der Prüfkörper an der Oberseite und Unterseite erfasst. Die maximale Abweichung von der Sollgeometrie wird in die Bewertung einbezogen.

4.4.1.4 Ablösbarkeit an PK 1.1

Die Bewertung der Ablösbarkeit kann sowohl anhand qualitativer als auch quantitativer Kriterien erfolgen. Als quantitative Größe wird der Zeitaufwand für das vollständige Lösen der Stützstrukturen vom Prüfkörper PK1.1 erfasst. Als qualitative Größen werden die vier Einzelkriterien Restpulvergehalt, verbleibende Stützenreste nach dem Ablösen von der Bauplattform, Werkzeugeinsatz und mechanischer Widerstand anhand der in Tabelle 4-7 aufgeführten Kategorisierung ermittelt.

Tabelle 4-7: Qualitative Bewertungskriterien zur Ablösbarkeit der Stützstrukturen [Aus19].

Pulverrückstände				
Bewertung				
Kategorie	1	2	3	4
Stützenreste nach dem Lösen				
Bewertung				
Kategorie	1	2	3	4
Mechanischer Widerstand				
Bewertung	Kein bis geringer Widerstand	Mäßiger Widerstand	Deutlicher Widerstand	Kaum zu lösen
Kategorie	1	2	3	4
Werkzeugeinsatz				
Bewertung	per Hand	Zange	Hammer und Meißel	Gradschleifer etc.
Kategorie	1	2	3	4

Dabei ist eine gewisse Subjektivität der durchführenden Person unvermeidbar. Um diesen Einfluss möglichst gering zu halten, wurden die Versuche von unterschiedlichen Personen durchgeführt. Die Gesamtbewertung erfolgt daraufhin durch die Mittelwertbildung der vier Einzelkriterien.

4.4.1.5 Oberflächenrauheit an PK1.1

Für die Messung der Oberflächenrauheit wird das optische Messgerät Keyence VR3200 verwendet. Dieses verwendet das Prinzip der Streifenlichtprojektion, um die Linienrauheit in Form der gemittelten Rautiefe R_z zu bestimmen. Zur Durchführung der Messungen werden an der Unterseite des Prüfkörpers fünf Messlinien in X-Richtung und fünf Messlinien in Y-Richtung, wie in Bild 4-20 a) dargestellt, definiert und anschließend ausgewertet. Die Messlinien haben einen Abstand von 2,5 mm zueinander und einen Abstand von 1 mm zum Prüfkörpererrand. Um eventuelle Schrägstellungen des Prüfkörpers unter dem Makroskop auszugleichen, werden die Messlinien einer Neigungskorrektur unterzogen.

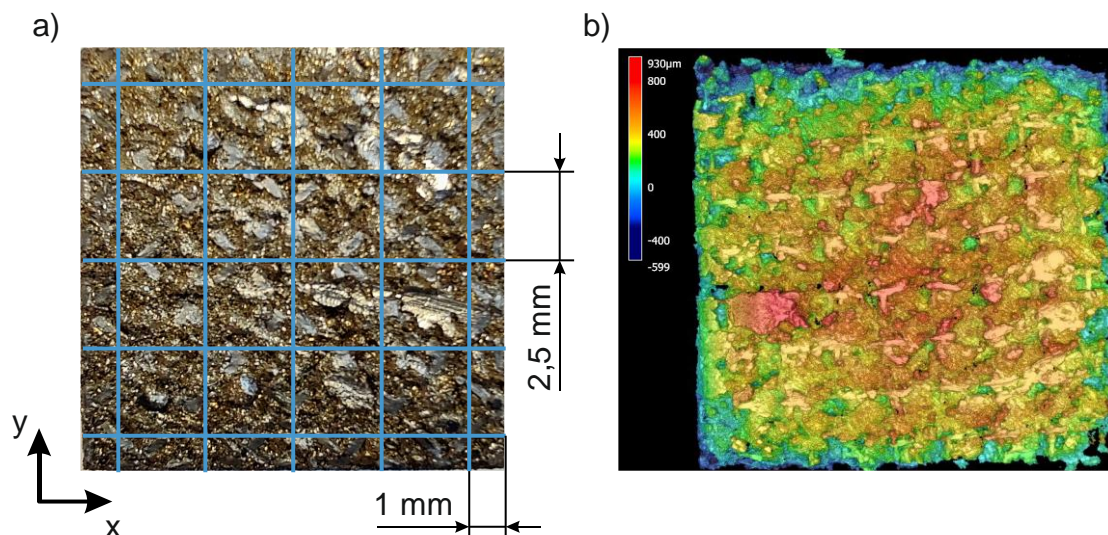


Bild 4-20: a) Messlinien an der Prüfkörperunterseite von PK1.1 b) Höhenbild der Prüfkörperunterseite von PK1.1. Rote Bereiche zeigen starke Stützstrukturanhaftungen.

Die Messstrecke wird nach ISO 21920 entsprechend der erwartbaren Oberflächenrauheit ausgewählt. Die erwartbare Oberflächenrauheit liegt bei einer gemittelten Rautiefe von $R_z \geq 50 \mu\text{m}$ [Ada15, BHS17]. Dabei ist von einem aperiodischen Profil durch Pulveranhaftungen, Stützenreste und Ausbrüche an der Prüfkörperunterseite auszugehen. Gemäß den Normvorgaben setzt sich die Gesamtmessstrecke für die erwartete Oberflächenrauheit aus fünf Einzelmessstrecken zusammen, wobei jede Einzelmessstrecke eine Länge von 8 mm aufweist. Diese Einzelmessstrecke entspricht der Grenzwellenlänge λ_C , die als Hochpassfilter fungiert und größere Wellenlängen herausfiltert. Dabei werden hauptsächlich

Gestaltabweichungen erster und zweiter Ordnung erfasst, die bereits in den vorherigen Messungen in den Kapiteln 4.4.1.2 und 4.4.1.3 berücksichtigt wurden. Zusätzlich wird ein Kurzwellenfilter λ_S von 25 μm gemäß DIN EN ISO 3274 verwendet, der aus λ_C abgeleitet wird. Die gemittelte Rautiefe R_Z (Gleichung 4.2) ergibt sich aus dem arithmetischen Mittelwert der fünf Einzelmessstrecken, für die die Höhendifferenz R_{Zi} zwischen der höchsten Profispitze und dem tiefsten Profital ermittelt wird [DIN EN ISO 4287].

$$R_Z = \frac{1}{5} \cdot \sum_{i=1}^5 R_{Zi} \quad (4.2)$$

Zusätzlich werden von den Prüfkörperunterseiten Höhenbilder erstellt, wie sie in Bild 4-20 b) zu sehen sind. Durch eine visuelle Inspektion der Höhenbilder können Bereiche mit erhöhtem Stützenrestgehalt identifiziert werden. Die Farbgebung der Höhenbilder ermöglicht eine intuitive und schnelle Beurteilung von Stützenresten, einschließlich deren Form, Verteilung und Größe.

4.4.1.6 Datenvorbereitungszeit an PK 1.1

Die Ermittlung der Datenvorbereitungszeit erfolgt an den Prüfkörpern PK1.1, wobei jeder der 81 auf einem Baujob platzierten Prüfkörper mit einem unterschiedlichen Blocksupport versehen wird. Die Höhe der Stützstrukturen unterhalb des Prüfkörpers beträgt 4 mm. Es werden verschiedene Blocksupportparameter variiert, wie der Stützstrukturhatchabstand, die Fragmentierung, die Zahnhöhe und die Zahn-Toplänge wie in Kapitel 2.4.4 beschrieben. Während der Einstellung dieser konstruktiven Parameter und der Erzeugung der Strukturen durch das Vorbereitungsprogramm, in diesem Fall Materialise Magics 25.0, wird die Zeit gemessen. Die Zeitnahme beginnt, nachdem der zu supportierende Prüfkörper angewählt und der Button „Support erzeugen“ im Menüband „Supporterzeugung“ angeklickt wird. Daraufhin werden die Blocksupportparameter für die jeweilige gewünschte Parameterstufenkombination eingestellt. Die Einstellungen der Zähne gelten dabei für die Anbindung zum Bauteil als auch für die Anbindung zur Bauplattform. Zusätzlich müssen für jede Parameterstufenkombination einheitliche Grundeinstellungen vorgenommen werden. Hierzu zählt der XY-Offset, der auf 0 mm gesetzt wird und die Entfernung der Perforation. Durch Anwählen der Schaltfläche „2D & 3D neu erstellen“ beginnt die Software den Support zu generieren. Sobald dies geschehen ist, wird die Zeit gestoppt und festgehalten. Auf diese Weise wird die Datenvorbereitungszeit für jede spezifische Parameterstufenkombination ermittelt.

4.4.1.7 Datenvolumen an PK 1.1

Zur Bestimmung des Datenvolumens wird die erforderliche Speicherkapazität des Prüfkörpers mit Stützstrukturen nach dem Slicing und der Konvertierung in das

Maschinendatenformat ermittelt. Es könnte theoretisch die Größe der STL-Datei des ungeslicten Modells verwendet werden, da mit zunehmender Komplexität der Stützstrukturen die Anzahl der approximierten Dreiecke zunimmt und somit das Datenvolumen steigt. Jedoch sind die STL-Dateien für die verschiedenen Prozessparametersätze identisch, was keinen Vergleich untereinander ermöglicht. Erst der Vergleich der geslicten 3D-Modelle ermöglicht es Unterschiede zwischen den verschiedenen Stützstrukturen festzustellen und auch Rückschlüsse auf die Prozessparametersätze zu ermöglichen. Darüber hinaus ist das Slicen einer der relevanten Schritte im Preprocessing und sollte daher in die Bewertung einbezogen werden. Dabei ist es von essenzieller Bedeutung sicherzustellen, dass für die Prüfkörper in jedem Baujob der gleiche Prozessparametersatz gemäß Kapitel 4.3 in Verbindung mit der identischen Belichtungsstrategie verwendet wird, um eine Vergleichbarkeit des Datenvolumens in der geslicten Datei zu gewährleisten. Das Slicen wird mithilfe der Software Materialise Magics 25.0 durchgeführt. Das resultierende Datenvolumen wird in Megabyte (MB) angegeben.

4.4.1.8 Materialverbrauch an PK 2.1

Zur Bestimmung des Materialverbrauchs wird auf den Prüfkörper PK2.1 zurückgegriffen. Die 81 Parameterstufenkombinationen werden in einem separaten Baujob gefertigt. Nach Fertigstellung des Baujobs wird das nicht geschmolzene Pulver bestmöglich entfernt. Um auch das nicht geschmolzene Pulver aus den Zwischenräumen der in PK2.1 eingebrachten Stützstrukturen zu entfernen, wird der Baujob auf die Seitenfläche gestellt und mittels eines Schonhammers auf die Unterseite geschlagen. Sobald kein Pulver mehr austritt, wird der Baujob auf die nächste Seitenfläche gestellt und der Vorgang wiederholt, bis kein Pulver mehr austritt. Anschließend werden die Prüfkörper mit einem Meißel an der Sollbruchstelle der PK2.1 von der Bauplattform abgeschlagen (s. Kapitel 4.2). Die Messung des Gewichts der einzelnen Prüfkörper erfolgt mit einer Feinwaage des Typs Mettler Toledo XS4002s DeltaRange. Dabei wird das Gewicht m_{ges} der Prüfkörper mit eingebetteten Stützstrukturen und möglicherweise verbliebenem Restpulver ermittelt. Anschließend wird das Materialvolumen der Stützstrukturen bestimmt, indem die Masse des Prüfkörpers davon subtrahiert wird. Dazu wurde das rechnerische Volumen des Prüfkörpers $V_P = 615,44 \text{ mm}^3$ mit der Dichte des verwendeten Stahls 316L (1.4404) $\rho_{316L} = 7,95 \text{ g/cm}^3$ multipliziert. Daraus ergibt sich eine Masse von $m_P = 4,892 \text{ g}$ für den Prüfkörper. Anschließend wird das Volumen der Stützstrukturen V_{St} nach Gleichung 5.2 bestimmt, wobei m_{ges} durch Wiegen ermittelt wird.

$$V_{St} = \frac{m_{ges} - m_P}{\rho_{316L}} \quad (4.3)$$

Die Angabe des Materialverbrauchs als Volumen bietet den Vorteil, dass dieser Wert den maximal möglichen Stützvolumen, wenn der Stützstrukturbereich durch ein Volumensupport gefüllt wird, gegenübergestellt werden kann. Außerdem handelt es sich bei der

Volumenfüllung um eine gängige Angabe für Gitterstrukturen, sodass auch diese verglichen werden können. Eine Umrechnung in ein Gewicht kann jederzeit über die Werkstoffdicke erfolgen.

4.4.1.9 Untersuchungen an PK3.1

Der Prüfkörper wird zuerst auf der Bauplatzform mit dem Koordinatenmessgerät Nikon Altera 8.7.6 mit dem Dreh- und Schwenkkopf Renishaw PH10M Plus und der Tasteraufnahme SP25M sowie dem Messtaster SP25_L40_D2 vermessen, um die Form und Maßhaltigkeit zu überprüfen. Hierbei werden die in Bild 5-6 aufgeführten Messpunkte angefahren. Die Messpunkte befinden sich an jedem Überhang in Längsrichtung an drei Positionen. Als Referenzpunkte dienen die Messpunkte auf dem Mittelsteg. Anhand der weiteren Messpunkte kann die Verschiebung in Z-Richtung relativ zum Mittelsteg ermittelt und mit dem Sollwert verglichen werden. Darüber hinaus kann die Formhaltigkeit durch den Vergleich der drei Messpositionen entlang einer Linie überprüft werden. Nachdem die Stützstrukturen durchtrennt wurden, werden die Messungen der in Bild 4-21 dargestellten Messpunkte erneut durchgeführt, um mögliche Verzüge aufgrund von wärmeinduzierten Eigenspannungen zu untersuchen.

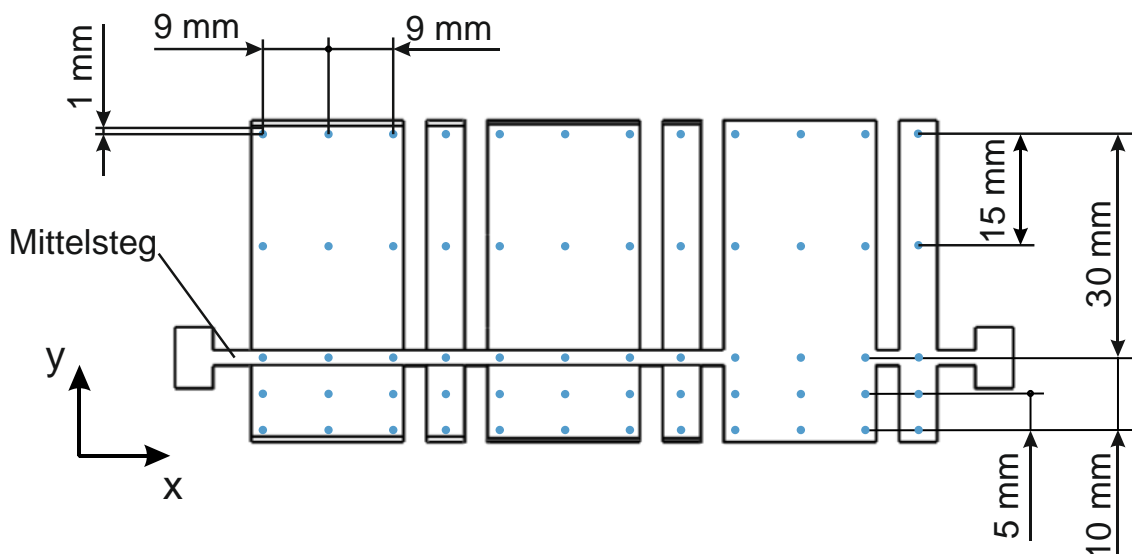


Bild 4-21: Messpunkte der Koordinatenmessmaschine an PK1.1.

Zusätzlich wird ein weiterer Aspekt berücksichtigt, nämlich die Überprüfung der Form- und Maßhaltigkeit der Überhänge durch die Analyse ihres Querschnittsprofils. Hierfür werden die zu untersuchenden Prüfkörper unter Verwendung einer speziellen Vorrichtung, wie sie in Bild 4-22 veranschaulicht wird, am Mittelsteg eingespannt. Im Anschluss wird der bewegliche Teil der Vorrichtung gedreht, um den Prüfkörper auszurichten und sicherzustellen, dass das Querschnittsprofil der Überhänge in aufrechter Position nach oben zeigt.

Anschließend erfolgt die Auswertung des Querschnittsprofils mithilfe eines Makroskops vom Typ Keyence VR3200.

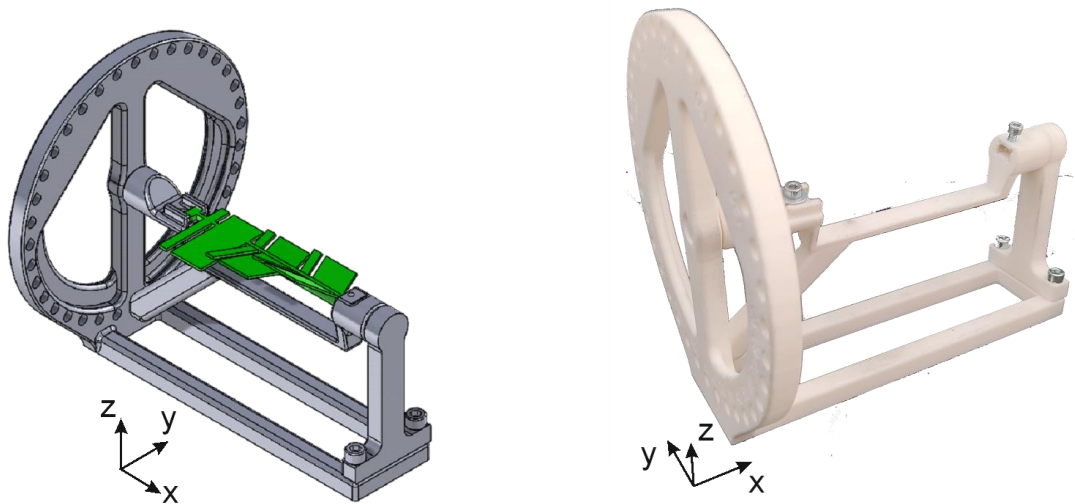


Bild 4-22: Einspannvorrichtung für die Prüfkörper PK3.1 bis PK3.4 nach [Aus20].

Zur umfassenden Auswertung werden mithilfe der Analyzer-Software der VR3000-Serie gemäß Bild 4-23 die Breite b_Q und Höhe h_Q des Querschnitts bestimmt. Dies geschieht durch das Platzieren horizontaler und vertikaler Hilfslinien entlang der Kontur des Querschnitts und anschließende Messungen zwischen den Hilfslinien. Zusätzlich ermöglicht eine erhöhte Zoomstufe die Bestimmung des Kantenzustands des Querschnittsprofils. Hierbei wird der mögliche Schrägstellungswinkel durch die Messung des Abstands x_{Sch} , wie in Bild 4-23 dargestellt, erfasst.

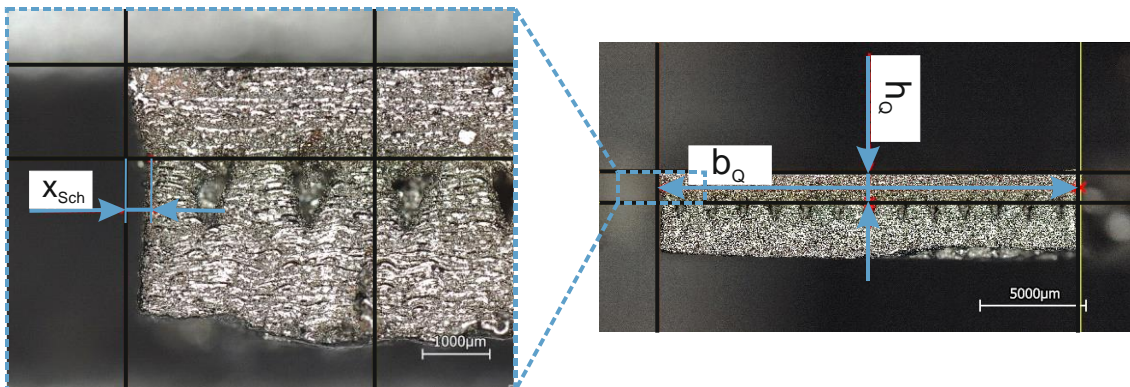


Bild 4-23: Messungen zur Formhaltigkeit des Querschnitts an PK3.1.

Abschließend erfolgt eine Messung der Oberflächenrauheit der Downskinflächen. Zur exakten Positionierung wird die in Bild 4-22 dargestellte Vorrichtung verwendet, wobei der Prüfkörper so gedreht wird, dass die Downskinfläche horizontal zur Messfläche des Makroskops ausgerichtet ist. Die gemittelte Rautiefe (R_z) wird unter Verwendung einer Grenzwellenlänge (λ_C) von 8 mm und einem Kurzwellenfilter (λ_S) von 25 μm gemäß den Normen DIN

EN ISO 4288 und DIN EN ISO 3274 bestimmt. Zusätzlich wird ein Höhenbild der Downskinfläche erstellt.

4.4.1.10 Untersuchungen an PK3.2

Entsprechend den Ausführungen in Kapitel 4.4.1.9 wird eine ähnliche Bewertungsmethode angewendet, um die Auswirkungen auf interne, nicht gekrümmte Oberflächen zu untersuchen. Eine Vermessung des Querschnittsprofils wird durchgeführt, wobei das Makroskop Keyence VR3200 zum Einsatz kommt. Mithilfe der Analyzer-Software wird eine rechteckige Referenzgeometrie generiert, die das innere Rechteck des Prüfkörpers abbildet, wie in Bild 4-24 veranschaulicht. Anhand dieser Referenzgeometrie werden die Breite b_{Qi} und Höhe h_{Qi} des rechteckigen Querschnitts bestimmt. Zur Ermittlung der Oberflächenrauheit wird der Prüfkörper PK3.2 mittig aufgefräst und die Stützstrukturen möglichst restlos entfernt. Dadurch wird es ermöglicht, die Oberflächenrauheit der internen, von Stützstrukturen befreiten Downskinfläche mithilfe des Makroskops Keyence VR3200 zu vermessen. Die Einstellungen des Makroskops gleichen jenen, die im Kapitel 4.4.1.9 beschrieben wurden.

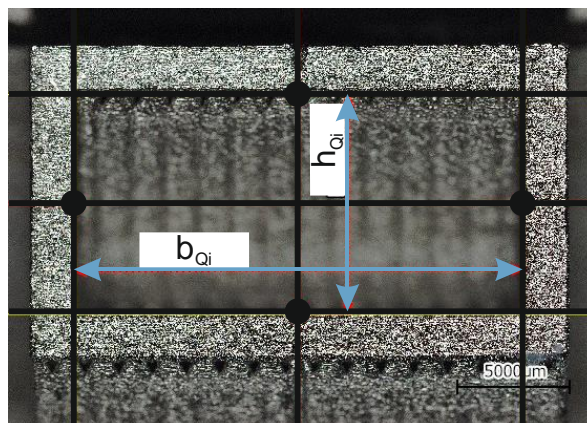


Bild 4-24: Messungen zur Formhaltigkeit des Querschnitts an PK3.2

4.4.1.11 Untersuchung an PK3.3

Zur Untersuchung des Einflusses von Stützstrukturen auf außen einfach gekrümmte Oberflächen werden die Prüfkörper PK3.3 verwendet. Die Messpunkte nach Bild 4-25 werden im ungelösten Zustand der Prüfkörper von der Bauplattform mit Hilfe der Koordinatenmessmaschine Nikon Altera aufgenommen. Nach der Durchtrennung der Stützstrukturen zwischen dem Bauteil und der Bauplattform werden die gleichen Messpunkte erneut angesteuert, um Verformungen durch eigenspannungsbedingte Verzüge zu erfassen, die nach dem Entfernen der Stützstrukturen sichtbar werden. Nach dem Abtrennen der Prüfkörper von der Bauplattform und der Entfernung der Stützstrukturen wird die Formhaltigkeit des Querschnittsprofils untersucht.

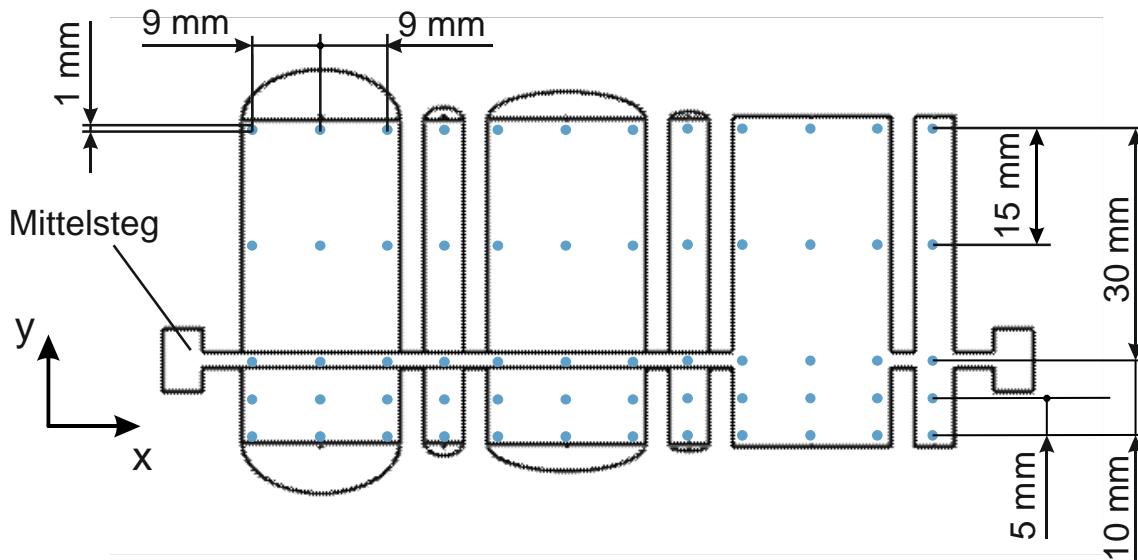


Bild 4-25: Messpunkte der Koordinatenmessmaschine an PK3.3 (s.a Bild 4-5).

Aufgrund des einfach gekrümmten halbzyylinderförmigen Querschnitts werden die in Bild 4-26 angegebenen Radien r_{Q1} bis r_{Q5} in die Makroskopaufnahmen des Keyence VR3200 eingebracht. Zusätzlich wird die gemittelte Rautiefe R_z bestimmt. Hierfür muss die einfach gekrümmte Oberfläche der Downskinfläche mittels des Makroskops bei einer 80-fachen Vergrößerung aufgenommen werden. Die Filter sind analog zu Kapitel 4.4.1.9 zu wählen und eine Oberflächenformkorrektur ist durchzuführen, um den Einfluss der Oberflächenkrümmung auszuschließen.

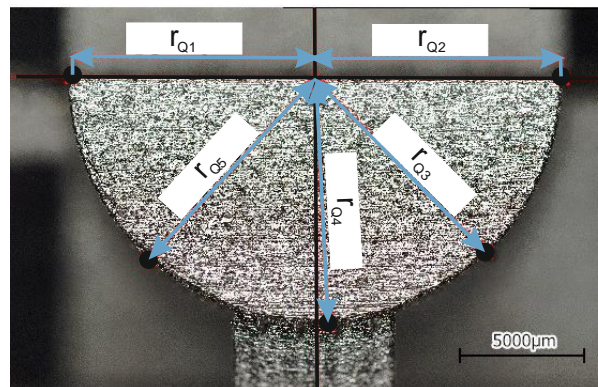


Bild 4-26: Messungen zur Formhaltigkeit des Querschnitts an PK 3.3.

4.4.1.12 Untersuchungen an PK3.4

Für die Untersuchung einfach gekrümmter innenliegender Flächen wird der Prüfkörper 3.4 verwendet. Dabei wird die Form- und Maßhaltigkeit des Querschnittsprofils ermittelt, indem mit Hilfe des Makroskops Keyence VR3200 Messungen des Radius durchgeführt werden, wie in Bild 4-27 dargestellt. Hierzu werden zwei Referenzlinien entlang der Mittelachsen des kreisrunden Profils eingefügt. Anschließend wird der Ist-Wert zur Bestimmung der

Maßabweichung des Innendurchmessers in horizontaler d_{qh} und vertikaler d_{qv} Richtung ermittelt. Zur Beurteilung der Formhaltigkeit, wird zudem ein Referenzkreis in die Makropaufnahme integriert und die Abweichung von der kreisrunden Form festgehalten.

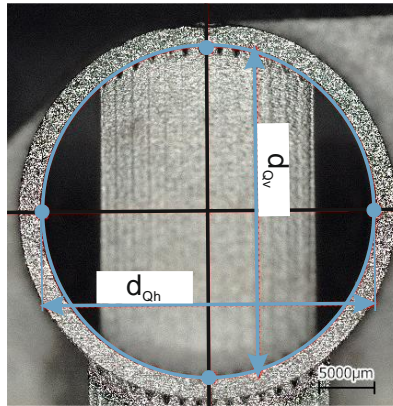


Bild 4-27: Messungen zur Formhaltigkeit des Querschnitts an PK 3.4.

Zur Bestimmung der Oberflächenqualität, werden die hohlzylinderförmigen Überhänge aufgefräst und die Downskinfläche nach der Stützstrukturentfernung vermessen. Hierbei wird das Makroskop Keyence VR3200 verwendet, um die gemittelte Rautiefe R_z zu bestimmen. Auch hierbei wird eine 80-fache Vergrößerung bei den in Kapitel 4.4.1.9 gewählten Filtern verwendet.

4.4.1.13 Untersuchungen an PK3.5

Um doppelt gekrümmte Standardelemente zu untersuchen, werden die konkaven und konvexen Flächen am Prüfkörper 3.5 genutzt. Zur qualitativen Bewertung der Form- und Maßhaltigkeit wird mittels des Makroskops Keyence VR3200 ein Höhenbild der Downskinfläche erstellt und mit der gewünschten Sollgeometrie verglichen, wie in Bild 4-28 dargestellt. Die Abweichungen von der Sollgeometrie werden durch die farbigen Unterschiede deutlich. Rote Bereiche stellen ein Aufmaß dar, blaue Bereiche eine Maßunterschreitung. Grün entspricht der Sollgeometrie. Das Höhenbild dient somit auch zur qualitativen Beurteilung der Ablösbarkeit, indem der Anteil verbleibender Stützenreste beurteilt wird. Hierbei wird eine 40-fache Vergrößerung am Makroskop verwendet.

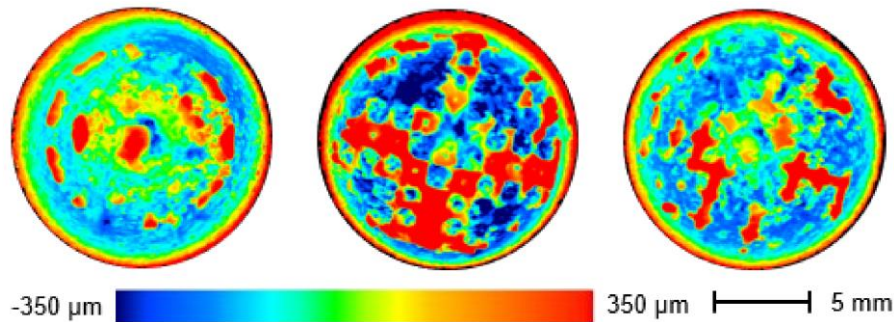


Bild 4-28: Höhenbilder der PK3.5 bei unterschiedlichen Stützstrukturen [Kal19].

4.4.1.14 Untersuchungen der Toplänge an PK 3.6

Zur Untersuchung der Toplänge bei verschiedenen Downskinwinkeln verfügt der Prüfkörper PK3.6 über eine in vier Segmente eingeteilte Downskinfläche, die in jedem Segment einen anderen Downskinwinkel aufweist. Die Winkel betragen 10° , 20° , 30° , 40° . Mit Hilfe des Makroskops Keyence VR3200 wird, wie in Bild 4-29 dargestellt, eine Gesamtaufnahme des Prüfkörpers in 12-facher Vergrößerung erstellt. Die Winkel werden durch die Verwendung von Referenzlinien, die in die Aufnahme eingefügt werden, kontrolliert. Anschließend wird jedes Segment einzeln bei 40-facher Vergrößerung aufgenommen und die Toplänge der Zähne vermessen. Hierfür wird eine Referenzlinie genau an der Unterseite des Bauteils positioniert und die Flanken der Zähne mittels zusätzlicher Hilfslinien markiert. Die Toplänge wird als der Abstand zwischen den Schnittpunkten der Referenzlinien bestimmt, wie in Bild 4-29 veranschaulicht.

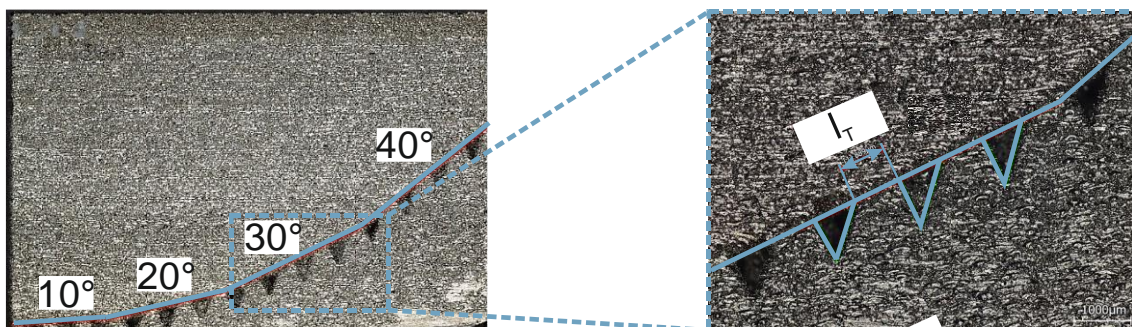


Bild 4-29: Messung der Toplänge bei unterschiedlichen Downskinwinkeln.

4.4.1.15 Untersuchung der Ablösbarkeit bei eingeschränkter Zugänglichkeit an PK3.7

Zur Bewertung der Ablösbarkeit bei unterschiedlicher Zugänglichkeit, sowohl einseitig als auch zweiseitig, wird der Prüfkörper PK3.7 verwendet. Dazu wird in den beiden Messbereichen, der Grad der Entfernung der Stützstrukturen in zwei Minuten Bearbeitungszeit ermittelt (s.a. Bild 4-9). Zudem wird der mechanische Widerstand, der erforderliche

Werkzeugeinsatz, die Rückstände des Pulvers und die verbleibenden Stützenreste gemäß dem Bewertungsschema aus Tabelle 4-7 bewertet. Die Gesamtbewertung erfolgt durch die Berechnung des Mittelwerts der einzelnen Kriterien.

4.4.2 Auswertung der Ergebnisse der Vorsondierungsversuche

Wie in Kapitel 4.3 aufgeführt, erfolgte die Herstellung der Prüfkörper in mehrfacher Ausführung unter Verwendung eines vollfaktoriellen Versuchsplans unter Berücksichtigung eines statistischen Versuchsumfangs (engl.: Design of Experiment, kurz: DoE). Die Ergebnisauswertung erfolgt an den in Kapitel 4.2.3 vorgestellten Pareto-Diagrammen, Haupteffektdiagrammen, Wechselwirkungsdiagrammen und der Gesamtergebnisdarstellung. Die Auswertung erfolgt für jede Zielgröße in einem separaten Unterkapitel. Dazu werden die Gesamtergebnisdarstellungen für alle drei betrachteten Prozessparametersätze PS1, PS2 und PS3 betrachtet (s. Kapitel 4.3).

4.4.2.1 Auswertung der Abbildegenauigkeit

Die Analyse des Pareto-Diagramms in Bild 4-30 lässt darauf schließen, dass der Faktor A (Hatchabstand) und der Faktor C (Toplänge) einen signifikanten Effekt auf die Abbildegenauigkeit bei einem 95%-Vertrauensniveau ($\alpha=0,05$) haben.

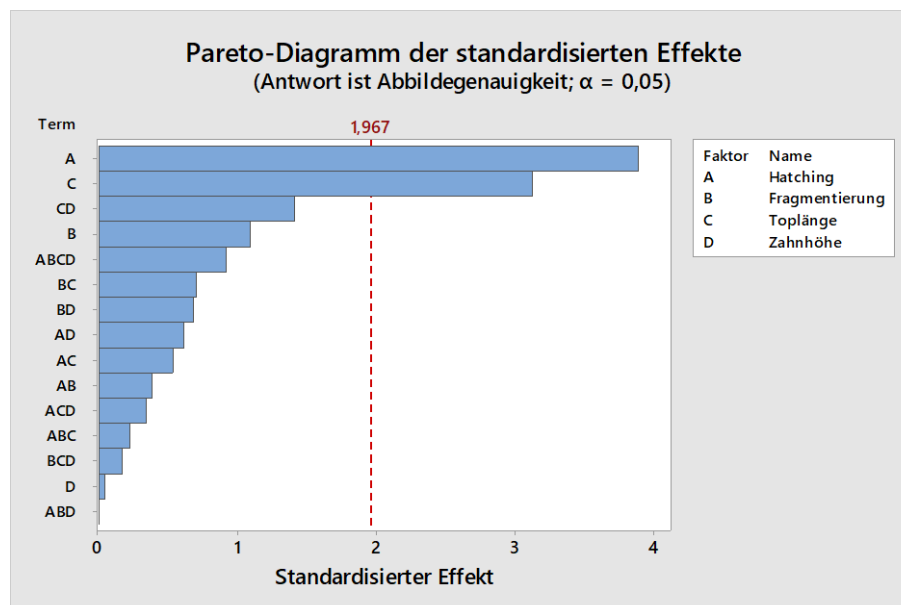


Bild 4-30: Pareto-Diagramm der Abbildegenauigkeit.

Die vorliegenden Beobachtungen können ebenfalls durch das Haupteffektdiagramm in Bild 4-31 veranschaulicht werden. Es wird deutlich, dass durch die Erhöhung des Hatchabstands eine Verschlechterung der Abbildegenauigkeit erreicht wird. Diese Verschlechterung ist dreimal so groß wie bei der Erhöhung der Fragmentierung oder der Zahnhöhe.

Darüber hinaus ist der Effekt der Toplänge deutlich erkennbar, da eine Vergrößerung der Toplänge zu einer deutlichen Verringerung der Abbildegengenauigkeit führt.

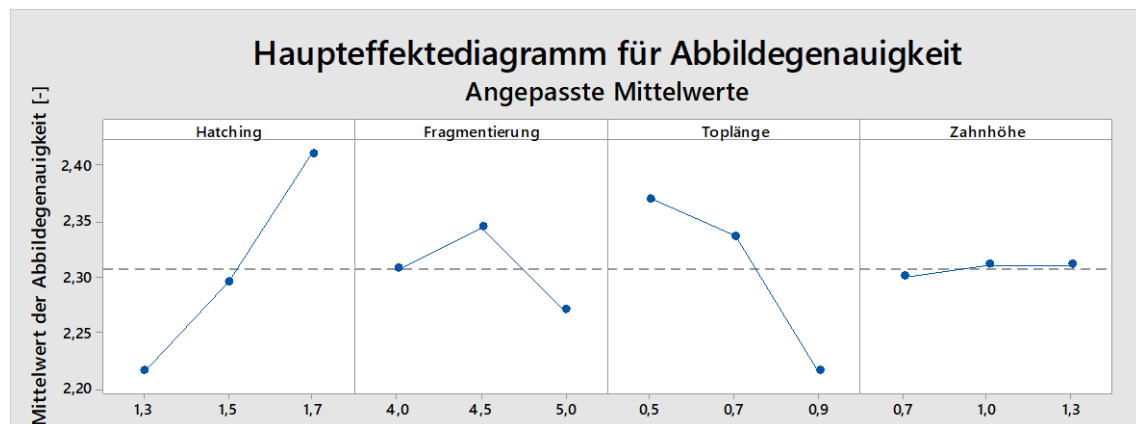


Bild 4-31: Haupteffektdiagramm der Faktoren für die Abbildegengenauigkeit.

Wechselwirkungen jenseits der beiden signifikanten Faktoren A (Hatching) und C (Toplänge) haben hingegen einen geringeren Einfluss, wie man in Bild 4-32 erkennen kann. Hier ist lediglich die Zweifaktorwechselwirkung aus Toplänge und Zahnhöhe deutlich sichtbar, die darauf schließen lässt, dass kleine, breite Zähne zu bevorzugen sind.

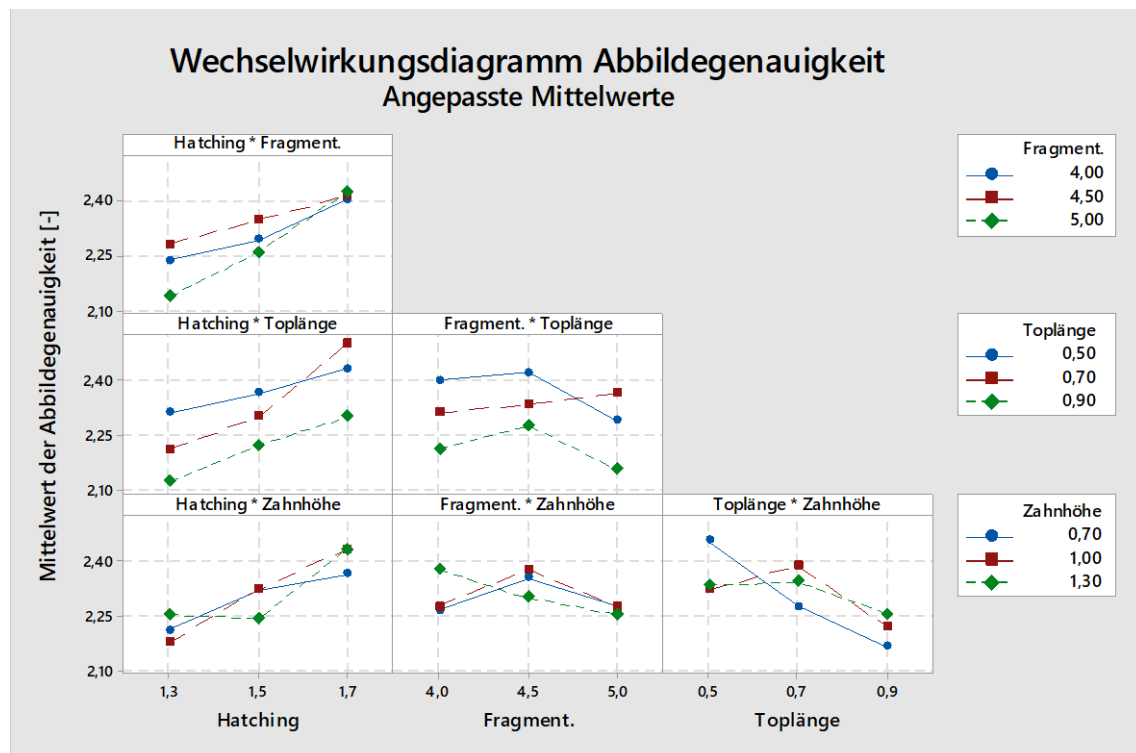


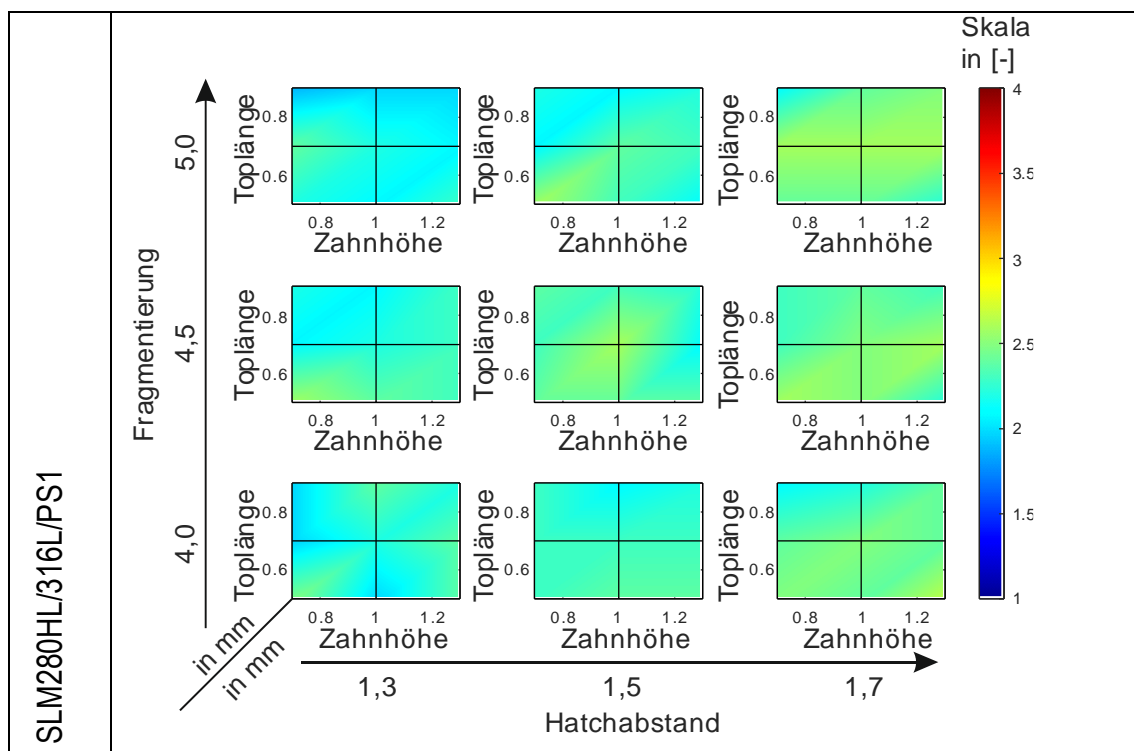
Bild 4-32: Wechselwirkungsdiagramm der Abbildegengenauigkeit.

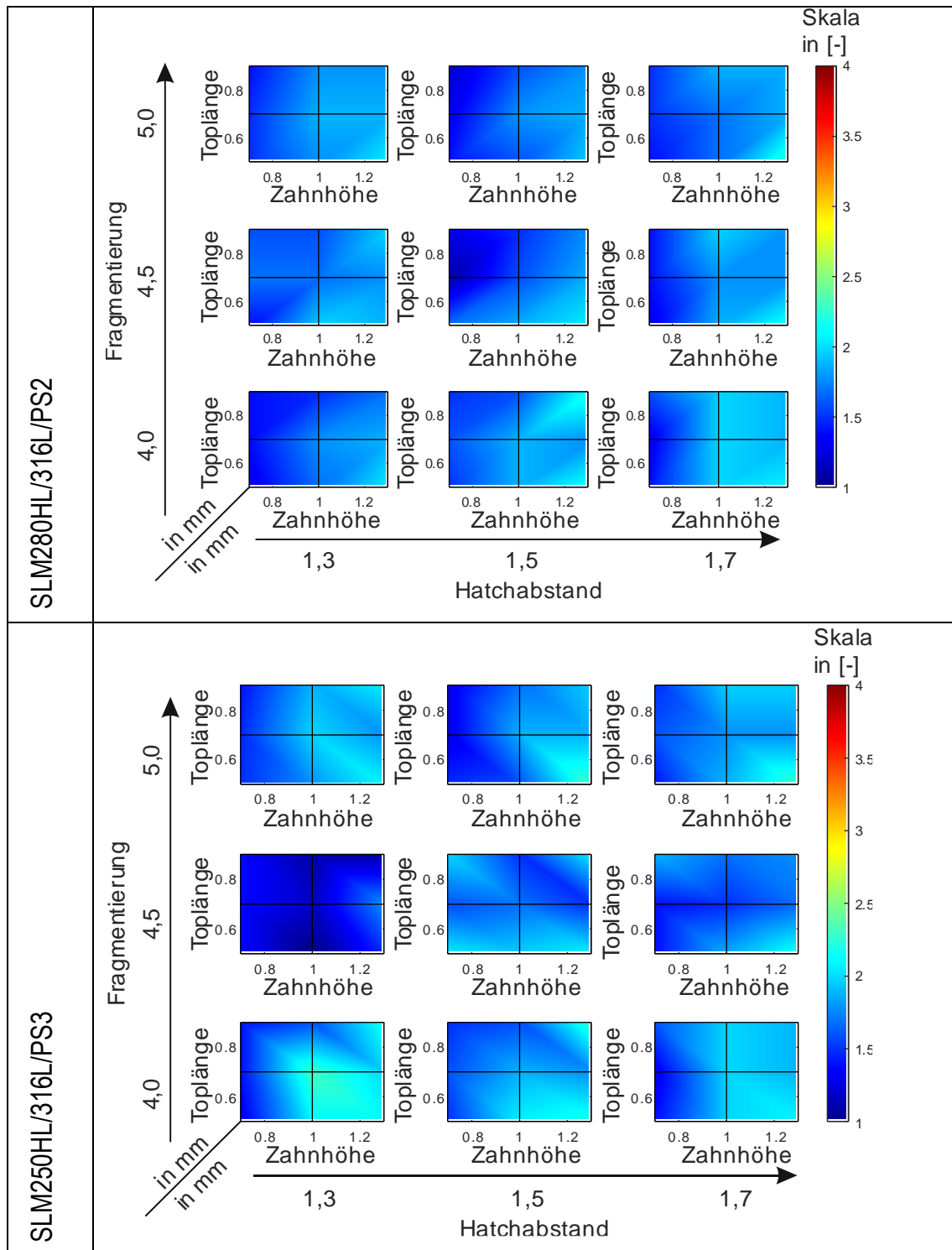
Dies deckt sich mit den Gesamtergebnisdarstellungen. In allen Diagrammen in Tabelle 4-8 ist erkennbar, dass ein größerer Hatchabstand von 1,7 mm mit einem schlechteren,

höheren Wert für die Abbildegenauigkeit einhergeht. Dies deutet darauf hin, dass ein großer Hatchabstand zu einer Beeinträchtigung der Verbindung zwischen den Stützstrukturen und dem Bauteil führt. Durch das Vorhandensein weniger Stützstrukturwände wird die Wärmeabfuhr verringert, was wiederum zu stärkerem Verzug im Bauteil führen kann.

Die Unterschiede in den Gesamtergebnisdarstellungen zwischen den 50µm-Prozessparametersätzen PS2 und PS3 sowie dem 30µm-Parametersatz PS1 lassen sich auf die Schichtdicke zurückführen. So ist der Wärmeeintrag im 30 µm-Parametersatz durch die höhere Anzahl an Schichten bei ähnlicher Laserleistung höher. Der Einfluss der Toplänge ist ebenfalls in den Gesamtergebnisdarstellungen in Tabelle 4-8 erkennbar. Es wird deutlich, dass bei einer größeren Toplänge geringere, bessere Werte für die Abbildegenauigkeit erreicht werden, was durch die größere Kontaktfläche zum Bauteil und die damit verbundene bessere Wärmeabfuhr bei größeren Toplängen zu erklären ist. Der positive Effekt der Toplänge auf die Abbildegenauigkeit ist auch an den Prüfkörpern erkennbar, wie beispielhaft in Bild 4-33 a) und b) zu sehen ist. Hier ist erkennbar, dass bei einer größeren Toplänge die Brüche im Kontaktbereich vermieden wurden und auch eine geringere Schrägstellung auftritt.

Tabelle 4-8: Gesamtergebnisdarstellung der Abbildegenauigkeit.





Anhand der Gesamtergebnisdarstellungen in Tabelle 4-8 lässt sich ebenfalls darauf schließen, dass die Zahnhöhe einen Einfluss auf die Abbildegengenauigkeit hat, da tendenziell geringere, bessere Abbildegengenauigkeitswerte bei kleinen Zahnhöhen festgestellt werden. Es ist jedoch zu beachten, dass diese Beobachtung statistisch nicht abgesichert ist, da das Pareto-Diagramm in Bild 4-30 keinen signifikanten Effekt der Zahnhöhe anzeigt.

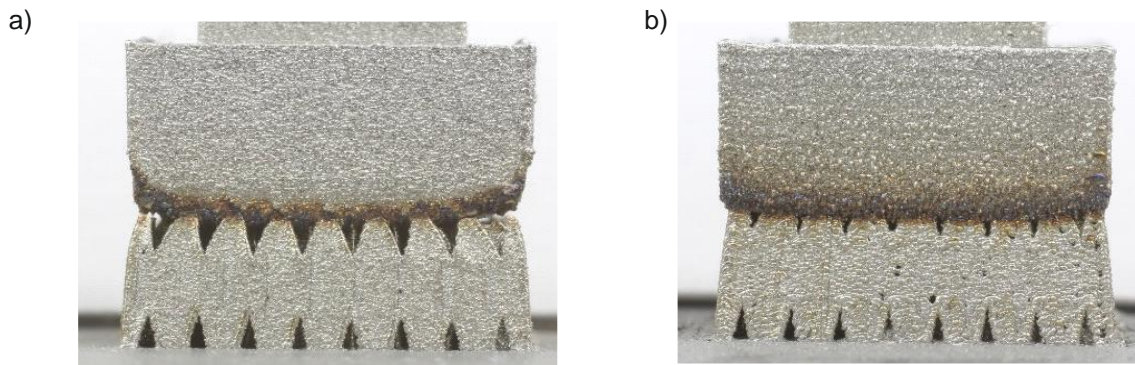


Bild 4-33: a) Prüfkörper PK1 mit schmalen, langen Zähnen und einem großen Hatchabstand, der deutliche Stützstrukturbrüche und eine Einschnürung im Kontaktbereich aufweist b) Prüfkörper PK1 mit breiten, kurzen Zähnen und einem geringen Hatchabstand, der eine deutlich bessere Abbildegauigkeit aufweist.

Fazit: Breite, niedrige Zähne und ein geringer Hatchabstand haben einen positiven Effekt auf die Abbildegauigkeit. Die Fragmentierung hat keinen signifikanten Effekt auf die Abbildegauigkeit.

4.4.2.2 Auswertung der Form- und Maßhaltigkeit in Z-Richtung

Die Untersuchung der Maßhaltigkeit in Z-Richtung erfolgt gemäß Kapitel 5.1.2 anhand der Abweichung des Maßes zwischen der Unterseite und dem Flächenmittelpunkt an der Oberseite des Prüfkörpers. Das in Bild 4-34 abgebildete Pareto-Diagramm zeigt, dass die Faktoren C (Toplänge) und B (Fragmentierung) einen signifikanten Effekt auf die Maßhaltigkeit in Z-Richtung aufweisen, mit einem Konfidenzniveau von 95%. Darüber hinaus haben die Faktoren A (Hatchabstand) und D (Zahnhöhe) in Form von Zweifaktorwechselwirkungen oder höheren Wechselwirkungen einen signifikanten Effekt auf die Maßhaltigkeit in z-Richtung, der die standardisierten Effekte der einzelnen Faktoren übersteigt.

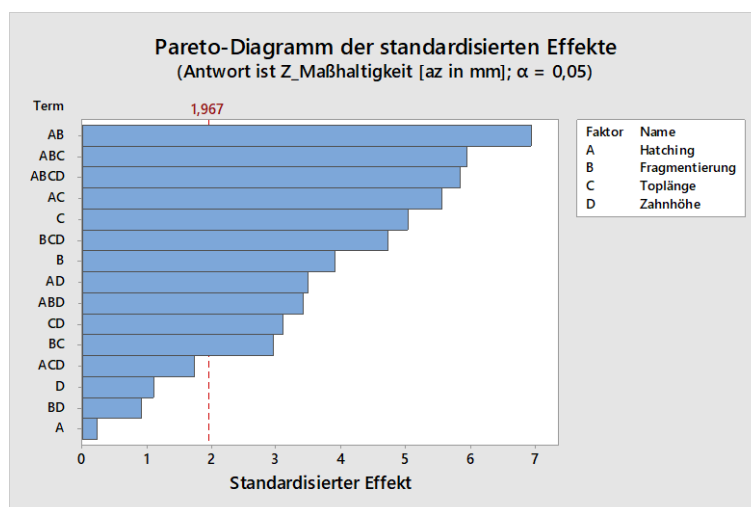


Bild 4-34: Pareto-Diagramm der Z-Maßhaltigkeit.

Die signifikanten Effekte sind auch in den Haupteffektdiagrammen in Bild 4-35 deutlich erkennbar. So führt eine Erhöhung der Fragmentierung von der mittleren Faktorstufe auf die höchste Faktorstufe zu einer Verschlechterung der Z-Maßhaltigkeit um etwa 10% von 1,15 mm auf 1,27 mm. Dies legt nahe, dass durch eine hohe Fragmentierung mehr Stützstrukturwände generiert werden, die für mehr Anhaftungen an der Downskinfläche sorgen und somit die Z-Maßhaltigkeit negativ beeinflussen.

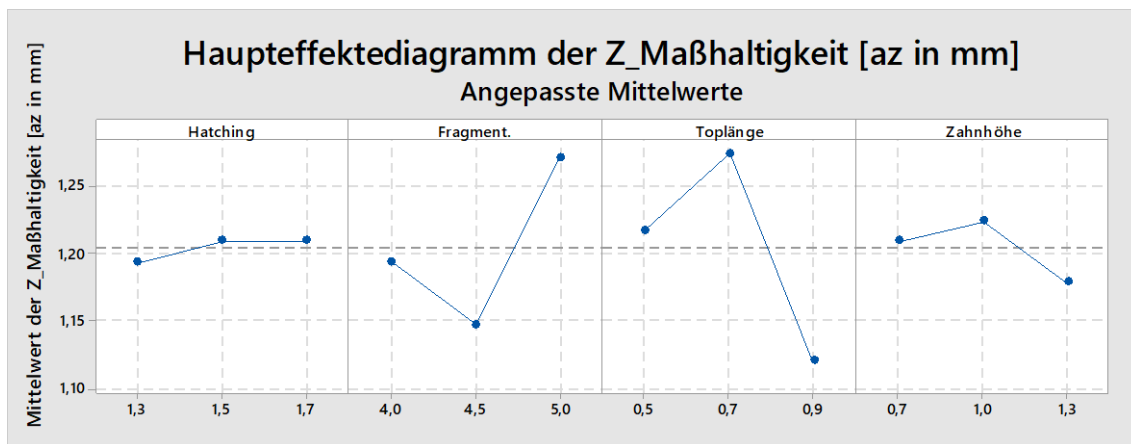


Bild 4-35: Haupteffektdiagramm der Faktoren für die Z-Maßhaltigkeit.

Der Einfluss der Toplänge lässt sich ebenfalls den Haupteffektdiagrammen entnehmen. So führt eine Erhöhung der Toplänge von der mittleren auf die obere Faktorstufe zu einer Verbesserung der Maßhaltigkeit um 15% von 1,3 mm auf 1,11 mm. Eine große Toplänge führt zu einer verbesserten Wärmeableitung durch eine breitere Zahngeometrie. Jedoch haben auch schmalere Zähne einen positiven Effekt. Dies kann durch die geringere Anhaftung begründet werden, die bei schmalen Zähnen auftritt. Daher ist eine Abwägung erforderlich, welchen positiven Effekt man nutzen möchte. Es ist jedoch festzuhalten, dass eine mittlere Faktorstufe nicht zu einer besseren Maßhaltigkeit führt und vermieden werden sollte.

Die Effekte der Faktoren A (Hatchabstand) und D (Zahnhöhe) sind in den Haupteffektdiagrammen, wie auch im Pareto-Diagramm bereits festgestellt wurde, nicht signifikant. Erst in Kombination mit anderen Faktoren treten signifikante Effekte auf. Diese sind den Wechselwirkungsdiagrammen in Bild 4-36 zu entnehmen. Es ist erkennbar, dass es bei einer kombinierten Erhöhung des Hatchabstands auf die mittlere Faktorstufe und einer Verringerung der Fragmentierung auf die niedrigste Faktorstufe, also bei der Zweifaktorwechselwirkung AB, zu einer deutlichen Verbesserung der Maßhaltigkeit um etwa 16% von 1,3 mm auf 1,1 mm kommt. Auch hier kann die Verringerung der Anzahl an Stützstrukturwänden bei gleichzeitiger ausreichender Wärmeableitung als Begründung für den positiven Effekt identifiziert werden.

