

Andre Hirsch

Ein Beitrag zur Erarbeitung von Fertigungsrichtlinien für das Kunststoff Freiformen

Forschungsberichte des
Direct Manufacturing Research Centers

29

**Ein Beitrag zur Erarbeitung von Fertigungsrichtlinien
für das Kunststoff Freiformen**

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

genehmigte
DISSERTATION

von
Andre Hirsch, M.Sc.
aus Warstein

Tag des Kolloquiums: 31.10.2023

Referent: Prof. Dr.-Ing. Elmar Moritzer

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Dietmar Drummer

Forschungsberichte des Direct Manufacturing Research Centers
herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Elmar Moritzer

Band 29

Andre Hirsch

**Ein Beitrag zur Erarbeitung von Fertigungsrichtlinien
für das Kunststoff Freiformen**

D 466 (Diss. Universität Paderborn)

Shaker Verlag
Düren 2024

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Paderborn, Univ., Diss., 2023

Copyright Shaker Verlag 2024

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-9409-1

ISSN 2364-3072

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Direct Manufacturing Research Center (DMRC) in der Arbeitsgruppe Kunststofftechnik Paderborn (KTP) der Universität Paderborn. An dieser Stelle möchte ich meinen herzlichen Dank an folgende Personen aussprechen, ohne deren Unterstützung die Erstellung dieser Dissertation nicht möglich gewesen wäre.

Mein besonderer Dank gilt zunächst Herrn Prof. Dr.-Ing. Elmar Moritzer, meinem Doktorvater, für die Möglichkeit der Promotion, die wertvollen Anregungen, die kontinuierliche Unterstützung und seine entgegengebrachte Wertschätzung.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Dietmar Drummer danke ich für sein Interesse an meiner Arbeit und die freundliche Übernahme des Korreferats. Auch Herrn Prof. Dr.-Ing. Balázs Magyar sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Volker Schöppner möchte ich für die Mitwirkung in der Promotionskommission meinen Dank aussprechen.

Sehr geschätzt habe ich das stets hervorragende Arbeitsklima und die freundschaftliche Zusammenarbeit mit meinen Arbeitskolleginnen und Arbeitskollegen vom DMRC und KTP. Insbesondere möchte ich mich für die vielfältige Unterstützung bei Julian Wächter, Christian Schumacher und Frederick Knoop bedanken.

Den zahlreichen Studierenden, die durch ihre Mitarbeit als studentische Hilfskräfte sowie ihre Studien- und Abschlussarbeiten, zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, sei an dieser Stelle ebenfalls gedankt. Insbesondere Felix Hecker und Christian Lennart Elsner gilt mein großer Dank für die gute Zusammenarbeit und ihr Engagement bei den experimentellen Untersuchungen.

An letzter, doch eigentlich an erster Stelle möchte ich meiner Familie für die Motivation, die Unterstützung und die Geduld herzlich danken. Mein besonderer Dank gilt dabei meiner Frau Saskia für ihr unermüdliches geduldiges Zuhören, ihre Rücksichtnahme und die uneingeschränkte Unterstützung bei der Anfertigung dieser Arbeit.

Paderborn, im Januar 2024

Andre Hirsch

Zusammenfassung

Das Kunststoff Freiformen ist ein additives Fertigungsverfahren, mit dem dreidimensionale Bauteile durch schichtweises Auftragen feiner, geschmolzener Kunststofftropfen hergestellt werden können. Die parameteroffene Maschinensteuerung des zugehörigen Maschinensystems ermöglicht den Einsatz neuartiger und eigener Werkstoffe. Hierfür muss jedoch im Vorfeld eine Materialqualifizierung durchgeführt werden, bei der die verarbeitungsrelevanten Prozessparameter optimiert werden. Eine grundlegende Prozessparameteroptimierung kann ebenfalls sinnvoll sein, wenn spezifische Bauteileigenschaften erzielt werden sollen. Die Voraussetzung für derartige Optimierungen sind ein umfassendes Prozessverständnis und die Kenntnis über die jeweiligen Einflussfaktoren sowie deren Wirkprinzipien.

