

Kunststoffoptiken im Mehrschichtspritzguß

von der Technischen Fakultät
der Universität Erlangen-Nürnberg
genehmigte Dissertation
zur Erlangung des Grades

Doktor-Ingenieur

vorgelegt von:

Dipl.-Ing. (FH) Olaf Josef Zöllner
aus Sundern

Fachgutachter:

Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Gottfried W. Ehrenstein (Betreuer)
Prof. Dr.-Ing. Dietmar Drummer
Prof. Dr.-Ing. Georg Steinbichler

Für die Nutzung dieser Dissertationen gelten folgende rechtlichen Bestimmungen

- Die vorliegende Dissertation darf von der Universität Erlangen-Nürnberg frei im Internet angeboten werden. Eine weitere Verbreitung oder öffentliche Wiedergabe ist nicht gestattet und kann nur mit ausdrücklicher Genehmigung des Autors (Promovierten) geschehen.
- Die Vervielfältigung ist nur im Rahmen des privaten und eigenen wissenschaftlichen Gebrauchs (§ 53 UrhG) erlaubt.
- Die Publikation darf nicht bearbeitet oder in anderer Weise verändert werden.
- Der Autor hat das Recht, sein Werk, auch auszugsweise, anderweitig verfügbar zu machen und zu verbreiten.
- Für den Inhalt des Dokuments ist allein der Autor verantwortlich.

This publication (dissertation) is subject to the following terms of use:

- The University of Erlangen-Nürnberg is entitled to give open access to this publication. Further publication or public broadcasting needs explicit authorization of the copyright owner (doctor).
- Copying is permitted only for private or the own scientific purposes of the person who performs copying (according to § 53 of the German Copyright Act). The copyright owner grants production of complete single copies of this publication by means of a print on demand service.
- This publication may not be edited or changed otherwise.
- The copyright owner has got the right to publish or broadcast this publication as a whole or parts thereof elsewhere.
- The author is exclusively responsible for the content of this publication.

Vorwort

In meiner mehr als 24-jährigen Tätigkeit in der Anwendungsentwicklung des Geschäftsbereiches Polycarbonat der Bayer MaterialScience AG in Leverkusen hatte ich die Möglichkeit, an vielen verschiedenen Entwicklungen teilzunehmen und selbst durchzuführen. Motiviert durch eigene Vorarbeiten auf dem Gebiet der Herstellung von optischen Bauteilen aus Polycarbonat entstand die Idee, die neuen sich bildenden Möglichkeiten tiefgreifender zu untersuchen und in Form der vorliegenden Arbeit darzustellen.

Besonderer Dank gilt Herrn Prof. em. Dr.-Ing. Dr. h. c. Gottfried W. Ehrenstein, er hat mich zur Erstellung dieser Arbeit angeregt und im weiteren Verlauf stetig motiviert. Herrn Prof. Dr.-Ing. Dietmar Drummer, Inhaber des Lehrstuhls für Kunststofftechnik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg danke ich für die Unterstützung und vielen Anregungen zu meiner Arbeit. Beiden gilt mein Dank für ihr großes persönliches Engagement sowie die Erstellung Ihrer Gutachten.

Weiterhin möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Georg Steinbichler, Vorstand des Instituts für Polymer Injection Moulding and Process Automation an der Johannes Kepler Universität Linz für die Erstellung des dritten Gutachtens danken.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Dirk Schubert, Inhaber des Lehrstuhls für Polymerwerkstoffe der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg danke ich für die Übernahme der Aufgabe des weiteren prüfungsberechtigten Mitgliedes im Prüfungskollegium.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Paul Steinmann, Inhaber des Lehrstuhls für Technische Mechanik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg danke ich für die Übernahme des Vorsitzes im Prüfungskollegium.

Ebenfalls danken möchte ich allen Mitarbeitern der Abteilung Production & Development-Application Development der Bayer MaterialScience AG-Leverkusen. Ich wurde durch unzählige Diskussionen, Hinweise und kritische Fragen, aber auch aufmunternde Worte unterstützt und motiviert. Stellvertretend möchte ich hier Frau Dipl.-Ing. Sarah Klönne, Herrn Dr.-Ing. Peter Höck, Herrn Dipl.-Ing. Christoph Klinkenberg und Herrn Dipl.-Ing. Thomas Thulke erwähnen. Ebenfalls möchte ich meinen Vorgesetzten Herrn Dr. Klaus Zander, Herrn Dr. Ulrich Liman, und Herrn Dr. Dennis McCullough für Ihre Einwilligung zur Durchführung dieser Arbeit danken.

Frau Dr.-Ing. Natalie Rudolph vom Polymer Engineering Center-Mechanical Engineering Department der University of Wisconsin-Madison, USA und Herrn Dr.-Ing. Michael Gierth von der Dr. Gierth Ingenieurgesellschaft mbH-Aachen gilt ebenfalls mein Dank. Beide haben durch Anregungen und Diskussion zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Vor allem gilt mein ganz besonderer Dank meiner Frau Stefanie und meinen beiden Söhnen Phil und Luk. Sie haben stets liebevolles Verständnis gehabt und mir die Freiräume zur Erstellung dieser Arbeit gegeben.

Kurzfassung

Optische Bauteile werden vermehrt aus transparenten Kunststoffen hergestellt. Insbesondere neue Leuchtmittel wie LEDs begünstigen den Einsatz von Thermoplasten. Jedoch widersprechen die vom Optikdesign benötigten Geometrien den bekannten Richtlinien für die Auslegung von Formteilen aus Kunststoffen, so dass die bekannten Spritzgießverfahren an Grenzen stoßen. Um die geforderte Wirtschaftlichkeit und Präzision zu erreichen, müssen neue Herstellverfahren entwickelt werden.

Mit dem hier untersuchten Mehrschichtspritzgießen wird das optische Bauteil durch eine schichtweise Fertigung der Gesamtgeometrie hergestellt. Die Einzelschichten sind hierbei dünner als die Gesamtwanddicke, so dass sich eine signifikante Reduzierung der Kühlzeit und der verfahrenstechnischen Herausforderungen erzielen lässt. Dies wird durch den Vergleich von geometrischen und werkstofflich gebundenen optischen Eigenschaften eines Formteils gezeigt, das im Ein-, Zwei- und Dreischichtspritzguß hergestellt und untersucht wird. Hierzu wird eine Varianzanalyse von technologisch wichtigen Verarbeitungsparametern durchgeführt. Das in dieser Arbeit entwickelte Messverfahren verwendet ein auf den Prüfkörperwerkstoff Polycarbonat abgestimmtes Immersionsöl, so dass geometrische und innere, werkstoffgebundene Eigenschaften getrennt untersucht werden können. Theoretische Abkühlberechnungen, polarisationsoptische Aufnahmen und Wanddickenvermessungen vor und nach einer Wärmebehandlung zeigen die gegenseitige Beeinflussung von Vor- und Nachspritzling während der Herstellung. Sie helfen weiterhin, die Phasenübergänge fest, entropieelastisch und schmelzeförmig und damit Ursachen für die beobachteten Effekte zu erforschen.

Abstract

Transparent thermoplastic materials are more frequently being used in the manufacture of optical components, especially in illumination applications such as for LED's. However, the necessary geometry to achieve the targeted optical performance often stretches the limits of traditional thermoplastic design guidelines. Consequently, conventional injection molding processes alone will not adequately meet the manufacturing challenges. In order to archive economical production and the required precision, new processing technologies need to be developed.

In the multilayer injection molding process, an optical component is manufactured in layers to gain the final wall thickness. The individual single layers comprising the multi-layer optic are smaller than the final wall thickness and therefore allow a significant reduction in cooling time, as well as overcoming the issues associated with molding excessively thick parts. This is illustrated via the comparison of geometric and material related properties of an optical component which is manufactured in single, double and triple injection molding process. For this investigation a statistical analysis is conducted focusing on key processing parameters. Here, a new testing method has been developed using an immersion oil, which is correlated to the Polycarbonate material used in the lenses. Therefore geometrical and material related optical properties can be analyzed separately. Cooling simulations, polarization optical analysis, wall thickness measurement before and after heat aging, are used to verify the interaction of the pre- and post-molded geometry. They are further used to investigate the transition phases between solid, entropy-elastic and the molten phase to determine the root causes for the observed effects.