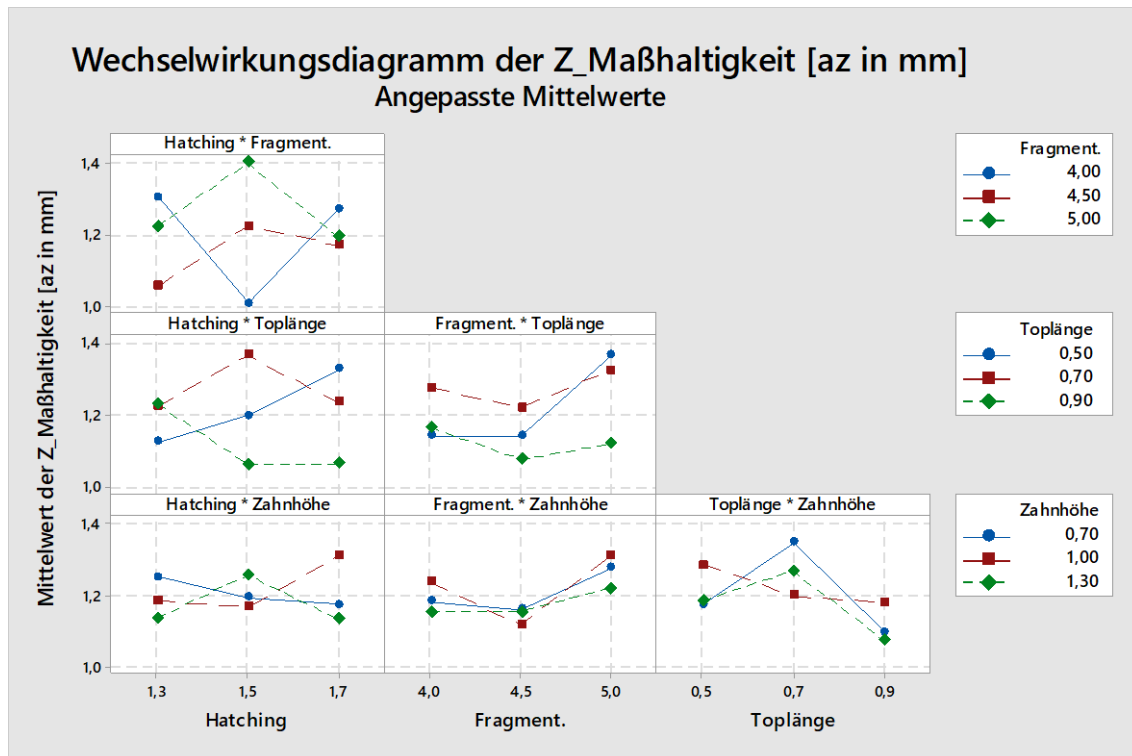


Bild 4-36: Wechselwirkungsdiagramm der Z-Maßhaltigkeit.

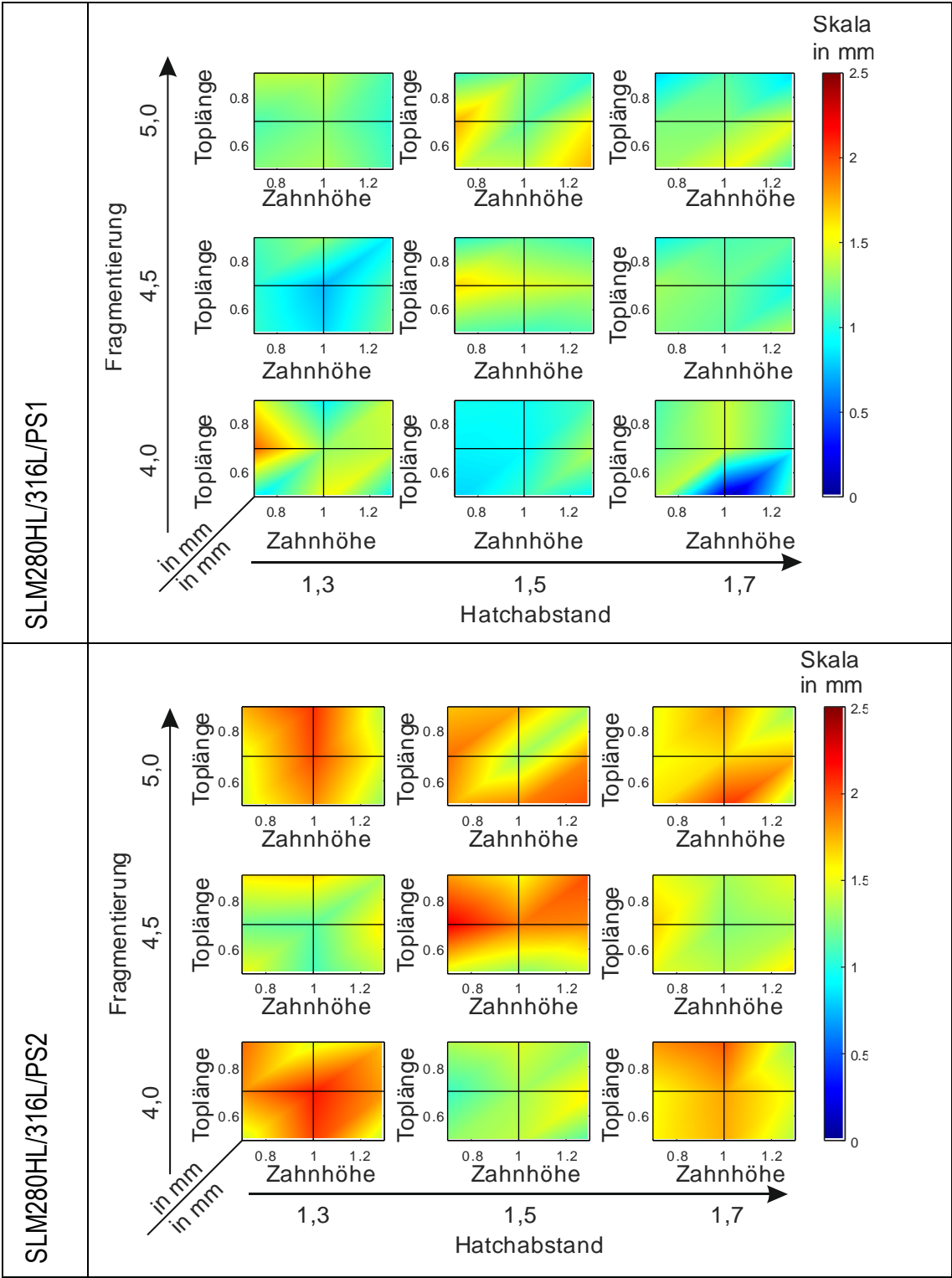
Eine kombinierte Verringerung der Zahnhöhe und eine Erhöhung des Hatchabstands, was der Zweifaktorwechselwirkung AD entspricht, führt ebenfalls zu einer Verbesserung der Maßhaltigkeit um ca. 8% von 1,3 mm auf 1,2 mm. Auch hier kann einerseits die Vergrößerung der Anbindungsfläche durch breitere, kürzere Zähne bei gleichzeitiger Reduktion der Anzahl der Stützstrukturwände als Erklärung herangezogen werden. Dadurch wird einerseits die Wärmeableitung verbessert und andererseits werden Anhaftungen an der Downskinfläche des Prüfkörpers verringert.

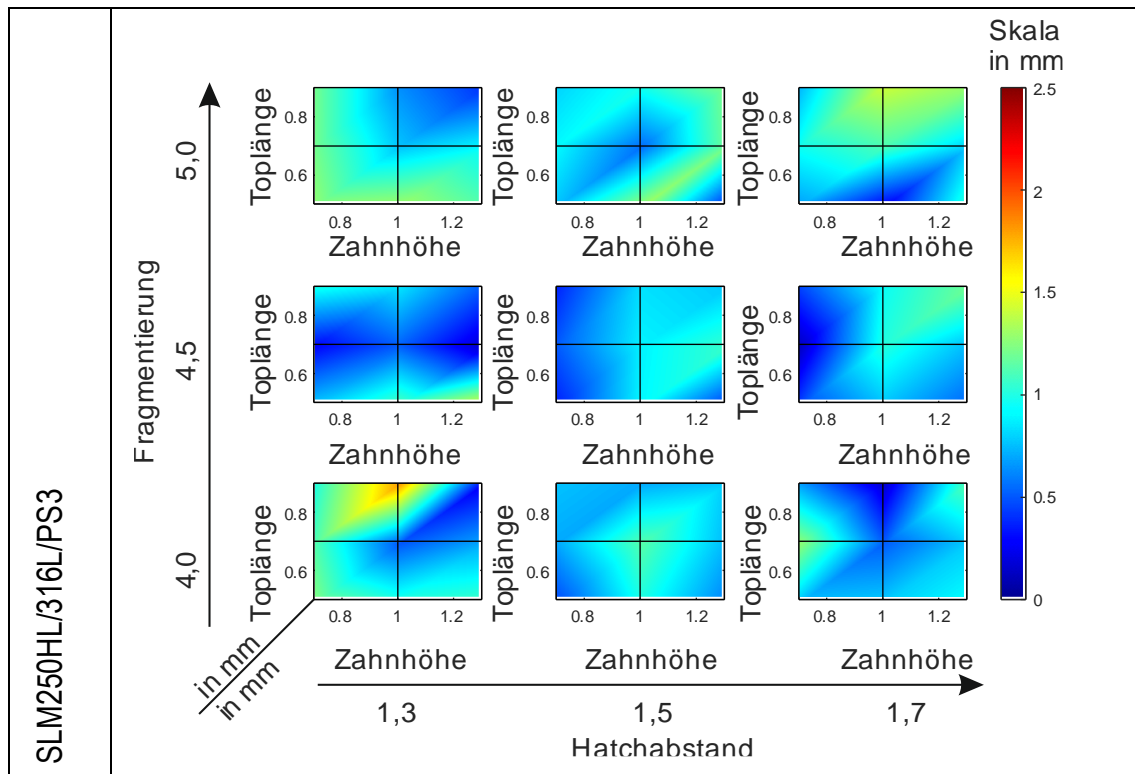
Auch die Faktorkombination AC, bestehend aus einem verringerten Hatchabstand in Kombination mit einer Verringerung der Toplänge, hat einen positiven Effekt auf die Maßhaltigkeit und kann zu einer Verbesserung von etwa 16%, von 1,3 mm auf 1,1 mm, führen. Auch hier kann als Erklärung ein Kompromiss zwischen geringerem Verzug durch eine gute Anbindung mittels mehr Stützstrukturwänden und der Reduktion von Anhaftungen durch eine Verringerung der Zahnhöhe herangezogen werden.

Die signifikanten Dreifaktor- und Vierfaktorwechselwirkungen, die im Pareto-Diagramm ersichtlich sind, können nicht direkt aus den Haupteffektdiagrammen und den Wechselwirkungsdiagrammen abgelesen werden. Es ist jedoch plausibel, dass die Kombinationen der signifikanten Faktoren ebenfalls einen positiven Effekt auf die Maßhaltigkeit haben können.

Die Beobachtungen, die aus den Diagrammen in Bild 4-34 bis Bild 4-36 abgeleitet wurden, sind auch in den Gesamtergebnisdarstellung in Tabelle 4-9 erkennbar.

Tabelle 4-9: Gesamtergebnisdarstellung der Maßhaltigkeit in Z-Richtung





So zeigt sich bei einer hohen Fragmentierung ein negativer Effekt auf die Maßhaltigkeit. Ebenso ist der positive Effekt einer geringen Toplänge insbesondere bei geringen Hatchabständen in Kombination mit einer mittleren Zahnhöhe erkennbar. Hingegen wirken sich mittlere Toplängen negativ auf die Maßhaltigkeit aus. Der positive Effekt eines großen Hatchabstands und einer geringen Fragmentierung wird insbesondere für den Prozessparametersatz PS1 deutlich, der für das Diagramm in der unteren rechten Ecke die besten Maßhaltigkeitswerte aufzeigt. Die Beobachtungen zur Wechselwirkung AD werden in den Gesamtergebnisdarstellungen nicht deutlich. So kann bei einer geringen Zahnhöhe und einem großen Hatchabstand kein deutlicher Effekt in den Gesamtergebnisdarstellungen erkannt werden.

Die Schlussfolgerungen aus den Diagrammen lassen sich auch an den Prüfkörpern beobachten. Es ist bei Wahl eines mittleren Hatchabstands (1,5 mm), einer mittleren Fragmentierung (4,5 mm) und eines hohen Wertes für die Toplänge (1,0 mm) bei einer hohen Zahnhöhe (1,3 mm) eine Verringerung der Anhaftungen auf der Prüfkörperunterseite zu beobachten. Es kann eine Anhaftung von 0,85 mm gemessen werden, während bei einer suboptimalen Parameterkombination mit einem geringen Hatchabstand (1,3 mm), einer geringen Fragmentierung (4,0 mm) und einer großen Toplänge (0,9 mm) mit Abweichungen in Z-Richtung von 1,1 mm zu rechnen ist. Dabei ist zu sagen, dass durchaus noch größere Anhaftungen und somit Abweichungen in Z-Richtung auftreten, die durch das verwendete optische Makroskop vom Typ Keyence VR3200 nicht mehr aufgenommen werden konnten und als schwarze Flecken im Höhenbild in Bild 4-37 dargestellt werden. Hier bietet es sich an die Messungen der Koordinatenmessmaschine zu betrachten, die für die suboptimale

Stützstrukturparameterkombination eine Abweichung in Z-Richtung von 1,488 mm ergab, während bei der optimierten Parameterkombination lediglich 0,915 mm gemessen wurden. Die Unterschiede der Ergebnisse ergeben sich aus der messtechnisch unvermeidbaren, unterschiedlichen Referenz, da das Makroskop lediglich die Unterseite des Prüfkörpers betrachtet während bei der Messung mittels Koordinatenmessmaschine, wie in Kapitel 4.4.1.2 beschrieben, der Referenzpunkt auf der Oberseite liegt und somit die tatsächliche Dicke des Prüfbereichs ermittelt wird und Einflüsse auf der Oberseite des Prüfkörpers ebenfalls berücksichtigt werden.

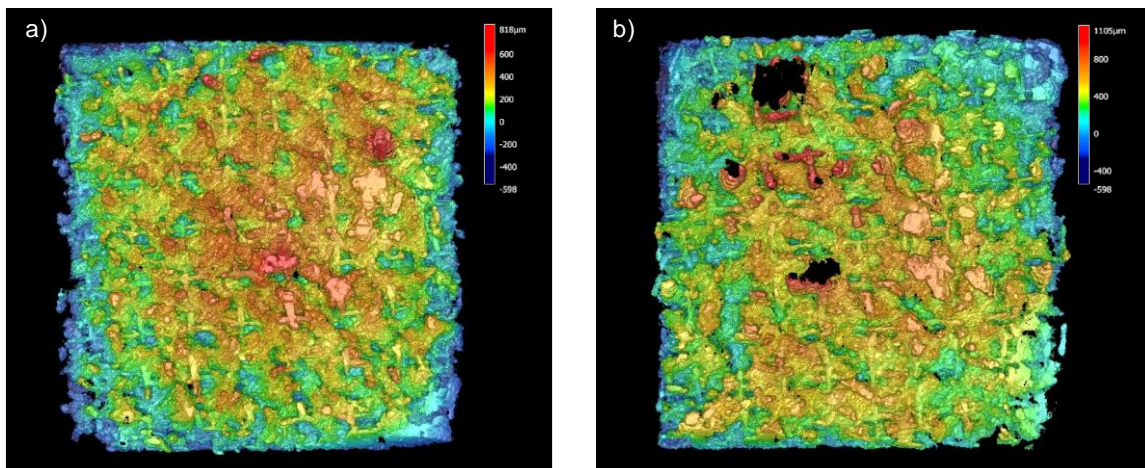


Bild 4-37: a) Geringere Anhaftungen bei optimierten Stützstrukturparametern b) massive Anhaftungen bei suboptimaler Stützstruktureauslegung am Beispiel des Parametersatzes PS2 an den Prüfkörpern PK1.1-65 und PK1.1-23.

Aus den Gesamtergebnisdarstellungen in Tabelle 4-9 geht hervor, dass auch die Prozessparametersätze einen Einfluss auf die Maßhaltigkeit haben. Das deckt sich mit Untersuchungen von LIENEKE, der unterschiedliche Maßabweichungen in Z-Richtung für verschiedene Parametersätze festgestellt hat [LLZ21a]. Es ist jedoch zu beachten, dass in den vorliegenden Diagrammen nur die Effekte durch die Stützstrukturparameter berücksichtigt werden. Daher sind die Diagramme spezifisch für jeden Prozessparametersatz gültig und stellen die Auswirkungen der Stützstrukturparameter für den jeweiligen Prozessparametersatz dar.

Es ist von Bedeutung, dass die Wechselwirkungseffekte im Zusammenhang mit Dreifaktor- und Vierfaktorwechselwirkungen angemessen berücksichtigt werden. Daher bieten die Gesamtergebnisdarstellungen (Tabelle 4-9) die beste Möglichkeit, Stützstrukturparameterkombinationen anhand der Diagramme auszuwählen. Um eine Reproduzierbarkeit der Messungen zu gewährleisten, wurden die Maßabweichungen mit einem standardisierten Messprogramm mittels einer Koordinatenmessmaschine erfasst. Durch die Blockbildung und die Randomisierung im Versuchsplan wurden Störeinflüsse auf ein Minimum reduziert. Zusätzlich wurden andere potenzielle Einflussfaktoren wie Materialeigenschaften oder die

Prüfkörpergeometrie konstant gehalten, um den Effekt der Stützstrukturen isoliert bestimmen zu können.

Fazit: Vor allem die Kombination aus einem großen Hatchabstand und einer geringen Fragmentierung hat einen signifikanten Effekt auf die Maßhaltigkeit in Z-Richtung. Höherwertige Wechselwirkungen haben ebenfalls einen großen Einfluss auf die Maßhaltigkeit, lassen sich aber nicht aus den Effektdiagrammen und den Gesamtergebnisdarstellungen erkennen. Daher werden in Kapitel 6.5 vorrangig Konstruktionsrichtlinien für die am stärksten wirkenden Wechselwirkungseffekt AB und AC aufgestellt, um einen Kompromiss zwischen geringem Verzug und geringer Anzahl von Stützenresten abzubilden.

4.4.2.3 Auswertung der Form- und Maßhaltigkeit in der XY-Ebene

Aus dem Pareto-Diagramm in Bild 4-38 lässt sich ablesen, dass der Faktor A (Hatchabstand) in Kombination mit dem Faktor C (Toplänge) einen signifikanten Effekt auf die Maßhaltigkeit in XY-Richtung hat. Den nächstgrößten Effekt hat der Faktor D (Zahnhöhe). Dieser erreicht allerdings nicht den Grenzwert, um als signifikant eingestuft zu werden. Weitere Effekte anderer Faktoren scheinen ebenfalls nicht signifikant zu sein.

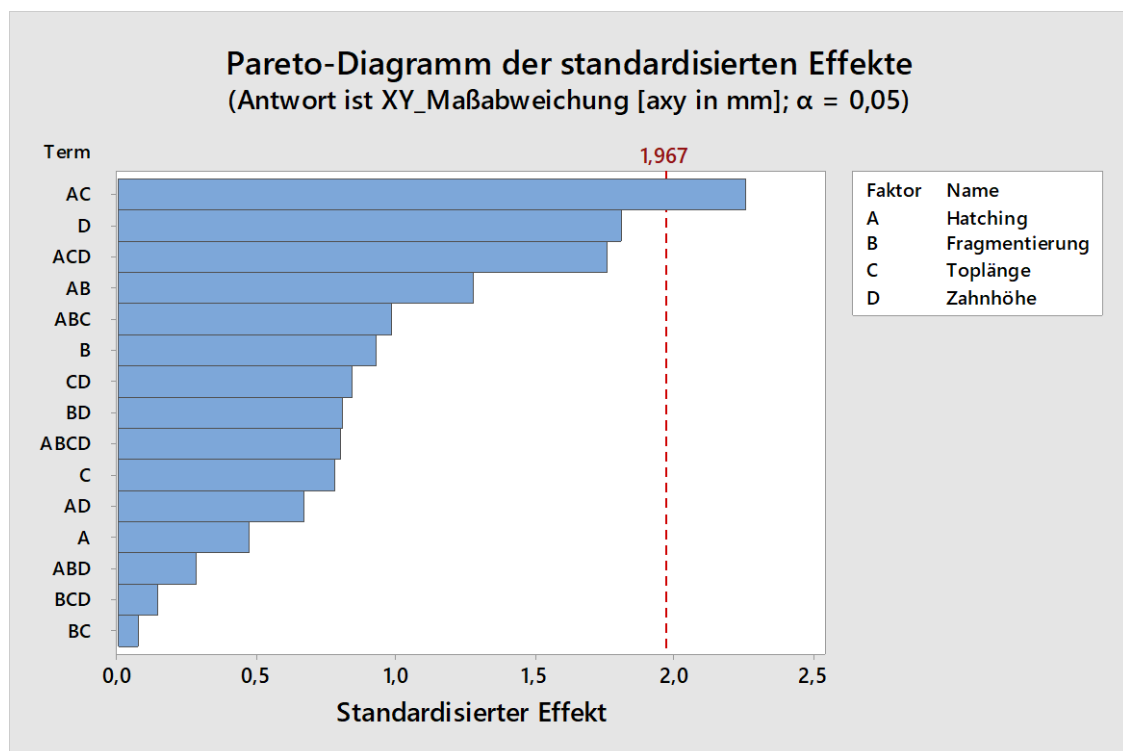


Bild 4-38: Pareto-Diagramm der XY-Maßhaltigkeit.

Basierend auf den Haupteffektdiagrammen in Bild 5-24 ist ersichtlich, dass ein großer Hatchabstand mit geringeren Maßabweichungen einhergeht. Auch eine Verringerung der Toplänge und der Zahnhöhe tendiert dazu, geringere Maßabweichungen zu verursachen.

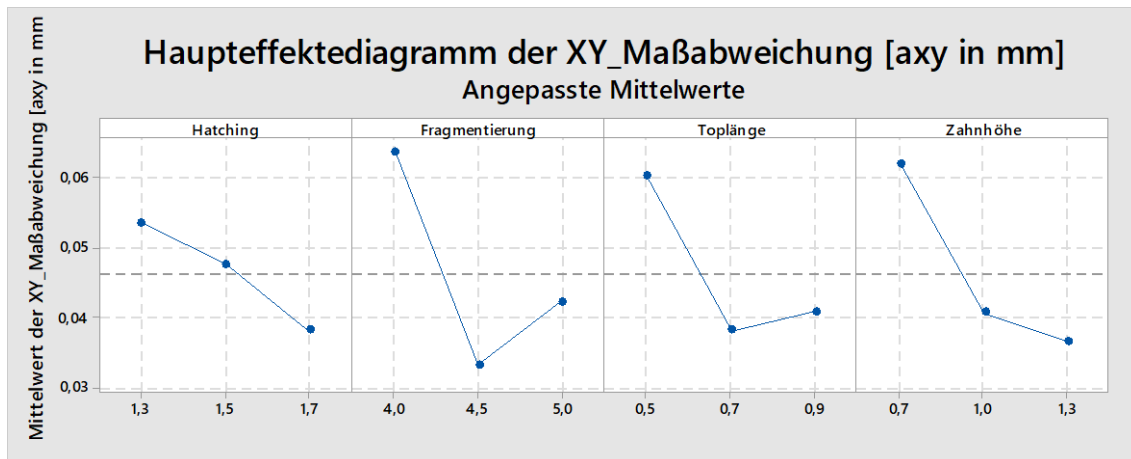


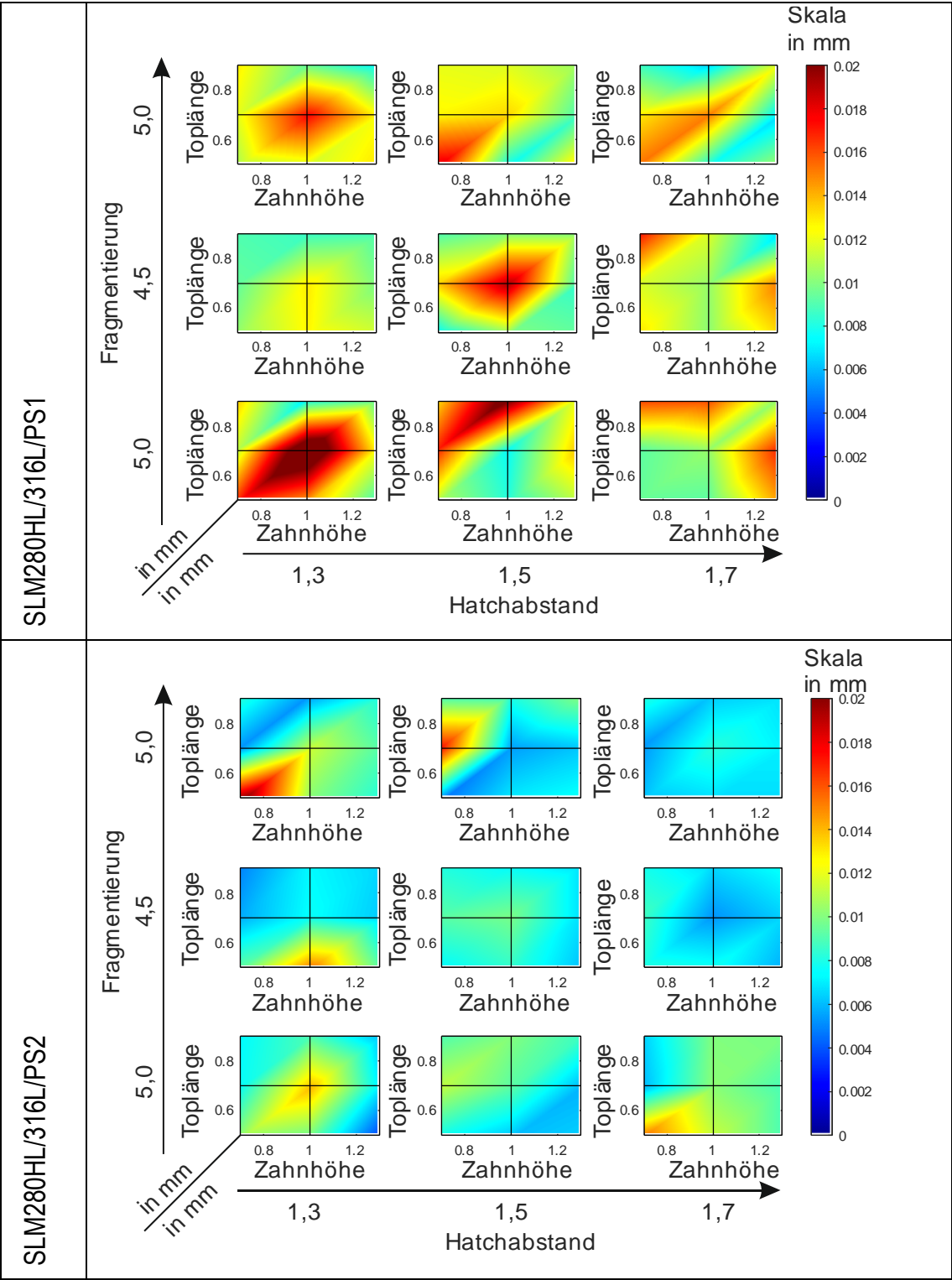
Bild 4-39: Haupteffektdiagramm der Faktoren für die XY-Maßhaltigkeit.

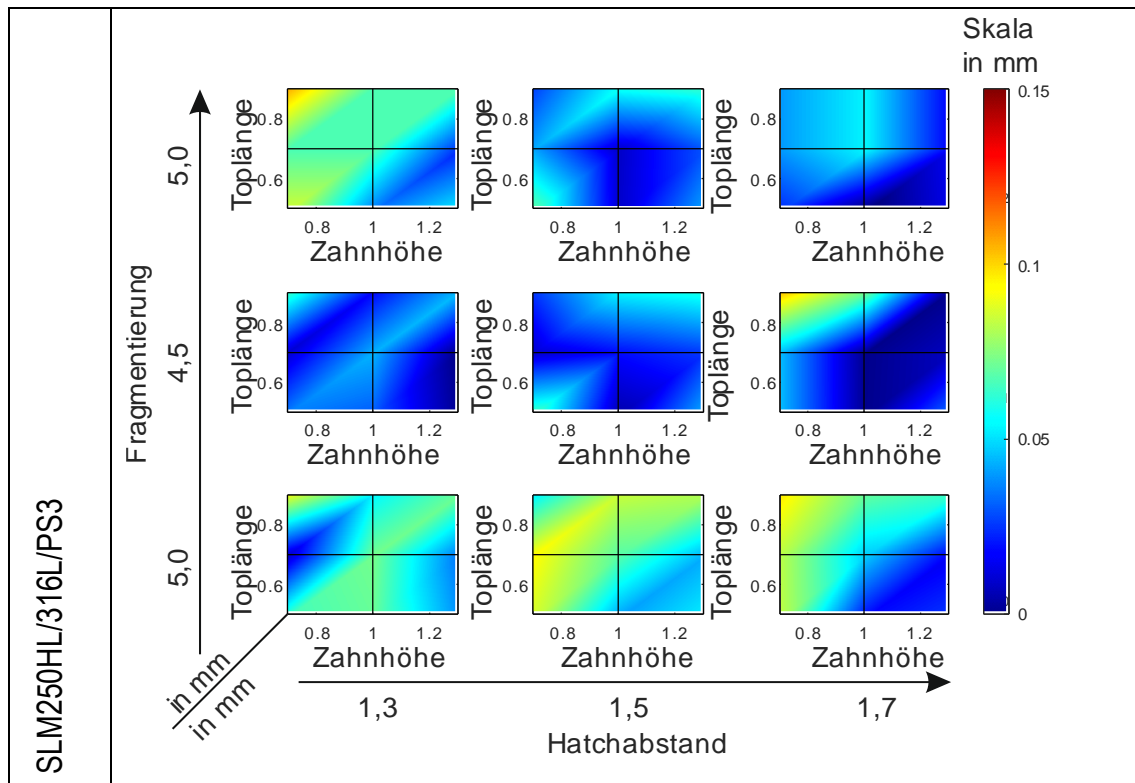
Der signifikante Effekt der Kombination aus Toplänge und Hatchabstand (AC), der im Pareto-Diagramm beobachtet wurde, lässt sich auch im Wechselwirkungsdiagramm in Bild 4-40 erkennen. Dort ist zu sehen, dass sich eine größere Toplänge von 0,9 mm in Kombination mit einem großen Hatchabstand von 1,7 mm positiv auf die Maßabweichung auswirkt und eine Verbesserung der Maßhaltigkeit von etwa 50% von 0,06 mm auf 0,03 mm bewirkt. Dies ist auf eine verbesserte Wärmeableitung durch die breiteren Zähne zurückzuführen. Der positive Effekt eines größeren Hatchabstands lässt sich allerdings nicht eindeutig erklären. Möglicherweise spielt hier ein erhöhter Wärmeeintrag durch die Verringerung der Stützstrukturwände eine Rolle, der zu einer mikrostrukturellen Veränderung im Gefüge führt.

Der erhöhte Wärmeeintrag kann also als eine Art Härtung im Kontaktbereich angesehen werden und somit einen besseren Widerstand gegen Verformung ermöglichen. Die Beobachtungen aus den Haupteffekten der Einzelfaktoren spiegeln sich auch in den Gesamtergebnisdarstellungen in Tabelle 4-10 wider. So ist erkennbar, dass Bereiche mit einem großen Hatchabstand und einer großen Toplänge tendenziell geringere Maßabweichungen aufweisen. Dies entspricht den rechten Spalten der Gesamtergebnisdarstellungen für alle drei Prozessparametersätze PS1, PS2 und PS3.

Exemplarisch lässt sich das Potential der Verbesserung der XY-Maßhaltigkeit anhand von zwei Prüfkörpern verdeutlichen, die konträre Stützstrukturparameter aufweisen und den Extremfällen (worst- und best-case) entsprechen. Ein Prüfkörper mit einem großen Hatchabstand von 1,7 mm, einer großen Toplänge von 0,9 mm und einer großen Zahnhöhe von 1,3 mm, weist eine XY-Abweichung von 0,0068 mm.

Tabelle 4-10: Gesamtergebnisdarstellung der Maßhaltigkeit in der XY-Ebene.





Im Gegensatz dazu weist ein Prüfkörper mit einem kleinen Hatchabstand von 1,3 mm, einer kleinen Toplänge von 0,5 mm und einer kleinen Zahnhöhe von 0,7 mm eine fast dreimal so große XY-Maßabweichung von 0,02 mm auf. Die Fragmentierung und die Zahnhöhe ist bei beiden Varianten identisch auf 4,5 mm gehalten und die Prozessparameter entsprechen dem Parametersatz PS2. Das Beispiel verdeutlicht, dass die betrachteten Effekte der Faktoren aus den Diagrammen in Bild 4-38 bis Bild 4-40 tatsächlich auftreten. Betrachtet man die gleichen Prüfkörper für den Prozessparametersatz PS1 ergibt sich ein ähnliches Bild. Hier kann die Maßabweichung durch die Optimierung der Stützstrukturparameter von 0,017 mm auf 0,008 mm verbessert werden. Für den Prozessparametersatz PS3 konnte sogar eine Reduktion der Maßabweichung von 0,106 mm auf 0,0158 mm bei den betrachteten Prüfkörpern erreicht werden.

Durch die Automatisierung der Messungen mittels Koordinatenmessmaschine wurde hier der Faktor Mensch im Messvorgang weitestgehend als Fehlerquelle ausgeschlossen. Allerdings ist auch die Probenvorbereitung und Einspannung zu betrachten. Eine Schulung der Nutzer ist deshalb nötig. Durch die Blockbildung und Randomisierung der Versuche können ungewollte Blockeffekte und die Verzerrung durch Störfaktoren minimiert werden. So sind unterschiedliche Randbedingungen und nutzereingebrachte Effekte minimier- und erkennbar.

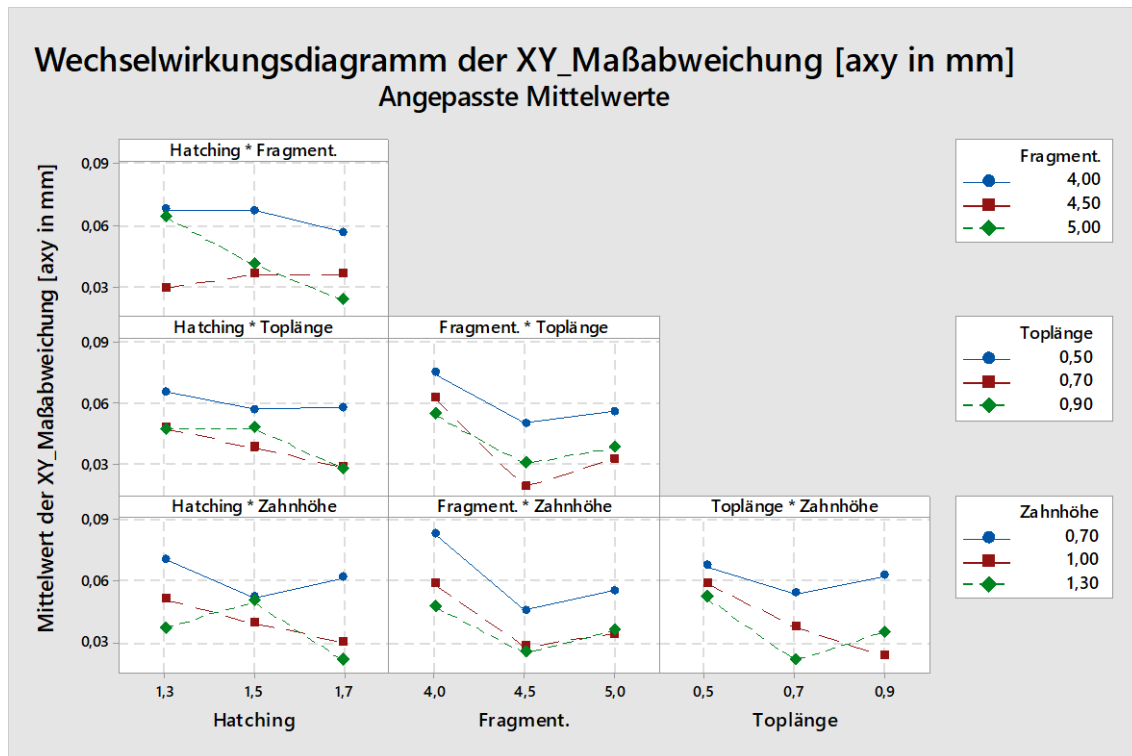


Bild 4-40: Wechselwirkungsdiagramm der XY-Maßhaltigkeit.

Fazit: Die Maßabweichungen in XY-Richtung sind überaus gering und weisen bei allen Prozessparametersätzen einen Wert zwischen 0 und 0,15 mm auf. Die besten Resultate können durch eine Erhöhung des Hatchabstands in Kombination mit einer gleichzeitigen Vergrößerung der Toplänge erzielt werden. Diese Beobachtung wird in der Konstruktionsrichtlinie in Kapitel 5.6 ausführlich dokumentiert.

4.4.2.4 Auswertung der Ablösbarkeit

Aus dem Pareto-Diagramm für die Ablösbarkeit in Bild 4-41 lässt sich ablesen, dass die Wechselwirkung aus den Faktoren A (Hatchabstand) und B (Fragmentierung) einen signifikanten Effekt auf die Ablösbarkeit bei einem Vertrauensniveau von 95% hat. Der Faktor C weist auch allein betrachtet einen signifikanten Effekt auf. Dies gilt ebenso wie für die Kombination aus den Faktoren A (Hatching) und C (Toplänge)

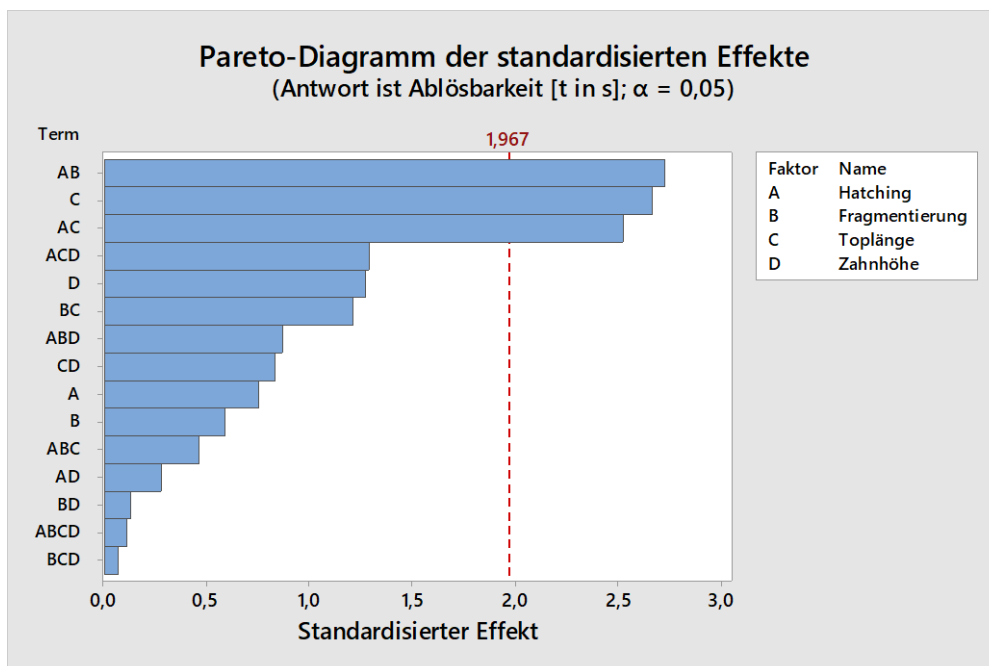


Bild 4-41: Pareto-Diagramm der Ablösbarkeit.

Aus den Haupteffektdiagrammen in Bild 4-42 ist erkennbar, dass bei einem großen Hatchabstand oder einer großen Fragmentierung mit einer Reduktion der Ablösezeit um ca. 2s zu rechnen ist. Dies lässt sich mit der Verringerung der Kontaktfläche zwischen Stützstruktur und Bauteil erklären, die bei einem großen Hatchabstand reduziert wird. Gleichzeitig wird durch eine große Fragmentierung die Wärmeabfuhr verbessert, was dazu führt, dass im Anbindungsbereich keine Aufhärtung im Kontaktbereich zwischen Bauteil und Stützstrukturen entsteht.

Die Wechselwirkung zwischen Hatchabstand und Fragmentierung wird auch in den Wechselwirkungsdiagrammen in Bild 4-43 deutlich. So führt eine gleichzeitige Erhöhung der beiden Faktoren zu einer Verringerung der Ablösezeit um bis zu 5s.

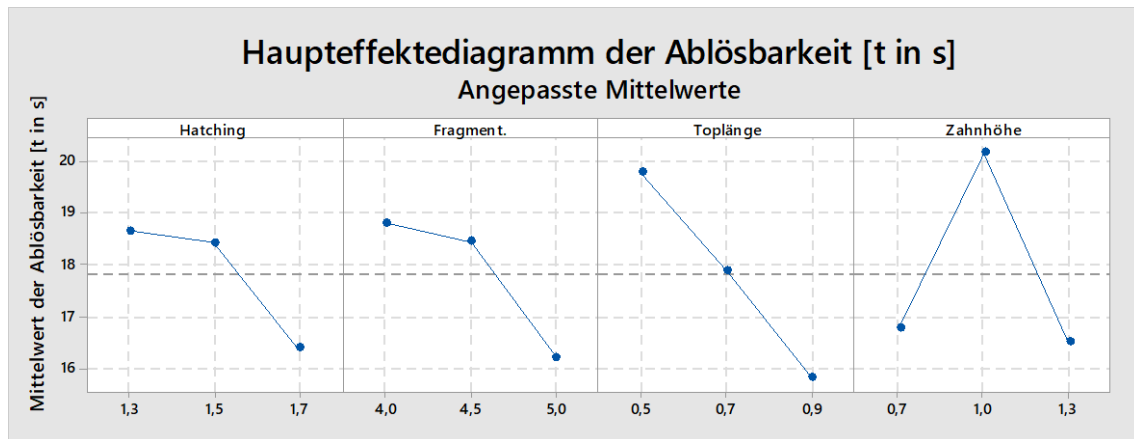


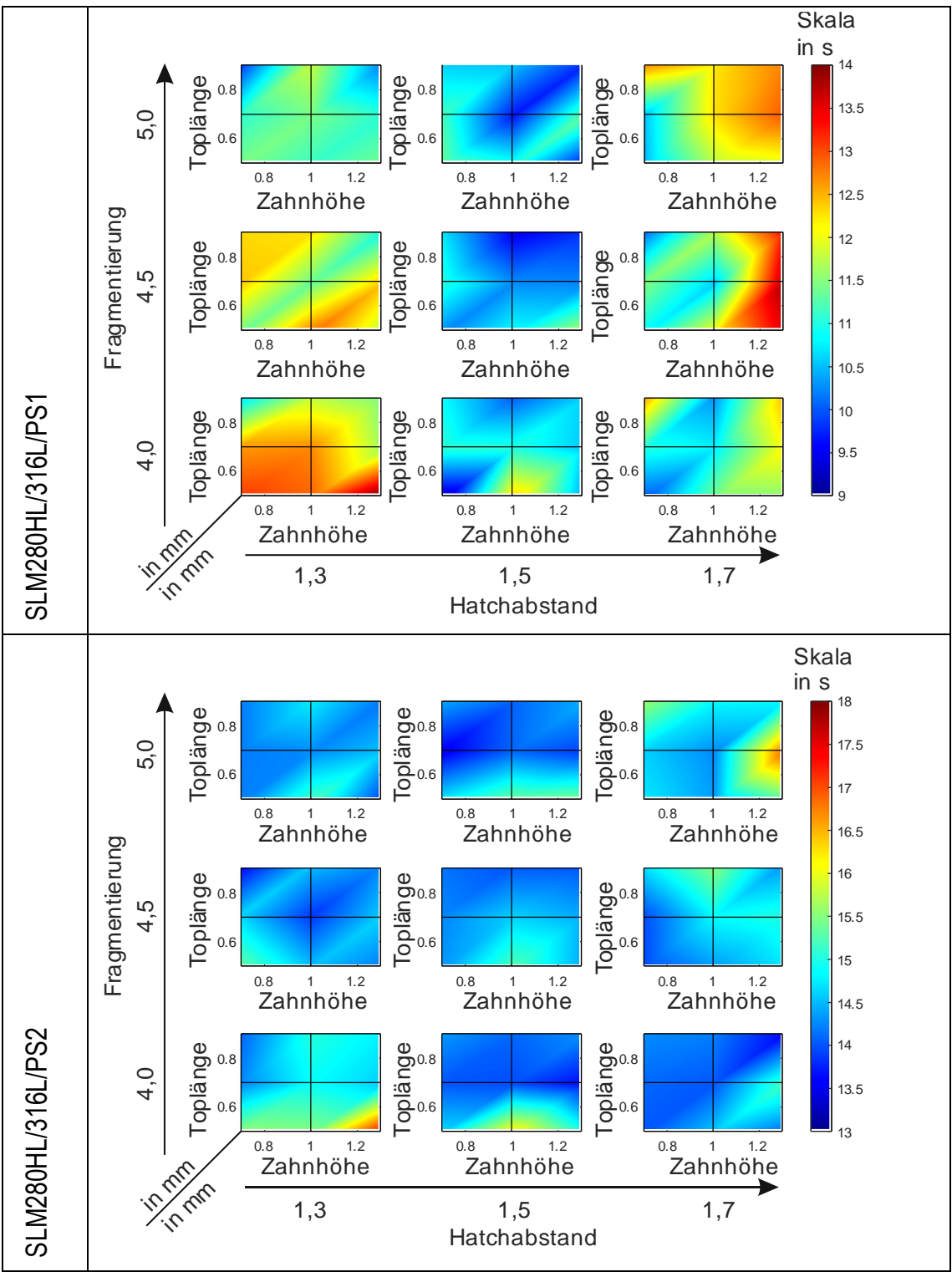
Bild 4-42: Haupteffektdiagramm der Faktoren für die Ablösbarkeit.

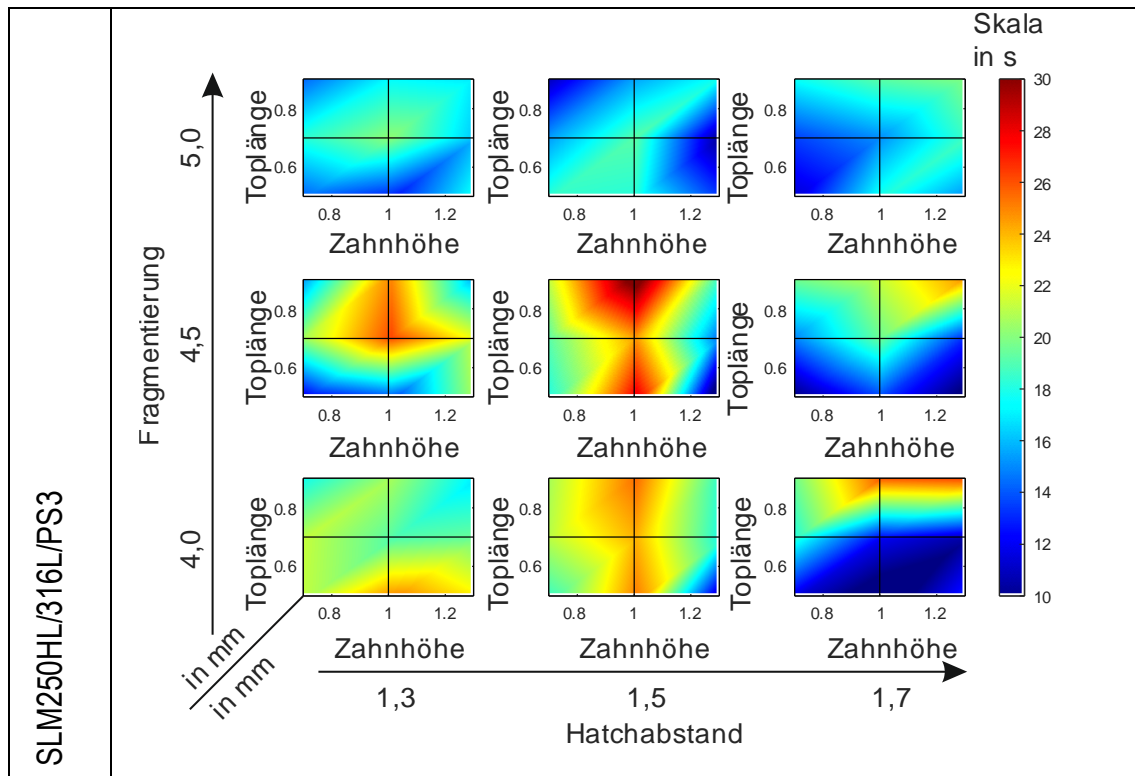
Das Haupteffektdiagramm der Toplänge (s. Bild 4-42) lässt statistisch darauf schließen, dass eine Erhöhung der Toplänge wider Erwarten zu einer Verbesserung der Ablösezeit führt. Dies widerspricht der Begründung, dass geringere Anbindungsflächen zu einer besseren Entfernbarkeit führen, lässt sich aber über die Mikrostruktur im Kontaktbereich zwischen Stützstruktur und Bauteil erklären. Durch die Wärmeabfuhr im Bereich der Zahnspitzen wirkt diese bei geringen Toplängen als eine Art Wärmebehandlung und sorgt dafür, dass die Zähne besser an dem Bauteil anhaften bzw. das mikrostrukturelle Gefüge über die Grenze zwischen Stützstruktur und Bauteil hinauswächst. Dieser als „columnar grain growth“ bekannte Effekt wurde bereits von Yang beobachtet [YYK+21]. Um dies zu umgehen, sind größere Toplängen vorteilhafter, um die Ablösezeit zu reduzieren.

Die Wirkung des Hatchabstands und der Toplänge als dritter signifikanter Effekt lässt sich als Kombination der zuvor beschriebenen Einzeleffekte beschreiben und ist auch im Wechselwirkungsdiagramm zu erkennen. So führt eine zeitgleiche Erhöhung der beiden Faktoren zu einer Reduktion der Ablösezeit.

Die Effekte der Faktoren, wie sie aus den statistischen Grundlagen abgeleitet werden können, lassen sich auch in den Gesamtergebnisdarstellungen der drei betrachteten Prozessparametersätzen (PS1, PS2, PS3) in Tabelle 4-11 wiederfinden. Es ist deutlich erkennbar, dass die Diagramme in der ersten Zeile und der letzten Spalte, die hohe Hatchabstände und Fragmentierungen repräsentieren, tendenziell geringere Ablösezeiten aufweisen. Dies bestätigt die Beobachtungen zum Effekt der Wechselwirkung AB, wie bereits zuvor festgestellt. Insbesondere bei den Prozessparametersätzen PS2 und PS3 wird deutlich, dass die Ablösezeiten im Zusammenhang mit den betrachteten Faktoren (AB) stehen. PS1 weist hingegen in der rechten Spalte ein abweichendes Verhalten auf mit tendenziell schlechteren Ablösezeiten. Bei einem Vergleich aller drei Prozessparametersätze wird deutlich, dass die Ablösezeiten für den Parametersatz PS1 deutlich geringer sind.

Tabelle 4-11: Gesamtergebnisdiagramm der Ablösbarkeit





Der signifikante Effekt des Faktors C, wie er dem Pareto-Diagramm in Bild 4-41 entnehmbar ist, lässt sich auch in den Gesamtergebnisdarstellungen nachvollziehen. Es zeigt sich, dass eine größere Topplänge mit einer besseren Ablösbarkeit einhergeht. Allerdings ist zu beachten, dass dieser Zusammenhang nicht in allen Diagrammen eindeutig erkennbar ist. Es gibt Bereiche, in denen eine große Topplänge zu steigenden Ablösezeiten führt.

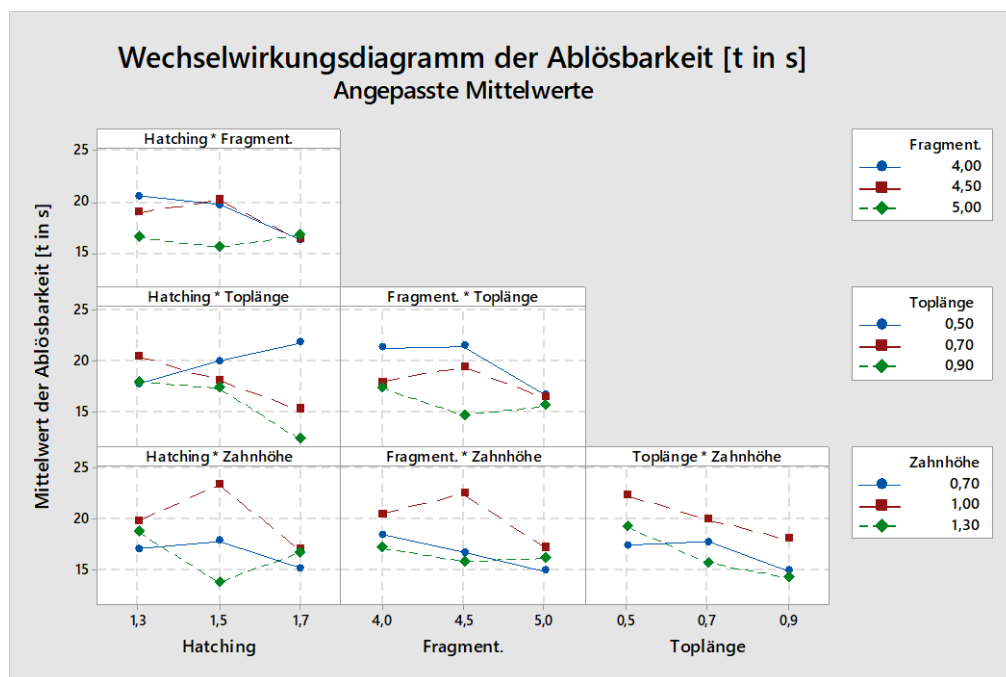


Bild 4-43: Wechselwirkungsdiagramm der Ablösbarkeit.

Der letzte identifizierte, signifikante Effekt aus der Wechselwirkung zwischen dem Hatchabstand und der Topplänge (AC) ist nicht eindeutig aus den Gesamtergebnisdarstellungen zu entnehmen. Aus den Effektdiagrammen kann allerdings abgelesen werden, dass bei großen Topplängen und großen Hatchabständen mit längeren Ablösezeiten zu rechnen ist.

Beispielhaft lässt sich das Potential der Verbesserung der Ablösbarkeit verdeutlichen, indem Prüfkörper betrachtet werden, die konträre Stützstrukturparameter aufweisen und sich an den zuvor beschriebenen Beobachtungen orientieren. So weisen die Prüfkörper, die einen großen Hatchabstand von 1,7 mm, eine große Fragmentierung von 5,0 mm und eine große Topplänge von 0,9 mm besitzen um 7s kürzere Ablösezeiten auf als die Prüfkörper, welche einen geringen Hatchabstand von 1,3 mm, eine geringe Fragmentierung von 4 mm und eine geringe Topplänge von 0,5 mm aufweisen. Alle anderen Faktoren wurden konstant gehalten.

Fazit: Es ist erkennbar, dass große Hatchabstände, Fragmentierungen und Topplängen einen positiven Einfluss auf die Stützstrukturablösbarkeit haben und die Ablösezeiten verkürzen können. Faktoren wie die Routine der Person, die die Messungen durchführt oder Schwankungen bei der Zeitnahme durch abweichende Ablöseprozessdurchführungen können die Ergebnisse verfälschen. Deshalb sind die Nutzer entsprechend zu schulen, um einer Verfälschung der Ergebnisse entgegenzuwirken. Kleinere Störeinflüsse können durch die Blockbildung und die Randomisierung der Versuche herausgefiltert werden. Die Ergebnisse sind in den Kapiteln 5.7 bis 5.8 aufgeführten Konstruktionsrichtlinien aufbereitet.

4.4.2.5 Auswertung der Oberflächenrauheit

Aus dem Pareto-Diagramm für die Oberflächenrauheit in Bild 4-44 lässt sich ableiten, dass die Faktoren A (Hatchabstand), B (Fragmentierung), C (Toplänge) und D (Zahnhöhe) einen signifikanten Effekt auf die Oberflächenrauheit aufweisen, mit einem Vertrauensniveau von 95%. Darüber hinaus scheint auch die Wechselwirkung zwischen den Faktoren A und B einen signifikanten Effekt zu haben.

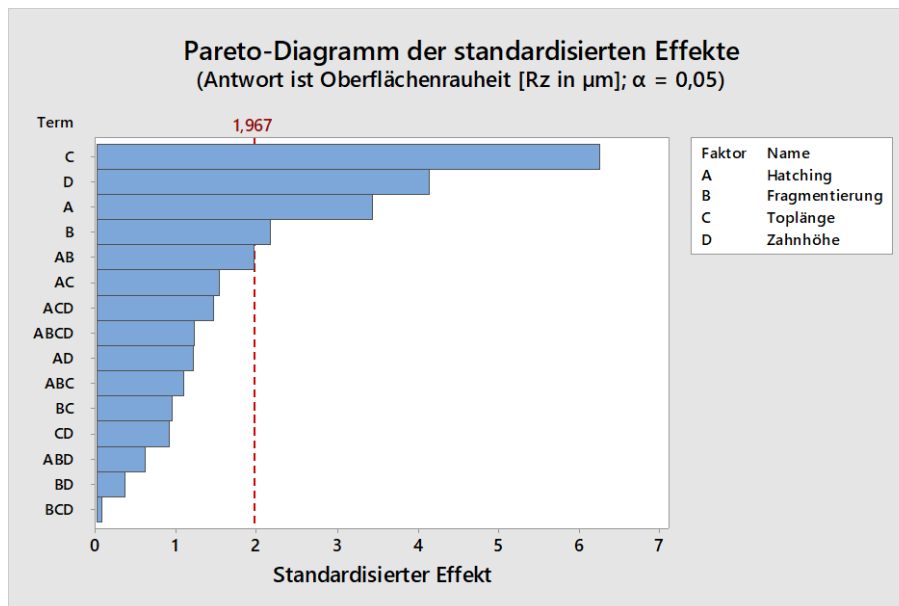


Bild 4-44: Pareto-Diagramm der Oberflächenrauheit.

Aus den Haupteffektdiagrammen in Bild 4-45 lassen sich die Auswirkungen der Faktoren auf die Oberflächenrauheit ablesen. In den Haupteffektdiagrammen für den Hatchabstand wird deutlich, dass mit einer Erhöhung des Hatchabstands eine Reduktion der Oberflächenrauheit einhergeht. Dieser Zusammenhang ist schlüssig, da ein größerer Hatchabstand weniger Stützstrukturwände generiert und somit weniger Rückstände nach der Entfernung der Stützstrukturen am Bauteil verbleiben, die die Oberflächenrauheit beeinträchtigen würden.