Im Rahmen dieser Arbeit werden Fertigungsrandbedingungen analysiert, um darauf aufbauend ein grundlegendes Prozessverständnis zu entwickeln und Störgrößen zu identifizieren. Anschließend werden die mechanischen Bauteileigenschaften unter Berücksichtigung relevanter Einflussfaktoren untersucht und Optimierungsansätze aufgezeigt. Im Hinblick auf die geometrischen Bauteileigenschaften wird nach der Analyse des Schwindungsverhaltens eine optimierte Methode zur Bestimmung der Skalierungsfaktoren entwickelt, mit der eine höhere Maßhaltigkeit erreicht werden kann. Abschließend werden ein optimiertes Verfahren zur Durchführung der Materialqualifizierung und zusammenfassende Fertigungsrichtlinien zur gezielten Prozessparameteroptimierung eines Bauteils dargelegt.

Summary

Plastic freeforming is an additive manufacturing process for producing three-dimensional components by applying fine, molten plastic droplets layer by layer. The parameter-open machine control of the associated machine system enables the use of innovative and custom materials. For this, a material qualification must be carried out in advance, in which the relevant processing parameters need to be optimized. It can also be useful to optimize the process parameters if specific component properties should be achieved. The requirements for such optimizations are a detailed understanding of the process and knowledge of the respective influencing factors as well as their effective principles.

In this work, therefore, manufacturing boundary conditions are analyzed in order to develop a fundamental understanding of the process and to identify disturbance variables. Subsequently, the mechanical properties of the components are investigated and optimization approaches are identified. With regard to the geometric component properties, after analyzing the shrinkage behavior, an optimized procedure for determining the scaling factors is developed with which higher dimensional accuracy can be achieved. Finally, an optimized procedure for performing a material qualification and summarized manufacturing guidelines for the targeted process parameter optimization of a component are presented.

Liste der Vorveröffentlichungen

- [MHB17] MORITZER, E.; HIRSCH, A.; BÜRENSHAUS, F.: Entwicklung lastfallgerechter Fertigungsrichtlinien für FDM-Strukturen zur Verstärkung von Hybridbauteilen. Deutscher Verband für Materialforschung und -prüfung e.V. - Additiv gefertigte Bauteile und Strukturen, Berlin (Deutschland), 2017
- [MHG+16] MORITZER, E.; HIRSCH, A.; GÜNTHER, K.; TEUTOBURG-WEISS, S.; LASAGNI, A.; KLOTZBACH, U.; SONNTAG, F.: Universelle Mikrobearbeitungsplattform und Basistechnologien für das Fertigen und Markieren mikrophysiologischer Systeme. Biomedizinische Technik - interdisziplinär, integrativ und innovativ, Zwickau (Deutschland), Universitätsverlag & Buchhandel Eckard Richter & Co. OHG, S. 65-70, 2016, ISBN: 978-3-95908-078-1.
- [MHG+17] MORITZER, E.; HIRSCH, A.; GÜNTHER, K.; SONNTAG, F.; KLOTZBACH, U.; LASAGNI, A.: Universal Micromachining Platform and Basic Technologies for the Manufacture and Marking of Microphysiological Systems. In: Micromachines, 8. Jg. Heft 8, S. 246, 2017, ISSN: 2072-666X.
- [MHH17] MORITZER, E.; HEIDERICH, G.; HIRSCH, A.: Fiber Length Reduction during Injection Molding. Europe-Africa Conference of the Polymer Processing Society, Dresden (Deutschland), 2017
- [MHN17] MORITZER, E.; HIRSCH, A.; NORDMEYER, T.: Effect of the Direct Injection Plasma (DIP) Treatment on the Bonding Strength of Adhesive Bonded Joints. 70th Annual Assembly of the International Institute of Welding (IIW), Shanghai (China), 2017
- [MBH18] MORITZER, E.; BÜRENSHAUS, F.; HIRSCH, A.: Development and Modeling of Design and Process Guidelines for FDM Structures for the Partial Reinforcement of Hybrid Structures. 34th International Conference of the Polymer Processing Society (PPS), Taipei (Taiwan), 2018
- [MH18] MORITZER, E.; HIRSCH, A.: Charakterisierung des Arburg Kunststoff Freiformens. WAK-Symposium, Bayreuth (Deutschland), 2018
- [MHH+18] MORITZER, E.; HIRSCH, A.; HÜTTNER, M.; WÄCHTER, J.: The Influence of Environmental Aging on the Material Properties of Back-Molded Composite Sheets. 34th International Conference of the Polymer Processing Society (PPS), Taipei (Taiwan), 2018
- [MBH19a] MORITZER, E.; BÜRENSHAUS, F.; HIRSCH, A.: Adhesive Bonding of FDM-Manufactured Parts Made of ULTEM 9085 Considering Surface Treatment, Surface Structure, and Joint Design. Welding in the World, 63. Jg. Heft 6, S. 1819-1832, 2019, ISSN: 0043-2288
- [MBH19b] MORITZER, E.; BÜRENSHAUS, F.; HIRSCH, A.: Advancing into New Dimensions. Kunststoffe international, 3/2019, S. 48-52, 2019, ISSN: 1862-4243
- [MBH19c] MORITZER, E.; BÜRENSHAUS, F.; HIRSCH, A.: Vorstoß in neue Dimensionen. Kunststoffe, 2/2019, Hanser Verlag, S. 68-72, 2019, ISSN: 0023-5563
- [MHH19] MORITZER, E.; HIRSCH, A.; HECKER, F.: Process Parameter Optimization to Improve the Mechanical Properties of Arburg Plastic Freeformed Components. Proceedings of the 30th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin (USA), S. 705-714, 2019
- [MHH+19] MORITZER, E.; HIRSCH, A.; HEIM, H.-P.; CHERIF, C. TRÜMPER, W.: Plastic droplet welding: bond strength between plastic freeforming structures and continuous fiber-reinforced thermoplastic composites. Welding in the World, Vol. 63, S. 867-873, 2019, DOI: 10.1007/s40194-019-00714-3
- [MHP19] MORITZER, E.; HIRSCH, A.; PAULUS, S.: Rissausbreitungsmechanismen in FDM-Verstärkungsstrukturen unter dynamischer Beanspruchung. Additive Fertigung von Bauteilen und Strukturen - Neue Erkenntnisse und Praxisbeispiele. Springer Vieweg, Wiesbaden (Deutschland), S. 185-198, 2019, ISBN: 978-3-658-27411-5
- [MHD21] MORITZER, E.; HIRSCH, A.; DALMER, C.: Investigation of Plastic Freeformed, Open-Pored Structures with Regard to Producibility, Reproducibility and Liquid Permeability. Industrializing Additive Manufacturing - Proceedings of AMPA 2020, Springer International Publishing, S. 112-129, 2021, ISBN: 978-3-030-54334-1