Inhalt

1	MOTIVATION UND ZIELSETZUNG	1
2	GRUNDLAGEN.....	3
2.1	Transparente Kunststoffe für Optiken.....	3
2.1.1	Überblick	3
2.1.2	Abgrenzung zu den optischen Gläsern.....	4
2.1.3	Kunststoffe für abbildende und nichtabbildende Optiken	6
2.2	Linsen für nichtabbildende Optiken	8
2.2.1	Überblick	8
2.2.2	Geometrische Bedingungen	11
2.2.2.1	Form, Welligkeit und Rauigkeit.....	11
2.2.2.2	Reflexion, Brechung	13
2.2.3	Werkstofflich gebundene Eigenschaften.....	16
2.2.3.1	Einfluss des Herstellprozesses auf die Brechzahl.....	16
2.2.3.2	Einflussgrößen auf die Transmissionen	18
2.2.3.3	Yellowness-Index.....	20
2.3	Herstellverfahren für Optiken aus transparenten Thermoplasten.....	21
2.3.1	Verarbeitungsrelevantes Werkstoffverhalten	21
2.3.2	Spritzgießen und Spritzprägen	24
2.3.3	Mehrschichtspritzgießen	28
2.4	Zusammenfassende Bewertung des Kenntnisstandes	32
3	WERKSTOFF UND SPRITZGIEßVERSUCHE	34
3.1	Werkstoff	34
3.2	Prüfkörpergeometrien	36
3.3	Versuchswerkzeug und Spritzgießmaschine	37
3.4	Spritzgießversuche zur Herstellung der Prüfkörper	38
3.4.1	Auswahl der Prozessparameter für die Versuchspläne.....	38
4	PRÜFVERFAHREN	45
4.1	Geometrische Eigenschaft – Gestaltsabweichungen	45
4.1.1	Messaufbau, Messgröße und -durchführung	45
4.1.2	Messungenauigkeit und Reproduzierbarkeit	47
4.2	Werkstofflich gebundene Eigenschaft – Verzerrung eines Punktemusters.....	47
4.2.1	Prüfungsaufbau und Funktionsprinzip	47
4.2.2	Wirkungsweise des Immersionsöls.....	49
4.2.3	Auswertung der gemessenen Punkteverschiebungen	50
4.2.4	Qualitätszahl der Punkteverschiebung	52
4.2.5	Reproduzierbarkeit der Messmethode.....	56
4.2.6	Auflösevermögen bei großen Einfallstellen.....	57

4.3	Transmission und Gelbwert (Yellowness Index).....	60
4.4	Spannungsoptische Messungen.....	62
4.5	Simulation des Abkühlverhaltens	63
4.6	Wärmelagerung.....	64
5	UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE	66
5.1	Prozessanalyse zur Untersuchung des geometrischen Qualitätsmerkmals	66
5.1.1	Einschichtprüfkörper	66
5.1.2	Zweischichtprüfkörper	67
5.1.3	Dreischichtprüfkörper	69
5.2	Prozessanalyse zur Untersuchung des werkstofflichen Qualitätsmerkmals.....	71
5.2.1	Einschichtprüfkörper	71
5.2.2	Zweischichtprüfkörper	72
5.2.3	Dreischichtprüfkörper	74
5.3	Spektraloptische Eigenschaften	76
5.4	Simulation des Abkühlverhaltens	78
5.4.1	Einschichtprüfkörper	78
5.4.2	Zweischichtprüfkörper	79
5.4.3	Dreischichtprüfkörper	81
5.5	Prozessabhängige Wanddicken nach dem Spritzgießen	84
5.6	Einfluss der Wärmebehandlung auf geometrische und innere Eigenschaften ..	87
5.6.1	Vorversuche	87
5.6.2	Einschichtprüfkörper	89
5.6.3	Zweischichtprüfkörper	90
5.6.4	Dreischichtprüfkörper	91
5.7	Charakteristisches Punkteverschiebungsmuster	93
5.7.1	Ein- und Zweischichtprüfkörper	93
5.7.2	Dreischichtprüfkörper	94
5.7.3	Einfluss des Werkzeugs auf das Punktemuster der Dreischichtprüfkörper.....	95
5.8	Verhalten des Vorspritzlings beim Dreischichtprüfkörper.....	96
5.8.1	Punkteverschiebung im Vorspritzling ohne Überspritzung	97
5.8.2	Punkteverschiebung nach Überspritzen und Schichtentrennung	98
5.9	Ergebnisse der Polarisationsoptik.....	99
5.9.1	Einschicht- und Zweischichtprüfkörper	99
5.9.2	Dreischichtprüfkörper	102
6	DISKUSSION UND BEWERTUNG DER ERGEBNISSE	104
6.1	Wirkmechanismen bei der Herstellung	104
6.1.1	Einfluss des Drucks.....	105
6.1.2	Einfluss der Temperatur.....	107
6.1.2.1	Temperaturverlauf bei dem Einschichtprüfkörper.....	108
6.1.2.2	Temperaturverlauf bei dem Zweischichtprüfkörper	109
6.1.2.3	Temperaturverlauf bei dem Dreischichtprüfkörper	110
6.1.2.4	Einfluss der Abkühlgeschwindigkeit	114
6.1.3	Zusammenfassung.....	115

6.2	Prozessanalyse	117
6.3	Geometrische Eigenschaften im Vergleich.....	121
6.4	Erreichte Kühlzeiten und optische Eigenschaften.....	123
7	ZUSAMMENFASSUNG	127
8	LITERATURVERZEICHNIS	130
9	LISTE DER FORMELZEICHEN UND ABKÜRZUNGEN	140
10	ANHANG.....	144

1 Motivation und Zielsetzung

Optische Technologien zählen zu den wichtigsten Wachstums- und Zukunftsmärkten, den so genannten „Enabling Technologies“ [1]. Neben traditionellen Feldern wie Sehhilfen, Mikroskopen und Fernrohren werden Optiksysteme seit einigen Jahren auch in den Bereichen digitaler Informationsgewinnung und Visualisierung eingesetzt. Beispiele sind Video- und Kameraoptiken, WebCams und Mobiltelefone. Ein weiterer, interessanter Markt entwickelt sich in der Beleuchtungstechnik. Durch neue Leuchtmittel wie LEDs, deren Licht nur wenig ultraviolette (UV) und infrarote (IR) Strahlung enthält, können Kunststoffe vermehrt in optischen Systemen Anwendung finden, die vorher nur Glasoptiken vorbehalten waren [2, 3, 4, 5]. Das stark streuende LED-Licht benötigt zur zielgerichteten Ausleuchtung komplexe, freigeformte, halb-brechende und halb-reflektierende Optiken, die in Glas nur schwer herstellbar sind [6], Bild 1.1.



Bild 1.1 LED Freiformoptiken

links: LED-Scheinwerfer Audi R8-Fokussierlinse PC / Lichtleiter PMMA [7]

mitte: LED-Straßenbeleuchtung [8].

rechts: LED-Freifformoptik aus Polycarbonat – Vor- und Nachspritzling [9]

Weitere Argumente für den Einsatz von Thermoplasten in Optiken sind die Gewichtsersparnis und die Möglichkeit der Funktionsintegration im Vergleich zu Glas.

Zur Funktionserfüllung einer Beleuchtungsoptik müssen Streu- und Intensitätsverluste, sowie Lichtstrahlablenkungen gering gehalten werden. Dies wird aus der Geometrie der Funktionsoberflächen (Form, Welligkeit und Rauigkeit) und von den werkstofflichen Eigenschaften (Transmission, Absorption, Dispersion, Spannungen, Dichteverteilungen) integral bestimmt. Hieraus folgt, dass die Abformungsgenauigkeit der optischen Funktionsflächen, an denen Licht ein- und ausgekoppelt wird, hoch sein muss. Bei Einfallstellen und Formabweichung sind Genauigkeiten im unteren zweistelligen μm -Bereich erforderlich, bei den Oberflächenrauigkeiten sogar im einstelligen nm -Bereich [10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17]. Zum anderen bedeutet dies

auch, dass das Formteilmolumen möglichst geringe innere Spannungen, Verunreinigungen und anisotrope Materialeigenschaften aufweisen sollte, um die optischen Eigenschaften nicht negativ zu beeinflussen. Dies stellt eine besondere Herausforderung entlang der gesamten Prozesskette dar. Diese prozessbedingten Anforderungen überlagern sich mit der aus dem Optikdesign resultierenden Geometriegestaltung. Oftmals werden kompakte Linsenkörper mit großen Wanddicken von 10 mm, 20 mm und 30 mm eingesetzt, die je nach Optikdesign und Funktionsintegrationen in der Geometrie noch stark variieren können. Eine gleichmäßige Formteilmfüllung, Druckübertragung, Schwindungsausgleich und damit die geforderte Abformpräzision der optischen Flächen wird hierdurch erschwert.

Die großen Wanddicken führen außerdem zu langen Kühlzeiten von 5 bis 20 Minuten und teilweise noch darüber. Durch die hiermit verbundenen langen Verweilzeiten der Schmelze in der Plastifiziereinheit der Spritzgießmaschine, ist die thermische Belastung der Kunststoffe und damit die Gefahr von Materialschädigungen größer als bei dünnwandigen Anwendungen. Weiterhin werden durch die langen Kühlzeiten eine kontinuierliche Prozessführung und -kontrolle erschwert. Nicht zuletzt werden die Kosten für diese Bauteile durch die langen Kühl- und Zykluszeiten negativ beeinflusst [18].

Mit dem in dieser Arbeit untersuchten Mehrschichtenspritzgießen wird von dem klassischen Weg des Spritzgießens oder Spritzprägens abgewichen und durch eine schichtweise Herstellung ein optisches Bauteil gefertigt. Hierbei sind die Einzelschichten dünner als die Gesamtwanddicke, so dass sich eine Reduzierung der Kühlzeit ergibt [19, 20]. Es wird weiterhin erwartet, dass die verfahrenstechnischen Probleme bei komplexen dickwandigen Optiken reduziert und so die gewünschten geometrischen und inneren Eigenschaften leichter erreicht werden.