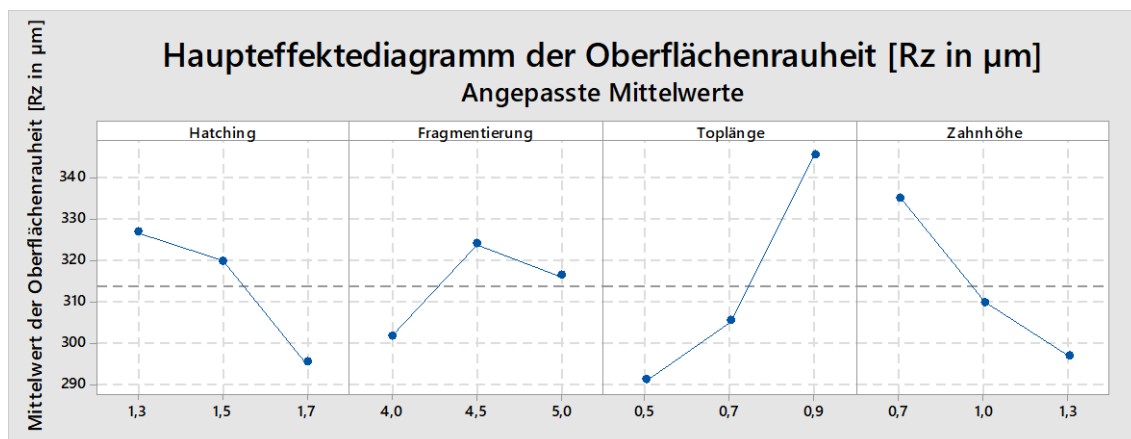


Bild 4-45: Haupteffektdiagramm der Faktoren für die Oberflächenrauheit.

Für die Fragmentierung ist aus den Haupteffektdiagrammen kein eindeutiges Verhalten ersichtlich. Hier gilt es die Wechselwirkungsdiagramme in Bild 4-46 und den Effekt der Kombination aus Hatchabstand und Fragmentierung zu betrachten. Dabei wird deutlich, dass mit steigendem Hatchabstand und gleichzeitiger Erhöhung der Fragmentierung geringere Oberflächenrauheiten erzielt werden können. Auch hier kann die Reduktion der Stützstrukturwände als Erklärung für den positiven Effekt auf die Oberflächenrauheit angesehen werden.

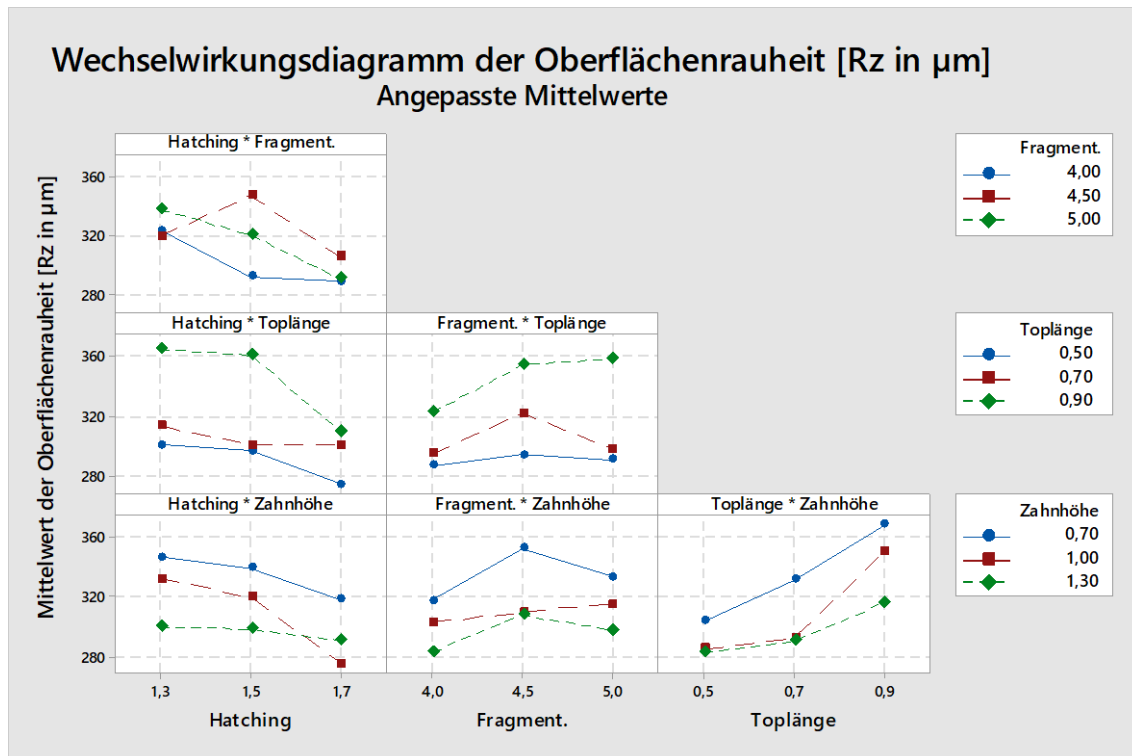
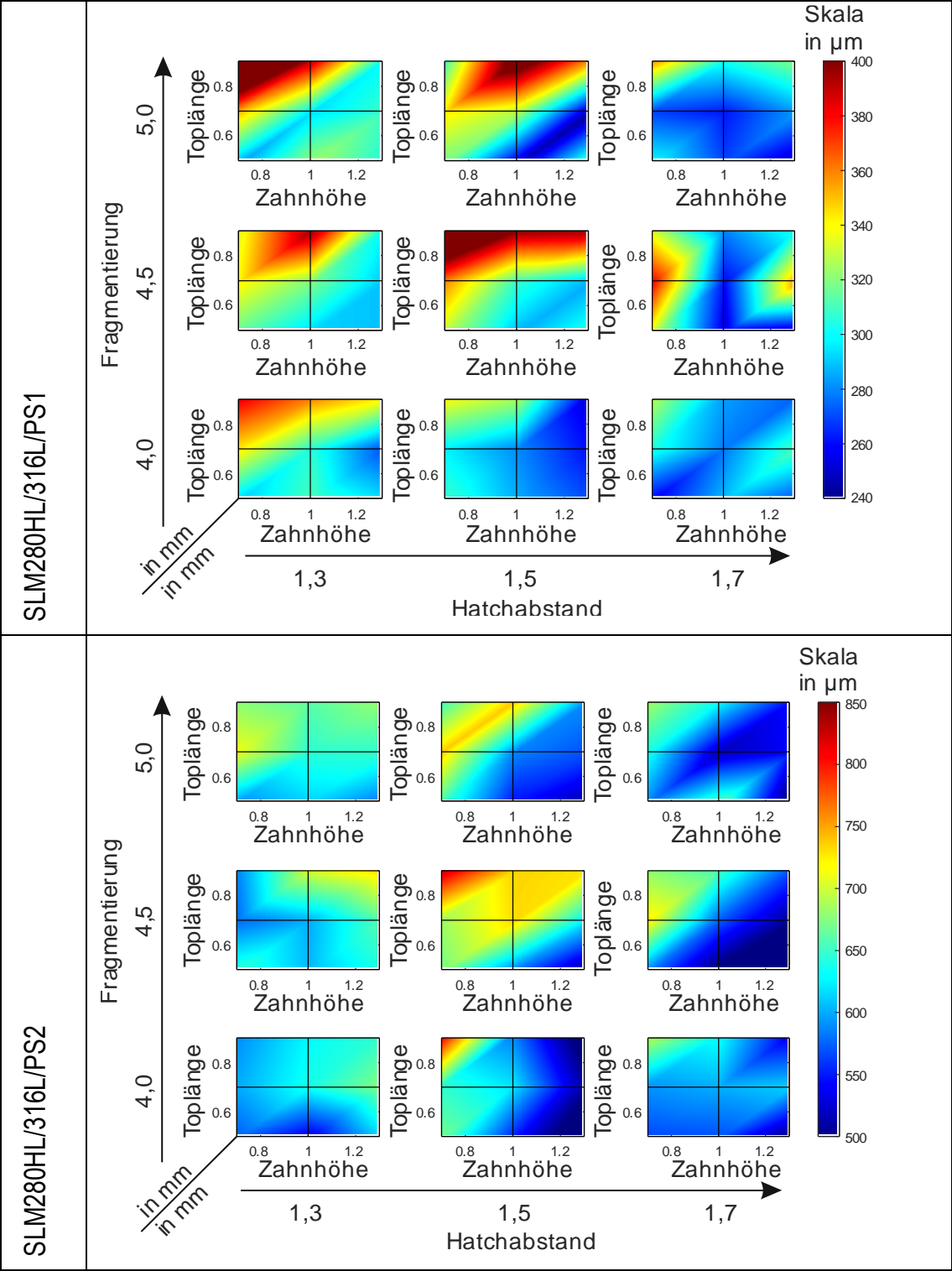


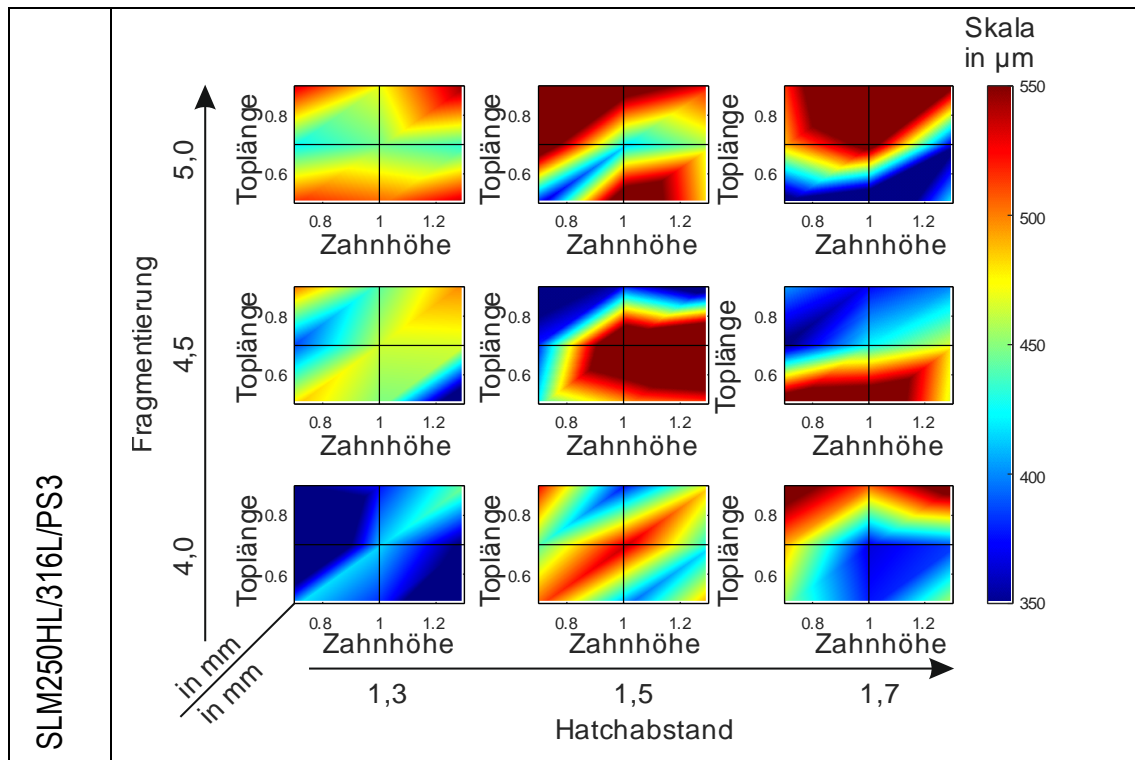
Bild 4-46: Wechselwirkungsdiagramm der Oberflächenrauheit.

Der Einfluss der Toplänge auf die Oberflächenrauheit lässt sich eindeutig anhand der Haupteffektdiagramme erkennen. Eine Zunahme der Toplänge führt zu einer deutlichen Erhöhung der Oberflächenrauheit um bis zu 15 %. Ebenso hat die Zahnhöhe einen signifikanten Einfluss auf die Oberfläche. Gemäß dem Haupteffektdiagramm ist bei steigender Zahnhöhe eine Verringerung der Oberflächenrauheit um ca. 12% zu beobachten. Diese Ergebnisse stimmen mit dem Pareto-Diagramm überein, in dem die Toplänge und die Zahnhöhe als die bedeutendsten Faktoren für die Oberflächenrauheit identifiziert werden. Dies lässt sich durch die feinere Zahngeometrie erklären, die aus geringer Toplänge und hoher Zahnhöhe resultiert. Schmale, lange Zähne hinterlassen weniger Stützstrukturreste auf der Oberfläche, was zu einer verbesserten Oberflächenrauheit führt.

Die Auswirkungen der signifikanten Effekte lassen sich ebenfalls in den Gesamtergebnisdarstellungen für die drei betrachteten Prozessparametervarianten PS1, PS2 und PS3 in Tabelle 4-12 nachvollziehen.

Tabelle 4-12: Gesamtergebnisdarstellung der Oberflächenrauheit





Insbesondere bei den Parametersätzen PS1 und PS2 wird deutlich, dass größere Hatchabstände zu geringeren Oberflächenrauheiten führen können. Auch der Effekt durch die zahngeometriebestimmenden Faktoren Topplänge und Zahnhöhe wird in den Gesamtergebnisdarstellungen deutlich. Es ist erkennbar, dass bei größeren Zahnhöhen und niedrigeren Topplängen geringere Oberflächenrauheitswerte erreicht werden können. Der Effekt der Fragmentierung wird in den Gesamtergebnisdarstellungen deutlicher als in den Effektdiagrammen in Bild 4-44 und Bild 4-46. Darüber hinaus zeigen die Gesamtergebnisdarstellungen Unterschiede zwischen den betrachteten Maschinen auf. Es ist ersichtlich, dass die beobachteten Auswirkungen auf die Oberflächenrauheit insbesondere bei der SLM 280HL auftraten (Prozessparametersätze PS1, PS2). In dem Diagramm für die SLM 250HL (PS3) sind die Effekte weniger deutlich erkennbar. Die erzielbaren Rauheitswerte bei unterschiedlichen Faktorstufenkombinationen liegen zwischen einem R_z von $240\mu\text{m}$ bis $850\mu\text{m}$. Dabei wird deutlich, dass auch prozessparameterabhängige Effekte erkennbar sind. So lassen sich mit dem Parametersatz PS1 deutlich bessere Oberflächenrauheiten als mit dem Parametersatz PS2 erreichen.

Durch den Vergleich von Prüfkörpern mit vorteilhaften Stützstrukturparametern für die Oberflächenrauheit, nämlich einem großen Hatchabstand, einer hohen Fragmentierung, einer geringen Topplänge und einer großen Zahnhöhe, mit Prüfkörpern, die entgegengesetzte Attribute aufweisen, wird deutlich, dass eine Verbesserung der Oberflächenrauheit um bis zu 35,6% erzielt werden kann. Im Falle des Prozessparametersatzes PS1 ist somit eine Reduktion der Oberflächenrauheit von $385\mu\text{m}$ auf $248\mu\text{m}$ in den betrachteten Fällen

möglich. Für den Prozessparametersatz PS2 konnte immerhin noch eine Reduktion um 17,8% von 591 μm auf 486 μm festgestellt werden.

Um mögliche Fehlerquellen zu vermeiden, sind die Stützstrukturen bestmöglich zu entfernen. Sollten zu große Stützenreste an den Bauteilen anhaften, kann die Messung verfälscht werden und die Oberflächenrauheit nicht mit dem Makroskop vom Typ Keyence VR 3200 aufgenommen werden.

Fazit: Große Hatchabstände, Fragmentierungen und Zahnhöhen sowie geringe Toplängen haben einen positiven Einfluss auf die Oberflächenrauheit. Diese Erkenntnisse können als Grundlage für die Ableitung von Konstruktionsrichtlinien dienen, wie sie in Kapitel 5.9 bis 5.11 aufgeführt sind.

4.4.2.6 Auswertung der Datenvorbereitungszeit

Aufgrund der Verwendung desselben CAD- bzw. STL-Modells für alle fünf Realisierungen ist die Zeit für die Datenvorbereitung bei allen fünf Realisierungen identisch. Daher ist es nicht möglich, ein Pareto-Diagramm mit einem standardisierten Effekt zu erstellen. In diesem Fall stehen lediglich die Haupteffektdiagramme, die Wechselwirkungsdiagramme und die Gesamtergebnisdarstellungen zur Verfügung, aus denen die wirkenden Effekte ermittelt werden können.

Anhand des Haupteffektdiagramms in Bild 4-47 lässt sich feststellen, dass insbesondere der Hatchabstand und die Fragmentierung einen signifikanten Effekt auf die Datenvorbereitungszeit haben. So ist bei einem großen Hatchabstand und einer großen Fragmentierung mit einer reduzierten Datenaufbereitungszeit zu rechnen.

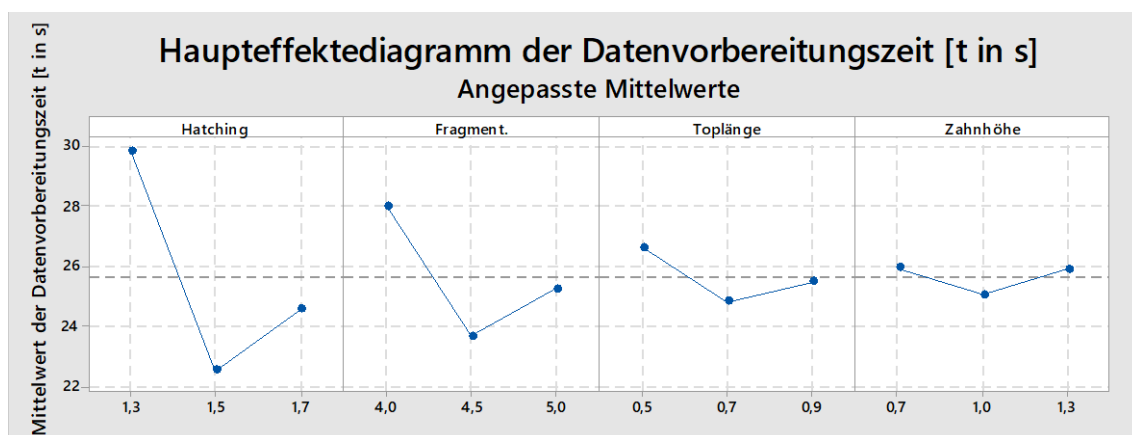


Bild 4-47: Haupteffektdiagramm der Faktoren für die Datenvorbereitungszeit.

Dies geht mit einer Verringerung der Stützstrukturwände einher, womit weniger Stützstruktur generiert werden muss, was sich positiv auf die Datenvorbereitungszeit auswirkt. Der

Hatchabstand hat den größten Effekt auf die Datenvorbereitungszeit und es ist eine Reduktion der Datenaufbereitungszeit von bis zu 26,6% von 30 auf 22 Sekunden realisierbar.

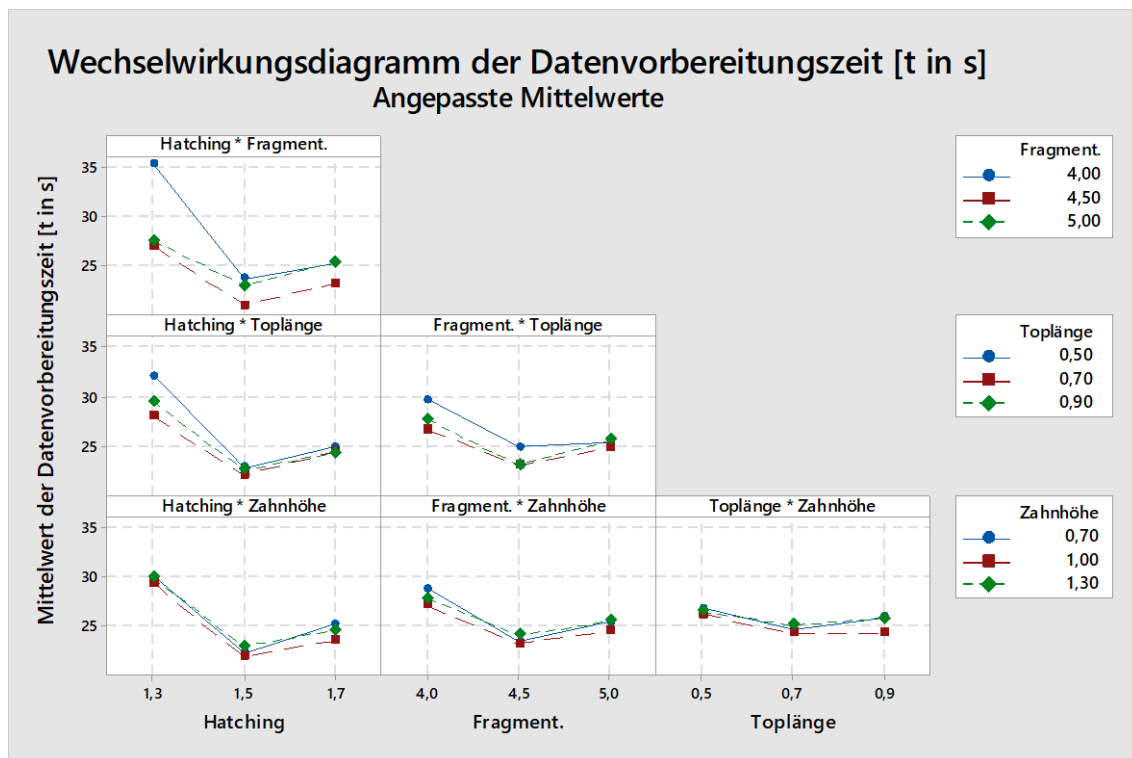
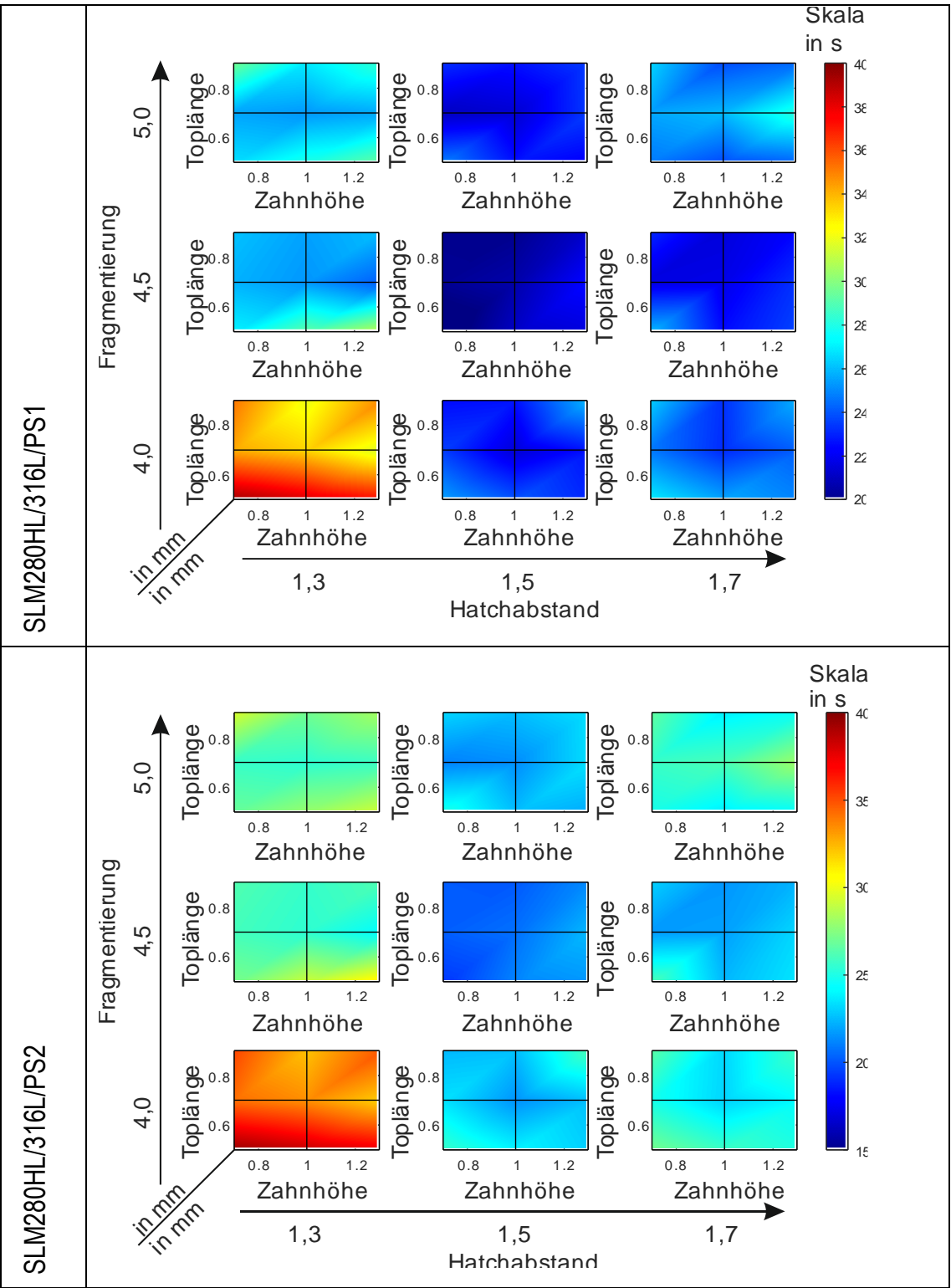


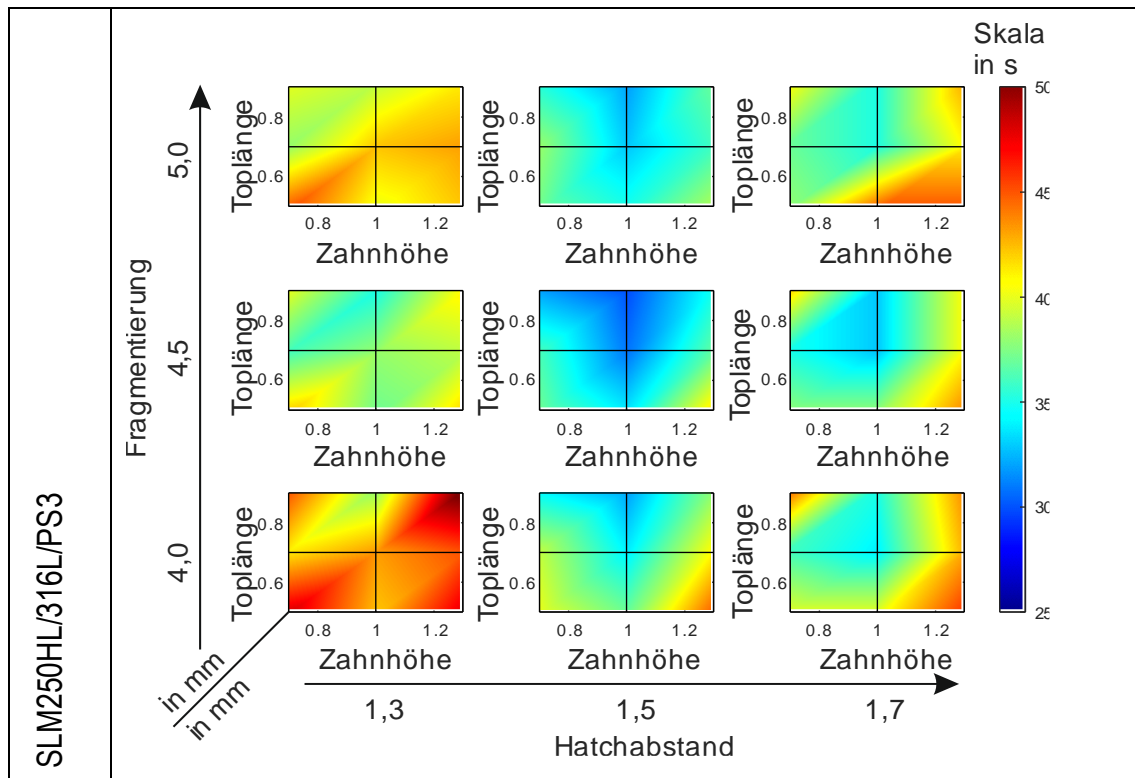
Bild 4-48: Wechselwirkungsdiagramm der Datenvorbereitungszeit.

Bei einer Verringerung der Fragmentierung ist lediglich eine Reduktion von 14,3% von 28 auf 22 Sekunden erreichbar. Die Zahngeometrie, dargestellt durch die Faktoren Toplänge und Zahnhöhe, hat kaum einen Einfluss auf die Datenvorbereitungszeit. Sie bleibt nahezu konstant über die verschiedenen Faktorstufen. Erst in Kombination mit einer Änderung des Hatchabstands oder der Fragmentierung wird in den Wechselwirkungsdiagrammen in Bild 4-48 ein Effekt erkennbar. Allerdings ist dieser deutlich geringer als bei einer kombinierten Reduktion des Hatchabstands und der Fragmentierung. In den Wechselwirkungsdiagrammen ist jedoch erkennbar, dass eine geringere Toplänge einen positiven Einfluss auf die Datenvorbereitungszeit hat. Die Zahnhöhe hingegen zeigt keinen erkennbaren Einfluss auf die Datenvorbereitungszeit.

Die Gesamtergebnisdarstellungen für die betrachteten Prozessparametersätze in Tabelle 4-13 bestätigen die zuvor gemachten Erkenntnisse. Es ist deutlich erkennbar, dass geringe Hatchabstände und geringe Fragmentierungen zu einer deutlichen Erhöhung der Datenvorbereitungszeiten führen. Die Effekte der Toplänge und der Zahnhöhe stimmen jedoch nicht mit den Beobachtungen aus den Haupteffektdiagrammen und den Wechselwirkungsdiagrammen überein. Insbesondere für den Prozessparametersatz PS3 ist ein Einfluss der Zahnhöhe auf die Datenvorbereitungszeit erkennbar. Eine Erhöhung der Zahnhöhe führt zu längeren Datenvorbereitungszeiten.

Tabelle 4-13: Gesamtergebnisdarstellung der Datenvorbereitungszeit.





Bei einer direkten Untersuchung der Ergebnisse an den Prüfkörpern wird auch bei der Gegenüberstellung von Prüfkörpern mit einem großen Hatchabstand und einer großen Fragmentierung und solchen mit einem geringen Hatchabstand und einer geringen Fragmentierung der positive Effekt deutlich. Die durchschnittliche Datenvorbereitungszeit reduziert sich von 32,08s auf 23,8 Sekunden. Dies entspricht einer relativen Verbesserung um etwa 25%.

Potenzielle Fehlereinflüsse auf die Datenvorbereitungszeit, die hier ausgeschlossen wurden, sind Fehler in den STL-Dateien. Nicht geschlossene oder fehlerhaft konvertierte STL-Daten können zu Problemen bei der Generierung von Stützstrukturen führen und somit einen erheblichen Einfluss auf die Datenvorbereitungszeit haben. Ebenso kann die verwendete Hardware einen Einfluss auf die Datenvorbereitungszeit haben. In dieser Ausarbeitung wurde jedoch die verwendete Hardware konstant gehalten, um diesen Einfluss auszuschließen.

Fazit: Ein großer Hatchabstand, eine große Fragmentierung und eine geringe Toplänge führen zu einer optimierten Datenvorbereitungszeit. Diese Erkenntnisse fließen in die Konstruktionsrichtlinien in Kapitel 5.12 und 5.13 ein.

4.4.2.7 Auswertung des Datenvolumens

Da allen Realisierungen dasselbe CAD-Modell zugrunde liegt, ist das Datenvolumen für alle fünf Realisierungen identisch. Daher ist es nicht möglich, ein Pareto-Diagramm mit standardisierten Effekten zu erstellen. Stattdessen stehen lediglich die Haupteffektdiagramme, Wechselwirkungsdiagramme und Gesamtergebnisdarstellungen zur Verfügung, um die tatsächlichen Einflüsse der Faktoren auf das Datenvolumen zu ermitteln.

Anhand des Haupteffektdiagramms in Bild 4-49 lässt sich feststellen, dass insbesondere der Hatchabstand einen signifikanten Effekt auf das Datenvolumen hat. Ein größerer Hatchabstand führt zu einer deutlichen Reduktion des Datenvolumens.

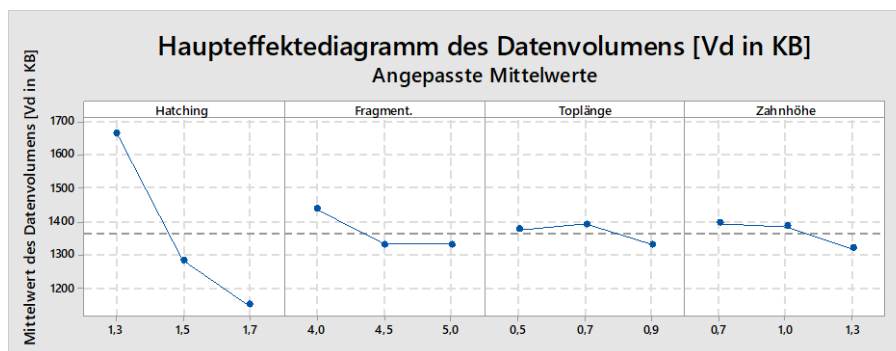


Bild 4-49: Haupteffektdiagramm der Faktoren für das Datenvolumen.

Dies liegt in einer Verringerung der Stützstrukturwände begründet, da bei einem größeren Hatchabstand weniger Stützstruktur generiert werden muss, was sich positiv auf das Datenvolumen auswirkt. Dadurch ist eine mittlere Reduktion des Datenvolumens um bis zu 400 KB den Haupteffektdiagrammen entnehmbar. Auch eine Verringerung der Fragmentierung zeigt einen positiven Effekt auf das Datenvolumen, wobei hier nur Reduktionen von etwa 100 KB erzielt werden konnte. Die Zahngeometrie, repräsentiert durch die Faktoren C (Toplänge) und D (Zahnhöhe), hat hingegen kaum Einfluss auf das Datenvolumen. Es bleibt nahezu konstant über die verschiedenen Faktorstufen. Nur in Kombination mit einer Veränderung des Hatchabstands wird in den Wechselwirkungsdiagrammen in Bild 4-50 ein Effekt erkennbar.

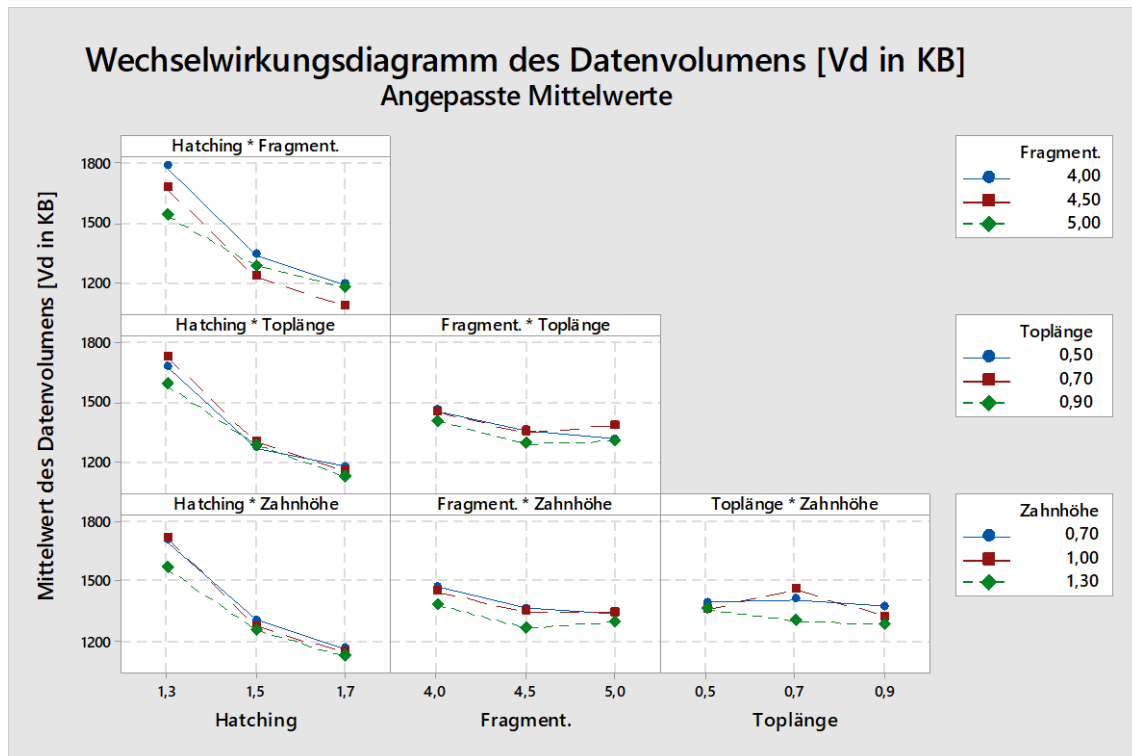
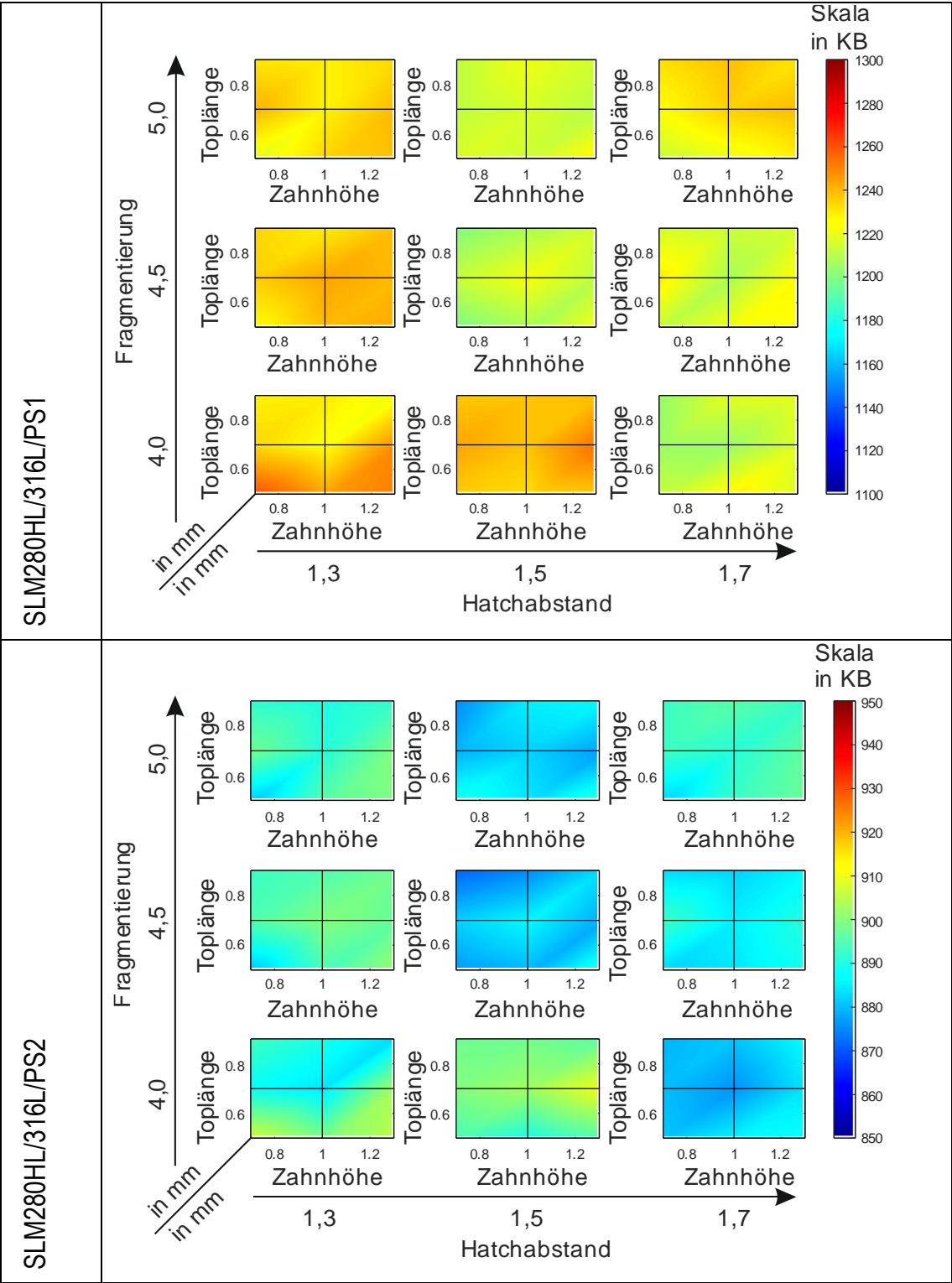


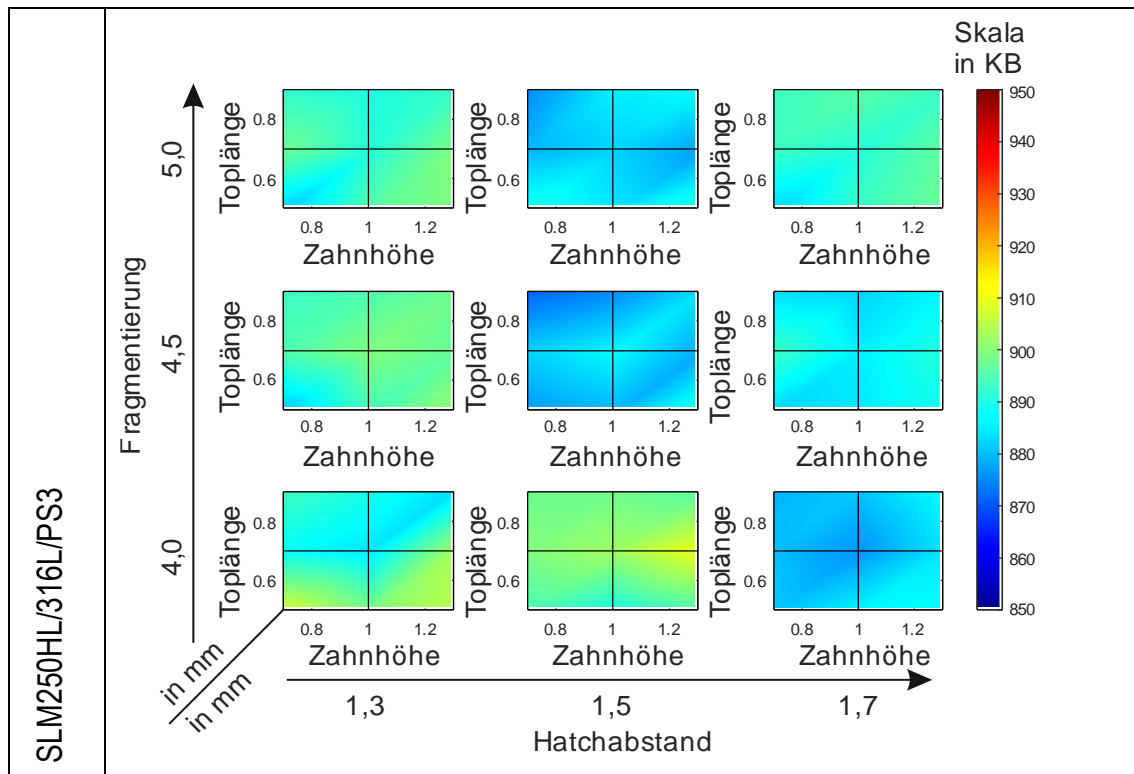
Bild 4-50: Wechselwirkungsdiagramm des Datenvolumens.

Die Gesamtergebnisdarstellungen für die betrachteten Prozessparametersätze in Tabelle 4-14 bestätigen die zuvor gemachten Beobachtungen. Es ist deutlich erkennbar, dass geringe Hatchabstände bei allen Prozessparametersätzen zu einer deutlichen Erhöhung des Datenvolumens führen. Ein geringer Effekt der Fragmentierung ist ebenfalls erkennbar. So sinkt das Datenvolumen mit steigender Fragmentierung. Dies wird insbesondere bei dem Prozessparametersatz PS3 deutlich, ist aber auch bei den anderen Parametersätzen erkennbar.

Es lässt sich erkennen, dass der Prozessparametersatz einen signifikanten Einfluss auf das Datenvolumen aufweist. Ein direkter Vergleich zwischen Parametersatz PS1 und PS2 zeigt, dass das Datenvolumen mit abnehmender Schichtdicke deutlich ansteigt. Dies ist plausibel, da beim Slicen der Daten eine größere Anzahl von Schichtinformationen generiert werden muss, um die gleiche Bauteilhöhe zu erreichen. Des Weiteren ist ein Unterschied zwischen den untersuchten Fertigungsanlagen festzustellen. Es wird deutlich, dass bei der älteren SLM 250HL wesentlich größere Datenvolumen vorliegen als bei der neueren SLM 280HL. Dies ist auf die unterschiedliche Effizienz der Slicesoftwaretools zurückzuführen. In der SLM 250HL wird die ältere Slicesoftware Autofab verwendet, während in der SLM 280HL die Software Materialise Magics zum Einsatz kommt, die kontinuierlich weiterentwickelt wird.

Tabelle 4-14: Gesamtergebnisdarstellung des Datenvolumens.





Bei einer direkten Untersuchung der Ergebnisse an den Prüfkörpern wird auch bei der Gegenüberstellung von Prüfkörpern mit einem großen Hatchabstand und solchen mit einem geringen Hatchabstand der positive Effekt deutlich. Das Datenvolumen lässt sich so im best-case beim Prozessparametersatz PS3 von 1933 KB auf 1081 KB reduziert. Dies entspricht einer relativen Verbesserung um etwa 44%.

Die Beobachtungen verdeutlichen, dass die Schichtdicke einen signifikanten Einfluss auf das Datenvolumen hat. Aufgrund dessen, dass die Schichtdicke als Teil der Prozessparameter definiert wird und keinen direkten Stützstrukturparameter darstellt, wurde sie in dieser Untersuchung nicht berücksichtigt. Dies bedeutet, dass die Ergebnisse nur für den spezifischen verwendeten Prozessparametersatz Gültigkeit besitzen. Ein Vergleich untereinander ist also nur bedingt zulässig. Darüber hinaus ist es von großer Bedeutung, dass die Datenerstellung einheitlich durchgeführt wird, um vergleichbare Ergebnisse innerhalb eines Prozessparametersatzes zu erzielen.

Fazit: Ein erhöhter Hatchabstand hat ein optimiertes Datenvolumen zur Folge. Dieses Ergebnis wird in die Konstruktionsrichtlinien in Kapitel 5.14 festgehalten.

4.4.2.8 Auswertung des Materialverbrauchs

Das Pareto-Diagramm für den Materialverbrauch in Bild 4-51 zeigt, dass die Faktoren A (Hatchabstand), B (Fragmentierung), C (Toplänge) und D (Zahnhöhe) einen signifikanten Effekt auf den Materialverbrauch haben. Darüber hinaus scheint auch die Vierfaktorwechselwirkung der Faktoren A, B, C und D einen signifikanten Effekt auf den Materialverbrauch aufzuweisen. Es ist anzumerken, dass diese Schlussfolgerungen mit einem Vertrauensniveau von 95% abgeleitet wurden.

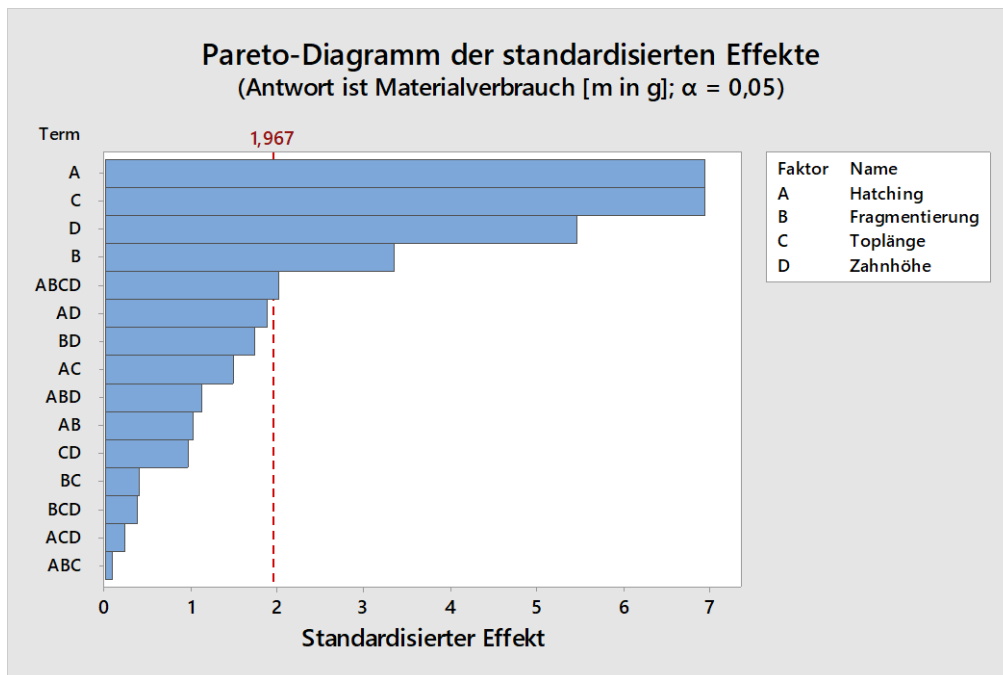


Bild 4-51: Pareto-Diagramm des Materialverbrauchs.

Die Haupteffektdiagramme in Bild 4-52 ermöglichen die Beurteilung der Auswirkungen der verschiedenen Faktoren auf den Materialverbrauch. In dem Diagramm für den Hatchabstand wird beispielsweise deutlich, dass eine Erhöhung dieses Faktors mit einer Verringerung des Materialverbrauchs einhergeht. Dieser Zusammenhang ist plausibel, da ein größerer Hatchabstand zu einer geringeren Anzahl von Stützstrukturwände führt und somit weniger Material für die Herstellung der Stützstrukturen benötigt wird. Darüber hinaus wird eine bessere Entpulverung ermöglicht, wodurch weniger Material in den Zwischenräumen der Stützstrukturen verbleibt. Infolgedessen kann eine Reduktion des Materialverbrauchs um etwa 41% von ca. 2,9 g auf 1,7 g für die Stützstrukturen erreicht werden.

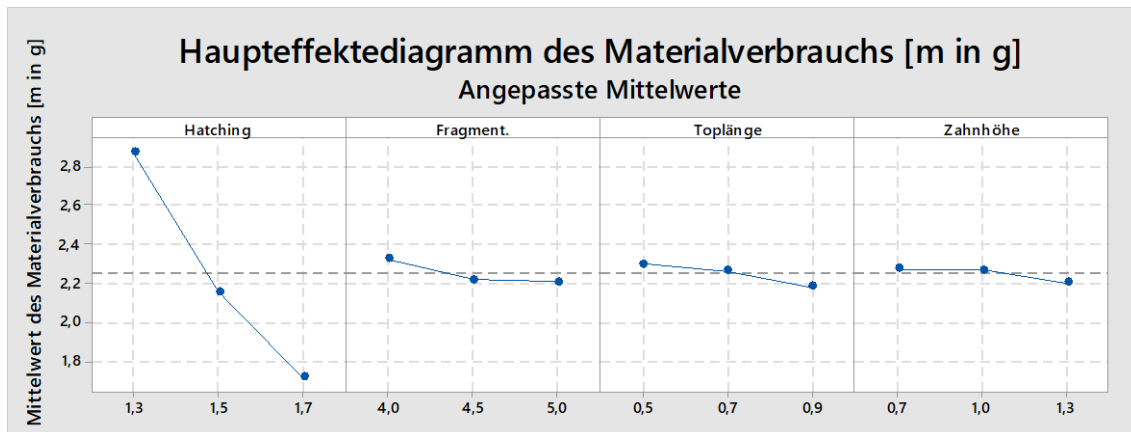


Bild 4-52: Haupteffektdiagramm der Faktoren für den Materialverbrauch.

Die Auswirkungen der anderen Faktoren sind deutlich geringer. Aus dem Haupteffektdiagramm der Fragmentierung ist ersichtlich, dass eine Erhöhung dieses Faktors zu einer leichten Reduzierung des Materialverbrauchs um etwa 5% führt. Auch hier kann der positive Effekt auf den Materialverbrauch durch die Reduktion der Anzahl an Stützstrukturwänden als Erklärung angesehen werden.

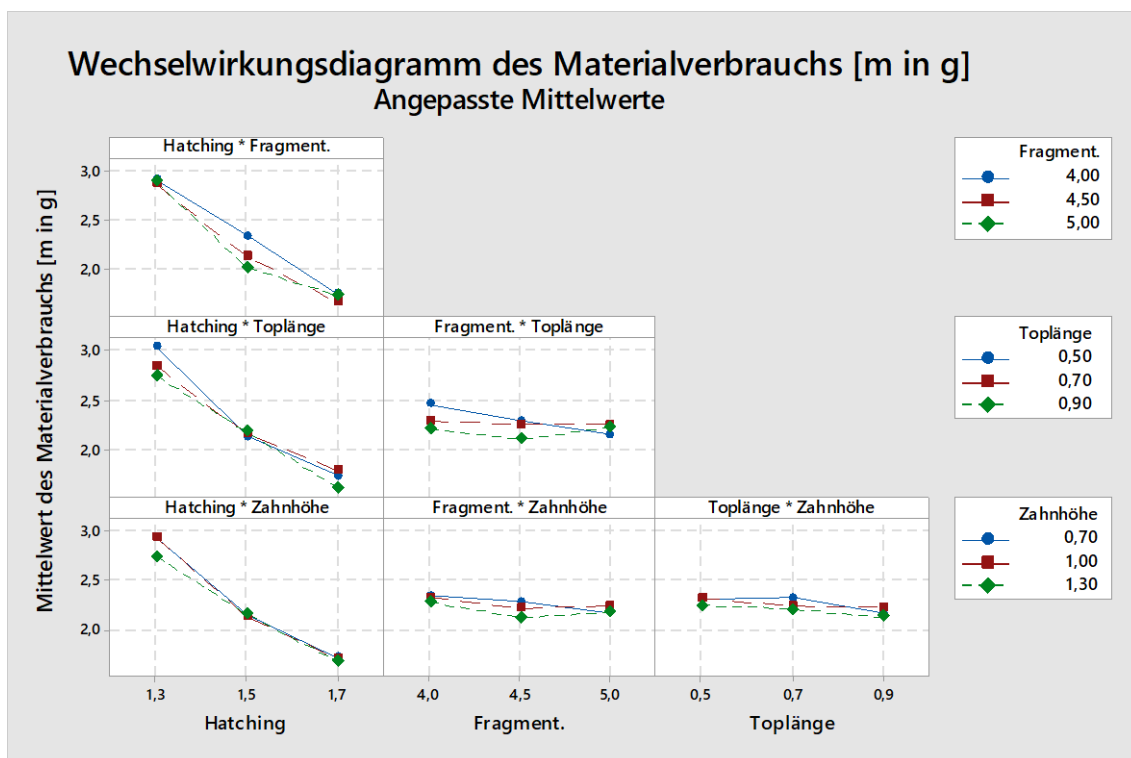


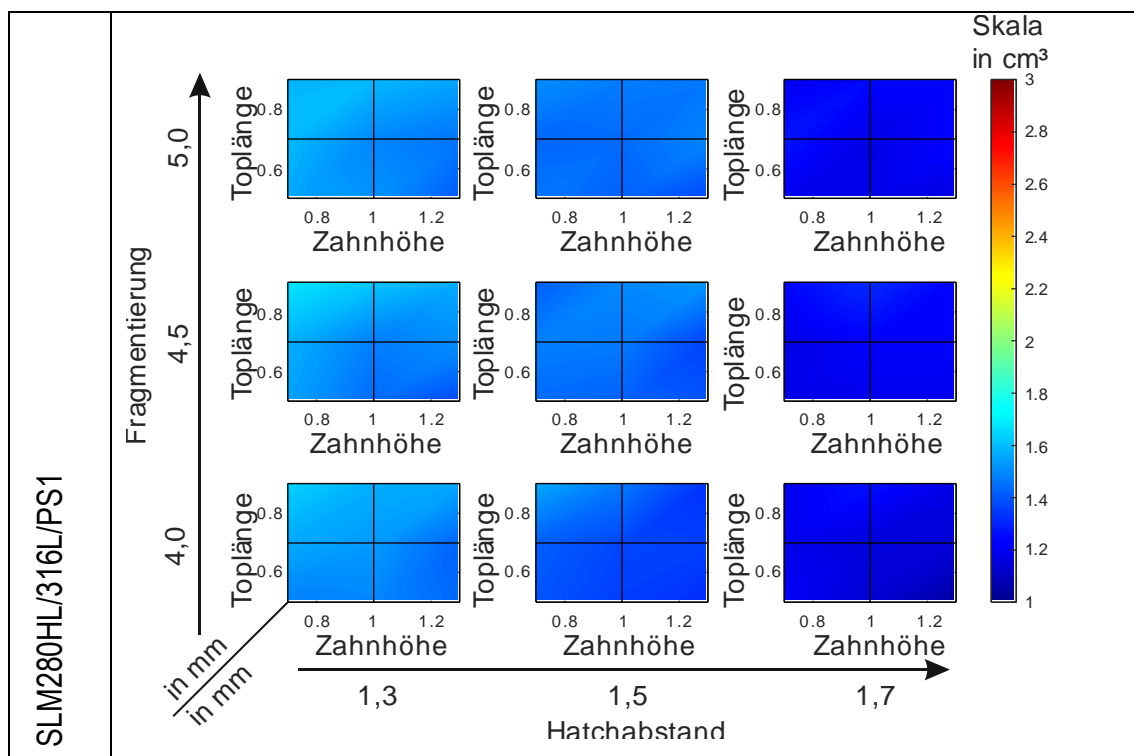
Bild 4-53: Wechselwirkungsdiagramm des Materialverbrauchs.

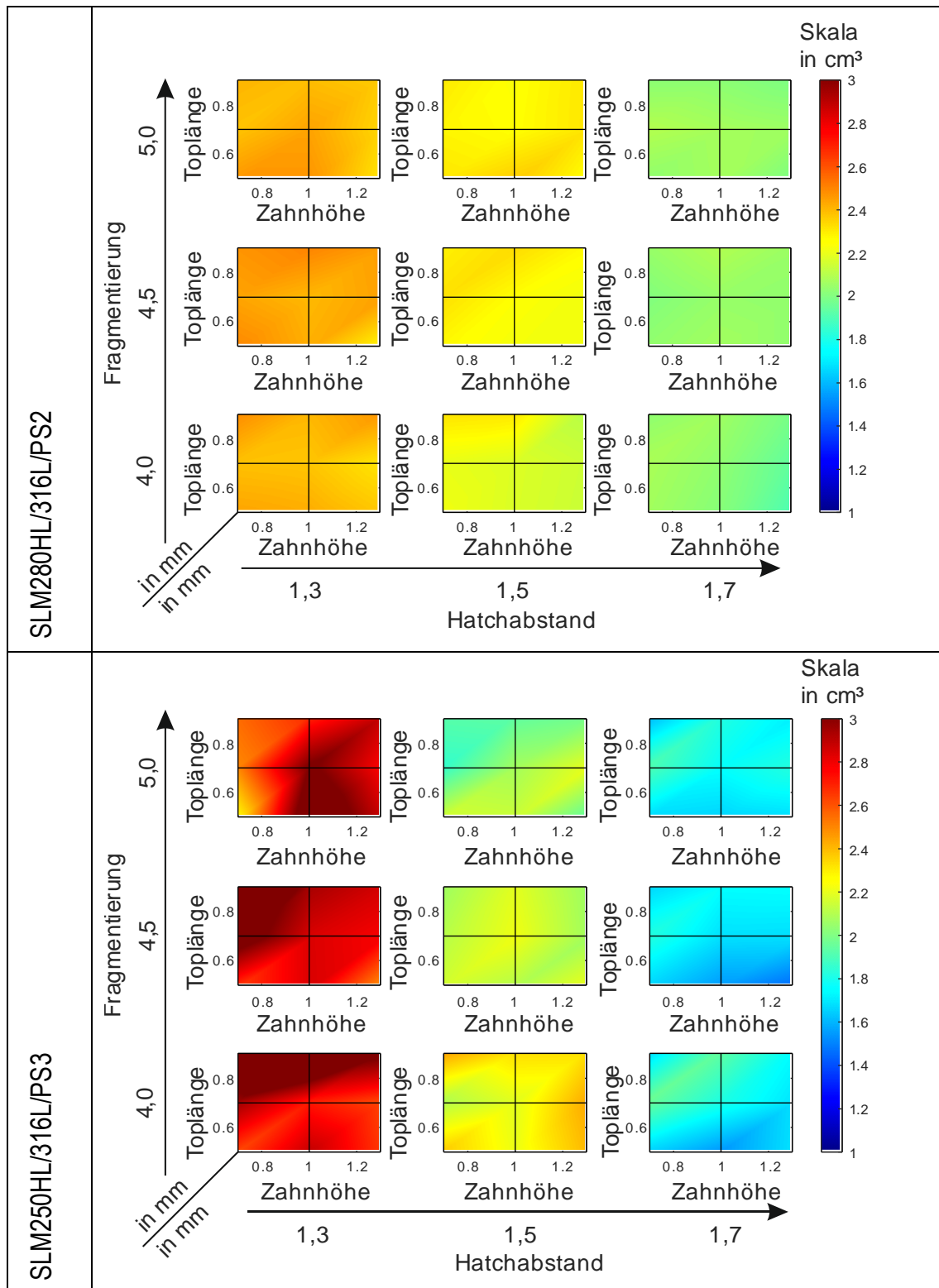
Die Effekte der Toplänge und der Zahnhöhe liegen in einem ähnlichen Größenbereich wie der Effekt der Fragmentierung. Eine Reduktion der Toplänge und eine Erhöhung der Zahnhöhe haben beide einen positiven Effekt auf den Materialverbrauch. Dies kann durch die daraus resultierende feinere Zahngeometrie erklärt werden, die zudem eine einfacheren

Entpulverung ermöglicht. Der Effekt der ebenfalls signifikanten Vierfaktorwechselwirkung ABCD ist in den Zweifaktorwechselwirkungsdiagrammen nicht ersichtlich, wurde jedoch durch die Messungen an den Prüfkörpern nachgewiesen. Bei direkter Gegenüberstellung von Prüfkörpern mit einem großen Hatchabstand, einer großen Fragmentierung, einer geringen Topplänge und einer großen Zahnhöhe im Vergleich zu Prüfkörpern mit gegenteiligen Stützstrukturparametern wird deutlich, dass eine Reduktion des Materialverbrauchs um etwa 43% ermöglicht wird.