- [MHD+21] MORITZER, E.; HECKER F.; DRIEDIGER, C.; HIRSCH, A.: Comparison of Component Properties and Economic Efficiency of the Arburg Plastic Freeforming and Fused Deposition Modeling. Proceedings of the 32nd Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin (USA), S. 575–584, 2021
- [MHE+21a] MORITZER, E.; HECKER, F.; ELSNER, C. L.; HIRSCH, A.: Influences of Temperature-Dependent Boundary Conditions on Component Properties in Arburg Plastic Freeforming. Presented at the 36th International Conference of the Polymer Processing Society, Montreal (Canada), 2021
- [MHE+21b] MORITZER, E.; HECKER, F.; ELSNER, C. L.; HIRSCH, A.: Investigations for the Optimization of Visual and Geometrical Properties of Arburg Plastic Freeforming Components. Proceedings of the 32nd Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin (USA), S. 467–474, 2021
- [MHH21a] MORITZER, E.; HECKER F.; HIRSCH, A.: Investigation and Modeling of the Residence Time Dependent Material Degradation in the Arburg Plastic Freeforming. Proceedings of the 32nd Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin (USA), S. 1268-1275, 2021
- [MHH21b] MORITZER, E.; HECKER, F.; HIRSCH, A.: Aus der Forschung in die Anwendung - Materialqualifizierung im Kunststoff Freiformen. In: Kunststoffland NRW report, Ausgabe 2, S. 42-43, 2021
- [MHH21c] MORITZER, E.; HECKER, F.; HIRSCH, A.: Kleine Tropfen, große Wirkung. Kunststoffe, 9/2021, Hanser Verlag, S. 88-90, 2021

Studentische Arbeiten

Die nachstehend aufgeführten studentischen Arbeiten wurden im Kontext der vorliegenden Arbeit in der Arbeitsgruppe Kunststofftechnik der Fakultät für Maschinenbau an 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. Elmar Moritzer, Prof. Dr.-Ing. Volker Schöppner und Andre Hirsch). Die erzielten Ergebnisse sind zum Teil in diese Arbeit eingeflossen.