Für das Verständnis des Mehrschichtenspritzgießens werden grundlegende Betrachtungen hinsichtlich der Abformung der Werkzeuggeometrie und der optisch relevanten inneren Eigenschaften an einer speziell hierfür hergestellten Geometrie, die im Ein-, Zwei- und Dreischichtverfahren hergestellt wird, durchgeführt.

Für die Beurteilung des Potentials des Mehrschichtenspritzgießens ist eine Untersuchung der erreichbaren Qualitäten erforderlich. Deshalb wird eine Prozessanalyse der geometrischen und optischen Qualitätsmerkmale in Abhängigkeit von technologisch relevanten Prozessparametern durchgeführt. Von besonderem Interesse ist es hierbei, den Einfluss des Formteilmolumens und der Schichten auf die Lichtstrahlabweichung aufzuzeigen. Hierzu wurde ein besonderes Prüfverfahren entwickelt, das einen quantitativen Einfluss von Prozessparametern auf die werkstofflich gebundenen, optisch relevanten Eigenschaften ermöglicht. Als geometrisches Qualitätsmerkmal wird die Ebenheit der Formteilaußenflächen gewählt.

Abschließend werden die erreichbaren optischen Eigenschaften der Einschicht- und der Mehrschichtprüfkörper miteinander verglichen und bewertet.

2 Grundlagen

2.1 Transparente Kunststoffe für Optiken

2.1.1 Überblick

Die meist verwendeten transparenten Kunststoffe in optischen Bauteilen sind Polymethylmethacrylat (PMMA), Polycarbonat (PC) und die Cycloolefin-Polymere (COP) bzw. Cycloolefin-Copolymere (COC). Tabelle 2.1 zeigt hierzu einen Überblick. Zum Vergleich sind die Werte für das optische Glas BK7 angegeben.

PMMA entsteht durch Block-, Emulsions- oder Suspensionspolymerisation von Methacrylsäure. Es besitzt die höchsten Transmissionswerte der hier genannten transparenten Thermoplaste. Seine Brechzahl liegt allerdings unterhalb der von PC und COC, was bei gleicher Brechkraft eine größere Wanddicke in optischen Bauteilen für PMMA zur Folge hat. Die Glasübergangstemperatur und damit die Wärmeformbeständigkeit von PMMA sind im Vergleich zu PC und COC geringer. PMMA besitzt eine vergleichsweise hohe Wasseraufnahme, was zu Volumenveränderungen und Beeinflussung der Brechzahl durch Feuchteaufnahme führen kann. Seine hohe Oberflächenhärte (Kratzfestigkeit) und UV-Beständigkeit prädestinieren PMMA für Außenanwendungen [21].

Im Gegensatz zu Polyolefinen werden für die Herstellung von COC-Polymeren nicht ein, sondern zwei Monomerbausteine (Ethylen und Norbornen) verwendet. COC ist im Gegensatz zu den teilkristallinen Polyolefinen amorph und damit transparent, aber durch seine olefinischen Monomerbausteine säure- und laugenbeständig. COC hat hohe Transmissionswerte, eine niedrige Dichte, eine große Brechzahl und weist eine geringe Wasseraufnahme auf. Die Materialien sind aber thermisch empfindlich und neigen bei langen Zykluszeiten zu oxidativem Molekülabbau [22, 23, 24].

Polycarbonat wird aus Bisphenol A und Phosgen durch Polykondensation hergestellt. PC hat die höchste Brechzahl, aber auch eine erhöhte Neigung zur Dispersion (niedrige Abbe-Zahl, Aufspaltung des Lichts in seine Spektralfarben). Die Wasseraufnahme von PC ist geringer als von PMMA und seine Glasübergangstemperatur ist hoch. Weiterhin besitzt Polycarbonat im Vergleich zu den anderen Werkstoffen die höchste Zähigkeit. Hierdurch sind auch bei hohen mechanischen und thermischen Belastungen komplexe optische Systeme mit hoher Funktionsintegration möglich [25].

Das transparente amorphe Polyamid (PA) wird aus cycloaliphatischen Diamin und Dodecandisäure hergestellt. Die kristallinen Strukturen sind hierbei so klein, dass es zu keiner sichtbaren Lichtstreuung kommt. Es wird besonders dort eingesetzt, wo geringe Spannungsrisssneigung und hohe Chemikalienbeständigkeit gefordert wird. Die thermische Wärmeausdehnung und die Wasseraufnahme sind hoch, was bei präzisen optischen Systemen zu Nachteilen führen kann [21].

Eigenschaften / Norm	Einheit	PMMA Plexiglas® POQ628	PC Makrolon® LED 2245	COC TOPAS® 5013S	PA amorph Trogamid® CX7323	Optisches Glas BK7®
Brechzahl ISO 489 – Methode A	–	1,491	1,586	1,533	1,516	1,5168
Abbe-Zahl v_d	–	59	34	56	52	64
Transmission / ISO 13468-2	%	92	90	91	91	92 (10 mm)
Glasübergangstemperatur 10 °C/min/ ISO 11357-1,-2	°C	108	145	134	140	557
Wasseraufnahme / ISO 62 (23 °C, 50 % rel. F.)	%	0,6	0,12	0,01	1,5	–
Dichte / ISO 1183-1	g/cm ³	1,19	1,19	1,02	1,02	2,51
Wärmeausdehnungskoeffizient ISO 11359-1-2	10 ⁻⁵ /°C	8	6,5	6	9	0,71-0,8
Charpy Schlagzähigkeit ISO 179/1eU,23°C	KJ/m ²	20	k. Bruch	13	k. Bruch	–
E-Modul / ISO 527-1,2	N/mm ²	3.300	2.350	3.200	1.400	82.000

Tabelle 2.1 Vergleich verschiedener Eigenschaften transparenter Kunststoffe [21, 22, 23, 24, 25], sowie von optischem Glas BK7 [26]

Des Weiteren befinden sich noch Polystyrol (PS), Polyetherimid (PEI), Polyethersulfon (PES) und Polymethylmethacrylimid (PMMI) in optischen Anwendungen: Polystyrol besitzt eine niedrige Schlagzähigkeit von 8-16 KJ/m², eine niedrige Glasübergangstemperatur ($T_g = 80-100$ °C) und eine niedrige Abbe-Zahl von 31 [12, 27]. Polyetherimid und Polyethersulfon haben beide sehr geringe Transmissionswerte von nur ca. 80 % [12, 24]. Polymethylmethacrylimid hat eine Transmission von 91 %, eine Brechzahl von 1,53 und eine Glasübergangstemperatur von $T_g = 163$ °C. Jedoch ist die Bruchdehnung mit 4-5,5 % niedrig [21]. In den letzten Jahren wurden auch transparente Silicone für optische Anwendungen entwickelt. Sie bieten in der Kombination von Transmission bis 95 % und Wärmeformbeständigkeit bis zu 150 °C durchaus Einsatzpotential, liegen aber in den E-Modulwerten und Oberflächenhärten eher im Bereich weicherer Kunststoffe wie TPUs oder TPEs [28, 29]. Ferner existieren noch die Gießharze, wie das CR 39 als Vertreter dieser duroplastischen optischen Kunststoffe auf Basis von Polyallyldiglycolcarbonat. Ihr Einsatz hat sich jedoch bislang hauptsächlich auf die Herstellung von Brillengläsern beschränkt [30].

2.1.2 Abgrenzung zu den optischen Gläsern

Transparente Thermoplaste sind organische Materialien deren Hauptbestandteil Kohlenstoff ist. Anorganisches Glas entsteht durch Zusammenschmelzen von Sili-

ziumdioxid mit weiteren Komponenten wie u. a. Aluminiumoxid (Al_2O_3), Bortrioxid und Phosphorpentoxid. Es sind unterkühlte Schmelzen, nicht kristallin und weitgehend homogen [31]. Optische Gläser sind in großer Variation mit unterschiedlichen Brechzahl-Dispersions-Kombinationen herstellbar. Sie können so maßgeschneidert die gewünschten optischen Anforderungen erfüllen, Bild 2.1 und Tabelle 2.1. Bei den transparenten Kunststoffen stehen im Vergleich hierzu nur wenige Typen zur Verfügung und diese haben aufgrund ihres chemischen Aufbaus typenabhängige, feste Brechzahl- und Dispersionswerte, die am unteren Rand des Glasbereiches liegen.

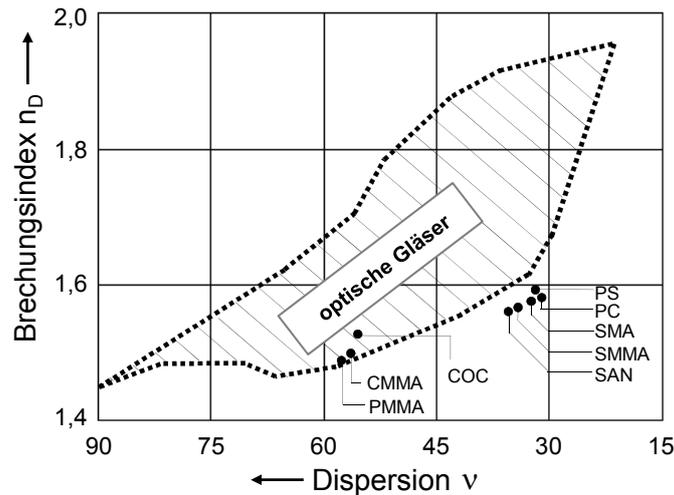


Bild 2.1 Brechzahl und Dispersion von optischen Gläsern und Kunststoffen [32]

Bei der Auslegung von Optiken sind die Abhängigkeit der Eigenschaften der Kunststoffe von Umwelteinflüssen wie der Temperatur und der Feuchtigkeit, die geringe Oberflächenhärte, sowie der Kontakt mit anorganischen Lösungsmitteln zu berücksichtigen. Dies bedeutet eine höhere Empfindlichkeit im späteren Einsatz oder während der Produktion, sowie die eventuelle Notwendigkeit einer zusätzlichen Beschichtung. Durch die Feuchtigkeitsaufnahme ergeben sich zum einen eine Brechzahländerung infolge der Dichtezunahme und zum anderen eine Änderung der geometrischen Abmessungen durch die Volumenzunahme. Beide Effekte beeinflussen die optische Leistungsfähigkeit. Hierbei gibt es große Unterschiede zwischen den Kunststoffen, Tabelle 2.1.