Die Auswirkungen der signifikanten Effekte lassen sich ebenfalls in den Gesamtergebnisdarstellungen für die drei betrachteten Prozessparametervarianten PS1, PS2 und PS3 in Tabelle 4-15 nachvollziehen. Es ist erkennbar, dass in der linken Spalte der Diagramme, das heißt bei einem geringen Hatchabstand eine deutliche Erhöhung des Materialverbrauchs zu verzeichnen ist. Die Effekte der anderen Faktoren sind weniger eindeutig ablesbar. Am ehesten sind diese in der Gesamtergebnisdarstellung für den Prozessparametersatz PS3 erkennbar. Hier zeigen sich Bereiche mit geringerem Materialverbrauch bei großen Zahnhöhen und geringen Topplängen.

Tabelle 4-15: Gesamtergebnisdarstellung des Materialverbrauchs.





Zusätzlich zeigen die Gesamtergebnisdarstellungen Unterschiede zwischen den betrachteten Maschinen auf. Dies kann durch die unterschiedlichen Prozessparameter erklärt werden, die beispielsweise einen Einfluss auf die Menge an angeschmolzene Pulverresten haben und somit für deutliche Gewichtssteigerungen verantwortlich sind. Die

Untersuchungen zu den Oberflächenrauheiten untermauern diese Erkenntnis, da die größten Oberflächenrauheiten dort festgestellt wurden, wo auch der größte Materialverbrauch zu verzeichnen war. Innerhalb eines Prozessparametersatzes sind aber die gleichen Effekte der Stützstrukturfaktoren auf den Materialverbrauch zu beobachten.

Mögliche Fehlerquellen bei der Bestimmung des Materialverbrauchs können sich durch unterschiedliche Mengen von zurückbleibenden Pulverresten zwischen den Stützstrukturen ergeben. Darum ist das Vorgehen zur Entpulverung aus Kapitel 4.4.1.8 gewissenhaft zu befolgen, um eine gleichbleibende Pulverentfernung zu gewährleisten. Auch auf eine ordnungsgemäße Kalibrierung und Justierung der Waage ist zu achten.

Fazit: Große Hatchabstände, Fragmentierungen und Zahnhöhen sowie geringe Toplängen haben einen positiven Einfluss auf den Materialverbrauch. Diese Erkenntnisse bieten eine Grundlage für die Ableitung einer Konstruktionsrichtlinie, wie sie in Kapitel 5.15 aufgeführt ist.

4.4.3 Auswertung der Ergebnisse der anwendungsnahen Prüfkörpern

Die Auswertung der Versuchsergebnisse der anwendungsnahen Prüfkörper erfolgt unter Verwendung der Prüfkörper PK3.1 bis PK3.7. Bei der Untersuchung der Stützwirkung an den verschiedenen Basiselementen wurden die in Kapitel 4.1 definierten Qualitätskriterien wie Form- und Maßhaltigkeit in z-Richtung, Maßhaltigkeit des Querschnittsprofils, Ablösbarkeit, Oberflächenqualität und Kantenzustand berücksichtigt. Des Weiteren wurden mithilfe der Prüfkörper PK3.6 und PK3.7 die Ablösbarkeit bei eingeschränkter Zugänglichkeit bzw. die Änderung der Toplänge in Abhängigkeit des Downskin-Winkels analysiert. Die Prüfkörper wurden mit Stützstrukturen versehen, die die optimierten Stützstrukturparameter gemäß Tabelle 4-5 aufweisen. Diese Parameter wurden mit Hilfe des Optimierungstools des Versuchsplanungsprogramms Minitab 17 auf Basis der Vorsondierungsuntersuchungen ausgewählt. Im Folgenden werden die Untersuchungen exemplarisch für den Prozessparametersatz PS2 beschrieben. Dieser Parametersatz umfasst die Fertigung auf einer aktuellen Anlage des Typs 280HL sowie die Verwendung einer in industriellem Umfeld weitverbreiteten Schichtdicke von 50µm.

4.4.3.1 Auswertung nicht gekrümmter, außenliegender Oberflächen an PK3.1

Mehrere Qualitätskriterien können berücksichtigt werden, indem die Stützstruktur an nicht gekrümmten, außenliegenden Elementen am Prüfkörper PK3.1 untersucht wird. Die untersuchbaren Qualitätskriterien umfassen die Form- und Maßhaltigkeit in Z-Richtung vor und nach dem Abtrennen von der Bauplattform, die Formhaltigkeit des Querschnittsprofils sowie die Oberflächenrauheit nach dem Entfernen der Stützstrukturen. Hierbei werden drei

verschiedene Orientierungen der Überhänge sowie verschiedene Breiten und Längen betrachtet.

Zur Bestimmung der Maßhaltigkeit in Z-Richtung erfolgt die Abtastung des Prüfkörper mit Hilfe der Koordinatenmessmaschine Nikon Altera an den in Kapitel 4.4.1.7 aufgeführten Punkten im verbundenen Zustand und nach dem Trennen von der Bauplattform. Die Ergebnisse für die **10 mm** langen Überhänge sind in Bild 4-54 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Einspannstelle, also der massive Mittelsteg, unabhängig von der Neigung der Überhänge eine negative Verschiebung in Z-Richtung von bis zu -0,249 mm aufweist. Mit zunehmender Entfernung der Messpunkte vom Mittelsteg steigt die Maßabweichung. Dies bedeutet, dass die Überhänge sich bereits im verbundenen Zustand leicht nach oben verziehen und sich dem Sollmaß annähern, sodass lediglich eine Abweichung von maximal -0,146 mm zu verzeichnen ist. Dies zeigt, dass die gewählte Stützstruktur ein erwartetes Hochbiegen der Überhänge verhindert und für geringe Abweichung zum Sollmaß sorgt.

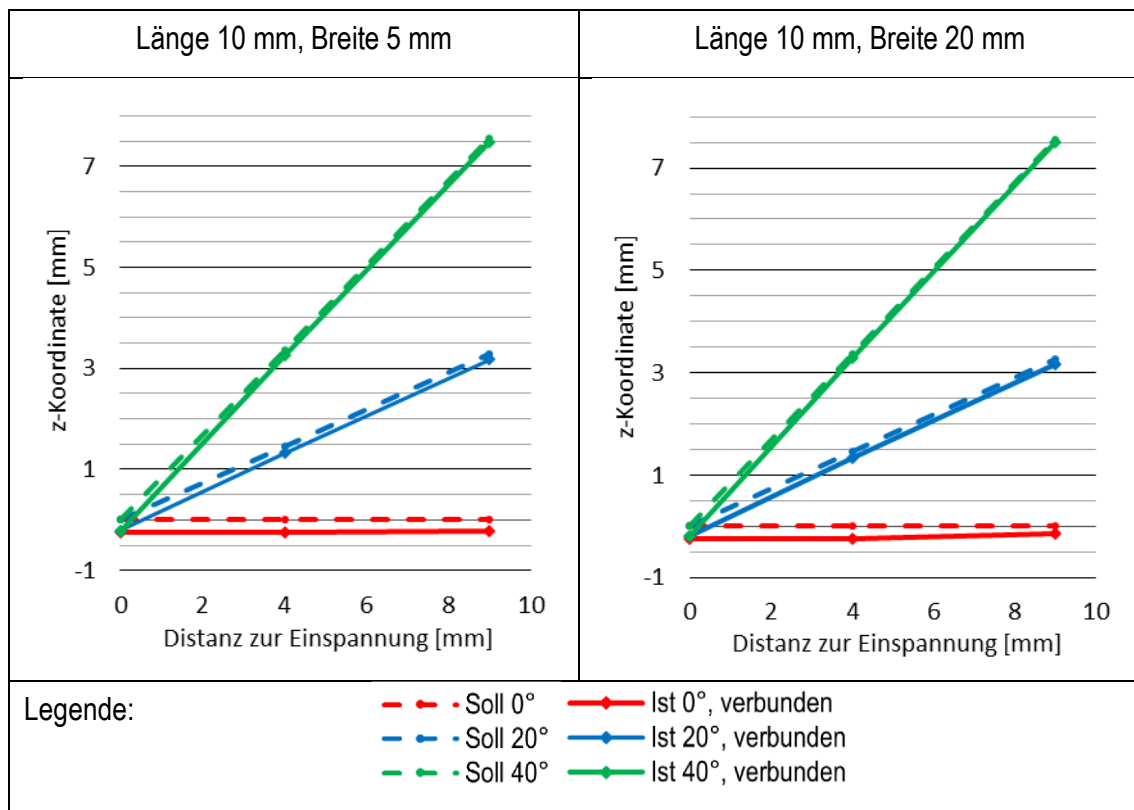


Bild 4-54: Maßhaltigkeit an den 10 mm langen Überhängen am Prüfkörper PK3.1 [nach Aus20].

Die Untersuchungen der **30 mm** langen Überhänge erfolgt im verbundenen und im getrennten Zustand von der Bauplattform. Vor dem Trennen werden ähnliche Effekte wie bei den 10 mm langen Überhängen deutlich (s. Bild 4-55). Auch hier weist der Mittelsteg eine Verschiebung von 0,2 mm in negative Z-Richtung auf. Mit zunehmendem Abstand zum Mittelsteg steigen die Abweichungen. Die größten Abweichungen von 1,459 mm in positive Z-

Richtung werden an den 40°-orientierten Prüfkörpern festgestellt. Nach dem Trennen von der Bauplattform werden Abweichungen in positive Richtung von bis zu 1,599 mm festgestellt. Dies bedeutet, dass die gewählten Stützstrukturen tatsächlich den wärmeinduzierten Eigenspannungen entgegenwirken und die Verzüge erst im getrennten Zustand ihr Maximum erreichen. Daraus folgt, dass vor dem Trennen eine Spannungsarmglühen zu empfehlen ist, um Verzüge aufgrund von Relaxation nach dem Trennen zu vermeiden.

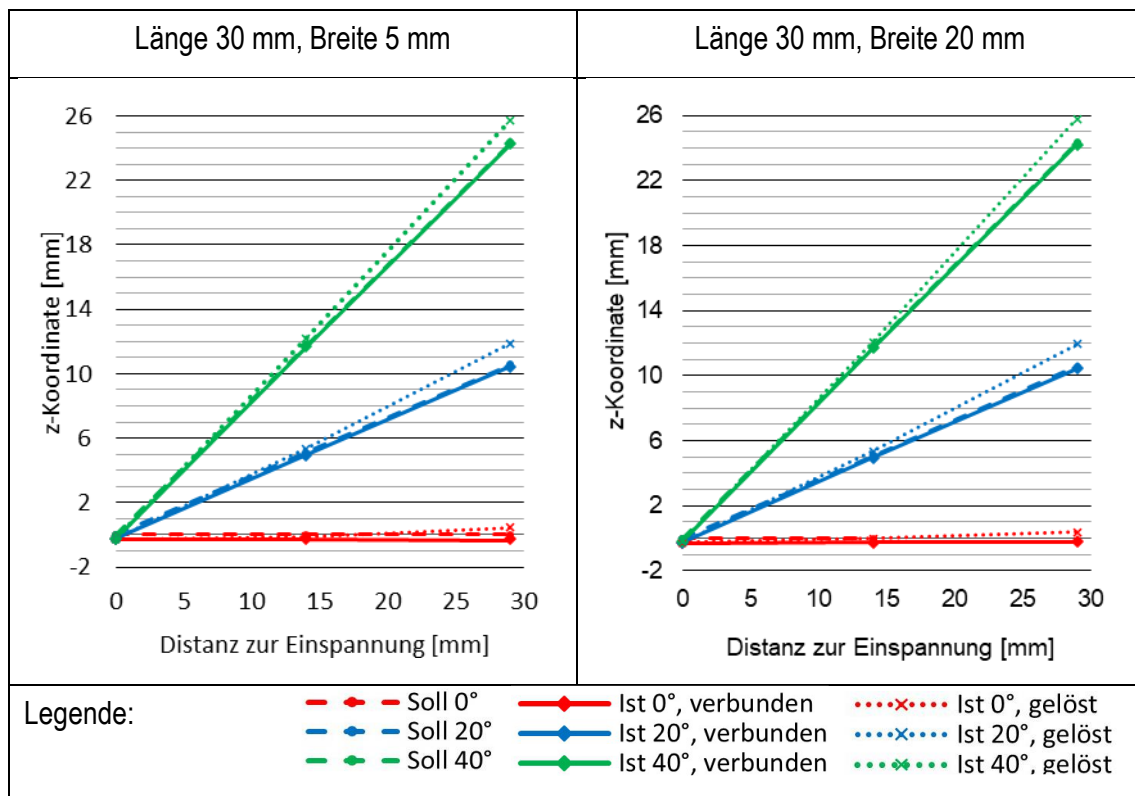
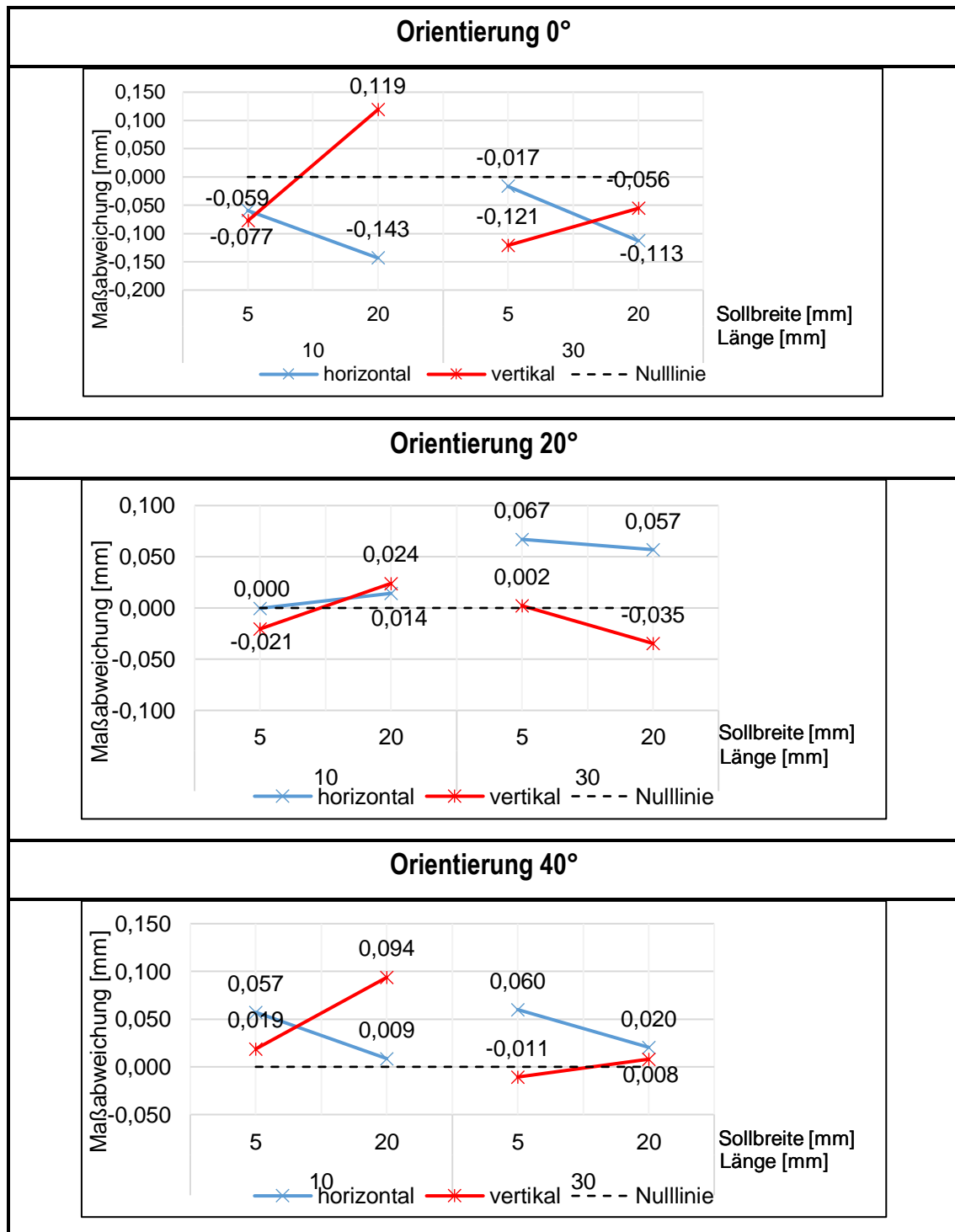


Bild 4-55: Maßhaltigkeit an den 30 mm langen Überhängen am Prüfkörper PK3.1 [nach Aus20].

Die Untersuchung der Form- und Maßhaltigkeit des Querschnittsprofils erfolgt gemäß Kapitel 4.4.1.9 mittels des Makroskops vom Typ Keyence VR 3200. In Tabelle 4-16 werden die horizontalen und vertikalen Abweichungen für verschiedene Ausrichtungen, Längen und Breiten der Überhänge dargestellt. Es ist deutlich erkennbar, dass die Maßabweichungen in vertikaler Richtung bei breiteren Überhängen zunehmen. Eine mögliche Erklärung hierfür ist, dass durch das Hochbiegen der Ecken bei breiteren Überhängen größere Abweichungen auftreten. Hingegen zeigen die horizontalen Maßabweichungen tendenziell einen Rückgang mit zunehmender Breite, was möglicherweise auf eine stärkere Verbindung und eine großflächigere Wärmeabfuhr durch mehr Stützstrukturen zurückzuführen ist. Diese Effekte sind bei allen betrachteten Überhanglängen und bei verschiedenen Orientierungswinkeln feststellbar.

Bei der Untersuchung der Oberflächenrauheit entsprechend Kapitel 4.4.1.9 konnten erhebliche Unterschiede bei verschiedenen Orientierungen festgestellt werden. So ist bei einem Orientierungswinkel von 40° die beste Oberflächenrauheit von $409\mu\text{m}$ erreichbar.

Tabelle 4-16: Untersuchungen am Querschnittsprofil des PK3.1 nach [Aus 20].



Bei einer 0° -Orientierung liegt der Rauheitswert hingegen bei $491\text{ }\mu\text{m}$. Bild 4-56 zeigt die Prüfkörper mit unterschiedlichen Orientierungen. Es wird deutlich, dass bei einer 40° Orientierung weniger Stützstrukturreste an der Oberfläche verbleiben, während bei der 0° -Orientierung deutlich mehr Anhaftungen zu beobachten sind. Dies ist vermutlich auf eine verbesserte Ablösbarkeit zurückzuführen, da bei den 40° -orientierten Überhängen durch das größere Stützstrukturvolumen mehr Angriffspunkte zur Entfernung der Stützstrukturen vorhanden sind. Darüber hinaus kann der größere Verzug der Überhänge bei einer 40° -Orientierung dazu führen, dass die Stützstrukturen bereits nach der Herstellung geschwächt sind und sich leichter entfernen lassen.

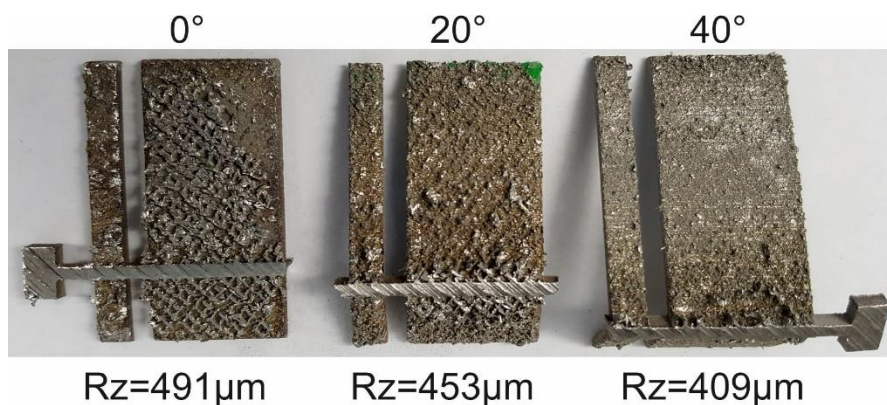
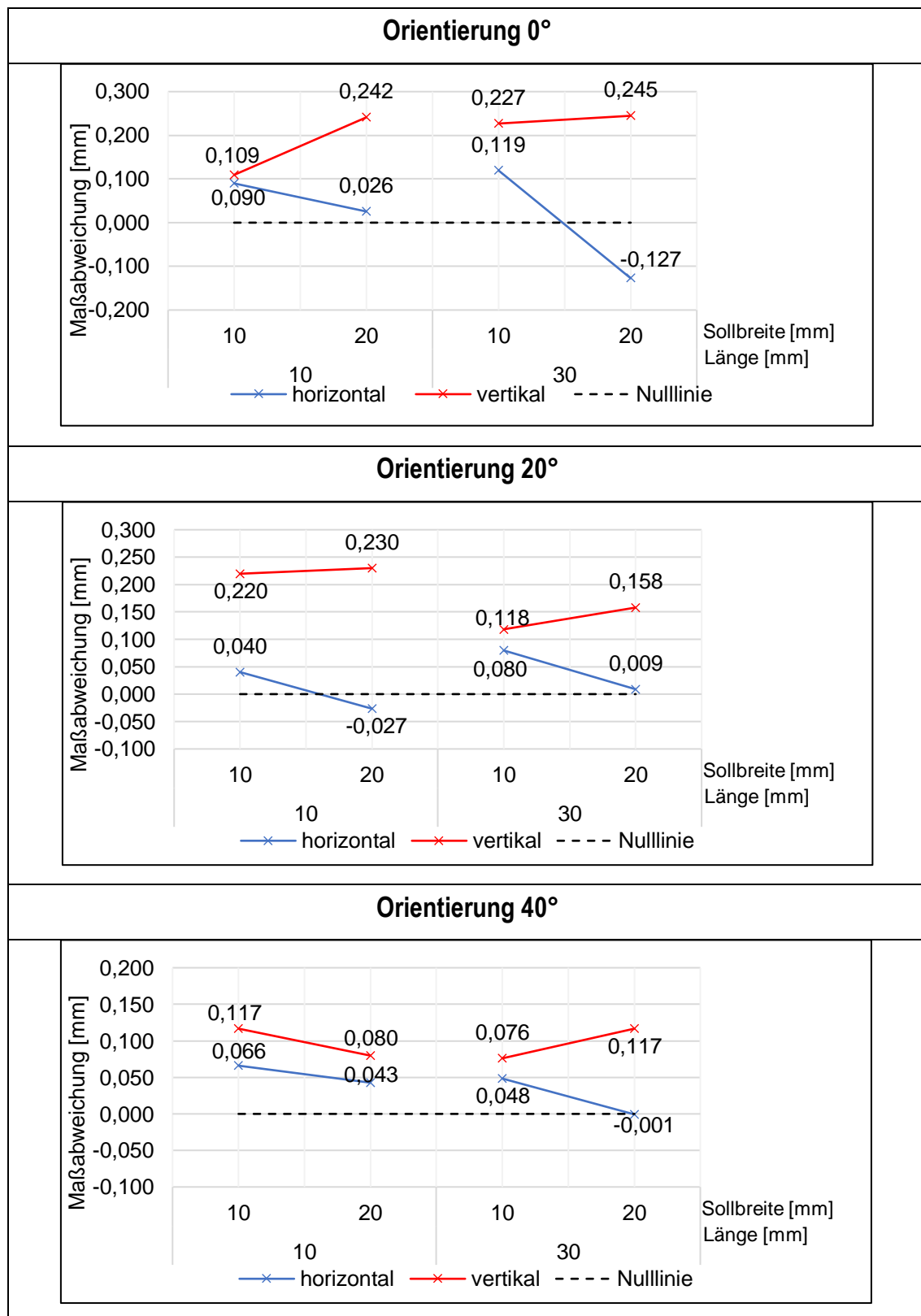


Bild 4-56: Oberflächenqualität an den Downskinflächen des Prüfkörpers PK3.1.

4.4.3.2 Auswertung nicht gekrümmter, innenliegender Oberflächen an PK3.2

Die Prüfkörper PK3.2 werden verwendet, um die Maßhaltigkeit des Querschnittsprofils sowie die Oberflächenrauheit an den innenliegenden Downskin-Flächen zu untersuchen. Dabei wird die Überhanglänge und -breite sowie der Orientierungswinkel variiert. Die Ergebnisse der Maßhaltigkeitsuntersuchungen sind in Tabelle 4-17 dargestellt. Es ist erkennbar, dass mit zunehmender Prüfkörperbreite die vertikalen Maßabweichungen zunehmen während die horizontalen Maßabweichungen abnehmen. Diese Effekte wurden bereits bei den nicht gekrümmten Außenflächen in Kapitel 4.4.3.1 beobachtet, jedoch sind die absoluten Maßabweichungen deutlich größer als bei den außen liegenden Flächen. Dies lässt sich erklären, da die innen liegenden Stützstrukturen nicht an der Bauplattform, sondern an einer Bauteiloberfläche beginnen. Maßabweichungen an dieser Ausgangsoberfläche verstärken somit die Maßabweichungen der zu stützenden Fläche. Zudem ist tendenziell erkennbar, dass die Maßabweichungen sowohl in vertikaler als auch in horizontaler Richtung mit steigenden Orientierungswinkel zunehmen. Dies ist vermutlich durch die längeren senkrechten Wege zur Wärmeableitung zurückzuführen, die sich negativ auf die Wärmeableitung aus dem Bauteil auswirken und somit zu einer erhöhten Verformung und entsprechenden Maßabweichungen führen.

Tabelle 4-17: Untersuchungen am Querschnittsprofil des PK3.2.



Bei der Untersuchung der Oberflächenrauheit gemäß Kapitel 4.4.1.9 wurden deutliche Unterschiede in Bezug auf verschiedene Orientierungen festgestellt. Ein Orientierungswinkel von 40° führt zur geringsten, erreichten Oberflächenrauheit von $450\text{ }\mu\text{m}$, während bei einer 0° -Orientierung ein Wert von $520\text{ }\mu\text{m}$ vorlag. Ähnlich wie bei den äußeren Flächen zeigt sich auch hier eine deutliche Abnahme der Stützstrukturreste auf der Oberfläche bei einer 40° -Orientierung im Vergleich zur 0° -Orientierung. Dies lässt sich auf eine verbesserte Ablösbarkeit zurückführen, da bei den 40° -orientierten Überhängen eine größere Anzahl von Angriffspunkten zur Entfernung der Stützstrukturen zur Verfügung steht. Zusätzlich führt der erhöhte Verzug der Überhänge bei einer 40° -Orientierung dazu, dass die Stützstrukturen bereits während des Fertigungsprozesses geschwächt werden und sich daher leichter entfernen lassen und weniger Rückstände anhaften. Im Vergleich zu den außen liegenden Flächen ist die Oberflächenrauheit bei den innen liegenden Oberflächen deutlich größer. Die Verankerung der Stützstrukturen am Bauteil und nicht an der Bauplattform führt dazu, dass die Wärme über einen längeren Weg abgeleitet wird. Infolgedessen besteht eine höhere Wahrscheinlichkeit für Pulveranhaftungen an der Downskinfläche, was wiederum zu einer Verschlechterung der Oberflächenrauheit führt.

4.4.3.3 Auswertung einfach gekrümmter, außenliegender Oberflächen an PK3.3

Am Prüfkörper PK3.3 werden an einfach gekrümmten Flächen dieselben Qualitätskriterien wie bereits an Prüfkörper PK3.1 untersucht. Die Messungen erfolgen gemäß Kapitel 4.4.1.11.

Auch hier fällt an beiden Überhanglängen auf, dass die Messpunkte nahe des Mittelstegs (s. Bild 4-57 und 4-58) eine negative Maßabweichung von bis zu $-0,169\text{ mm}$ aufweisen. Mit steigendem Abstand zum Mittelsteg nehmen auch hier die Abweichungen zu. Die Abweichungen sind allerdings geringer im Vergleich zu den Prüfkörpern PK3.1, da die Prüfkörper PK3.3 deutlich biegesteifer sind.

Die Untersuchungen der 30 mm langen Überhänge erfolgt im verbundenen und im getrennten Zustand von der Bauplattform. Mit zunehmendem Abstand zum Mittelsteg steigen die Abweichungen. Die größten Abweichungen von $0,3\text{ mm}$ in positive Z-Richtung werden an den 20° -orientierten Prüfkörpern festgestellt. Nach dem Trennen von der Bauplattform erhöht sich diese Abweichung auf $0,337\text{ mm}$. Eine Erhöhung der Abweichungen ist auch bei den anderen Orientierungen festzustellen und zeigt, dass die Stützstrukturen wärmeinduzierte Eigenspannungen aufnehmen.

Zur Bewertung der Form- und Maßhaltigkeit des Querschnittsprofils werden entsprechend Bild 4-26 fünf radial verlaufende Messstrecken zur Überprüfung des Sollradius verwendet. Die Mittelwerte der Maßabweichungen zum Sollradius sind in Tabelle 4-18 dargestellt.

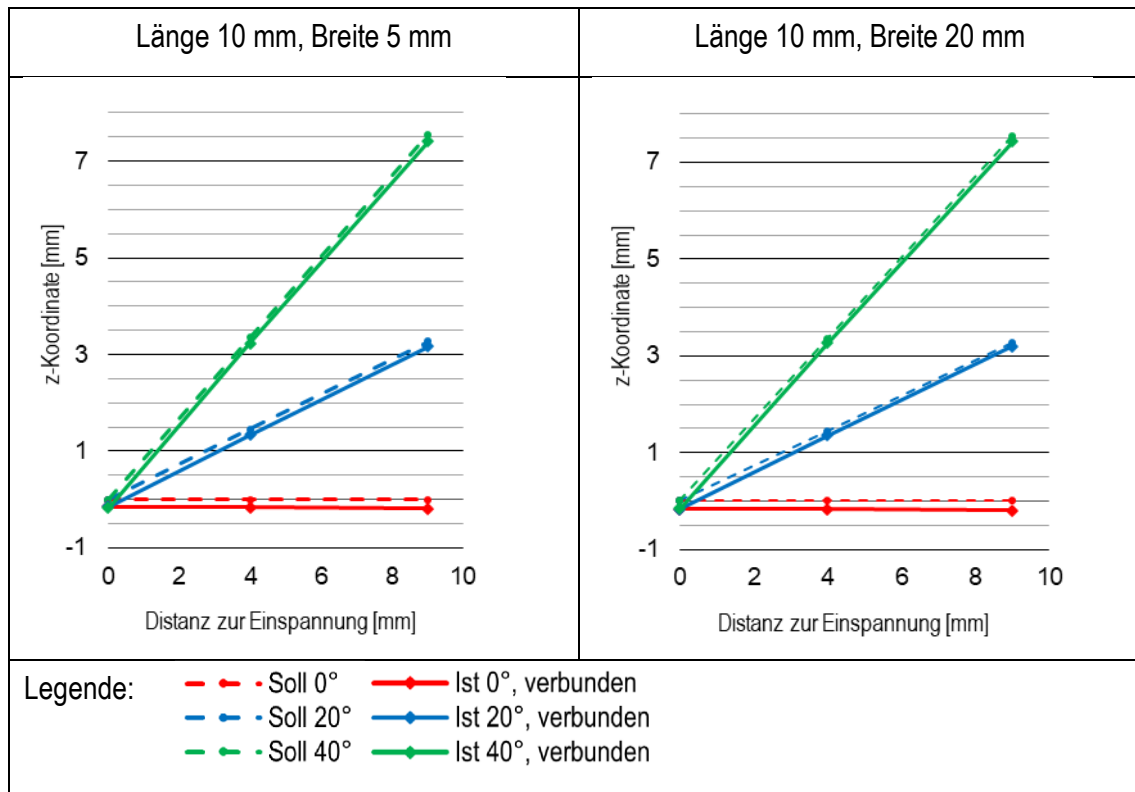
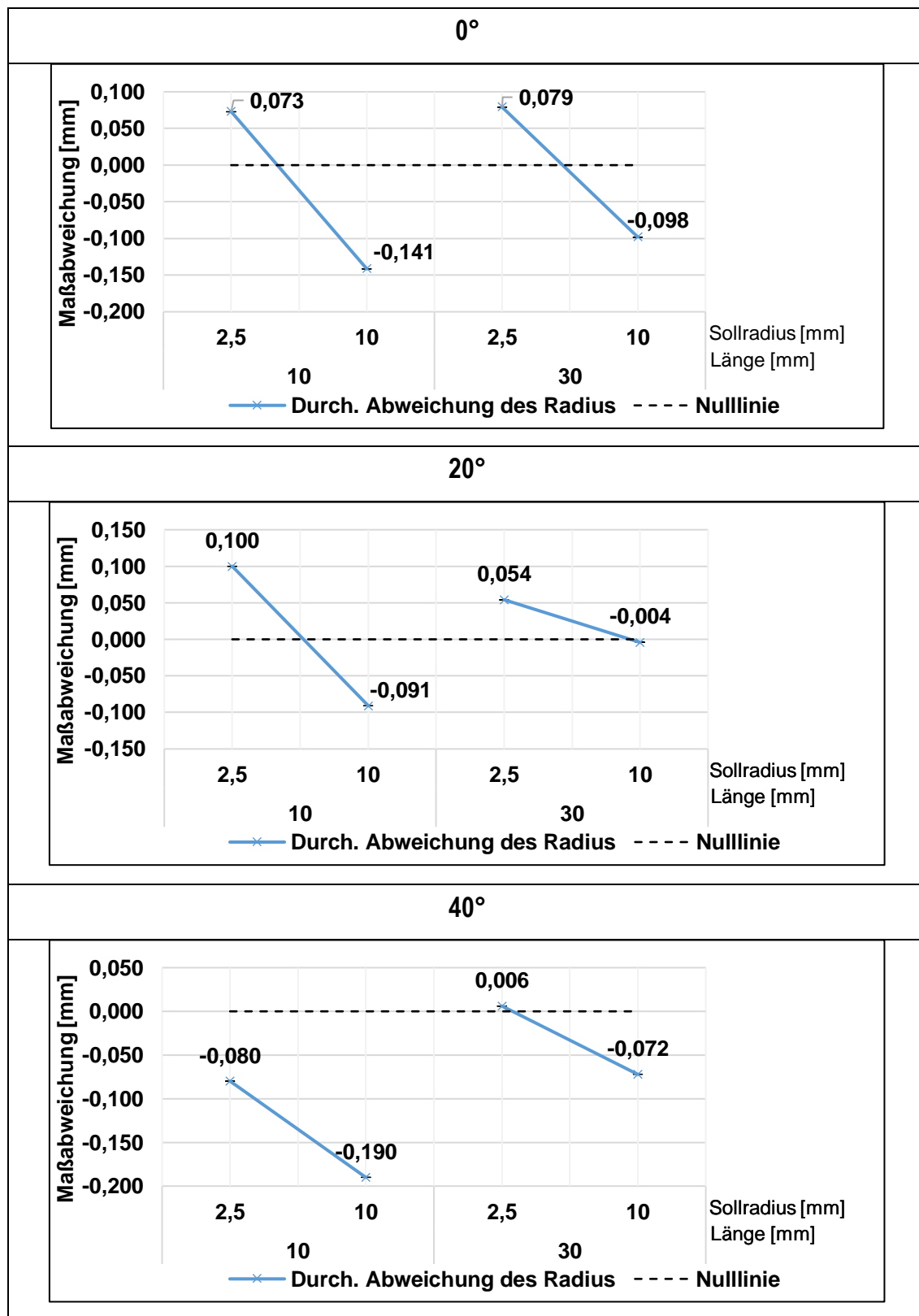


Bild 4-57: Maßhaltigkeit an den 10 mm langen Überhängen am Prüfkörper PK3.3.

Es ist erkennbar, dass die Überhänge mit einem größeren Sollradius geringere Maßabweichungen aufweisen, was in der größeren Biegesteifigkeit der massiveren Prüfkörper begründet liegt. Dies gilt für beide betrachteten Überhanglängen von 10 mm und 30 mm. Die größeren Radien weisen negative Abweichungen zum Sollradius auf. Dies liegt in der stärkeren Kontraktion des Materials durch die Erstarrung und Abkühlung von mehr Material begründet [KMF+18]. Die Orientierung hat keinen nennenswerten Einfluss auf die Form und Maßhaltigkeit des Querschnittsprofils.

Tabelle 4-18: Untersuchungen am Querschnittsprofil des PK3.3.



Empfehlenswert ist es Radien möglichst groß zu gestalten, da so mehr Stützstrukturen unter den Radien vorgesehen werden können, was wiederum zu einer besseren Formhaltigkeit und Maßhaltigkeit des Querschnittsprofils führt.

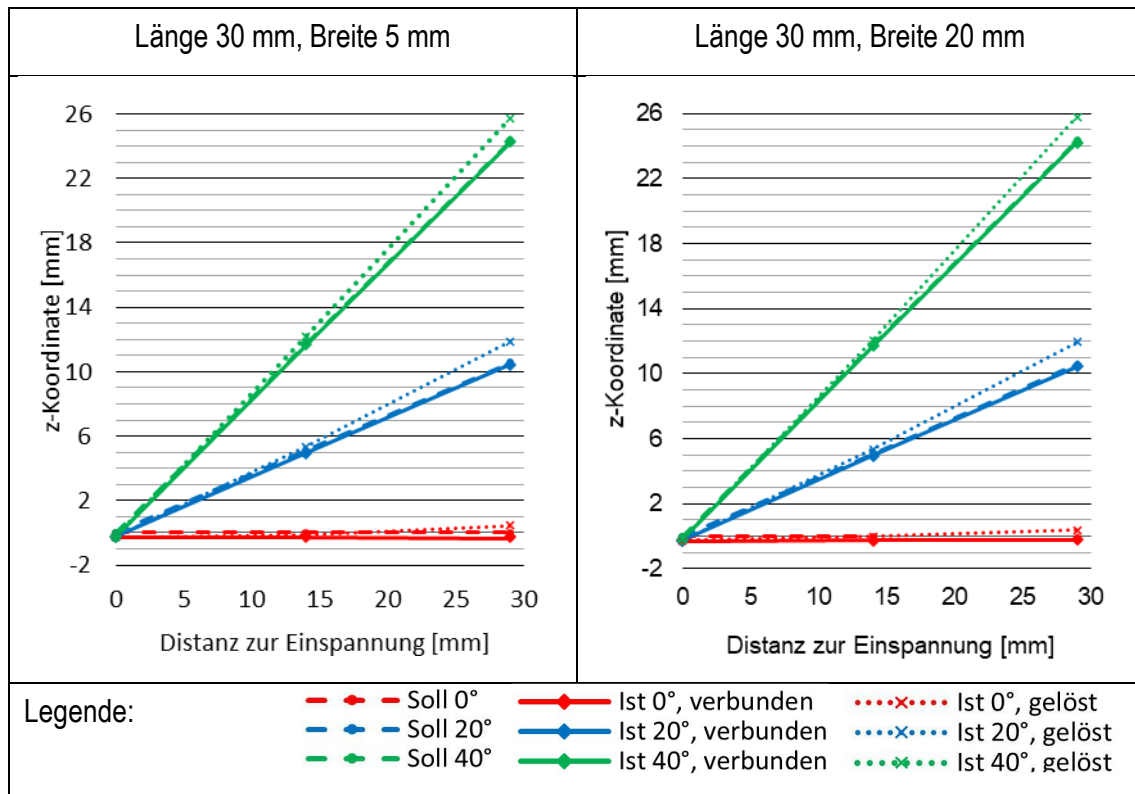


Bild 4-58: Maßhaltigkeit an den 30 mm langen Überhängen am Prüfkörper PK3.3.

Die Oberflächenrauheitsuntersuchungen zeigen, dass mit steigendem Orientierungswinkel geringere Oberflächenrauheiten einhergehen. So ist bei einem Orientierungswinkel von 40° eine gemittelte Rautiefe R_z von 491 μm zu verzeichnen während bei einem Orientierungswinkel von 0° eine Rauheit von 563 μm zu verzeichnen ist. Eine Gegenüberstellung der Oberflächen ist Bild 4-59 zu entnehmen. Auch hier kann vermutlich die verbesserte Ablösbarkeit bei den 40°-orientierten Überhängen als Begründung herangezogen werden. Darüber hinaus kann der größere Verzug der Überhänge bei einer 40°-Orientierung dazu führen, dass die Stützstrukturen bereits nach der Herstellung geschwächt sind und sich leichter entfernen lassen.

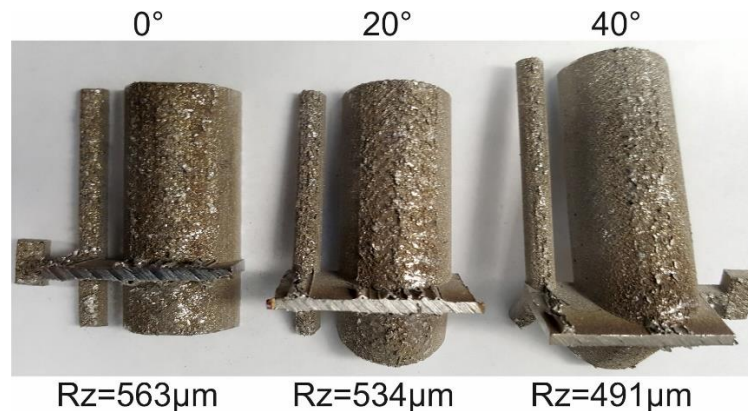


Bild 4-59: Stützstrukturreste an den Downskinflächen des Prüfkörpers PK3.3 quantifiziert durch Rz.

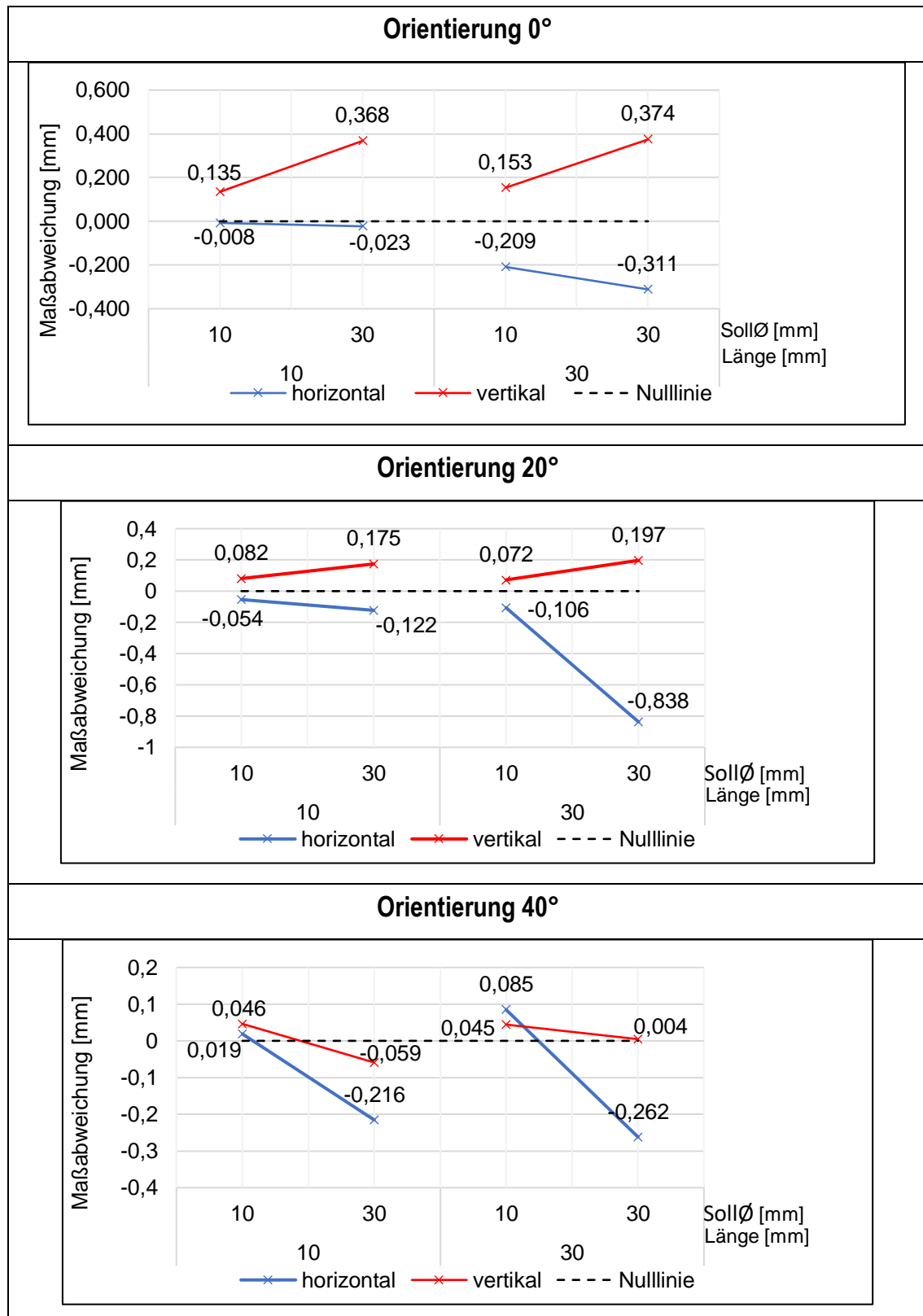
4.4.3.4 Auswertung einfach gekrümmter, innenliegender Oberflächen an PK3.4

Zur Beurteilung der Stützwirkung von einfach gekrümmten, innenliegenden Basiselementen dienen die Varianten des Prüfkörpers PK3.4. Diese Varianten unterscheiden sich in Bezug auf die Ausrichtung der abgestützten Fläche, die unterschiedlichen Innendurchmesser von 10 mm und 30 mm sowie die beiden Überhanglängen von 10 mm und 30 mm. Die Untersuchungen an diesen Prüfkörpern umfassen die Ermittlung der Form- und Maßhaltigkeit des Profilquerschnitts sowie die Messung der Oberflächenrauheit der abgestützten Flächen. Das Vorgehen bei der Messung ist in Kapitel 4.4.1.12 beschrieben.

Um die Formhaltigkeit zu vermessen, werden zwei Messlinien verwendet, um den Durchmesser sowohl horizontal als auch vertikal zu bestimmen. Dadurch kann nicht nur die Maßabweichung erfasst werden, sondern auch mögliche Formabweichung vom Kreisquerschnitt. Tabelle 4-19 zeigt, dass die vertikalen Maßabweichungen tendenziell positiv sind, während die horizontalen Maßabweichungen negativ sind und somit eine Maßunterschreitung aufweisen. Dies lässt darauf schließen, dass das Querschnittsprofil eine elliptische Form annimmt. Dieses Phänomen kann auf den Treppenstufeneffekt sowie auf unterschiedliche Wärmeableitung und damit einhergehende Schrumpfungsprozesse im oberen Bereich des Prüfkörpers zurückgeführt werden.

Die Ergebnisse zeigen eine tendenzielle Zunahme der vertikalen Maßabweichung mit zunehmendem Prüfkörperdurchmesser, während die horizontale Maßabweichung abnimmt. Dies kann auf den vergrößerten Wärmeableitungsweg bei größeren Durchmessern zurückgeführt werden, was zu erhöhten Eigenspannungen führt, wie bereits ADAM feststellte [Ada15]. Dieser Effekt ist auch bei einer Erhöhung der Überhanglänge festzustellen.

Tabelle 4-19: Untersuchungen am Querschnittsprofil des PK3.4.



Die Untersuchungen zur Oberflächenrauheit bestätigen die Ergebnisse aus Kapitel 4.4.3.3, wonach ein zunehmender Orientierungswinkel mit geringeren Oberflächenrauheiten einhergeht. Zum Beispiel wird bei einem Orientierungswinkel von 40° eine durchschnittliche Rautiefe R_z von bis zu $388\text{ }\mu\text{m}$ gemessen, während bei einem Orientierungswinkel von 0° eine Rauheit von $711\text{ }\mu\text{m}$ festgestellt wird. Es kann vermutet werden, dass die verbesserte Ablösbarkeit bei den Überhängen mit einem Orientierungswinkel von 40° diesen Effekt erklären kann.

4.4.3.5 Auswertung doppelt gekrümmten Oberflächen an PK3.5

Die Untersuchungen der Höhenbilder zeigen, dass insbesondere doppelt gekrümmte Oberflächen mit großem Krümmungsradius effektiv von den Stützstrukturen befreit werden konnten. Die gute Zugänglichkeit ermöglichte ein besseres Ablösen der Stützstrukturen. Jedoch sind die Rückstände der in einem Rastermuster angeordneten Stützstrukturen auf dem Bild 4-60 a) als deutlich erkennbare Erhebungen sichtbar. Dabei werden Unterschiede zwischen den Rückständen und der Sollgeometrie im Bereich von $1,6\text{ mm}$ deutlich. Bei Oberflächen mit kleineren Krümmungsradien konnten die Stützstrukturen wesentlich schlechter entfernt werden. Wie Bild 4-60 b) zeigt, wurden hier sogar Unterschiede zwischen dem Soll- und der Ist-Geometrie im Bereich von maximal $2,3\text{ mm}$ deutlich. Diese Tatsache ist auf die ungünstigere Entfernbarkeit der Stützstrukturen bei kleineren Radien zurückzuführen und ist als nachteilig für die Fertigungsqualität identifiziert worden.

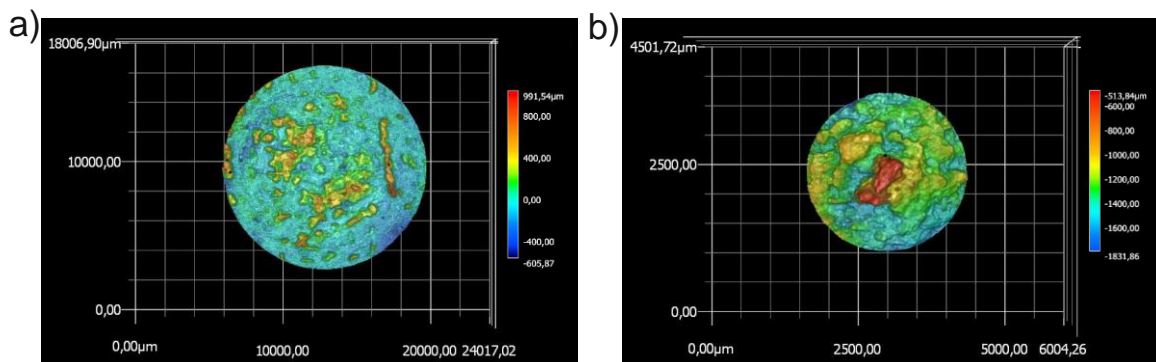


Bild 4-60: a) Höhenbild des konvexen 20 mm Durchmessers
b) Höhenbild des konvexen 5 mm Durchmessers.

4.4.3.6 Auswertung der Topplänge an PK3.6

Prüfkörper PK3.6 dient, wie schon in Kapitel 4.4.1.14 beschrieben zur Beurteilung des Einflusses des Downskinwinkels auf die Topplänge. Um die Topplänge bei unterschiedlichen Downskinwinkeln zu bestimmen, wird als Ausgangspunkt die in den Sondierungsversuchen als geeignet identifizierte Topplänge von $0,5\text{ mm}$ bei einem 0° -Downskinwinkel verwendet. Wie in Bild 4-61 zu sehen ist, nimmt mit steigendem Downskinwinkel die durchschnittliche

Toplänge zu. So liegt die messbare Toplänge bei einem Downskinwinkel von 10° schon bei 0,547 mm und steigt bis zu einem Downskinwinkel von 40° auf 0,735 mm. Die Ergebnisse lassen darauf schließen, dass der Einfluss der Toplänge auf die Qualitätskriterien, der bereits in Kapitel 4.4.2 nachgewiesen wurde, zusätzlich durch die Orientierung der Bauteilunterseite beeinflusst wird.

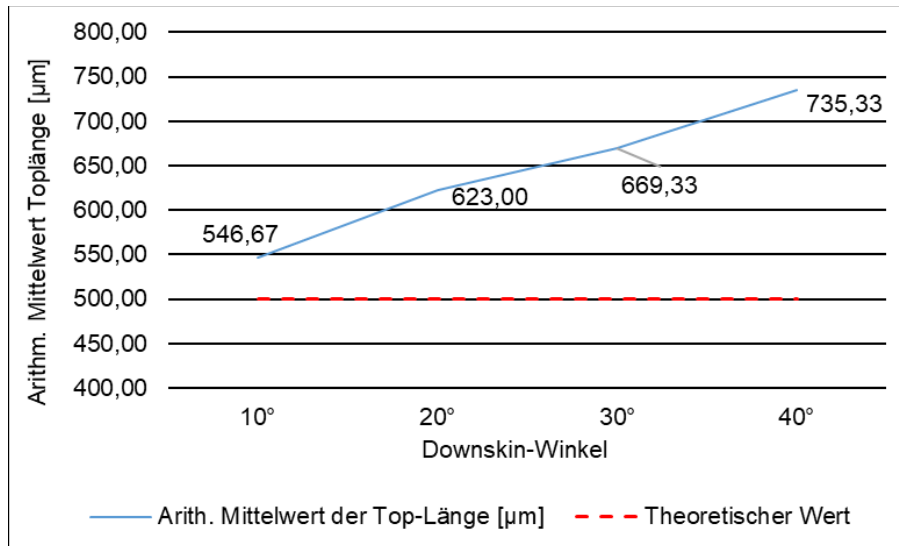


Bild 4-61: Toplänge in Abhängigkeit des Downskinwinkels [Man20].

4.4.3.7 Auswertung der Ablösbarkeit bei eingeschränkter Zugänglichkeit.

Bei dem zweiseitig zugänglichen Prüfkörperbereich konnten die Stützstrukturen gut mit einfachem Handwerkzeug in der gegebenen Zeit von zwei Minuten entfernt werden. Allerdings sind Reste in der hinteren Ecke des Prüfbereichs verblieben, wie in Bild 4-62 zu sehen ist. Zudem war eine beträchtliche Menge an Pulver in den Stützstrukturen eingeschlossen. Eine mögliche Verbesserung könnte darin bestehen, die Perforation der Stützstrukturen anzupassen, um unaufgeschmolzenes Pulver vor dem Ablösen der Stützstrukturen entfernen zu können. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass dies nicht Teil der aktuellen Untersuchung war und keinen variablen Faktor darstellte.



Bild 4-62: Eingeschlossenes Pulver und Stützenreste am Prüfkörper 3.7 nach [Man21].

Bei der einseitigen Zugänglichkeit konnten die Stützstrukturen nicht mit einfachen Handwerkzeugen entfernt werden. Hier fehlen Ansatzpunkte zum Beispiel für eine Zange. Erst mit Verwendung eines Multifunktionswerkzeugs mit Frässpitze konnten einige Stützstrukturen in der gegebenen Zeit entfernt werden (s. Bild 4-63). Auch hier war die Problematik des eingeschlossenen, unaufgeschmolzenen Pulvers vorhanden.

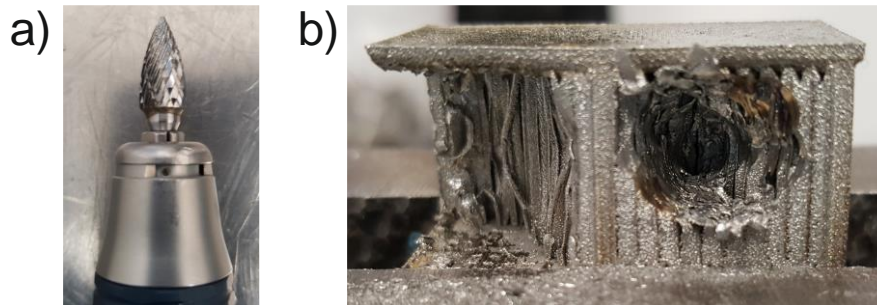


Bild 4-63: a) verwendetes Werkzeug zur einseitigen Stützstrukturentfernung b) Versuch die Stützstrukturen bei einseitiger Zugänglichkeit zu entfernen nach [Man21]

Es kann festgehalten werden, dass die in den Sondierungsversuchen ausgewählte Stützstrukturparameterstufenkombination grundsätzlich für den Einsatz in schwer zugänglichen Bereichen geeignet ist, jedoch mit einem erhöhten Aufwand für die Nachbearbeitung verbunden ist und durch die Pulverrückstände im Hinblick auf die Arbeitssicherheit kritisch zu betrachten ist.

5 Herleitung von Konstruktionsrichtlinien

Im Folgenden wird der Schritt 5 der in Bild 3-1 abgebildeten Methode erörtert. Dabei handelt es sich um die konkrete Herleitung von Konstruktionsrichtlinien.