- [Els20] ELSNER, C. L. (Betreuer: MORITZER, E.; SCHÖPPNER, V.; HIRSCH, A.): Untersuchung parameter-abhängiger Einflüsse zur Optimierung der visuellen und geometrischen Bauteileigenschaften beim Arburg Kunststoff Freiformen. Masterarbeit, Kunststofftechnik Paderborn, Direct Manufacturing Research Center, Universität Paderborn, Paderborn (Deutschland), 2020
- [Hec19] HECKER, F. (Betreuer: MORITZER, E.; HIRSCH, A.): Optimierung der mechanischen Eigenschaften von Arburg Kunststoff Freigeformten Bauteilen durch gezielte Variation der Prozessparameter. Studienarbeit, Kunststofftechnik Paderborn, Direct Manufacturing Research Center, Universität Paderborn, Paderborn (Deutschland), 2019
- [Hec20] HECKER, F. (Betreuer: MORITZER, E.; SCHÖPPNER, V.; HIRSCH, A.): Untersuchung und Modellierung der verweilzeitabhängigen Schädigung des Materials im Kunststoff Freiformen. Masterarbeit, Kunststofftechnik Paderborn, Direct Manufacturing Research Center, Universität Paderborn, Paderborn (Deutschland), 2020
- [Jun19] JUNG, P. (Betreuer: MORITZER, E.; HIRSCH, A.): Experimentelle Untersuchung des viskositäts-abhängigen Benetzungsverhaltens von schmelzflüssigen Kunststoffropfen beim Arburg Kunststoff Freiformen. Studienarbeit, Kunststofftechnik Paderborn, Direct Manufacturing Research Center, Universität Paderborn, Paderborn (Deutschland), 2019
- [Wie21] WIEGMANN, L. (Betreuer: MORITZER, E.; HIRSCH, A.): Untersuchung der resultierenden Bauteileigen-schaften in Abhängigkeit des Benetzungsverhaltens von schmelzflüssigen Kunststoffropfen im Arburg Kunststoff Freiformen. Masterarbeit, Kunststofftechnik Paderborn, Direct Manufacturing Research Center, Universität Paderborn, Paderborn (Deutschland), 2021

Inhaltsverzeichnis	Seite
1 Einleitung und Motivation	1
2 Stand der Technik	2
2.1 Additive Fertigung	2
2.2 Extrusionsbasierte additive Fertigungsverfahren	3
2.3 Kunststoff Freiformen	3
2.3.1 Verfahrensprinzip und Maschinenkomponenten.....	3
2.3.2 Prozessparameter	6
2.3.2.1 Schichtdicke	6
2.3.2.2 Formfaktor	7
2.3.2.3 Überlappung	7
2.3.2.4 Rasterwinkel und Rasterfolgewinkel	8
2.3.2.5 Bauteilorientierung	8
2.3.2.6 Prozesstemperaturen.....	9
2.3.2.7 Dosiervolumen	9
2.3.2.8 Staudruck	10
2.3.2.9 Austragswert	10
2.3.3 Verfügbare Werkstoffe	10
2.3.4 Materialqualifizierung (Standardvorgehen)	11
2.3.5 Einflussgrößen auf die resultierende Bauteilqualität	13
2.3.5.1 Mechanische Bauteileigenschaften	13
2.3.5.2 Geometrische Bauteileigenschaften	15
2.3.5.3 Transferfähige Einflussgrößen aus dem FDM	15
2.4 Forschungsbedarf und Zielsetzung	16
3 Fertigungsrandbedingungen im Kunststoff Freiformen	19
3.1 Beeinflussbare Fertigungsrandbedingungen.....	19
3.1.1 Formfaktor	19
3.1.1.1 Wellenbildung auf der Bauteiloberfläche	20
3.1.1.2 Geometrieabhängiger Formfaktor.....	21
3.1.1.3 Verschiedene Formfaktoren in einem Fertigungsauftrag	23
3.1.2 Austragswert	25
3.1.2.1 Untere Grenze des Austragswertes.....	25
3.1.2.2 Toleranzband des Austragswertes	25
3.1.3 Weitere Prozessparameter	27
3.1.3.1 Zonen der Zylindertemperierung	27
3.1.3.2 Bauraumtemperatur	28
3.1.3.3 Staudruck	28