Besonders zu berücksichtigen ist, dass der Temperaturgang der Brechzahl dn/dT bei Kunststoffen immer negativ ist und im Vergleich zu Glas um eine Größenordnung höher liegt [22, 32], Tabelle 2.2.

Eigenschaften	Einheit	PMMA	PC	COC	PA amorph	Glas
Brechzahländerung dn/dT	$10^{-4} / ^\circ\text{C}$	-1,2	-1,3	-1,0	-1,6	-0,09 bis + 0,1

Tabelle 2.2 Änderung der Brechzahl in Abhängigkeit der Temperatur für $T < T_g$ einiger transparenter Thermoplaste und Glas [16, 33]

Der im Vergleich zu Glas fast zehnfach höhere thermische Wärmeausdehnungskoeffizient von Kunststoffen kann zu maßlichen Veränderungen bei Temperaturwechsel führen und ist die Ursache für den höheren Temperaturgang der Brechzahl bei den Kunststoffen [33]. Durch die niedrigere Wärmeformbeständigkeit der Kunststoffe sind Grenzen bei der Anwendung vorgegeben (Tabelle 2.1). Bei den transparenten Kunststoffen besteht eine höhere Sensibilität der optischen Stoffeigenschaften gegenüber dem Verarbeitungsprozess (Spritzgießen und Spritzprägen).

Hingegen besitzen Kunststoffe wesentliche Vorteile gegenüber Glas. Kunststoffe haben eine höhere Zähigkeit. Hierdurch ist ein universeller Einsatz in Kombination mit Funktionsintegrationen möglich. Durch die niedrige Dichte der Kunststoffe ergeben sich Gewichtsvorteile und es lassen sich im Spritzgießverfahren komplexe Freiformoptiken herstellen, die in Glasoptiken nicht oder nur mit großem Aufwand darstellbar sind. Außerdem lässt sich durch Spritzgießen eine Massenfertigung kostengünstiger durchführen als durch die bekannten Press- und Polierverfahren bei der Glasverarbeitung [34].

Im Vergleich zu optischen Gläsern haben transparente Kunststoffe immer dann ein hohes Anwendungspotential und Substitutionsmöglichkeit, wenn [3, 34, 35]:

- Gewichtseinsparung und Miniaturisierung angestrebt werden
- lichtbeugende Strukturen (z. B. Nanostrukturen) abgeformt werden
- asphärische und freiformflächige Linsensysteme verlangt werden
- Funktionselemente integriert werden können
- Gestaltungsfreiheit ausgenutzt werden soll
- durch hohe Stückzahlen bei vollautomatisierter Fertigung Systemkosten reduziert werden
- Optiken, bei denen die oben genannten material- und herstellenspezifischen Nachteile der Kunststoffe nicht stören

2.1.3 Kunststoffe für abbildende und nichtabbildende Optiken

Die beschriebenen Substitutionspotentiale gegenüber Glas müssen für die abbildende und nichtabbildende Optik differenziert betrachtet werden.

Bei abbildenden Optiken wird ein optisches System zur Erzeugung von Abbildern der Originalobjekte genutzt. Hierzu werden Lichtstrahlen, ausgehend von einem Objekt, durch ein optisches Gerät (Linse, Spiegel, Fernrohr, Auge ...) geführt, wodurch ein Bild des Objektes erzeugt wird. Für die abbildenden Systeme können grob drei Genauigkeitsklassen definiert werden [34]:

Hohe Qualität : hohe optische Anforderungen, nahezu keine Aberration z. B. bei Wafer-Stepper, Mikroskop

Mittlere Qualität: Aberration wird anwendungsoptimiert korrigiert, z. B. bei Ferngläsern, Daten- und Videoprojektoren, Head-Up Displays, Digitalkameras

Niedrige Qualität: keine korrigierte Abbildung notwendig, z. B. bei Auswertung von Bildkontrast oder Lichtintensität, Wegmesssystem, Lichtschranken

Anwendungen für Kunststoffoptiken in abbildenden Systemen werden im mittleren und niedrigen Qualitätsbereich gesehen. Hierbei sollten bei moderaten thermischen und optischen Anforderungen Stückzahlen möglichst über 10.000 pro Jahr liegen. Der Haupttreiber sind die Gewichtsersparnis, sowie die vermehrte Nutzung von asphärischen Optiken zur Reduzierung der Anzahl von optischen Flächen [34]. Im hohen und mittleren Qualitätsbereich überwiegen im Vergleich zu optischen Gläsern bei den transparenten Kunststoffen die beschriebenen werkstoff- und verarbeitungsspezifischen Nachteile [34]. Änderungen der optischen Eigenschaften durch Umwelteinflüsse wie Temperatur und Wasseraufnahme, der hohe Wärmeausdehnungskoeffizient sowie die verarbeitungsbedingte Anisotropie der optischen Eigenschaften, können zu Variationen in der Lage des Fokussierpunktes und zu Abbildungsfehlern führen und sind für diese Anwendungen nur schwer zu kompensieren [36]. Aufgrund seiner maßgeschneiderten guten optischen Eigenschaften, verbunden mit hoher Kratzfestigkeit und Witterungsbeständigkeit, wird Glas auch zukünftig eine wichtige Rolle, besonders für hochwertige abbildende Systeme, einnehmen [37].

Für die nichtabbildenden Optiken und ganz besonders für die Beleuchtungsoptiken eignen sich die Kunststoffe besser. Im Gegensatz zur abbildenden Optik geht es nicht um die Erzeugung eines Abbildes der Quelle, sondern um die Ausleuchtung des Ziels. Hierbei wird eine gewisse Lichtverteilung bei gegebener Lichtquelle erzeugt.

Die Anforderungen sind für viele Anwendungen ebenfalls hoch, doch im direkten Vergleich mit der hohen und mittleren Qualität abbildender Optiken in Kunststoffen leichter umsetzbar. So sind Abbildungsfehler von untergeordneter Bedeutung und der Optikdesigner hat mehr Geometrie-Freiheitsgrade in der Auslegung seiner Optik. Hierdurch können Nachteile in den optischen Eigenschaften der Kunststoffe eher ausgeglichen und/oder toleriert werden. Bei der ultravioletten (UV) und infrarot (IR) reduzierten Strahlung der LED-Beleuchtung können für die Kunststoffe zusätzlich neue Bereiche erschlossen werden. Die neuen LED-Beleuchtungsoptiken fordern heute hoch komplexe, freigeformte, halb-brechende und halb-reflektierende Optiken, die in Glas nur noch schwer herstellbar sind [38, 39, 40]. Laut Herstellern von Beleuchtungsoptiken in KFZ-Scheinwerfersystemen zeichnet sich bei der optischen Auslegung von LED-Scheinwerfern ab, dass vermehrt transmissive Kunststoffoptiken eingesetzt werden [41]. Auch für die Anwendungen von LED-Beleuchtungsoptiken in Nichtautobereichen sind die zu erwartenden hohen Stückzahlen und die Verwendung von Freiformflächen eindeutige Argumente für den Einsatz von transparenten Kunststoffen [8, 42].

2.2 Linsen für nichtabbildende Optiken

2.2.1 Überblick

Die Anforderungen für optische Bauteile sind vielfältig und können abhängig vom jeweiligen Anwendungsgebiet der Optik unterschiedlich gewichtet sein, Bild 2.2.

Beleuchtungsoptiken werden oft in sehr exponierten Bereichen eingesetzt, die neben dem technischen Anforderungsprofil auch den Design- und Erscheinungsansprüchen genügen müssen. Deshalb sollte jegliche Beeinflussung der Funktion und Erscheinung durch Fließlinien, Quetschfalten, Schlieren, Lunker und andere Spritzgießfehler vermieden werden. Dies macht es auch notwendig, alle Arten von Kontaminationen durch Staub und andere Fremdstoffe und -partikel aus der Umgebung der Herstellungsprozesskette zu vermeiden. Je nach Anwendungsgebiet wird deshalb eine Fertigung im Reinraum empfohlen und macht spezielle Ausführungen der Spritzgießmaschinen, Plastifiziereinheit und Peripheriegeräte notwendig [43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51].