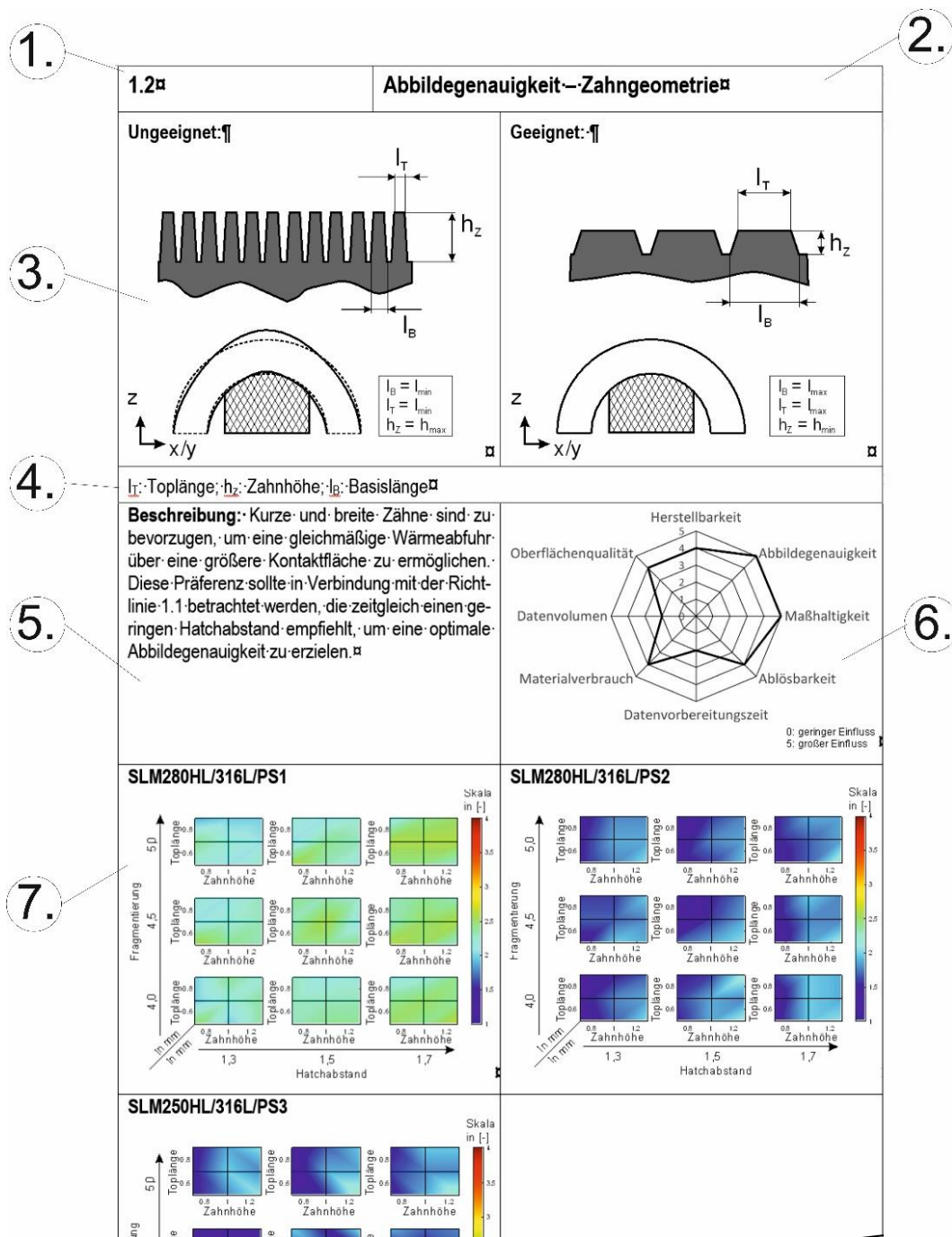
5.1 Aufbau der Richtlinien

Um ein einheitliches Design für die Konstruktionsrichtlinien zu schaffen, werden die Richtlinien nach der in Tabelle 5-1 aufgeführte Struktur aufgebaut. Diese Darstellung erlaubt es relevante Inhalte klar und eindeutig zu vermitteln, um die Richtlinie ohne weitere Erläuterungen abzubilden [DeG21]. Dazu sind die im Folgenden durchnummerierten und in Tabelle 5-1 exemplarisch aufgeführten Felder auszufüllen.

1. Nummerierung: Diese ermöglicht eine geordnete Strukturierung, vereinfacht das spätere Auffinden und ermöglicht eine präzise Referenzierung. Darüber hinaus kann eine spätere Erweiterung ermöglicht werden, indem eine zweigeteilte Nummerierung verwendet wird. Die erste Ziffer gibt dabei die Hauptgruppe an, die für das durch die Richtlinie beeinflusste Qualitätskriterium steht und die zweite Ziffer gibt den Stützstrukturparameter an, der das Qualitätskriterium beeinflusst.
2. Titel: Dieser ist darauf ausgerichtet, die Richtlinie in einer prägnanten Form zu erläutern und verdeutlicht ebenfalls, welcher Stützstrukturparameter welches Qualitätskriterium gemäß Kapitel 4.1 beeinflusst.
3. Graphische Vergleichsdarstellung: Diese zeigt eine ungeeigneten Stützstrukturgestaltung und einer besser geeigneten Alternative. Die Abbildungen für eine ungeeignete Stützstrukturkonstruktion dient dazu verbreitete Fehler bei der Stützstrukturgestaltung zu verdeutlichen. Die Darstellung einer geeigneten Stützstrukturkonstruktion hilft dabei, diese Fehler zu erkennen und zu korrigieren bzw. eine verbesserte Alternative vorzuschlagen. Dabei wird verdeutlicht, welche Stützstrukturparameter angepasst werden sollten, um ein besseres Ergebnis für das betrachtete Qualitätskriterium zu erzielen.
4. Legende: Diese zeigt die verwendeten Variablen in der graphischen Darstellung auf.
5. Beschreibung: Beschreibt die Richtlinien in textueller Form. Dieser Bereich umfasst Anweisungen zur optimalen Anwendung der Richtlinie sowie zusätzliche Hintergrundinformationen oder Verweise auf andere Richtlinien, die in Kombination betrachtet werden sollten.
6. Spinnennetzdiagramm: Dieses Diagramm bietet eine kompakte Zusammenfassung der Auswirkungen der Richtlinien auf die verschiedenen Qualitätskriterien. Dabei steht ein hoher Wert für einen bedeutenden Einfluss und ein niedriger Wert für einen geringen Einfluss.

7. Gesamtergebnisdarstellungen: Diese Diagramme werden für die drei betrachteten Prozessparametersätze (s. Tabelle 4-2) aufgeführt, damit der Nutzer direkt geeignete Stützstrukturparameter für seinen verwendeten Prozessparametersatz auswählen kann. Zusätzlich ist platz für zusätzliche Prozessparametersätze vorgesehen und die Tabelle ist zukünftig erweiterbar.

Tabelle 5-1: Aufbau der Konstruktionsrichtlinien

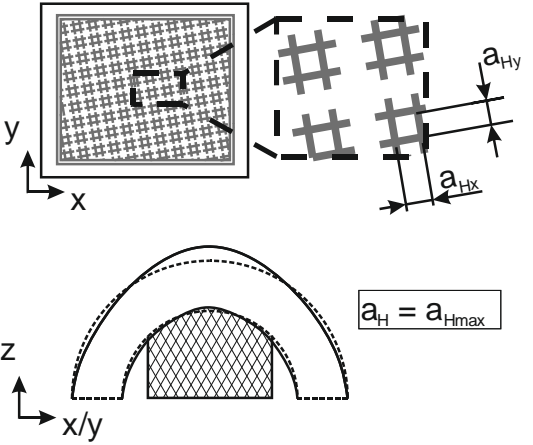
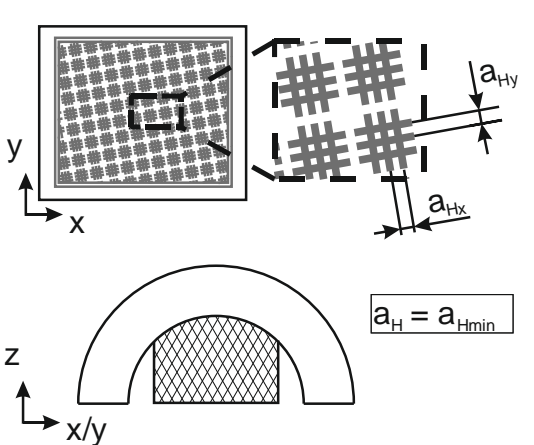


In der unteren optionalen Zeile werden Versuchsergebnisse zum Beispiel in Form der Gesamtergebnisdarstellungen aufgeführt, aus denen der Anwender die geeigneten Stützstrukturparameter ablesen kann, wie in Kapitel 4.2.3 beschrieben. Für jede Gesamtergebnisdarstellung wird der Gültigkeitsbereich in der Form „Maschine/Material/Prozessparametersatz“ (vgl. Tabelle 4-4) als Überschrift angegeben. Tendenziell ist es möglich, weitere Zeilen am unteren Ende hinzuzufügen, um Gesamtergebnisdarstellungen für weitere Kombinationen von Maschinen, Materialien und Prozessparametern bereitzustellen. Dadurch wird auch eine Erweiterung für zukünftige Kombinationen von Maschinen, Materialien und Prozessparametern ermöglicht.

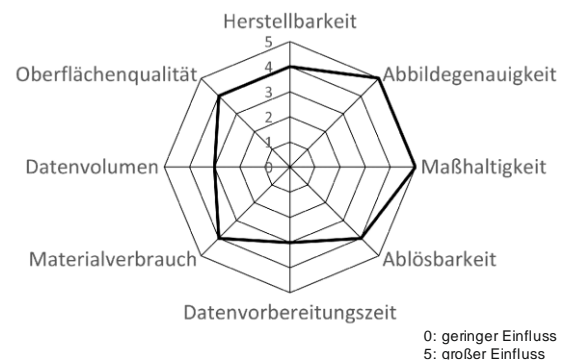
5.2 Richtlinie 1.1: Abbildegengenauigkeit – Hatchabstand

Gemäß den Erkenntnissen aus Kapitel 4.4.2.1 lässt sich feststellen, dass eine Reduzierung des Hatchabstands zu einer verbesserten Abbildegengenauigkeit führt. Eine geringere Distanz zwischen den einzelnen Hatchwänden führt zu einer Verringerung der durch Wärme induzierten Verzüge. Dies ist darauf zurückzuführen, dass mehr Stützstrukturen unterhalb der Downskinflächen platziert werden können, wodurch eine verbesserte Wärmeableitung gewährleistet wird.

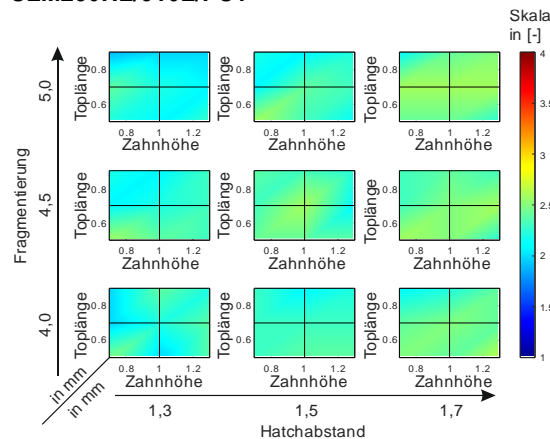
Tabelle 5-2: Konstruktionsrichtlinie zum Einfluss des Hatchabstands auf die Abbildegengenauigkeit.

1.1	Abbildegengenauigkeit – Hatchabstand
<p>Ungeeignet:</p>  <p>$a_H = a_{Hmax}$</p>	<p>Geeignet:</p>  <p>$a_H = a_{Hmin}$</p>
<p>a_{Hx}, a_{Hy}: Hatchabstand</p>	

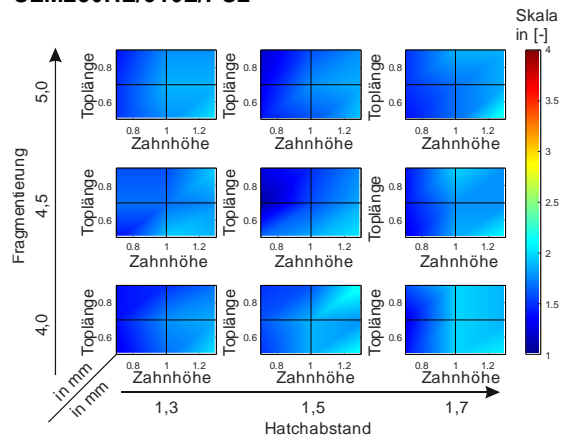
Beschreibung: Ein reduzierter Hatchabstand trägt zu einer verbesserten Abbildegenauigkeit bei. Durch die Einführung zusätzlicher Stützstrukturwände wird einem thermisch bedingten Verzug entgegengewirkt, wodurch die Form des Bauteils beibehalten wird. Insbesondere bei geringen Schichtdicken zeigt sich dieser Effekt deutlich. Es ist wichtig, diese Regel in Kombination mit Richtlinie 1.2 zu beachten, die gleichzeitig eine geringe Zahnhöhe und eine kurze Toplänge empfiehlt, um optimale Ergebnisse in Bezug auf die Abbildegenauigkeit zu erzielen.



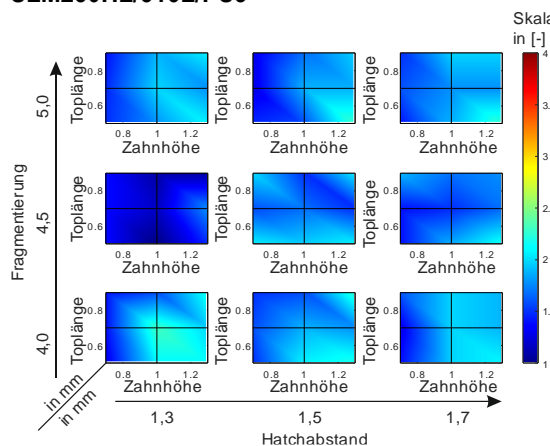
SLM280HL/316L/PS1



SLM280HL/316L/PS2



SLM250HL/316L/PS3



...

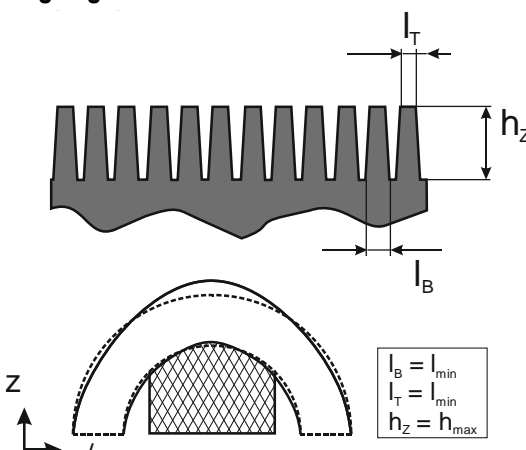
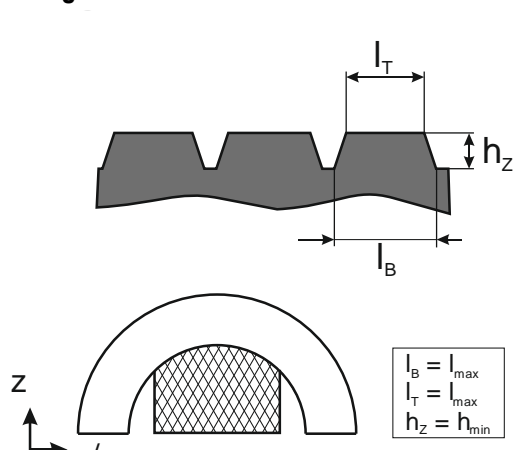
Es ist zu beachten, dass der Hatchabstand nicht nur einen maßgeblichen Einfluss auf die Abbildegenauigkeit hat, sondern auch auf die Maßhaltigkeit eines Bauteils sowie auf die Ablösbarkeit, Herstellbarkeit und Oberflächenqualität, ebenso wie auf den Materialverbrauch. Die Auswirkungen auf die Datenvorbereitungszeit und das Datenvolumen sind hingegen geringfügiger. Die Richtlinie 1.1 kann in Kombination mit der Richtlinie 1.2 angewendet werden, um die Abbildegenauigkeit durch eine Anpassung der Zahngeometrie weiterhin positiv zu beeinflussen. Für die hier betrachteten drei Maschine-Material-Prozessparametersatz-Kombinationen können geeignete Werte für den Hatchabstand aus den Gesamtergebnisdarstellungen in Tabelle 5-2 entnommen werden.

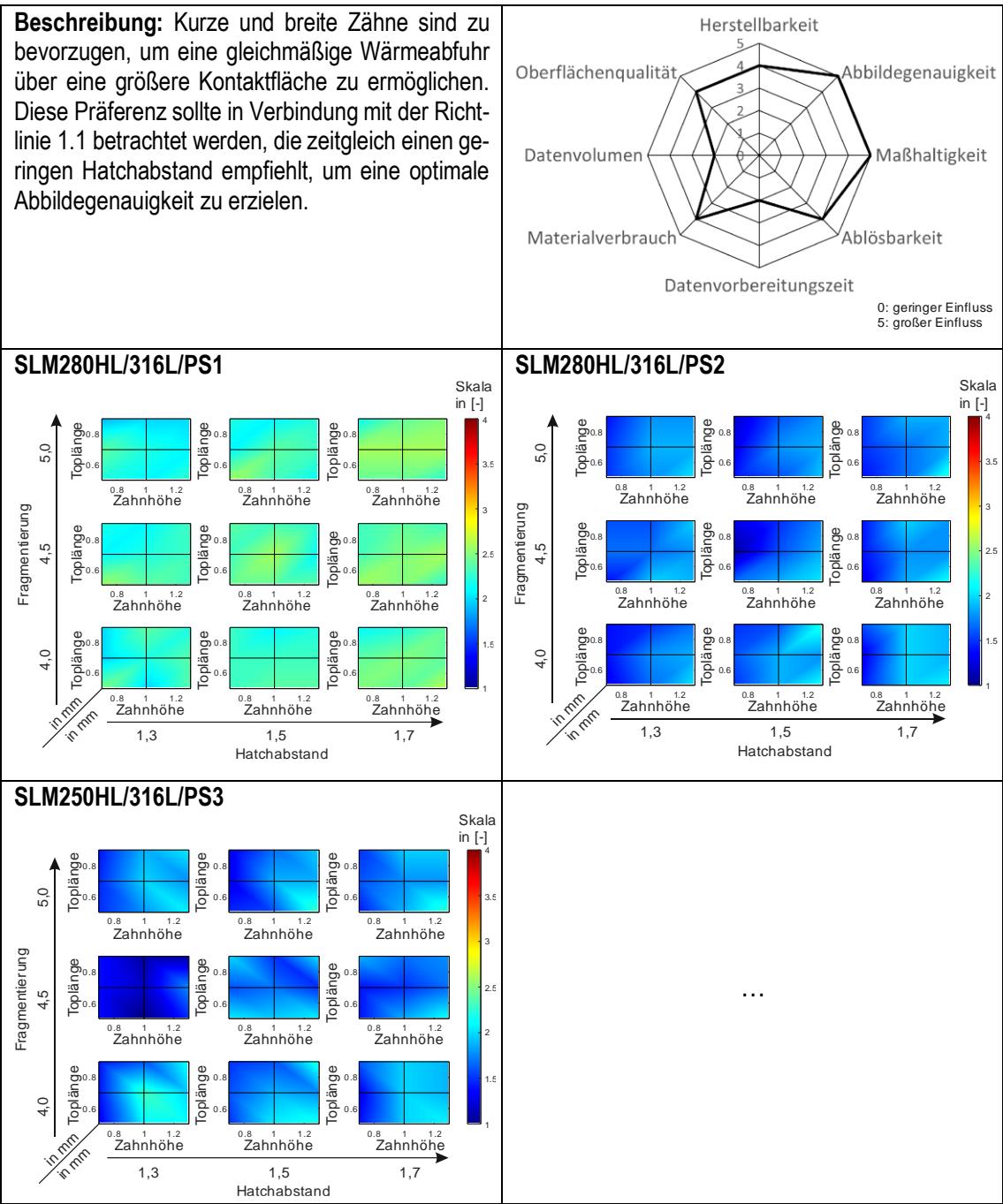
5.3 Richtlinie 1.2: Abbildegengenauigkeit – Zahngeometrie

Aus den Vorsondierungsuntersuchungen zur Abbildegengenauigkeit aus Kapitel 4.4.2.1 lässt sich des Weiteren eine Konstruktionsrichtlinie ableiten, die eine Empfehlung gibt, wie die Zähne der Stützstruktur zu gestalten sind, um einen positiven Einfluss auf die Abbildegengenauigkeit zu haben (s. Tabelle 5-3).

Um eine verbesserte Wärmeabfuhr und geringeren Verzug zu gewährleisten, sollten die Zähne mit einer großen Toplänge und einer geringen Zahnhöhe ausgeführt werden. Diese Gestaltung erhöht die Anbindungsfläche zwischen der Stützstruktur und dem Bauteil. Eine Änderung dieser Faktoren hat zudem positive Auswirkungen auf die Herstellbarkeit und die Maßhaltigkeit. Jedoch beeinflussen sie die Ablösbarkeit, den Materialverbrauch und die Oberflächenqualität negativ, da eine massivere Zahngeometrie mehr Material benötigt und schwieriger, rückstandslos vom Bauteil zu entfernen ist. Die Auswirkungen auf die Datenvorbereitungszeit und das Datenvolumen sind dagegen geringfügig. Geeignete Stützstrukturparameter können den Gesamtergebnisdarstellungen in Tabelle 5-3 entnommen werden.

Tabelle 5-3: Konstruktionsrichtlinie zum Einfluss der Zahngeometrie auf die Abbildegengenauigkeit.

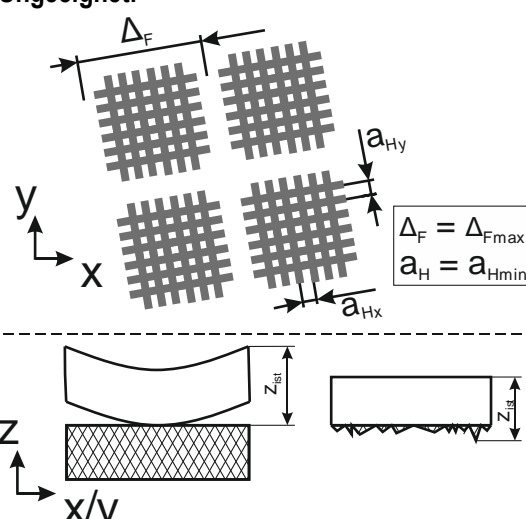
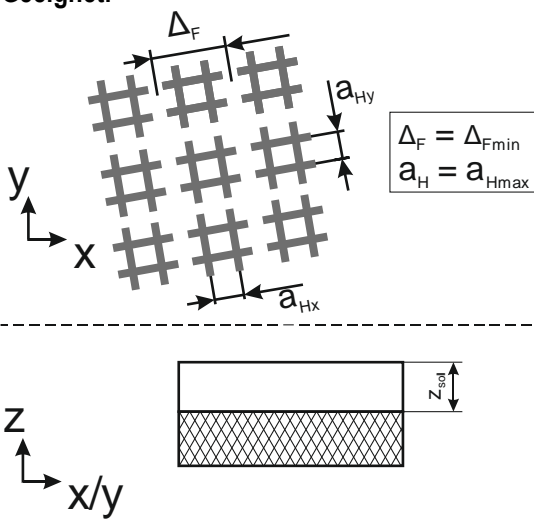
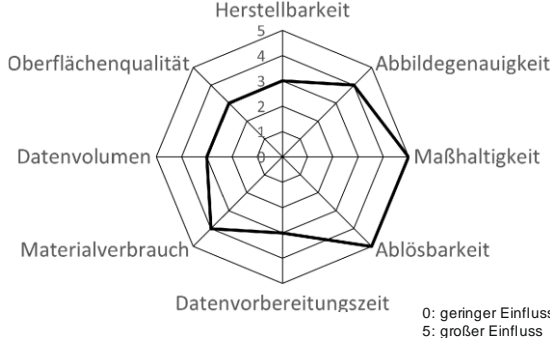
1.2	Abbildegengenauigkeit – Zahngeometrie
<p>Ungeeignet:</p>  <p> $l_B = l_{\min}$ $l_T = l_{\min}$ $h_z = h_{\max}$ </p>	<p>Geeignet:</p>  <p> $l_B = l_{\max}$ $l_T = l_{\max}$ $h_z = h_{\min}$ </p>
l_T : Toplänge; h_z : Zahnhöhe; l_B : Basislänge	

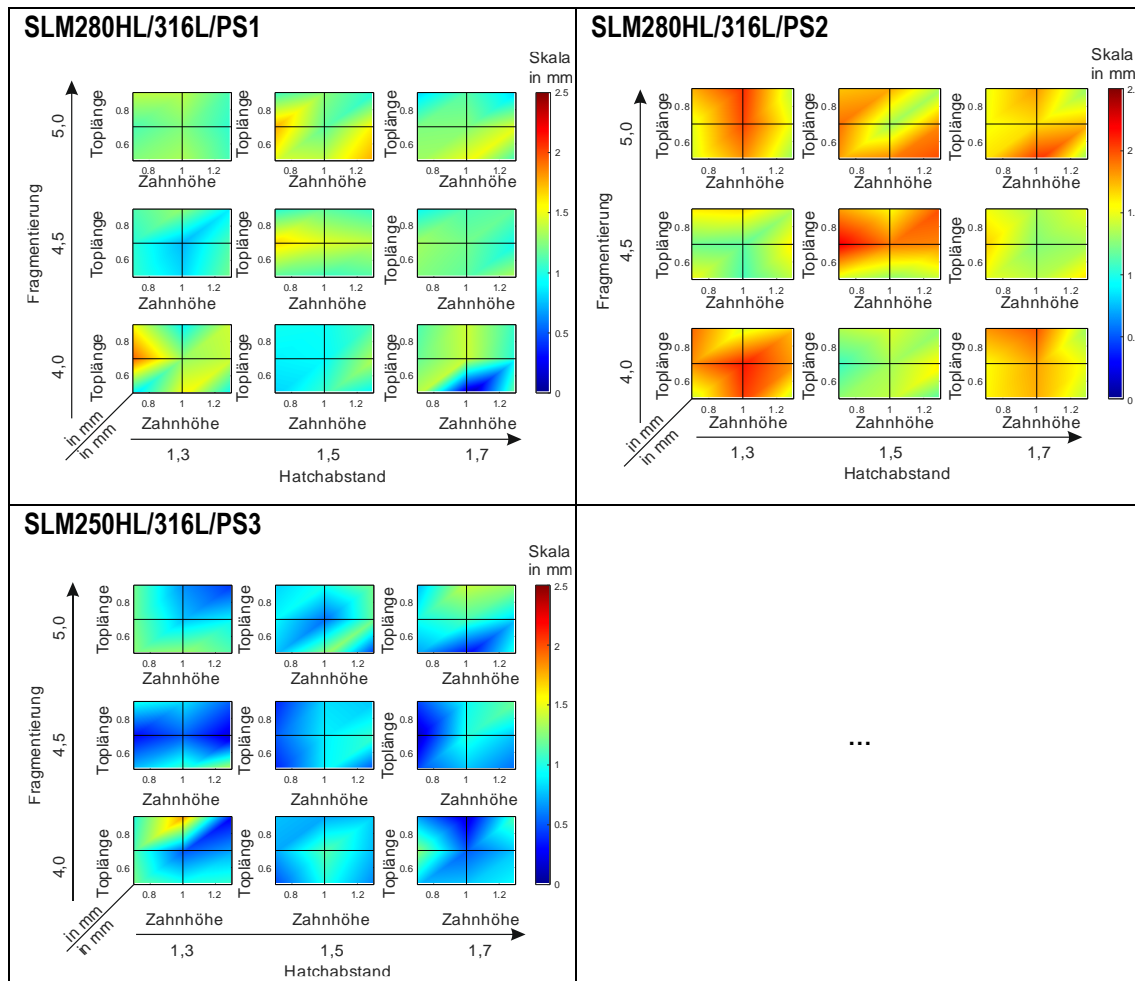


5.4 Richtlinie 2.1: Maßhaltigkeit Z-Richtung – Hatchabstand und Fragmentierung

Für die Maßhaltigkeit in Z-Richtung, wurde in Kapitel 4.4.2.2 festgestellt, dass die Kombination aus einer Erhöhung des Hatchabstands und eine Verringerung der Fragmentierung zu den geringsten Maßabweichungen führt. Dadurch wird ein Kompromiss aus einer Verringerung der Anzahl an Stützstrukturwänden bei gleichzeitiger ausreichender Wärmeabfuhr bewirkt. So wird einerseits der Verzug durch eine ausreichende Wärmeabfuhr gering gehalten und andererseits Anhaftungen an der Downskinfläche minimiert, was wiederum einen positiven Effekt auf die Maßhaltigkeit hat. Dieser Sachverhalt wird in der Konstruktionsrichtlinie in Tabelle 5-4 festgehalten.

Tabelle 5-4: Konstruktionsrichtlinie zum Einfluss der Wechselwirkung aus Hatchabstand und Fragmentierung auf die Maßhaltigkeit in Z-Richtung.

2.1	Maßhaltigkeit Z-Richtung – Hatchabstand und Fragmentierung
<p>Ungeeignet:</p>  <p>$\Delta_F = \Delta_{Fmax}$ $a_H = a_{Hmin}$</p>	<p>Geeignet:</p>  <p>$\Delta_F = \Delta_{Fmin}$ $a_H = a_{Hmax}$</p>
a_{Hx}, a_{Hy} : Hatchabstand; Δ_F : Fragmentierungsintervall	
<p>Beschreibung: Es liegt eine statistisch signifikante Wechselwirkung zwischen der Fragmentierung und dem Hatchabstand vor. Eine Kombination aus einem großen Hatchabstand und einer geringen Fragmentierung führt in Bezug auf die Z-Maßhaltigkeit zu den geringsten Maßabweichungen. Die Auswahl dieser Einstellung gewährleistet eine Reduzierung der Anzahl an Wänden, um Anhaftungen zu minimieren und gleichzeitig eine gute Wärmeabfuhr. Siehe auch Konstruktionsrichtlinie 2.2.</p>	 <p>0: geringer Einfluss 5: großer Einfluss</p>

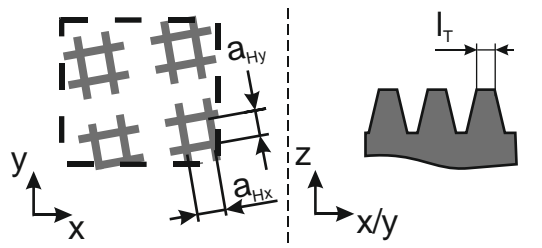
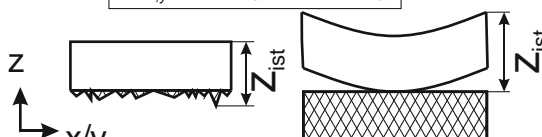
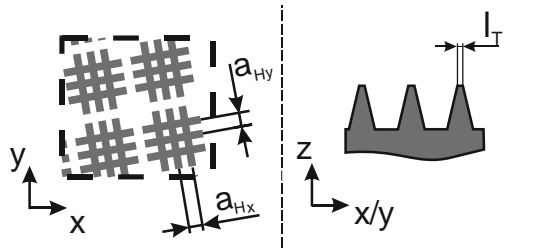
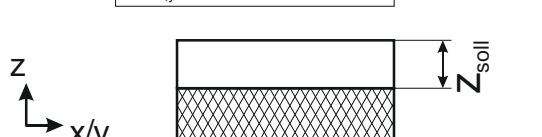
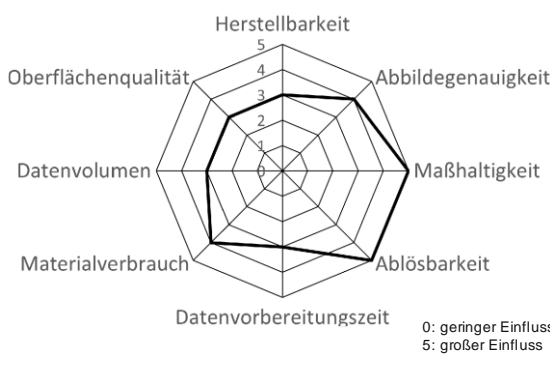


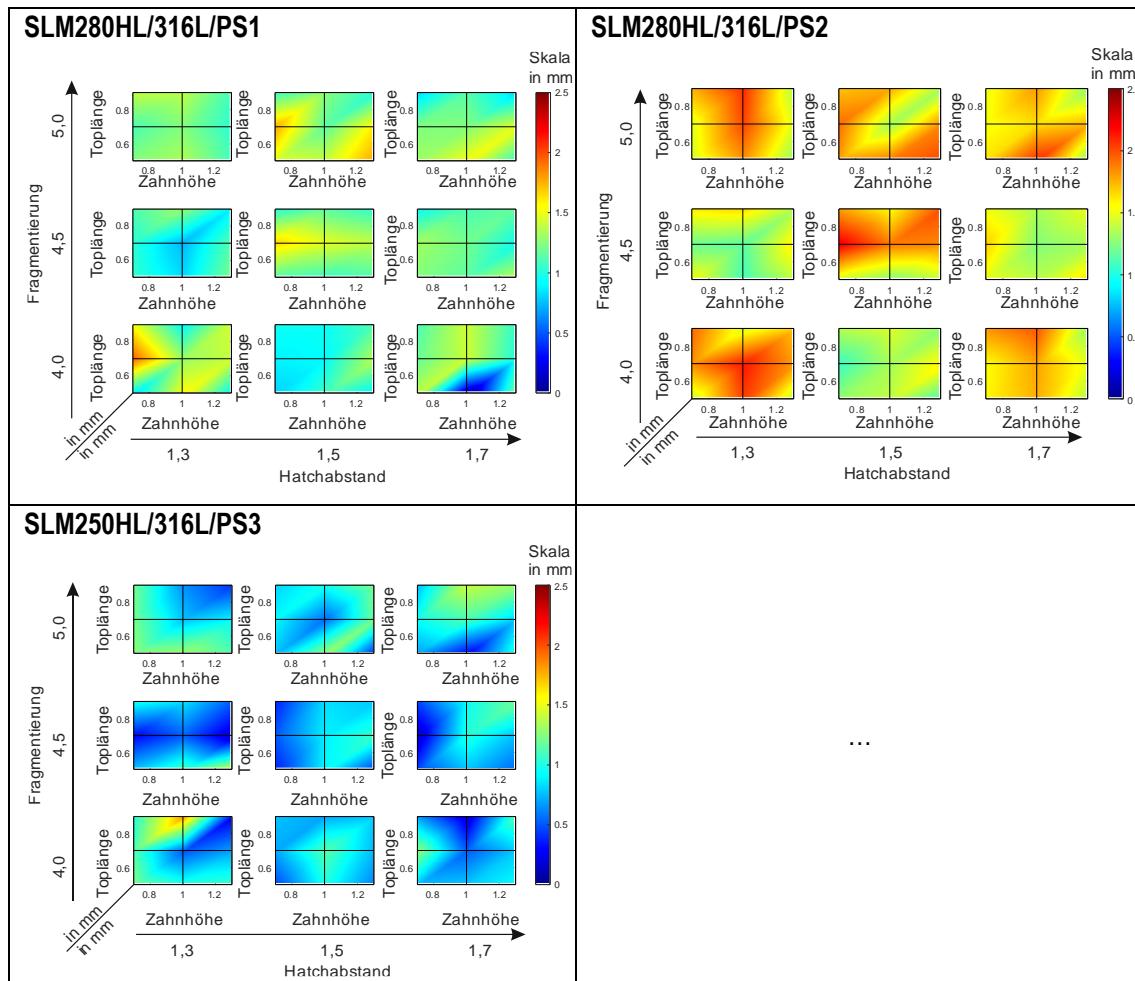
Eine Änderung des Hatchabstands und der Fragmentierung hat darüber hinaus einen maßgeblichen Effekt auf die Ablösbarkeit, die Oberflächenqualität und den Materialverbrauch sowie auf die Abbildegenauigkeit. Jedoch besteht eine geringere Korrelation zwischen der Konstruktionsrichtlinie und der benötigten Zeit für die Datenvorbereitung sowie dem Datenvolumen. Geeignete Stützstrukturparameter können den Gesamtergebnisdarstellungen in Tabelle 5-4 entnommen werden.

5.5 Richtlinie 2.2: Maßhaltigkeit Z-Richtung – Hatchabstand und Toplänge

Auch die Wechselwirkung zwischen dem Hatchabstand (A) und der Toplänge (C) wirkt sich signifikant auf die Maßhaltigkeit in Z-Richtung aus. Eine Reduzierung des Hatchabstands in Kombination mit einer Reduzierung der Toplänge führt zu einer verbesserten Maßhaltigkeit.

Tabelle 5-5: Konstruktionsrichtlinie zum Einfluss der Wechselwirkung aus Hatchabstand und Fragmentierung auf die Maßhaltigkeit in Z-Richtung.

2.2	Maßhaltigkeit Z-Richtung – Hatchabstand und Toplänge
<p>Ungeeignet:</p>  <p>$a_{Hx,y} = a_{Hmax}; l_T = l_{Tmax}$</p> 	<p>Geeignet:</p>  <p>$a_{Hx,y} = a_{Hmin}; l_T = l_{Tmin}$</p> 
l_T : Toplänge; $a_{Hx,y}$: Hatchabstand	
<p>Beschreibung: Es liegt eine statistisch signifikante Wechselwirkung zwischen der Toplänge und dem Hatchabstand vor. Insbesondere eine Kombination aus einem geringen Hatchabstand und einer geringen Toplänge führt in Bezug auf die Z-Maßhaltigkeit zu den geringsten Maßabweichungen. Die Auswahl dieser Einstellung gewährleistet einerseits eine effiziente Ableitung von Wärme durch ausreichend vorhandene Stützstrukturwände durch den geringen Hatchabstand. Andererseits wird die Toplänge auf ein Minimum reduziert, um Anhaftungen zu minimieren. Es ist anzumerken, dass diese Richtlinie in Verbindung mit der Richtlinie 2.1 zu betrachten ist.</p>	 <p>0: geringer Einfluss 5: großer Einfluss</p>



Diese Verbesserung kann durch einen Kompromiss zwischen geringerem Verzug durch mehrere Stützstrukturwände und der Verringerung von Anhaftungen durch eine kürzere Topplänge erklärt werden. Eine simultane Anpassung des Hatchabstands und der Topplänge hat signifikante Auswirkungen auf die Ablösbarkeit, die Oberflächenqualität, den Materialverbrauch und die Abbildegenauigkeit. Jedoch besteht eine geringere Korrelation zwischen der Konstruktionsrichtlinie und der erforderlichen Zeit für die Datenvorbereitung sowie dem Datenvolumen. Geeignete Stützstrukturparameter können den Gesamtergebnisdarstellungen in Tabelle 5-5 entnommen werden.

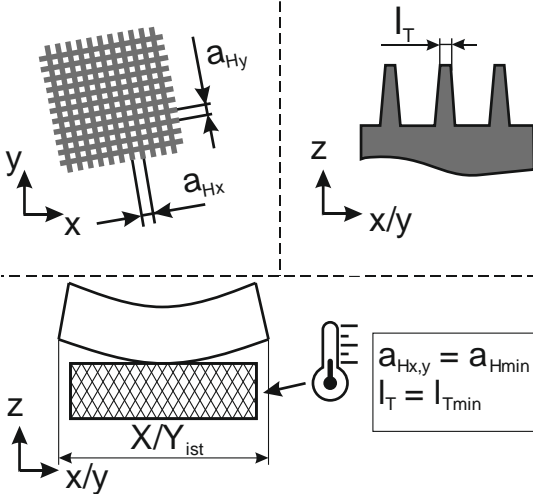
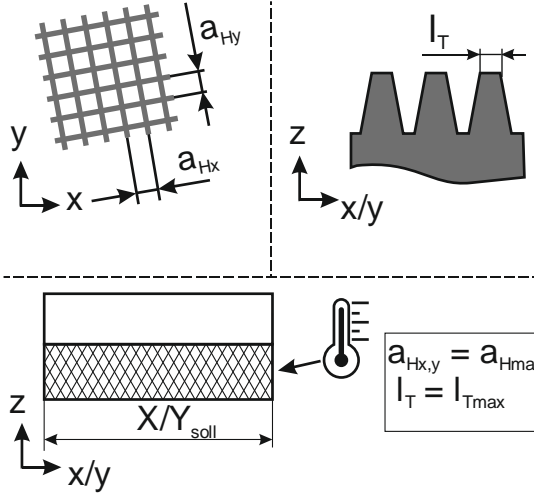
5.6 Richtlinie 3.1: Maßhaltigkeit XY-Richtung – Hatchabstand und Topplänge

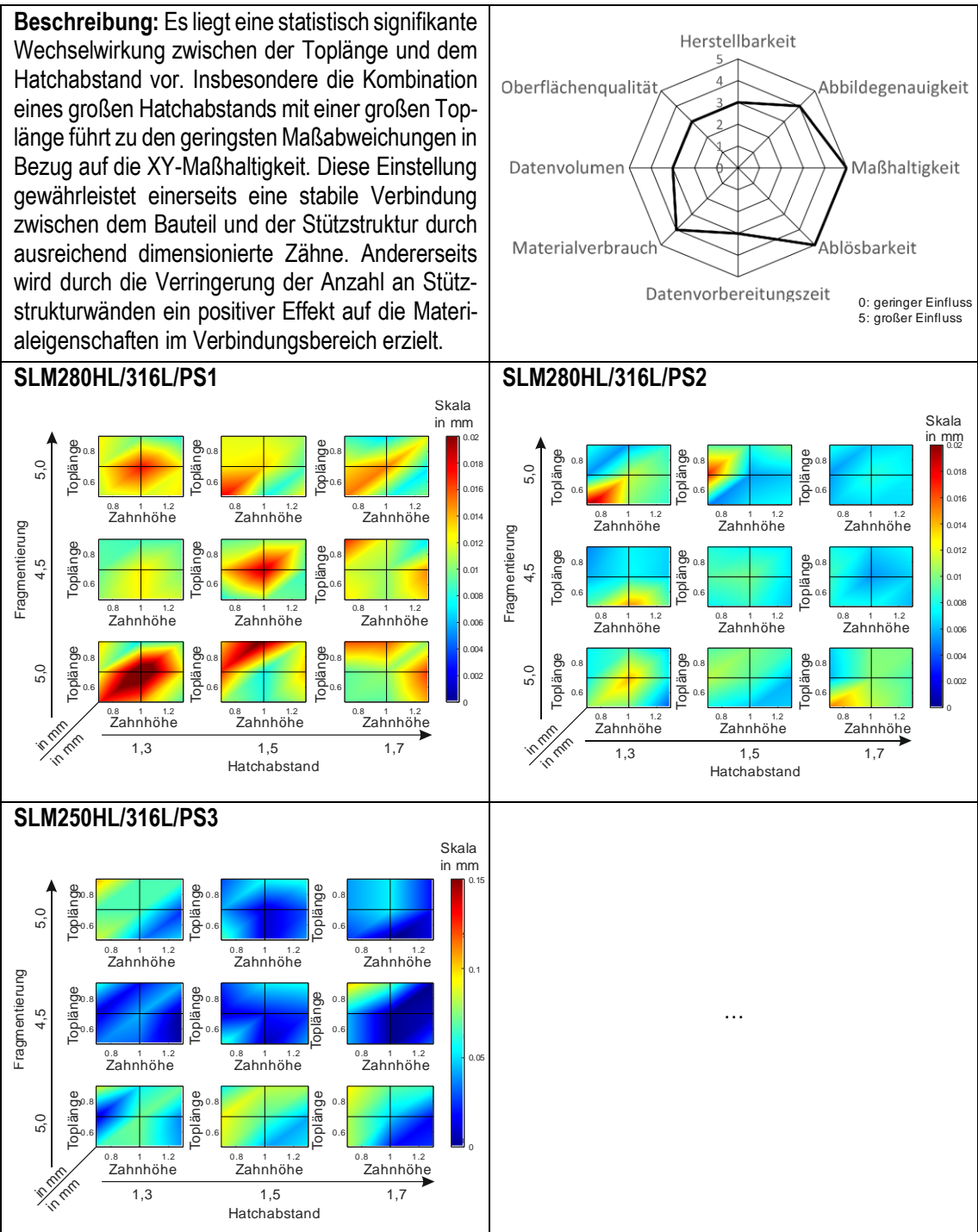
Die Auswertung in Kapitel 5.2.3 ergab, dass die Wechselwirkung zwischen dem Hatchabstand und der Topplänge einen signifikanten Einfluss auf die Maßhaltigkeit in der XY-Richtung hat. Es wurde festgestellt, dass ein größerer Hatchabstand in Kombination mit einer größeren Topplänge eine positive Wirkung auf die Maßhaltigkeit in der XY-Richtung hat. Dass eine erhöhte Topplänge einen positiven Effekt auf die Maßhaltigkeit hat, erscheint plausibel. Durch die breiteren Zähne kann die Wärme besser abgeführt werden und eine verbesserte Stabilität der Verbindung zwischen Stützstruktur und Bauteil realisiert werden. Die Ursache-Wirkungsbeziehung zwischen einer Reduzierung der Stützstrukturwände durch

eine Erhöhung des Hatchabstands und einer verbesserten Maßhaltigkeit erscheint jedoch nicht plausibel. Hier kann der erhöhte Wärmeeintrag auf die geringere Anzahl an Stützstrukturwänden einen positiven Effekt auf die Mikrostruktur bewirken. Die Stützstrukturwände werden praktisch gehärtet, was zu einer verbesserten Resistenz gegenüber Verformung in XY-Richtung führen könnte. Angesichts der geringen Maßabweichungen in der XY-Richtung gemäß Bild 5-24 lässt sich argumentieren, dass die Signifikanz des Hatchabstands möglicherweise nicht so stark ausgeprägt ist, wie es in den Pareto-Diagrammen in Bild 5-23 dargestellt wird. Bei der Erstellung der Konstruktionsrichtlinie in Tabelle 6-6 wird jedoch von der Annahme ausgegangen, dass der erhöhte Wärmeeintrag bei einer geringeren Anzahl von Stützstrukturwänden einen positiven Effekt hat.

Eine gleichzeitige Anpassung des Hatchabstands und der Toplänge zeigt signifikante Auswirkungen auf die Ablösbarkeit, Oberflächenqualität, Materialverbrauch und Abbildegenauigkeit. Allerdings besteht eine geringere Korrelation zwischen der Konstruktionsrichtlinie und dem erforderlichen Zeitaufwand für die Datenvorbereitung sowie dem Datenvolumen. Geeignete Stützstrukturparameter können den Gesamtergebnisdarstellungen in Tabelle 5-6 entnommen werden.

Tabelle 5-6: Konstruktionsrichtlinie zum Einfluss der Wechselwirkung aus Hatchabstand und Toplänge auf die Maßhaltigkeit in XY-Richtung.

3.1	Maßhaltigkeit XY-Richtung – Hatchabstand und Toplänge
<p>Ungeeignet:</p>  <p>l_T: Toplänge; $a_{Hx,y}$: Hatchabstand</p>	<p>Geeignet:</p> 

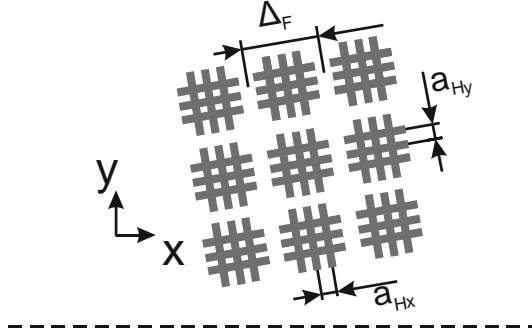
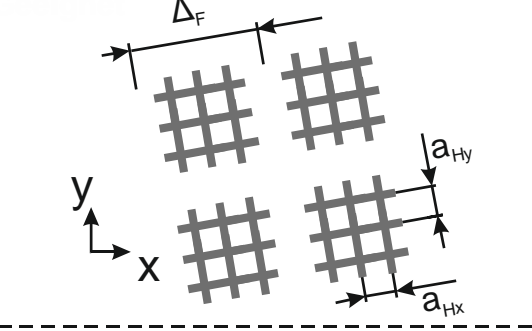


5.7 Richtlinie 4.1: Ablösbarkeit – Hatchabstand und Fragmentierung

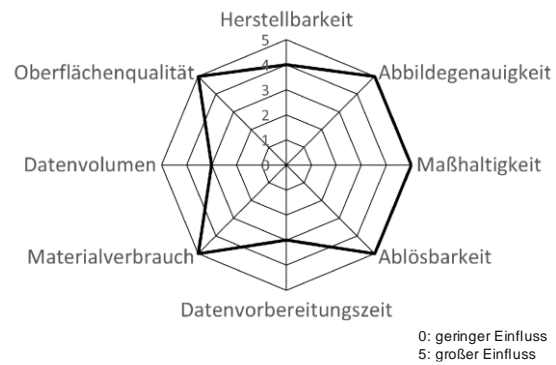
Die Auswertung in Kapitel 4.4.2.4 ergab, dass die Wechselwirkung zwischen dem Hatchabstand und der Fragmentierung den größten Effekt auf die Ablösbarkeit hat. Dabei wurde festgestellt, dass ein größerer Hatchabstand in Kombination mit einer größeren Fragmentierung die Ablösbarkeit verbessert. Dies lässt sich mit der Verringerung der Kontaktfläche zwischen Stützstruktur und Bauteil erklären, die bei einem großen Hatchabstand reduziert wird. Der positive Effekt des größeren Fragmentierungsintervalls wird nicht direkt deutlich, da durch ein größeres Fragmentierungsintervall die Anzahl an Stützstrukturwänden erhöht wird. Allerdings bewirkt eine größere Fragmentierung zugleich eine bessere Wärmeableitung, was wiederum zu einer Vermeidung von festigkeitssteigernden Effekten im Kontaktbereich führt. Diese Festigkeitssteigerung entsteht durch eine Veränderung des mikrostrukturellen Gefüges durch die prozessinduzierte Wärme, welche zu einem Wachstum der Gefügekörner über die Grenze zwischen Stützstruktur und Bauteil hinaus führt. Dieser Effekt wurde bereits von YANG beobachtet [YYK+21].

Als Resultat wird eine gesteigerte Festigkeit in der Verbindungszone erzielt, was wiederum zu einer schlechteren Ablösbarkeit führt. Die daraus resultierende Konstruktionsrichtlinie ist in Tabelle 5-7 aufgeführt.

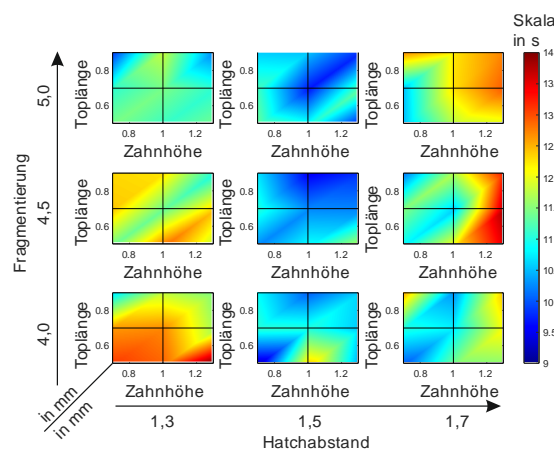
Tabelle 5-7: Konstruktionsrichtlinie zum Einfluss der Wechselwirkung aus Hatchabstand und Fragmentierung auf die Ablösbarkeit.

4.1	Ablösbarkeit – Hatchabstand und Fragmentierung
<p>Ungeeignet:</p>  <div data-bbox="619 1691 778 1780"> $\Delta_F = \Delta_{Fmin}$ $a_{Hx,y} = a_{Hmin}$ </div>	<p>Geeignet:</p>  <div data-bbox="1193 1691 1353 1780"> $\Delta_F = \Delta_{Fmax}$ $a_{Hx,y} = a_{Hmax}$ </div>
Δ_F : Fragmentierungsintervall; $a_{Hx,y}$: Hatchabstand	

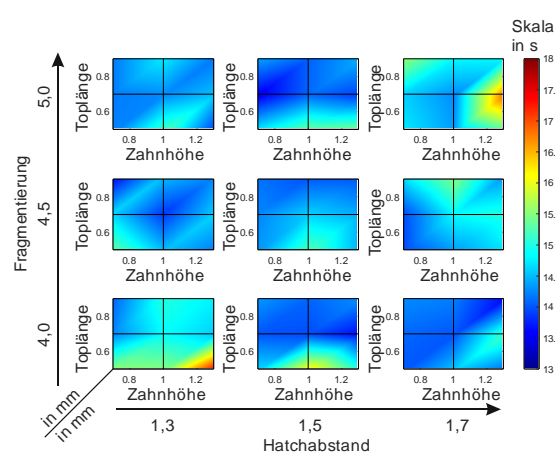
Beschreibung: Es liegt eine statistisch signifikante Wechselwirkung zwischen dem Hatchabstand und der Fragmentierung vor. Insbesondere die Kombination eines großen Hatchabstands mit einer großen Fragmentierung führt zu einer verbesserten Ablösbarkeit, da so einerseits weniger Stützstrukturwände unter dem Bauteil generiert werden und die Anbindungsfläche geringgehalten wird. Andererseits wird eine Festigkeitssteigerung im Kontaktbereich vermieden, was eine Verbesserung der Ablösbarkeit bewirkt. Die Richtlinie kann in Kombination mit Richtlinie 4.2 angewendet werden, um die Ablösbarkeit weiter zu verbessern.



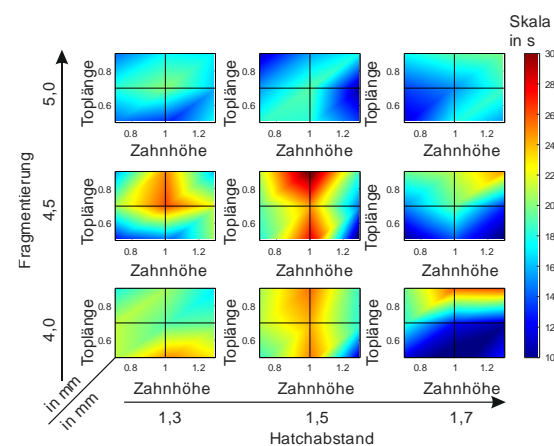
SLM280HL/316L/PS1



SLM280HL/316L/PS2



SLM250HL/316L/PS3



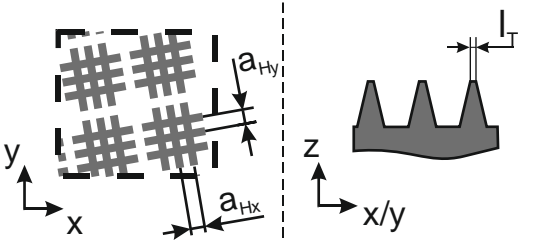
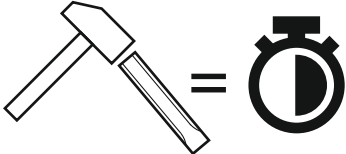
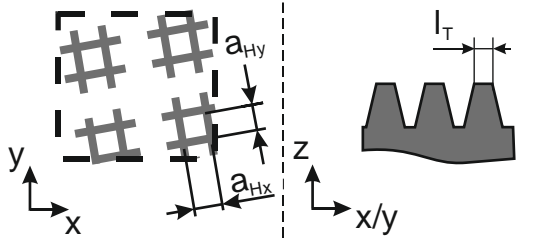
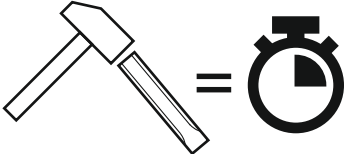
Eine simultane Erhöhung des Hatchabstands und der Fragmentierung hat positive Auswirkungen auf die Herstellbarkeit, Abblidegenauigkeit und Maßhaltigkeit. Allerdings werden die Oberflächenqualität, die Ablösbarkeit und der Materialverbrauch negativ beeinflusst. Die Auswirkungen auf die Datenvorbereitungszeit und das Datenvolumen sind geringfügig. Dies verdeutlicht, dass eine Mehrzieloptimierung vorliegt und die Auswahl der Konstruktionsrichtlinien von den spezifischen Zielen abhängt. Geeignete Stützstrukturparameter können den Gesamtergebnisdarstellungen in Tabelle 5-7 entnommen werden.

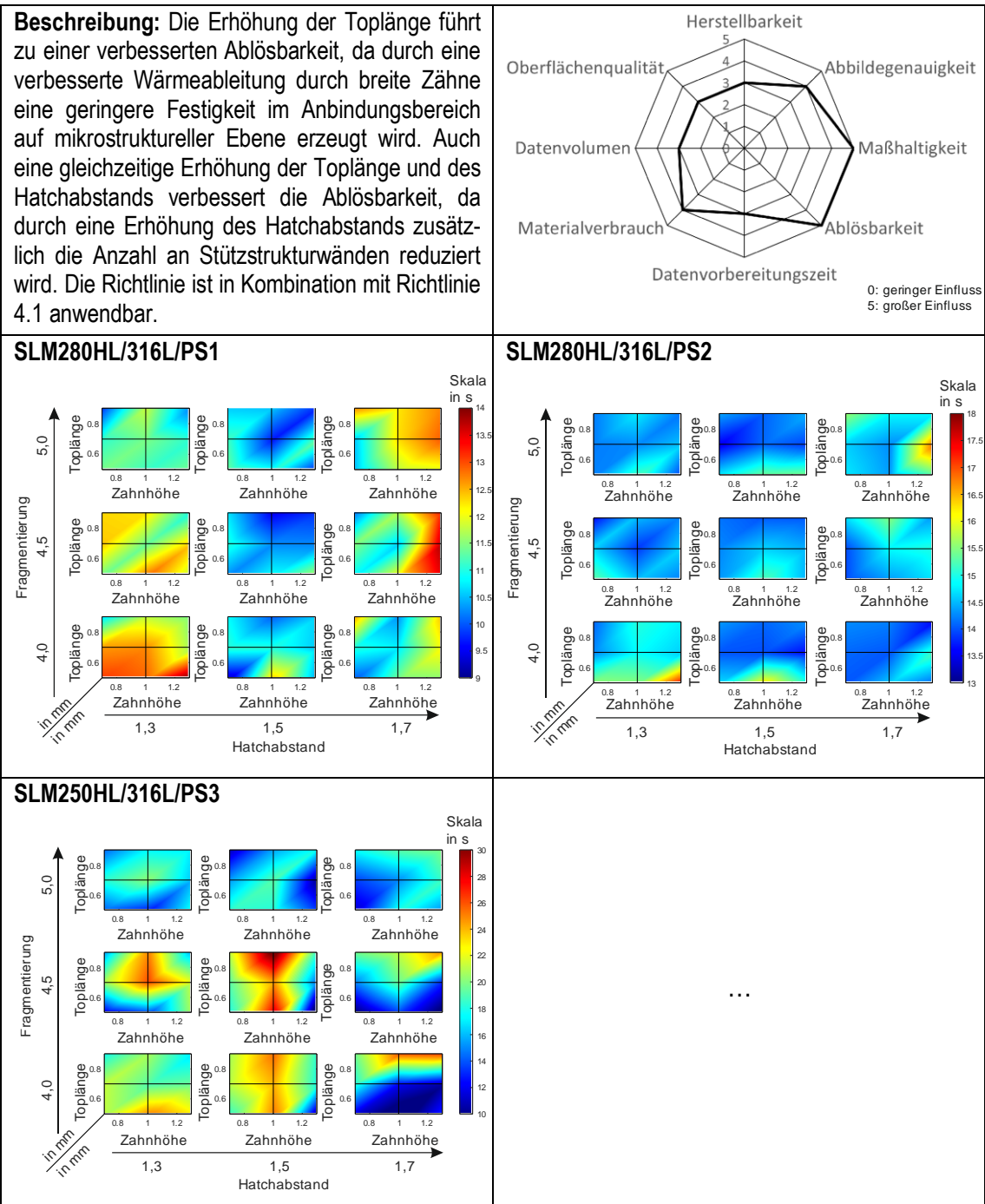
5.8 Richtlinie 4.2: Ablösbarkeit – Hatchabstand und Topplänge

Dem Pareto-Diagramm in Bild 5-26 ist zu entnehmen, dass die Topplänge allein betrachtet und in Kombination mit dem Hatchabstand einen signifikanten Effekt auf die Ablösbarkeit hat. Dabei wurde festgestellt, dass eine alleinige Erhöhung der Topplänge wider Erwarten zu einer Verbesserung der Ablösezeit führt. Dieser Effekt ist erklärbar durch die Wärmeabfuhr im Anbindungsbereich bei schmalen Zahnsitzen. So werden schmale Zähne stärker erwärmt als breite Zähne und somit einer Art Wärmebehandlung unterzogen, die das mikrostrukturelle Gefüge über die Grenze zwischen Stützstruktur und Bauteil hinauswachsen lässt. Dieser Effekt wurde bereits von YANG beobachtet [YYK+21] und führt zu einer erhöhten Festigkeit im Anbindungsbereich und somit zu einer schlechteren Ablösbarkeit. Kombiniert man eine Erhöhung der Topplänge mit einer Vergrößerung des Hatchabstands wird ebenfalls eine Verbesserung der Ablösbarkeit bewirkt. Allerdings ist dieser Effekt nicht so signifikant wie bei der alleinigen Erhöhung der Topplänge. Die aus den Beobachtungen abzuleitende Konstruktionsrichtlinie ist in Tabelle 5-8 aufgeführt. Die Zugehörigen Gesamtergebnisdarstellungen sind in Tabelle 5-8 aufgeführt.