3.1.3.4	Schichtdicke	29
3.1.3.5	Überlappung zwischen Raster- und Konturlinien	29
3.1.4	Einfluss der Schichtzeit	30
3.1.4.1	Einfluss auf die mechanischen Bauteileigenschaften	31
3.1.4.2	Einfluss auf die geometrischen Bauteileigenschaften	33
3.2	Nicht beeinflussbare Fertigungsrandbedingungen	34
3.2.1	Düsenverschleiß.....	34
3.2.2	Untersuchung der Temperaturverteilung auf der Bauplattform	37
3.2.2.1	Vorgehensweise bei der Temperaturermittlung.....	38
3.2.2.2	Auswertung der Temperaturverteilung auf der Bauplattform	40
3.2.2.3	Welligkeit von Probekörpern in der Z-Bauteilausrichtung.....	43
3.2.3	Verweilzeit im schmelzförmigen Zustand.....	45
3.2.3.1	Modellierung der Verweilzeit.....	46
3.2.3.2	Einflussgrößen auf die Verweilzeit.....	48
3.2.3.3	Strategien zur Minimierung der Verweilzeit	50
4	Untersuchung und Optimierung der mechanischen Bauteileigenschaften	52
4.1	Statistischer Versuchsplan zur Analyse ausgewählter Prozessparameter	52
4.1.1	Erstellung eines statistischen Versuchsplans	53
4.1.1.1	Auswahl und Definition der Faktorstufen	54
4.1.1.2	Herstellung der Probekörper.....	56
4.1.2	Auswertung der Prozessparametereinflüsse	57
4.1.2.1	Zugfestigkeit und Elastizitätsmodul	58
4.1.2.2	Bruchdehnung.....	60
4.1.3	Optimierung der XY-Bauteilausrichtung.....	62
4.1.4	Modellvalidierung	63
4.2	Einfluss des Raster- und Rasterfolgewinkels	64
4.2.1	Herstellung und Untersuchung von Zugstäben.....	65
4.2.2	Verwendung einer plattenförmigen Probekörpergeometrie	67
4.3	Untersuchung und Optimierung der Z-Bauteilausrichtung	69
4.3.1	Analyse der mechanischen Eigenschaften der Z-Bauteilausrichtung	69
4.3.2	Optimierungsansätze	71
4.3.2.1	Steigerung des Tropfenvolumens.....	72
4.3.2.2	Verwendung eines wanddickenabhängigen Formfaktors.....	77
4.4	Fazit.....	80
5	Untersuchung und Optimierung der geometrischen Bauteileigenschaften.....	81
5.1	Theoretische Grundlagen	81
5.1.1	Schwindung im Allgemeinen	81
5.1.2	Einflussfaktoren auf die Schwindung in der additiven Fertigung	82
5.1.3	Schwindungskompensation im KF	83