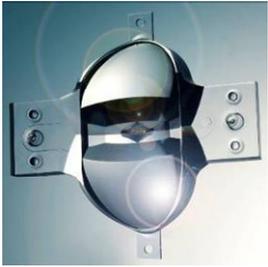
<p>Geometrisch Anforderungen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Kontur • Oberfläche • Rauigkeit • Krümmungsradius • Abmessung • Winkel • Toleranzen 	<p>Lichttechnische Anforderungen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Leuchtmittel • Ausleuchtung, Lichtverteilung • Farben • gesetzliche Anforderungen 	<p>Umweltanforderungen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Temperaturstabilität • Feuchtigkeit • Chemische Beständigkeit • Vergilbung • E-Modul • konstruktive Integration • Mechanik • Toleranzen
<p>Werkstofflich gebundene Anforderungen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Brechzahl / Dispersion • Reflexionsgrad • Transmission • Absorption • Streuung • Eigenfarbe • Doppelbrechung 		<p>Wirtschaftlichkeit</p> <ul style="list-style-type: none"> • Zykluszeit • Stückzahl • Fixkosten • Werkzeug- und Maschinenaufwand • Ausschuss • Toleranzen
	<p>Visuelle Anforderung</p> <ul style="list-style-type: none"> • Brillanz • Lunker, Einschlüsse • Oberflächenfehler wie Schlieren und Einschlüsse • Verschmutzung • Fließlinien 	

Bild 2.2 Überblick an produktspezifische Anforderungen für eine nichtabbildende Kunststoffoptik [6, 34, 40, 41, 52]

Bei der Betrachtung der Herstellkosten müssen im Vergleich zu anderen Kunststoffbauteilen einige Besonderheiten berücksichtigt werden [18]. Neben den Materialkosten ist ein Haupttreiber bei den Herstellkosten die geforderte präzise Geometrie für eine effiziente Lichtausbeute. Hierdurch werden eng tolerierte Formeinsätze benötigt, und die Anzahl von Mehrfachkavitäten ist durch auftretende Kavitätsschwankungen eingeschränkt. Des Weiteren werden die Herstellkosten bei den dickwandigen Optiken besonders durch die wanddickenabhängige, lange Kühlzeit be-

stimmt, die in vielen Fällen noch durch eine qualitätsbedingte zusätzliche Verweilzeit im Spritzgießwerkzeug verlängert wird.

Trotz der UV und IR reduzierten Strahlung ist der Einsatz von Kunststoffen bei der LED-Beleuchtung sehr genau zu spezifizieren. Für die sogenannten Primär- oder Vorsatzoptiken (direkt auf dem Halbleiter sitzende Optik) sind die Anforderungen wie Haftung, thermische Stabilität bei 100 °C bis 150 °C von über 20.000 h und für bestimmte Anwendungen sogar eine Lötbarkeit (bleifreie Profile, 260 °C) für die meisten transparenten Thermoplaste nur schwer erreichbar, Bild 2.3 rechts. Aus heutiger Sicht werden deshalb bei Hochleistungs-LEDs für die Primäroptiken bevorzugt Duroplaste eingesetzt. Anders ist dies bei den etwas weiter von der LED entfernten Sekundäroptiken, Bild 2.3 links. Da die Strahlungsintensität sehr schnell mit dem Abstand zur LED-Lichtquelle abnimmt, ist für diese Anwendung das Materialportfolio erweitert.

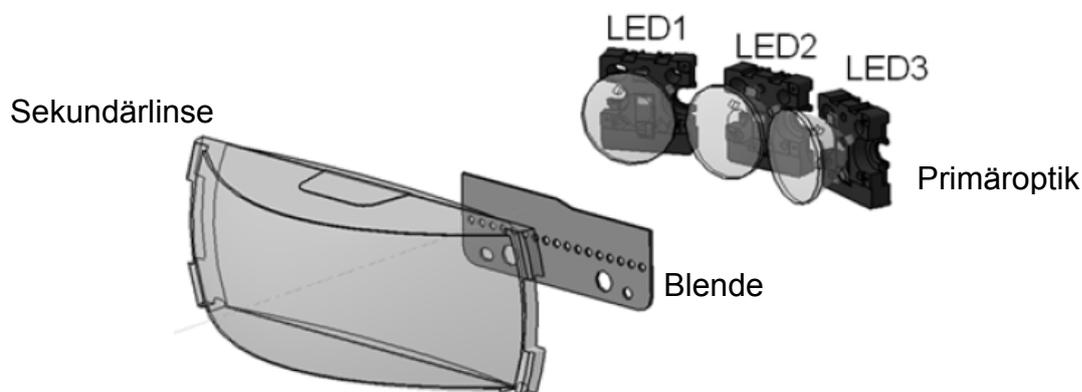


Bild 2.3 Audi R8 LED Scheinwerfer mit Primäroptik, Blende und Sekundärlinse aus Polycarbonat [5]

Die Entwicklung der LEDs geht in hoch effiziente, leistungsfähige und energie-schonende Systeme [53]. Einige Entwicklungen der Abstrahlcharakteristik führen deshalb möglicherweise zu einer Verschiebung zu kürzeren und somit energiereicheren Wellenlängen. Dies ist deshalb zu berücksichtigen, da Kunststoffe durch Absorption von Strahlung, abhängig von der Wellenlänge der Strahlung und des Energieeintrags und den damit verbundenen photochemischen Reaktionen (Radikalbildung, Oxidation, Vergilbung), geschädigt werden [54, 55]. Die Schädigung, besonders im kurzwelligen Lichtspektrum, ist deshalb groß, weil dort die Dissoziationsenergie der Bindungen mit der Photonenenergie der Strahlung weitgehend übereinstimmt [56]. Des Weiteren liegen nach heutiger Information die Dauergebrauchstemperaturen für Hochleistungs-LEDs, wie z. B. in Automobilscheinwerfern, bei 100 °C und darüber [52, 53, 57]. Die Alterung durch Kombination von Strahlungs- und Temperaturbelastung aller Kunststoffteile (Linsen, Gehäuse und Anbauteile) kann hierdurch um ein Vielfaches ansteigen.

Für die Funktionserfüllung einer Beleuchtungsoptik ist es wichtig, dass Streu- und Intensitätsverluste sowie Lichtstrahlableitungen gering gehalten werden. Dies wird aus der Geometrie der Funktionsoberflächen (Form, Welligkeit und Rauigkeit) und von den werkstofflich gebundenen, inneren Eigenschaften (Transmission, Absorption, Dispersion, Spannungen, Dichteverteilungen) integral bestimmt. Hieraus folgt, dass die Abformungsgenauigkeit der optischen Funktionsflächen, an denen Licht ein- und ausgekoppelt wird, hoch sein muss. Zum anderen bedeutet dies auch, dass die optischen inneren Eigenschaften möglichst hoch sind und wenig durch den Herstellprozess beeinflusst werden [3, 11, 14, 52, 57].

Bild 2.4 zeigt schematisch, wie die Geometrie und die werkstofflichen Eigenschaften Einfluss auf einen Lichtstrahl nehmen. Hierbei sind die dargestellten Stoffkennzahlen von der Wellenlänge λ des Lichtes abhängig.

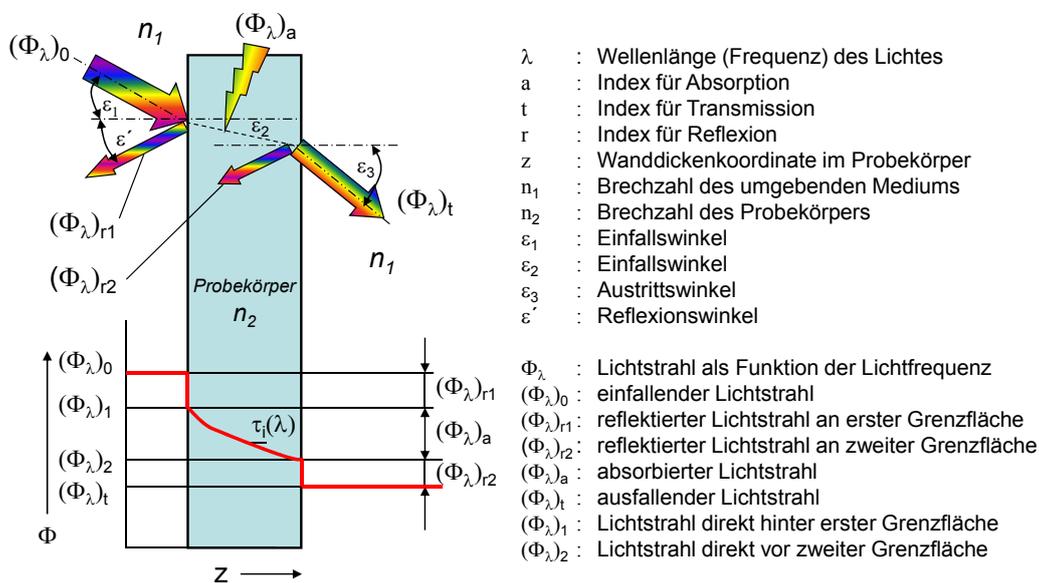


Bild 2.4 Strahlungsdurchgang durch eine Linse [31]

In der Beleuchtungsoptik werden alle physikalischen Möglichkeiten zur Umlenkung von Licht angewandt und auch miteinander kombiniert. Hierzu gehören Lichtleitung, Lichtreflexion an Oberflächen, totale Reflexion im Inneren von Linsen und Lichtleitern sowie Lichtbrechung und -streuung [6, 40].