Eine alleinige Anpassung der Topplänge oder eine zeitgleiche Anpassung des Hatchabstands und der Topplänge haben signifikante Auswirkungen auf die Maßhaltigkeit, die Oberflächenqualität, den Materialverbrauch sowie die Abbildegenauigkeit.

Tabelle 5-8: Konstruktionsrichtlinie zum Einfluss der Wechselwirkung aus Hatchabstand und Topplänge auf die Ablösbarkeit.

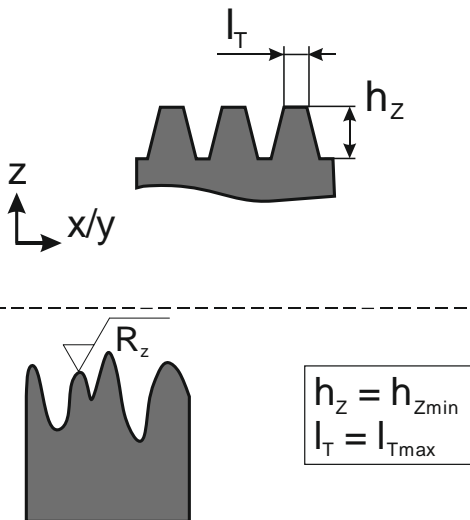
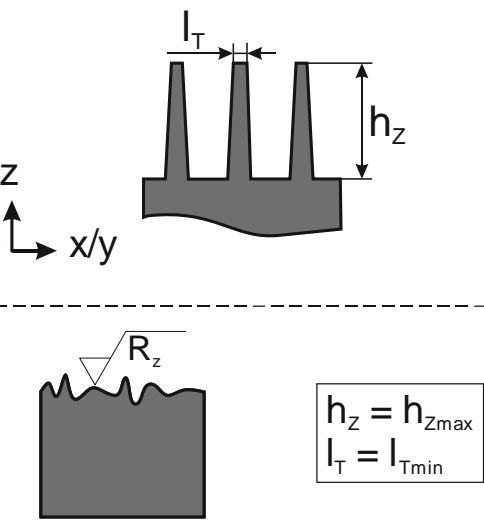
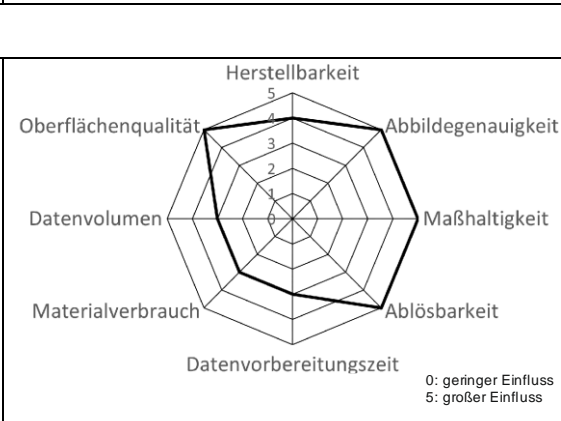
4.2	Ablösbarkeit – Hatchabstand und Topplänge
<p>Ungeeignet:</p>  <div data-bbox="347 1608 643 1657" style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;"> $a_{Hx,y} = a_{Hmin}; l_T = l_{Tmin}$ </div> 	<p>Geeignet:</p>  <div data-bbox="906 1608 1201 1657" style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;"> $a_{Hx,y} = a_{Hmax}; l_T = l_{Tmax}$ </div> 
l _T : Topplänge; a _{Hx,y} : Hatchabstand	

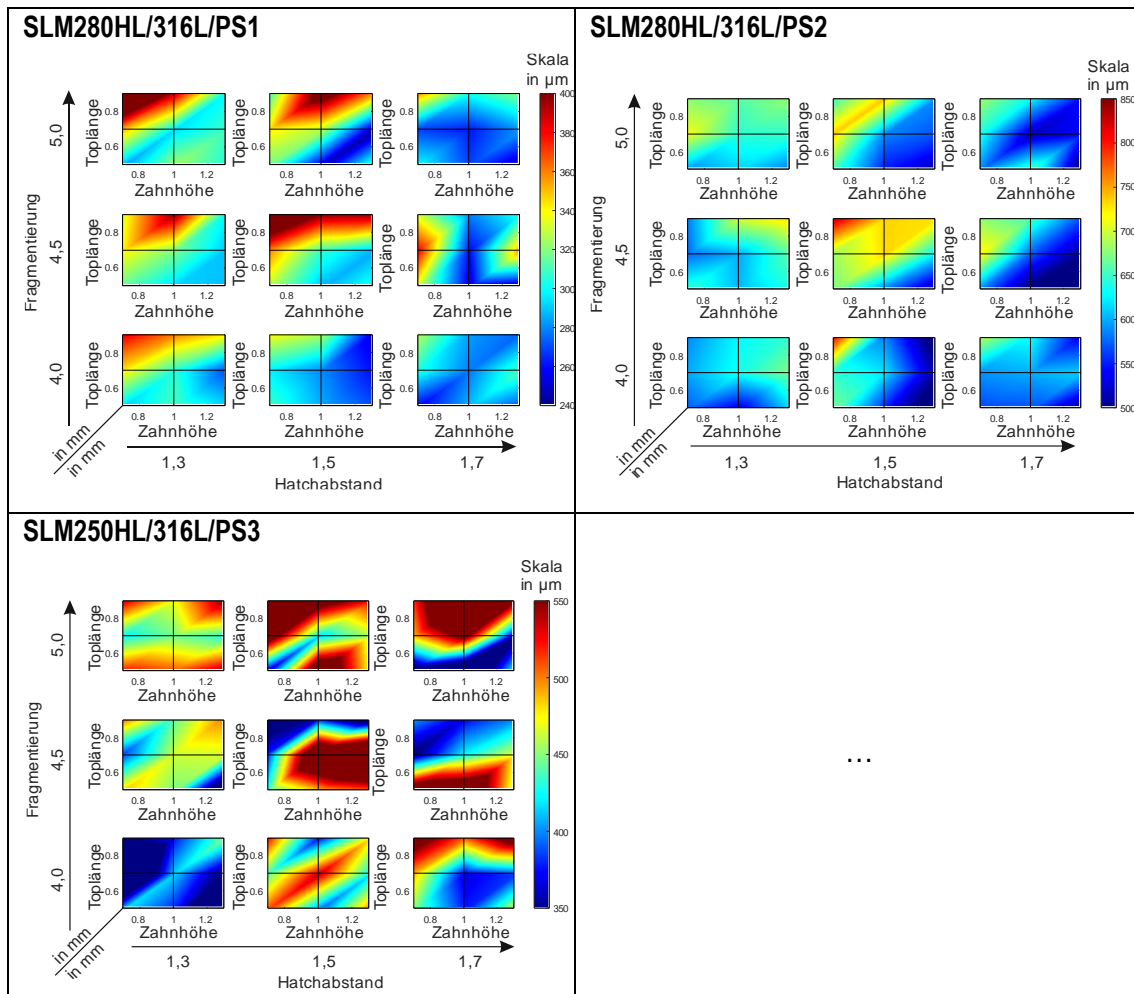


5.9 Richtlinie 5.1: Oberflächenrauheit – Zahngeometrie

Die Zahngeometrie in Form der Toplänge und der Zahnhöhe wurde in Kapitel 4.4.2.5 als Haupteinflussfaktoren auf die Oberflächenrauheit identifiziert. Dabei wurde festgestellt, dass kurze, breite Zähne einen negativen Effekt auf die Oberflächenrauheit haben. Eine Erhöhung der Zahnhöhe und eine Verringerung der Toplänge führt hingegen zu geringeren Oberflächenrauheiten. Dieser Zusammenhang erscheint plausibel, da filigranere Zähne weniger Stützstrukturreste auf der Oberfläche hinterlassen. Diese Beobachtungen zur Gestaltung der Zahngeometrie sind in Tabelle 5-9 in einer Konstruktionsrichtlinie zusammengefasst. Eine Änderung der Zahngeometrie hin zu filigranen Zähnen kann zudem relevante, negative Auswirkungen auf die Herstellbarkeit und die Maßhaltigkeit haben. Jedoch beeinflussen filigranere Zähne die Ablösbarkeit, den Materialverbrauch und die Oberflächenqualität positiv, da eine filigrane Zahngeometrie weniger Material benötigt und leichter, rückstandslos vom Bauteil zu entfernen ist.

Tabelle 5-9: Konstruktionsrichtlinie zum Einfluss der Zahngeometrie auf die Rauheit.

5.1	Oberflächenrauheit – Zahngeometrie		
Ungeeignet:		Geeignet:	
<p>l_T: Toplänge; h_z: Zahnhöhe</p> <p>Beschreibung: Zähne mit einer geringen Toplänge und einer großen Zahnhöhe, führen zu einer besseren Oberflächenrauheit. Dies resultiert aus einer geringeren Anbindungsfläche und der filigraneren Struktur der Zähne, wodurch weniger bzw. kleinere Stützstrukturreste an der Oberfläche verbleiben. Vergleiche Richtlinie 5.2.</p>			
 <p>0: geringer Einfluss 5: großer Einfluss</p>			



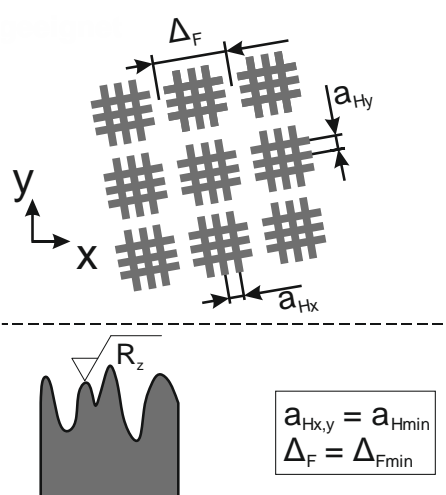
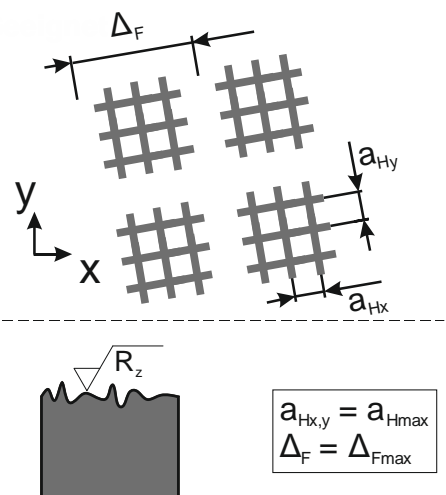
Die Auswirkungen auf die Datenvorbereitungszeit und das Datenvolumen sind dagegen geringfügig. Geeignete Stützstrukturparameter können Tabelle 5-9 entnommen werden.

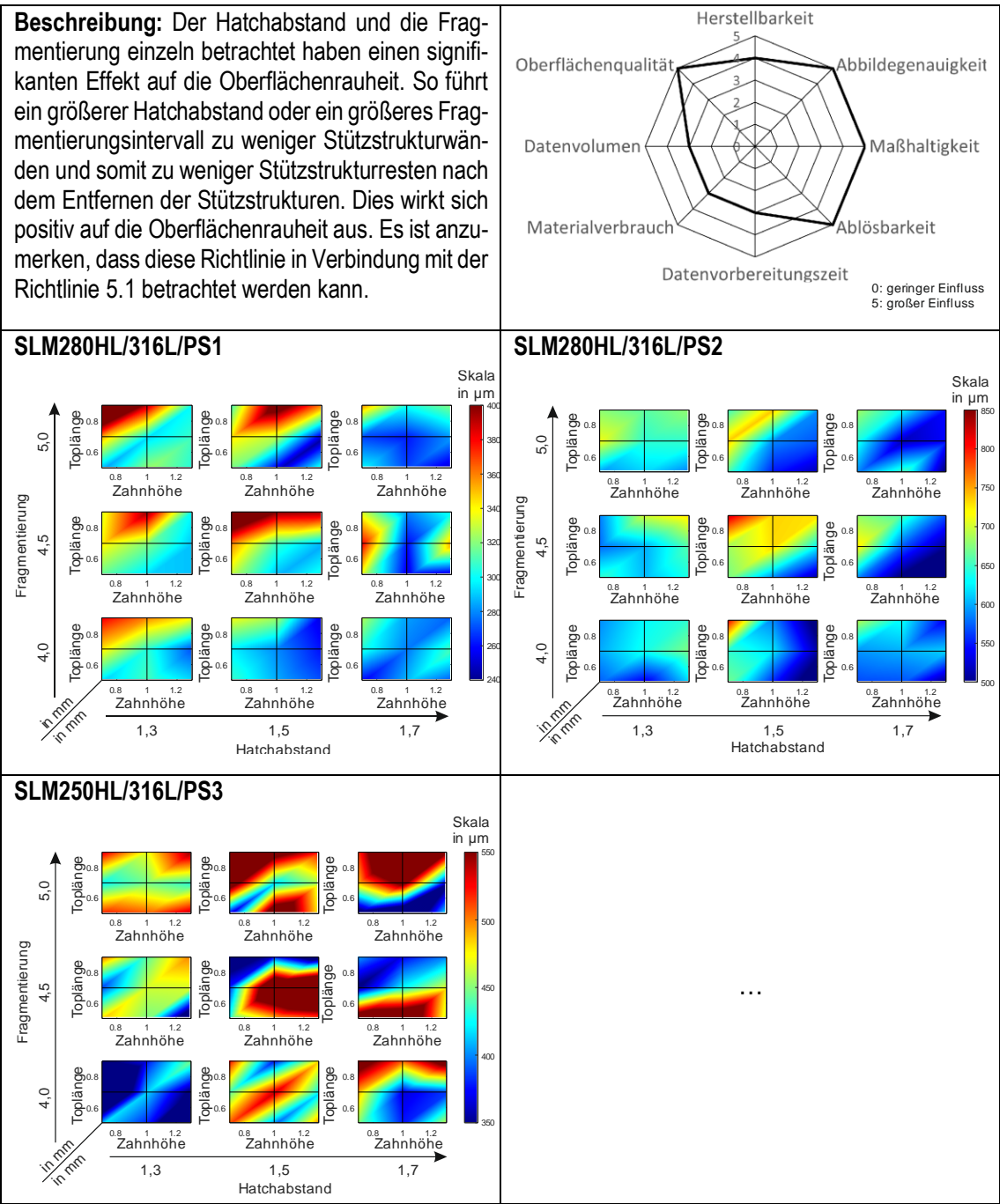
5.10 Richtlinie 5.2: Oberflächenrauheit – Hatchabstand und Fragmentierung

Der Hatchabstand und die Fragmentierung wurden in Kapitel 4.4.2.5 als weitere Einflussfaktoren auf die Oberflächenrauheit identifiziert. Diese Beobachtungen werden in Tabelle 5-10 in eine Konstruktionsrichtlinie überführt. Insbesondere ein großer Hatchabstand und ein großes Fragmentierungsintervall haben einen positiven Effekt auf die Oberflächenrauheit. Dies ist auf die daraus resultierende Reduzierung der Anzahl von Stützstrukturwänden und die daraus resultierende Verringerung der Stützstrukturreste nach dem Entfernen der Stützstrukturen zurückzuführen.

Eine Änderung des Hatchabstands und der Fragmentierung hat darüber hinaus einen maßgeblichen Effekt auf die Ablösbarkeit, die Oberflächenqualität und den Materialverbrauch sowie auf die Abbildegenauigkeit. Es kann jedoch festgestellt werden, dass es nur einen geringen Zusammenhang zwischen der Konstruktionsrichtlinie und dem Zeitaufwand für die Datenvorbereitung sowie dem Datenvolumen gibt. Geeignete Stützstrukturparameter können den Gesamtergebnisdarstellungen in Tabelle 5-10 entnommen werden.

Tabelle 5-10: Konstruktionsrichtlinie zum Einfluss des Hatchabstands und der Fragmentierung auf die Oberflächenrauheit.

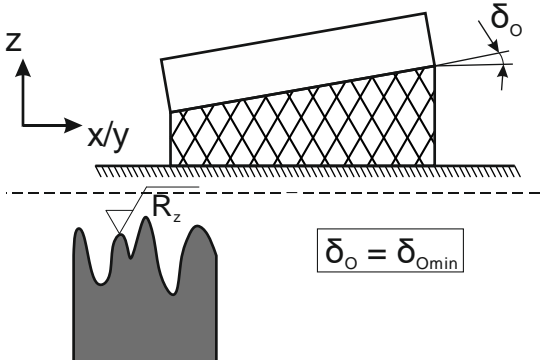
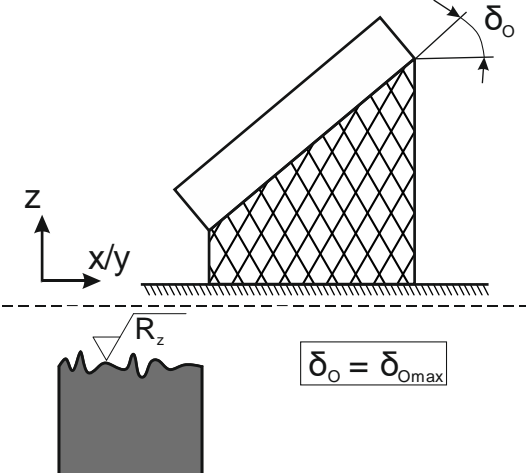

5.2	Oberflächenrauheit – Hatchabstand und Fragmentierung
<p>Ungeeignet:</p>  <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin-left: auto; margin-right: auto;"> $a_{Hx,y} = a_{Hmin}$ $\Delta_F = \Delta_{Fmin}$ </div>	<p>Geeignet:</p>  <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin-left: auto; margin-right: auto;"> $a_{Hx,y} = a_{Hmax}$ $\Delta_F = \Delta_{Fmax}$ </div>
$a_{Hx,y}$: Hatchabstand; Δ_F : Fragmentierungsintervall	



5.11 Richtlinie 5.3: Oberflächenrauheit – Orientierung Downskinfläche

Die Untersuchungen in Kapitel 4.4.3.1 zeigen, dass sich die Stützstrukturen, die die Richtlinien 5.1 und 5.2 (Kapitel 5.9 und 5.10) einhalten deutlich besser an geneigten Flächen entfernenbar sind und dort weniger Stützstrukturreste hinterlassen. Dies resultiert in verbesserten Oberflächenrauheitswerten im Vergleich zu Flächen, die parallel zur Bauplattform orientiert sind. Diese Beobachtung kann auf die festgestellten größeren wärmeinduzierten Spannungen auf die Stützstrukturen zurückgeführt werden, die einen positiven Effekt auf die Entfernbarkeit und somit auf die Oberflächenrauheit hat. Da der Bauteilorientierungswinkel keinen Stützstrukturparameter darstellt, sind in Tabelle 5-11 keine Gesamtergebnisdarstellungen aufgeführt.

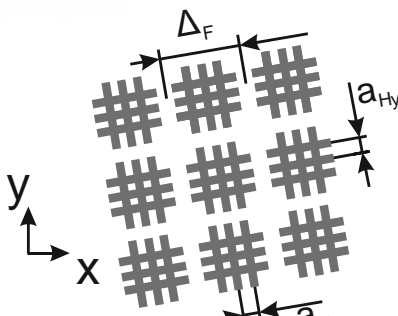

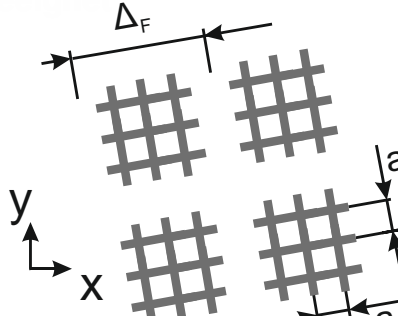

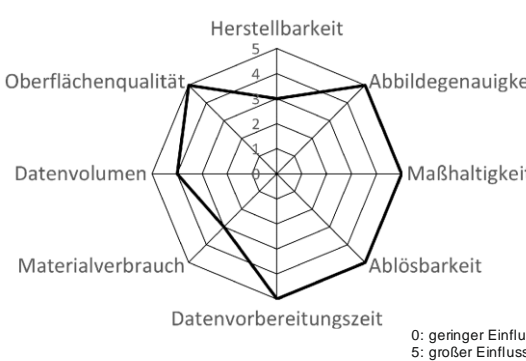
Tabelle 5-11: Konstruktionsrichtlinie zum Einfluss des Orientierungswinkels auf die Oberflächenrauheit.

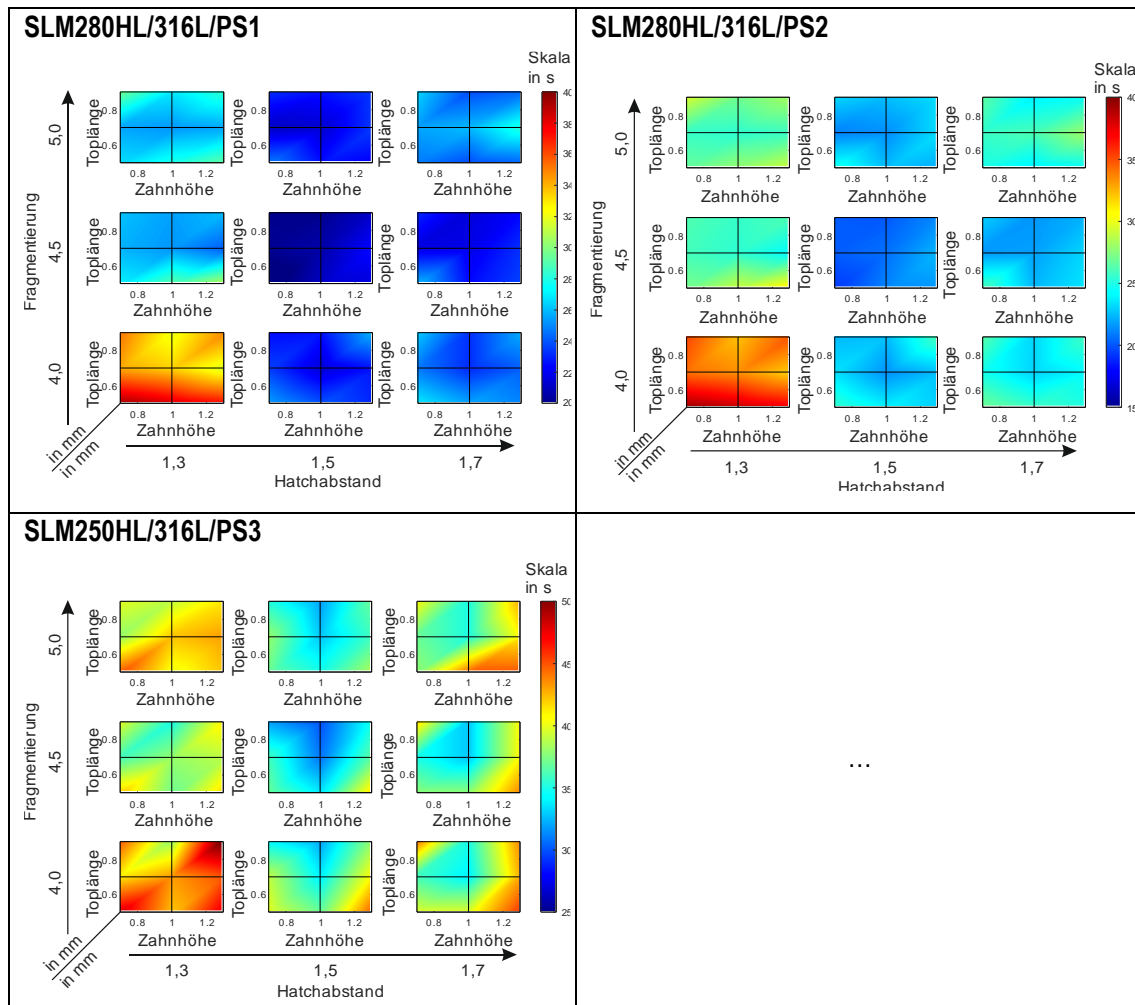
5.3	Oberflächenrauheit – Orientierung Downskinfläche
<p>Ungeeignet:</p>  <p>$\delta_o = \delta_{o \min}$</p>	<p>Geeignet:</p>  <p>$\delta_o = \delta_{o \max}$</p>
<p>δ_o: Orientierungswinkel</p>	
<p>Beschreibung: Um weniger Anhaftungen an den Downskinflächen zu bewirken, die sich negativ auf die Oberflächenrauheit auswirken, sind möglichst steil zur Bauplattform geneigte Flächen vorzusehen. So werden wärmeinduzierte Spannungen erhöht, die für eine bessere Ablösbarkeit sorgen können und die Stützstrukturen gezielt schwächen.</p>	 <p>0: geringer Einfluss 5: großer Einfluss</p>

5.12 Richtlinie 6.1: Datenvorbereitungszeit – Hatchabstand und Fragmentierung

In Kapitel 4.4.2.6 wurde ein signifikanter Effekt des Hatchabstands und der Fragmentierung auf die Datenaufbereitungszeit festgestellt. So ist bei einem großen Hatchabstand und einer großen Fragmentierung eine geringere Datenaufbereitungszeit zu erwarten. Dies ist auf eine Reduzierung der Stützstrukturwände zurückzuführen, was sich positiv auf die Datenvorbereitungszeit auswirkt. Diese Beobachtungen werden in der Konstruktionsrichtlinie in Tabelle 5-12 aufbereitet.

Tabelle 5-12: Konstruktionsrichtlinie zum Einfluss des Hatchabstands und der Fragmentierung auf die Datenaufbereitungszeit.

6.1	Datenvorbereitungszeit – Hatchabstand und Fragmentierung
<p>Ungeeignet:</p>  <p>-----</p>  <div data-bbox="574 1332 758 1433"> $a_{Hx,y} = a_{Hmin}$ $\Delta_F = \Delta_{Fmin}$ </div>	<p>Geeignet:</p>  <p>-----</p>  <div data-bbox="1133 1332 1316 1433"> $a_{Hx,y} = a_{Hmax}$ $\Delta_F = \Delta_{Fmax}$ </div>
$a_{Hx,y}$: Hatchabstand; Δ_F : Fragmentierungsintervall	
<p>Beschreibung: Die Kombination aus einer Hatchabstandsänderung und einer Fragmentierungsänderung hat einen signifikanten Effekt auf die Datenvorbereitungszeit. So führt eine Erhöhung des Hatchabstands oder eine Erhöhung des Fragmentierungsintervalls zu weniger Stützstrukturwänden, die mit dem Jobvorbereitungsprogramm generiert werden müssen. Dies wirkt sich positiv auf die Datenvorbereitungszeit aus. Die Zahngeometrie hat einen geringen Einfluss auf die Datenvorbereitungszeit, da das Datenvolumen der Zähne im Vergleich zur gesamten Stützstruktur gering ist. Dennoch ist in diese Richtlinie mit der Richtlinie 6.2 kombinierbar.</p>	

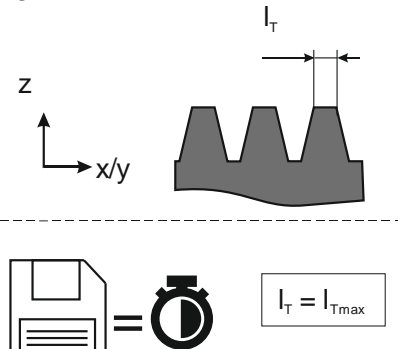
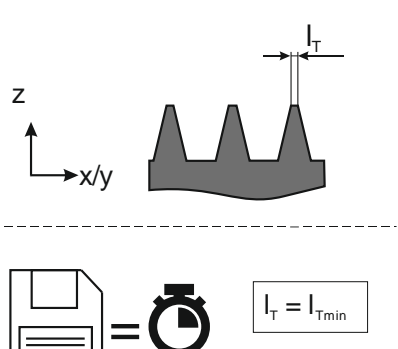
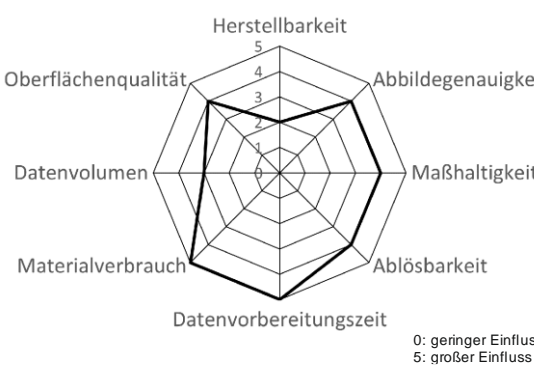


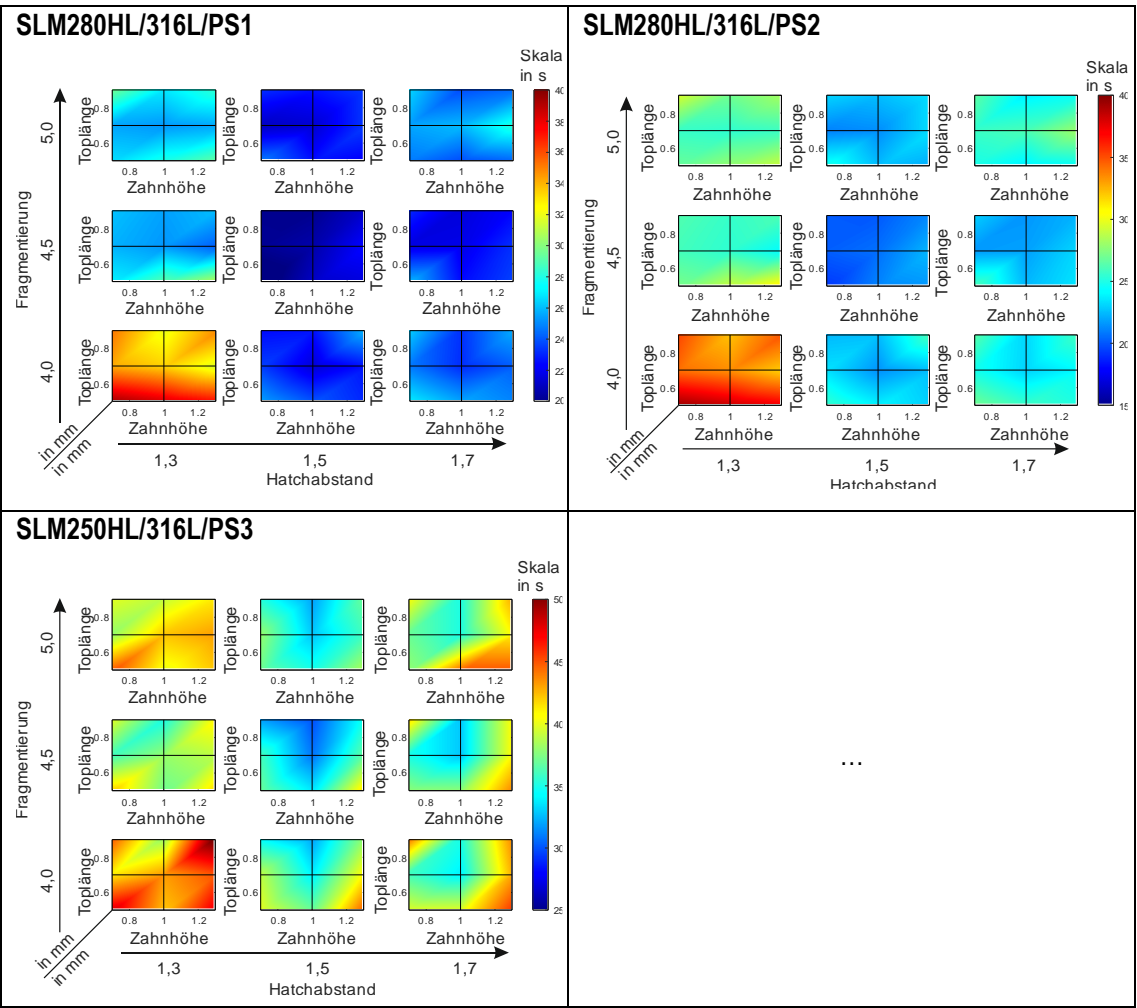
Eine gleichzeitige Änderung des Hatchabstands und der Fragmentierung hat darüber hinaus einen maßgeblichen Effekt auf die Abbildegenauigkeit, die Maßhaltigkeit, die Ablösbarkeit und die Oberflächenqualität. Ein starker Effekt auf das Datenvolumen ist ebenfalls festzustellen. Auf die Herstellbarkeit und den Materialverbrauch ist lediglich ein geringerer Einfluss festzustellen. Geeignete Stützstrukturparameter können den Gesamtergebnisdarstellungen in Tabelle 5-12 entnommen werden.

5.13 Richtlinie 6.2: Datenvorbereitungszeit – Toplänge

In Kapitel 4.4.2.6 konnte ein geringfügiger Einfluss der Toplänge auf die Datenvorbereitungszeit festgestellt werden. Eine geringere Toplänge führt dabei zu einer verkürzten Datenvorbereitungszeit. Dies ist auf das geringere Volumen der Zähne zurückzuführen, welches im Jobvorbereitungsprogramm schneller generiert werden kann. Es handelt sich hierbei jedoch nur um einen marginalen Effekt auf die Datenvorbereitungszeit, wie auch Richtlinie 6.2 in Tabelle 5-13 zu entnehmen ist. Geeignete Stützstrukturparameter können den Gesamtergebnisdarstellungen in Tabelle 5-13 entnommen werden. Darüber hinaus hat eine Änderung der Toplänge einen maßgeblichen Effekt auf den Materialverbrauch (s. Kapitel 5.17) und führt zu einem starken Effekt auf die Abblidegenauigkeit, die Maßhaltigkeit, die Ablösbarkeit und die Oberflächenrauheit. Das Datenvolumen und die Herstellbarkeit werden hingegen weniger stark beeinflusst. Hierdurch wird deutlich, dass die Toplänge verschiedenste Zielgrößen beeinflusst und im Hinblick auf eine mehrzieloptimierte Anpassung der Stützstrukturen zu berücksichtigen ist.

Tabelle 5-13: Konstruktionsrichtlinie zum Einfluss der Toplänge auf die Datenvorbereitungszeit.

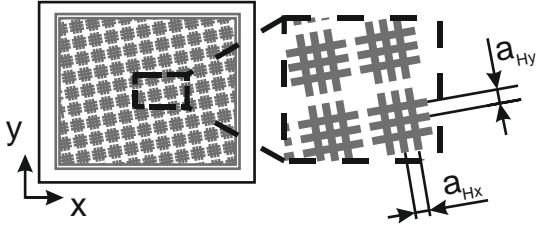
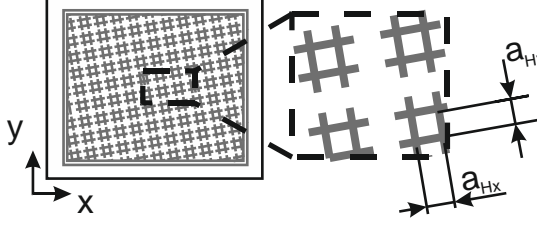
6.2	Datenvorbereitungszeit – Toplänge
<p>Ungeeignet:</p> 	<p>Geeignet:</p> 
<p>l_T: Toplänge</p> <p>Beschreibung:</p> <p>Eine reduzierte Toplänge trägt zu einer verbesserten Datenvorbereitungszeit bei. Durch das geringere Volumen filigraner Zähne, wird die Generierung der Stützstrukturen im Jobvorbereitungsprogramm beschleunigt. Es handelt sich allerdings nur um einen geringen Effekt. Um die Zeit für die Datenvorbereitung effektiver zu reduzieren, sollte auch Richtlinien 6.1 in Betracht gezogen werden.</p>	
 <p>0: geringer Einfluss 5: großer Einfluss</p>	



5.14 Richtlinie 7.1: Datenvolumen – Hatchabstand

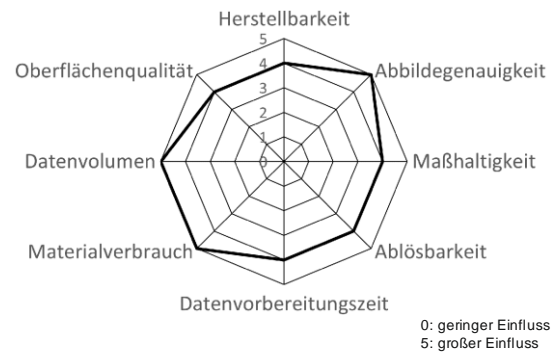
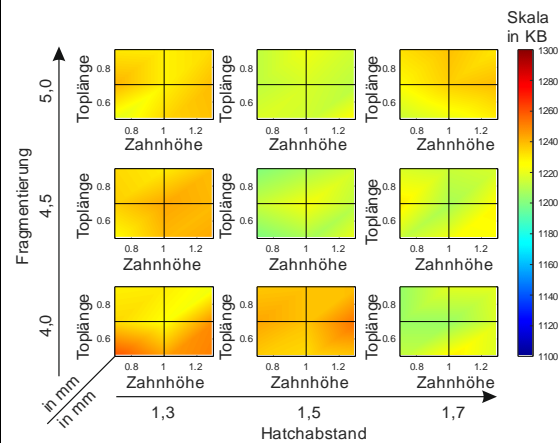
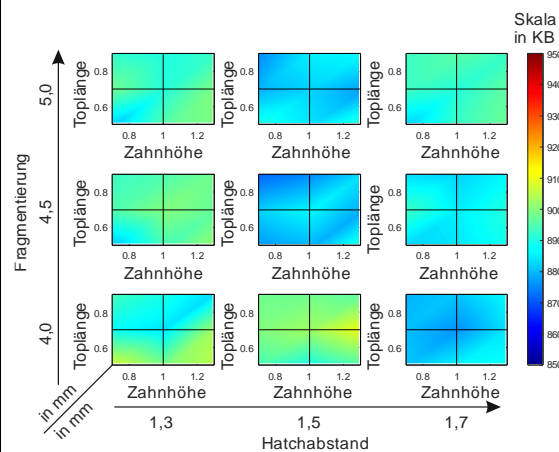
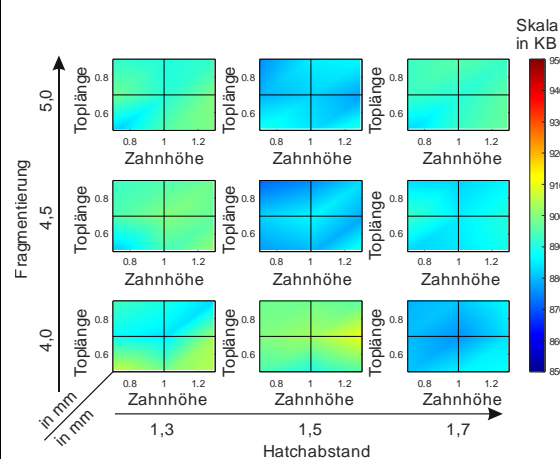
In Kapitel 4.4.2.7 wurde bereits festgestellt, dass insbesondere der Hatchabstand einen signifikanten Effekt auf das Datenvolumen aufweist. Dies liegt in einer Verringerung der Stützstrukturwände begründet, da bei einem größeren Hatchabstand weniger Stützstrukturwände generiert werden müssen, was sich positiv auf das Datenvolumen auswirkt. Dieser Zusammenhang ist in Tabelle 5-14 in einer Konstruktionsrichtlinie zusammengefasst. Darüber hinaus wurde mithilfe der Wechselwirkungsdiagramme in Bild 4-50 deutlich, dass eine gleichzeitige Erhöhung des Hatchabstands und anderer Faktoren ebenfalls zu einer Verringerung des Datenvolumens führen kann. Das lässt darauf schließen, dass der Hatchabstand den größten Einfluss hat. In den Untersuchungen in Kapitel 4.4.2.7 wurde auch deutlich, dass der Prozessparametersatz einen signifikanten Einfluss auf das Datenvolumen aufweist. Ein direkter Vergleich zwischen den Parametersätzen PS1 und PS2 zeigt beispielsweise, dass das Datenvolumen mit abnehmender Schichtdicke deutlich ansteigt. Dies ist plausibel, da beim Slicen der Daten eine größere Anzahl von Schichtinformationen generiert werden muss, um die gleiche Bauteilhöhe zu erreichen. Diese Beobachtung zeigt, dass nicht nur die Stützstrukturparameter einen Effekt auf die Zielgrößen haben. Allerdings kann die Zielgröße unabhängig von den Prozessparametern erheblich beeinflusst werden, indem die Stützstrukturparameter optimiert werden. Geeignete Stützstrukturparameter können den Gesamtergebnisdarstellung in Tabelle 5-14 entnommen werden.

Tabelle 5-14: Konstruktionsrichtlinie zum Einfluss des Hatchabstands auf das Datenvolumen.

7.1	Datenvolumen – Hatchabstand
<p>Ungeeignet:</p>  <p>$a_{Hx,y} = a_{Hx,ymin}$</p>	<p>Geeignet:</p>  <p>$a_H = a_{Hx,y max}$</p>
<p>$a_{Hx,y}$: Hatchabstand</p>	

Beschreibung:

Ein größerer Hatchabstand führt zu einer Verringerung der Anzahl an Stützstrukturwänden. Diese Reduzierung wirkt sich positiv auf das Datenvolumen aus. Eine zeitgleiche Veränderung anderer Faktoren in Kombination mit dem Hatchabstand wirkt sich ebenfalls positiv auf das Datenvolumen aus.

**SLM280HL/316L/PS1****SLM280HL/316L/PS2****SLM250HL/316L/PS3**

...

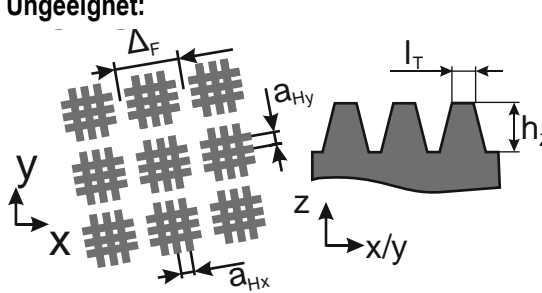
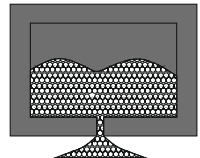
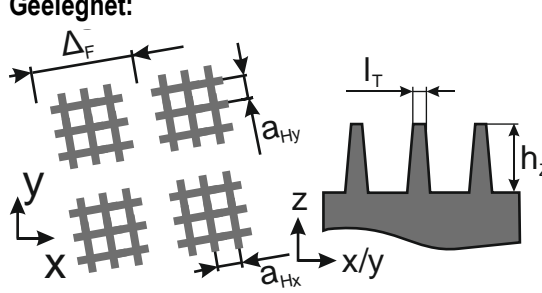
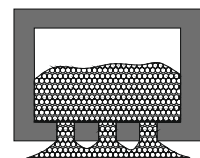
Eine Änderung des Hatchabstands hat darüber hinaus einen maßgeblichen Effekt auf den Materialverbrauch (s. Kapitel 5.15) und die Abblendegeauigkeit. Der Hatchabstand hat des Weiteren einen starken Effekt auf die Herstellbarkeit, die Maßhaltigkeit, die Ablösbarkeit, die Datenvorbereitungszeit und die Oberflächenrauheit. Hierdurch wird deutlich, dass der Hatchabstand verschiedenste Zielgrößen stark beeinflusst und mitunter als wichtigster Stützstrukturparameter angesehen werden kann, um eine erfolgreiche mehrzieloptimierte Stützstrukturkonstruktion zu ermöglichen.

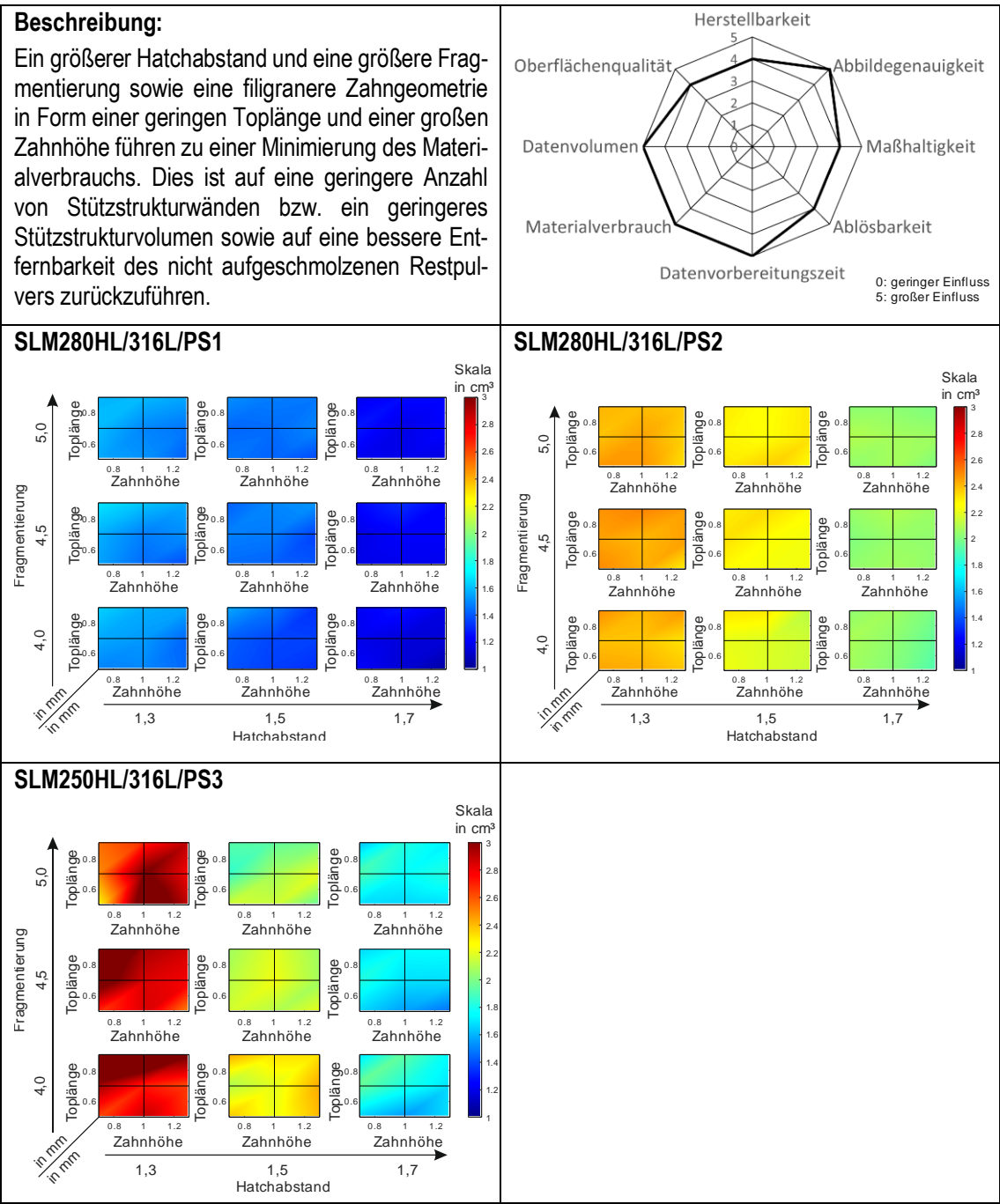
5.15 Richtlinie 8.1: Materialverbrauch – Hatchabstand, Zahngeometrie und Fragmentierung

In Kapitel 4.4.2.8 wurde bereits festgestellt, dass auf den Materialverbrauch alle vier Faktoren einen signifikanten Effekt haben. Dabei zeichnete sich besonders der Hatchabstand als einflussreichster Faktor auf den Materialverbrauch aus. So konnte gezeigt werden, dass ein großer Hatchabstand einen positiven Effekt auf den Materialverbrauch hat. Dies ist plausibel, da so weniger Stützstrukturwände generiert werden, was einerseits die Entpulverung erleichtert und andererseits weniger Material zur Fertigung der Stützstrukturen benötigt. Aus den gleichen Gründen führt auch eine filigranere Zahngeometrie mit einer minimierten Toplänge und größeren Zahnhöhe zu einem geringeren Materialverbrauch. Ebenso führt ein größeres Fragmentierungsintervall zu einem verringerten Materialverbrauch. Da auch die Wechselwirkung der betrachteten Faktoren zu einer Verringerung des Materialverbrauchs führt, wird eine zusammenfassende Konstruktionsrichtlinie in Tabelle 5-15 aufgestellt.

Eine Änderung der Faktoren hat darüber hinaus einen maßgeblichen Effekt auf das Datenvolumen, die Datenvorbereitungszeit und die Abbildegengenauigkeit. Des Weiteren haben sie einen starken Effekt auf die Herstellbarkeit, die Maßhaltigkeit, die Ablösbarkeit, und die Oberflächenrauheit. Geeignete Stützstrukturparameter können den Gesamtergebnisdarstellungen in Tabelle 5-15 entnommen werden.

Tabelle 5-15: Konstruktionsrichtlinie zum Einfluss der Wechselwirkung der Faktoren Hatchabstand, Fragmentierung, Toplänge und Zahnhöhe auf den Materialverbrauch.

8.1	Materialverbrauch – Hatchabstand, Zahngeometrie und Fragmentierung
<p>Ungeeignet:</p>   <div data-bbox="502 1769 694 1937"> $a_H = a_{Hx,ymin}$ $\Delta_F = \Delta_{Fmin}$ $I_T = I_{Tmax}$ $h_z = h_{Zmin}$ </div>	<p>Geeignet:</p>   <div data-bbox="1109 1769 1300 1937"> $a_H = a_{Hx,ymax}$ $\Delta_F = \Delta_{Fmax}$ $I_T = I_{Tmin}$ $h_z = h_{Zmax}$ </div>
$a_{Hx,y}$: Hatchabstand; Δ_F : Fragmentierungsintervall; I_T : Toplänge; h_z : Zahnhöhe	



6 Validierung

In diesem Kapitel werden einleitend das Bauteil vorgestellt, das zur Validierung verwendet wird, und seine Eignung für die Validierung diskutiert. Daraufhin wird die Herstellung mithilfe der optimierten Stützstrukturparameter beschrieben. Anschließend erfolgt eine Auswertung, die die Anwendbarkeit der entwickelten Methode zur systematischen Erarbeitung von Konstruktionsrichtlinien für eine fertigungsgerechte Stützstrukturkonstruktion im Laserstrahlschmelzen zeigt. Gleichzeitig werden die Grenzen dieser Methode aufgezeigt.

6.1 Fraktal-Schraubstock

Zur Validierung der Konstruktionsrichtlinien und der als geeignet identifizierten Stützstrukturparameter wurde ein Fraktal-Schraubstock (engl. fractal vise) als Anwendungsbeispiel verwendet. Hierbei handelt es sich um einen historischen Schraubstocktypen, der 1913 entwickelt und patentiert wurde [Kun13]. Die Besonderheit dieses Schraubstocks besteht darin, dass er das Spannen von ungleichförmigen Bauteilen mithilfe segmentierter, beweglicher Backensegmente ermöglicht (s. Bild 6-1).

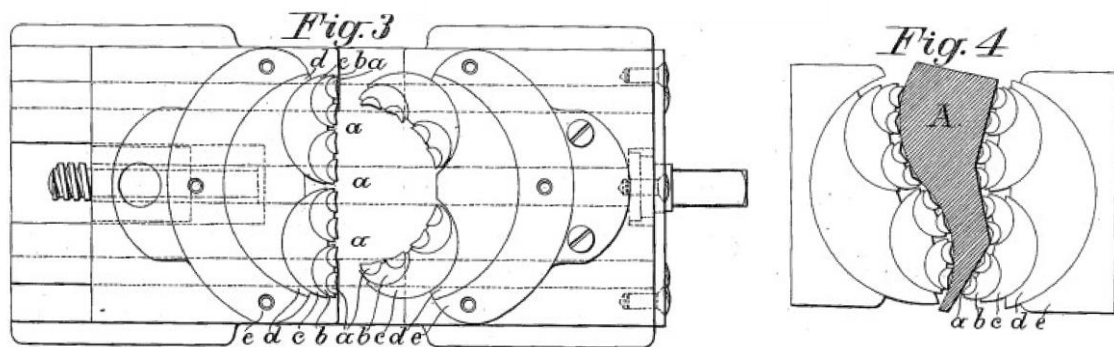


Bild 6-1: Aufbau eines Fraktal-Schraubstocks aus dem Patent US1059545A [Kun13].

Oft werden alte Fraktal-Schraubstöcke gefunden, die einer Restauration bedürfen. Da keine Ersatzteile für diese alten Schraubstöcke verfügbar sind, müssen diese Teile neu angefertigt werden, oft in Stückzahl eins. Hier bietet sich die additive Fertigung als Fertigungsverfahren an, um die aufwendige Herstellung von Gussformen oder die Einrichtungen von spanenden Fertigungsanlagen für die Produktion einzelner Teile zu vermeiden. Des Weiteren liegen häufig keine Fertigungszeichnungen mehr vor, sodass ein Einscannen vorhandener Bauteile zur Generierung der Fertigungsdaten für die additive Fertigung einfacher ist. Allerdings sind die einzelnen Bauteile eines Fraktal-Schraubstocks nicht für die additive Fertigung optimiert, wodurch eine Fertigung ohne Stützstrukturen nicht möglich ist. Hier gilt es Stützstrukturen sinnvoll anzupassen, um die Schraubstockeinzelteile erfolgreich fertigen zu können und die spätere Bauteilfunktion gewährleisten zu können. Dazu müssen Maßabweichungen vermieden und Oberflächenrauheiten, insbesondere an den Führungsflächen minimiert werden. Zudem sollte der Materialverbrauch, der Aufwand für das

Postprocessing und die Kosten geringgehalten werden. Es handelt sich also um eine Mehrzieloptimierung der unvermeidbaren Stützstrukturen, sodass sich dieser Schraubstock zur Validierung der in dieser Ausarbeitung gemachten Erkenntnisse eignet.

6.2 Herstellung des Fraktal-Schraubstocks

Das CAD-Modell des Fraktal-Schraubstocks wurde als frei verfügbare Version aus dem Internet beschafft [SHE21-ol]. Dieser Ansatz wurde gewählt, um den Fokus auf die Stützstrukturgestaltung zu legen und nicht auf die Gestaltung des Bauteils selbst (s. Bild 6-2). So ist sichergestellt, dass Bauteile verwendet werden, die nicht für die additive Fertigung optimiert sind und aus diesem Grund Stützstrukturen benötigen.

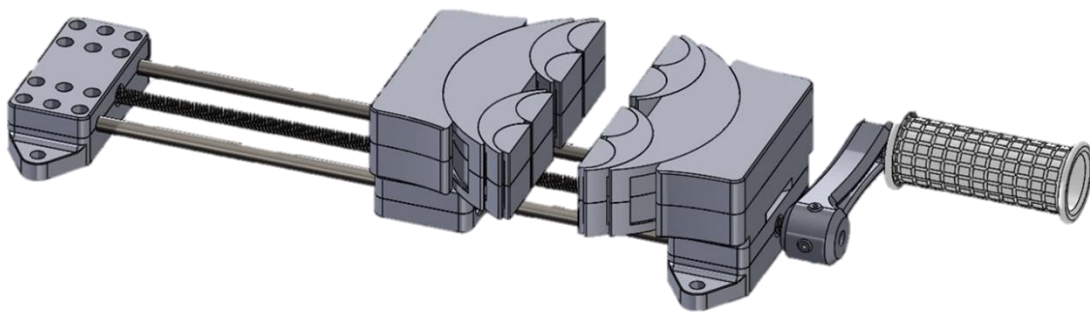


Bild 6-2: CAD-Modell des verwendeten Fraktal-Schraubstocks [SHE21-ol].

Die Herstellung der Einzelteile des Fraktal-Schraubstocks erfolgte auf einer Anlage vom Typ SLM 280HL unter Verwendung des in Tabelle 4-2 aufgeführten Prozessparametersatzes PS2. Die Stützstrukturen wurden wie die anwendungsnahen Prüfkörper mit den in Tabelle 4-5 aufgeführten Stützstrukturparametern für den Parametersatz PS2 gefertigt. Diese Stützstrukturparameter wurden im Rahmen der Vorsondierungsuntersuchungen als bestgeeignete Stützstrukturparameter im Hinblick auf die in Kapitel 4.1 identifizierten Zielgrößen ausfindig gemacht.

Des Weiteren weisen die einzelnen Komponenten des Fraktal-Schraubstocks Flächen auf, die nicht- und einfachgekrümmten Standardelementen entsprechen. Zusätzlich wurde die Orientierung im Bauraum bei einigen Komponenten angepasst, um unterschiedlich geneigte nicht- und einfachgekrümmte Flächen zu erhalten. Dies ermöglicht einen Vergleich mit den anwendungsnahen Prüfkörpern und den dort erzielten Ergebnissen. Die supportierten Bereiche und die Anordnung der Bauteile sind den Bildern 6-3a) bis d) zu entnehmen.

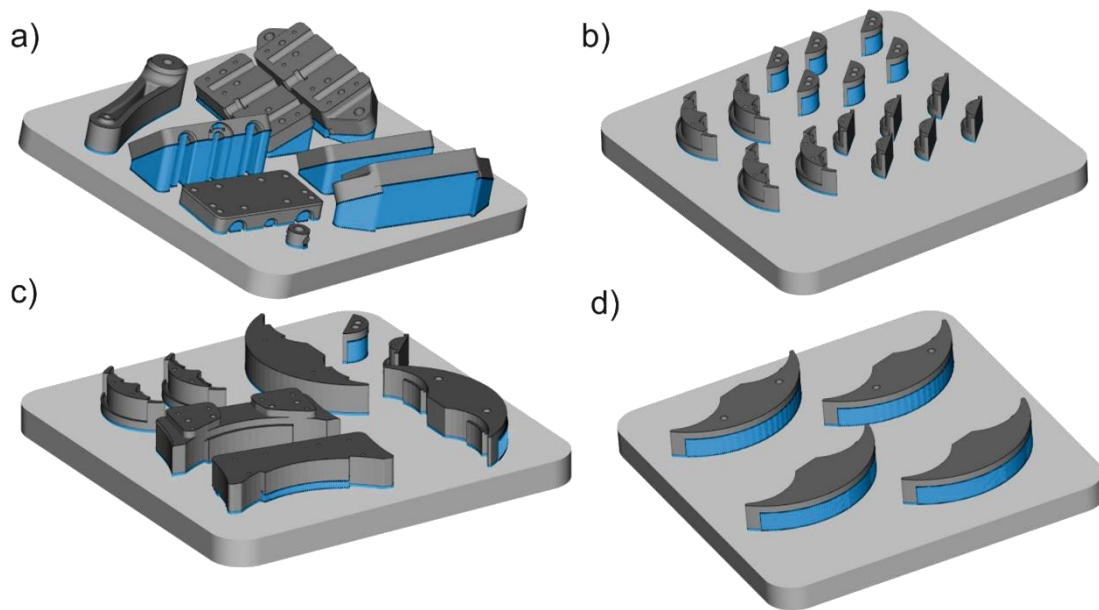


Bild 6-3: a) Baujob 1 mit schräggestellten nicht- und einfach gekrümmten Bereichen.
 b) Baujob 2 mit einfach gekrümmten überhängenden Bereichen.
 c) Baujob 3 mit großflächigen nicht gekrümmten Flächen.
 d) Baujob 4 mit einfach gekrümmten überhängenden Bereichen.