5.2	Schwindungsverhalten von ABS-M30 im Kunststoff Freiformen.....	84
5.2.1	Prüfkonzept	85
5.2.2	Auswertung der Maßabweichungen von linearen Bauteilelementen.....	87
5.2.3	Analyse der prozessbedingten Einflussfaktoren im KF	89
5.2.3.1	Einfluss der Schichtzerlegung	89
5.2.3.2	Einfluss der ersten Bauteilschicht (Offset-Wert).....	92
5.2.3.3	Instabile Bauteilbereiche (Schwingungen) bei großen Probekörperlängen	93
5.2.3.4	Einfluss des Formfaktors	95
5.3	Optimierte Methode zur Bestimmung der Skalierungsfaktoren.....	95
5.3.1	Optimierung für die x- und y-Koordinatenrichtung	96
5.3.2	Optimierung für die z-Koordinatenrichtung	97
5.3.3	Optimierung der Berechnungsmethode	99
5.3.4	Validierung	100
6	Zusammenfassende Fertigungsrichtlinien	103
6.1	Optimierte Vorgehensweise für die Materialqualifizierung	103
6.1.1	Optimierter rechnerischer Formfaktor	107
6.1.1.1	Modellierung	108
6.1.1.2	Validierung	112
6.1.2	Mathematische Formfaktorstufenberechnung	115
6.1.2.1	Modellierung und Umsetzung	116
6.1.2.2	Validierung	119
6.1.3	Systematische Optimierung des Formfaktors	121
6.1.4	Vorteile der optimierten Vorgehensweise	124
6.2	Gezielte Prozessparameteroptimierung für ein spezifisches Bauteil	124
6.2.1	Düsentemperatur.....	125
6.2.2	Formfaktor	126
6.2.3	Weitere Einflussfaktoren	127
6.2.4	Konstruktive Fertigungsrichtlinien	128
7	Zusammenfassung	129
8	Ausblick	131
	Literaturverzeichnis	132
	Anhang 139	
A1	Technische Materialdatenblätter	139
A2	Prozessparameter	142
A3	Einfluss der Schichtzeit auf die mechanischen Bauteileigenschaften.....	144
A4	Optimierung der mechanischen Eigenschaften in Z-Bauteilausrichtung.....	145

A5	Geometrische Bauteileigenschaften - Probekörpergeometrien	147
A6	Optimierte Methode zur Bestimmung der Skalierungsfaktoren.....	149

Verzeichnis der Abkürzungen und Formelzeichen

a	%	Austragswert
α	°	Rasterwinkel
β	°	Rasterfolgewinkel
ABS		Acrylnitril-Butadien-Styrol
AF		Additive Fertigung
b_K	mm	Konturbreite
b_{Soll}	mm	Nennmaß der Wanddicke des Qualifizierungsbauteils
CCD		Central-Composite-Design
CT		Computer Tomographie
d_T	mm	Tropfendurchmesser
d_z	mm	Zylinderdurchmesser der Plastifiziereinheit
δ	%	Überlappung zwischen Rasterfüllung und Kontur
E-Modul		Elastizitätsmodul
et al.		et alii, et aliae, et alia (lateinisch, entspricht „und andere“)
etc.		et cetera
f.		folgend
ff.		fortfolgend
FDM		Fused Deposition Modeling
F_{max}	N	Maximalkraft
h_{Off}	mm	Offset
h_S	mm	Schichtdicke
h_T	mm	Tropfenhöhe
h_T/h_S -Verhältnis		Verhältnis der Tropfenhöhe zur Schichtdicke
h_z	mm	Zurückgelegter Schneckenweg für ein definiertes Tropfenvolumen
KF		Kunststoff Freiformen
k_F		Experimentell ermittelte Formfaktor
$k_{rechn.}$		Rechnerisch ermittelter Formfaktor
L/B		Längen-zu-Breiten-Verhältnis
l_{Ist}	mm	Tatsächliche Länge (gemessenes Ist-Maß des Probekörpers)
l_R	mm	Länge der Rasterinie
l_{Soll}	mm	Ausgangslänge (Nennmaß des Probekörpers nach CAD-Zeichnung)
$l_{z,Ist}$	mm	Ist-Maß des Probekörpers in z-Koordinatenrichtung (gemessen)
$l_{z,Soll}$	mm	Nennmaß des Probekörpers in z-Koordinatenrichtung (CAD-Zeichnung)
OFAT		One-Factor-at-a-Time

PC		Polycarbonat
PMMA		Polymethylmethacrylat
PP		Polypropylen
R^2		Bestimmtheitsmaß (statistisch)
S_A	mm	Absolute Schwindung
$S_{k,z}$		Skalierungsfaktor für z-Koordinatenrichtung
S_R	%	Relative Schwindung
STL		Standard Triangulation Language
Φ	%	Bauteildichte
V_B	mm ³	Tropfenvolumen in Form eines idealen Quaders
$V_{B,Dichte}$	mm ³	Tropfenvolumen in Form eines Quaders unter Beachtung der Bauteildichte
V_T	mm ³	Tropfenvolumen in Form eines idealen Zylinders
$V_{T,Schnecke}$	mm ³	Tropfenvolumen, definiert durch Maschinensteuerung (Schneckenweg)
X_T		Anzahl der Tropfen