Auf dem Weg von einer Lichtquelle durch einen Linsenkörper wird der eintretende Lichtstrahl Φ_0 durch die Reflexion an der ersten Grenzfläche Φ_{r1} auf die Intensität Φ_1 reduziert. Die Brechzahl bestimmt hierbei die Höhe der Reflexion und die Oberflächenbeschaffenheit, wie Welligkeit und Rauigkeit die Ablenkung des eintretenden Lichtstrahls. Innerhalb des Linsenkörpers nimmt die Intensität des Lichtstrahls durch Absorption Φ_a exponentiell auf die Intensität Φ_2 ab. Hierbei wird der Lichtstrahl durch die inneren Eigenschaften wie Brechzahlverteilung, Polarisierung, Doppelbrechung beeinflusst. Auch Verunreinigungen und Abbauprodukte können zu Lichtstrahl-

ablenkungen führen. Das ausfallende Licht wird an der zweiten Grenzfläche nochmal reflektiert Φ_{r2} , so dass nach dem Durchgang durch den Optikkörper nur noch der Lichtstrahl mit der Intensität Φ_t vorhanden ist. Die Richtung des ausfallenden Lichtstrahls wird durch die Summe der geschilderten Ablenkungsmöglichkeiten (geometrische und innere) integral beeinflusst [31, 58].

Im Nachfolgenden werden die geometrischen Anforderungen an Beleuchtungsoptiken und der Einfluss des Herstellprozesses auf die inneren Eigenschaften beschrieben.

2.2.2 Geometrische Bedingungen

2.2.2.1 Form, Welligkeit und Rauigkeit

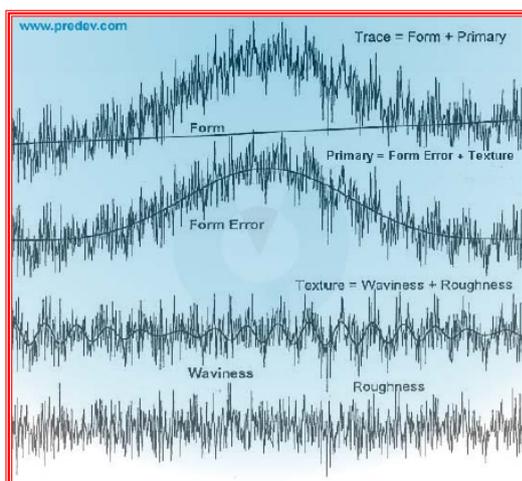
Für die optische Funktion einer Linse ist die eng tolerierte Einhaltung der im Optikdesign berechneten Linsengeometrie und Oberflächenkontur besonders wichtig. Die erreichbare Präzision bei optischen Komponenten ist immer eine Kombination aus den Faktoren [14, 59]:

Werkstoff → Schwindungsverhalten, bei komplexer Geometrie und Wanddickenverteilungen

Spritzgießwerkzeug → Genauigkeit der Formeinsätze

Spritzgießfertigung → Verfahrensvariante, Präzision, Reproduzierbarkeit

Bezogen auf die optische Funktion und Leistungsfähigkeit lässt sich eine Oberfläche durch drei Parameter charakterisieren: Formfehler, Welligkeit und Rauigkeit.



Formfehler: große räumliche Wellenlänge, übergeordnete Geometrieabweichung

Welligkeit: räumliche Frequenz der Oberfläche, $1 \mu\text{m} - 1 \text{mm}$, (z. B. Einfallstelle)

Rauigkeit: kleine räumliche Wellenlänge, $1 \text{nm} - 1 \text{mm}$

Bild 2.5 Oberflächenbeschreibung: Formfehler + Welligkeit + Rauigkeit [13, 60]

Der Formfehler (übergeordneter Verzug) muss so gering wie möglich sein, um die spezifizierte Beleuchtungsfunktion zu erreichen. Hierbei wirken die aus der Kunststoffverarbeitung bekannten Mechanismen wie prozessabhängiges Schwindungs- und Verzugsverhalten auf die geometrische Form. Je nach Geometrie und Wanddickenverteilung erfordert dies spezielle Werkzeug- und Verarbeitungsstrategien bis zum Vorhalten des zu erwartenden Verzuges. Neben der „übergeordneten“ Formabweichung wirken sich bei der Beleuchtungsoptik bereits kleine Abweichungen der Oberflächenwelligkeit und -rauigkeit aus. Bild 2.6 zeigt hierzu die Unterschiede im Reflexionsverhalten eines einfallenden Lichtstrahles bei einer Oberflächenrauigkeit im Nanobereich (links) und einer Oberflächenwelligkeit im Mikrobereich z. B. einer Einfallstelle (rechts).

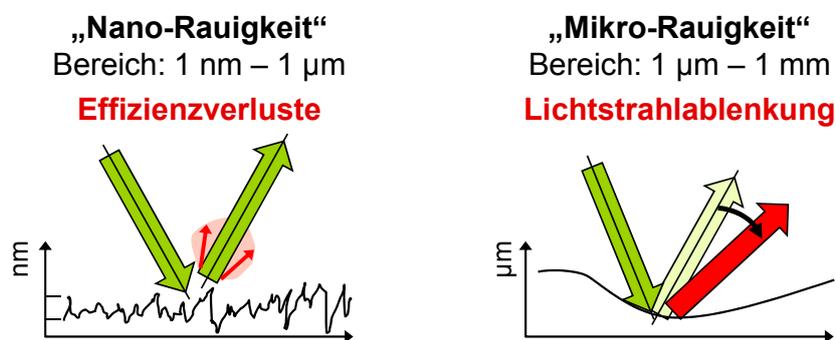


Bild 2.6 Lichtstrahlstreuung und Ablenkung [61]

links: Oberflächenrauigkeit

rechts: Oberflächenwelligkeit

Soll bei reflektierenden Flächen von Präzisionsoptiken nur 1 % diffuse Lichtstreuung auftreten, um Lichteffizienzverluste durch Streuung zu reduzieren, so muss die maximal zulässige Rauigkeit der Oberfläche im einstelligen nm-Bereich liegen [6]. Diese Rauigkeit wird nach entsprechender Politur des Spritzgießwerkzeugs bei der Abformung im Spritzgießprozess auf die Kunststoffoberfläche übertragen.

Durch eine größere Welligkeit oder Unebenheit, z. B. eine Einfallstelle, wird der Lichtstrahl mit einem bestimmten Winkel in eine ungewollte Richtung abgelenkt. Eine exakte Abformung der lichttechnisch wirksamen Oberflächen für Optikkomponenten ist bezogen auf die zulässige Lichtablenkung wichtig, und die hierfür entscheidenden Einfallstellen sind prinzipiell zu vermeiden bzw. zu minimieren [52, 57]. Da aber eine fehlerfreie Abformung besonders bei komplexen, dickwandigen Optiken wiederum nur schwer zu erreichen ist, ist die Kenntnis der maximal zulässigen Größe einer Einfallstelle und anderer kleinerer Formfehlstellen entscheidend. Zudem ist wichtig, dass der Formfehler bzw. die Welligkeit nicht durch eine sprunghafte Änderung der Oberflächenkontur entsteht. Die durch Schwindungseffekt entstehenden Formabweichungen sind im Allgemeinen nicht sprunghaft, sondern folgen eher einem kurvenförmigen Verlauf. Für die Strahlenabweichung ist hierbei das Verhältnis

zwischen Tiefe und Breite der Einfallstelle ausschlaggebend. Theoretische Untersuchungen fordern für den Fall der internen Reflexion (z. B. für Lichtleiter) Einfallstellentiefen von weniger als 5 bis 10 μm [61, 62]. Hierbei wird vorausgesetzt, dass die Lichtstrahlenablenkung durch die Einfallstelle kleiner als $0,1^\circ$ ist. Bei externer Reflexion und vor allem für Transmission sind die Toleranzen für zulässige Lichtstrahlenablenkung größer, so dass auch größer Einfallstellen möglich sind [38].

Durch großen Aufwand sind heute schon hohe Genauigkeiten erreichbar. So werden Spiegellinsen für Head-up-Displays mit maximalen Geometriefehlern von 20 μm und Oberflächenrauigkeiten von 5 nm hergestellt [63]. Durch mehrfache Iterationsschritte im Vorhalten der gemessenen Schwindung und hohen prozesstechnischen Aufwand (wie z. B. lange Restkühlzeiten) werden Linsen von 80 mm bzw. 100 mm Durchmesser mit Genauigkeiten von 5,7 μm [24] bzw. 6 μm [64] gefertigt. Mit Hilfe von Optimierungsschleifen bei der Herstellung von komplexen Freiformflächen konnten Formabweichungen von $\pm 30 \mu\text{m}$ erzielt werden [64]. Detaillierte Untersuchungsergebnisse für zulässige Abweichungen in dieser sehr jungen Anwendung im Bereich der Beleuchtungsoptiken liegen noch nicht vor. Geprüft wird die Funktion der Beleuchtungsoptik, d. h. wird die gewünschte Ausleuchtung erreicht, so werden die Oberflächen in der Regel nicht korrigiert. Aufgrund der bisherigen Aussagen im Markt und der theoretischen Berechnungen aus dem Optikdesign, ist jedoch davon auszugehen, dass, abhängig von den Anforderungen der Beleuchtungsoptik, die zulässigen Formabweichungen im unteren zweistelligen μm -Bereich liegen werden.