6.3 Auswertung der Untersuchungen am Fraktal-Schraubstock

Durch die Supportierung mit den in Tabelle 4-5 aufgeführten Stützstrukturparameter für den Prozessparametersatz PS2 wurden im Wesentlichen die folgenden Konstruktionsrichtlinien eingehalten:

- Richtlinie 3.1: Durch die Verwendung eines großen Hatchabstands und einer geringen Toplänge werden geringe Maßabweichungen in XY-Richtung ermöglicht. Dies wurde während der Montage deutlich, bei der die Verbindungsstellen zwischen den Bauteilen in XY-Richtung passgenau übereinander lagen. Eine Vermessung der Teile mittels Koordinatenmessmaschine ergab, dass die Abweichungen, ähnlich wie bei den untersuchten Prüfkörper für den betrachteten Prozessparametersatz, im Bereich von zwei hundertstel Millimeter lagen.



Bild 6-4: Erkennbare gute Montierbarkeit und geringer XY-Versatz

- Richtlinie 4.1 und 4.2: Durch die Verwendung eines großen Hatchabstands und filigraner Zähne wurde eine gute Ablösbarkeit der Stützstrukturen erreicht, was im Postprocessing der Bauteile bestätigt wurde. Hier konnten alle Stützstrukturen mit einfachen Handwerkzeugen vom Bauteil entfernt werden. Leichte Rückstände konnten dennoch festgestellt werden, wie man Bild 6-5 entnehmen kann.
- Richtlinie 5.1 und 5.2: Durch die Verwendung eines großen Hatchabstands und filigraner Zähne wird die Oberflächenrauheit laut Richtlinien geringgehalten. Dies konnte insbesondere bei den Führungen des Fraktal-Schraubstocks nicht bestätigt werden, da eine Nachbearbeitung der Führungs- und Passflächen erforderlich war, um die relative Bewegung untereinander zu ermöglichen. Die gemittelte Rautiefe R_z betrug $384\text{ }\mu\text{m}$ bei supportierten Downskinflächen mit einem Orientierungswinkel von 0° und $310\text{ }\mu\text{m}$ bei Downskinflächen mit einem Orientierungswinkel von 45° . Es ist allerdings anzumerken, dass diese Werte weitgehend mit den ermittelten geringsten Rauheitswerten aber für die Funktion nicht ausreichende kleinen Werten der Prüfkörper übereinstimmen (vgl. Kapitel 4.4.2.5).



Bild 6-5: Stützstrukturreste an einfach gekrümmten Oberflächen [Man22].

- Richtlinie 8.1: Durch den großen Hatchabstand, der weniger Stützstrukturwände an Downskinflächen bewirkt, und die filigranen Zähne konnte das Stützstrukturvolumen und daraus folgend der Materialbedarf im Vergleich zu einer massiven Stützstruktur geringgehalten werden. Der Anteil des eingeschlossenen Pulvers konnte nicht untersucht werden, da sich das Pulver aus den unperforierten Stützstrukturen nur schwer entfernen ließ. Hier lässt die filigranere Zahngeometrie aber darauf schließen, dass eine bessere Entpulverung möglich ist als bei großen Topplängen oder gänzlich ohne Zähne.

Durch die Einhaltung dieser Konstruktionsrichtlinien werden, wie bei einer Mehrzieloptimierung üblich, andere Richtlinien nicht erfüllt. So wird durch die Verwendung eines geringen Hatchabstands und einer filigraneren Zahngeometrie laut Richtlinie 2.1 und 2.2 eine schlechtere Maßhaltigkeit in Z-Richtung bewirkt. Dies ist auch bei einigen Komponenten des Fraktal-Schraubstocks deutlich sichtbar (s. Bild 6-6). Insbesondere bei Komponenten, die flach zur Bauplattform orientiert sind (30° Downskinwinkel) lösen

sich die Komponenten von den Stützstrukturen und zeigen eine deutliche Verfärbung aufgrund einer schlechten Wärmeableitung. Es ist jedoch anzumerken, dass die Bauteile dennoch hergestellt werden konnten. Es wurde also ein Kompromiss gefunden, der die bestmögliche Kombination von Stützstrukturfaktoren nutzt, um möglichst viele Qualitätskriterien zu erfüllen.

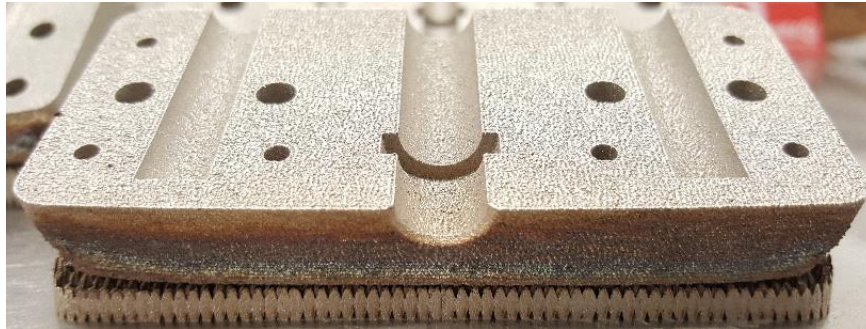


Bild 6-6: Deutlicher Verzug in Z-Richtung bei 30° zur Bauplattform orientierten Komponenten des Fraktal-Schraubstocks [Man22].

Das Beispiel des Fraktal-Schraubstocks (s. Bild 6-7) verdeutlicht, dass Stützstrukturen nicht immer vollständig zu vermeiden sind und dass eine angepasste Stützstrukturgestaltung durchaus relevant für eine erfolgreiche Fertigung ist. Darüber hinaus zeigt sich, dass verschiedene Qualitätskriterien durch die Einhaltung der hergeleiteten Konstruktionsrichtlinien bzw. durch Einhaltung der ermittelten Werte für die Stützstrukturparameter, positiv beeinflusst werden können. Dabei wird immer eine Mehrzieloptimierung durchgeführt, um einen Kompromiss aus unterschiedlichen Zielstellungen zu finden. Es ist allerdings wichtig anzumerken, dass die einstellbaren Stützstrukturfaktoren nur für den betrachteten Prozessparametersatz, die spezifische Anlage und das verwendete Material gültig sind. Für andere Randbedingungen wie andere Maschinen, Materialien und Prozessparametersätze müssen die Richtlinien erneut experimentell anhand der in dieser Ausarbeitung vorgestellten Methode ermittelt werden. So können nur durch ein Zusammenspiel einer optimierten Bauteilgestaltung für die additive Fertigung, die Verwendung bestmöglicher Prozessparameter und durch geeignete Stützstrukturparameter die besten Ergebnisse erzielt werden.



Bild 6-7: Mittels SLM-Verfahren hergestellter, fertig montierter Fraktal-Schraubstock [Man22].

7 Vorschlag zur Spezifikation von Stützstrukturen in der technischen Dokumentation

Im Rahmen der Recherche (Kapitel 2) wurde festgestellt, dass bisher keine einheitliche und allgemeingültige Dokumentation von fertigungsrelevanten Stützstrukturinformationen erfolgt. Dies wird durch eine Auswahl von Darstellungsvarianten in Bild 7-1 verdeutlicht, die unterschiedlich sind und welche das Fehlen einer einheitlichen Darstellungsform aufzeigen. In diesen Darstellungsformen sind des Weiteren die verwendeten Stützstrukturparameter nicht ersichtlich.

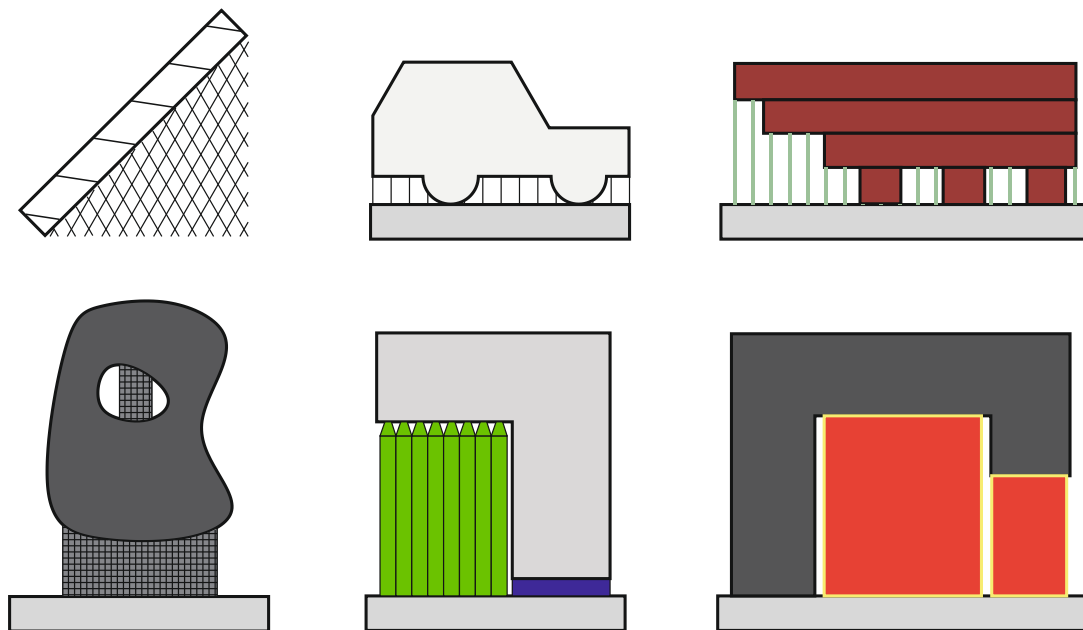


Bild 7-1: Darstellungsvarianten von Stützstrukturen aus Ada15, BHS13, Cal14, CLB19, KMF+18, LLF16 und MAH17.

Obwohl es möglich ist, die Stützstrukturinformationen aus dem Jobvorbereitungsprogramm für die additive Fertigung auszulesen, nehmen diese Daten ein erhebliches Speichervolumen ein und erfordern spezielle Softwareprogramme, um die benötigten Stützstrukturparameter auszulesen. Insbesondere dann, wenn die verwendete Stützstruktur einen Einfluss auf die Nachbearbeitung des Bauteils hat, wie in vorherigen Studien beschrieben [LTZ19, KLL19], gestaltet es sich schwierig, die Stützstrukturinformationen effektiv an Zulieferer oder andere Unternehmensbereiche zu übermitteln. Im Verlauf der letzten Jahrzehnte haben sich technische Zeichnungen sowohl in schriftlicher als auch digitaler Form zur Informationsübermittlung für konventionelle Fertigungsverfahren etabliert. Neben der Bauteilform und Maßen werden auch Werkstoffe, Fertigungsverfahren und zulässige Abweichungen in technischen Zeichnungen spezifiziert. Technische Zeichnungen liefern somit eine vollständige, eindeutige und gut verständliche Beschreibung von Bauteilen, die in unterschiedlichen Unternehmensbereichen und Unternehmen zur Kommunikation und zum

Informationstransfer eingesetzt werden [HF18, LW08]. Eine eindeutige und allgemein verständliche Darstellung erfolgt durch die Anwendung verbindlicher Regeln bei der Erstellung von technischen Zeichnungen. Die entsprechenden Regeln sind in international gültigen Normen festgelegt [DIN EN ISO 128-2, DIN EN ISO 128-3].

7.1 Vorgehen Stützstrukturdarstellung

Um eine einheitliche Dokumentation von Stützstrukturinformationen zu ermöglichen, wird im Folgenden ein Konzept vorgestellt, welches eine standardisierte Darstellungsform von Stützstrukturen in technischen Zeichnungen in Anlehnung an die DIN EN ISO 128-2 und DIN EN ISO 128-3 ermöglicht. Dieses Konzept lehnt sich an die Vorschläge von FRYE an [Fry20]. Im Zuge dieser Untersuchung werden die Kriterien zur Festlegung einer einheitlichen Darstellung von Stützstrukturen definiert und ein Verfahren zur Integration dieser Strukturen in technische Zeichnungen präsentiert. Die Zeichnungseintragung soll alle fertigungsrelevanten Stützstrukturinformationen beinhaltet. Es wird angestrebt nicht nur dünnwandige Stützstrukturen, wie sie in den gängigen Supportvorbereitungsprogrammen Verwendung finden, zu berücksichtigen, sondern auch Stützstruktur-Sonderformen und zukünftige Stützstrukturen. Die standardisierte Dokumentation der Stützstrukturinformationen in technischen Zeichnungen soll den Informationsaustausch zwischen Geschäftsbereichen oder unterschiedlichen Unternehmen entlang der Wertschöpfungskette sicherstellen. Hierbei wird besonderes Augenmerk auf die nahtlose Integration in bereits etablierte Softwaretools wie CAD und PDM gelegt, wobei ein geringes Datenvolumen erreicht werden soll. Darüber hinaus wird angestrebt, den Schulungsaufwand für die Mitarbeiter, die die Zeichnungen erstellen, gering zu halten. Dies wird durch die Anwendung bekannter Prinzipien der technischen Darstellung erreicht.

Wie bereits in Kapitel 2.4.2 aufgeführt, gibt es verschiedene Stützstrukturen. Im Folgenden wird die einheitliche Darstellung von Stützstrukturen am Beispiel des weit verbreiteten Blocksupports betrachtet. In Bild 2-19 ist ersichtlich, dass es bereits für diese Art von Stützstruktur eine Vielzahl an einstellbaren Stützstrukturparametern gibt. Diese Parameter haben direkte Auswirkungen auf die Prozessstabilität, die Qualität des Bauteils, den erforderlichen Nachbearbeitungsaufwand und letztendlich auch auf die Kosten. Abhängig von der verwendeten Software können zusätzlich weitere Parametereinstellungen vorgenommen werden. So besteht die Möglichkeit, dass die Parameter entweder global für den gesamten Bauauftrag festgelegt werden oder dass individuelle Stützstrukturen für bestimmte Bereiche des Bauteils lokal festgelegt werden können. Diese Informationen gilt es in der einheitlichen Dokumentation von Stützstrukturen zu berücksichtigen.

7.2 Anforderungen an die Stützstrukturdarstellung in technischen Zeichnungen

Wie man dem Kapitel 2.4 entnehmen kann, gibt es eine Vielzahl an Stützstrukturen mit verschiedensten Stützstrukturparametern, die für einen vollumfänglichen Informations-transfer zu dokumentieren sind. Zur Ermittlung der Anforderungen an eine geeignete Stützstrukturdarstellung in technischen Zeichnungen wurden Befragungen im akademischen, wissenschaftlichen und industriellen Umfeld durchgeführt. Dabei wurden primär Anwender des Laserstrahlschmelzens befragt aber auch Personen aus dem Fachgebiet der normgerechten, technischen Darstellung. Auch gängige Prinzipien bei der Konstruktion und Darstellung von technischen Systemen wurden zur Definition der Anforderungen eingebunden. Daraus resultierten die folgenden als elementar identifizierten Eigenschaften für eine einheitliche Stützstrukturdarstellungsform in technischen Zeichnungen. Die Darstellungsform sollte:

- intuitiv verständlich, einfach, eindeutig und allgemeingültig sein.
- in die bestehende genormte Zeichnungsdarstellung integrierbar sein, ohne im Widerspruch zu bestehenden Normen zu stehen oder Verwechslungen mit anderen Zeichnungseintragungen zu begünstigen.
- die Dokumentation von verschiedenen Typen von Stützstrukturen ermöglichen und die verwendeten Stützstrukturparameter nachvollziehbar in die technische Zeichnung integrieren.
- in bestehende Softwaretools zur technischen Zeichnung integrierbar sein und gegebenenfalls nachträglich in bereits bestehende technische Zeichnungen eingefügt werden können.
- in der Lage sein, zukünftig durch neu entwickelte Stützstrukturen oder zusätzliche einstellbare Parameter erweitert zu werden.

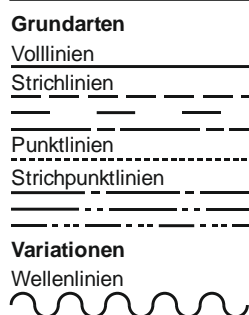
Des Weiteren sind folgende Punkte zu berücksichtigen:

- Da Stützstrukturen oft eine filigranere und komplexere Struktur aufweisen als massive Bauteile, ist eine vereinfachte Darstellung sinnvoll, die nicht die exakten Formen und Maße der Stützstrukturen abbildet, sondern die Bereiche markiert, in denen Stützstrukturen vorhanden sind.
- Die genaue Definition der Stützstrukturen kann durch Symbole und Angaben von Parametern und Maßen in ergänzenden Schriftfeldern erfolgen, um den Speicherbedarf zu reduzieren und relevante geometrische Daten direkt abzulesen.
- Bei komplexeren Stützstrukturgeometrien sollte eine Referenzierung zu weiteren Dateien vorgesehen werden.

7.3 Darstellung der Stützstrukturen in technischen Zeichnungen

In technischen Zeichnungen werden Bereiche aus unterschiedlichen Materialien oder spezielle Bauteilbereiche durch den Einsatz verschiedener Linienarten und Bereichsschraffuren symbolisiert, wie in den Normen DIN EN ISO 128-2 und DIN EN ISO 128-3 definiert. Eine Darstellung einiger dieser Linien und Bereichsschraffuren ist in Bild 7-2 dargestellt. Dieser Ansatz kann auch auf Stützstrukturbereiche angewendet werden, um sie in technischen Zeichnungen von anderen Bauteilbereichen abzugrenzen. Dies erfolgt durch die Verwendung einer unterschiedlichen Konturierung und Füllung der Bauteilbereiche, die die Stützstrukturbereiche repräsentieren.

Linienarten nach DIN EN ISO 128-2



Schraffuren nach DIN EN ISO 128-3

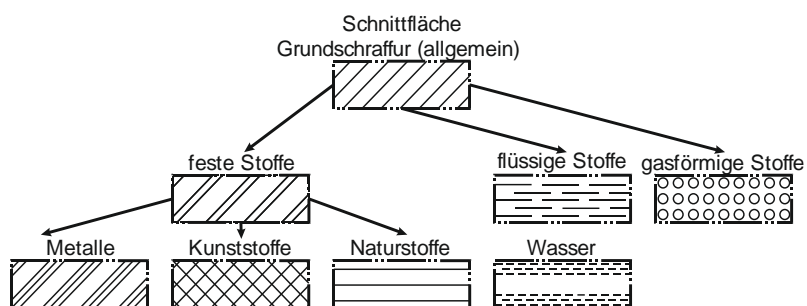


Bild 7-2: Standardisierte Linienarten und Schraffuren

7.3.1 Darstellungsform der Konturen

Zur Abgrenzung der Stützstrukturbereiche wurden in diesem Fall einfache, breite, schwarze Volllinien gewählt. Diese Linienart wird üblicherweise verwendet, um sichtbare Kanten und Umrisse von Bauteilen darzustellen. Durch den Einsatz dieser Linienart wird eine deutliche Begrenzung der Stützstrukturbereiche erreicht und eine eindeutige Bemaßung ermöglicht, wie in Bild 7-3 dargestellt. Im Gegensatz dazu sind Strich- und Strichpunktlinien weniger gut bemaßbar und werden eher für die technische Darstellung anderer Bereiche eingesetzt, weshalb sie weniger geeignet sind. Eine Kombination mehrerer Linienarten wird vermieden, um eine einfache und schnelle Eintragung in technische Zeichnungen, auch manuell, zu gewährleisten.

7.3.2 Darstellungsform der Füllungen

Durch die Füllung der Stützstrukturbereiche wird sichergestellt, dass sie klar vom eigentlichen Bauteil unterschieden werden können. Für Stützstrukturbereiche wurde eine Kreuzschraffur als geeignet identifiziert. Obwohl diese Schraffur gewisse Ähnlichkeiten mit der genormten Schraffur zur Darstellung von Kunststoffen aufweist, ermöglicht der deutlich größere 65°-Winkel der Kreuzschraffur eine eindeutige Unterscheidung. Darüber hinaus ähnelt

eine Kreuzschraffur einer stilisierten, perforierten Stützstruktur, was den Wiedererkennungswert erhöht. Die Schraffurlinien sind schwarz auszuführen und halb so dick wie die Konturlinien. Die Bereiche zwischen den Linien weisen keine Füllfarbe auf, um eine nahtlose Integration in bestehende Zeichnungen zu ermöglichen. Eine beispielhafte Zeichnungseintragung ist in Bild 7-3 a) zu finden.

7.3.3 Alternative vereinfachte Darstellungsform

Es besteht die Möglichkeit, eine vereinfachte Darstellungsform zu verwenden, wenn die Stützstrukturbereiche direkt von der Bauplattform bis zur Bauteiloberfläche verlaufen. In diesem Fall wird nicht der gesamte Stützstrukturbereich konturiert und mit einer Schraffur versehen, sondern lediglich die gestützte Oberfläche durch eine begrenzte Zickzacklinie markiert. Der Winkel der Zacken beträgt dabei, ähnlich wie bei der Schraffur, 65° , wie in Bild 7-3 b) dargestellt.

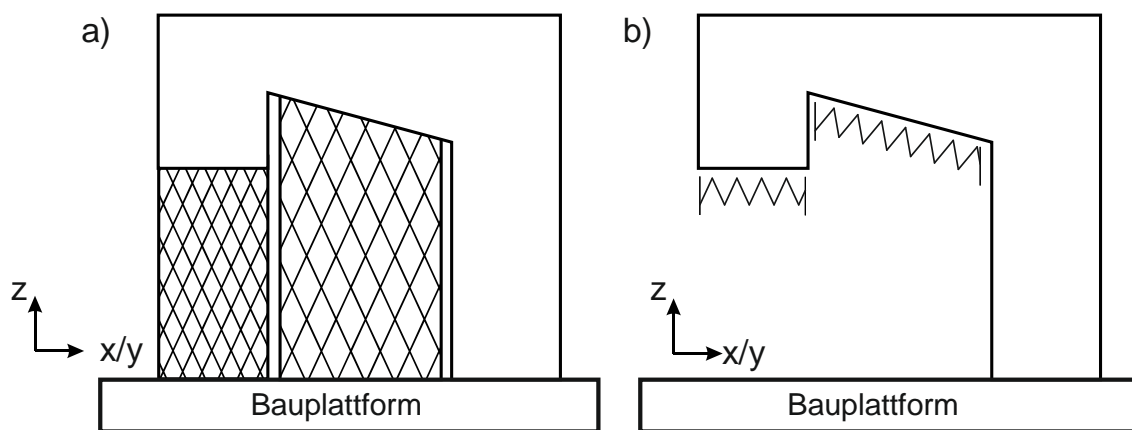


Bild 7-3: a) Darstellung der Stützstrukturen durch Konturlinien und Schraffurfüllung.
b) Vereinfachte Darstellung nach [nach Fry20].

7.4 Spezifizierung der Stützstruktureigenschaften

Um die Parameter der Stützstruktur zu dokumentieren, wird ähnlich wie bei Toleranzangaben ein Spezifikationsfeld verwendet. Dieses Feld ist mit dem zu dokumentierenden Stützstrukturbereich durch ein Referenzsymbol verbunden. Als Referenzsymbol wird eine Raute verwendet, wie in Bild 7-4a) dargestellt. Die Zuordnung eines Stützstrukturbereichs erfolgt durch Anbindung der Raute mit einem dünnen Hinweispfeil. Der Pfeil zeigt senkrecht auf den Rand des zu beschreibenden Bereichs. Alternativ kann der Hinweispfeil in den zu dokumentierenden Stützstrukturbereich enden. In diesem Fall wird am Linienende ein Punkt anstelle einer Pfeilspitze verwendet, wie in Bild 7-4b) dargestellt. Die Verbindung des Pfeils mit dem Rautensymbol erfolgt senkrecht an der linken oder rechten Spitze der Raute, wie auch in Bild 7-4c) zu sehen ist.

Die Stützstrukturparameter werden in einem rechteckigen Spezifikationsfeld angegeben. Dieses Feld kann direkt an das mit der Stützstruktur verbundene Rautensymbol anschließen (s. Bild 7-4 d1). Falls der verfügbare Platz nicht ausreicht, kann das Rautensymbol mit einer Nummer versehen werden und das Spezifikationsfeld kann in einem freien Bereich des Zeichenblattes platziert werden, wobei auf die Nummer verwiesen wird (s. Bild 7-4 d2). Wenn alle Stützstrukturen die gleichen Eigenschaften aufweisen, genügt die Angabe eines einzigen Spezifikationsfeldes. Dieses Feld benötigt keine Verbindung zu einem spezifischen Stützstrukturbereich und kann oberhalb des Zeichnungsfeldes angegeben werden, wie in Bild 7-4 d3) dargestellt.

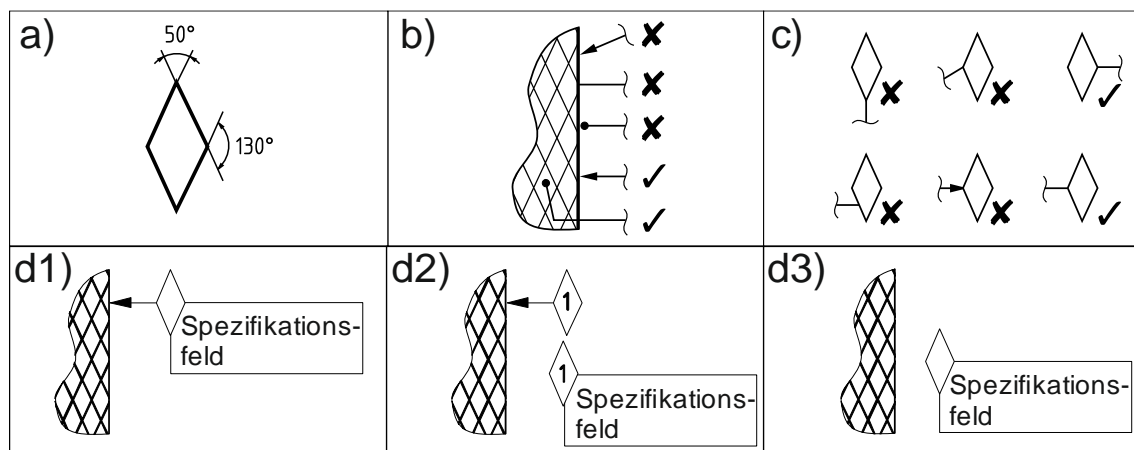


Bild 7-4: a) Rauten Referenzsymbol b) Verbindung zum Stützstrukturbereich c) Verbindung zum Rautensymbol d) Mögliche Positionierung des Spezifikationsfeldes nach [nach Fry20]

Das Spezifikationsfeld wird mit einer schmalen Volllinie umrandet. Je nach Stützstruktur kann es wie in Bild 7-5 in mehrere Blöcke mit zusätzlichen Informationen unterteilt werden.

$\#$	$b_w(x)$	$a_{Hx} \times a_{Hy} \times \alpha_F$	$F \Delta_F \times a_F$	$P \diamond b_P \times h_P \times \alpha_P / b_{R+1} \times b_S \times h_{R+1} / \downarrow a_d \times \uparrow a_t$		
1	2	3	4	5	6	7

- 1: Stützstrukturtyp entsprechend Tabelle 8-1
- 2: Dimensionsfeld 1
- 3: Dimensionsfeld 2 (optional, abhängig von der gewählten Stützstruktur)
- 4: Fragmentierung (optional)
- 5: Perforation – Lochgeometrie (optional)
- 6: Perforation – Lochlayout (optional)
- 7: Perforation – unperforierte Bereiche unten und oben (optional)

Bild 7-5: Blöcke des Spezifikationsfeld am Beispiel des Blocksupports [nach Fry20].

Durch die Verwendung der in Tabelle 7-1 dargestellten Symbole können Informationen zum verwendeten Stützstrukturtyp veranschaulicht werden. Durch Hinzufügen von Maßangaben können konkrete Stützstruktureigenschaften charakterisiert werden. Diese Maßangaben sind in Millimetern anzugeben. Wenn mehrere Eigenschaften bemessen werden, werden

zusammenhängende Maßangaben durch ein kleines "x" getrennt. Falls eine weitere Unterteilung in den einzelnen Spezifikationsfeldblöcken erforderlich ist, kann ein Schrägstrich "/" verwendet werden. Die erste Zeile des Spezifikationsfeldes beginnt mit einem Symbol gemäß Tabelle 7-1a) und b), das den verwendeten Stützstrukturtyp kennzeichnet. Der weitere Aufbau des Spezifikationsfeldes hängt vom Stützstrukturtyp ab.

Tabelle 7-1: Symbole für Stützstrukturtypen

a) dünnwandige Stützstrukturtypen			b) Massive Stützstrukturtypen	
Ohne Konturwand	Mit Konturwand			
		Blocksupport		Volumensupport
		Netzsupport		Säulensupport
		Kontursupport		Kegelsupport
		Linien-support		Baumsupport
		Punktsupport		Gitterstrukturen
		Gussetsupport	CAD	Separate CAD-Datei
		Konturwand		

7.5 Spezifikationsfelder von dünnwandigen Stützstrukturen

Das Stützstruktursymbol für dünnwandige Stützstrukturen in der Spalte „ohne Konturwand“ in Tabelle 7-1 a) gibt an, dass der referenzierte Stützstrukturbereich entweder keine Konturwand aufweist oder dass die Konturwand andere Parameter hat als der Stützstrukturhatchbereich. Wenn die Konturwand die gleichen Eigenschaften wie der Hatchbereich aufweist, sollte das entsprechende Symbol in der Spalte "mit Konturwand" verwendet werden. Falls die Konturwand andere Parameter als der Stützstrukturhatch aufweist, kann dies durch eine zusätzliche Zeile im Spezifikationsfeld dargestellt werden. Diese Zeile wird mit dem Symbol "Konturwand" aus Tabelle 7-1 eingeleitet. Die Angabe der Parameter für die Konturwand erfolgt auf ähnliche Weise wie bei der Hatchbereichsdarstellung von Blocksupports. Dieses Vorgehen wird im Folgenden erläutert. Die Zeichnungseintragung für die Kontur ist darüber hinaus beispielhaft in Bild 7-7 dargestellt. Nach dem Symbol für den Stützstrukturtyp folgt im ersten Dimensionsfeld des Spezifikationsfeldes (siehe Bild 7-5) die Angabe der Stützstrukturwanddicke. Diese Angabe wird durch die Abkürzung "b_w" eingeleitet, gefolgt von der Maßangabe in Millimetern. Im darauffolgenden zweiten Dimensionsfeld des

Spezifikationsfeldes (siehe Bild 7-5) werden die Parameter des Stützstrukturhatches angegeben. Dazu werden der Hatchabstand a_{Hx} in X-Richtung und a_{Hy} in Y-Richtung in Millimetern eingetragen sowie der Winkel α_F in Grad. Die Angaben zur Fragmentierung werden durch den Buchstaben „F“ in einem nächsten Spezifikationsfeldblock eingeleitet. Dann folgt die Maßangabe zum Fragmentierungsintervall Δ_F sowie zum Fragmentierungsabstand a_F (siehe Bild 7-5). Perforationsangaben werden mit dem Buchstaben „P“ eingeleitet. Die Lochgeometrie der Perforation wird durch ein entsprechendes Symbol, wie in Bild 7-5 dargestellt, angegeben. Anschließend werden die relevanten Maße der Perforation in Form der Perforationshöhe h_P , der Perforationsbreite b_P und des Perforationswinkels α_P angegeben. Nach einem trennenden Schrägstrich folgen Maßangaben zum Perforationslayout wie in Bild 7-5 gezeigt. Dabei werden der Perforationsabstand in Breitenrichtung b_{R+1} und in Höhenrichtung h_{R+1} sowie der Lochabstand b_S angegeben. Hinter einem weiteren Schrägstrich werden Maße von nichtperforierten Wandabschnitten ergänzt (siehe Bild 7-5). Dabei wird der unperforierte Bereich zur Bauplattform durch einem Pfeil nach unten angegeben, während der Bereich zum oberen, bauteilzugewandten Rand durch einem Pfeil nach oben gekennzeichnet wird. Um die Zahngeometrie der dünnwandigen Stützstrukturen zu beschreiben, werden die relevanten Informationen in einer neuen Zeile innerhalb des Spezifikationsfeldes ergänzt. Dies wird durch das Hinzufügen eines Doppeldreiecksymbols erreicht, das in Bild 7-6 dargestellt ist und die Zahnform symbolisieren soll. Durch die Ausrichtung der Doppeldreiecke nach oben und unten wird sowohl die Verbindung zur Bauteiloberfläche als auch die Verbindung zur Bauplattform berücksichtigt. Wenn nur ein Paar von Dreiecken abgebildet ist, wird nur die Zahngeometrie zur Bauplattform (nach unten) oder zum Bauteil (nach oben) spezifiziert, wie in Bild 7-6a) dargestellt. Wenn keine explizite Information zur Zahngeometrie gegeben wird, erstrecken sich die Stützstrukturwände unverändert bis zum Bauteil bzw. zur Bauplattform.

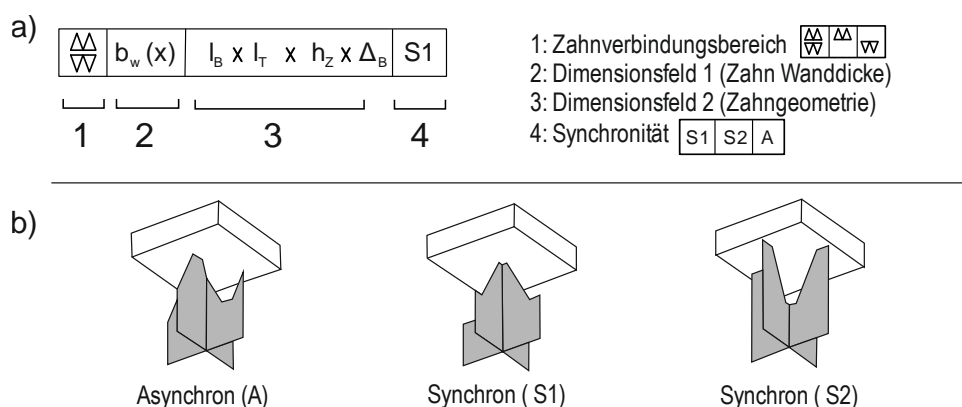
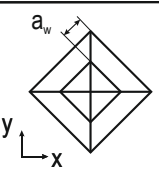
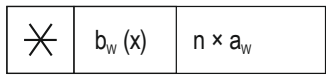
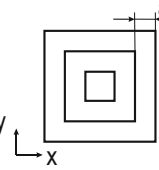
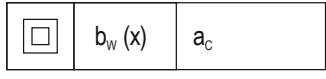
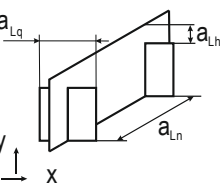
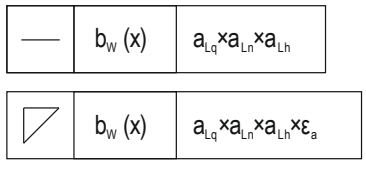
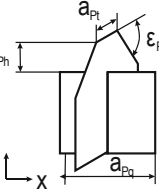
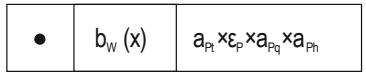


Bild 7-6: a) Zahngeometrie Spezifikationsfeld b) Mögliche Zahnsynchronitäten [nach Fry20]

Nach dem Doppeldreiecksymbol folgt die Angabe der Wanddicke der Zähne. Diese wird mit einem vorangestellten „ b_w “ gekennzeichnet. Die Maßangaben zur Zahngeometrie werden im nächsten Feld angegeben. Dies umfasst die Basislänge der Zähne l_b , die Toplänge

der Zähne l_T , die Zahnhöhe h_z sowie der Intervallabstand Δ_b zwischen zwei Zähnen (s. Bild 7-6a). Die Stützstruktursynchronität kann ebenfalls im Spezifikationsfeld unter Angabe der in Bild 7-6 b) dargestellten Kürzel A, S1 oder S2 dokumentiert werden. Wenn keiner dieser Fälle zutrifft, erfolgt keine Ergänzung im Synchronitätsfeld. Der Aufbau des Spezifikationsfeldes für andere dünnwandige Stützstrukturtypen ist in Tabelle 7-2 dargestellt.

Tabelle 7-2: Spezifikationsfelder für dünnwandige Stützstrukturen

Typ	Skizze	Spezifikationsfeld	Parameter
Netzsupport			n : Anzahl Netzstrahlen a_w : Wandabstand
Kontursupport			a_c : Wandabstand
Linien- / Gusssetsupport			a_{Lq} : Rippenlänge a_{Ln} : Rippenabstand a_{Lh} : Rippe-Bauteil-Abstand ϵ_a : Winkel
Punktsupport			a_{Pt} : Kontaktlänge a_{Pq} : Rippenlänge a_{Ph} : Rippe-Bauteil-Abstand ϵ_p : Winkel

Eine schematische Zeichnungseintragung eines Bauteils mit zwei Stützstrukturbereichen ist in Bild 7-7 dargestellt. Im Bereich 1 wird ein Kontursupport verwendet, der oben und unten identische Zähne mit einer Synchronität S2 aufweist. Im zweiten Bereich, der direkt durch einen Hinweispfel referenziert wird, wird ein Blocksupport verwendet, der oben und unten unterschiedliche Zahngeometrien aufweist. Dieser Bereich weist auch eine Fragmentierung auf sowie eine abweichende Kontur, die perforiert ist und oben und unten die gleichen Zähne mit einer Asynchronität aufweist.

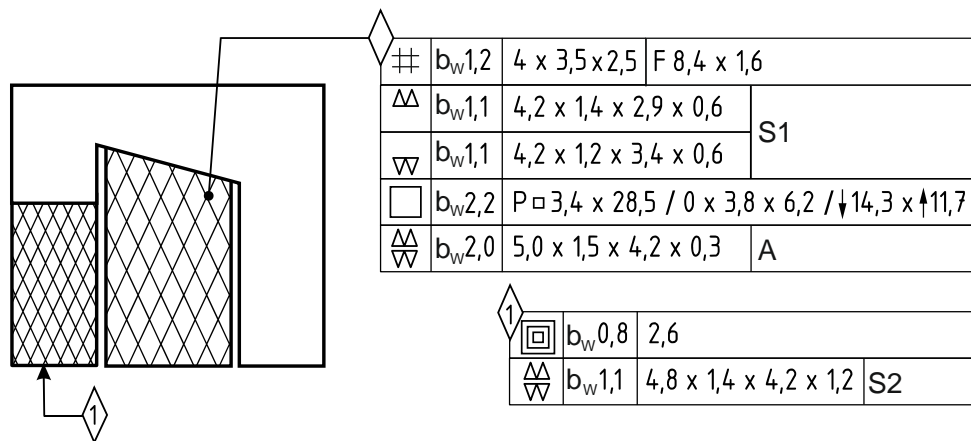
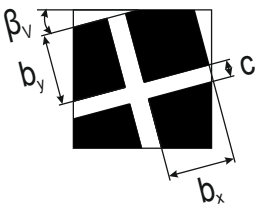

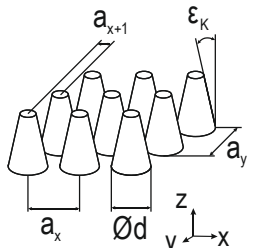


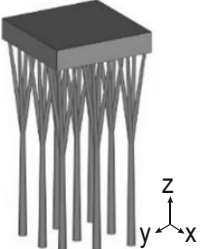





Bild 7-7: Beispielhafte Zeichnungseintragung [nach Fry20].

7.6 Spezifikationsfelder von massiven Stützstrukturen

Auch massive Stützstrukturen können durch ein Spezifikationsfeld dargestellt werden. Hierzu werden die in Tabelle 7-1 b) aufgeführten Symbole verwendet. Das Symbol für den Volumensupport ist ein schwarz gefülltes Quadrat. Sollte der Volumensupport fragmentiert sein, können die relevanten Parameter gemäß Tabelle 7-3 im Spezifikationsfeld dokumentiert werden. Dadurch wird eine präzise Beschreibung der fragmentierten Struktur ermöglicht. Säulen- oder Kegelsupports werden entsprechend Tabelle 7-3 spezifiziert. Zunächst wird das entsprechende Symbol aus Tabelle 7-1 für den Stützstrukturtyp abgebildet. Im darauffolgenden Feld wird der Säulen- bzw. der Kegeldurchmesser an der Bauplattform, der als Basisdurchmesser bezeichnet wird, angegeben. Bei Kegelstützstrukturen wird zusätzlich der Verjüngungswinkel ϵ_K angegeben. Das letzte Feld enthält Maße zur Anordnung der einzelnen Säulen oder Kegel.

Tabelle 7-3: Spezifikationsfelder für massive Stützstrukturen.

Typ	Skizze	Spezifikationsfeld	Parameter
Volumensupport		 $b_x \times b_y \times c / \beta_v$	b_x : Breite x b_y : Breite y c : Abstand β_v : Fragmentationswinkel
Säulen-/Kegelsupports		<div>  $\emptyset d$ $a_x \times a_y / a_{x+1}$ </div> <div>  $\emptyset d / \epsilon_k$ $a_x \times a_y / a_{x+1}$ </div>	d : Basisdurchmesser a_x : Abstand x a_y : Abstand y a_{x+1} : Versatz ϵ_k : Verjüngungswinkel
Gitterstrukturen/Baumsupport		<div>  Dokumentenname/ Dokumentenpfad </div> <div>  Gitterstrukturtyp (Vol-%) Dokumentenname und -pfad </div> <div>  Dokumentenname/ Dokumentenpfad </div>	Das 3D-Modell der Stützstrukturen wird in einer separaten Datei gespeichert auf die referenziert wird

Baumsupports oder komplexe Gitterstrukturen können ebenfalls durch ein Spezifikationsfeld abgebildet werden. Da hier keine einzelnen Parameter angegeben werden können, wird im Spezifikationsfeld auf die hinterlegten Einheitszellen oder die Stützstrukturen im CAD- und STL-Dateiformat verwiesen. Bei Gitterstrukturen kann zusätzlich die Volumendichte der einzelnen Gitterzellen angegeben werden oder der Gitterstrukturtyp wie beispielsweise „Schwartz Diamond“ oder „Schoen Gyroid“. Stützstrukturen, die hier nicht aufgeführt sind, können durch die Angabe "CAD" im Spezifikationsfeld dokumentiert werden. Im darauffolgenden Feld wird auf die entsprechende Quelldatei verwiesen. dies kann eine analoge Zeichnung, ein Dateiname mit Pfad oder in einer digitalen Umgebung auch ein direkter Link zu einer Datenbank mit der entsprechenden CAD-Datei sein.

7.7 Fazit zur Spezifikation von Stützstrukturen in technische Zeichnungen

In den vorangegangenen Kapiteln wurde eine Methode zur Darstellung von Stützstrukturen von laserstrahlgeschmolzenen Bauteilen in technischen Zeichnungen vorgestellt. Dafür wurde der aktuelle Stand der Technik ermittelt, Anforderungen an eine sinnvolle Darstellung der Stützstrukturen identifiziert und eine Empfehlung zur Darstellung der Stützstrukturen in technischen Zeichnungen präsentiert. Um zwischen verschiedenen Stützstrukturtypen zu unterscheiden, wurde eine standardisierte Darstellung geometrischer Informationen mit Symbolen in einem Spezifikationsfeld entwickelt. Das Spezifikationsfeld gibt eine

detaillierte Beschreibung des Stützstrukturtyps, der Geometrie sowie der Verbindung zum Bauteil und der Bauplattform. Auch ungewöhnliche Stützstrukturtypen wie Gitterstrukturen oder CAD-basierte Stützstrukturen können implementiert werden. Die entwickelten Darstellungsformen können als Grundlage für verschiedene zukünftige Stützstrukturen dienen. Darüber hinaus können zusätzliche geometrische Informationen der Stützstrukturen implementiert werden. Eine Implementierung in Normen zur technischen Darstellung ist ebenfalls denkbar. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die in Kapitel 7.2 aufgeführten Anforderungen erfüllt wurden.

8 Interpretation der Ergebnisse

In bisherigen Ansätzen zur Konstruktion von Stützstrukturen wurden vorrangig die Vermeidung von Stützstrukturen betrachtet. Die Ermittlung von Stützstrukturparametern und die geometrische Gestaltung für verschiedene Randbedingungen wie den verwendeten Werkstoff, die eingesetzte Anlagentechnik und die Prozessparameter wurde weniger betrachtet.

Das Hauptziel dieser Ausarbeitung bestand deshalb darin, eine Methode zur systematischen Erarbeitung von Konstruktionsrichtlinien für eine fertigungsgerechte Stützstrukturkonstruktion im Laserstrahlschmelzen zu entwickeln. Zur Erreichung dieses übergeordneten Ziels werden in Kapitel 1.2 drei Teilziele definiert.

1. Die Berücksichtigung von anwendungsspezifischen Zielgrößen soll möglich sein.
2. Die Methode soll quantifizierbare Konstruktionsrichtlinien für Stützstrukturen ermöglichen.
3. Die Methode soll erweiterbar sein, um Konstruktionsrichtlinien für weitere Randbedingungen ermitteln zu können. Auch weitere Stützstrukturarten sollen berücksichtigt werden können.

Um das erste Teilziel zu erreichen, wurden geeignete Kriterien zur Qualitätsbeurteilung der Stützstrukturen identifiziert. Dazu zählen beispielsweise die erreichbare Oberflächenqualität, die Maßhaltigkeit und die Ablösbarkeit der Stützstrukturen vom Bauteil. Diese Kriterien sind die anwendungsspezifischen Zielgrößen, die einen direkten Einfluss auf die Bauteilqualität und die Prozessstabilität haben und je nach Anwendung unterschiedlich zu gewichten sind. Die Qualitätskriterien wurden sorgfältig nach der Befragung von Anwendern des Laserstrahlschmelzens ausgewählt. Es ist jedoch für jeden Anwendungsfall individuell zu prüfen, ob die Qualitätskriterien für den Nutzer relevant sind. Darüber hinaus können die Stützstrukturparameter einen positiven Effekt auf eine Zielgröße haben aber eine andere negativ beeinflussen. Hier müssen Abstriche in Kauf genommen werden.

Basierend auf den Qualitätskriterien wurden Prüfkörper entwickelt, die eine Untersuchung und einen Vergleich der Qualitätskriterien für variierende Stützstrukturparameter ermöglichen. Die Prüfkörper erlaubten es, die Auswirkungen der verschiedenen Stützstrukturparameter auf die jeweiligen Qualitätskriterien zu analysieren und zu messen. Die Ergebnisse wurden graphisch aufbereitet, um die Auswirkungen der Stützstrukturparameter auf die Qualitätskriterien schnell erfassen zu können und einen einfachen Vergleich der komplexen Zusammenhänge ermöglichen zu können. Dadurch wurde das zweite Teilziel, nämlich die Quantifizierung der Qualitätskriterien, erreicht. Es ist allerdings anzumerken, dass die Quantifizierung einiger Qualitätskriterien durch den Anwender erfolgt und einer gewissen Subjektivität unterlegen ist.

Zur Erfüllung des dritten Teilziels, nämlich der zukünftigen Erweiterbarkeit der Methode, wurde ein vollfaktorieller Versuchsplan verwendet. Dieser Versuchsplan ermöglicht es, die Methode in Zukunft um weitere Randbedingungen, Stützstrukturarten oder Stützstrukturparameter zu erweitern. Allerdings ist zu beachten, dass ein solcher vollfaktorieller Versuchsplan mit einem erhöhten Versuchsaufwand verbunden ist.

Um die Wirksamkeit der entwickelten Methode und der daraus abgeleiteten Konstruktionsrichtlinien zu überprüfen, wurden anwendungsnahe Prüfkörper und ein Anwendungsbauteil betrachtet und die Methode experimentell validiert. Durch diese Validierung konnte die Praxistauglichkeit und Effektivität der Methode am Beispiel eines Restaurationsobjektes bzw. eines Einzelstücks nachgewiesen werden. Es bietet sich dennoch an, die Anwendbarkeit der Methode in weiteren Anwendungsfällen zu untersuchen, um beispielsweise im Hinblick auf eine Serienfertigung additiv gefertigter Bauteile eine Aussage treffen zu können.

Zusätzlich zu den genannten Zielen wurde ein Vorschlag zur einheitlichen Darstellung von Stützstrukturen in technischen Zeichnungen entwickelt. Eine standardisierte Darstellung von Stützstrukturen trägt dazu bei, dass eine bessere Kommunikation von technischen Details zwischen verschiedenen Unternehmen oder Unternehmensbereichen ermöglicht wird. Um die Praxistauglichkeit und Akzeptanz dieses Vorschlags zu gewährleisten, ist es erforderlich, diesen zukünftig zu validieren und in Gremien zur Normung einzuführen. Durch eine Validierung des Vorschlags in verschiedenen Anwendungsfällen und unter Berücksichtigung von Rückmeldungen und Anforderungen aus der Praxis kann die Nützlichkeit und Wirksamkeit der standardisierten Darstellung von Stützstrukturen in technischen Zeichnungen weiter bestätigt werden.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Im Folgendem sollen die Schritte zur Zielerreichung und die Ergebnisse zusammengefasst werden. Anschließend soll ein Ausblick gegeben werden, wie die Ergebnisse der entwickelten Methode zukünftig verwendet werden können. Des Weiteren sollen Ansatzpunkte für weiterführende Untersuchungen aufgezeigt werden.

9.1 Zusammenfassung

Additive Fertigungsverfahren besitzen ein erhebliches Potenzial, weisen jedoch auch verfahrensspezifische Restriktionen auf. Zu den Restriktionen zählt die unvermeidbare Verwendung solider Stützstrukturen insbesondere bei SLM-Verfahren. Neben einer Vielzahl von Aufgaben, wie die Aufnahme von Prozesskräften, die Gewährleistung einer gleichmäßigen Wärmeableitung oder die Verhinderung von Verzug und Prozessabbrüchen, beeinflusst der Einsatz von Stützstrukturen die Bauteilqualität und Prozesseffizienz. Diese Problemstellungen werden zu Beginn dieser Arbeit detailliert aufgeführt (Kapitel 1).

Basierend auf der Problemstellung wird die Motivation bzw. die Zielstellung dieser Arbeit aufgestellt, die die Entwicklung einer Methode zur Herleitung quantifizierbare Konstruktionsrichtlinien für Stützstrukturen umfasst. Zum Erreichen dieser Zielstellung werden im Stand der Technik grundlegende Aspekte der additiven Fertigung sowie im speziellen zum SLM-Verfahren erörtert. Zusätzlich werden Anforderungen an Stützstrukturen, verbreitete Ausführungen von Stützstrukturen, die Vorgehensweise bei der Gestaltung von Stützstrukturen und die einstellbaren Parameter von Stützstrukturen beschrieben. Des Weiteren wird der Forschungsbedarf im Themenfeld der Stützstrukturen dargelegt. Anschließend werden bestehende Konstruktionsrichtlinien für die additive Fertigung beschrieben und auch hier wird der Forschungsbedarf im Bereich der Stützstrukturen aufgezeigt (Kapitel 2).

Aufbauend auf dem identifizierten Forschungsbedarf wird die Zielstellung dieser Arbeit konkretisiert und das geplante Vorgehen aufgezeigt, welches in die Versuchsplanung (Kapitel 4.2), die Versuchsdurchführung (Kapitel 4.4) und die Herleitung von Konstruktionsrichtlinien unterteilt ist (Kapitel 5).

Die Versuchsplanung besteht aus drei separaten Schritten. So werden zuerst die Qualitätskriterien identifiziert, anhand derer die Qualitätsbeurteilung der Stützstrukturen erfolgen soll (Kapitel 4.1). Hier wurden die Abbildegenauigkeit, die Maßhaltigkeit in den drei Raumrichtungen, die Ablösbarkeit, das Datenvolumen und die Datenvorbereitungszeit, die Oberflächenqualität sowie der Materialverbrauch identifiziert. Um die genannten Qualitätskriterien zu untersuchen, werden im zweiten Schritt Prüfkörper entwickelt, die eine quantitative Bewertung ermöglichen. Unter Berücksichtigung eines statistischen Versuchsplans werden die Stützstrukturen der Prüfkörper variiert. Dazu werden die vier relevanten Stützstrukturparameter Hatchabstand, Fragmentierungsintervall, Toplänge und Zahnhöhe als Faktoren

verwendet. Jedem dieser Faktoren werden drei Faktorstufen zugeordnet. Da es sich um einen vollfaktoriellen Versuchsplan handelt, wird jede der 81 möglichen Kombinationen berücksichtigt. Dies ermöglicht eine spätere Erweiterung des Versuchsplans um zusätzliche Faktoren und die Detaillierung durch weitere Faktorstufen. Zur statistischen Absicherung werden die Prüfkörper in fünffacher Ausfertigung unter Berücksichtigung einer Blockbildung und Randomisierung hergestellt (Kapitel 4.2). Die Herstellung der Prüfkörper stellt den dritten Schritt der Versuchsplanung dar und erfolgt auf zwei verschiedenen Anlagen, um sicherzustellen, dass die Ergebnisse auf weitere Anlagen übertragbar sind. Dabei werden unmodifizierte Anlagen vom Typ SLM 250HL und SLM 280HL der SLM Solutions AG verwendet. Um auch die Übertragbarkeit der Methode auf verschiedenen Prozessparametersätzen zu zeigen, werden drei Prozessparametersätze verwendet (Kapitel 4.3).

Zur Versuchsdurchführung (Kapitel 4.4) werden zunächst die verwendeten Prüfmittel und Messmethoden zur experimentellen Bestimmung der Qualitätskriterien an den entwickelten Prüfkörper beschrieben (Kapitel 4.4.1). Daraufhin werden die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen ausgewertet. Hierzu werden die signifikanten Effekte und Wechselwirkungen der Stützstrukturparameter auf die Qualitätskriterien ermittelt. Des Weiteren werden die Messwerte für jedes Qualitätskriterium in Form von Konturdiagrammen aufbereitet, die ein direktes Ablesen des Qualitätskriteriums in Abhängigkeit der verwendeten Stützstrukturparameter ermöglichen. Diese Diagramme werden zur Auswahl einer anwendungsspezifisch geeigneten Stützstruktur bzw. Parameterstufenkombination genutzt (Kapitel 4.4.2). Durch die Verwendung der statistischen Versuchsplanung und durch Auswertung der Konturdiagramme konnte eine geeignete Stützstrukturparameterkombination identifiziert werden, die einen bestmöglichen Kompromiss für die verschiedenen Qualitätskriterien darstellt. Mit dieser Stützstrukturparameterkombination werden anwendungsnahe Prüfkörper supportiert, die aus etablierter Standardelemente aufgebaut werden und typische Geometrien technischer Produkte repräsentieren. Mithilfe dieser anwendungsnahen Prüfkörper werden Einflüsse der Stützstrukturparameter auf geneigte, gekrümmte und innen liegende Oberflächen untersucht sowie die Ablösbarkeit bei schlechter Zugänglichkeit bewertet (Kapitel 4.4.3).

Basierend auf den Versuchsergebnissen werden Konstruktionsrichtlinien hergeleitet. Hierzu wird zuerst ein einheitlicher Aufbau der Richtlinien festgelegt. Dieser beinhaltet neben der graphischen Darstellung einer geeigneten Stützstrukturkonstruktion auch ein Negativbeispiel und eine textuelle Erklärung der Richtlinien. Zur Quantifizierung der Richtlinien und zur Auswahl geeigneter Stützstrukturparameter werden die zuvor ermittelten Konturdiagramme verwendet. So konnten 14 Richtlinien aufgestellt werden, die konkrete Handlungsempfehlungen zur Verbesserung der ermittelten Qualitätskriterien geben (Kapitel 5).

Zur Validierung der Konstruktionsrichtlinien wird ein technischer Anwendungsdemonstrator verwendet. Dabei handelte es sich um einen sogenannten Fraktal-Schraubstock, der durch

segmentierte, bewegliche Spannbacken ein an das Werkstück angepasstes Spannen ermöglicht. Die Einzelteile dieses Schraubstocks werden unter Verwendung der optimierten Stützstrukturparameter und unter Berücksichtigung der aufgestellten Konstruktionsrichtlinien supportiert und hergestellt. Durch diese Vorgehensweise konnten die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen an den Prüfkörpern für die verschiedenen Qualitätskriterien bestätigt werden, wodurch auch die Anwendbarkeit der hergeleiteten Konstruktionsrichtlinien nachgewiesen wurde (Kapitel 6).

Im Rahmen dieser Arbeit wurde festgestellt, dass es keine einheitliche Darstellungsform von Stützstrukturen in technischen Zeichnungen gibt. Daher wurde zusätzlich ein Vorschlag zur Spezifikation von Stützstrukturen in technischen Zeichnungen entwickelt, um die Kommunikation zwischen verschiedenen Unternehmensbereichen oder Unternehmen zu vereinfachen (Kapitel 7).

Es wurde ebenfalls das Erreichen der zu Beginn festgelegten Ziele im Rahmen einer Interpretation der Ergebnisse durchgeführt (Kapitel 8)

9.2 Ausblick

Die entwickelte Methode zur Herleitung von Konstruktionsrichtlinien stellt einen bedeutenden Fortschritt bei der Entwicklung von anwendungsangepassten Konstruktionsrichtlinien für Stützstrukturen dar. Allerdings ist der Gültigkeitsbereich auf die hier betrachteten Randbedingungen beschränkt und sollte deutlich erweitert werden, indem weitere Fertigungsanlagen, Materialien und Prozessparametern berücksichtigt werden.

Durch die Verwendung eines vollfaktoriellen Versuchsplans in dieser Arbeit, besteht die Möglichkeit einer zukünftigen Erweiterung des Versuchsplans. Dabei können weitere Stützstrukturparameter als Faktoren berücksichtigt oder zusätzliche Faktorstufen eingeführt werden, um die zur Stützstrukturparameterauswahl verwendeten Gesamtergebnisdarstellungen zu erweitern.

Es besteht auch die Möglichkeit, weitere Stützstrukturarten zu untersuchen. Auf diese Weise kann die entwickelte Methode verwendet werden, um das Wissen zu erweitern und in geeigneter Form weitergeben zu können. Dies sollte als fundierte Entscheidungshilfe bei der Auswahl anwendungsspezifischer Stützstrukturen dienen. Die Nutzung dieser Datenbank im Rahmen einer automatisierten Stützstrukturgenerierung in Jobvorbereitungsprogrammen würde ebenfalls eine umfassende Nutzung der Ergebnisse unterstützen.

Die Diskussion der entwickelten Methode in Normungsgremien und die darauf resultierende Entwicklung eines Standards für die systematische Bestimmung anwendungsspezifischer Stützstrukturparameter würden eine bedeutende Aufwertung der Methode bedeuten. Dabei könnten auch Methoden des maschinellen Lernens angewendet werden, um die Prognose

von geeigneten Stützstrukturparametern mit reduziertem experimentellem Aufwand zu ermöglichen.

Eine zukünftige Validierung der Ergebnisse an zusätzlichen Demonstratoren ist ebenfalls empfehlenswert. So können bei Demonstratorteilen, die in größerer Stückzahl hergestellt werden, durchaus weitere Qualitätskriterien relevant sein, die unter anderem die Wirtschaftlichkeit einer Serienfertigung untersuchen.

Der in dieser Ausarbeitung vorgestellte Vorschlag zur Spezifikation von Stützstrukturen in der technischen Dokumentation sollte weiter untersucht und im industriellen Umfeld geprüft werden. Falls sich der Vorschlag als geeignet erweist, sollte er in Normen zur Eintragung von Stützstrukturen in technische Zeichnungen implementiert werden.

Auch eine Integration der Eintragung von Stützstrukturen in technische Zeichnungen in ein CAD-Programm gilt es in Zukunft zu prüfen, um eine breite Anwendung und Etablierung in der Praxis zu ermöglichen.