2.2.2.2 Reflexion, Brechung

Reflexion

Neben der Geometrie (Oberflächenwelligkeit und -rauigkeit) bestimmt die Brechzahl maßgeblich die Reflexion und Brechung. Tritt ein Lichtstrahl von einem transparenten Medium mit der Brechzahl n_1 in ein anderes transparentes Medium mit der Brechzahl n_2 , so wird ein Teil des Lichtstroms reflektiert, der Rest dringt in das Medium ein, wobei im allgemeinen Brechung erfolgt. Bei senkrechtem Einfall und hiervon gering abweichendem Winkel bis ca. 30° , kann die Reflexion durch eine vereinfachte aus der fresnelschen Beziehung hergeleitete Gleichung bestimmt werden [31, 65].

$$\rho(\lambda) = \frac{(n_1 - n_2)^2}{(n_1 + n_2)^2} \quad 2.1$$

n_1 = Brechzahl des umgebenden Mediums, n_2 = Brechzahl des Prüfkörpers

Die Höhe der Reflexion richtet sich demnach allein nach der Brechzahl der beteiligten Medien. Die Brechzahl ist wellenlängenabhängig, so dass zur Berechnung des gesamten Reflexionsgrades dies für jede einzelne Wellenlänge durchführen müsste. Gleichung 2.1 zeigt an, dass Materialien mit kleinerer Brechzahl geringere Refle-

xionsverluste haben. Wie der Vergleich zwischen PC ($n_{PC} = 1,585$) mit PMMA ($n_{PMMA} = 1,491$) bei $\lambda_d = 587,6$ nm (gelbe Spektralfarbe) und Brechung an Luft ($n_1 = 1$) bestätigt, ist der Reflexionsverlust bei PMMA mit 3,9 % geringer als bei PC mit 5,1 %.

$$\rho_{PC}(587,6nm) = \frac{(n_1 - n_2)^2}{(n_1 + n_2)^2} = \frac{(1 - 1,585)^2}{(1 + 1,585)^2} = 0,051$$

$$\rho_{PMMA}(587,6nm) = \frac{(n_1 - n_2)^2}{(n_1 + n_2)^2} = \frac{(1 - 1,491)^2}{(1 + 1,491)^2} = 0,039$$

Wie in Bild 2.4 dargestellt, tritt Reflexion an jeder Grenzfläche auf, also am Eintritt des Lichts von Luft ins Medium und wieder am Austritt vom Medium in Luft. Die Zweifach-Reflexion kann mit nachfolgender Formel abgeschätzt werden. Die sehr geringen Intensitätsverluste durch darüberhinausgehende Reflexion im Körper werden hierbei nicht berücksichtigt [31, 58]:

$$\rho_{ges} = 1 - T_{ges} = 1 - (1 - \rho)^2 = 1 - (1 - 2\rho + \rho^2) = 2\rho - \rho^2 \quad 2.2$$

Die Grenzflächenreflexion ρ_{ges} bestimmt die maximale Transmission T_{max} eines Werkstoffs.

$$T_{max} = 100\% - \rho_{ges} \quad 2.3$$

Durch Absorption wird diese dann werkstoff- und verarbeitungsspezifisch weiter reduziert. In Tabelle 2.3. sind für $\lambda_d = 587,6$ nm und Brechung an Luft ($n = 1$) die maximalen Transmissionen T_{max} für einige transparente Werkstoffe nach Gleichung 2.1, Gleichung 2.2 und Gleichung 2.3. berechnet.

Werkstoff	Brechzahl bei $\lambda_d = 587,6$ nm	Maximale Transmission
Polycarbonat	1,585	90,1 %
PMMA	1,491	92,4 %
COC	1,530	91,4 %
Kornglas BK7	1,5168	91,8 %

Tabelle 2.3 Maximale Transmission einiger transparenter Werkstoffe.
Berechnet nach Gleichungen 2.1, 2.2 und 2.3

Brechung

Im Allgemeinen treten, wie oben beschrieben, an den Grenzflächen Reflexion und Brechung gemeinsam auf. Der einfallende Lichtstrahl wird abhängig von den Materialpaarungen aufgeteilt. Man unterscheidet hierbei den Übergang zu einem optisch dichteren und zu einem optisch dünneren Medium. Bild 2.7 zeigt hierzu jeweils die Brechung eines schräg einfallenden Lichtstrahls. Bei dem dargestellten scharfen Brechzahlübergang entsteht ein Knick. Bei kontinuierlicher Brechzahl-

änderung würde der Lichtstrahl stetig gekrümmt werden. Einfallender, reflektierter und gebrochener Strahl liegen in einer Ebene [31].

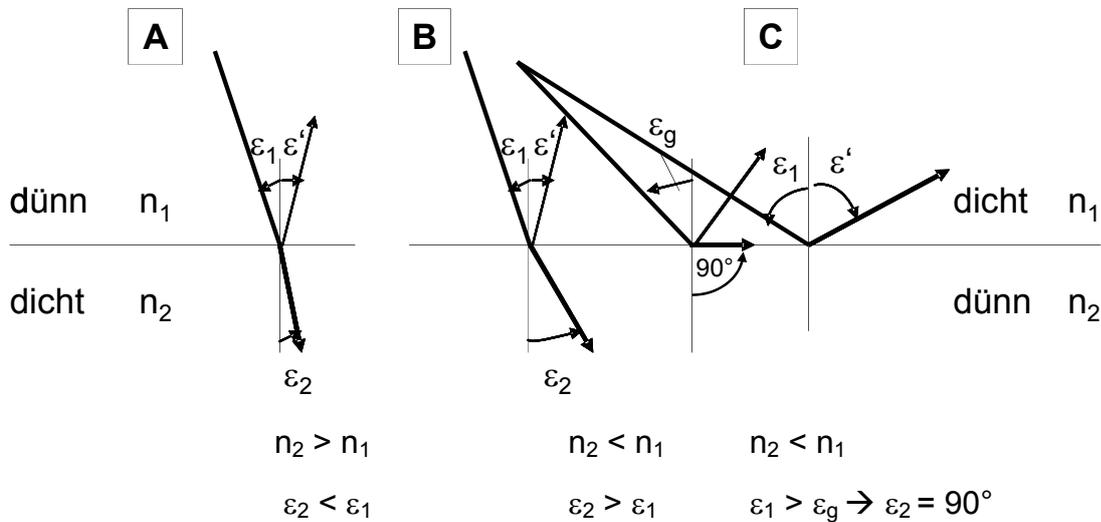


Bild 2.7 Übergang einer Lichtwelle [31]
 (A) in ein optisch dichteres Medium, (B) in ein optisch dünneres Medium
 (C) Totalreflexion
 ε_1 = Einfallswinkel, ε_2 = Brechungswinkel, ε' = Reflexionswinkel,
 ε_g = Grenzwinkel der Totalreflexion

Dies lässt sich durch das Brechungsgesetz nach Snellius beschreiben [31].

$$\frac{\sin \varepsilon_1}{\sin \varepsilon_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad n_1 * \sin \varepsilon_1 = n_2 * \sin \varepsilon_2 \quad 2.4$$

Totalreflexion

Beim Übergang von einem optisch dichteren in ein optisch dünneres Medium ist ε_2 immer größer als ε_1 , Bild 2.7 B. Wird ein sogenannter Einfallgrenzwinkel ε_g überschritten, so wird $\varepsilon_2 = 90^\circ$. Zur Ermittlung von ε_g setzt man $\varepsilon_2 = 90^\circ$ und erhält den Grenzwinkel der Totalreflexion aus Gleichung 2.4.

$$\sin \varepsilon_g = \frac{n_2}{n_1} \Rightarrow \varepsilon_g = \arcsin \frac{n_2}{n_1} \quad 2.5$$

Bei Winkeln größer 90° ist das Brechungsgesetz nicht mehr definiert (Gleichung 2.5, $\arcsin > 1!$) Die Lichtwelle kann also nicht in das optisch dünnere Medium gelangen. Da aber Lichtleistung nicht verloren geht, wird der Lichtstrahl zu 100 % reflektiert [31, 65]. Für Polycarbonat ($n_1 = n_{PC} = 1,585$ bei $\lambda_d = 589$ nm) ergibt sich beim Übergang an Luft bei einem Lichteinfallswinkel von $\varepsilon_g = 39,12^\circ$ Totalreflexion. Bei PMMA tritt Totalreflexion beim Übergang an Luft durch die kleinere Brechzahl ($n_1 = n_{PMMA} = 1,491$ bei $\lambda_d = 589$ nm) bei $\varepsilon_g = 42,1^\circ$ auf. Dies bedingt deshalb z. B. bei Lichtleitern materialspezifische geometrische Flächen.