10 Literaturverzeichnis

Öffentlich zugängliche Literaturangaben:

- [3D19-ol] 3D SYSTEMS, INC.: 3DXpert™ – Durchgängige Software-Komplettlösung für die additive Fertigung, 2019. Unter: <https://de.3dsystems.com/sites/default/files/2019-04/3d-systems-3dexpert-de-a4-web-2018-12-06.pdf>, zuletzt geprüft am 21. Juni 2023
- [ABE21] ASAMI, K.; BARTSCH, K.; EMMELMANN, C.: Design-Richtlinie für die ressourceneffiziente Gestaltung von Stützstrukturanbindungen im pulverbettbasierten Laserstrahlschmelzen von Ti6Al4V. In: Kynast, M.; Witt, G.; Eichmann, M. (Ed.): Proceedings of the 17th Rapid.Tech 3D Conference Erfurt, Germany, 22–23 June 2021, 2021, Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München
- [Ada15] ADAM, G. A. O.: Systematische Erarbeitung von Konstruktionsregeln für die additiven Fertigungsverfahren Lasersintern, Laserschmelzen und Fused Deposition Modeling. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Paderborn, 2015 - ISBN 978-3-8440-3474-5
- [AHD+21] Andreiev, A; Hoyer, K.-P.; Dula, D.; Hengsbach, F.; Haase, M.; Gierse, J.; Zimmer, D.; Tröster, T.; Schaper, M.: Soft-magnetic behavior of laser beam melted FeSi3 alloy with graded cross-section. Journal of Material Processing Technology, Vol.296, 2021
- [ANS20a-ol] ANSYS, INC.: ANSYS Additive Suite – ANSYS Additive Suite Capabilities, 2020. Unter: <https://www.ansys.com/products/structures/ansys-additive-suite/additive-suite-capabilities>, zuletzt geprüft am 21. Juni 2023
- [ANS20b-ol] ANSYS, INC.: ANSYS Additive Suite – The most powerful simulation solution for metal additive manufacturing, 2020. Unter: <https://www.ansys.com/products/structures/ansys-additive-suite>, zuletzt geprüft am 21. Juni 2023
- [ARS+21] Auricchio, F; Rank, E.; Steinmann, P; Kollmannsberger, S.: II. International Conference on Simulation for Additive Manufacturing, Artes Graficas Torres S.L.Pavia, ISBN 978-84-949194-8-0. 2019
- [BBW+13] BREUNINGER, J.; BECKER, R.; WOLF, A.; ROMMEL, S.; VERL, A.: Generative Fertigung mit Kunststoffen - Konzeption und Konstruktion durch selektives Lasersintern. Springer Vieweg, Berlin, 2013 - ISBN 978-3-642-24325-7
- [Bha18] BHATE, D.: Lattice Design Optimization: Crowdsourcing Ideas in the Classroom. In: Bourell, D. (Ed.): Solid Freeform Fabrication 2018: Proceedings of the 29th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium - An Additive Manufacturing Conference. Twenty-ninth Annual International Solid Freeform Fabrication (SFF) Symposium, 13.-15.08.2018, Austin, 2018
- [BHS17] BERGER, U.; HARTMANN, A.; SCHMID, D.: 3D-Druck - Additive Fertigungsverfahren – Rapid Prototyping, Rapid Tooling, Rapid Manufacturing. 2. Auflage, Verlag Europa-Lehrmittel - Nourney Vollmer GmbH & Co. KG, Haan-Gruiten, 2017 - ISBN 978-3-8085-5034-2
- [BMD12] BREMEN, S.; MEINERS, W.; DIATLOV, A.: Selective Laser Melting. Laser Technik Journal, Vol. 9, Iss. 2, 2012, p. 33–38
- [Bod96] BODE, E.: Konstruktionsatlas - Verfahrensgerechtes Konstruieren / Werkstoffgerechtes Konstruieren. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, s.l., 6., aktualisierte und erweiterte Auflage, 1996 - ISBN 978-3-663-16321-3

- [BOE20] BARTSCH, K.; OHRENBERG, J.; EMMELMANN, C.: Benchmark parts for the evaluation of optimized support structures in Laser Powder Bed Fusion of metals. *Procedia CIRP*, Vol. 94, 2020, p. 254–259
- [BQD+17] BOBBIO, L. D.; QIN, S.; DUNBAR, A.; MICHALERIS, P.; BEESE, A. M.: Characterization of the strength of support structures used in powder bed fusion additive manufacturing of Ti-6Al-4V. *Additive Manufacturing*, Vol. 14, 2017, p. 60–68
- [BSM+11] BUCHBINDER, D.; SCHILLING, G.; MEINERS, W.; PIRCH, N.; WISSENBACH, K.: Untersuchung zur Reduzierung des Verzugs durch Vorwärmung bei der Herstellung von Aluminiumbauteilen mittels SLM. *RT e journal*, Vol. 2011, Iss. 8, 2011
- [Cal14] CALIGNANO, F.: Design optimization of supports for overhanging structures in aluminum and titanium alloys by selective laser melting. In: *Materials & Design*. Vol. 64, 2014, Elsevier Ltd., London, S. 203-213. DOI: 10.1016/j.matdes.2014.07.043
- [CGE+17-ol] CAVIEZEL, C.; GRÜNWALD, R.; EHRENBERG-SILIES, S.; KIND, S.; JETZKE, T.; BOVENSCHULTE, M.: Additive Fertigungsverfahren (3-D-Druck) – Innovationsanalyse. Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag, Berlin, 2017. Unter: <https://www.tab-beim-bundestag.de/de/pdf/publikationen/berichte/TAB-Arbeitsbericht-ab175.pdf>, zuletzt geprüft am 21. Juni 2023
- [CLB+19] CHENG, L.; LIANG, X.; BAI, J.; CHEN, Q.; LEMON, J.; TO, A.: On utilizing topology optimization to design support structure to prevent residual stress induced build failure in laser powder bed metal additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, Vol. 27, Iss. January, 2019, p. 290–304
- [CLL10] CHUA, C. K.; LEONG, K. F.; LIM, C. S.: *Rapid Prototyping – Principles and Applications*. 3. Auflage, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapur, 2010 - ISBN 978-981-277-897-0
- [CSW13-ol] CLOOTS, M.; SPIERINGS, A. B.; WEGENER, K.: Assessing new support minimizing strategies for the additive manufacturing technology SLM. *Solid Freeform Fabrication Symposium*, 16. August 2013, Austin, The University of Texas, 2013. Unter: <https://sffsymposium.engr.utexas.edu/Manuscripts/2013/2013-50-Cloots.pdf>, zuletzt geprüft am 21. Juni 2023
- [CUM+21] CAMPANA, G.; UHLMANN, E.; MELE, M.; RAFFAELLI, L.; BERGMANN, A.; KOCHAN, J.; POLTE, J.: Numerical investigation into cleanability of support structures produced by powder bed fusion technology. *Rapid Prototyping Journal*, Vol. ahead-of-print, Iss. ahead-of-print, 2021
- [DCS+15] DAS, P.; CHANDRAN, R.; SAMANT, R.; ANAND, S.: Optimum Part Build Orientation in Additive Manufacturing for Minimizing Part Errors and Support Structures. *Procedia Manufacturing*, Vol. 1, 2015, p. 343–354
- [DMC+17] DAS, P.; MHAPSEKAR, K.; CHOWDHURY, S.; SAMANT, R.; ANAND, S.: Selection of build orientation for optimal support structures and minimum part errors in additive manufacturing. *Computer-Aided Design and Applications*, Vol. 14, Iss. sup1, 2017, p. 1–13
- [DNM19] DIEGEL, O.; NORDIN, A.; MOTTE, D.: *A Practical Guide to Design for Additive Manufacturing*. Springer Verlag, Singapur, 2019
- [Fas16] FASTERMANN, P.: *3D-Drucken - Wie die generative Fertigungstechnik funktioniert*. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2., aktualisierte Auflage, 2016 - ISBN 978-3-662-49865-1
- [Fer21] FERCHOW, J.: *Additive Manufacturing towards Industrial Series Production: - Post-Processing Strategies and Design*. Dissertation, Product Development Group Zurich, ETH Zürich, Zürich, 2021
- [FGK+11] FISCHER, U.; GOMERINGER, R.; KILGUS, R.; HEINZLER, M.; NÄHER, F.; OESTERLE, S.; PAETZOLD, H.; STEPHAN, A.: *Tabellenbuch Metall*. 45. Auflage, Verlag Europa-Lehrmittel - Nourney Vollmer GmbH & Co. KG, Haan-Gruiten, 2011 - ISBN 978-3-8085-1725-3

- [FHM20] FERCHOW, J.; HOFMANN, U.; MEBOLDT, M.: Enabling Electropolishing of Complex Selective Laser Melting Structures. *Procedia CIRP*, Vol. 91, 2020, p. 472–477
- [FP16] FELDMANN, C.; PUMPE, A.: 3D-Druck - Verfahrensauswahl und Wirtschaftlichkeit – Entscheidungsunterstützung für Unternehmen. Springer Gabler, Wiesbaden, 2016 - ISBN 978-3-658-15195-9
- [Gau11-ol] GAUSEMEIER, J.; ECHTERHOFF, N.; KOKOSCHKA, M. AND WALL, M., "Thinking ahead the future of additive manufacturing – analysis of promising industries", available at: dmrc.uni-paderborn.de/fileadmin/dmrc/Download/data/DMRCStudien/DMRC_Study.pdf, 2011
- [GBI+18] GRAWLOW, M.; BLUNK, H.; IMGRUND, P.; HERZOG, D.; EMMELMANN, C.: Design Guidelines zur Auswahl geeigneter Supporttypen für verschiedene Anwendungsfälle im Bereich Laserstrahlschmelzen – Auf dem Weg zur automatisierten Supportgenerierung. In: *Rapid.Tech - Fachkongress, Forum Konstruktion*. Carl Hanser Fachbuchverlag, München, 2018, S. 95-110
- [GBK+10] GASSER, ANDRES; BACKES, GERHARD; KELBASSA, INGOMAR; WEISHEIT, ANDREAS; WISSENBACH, KONRAD: Laser Additive Manufacturing. In: *LTJ 7* (2), S. 58–63, 2010
- [Geb07] GEBHARDT, A.: Generative Fertigungsverfahren – Rapid Prototyping - Rapid Tooling - Rapid Manufacturing. 3. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, 2007 - ISBN 978-3-446-22666-1
- [Geb11] GEBHARDT, A.: Understanding Additive Manufacturing – Rapid Prototyping - Rapid Tooling - Rapid Manufacturing. Carl Hanser Verlag, München, 2011 - ISBN 978-1-56990-507-4
- [Geb13] GEBHARDT, A.: Generative Fertigungsverfahren – Additive Manufacturing und 3D Drucken für Prototyping - Tooling - Produktion. 4. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, 2013 - ISBN 978-3-446-43651-0
- [Geb16] GEBHARDT, A.: Additive Fertigungsverfahren – Additive Manufacturing und 3D-Drucken für Prototyping – Tooling – Produktion, Carl Hanser Verlag, München, 2016
- [GEK+11-ol] GAUSEMEIER, J.; ECHTERHOFF, N.; KOKOSCHKA, M.; WALL, M.: Thinking ahead the Future of Additive Manufacturing – Analysis of Promising Industries. Studie, Heinz Nixdorf Institut, Lehrstuhl für Produktentwicklung, Universität Paderborn, Paderborn, 2011. Unter: https://dmrc.uni-paderborn.de/fileadmin/dmrc/06_Downloads/01_Studies/DMRC_Study_Part_1.pdf, zuletzt geprüft am 21. Juni 2023
- [GKS19] GEBHARDT, A.; KESSLER, J.; SCHWARZ, A.: Produktgestaltung für die Additive Fertigung, ISBN 978-3-446-46133-8, 2019
- [GRS15] GIBSON, I.; ROSEN, D.; STUCKER, B.: Additive Manufacturing Technologies – 3D Printing, Rapid Prototyping and Direct Digital Manufacturing. 2. Auflage, Springer Science+Business Media, New York, 2015 - ISBN 978-1-4939-2112-6
- [GW16] GAN, M. X.; WONG, C. H.: Practical support structures for selective laser melting. In: *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 238, 2016, Elsevier B.V., Amsterdam, S. 474-484. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2016.08.006
- [Han19-ol] HANSAL, W. E. G.: Post-Processing in Serie. In: *Additive Fertigung – Das Fachmagazin für Rapid Prototyping, -Tooling, -Manufacturing*. Ausgabe 2/Mai 2019, x-technik IT & Medien GmbH, Wilhering, 2019, S. 12-16. Unter: https://www.x-technik.at/downloads/flipbook/additive%20fertigung/2019/AF_02_2019_screen.pdf#page=12, zuletzt geprüft am 21. Juni 2023

- [HGM+18] HAN, J.; GE, Y.; MAO, Y.; WU, M.: A study on the surface quality of the 3D printed parts caused by the scanning strategy. *Rapid Prototyping Journal*, 2018
- [HHS+19] HÖLLER, C.; HINTERBUCHNER, T.; SCHWEMBERGER, P.; ZOPF, P.; PICHLER, R.; HAAS, F.: Direct Machining of selective laser melted components with optimized support structures. In: *Procedia CIRP*, 52nd CIRP Conference on Manufacturing Systems. Vol. 81, 2019, Elsevier Ltd., London, S. 375-380. DOI: 10.1016/j.procir.2019.03.065
- [HHY+13] HUSSEIN, A.; HAO, L.; YAN, C.; EVERSON, R. (2013): Finite element simulation of the temperature and stress fields in single layers built without-support in selective laser melting. In: *Materials & Design (1980-2015)* 52, S. 638–647. DOI: 10.1016/j.matdes.2013.05.070.
- [HF18] HOISCHEN, H.; FRITZ, A.: *Technisches Zeichnen – Grundlagen, Normen, Beispiele, Darstellende Geometrie, Geometrische Produktspezifikation*. Cornelsen Verlag, Berlin, 2018
- [HNC+16] HILDEROTH, O. J.; NASSAR, A. R.; CHASSE, K. R.; SIMPSON, T. W.: Dissolvable Metal Supports for 3D Direct Metal Printing. *3D Printing and Additive Manufacturing*, Vol. 3, Iss. 2, 2016, p. 90–97
- [HSW+16] HERZOG, D.; SEYDA, V.; WYCISK, E.; EMMELMANN, C.: Additive manufacturing of metals. In: *Acta Materialia*. Vol. 117, 2016, Elsevier Ltd., London, S. 371-392. DOI: 10.1016/j.actamat.2016.07.019
- [HYE+12] HUSSEIN, A.; YAN, C.; EVERSON, R.; HAO, L.: Preliminary investigation on cellular support structures using SLM process Innovative developments in virtual and physical prototyping - Proceedings of the 5th International Conference on Advanced Research and Rapid Prototyping, Leiria, Portugal, 28 September - 1 October, 2011 ; [the 5th International Conference on Advanced Research in Virtual and Physical Prototyping , 2012, CRC Press/Balkema, Boca Raton, Fla.
- [JBW+18] JOHANNES LINDECKE, P. N.; BLUNK, H.; WENZL, J.-P.; MÖLLER, M.; EMMELMANN, C.: Optimization of support structures for the laser additive manufacturing of TiAl6V4 parts. *Procedia CIRP*, Vol. 74, 2018, p. 53–58
- [JHF15] JIN, Y.; HE, Y.; FU, J.: Support generation for additive manufacturing based on sliced data. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 80, Iss. 9-12, 2015, p. 2041–2052
- [JIB05] JIBIN, Z.: Determination of Optimal Build Orientation Based on Satisfactory Degree Theory for RPT- Ninth International Conference on Computer Aided Design and Computer Graphics (CAD-CG'05). 07-10 DEC. 2005, HONG KONG, CHINA, IEEE, 2005
- [JML+14] JÄRVINEN, J.-P.; MATILAINEN, V.; LI, X.; PIILI, H.; SALMINEN, A.; MÄKELÄ, I.; NYRHILÄ, O.: Characterization of effect of support structures in laser additive manufacturing of stainless steel. In: *Physics Procedia*, 8th International Conference on Photonic Technologies. Vol. 56, 2014, Elsevier B.V., Amsterdam, S. 72-81. DOI: 10.1016/j.phpro.2014.08.099
- [JW17] JEE, H.; WITHERELL, P.: A method for modularity in design rules for additive manufacturing. *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 23, Iss. 6, 2017, p. 1107–1118
- [JXS18] JIANG, J.; XU, X.; STRINGER, J.: Support Structures for Additive Manufacturing: A Review. In: *Journal of Manufacturing and Material Processing*, Vol. 2, Iss. 4, 2018, p. 64
- [Kar16] Karevska, S.: *EY's Global 3D Printing Report 2019 (Vortrag)*, Mannheim, 2019
- [KFv+04] KRUTH, J. P.; FROYEN, L.; VAN VAERENBERGH, J.; MERCELIS, P.; ROMBOUTS, M.; LAUWERS, B.: Selective laser melting of iron-based powder. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 149, Iss. 1-3, 2004, p. 616–622

- [KHE15] KRANZ, J.; HERZOG, D.; EMMELMANN, C.: Design guidelines for laser additive manufacturing of lightweight structures in TiAl6V4. In: Journal of Laser Applications. Vol. 27, 2015, Laser Institute of America, Orlando, S. 1-17. DOI: 10.1063/1.4935926
- [KKK+18] KOCH, P.; KORN, H.; KORDASS, R.; HOLTZHAUSEN, S.; SCHOENE, C.; MUELLER, B.; STELZER, R.: A CAD-BASED WORKFLOW AND MECHANICAL CHARACTERIZATION FOR ADDITIVE MANUFACTURING OF TAILORED LATTICE STRUCTURES. In: Bourell, D. (Ed.): Solid Freeform Fabrication 2018: Proceedings of the 29th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium - An Additive Manufacturing Conference. Twenty-ninth Annual International Solid Freeform Fabrication (SFF) Symposium, 13.-15.08.2018, Austin, 2018
- [Kle16] KLEPPMANN, W.: Versuchsplanung – Produkte und Prozesse optimieren. In: Matyas, K. (Hrsg.): Praxisreihe Qualitätswissen. 9. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, Wien, 2016 - ISBN 978-3-446-44716-5
- [KMF+18] KLAHN, C. (HRSG.); MEBOLDT, M. (HRSG.); FONTANA, F.; LEUTENECKER-TWELSIEK, B.; JANSEN, J.: Entwicklung und Konstruktion für die Additive Fertigung – Grundlagen und Methoden für den Einsatz in industriellen Endkundenprodukten. Vogel Business Media GmbH & Co. KG, Würzburg, 2018 - ISBN 978-3-8343-3395-7
- [Kop18] KOPF, R.: Kostenorientierte Planung von Fertigungsfolgen additiver Technologien, Vol. Band 214, 1. Auflage, 2018 - ISBN 9783844059373
- [Kra17] KRANZ, J.: Methodik und Richtlinien für die Konstruktion von laseradditiv gefertigten Leichtbaustrukturen. Dissertation, 2017
- [Krü18] KRÜGER, L.: Untersuchung von innovativen Supportstrukturen im Bezug auf Bauzeit, Pulververbrauch und Entfernbarkeit von Restpulver. Studienarbeit, DMRC, LIA, Universität Paderborn, Paderborn, 2018
- [KTN+18] KAJIMA, Y.; TAKAICHI, A.; NAKAMOTO, T.; KIMURA, T.; KITTIKUNDECHA, N.; TSUTSUMI, Y.; NOMURARA, N.; KAWASAKI, A.; TAKAHASHI, H.; HANAWA, T.; WAKABAYASHI, N.: Effect of adding support structures for overhanging part on fatigue strength in selective laser melting. Journal of the mechanical behavior of biomedical materials, Vol. 78, 2018, p. 1–9
- [Kum18] KUMKE, M.: Methodisches Konstruieren von additiv gefertigten Bauteilen. Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2018.
- [Kun13] KUNZE, P. K.: Device for obtaining intimate contact with, engaging, or clamping bodies of any shape, US Patentamt Nr: US1059545A, <https://patents.google.com/patent/US1059545A/en>, 1913
- [Kun19] KUNKEL, M. H.: Techno-Economic Characterisation and Predictability of the Selective Laser Melting Process, Disserattion, Tshwane University of Technology, Pretoria, Südafrika, 2019
- [KVV16] KUMKE, M.; WATSCHKE, H.; VIETOR, T.: A new methodological framework for design for additive manufacturing. Virtual and Physical Prototyping, Vol. 11, Iss. 1, 2016, p. 3–19
- [KZS+11] KROL, TONI A.; ZÄH, MICHAEL F.; Schilp, Johannes; Seidel, Christian (2011): Computational-Efficient Design of Support Structures and Material Modeling for Metal-Based Additive Manufacturing. In: ANSYS Conference & CADFEM Users' Meeting 29, zuletzt geprüft am 27.03.2020.
- [Lan17] LANGELAAR, M.: An additive manufacturing filter for topology optimization of print-ready designs. Structural and Multidisciplinary Optimization, Vol. 55, Iss. 3, 2017, p. 871–883
- [Lan19] LANGELAAR, M.: Integrated component-support topology optimization for additive manufacturing with post-machining. Rapid Prototyping Journal, Vol. 25, Iss. 2, 2019, p. 255–265
- [LBW+18] LINDECKE, P. N. J.; BLUNK, H.; WENZL, J.-P.; MÖLLER, M.; EMMELMANN, C.: Optimization of support structures for the laser additive manufacturing of TiAl6V4 parts. In: Procedia CIRP, 10th CIRP Conference on Photonic Technologies. Vol. 74, 2018, Elsevier Ltd., London, S. 53-58. DOI: 10.1016/j.procir.2018.08.029

- [LFQ18-ol] LEUTENECKER-TWELSIEK, B.; FONTANA, F.; QUITTER, D.: Geeignete Bauteile für die Additive Fertigung identifizieren. Unter: <https://www.konstruktionspraxis.vogel.de/auswahl-von-bauteilen-und-baugruppen-fuer-die-additive-fertigung-a-761607/?cmp=nl-115&uuid=000F4941-4B30-4721-ACBA16493CA3618A>, 08. Oktober 2018
- [LJG+18] LIU, J.; JALALAHMADI, B.; GUO, Y. B.; SEALY, M. P.; BOLANDER, N.: A review of computational modeling in powder-based additive manufacturing for metallic part qualification. *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 24, Iss. 8, 2018, p. 1245–1264
- [LKM16] LEUTENECKER-TWELSIEK, B.; KLAHN, C.; MEBOLDT, M.: Considering Part Orientation in Design for Additive Manufacturing. In: *Procedia CIRP*, 26th CIRP Design Conference. Vol. 50, 2016, Elsevier B.V., Amsterdam, S. 408-413.
DOI: 10.1016/j.procir.2016.05.016
- [LL20] LACHMEYER, R.; LIPPERT, R.B.: „Entwicklungsmethodik für die Additive Fertigung“ Springer Vieweg, Berlin, 2020
- [LLF16] LACHMEYER, R.; LIPPERT, R.B.; FAHLBUSCH, T.: „3D-Druck beleuchtet - Additive Manufacturing auf dem Weg in die Anwendung“ Springer Vieweg, Berlin, 2016
- [LLW+18] LIU, Y.; LI, Z.; WEI, P.; CHEN, S.: Generating support structures for additive manufacturing with continuum topology optimization methods. *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 1, 2018, p. 348
- [LMP21] LOPEZ TABORDA, L. L.; MAURY, H.; PACHECO, J.: Design for additive manufacturing: a comprehensive review of the tendencies and limitations of methodologies. *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 27, Iss. 5, 2021, p. 918–966
- [LMS+19] LEARY, M.; MACONACHIE, T.; SARKER, A.; FARUQUE, O.; BRANDT, M.: Mechanical and thermal characterisation of AISi10Mg SLM block support structures. *Materials & Design*, Vol. 183, 2019, p. 108138
- [LW08] LABISCH S., WEBER C.: *Technisches Zeichnen – Selbstständig lernen und effektiv üben.*, Friedr. Vieweg & Sohn Verlag, Wiesbaden, 2008
- [m4p19-ol] M4P MATERIAL SOLUTIONS GMBH: m4p 316 L -Technisches Datenblatt – Rostfreies Stahlpulver für das laserbasierte Pulverbettverfahren, 2019. Unter: https://www.metals4printing.com/wp-content/uploads/2019/11/03_m4p_Datenblatt_316L_DE.pdf, zuletzt geprüft am 21. Juni 2023
- [MAH17] MORGAN, D.; AGBA, E.; HILL, C.: Support Structure Development and Initial Results for Metal Powder Bed Fusion Additive Manufacturing. In: *Procedia Manufacturing*, 45th SME North America Manufacturing Research Conference. Vol. 10, 2017, Elsevier B.V., Amsterdam, S. 819-830. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.07.083
- [Mat18] MATERIALISE NV: *Materialise Magics²³ – Benutzerhandbuch*. Materialise NV, Leuven, 2018
- [Mat20-ol] MATERIALISE NV: *Materialise Magics-Simulationsmodul*, 2020. Unter: <https://www.materialise.com/de/software/magics/module/simulationsmodul>, zuletzt geprüft am 21. Juni 2023
- [Mil17] MILEWSKI, J. O.: *Additive Manufacturing of Metals – From Fundamental Technology to Rocket Nozzles, Medical Implants and Custom Jewelry*. Springer Series in Material Science, Band 258, Springer International Publishing, Cham, 2017 - ISBN 978-3-319-58204-7
- [MLL+19] MACONACHIE, T.; LEARY, M.; LOZANOVSKI, B.; ZHANG, X.; QIAN, M.; FARUQUE, O.; BRANDT, M.: SLM lattice structures – Properties, performance, applications and challenges. In: *Materials and Design*. Vol. 183, 2019, Elsevier Ltd., London, S. 1-18.
DOI: 10.1016/j.matdes.2019.108137

- [MVH11] MUMATZ, K.; VORA, P.; HOPKINSON, N.: A Method to eliminate anchors / Supports from directly laser melted metal powder bed processes. In: Bourell, D. (Ed.): Solid Freeform Fabrication 2011: Proceedings of the 22nd Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium. Twenty-Second Annual International Solid Freeform Fabrication (SFF) Symposium – An, August 8-10, Austin, TX, USA, 2011
- [PA15] PAUL, R.; ANAND, S.: Optimization of layered manufacturing process for reducing form errors with minimal support structures. Journal of Manufacturing Systems, Vol. 36, 2015, p. 231–243
- [PYA+15] POYRAZ, Ö.; YASA, E.; AKBULUT, G.; ORHANGÜL, A.; PILATIN, S.: Investigation of Support Structures for Direct Metal Laser Sintering (DMLS) of IN625 Parts. In: Bourell, D. (Ed.): Solid Freeform Fabrication 2018: Proceedings of the 26th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium. SFF, Austin, 2015
- [Qui18-ol] QUITTER, DOROTHEE: Stützstrukturen reduzieren Schwingungen bei Fräsnachbearbeitung. Unter: <https://www.konstruktionspraxis.vogel.de/stuetzstrukturen-reduzieren-schwingungen-bei-fraes-nachbearbeitung-a-736363/?cmp=nl-115&uuid=000F4941-4B30-4721-ACBA16493CA3618A>, 18. September 2018
- [Rei19] REIHER, T.: Intelligente Optimierung von Produktgeometrien für die additive Fertigung. Shaker Verlag, Vol. 12, Düren, 2019 - ISBN 9783844067286
- [Rot01] ROTH, K.: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen - Band 2: Konstruktionskataloge. Springer, Berlin, 3. Auflage, mit wesentlichen Ergänzungen, 2001 - ISBN 978-3-642-17467-4
- [SHE+13] STRANO, G.; HAO, L.; EVERSON, R. M.; EVANS, K. E.: A new approach to the design and optimisation of support structures in additive manufacturing. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 66, Iss. 9-12, 2013, p. 1247–1254
- [SHE21-ol] SHERWOODS, B.: Fractal Vise Version 4, Grab CAD, 202, Unter: https://grabcad.com/library/fractal-vice-version-4-1/details?folder_id=10717721, zuletzt geprüft am 21. Juni 2023
- [Sim18-ol] SIMUFACT ENGINEERING GMBH: simufact additive – Software für die Simulation metallbasierter additiver Fertigungsprozesse, 2018. Unter: https://www.simufact.de/simufact-additive.html?file=files/Medien/Broschures/Products/Simufact-BR-Simufact-Additive_Prospekt_2018_D_web.pdf, zuletzt geprüft am 21. Juni 2023
- [Sim20a-ol] SIMUFACT ENGINEERING GMBH: Funktionen in Simufact Additive, 2020. Unter: <https://www.simufact.de/funktionen-simufact-additive.html>, zuletzt geprüft am 21. Juni 2023
- [Sim20b-ol] SIMUFACT ENGINEERING GMBH: Additive Fertigung mit Simufact Additive simulieren, 2020. Unter: <https://www.simufact.de/simufact-additive.html>, zuletzt geprüft am 21. Juni 2023
- [SK17] SPALLEK, J.; KRAUSE, D.: Entwicklung individualisierter Produkte durch den Einsatz Additiver Fertigung. In: Lachmayer, R.; Lippert, R. B. (Hrsg.): Additive Manufacturing Quantifiziert – Visionäre Anwendungen und Stand der Technik. Springer Verlag GmbH, Berlin, Heidelberg, 2017 - ISBN 978-3-662-54112-8
- [SLM19a-ol] SLM SOLUTIONS GROUP AG: SLM® 280 - Selective Laser Melting Machine – Robust Selective Laser Melting - Multiple Lasers and Process Stability for Demanding Applications, 2019. Unter: https://www.slm-solutions.com/fileadmin/user_upload/SLM_R_280_Machine_EN.pdf, zuletzt geprüft am 21. Juni 2023
- [SLM19b-ol] SLM SOLUTIONS GROUP AG: Materialdatenblatt – Stainless Steel 316L/1.4404/A276, 2019. Unter: https://www.slm-solutions.com/fileadmin/user_upload/MDS_FE-Alloy_316L_0219.pdf, zuletzt geprüft am 21. Juni 2023

- [Son96] SONG, Y.-A.: Selektives Lasersintern metallischer Prototypen. Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Shaker Verlag GmbH, Band 2/96, Aachen, 1996 - ISBN 3-8265-1203-0
- [STS21] SUBEDI, S. C.; THOMA, D. J.; SURESH K.: TRUSS-TYPE SUPPORT STRUCTURES FOR SLM. In: Bourell, D. (Ed.): Solid Freeform Fabrication 2021: Proceedings of the 32th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium - An Additive Manufacturing Conference. Thirty-second Annual International Solid Freeform Fabrication (SFF) Symposium, August 2-4, Austin, TX, USA, 2021
- [Tho09] THOMAS, D.: The Development of Design Rules for Selective Laser Melting. Dissertation, The National Centre for Product Design & Development Research, University of Wales Institute, Cardiff, 2009
- [TMH+16] TÖPPEL, T.; MÜLLER, B.; HOEREN, K. P.J.; WITT, G. (2016): Eigenspannungen und Verzug bei der additiven Fertigung durch Laserstrahlschmelzen. In: *Schweißen und Schneiden* 68 (4), S. 176–186.
- [VA16] VAIDYA, R.; ANAND, S. (2016): Optimum Support Structure Generation for Additive Manufacturing Using Unit Cell Structures and Support Removal Constraint. In: *Procedia Manufacturing* 5, S. 1043–1059
- [WGH+17] WESSARGES, Y.; GIESEKE, M.; HAGEMANN, R.; KAERLE, S.; OVERMEYER, L.: Entwicklungstrends zum Einsatz des selektiven Laserstrahlschmelzens in Industrie und Biomedizintechnik. In: Lachmayer, R.; Lippert, R. B. (Hrsg.): Additive Manufacturing Quantifiziert – Visionäre Anwendungen und Stand der Technik, Springer Verlag GmbH, Berlin, Heidelberg, 2017 - ISBN 978-3-662-54112-8
- [WMB+20] WEBER, S.; MONTERO, J.; BLECKMANN, M.; PAETZOLD, K.: PARAMETERS ON SUPPORT STRUCTURE DESIGN FOR METAL ADDITIVE MANUFACTURING. Proceedings of the Design Society: DESIGN Conference, Vol. 1, 2020, p. 1145–1154
- [Woh22] WOHLERS, T.: „Wohlers Report 2022 Analysis. Trends. Forecast. 3 D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry“, 2022
- [WT18] WU, T.; TOVAR, A.: Multiscale, thermomechanical topology optimization of self-supporting cellular structures for porous injection molds. *Rapid Prototyping Journal*, 2018
- [Yad09] YADROITSEV, I.: Selective laser melting – Direct manufacturing of 3D-objects by selective laser melting of metal powders. Lambert Academic Publishing AG & Co. KG, Saarbrücken, 2009 - ISBN 978-3-8383-1794-6
- [YHB+17] YANG, L.; HSU, K.; BAUGHMAN, B.; GODFREY, D.; MEDINA, F.; MENON, M.; WIENER, S.: Additive Manufacturing of Metals: The Technology, Materials, Design and Production. Springer International Publishing, Cham, s.l., 2017 - ISBN 978-3-319-55127-2
- [YYK+21] YANG, DENGGUI; YIN, YANJUN; KANN, XINFENG; ZHAO, YAN; ZHAO, ZHENGZHI AND SUN, JIQUAN: “The mechanism of substructure formation and grain growth 316L stainless steel by selective laser melting“, IOP Publishing, 2021
- [Zen15] ZENG, K.: Optimization of support structures for selective laser melting. Dissertation, Faculty of the J. B. Speed School of Engineering of the University of Louisville, University of Louisville, Louisville, Kentucky, 2015

Eigene Veröffentlichungen:

- [KLL+19] KÜNNEKE, T.; LIENEKE, T.; LAMMERS, S.; ZIMMER, D.: “Design guidelines for post-processing of laser beam melting in context of support structures” in: A. Bernard, R. Leach, D. Pedersen, J. Taylor (Eds) Proceedings of the Special Interest Group meeting on Advancing Precision in Additive Manufacturing, Ecole Centrale de Nantes, France, September 2019; pp 137-140

- [LKG21] LAMMERS, S.; KRUSE A.; GIERSE J.: Konstruktionsrichtlinien in der Produktentwicklung In: KOCH R.; GRÄBLER I.; ZIMMER D.; TRÖSTER T. (HRSG.): Mehrzieloptimierte und durchgängig automatisierte Bauteilentwicklung für Additive Fertigungsverfahren im Produktentstehungsprozess - Ergebnisbericht des BMBF Verbundprojektes OptiAMix, Paderborn, 2021, ISBN:978-3-8440-7932-6
- [LKM23] LAMMERS, S.; KOERS, T.; MAGYAR, B.; ZIMMER, D.; LIENEKE, T.: "Depiction of support structures in technical drawings" 32th Annual International Virtual Solid Freeform Fabrication (SFF) Symposium – An Additive Manufacturing Conference. Texas, Austin, USA, 14.08.2023 – 16.08.2023
- [LLZ21a] LAMMERS, S.; LIENEKE, T.; ZIMMER, D.: "Development of a Method to Derive Design Guidelines for Production-suitable Support Structures in Metal Laser Powder Bed Fusion." 32th Annual International Virtual Solid Freeform Fabrication (SFF) Symposium – An Additive Manufacturing Conference. Texas, Austin, USA, 02.08.2018 - 04.08.2018
- [LLZ21b] LIENEKE, T.; LAMMERS, S.; ZIMMER, D.: "Geometrical Deviations in Additive Manufacturing – Influences on The Manufacturing Accuracy", 32nd Annual International Virtual Solid Freeform Fabrication (SFF) Symposium – An Additive Manufacturing Conference. Texas, Austin, USA, 02.08.2018 - 04.08.2018, pp 437-457.
- [LTM+18-1] LAMMERS, S.; TOMINSKI, J.; MAGERKOHL, S.; KÜNNEKE, T.; LIENEKE, T.; ZIMMER, D.: "Design Guidelines for a Software-Supported Adaptation of Additively Manufactured Components with Regard to a Robust Production" 29th Annual International Solid Freeform Fabrication (SFF) Symposium – An Additive Manufacturing Conference. Texas, Austin, USA, 13.08.2018 - 15.08.2018, pp 527-540.
- [LTM+18-2] LAMMERS, S.; TOMINSKI, J.; MAGERKOHL, S.; KÜNNEKE, T.; LIENEKE, T.; ZIMMER, D.: „Konstruktionsrichtlinien für eine softwaregestützte Anpassung von additiv gefertigten Bauteilen im Hinblick auf eine robuste Fertigung“ in: M. Kynast, M. Eichmann und G. Witt (Eds.): Rapid.Tech. International Trade Show & Conference for Additive Manufacturing. Proceedings of the 15th Rapid.Tech Conference Erfurt, Germany, 05 - 07 June 2018, pp. 81–94.
- [LTZ19] LAMMERS, S.; TOMINSKI, J.; ZIMMER, D.: "Guidelines for post processing oriented design of additive manufactured parts for use in topology optimization" In: F. Auricchio; E. Rank, S. Kollmannsberger, S. Morganti "Proceedings of II. International Conference on Simulation for Additive Manufacturing Sim-AM 2019" Pavia, Italy, September 11-13, 2019, pp 174-185,
- [TLW+18] TOMINSKI, J.; LAMMERS, S.; WULF, C.; ZIMMER, D.: "Method for a Software-Based Design Check of Additively Manufactured Components", 29th Annual International Solid Freeform Fabrication (SFF) Symposium – An Additive Manufacturing Conference. Texas, Austin, USA, 13.08.2018 - 15.08.2018, pp 69-79.
- [TLZ20] LIENEKE, T.; LAMMERS, S.; ZIMMER, D.: "Geometrical Deviations in Additive Manufacturing – Influences on the Manufacturing Accuracy", In: 32nd Annual International Virtual Solid Freeform Fabrication (SFF) Symposium, 2021

Normen:

- [ASTM F2792] Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies, 2021
- [DIN EN ISO 3274] Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Nenneigenschaften von Tastschnittgeräten, 1998
- [DIN EN ISO 4287] Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit, 2010
- [DIN EN ISO 4288] Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Regeln und Verfahren für die Beurteilung der Oberflächenbeschaffenheit, 1998
- [DIN EN ISO / ASTM 52900] Additive Fertigung – Grundlagen – Terminologie
- [DIN ISO 52911-1] Additive Fertigung – Technische Konstruktionsrichtlinie für Pulverbettfusion - Teil 1: Laserbasierte Pulverbettfusion von Metallen, 2017
- [DIN ISO 2768-1] Allgemeintoleranzen – Toleranzen für Längen- und Winkelmaße ohne einzelne Toleranzeintragung, 1991

- [VDI 3404] Additive Fertigung – Grundlagen, Begriffe, Verfahrensbeschreibungen, 2014
- [VDI 3405-3] Additive Fertigungsverfahren – Konstruktionsempfehlungen für die Bauteilfertigung mit Laser-Sintern und Laser-Strahlschmelzen, 2015
- [EN ISO 128-2] Technische Produktdokumentation (TPD) – Allgemeine Grundlagen der Darstellung. Teil 2: Linien, Grundregeln (ISO 128-2:2020); Deutsche Fassung EN ISO 128-2:2020
- [EN ISO 128-3] Technische Produktdokumentation (TPD) – Allgemeine Grundlagen der Darstellung Teil 3: Ansichten, Schnitte und Schnittansichten (ISO 128-3:2020); Deutsche Fassung EN ISO 128-3:2020

Studentische Arbeiten:

Die nachstehend aufgeführten studentischen Arbeiten wurden im Kontext der vorliegenden Dissertation am Lehrstuhl für Konstruktions- und Antriebstechnik der Universität Paderborn angefertigt. Die Definition der Zielsetzung, die Bearbeitung sowie die Auswertung, Interpretation und Visualisierung von Ergebnissen erfolgten unter wissenschaftlicher Anleitung der Betreuenden Prof. Dr.-Ing Detmar Zimmer, Dr.-Ing. Vera Denzer und Stefan Lammers, M.Sc. Die erzielten Ergebnisse sind zum Teil in die Dissertation eingeflossen. Der Autor bedankt sich bei allen Studenten für ihren Einsatz und ihre große Unterstützung.

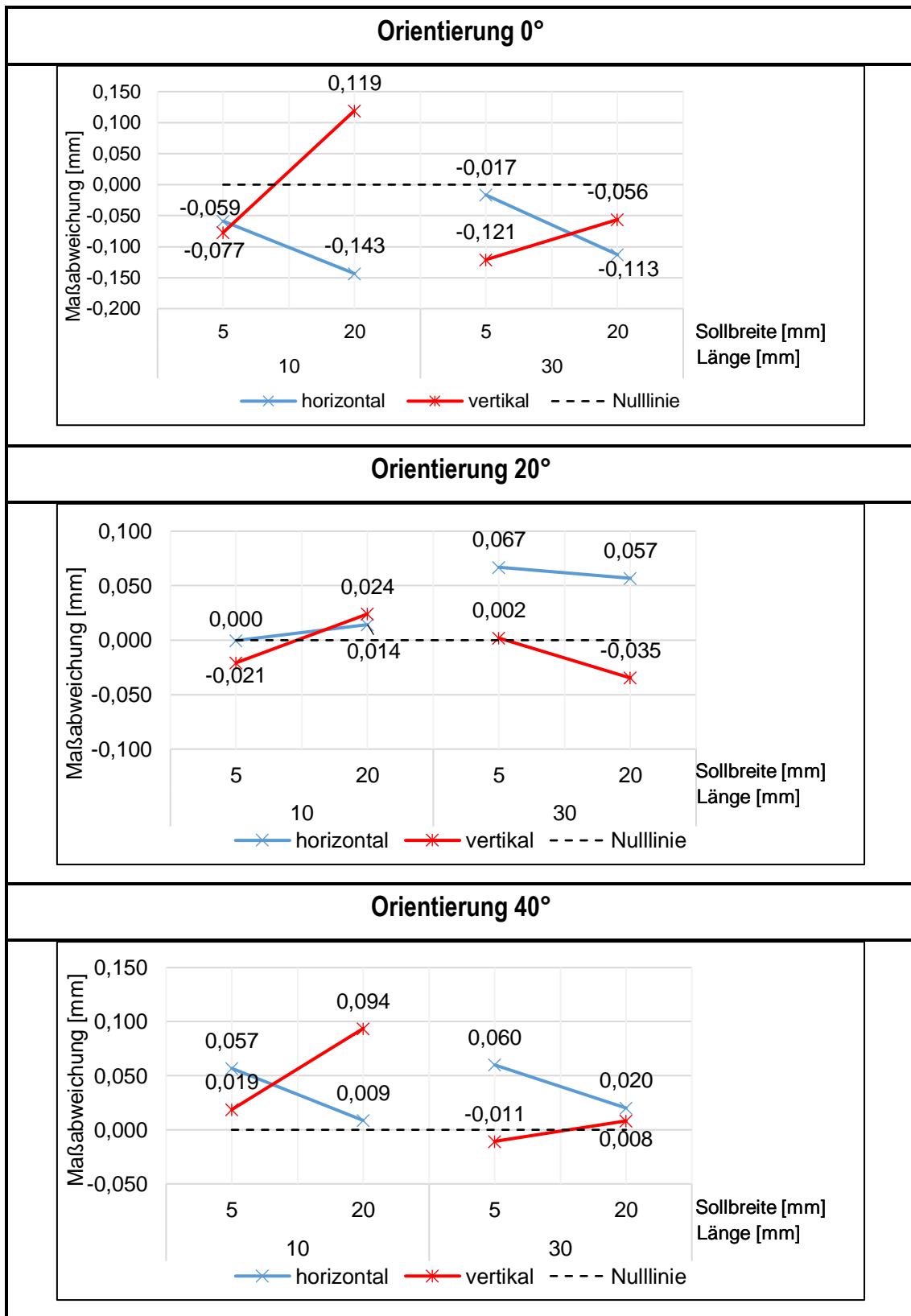
- [Aus19a] AUSTERMANN, L. P. (BETREUER: ZIMMER, D.; LAMMERS, S.): Erarbeitung von Konstruktionshinweisen für die Erstellung von Stützstrukturen im SLM-Verfahren. Universität Paderborn, Lehrstuhl für Konstruktions- und Antriebstechnik, unveröffentlichte Studienarbeit, 2019
- [Aus19b] AUSTERMANN, L.P. (BETREUER: ZIMMER, D.; LAMMERS, S.): Untersuchung des konstruktiven Einflusses von Stützstrukturen auf den Bauteilverzug im SLM-Verfahren. Universität Paderborn, Lehrstuhl für Konstruktions- und Antriebstechnik, unveröffentlichte Projektarbeit, 2019
- [Aus20] AUSTERMANN, L. P. (BETREUER: ZIMMER, D.; DENZER, V.; LAMMERS, S.): Entwicklung einer Methode zur Herleitung von Konstruktionsrichtlinien für eine fertigungsgerechte Stützstrukturkonstruktion und -simulation. Universität Paderborn, Lehrstuhl für Konstruktions- und Antriebstechnik, unveröffentlichte Masterarbeit, 2020
- [DeG21] DE GROOTE, C. (BETREUER: ZIMMER, D.; LAMMERS, S.): Erstellung eines Katalogs und Entwicklung eines Demonstratorbauteils zur Veranschaulichung von Konstruktionsrichtlinien für solide Stützstrukturen, Universität Paderborn, Lehrstuhl für Konstruktions- und Antriebstechnik, unveröffentlichte Studienarbeit, 2021
- [Die20] DIETRICH, F.N. (BETREUER: ZIMMER, D.; DENZER, V.; LAMMERS, S.): Wirtschaftliche Betrachtung von Stützstrukturen beim selektiven Laser-Strahlschmelzen. Universität Paderborn, Lehrstuhl für Konstruktions- und Antriebstechnik, unveröffentlichte Bachelorarbeit, 2020
- [Fry20] FRYE, T. (BETREUER: ZIMMER, D.; LAMMERS, S.): Stützstrukturen für das Laser-Strahlschmelzen – Erarbeitung von Darstellungsformen und Konstruktionsrichtlinien. Universität Paderborn, Lehrstuhl für Konstruktions- und Antriebstechnik, unveröffentlichte Studienarbeit, 2020
- [Joo21] JOOSTEN, I. Y. (BETREUER: ZIMMER, D.; DENZER, V.; LAMMERS, S.): Entwicklung eines neuronalen Netzes für die Vorhersage der Eignung von Stützstrukturparametern auf Basis experimentell durchgeführter Untersuchungen. Universität Paderborn, Lehrstuhl für Konstruktions- und Antriebstechnik, unveröffentlichte Masterarbeit, 2021
- [Kal19] KALESSE, P. (BETREUER: ZIMMER, D.; DENZER, V.; LAMMERS, S.): Experimentelle Untersuchungen von Stützstrukturen beim Laser-Strahlschmelzen. Universität Paderborn, Lehrstuhl für Konstruktions- und Antriebstechnik, unveröffentlichte Masterarbeit, 2019
- [Man22] MANN, F. (BETREUER: ZIMMER, D.; DENZER, V.; LAMMERS, S.): Validierung einer Methode von Konstruktionsrichtlinien anhand anwendungsnaher Prüfkörper und Bauteile. Universität Paderborn, Lehrstuhl für Konstruktions- und Antriebstechnik, unveröffentlichte Masterarbeit, 2022
- [Pau21] PAULUS, M.S. (BETREUER: ZIMMER, D.; DENZER, V.; LAMMERS, S.): Entwicklung eines neuronalen Netzes zur weiterführenden Untersuchung von Stützstrukturen. Universität Paderborn, Lehrstuhl für Konstruktions- und Antriebstechnik, unveröffentlichte Masterarbeit, 2021

- [Ras19] Rasche, K. (BETREUER: ZIMMER, D.; LAMMERS, S.): Erarbeitung einer Anleitung und eines Protokolls zur Einstellung von Supportparametern beim selektiven Laser-Strahlschmelzen. Projektarbeit, DMRC; KAt, Universität Paderborn, Paderborn, 2019

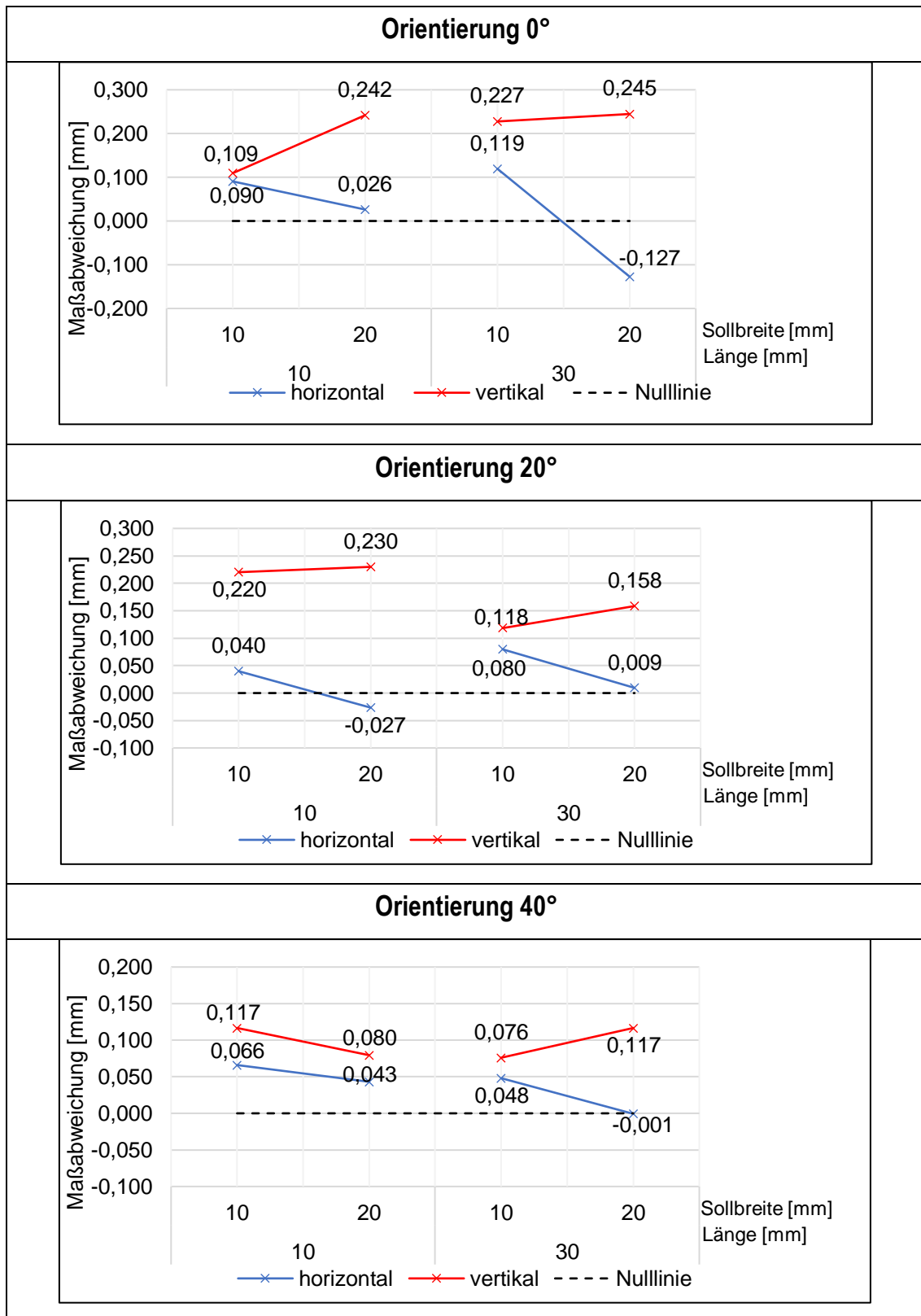
11 Anhang

A1 Untersuchungen am Querschnittsprofil des PK3.1	190
A2 Untersuchungen am Querschnittsprofil des PK3.1	191
A3 Untersuchungen am Querschnittsprofil des PK3.3	192
A4 Untersuchungen am Querschnittsprofil des PK3.4	193

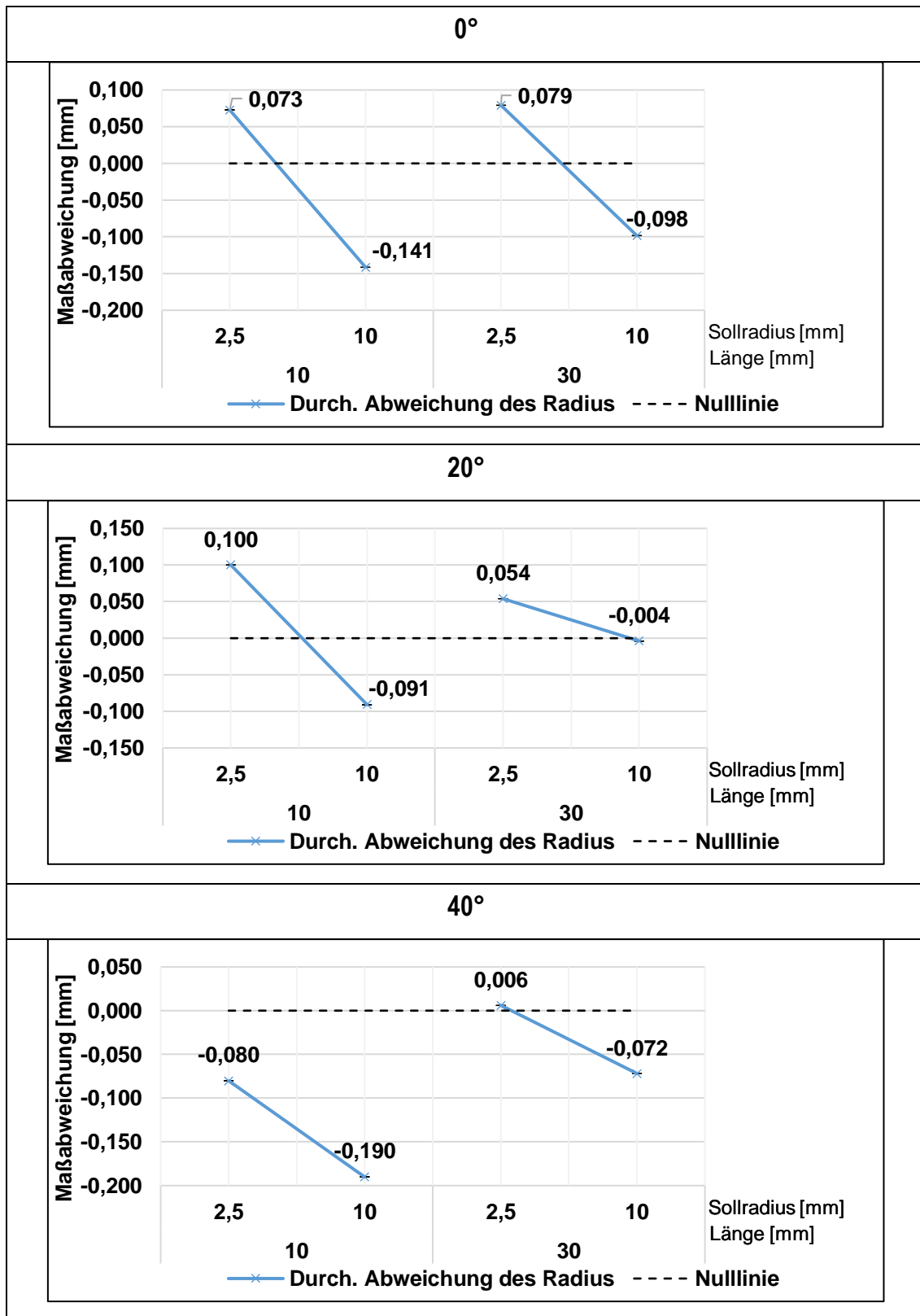
A1 Untersuchungen am Querschnittsprofil des PK3.1



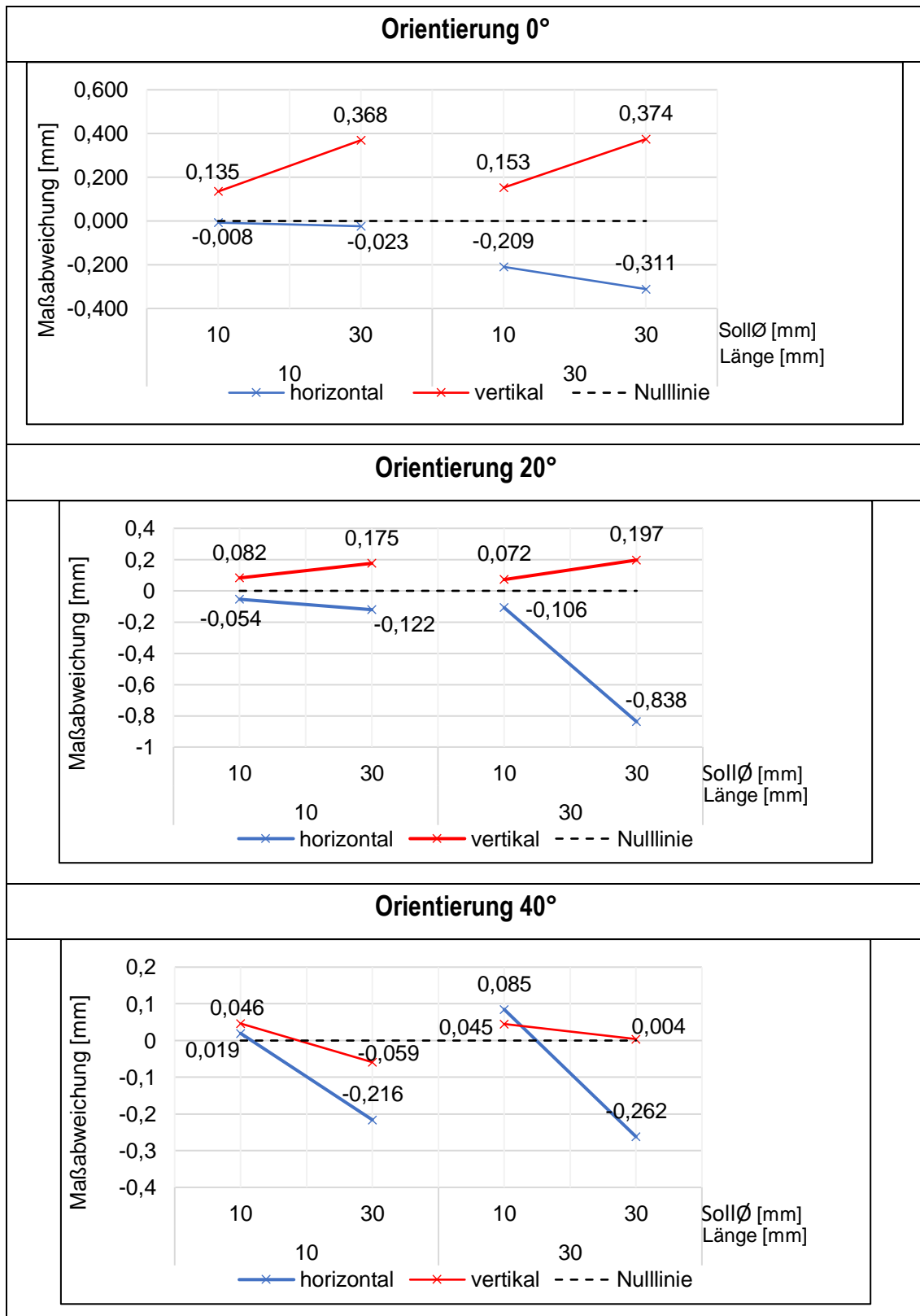
A2 Untersuchungen am Querschnittsprofil des PK3.1



A3 Untersuchungen am Querschnittsprofil des PK3.3



A4 Untersuchungen am Querschnittsprofil des PK3.4



Erklärung zur Zitation von Inhalten aus studentischen Arbeiten

In Ergänzung zu meinem Antrag auf Zulassung zur Promotion in der Fakultät für Maschinenbau der Universität Paderborn erkläre ich gemäß §11 der Promotionsordnung und unter Beachtung der Regelung zur Zitation studentischer Arbeiten:

Die von mir vorgelegte Dissertation habe ich selbstständig verfasst, und ich habe keine anderen als die dort angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt. Es sind Inhalte studentischen Ursprungs (studentische Arbeiten) in dieser Dissertation enthalten.

Ich habe die verwendeten Arbeiten entsprechend der Regelung „Zitation aus studentischen Arbeiten in Dissertationen“ zitiert.

Paderborn, 01.06.2024:

Unterschrift