2.2.3 Werkstofflich gebundene Eigenschaften

2.2.3.1 Einfluss des Herstellprozesses auf die Brechzahl

Beim Spritzgießen wird Kunststoffschmelze in ein Werkzeug gespritzt und kühlt anschließend auf Entformungstemperatur ab. Es entsteht eine komplexe zeitabhängige Druck- und Temperaturverteilung in dem erstarrenden Formteil, die entlang des Fließweges und in Dickenrichtung stark variiert [66, 67, 68]. Hierdurch kommt es in dem Spritzgussformteil zu einer mehr oder weniger stark ausgeprägten Anisotropie. Man spricht von einer optischen Anisotropie, wenn bestimmte Größen, die das optische Verhalten beeinflussen, wie z. B. Moleküllorientierungen, Dichte und Brechzahl sowie Polarisierung mikroskopisch anisotrop sind [65].

Durch die Druck- und Temperaturverteilung während des Abkühlens, insbesondere beim Durchlaufen des Glasübergangsbereiches, kann man deshalb eine komplizierte Dichte- und damit auch eine komplizierte Brechzahlverteilung in einem Spritzgussbauteil erwarten. Die Ermittlung einer solchen Verteilung kann anhand von Dünnschnitten mit dem Dichtegradientenverfahren oder mit Hilfe einer schlierenoptischen Messmethode ermittelt werden. Bei der letztgenannten Methode werden Lichtstrahlen durch ein optisches System und durch den Probenkörper geschickt und hierdurch Brechzahlgradienten bestimmt [69]. Bild 2.8 zeigt eine mit diesem Verfahren gemessene Brechzahlverteilung, die an einer ohne Formzwang abgekühlten Polycarbonatprobe ermittelt wurde.

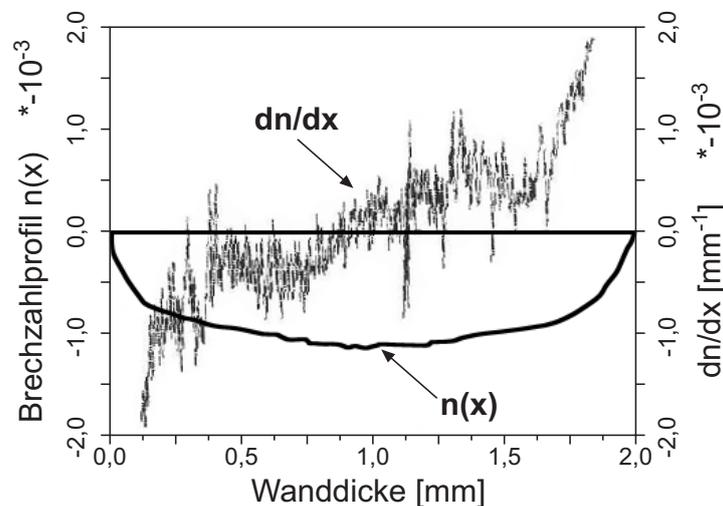


Bild 2.8 Lokaler Brechzahlgradient und der Integralwert (geglättete Linie) über dem Querschnitt einer abgekühlten Polycarbonatprobe [69]

Aus dem lokalen Intensitätsgradienten wurde der lokale Brechungsindexgradient dn/dx ermittelt. Die geglättete Linie ist das Integral der Indexverteilung über dem Querschnitt, hier als Relativverteilung zu den Oberflächen dargestellt. In dem vorliegenden Probenquerschnitt liegt ein Brechzahlunterschied von maximal 0,001 zwischen Rand und Probenmitte vor. Über eine lineare Beziehung zwischen Brech-

zahl δn und Dichte $\delta\rho$, können hieraus Dichteverteilungen in einem Probenquerschnitt δx bestimmt werden [69]:

$$\frac{\delta\rho}{\delta x} = \frac{\delta\rho}{\delta n} * \frac{\delta n}{\delta x} \quad 2.6$$

Nach Gleichung 2.6 lässt sich die Brechzahlverteilung durch Multiplikation mit dem Faktor $\delta\rho / \delta n$ in eine Dichteverteilung übersetzen. Für Polycarbonat und PMMA wurde dieser Faktor aus polarisationsoptischen Untersuchungen hergeleitet und beträgt für PC $2,02 \text{ g/cm}^3$ und für PMMA $2,45 \text{ g/cm}^3$ [69, 70].

Bild 2.9 zeigt eine mit dem schlierenoptischen Verfahren und Anwendung von Gleichung 2.6 ermittelte Dichteverteilung in einem spritzgegossenen PMMA Formteil (Abmessungen: $80 \text{ mm} * 35 \text{ mm} * 2 \text{ mm}$). Die Dichteverteilungen weisen alle einen steilen Anstieg direkt an der Oberfläche, ein lokales Maximum nahe dem Formteilrand und ein breites Plateau in der Formteilmittle. Die Höhe des Maximums liegt zwischen $2 * 10^{-3} \text{ g/cm}^3$ nahe dem Anguss und $1,3 * 10^{-3} \text{ g/cm}^3$ am Fließwegende. Die Dichteverteilung in der Probenmitte nimmt sehr schnell entlang des Fließweges ab und liegt bereits auf der halben Formteillänge unterhalb der Randdichte. Dies korreliert mit dem Druckabfall entlang des Fließweges, Bild 2.9.

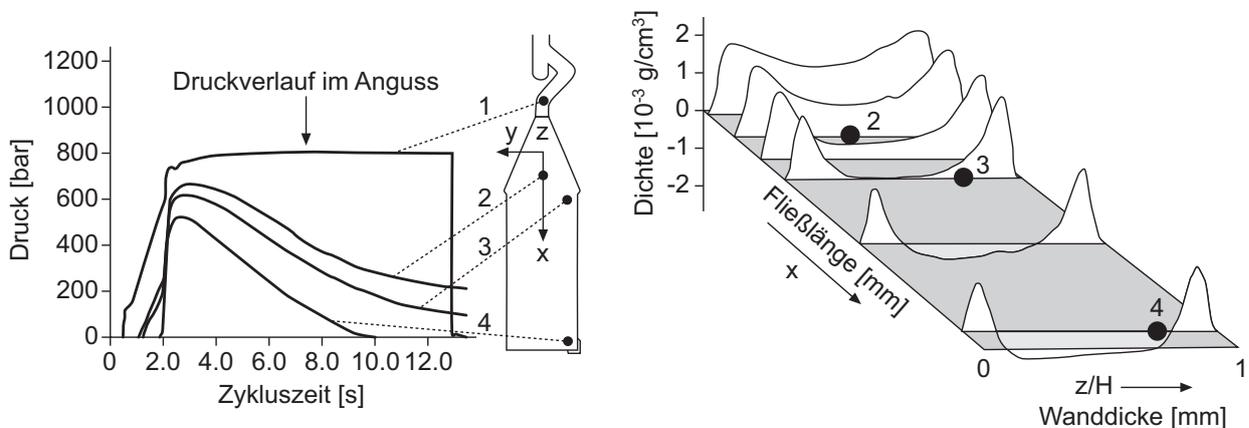


Bild 2.9 Druckeinfluss auf die Dichteverteilung in einem PMMA-Formteil [69]

links: Druckverläufe während des Spritzgießzyklus

rechts: Korrespondierende Dichteverteilung über dem Fließweg

Die Dichte in der Probenmitte hängt also in stärkerem Maße von der Druckverteilung während der Erstarrung im Formteil ab, als an den Formteilrändern. Die Höhe des Maximums und der Abfall zur Probenmitte werden durch den Druckverlauf während der Abkühlung und durch die fortschreitende Verfestigung vom Rand zur Probenmitte bestimmt. Mit hohen Formnesttemperaturen, geringen Einspritzgeschwindigkeiten

und geringen Nachdrücken kann die Dichteverteilung am geringsten gehalten werden [69, 71, 72].

Verhält sich das oben beschriebene Gradientenfeld der Brechzahl in einem anisotropen Material für zwei Polarisationsrichtungen des Lichtes verschieden, so liegt die genannte Doppelbrechung vor und hat folgende Ursachen [65]:

Durch Deformationen, die durch äußere Kräfte auf den Körper einwirken oder eingefroren sind, kann es zu einer Änderung der Valenzwinkel und der Atomabstände kommen. Neben dem Einwirken von äußeren Kräften entsteht dies bei Kunststoffen vornehmlich durch Abkühlspannungen. Man bezeichnet diese als Spannungsdoppelbrechung Δn_s (energieelastische Deformation), die mit dem photoelastischen Koeffizienten C und der Spannung σ beschrieben werden können [73, 74].

$$\Delta n_s = C \cdot \sigma \quad 2.7$$

Photoelastische Koeffizienten C im Glaszustand ($T < T_g$) sind für PMMA = $4 \cdot 10^{-12} \text{ Pa}^{-1}$ und für PC = $68 \cdot 10^{-12} \text{ Pa}^{-1}$ [74, 75]. Der höhere Wert für PC zeigt dessen größere Sensibilität für Spannungsdoppelbrechung an.

Durch Orientierungen, die während der Formteillfüllung entstehen und beim Erstarren eingefroren werden, entstehen Orientierungsdoppelbrechungen (entropieelastische Deformation). Einige amorphe Thermoplaste haben bedingt durch ihre chemische Struktur eine größere Neigung zur Doppelbrechung. So reduziert der in der chemischen Struktur bei Polycarbonat und Polystyrol enthaltene Benzol-Ring die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes senkrecht zu diesen. Solange diese Ketten statistisch gleichmäßig verteilt sind, heben sich die unterschiedlichen Polarisierbarkeiten auf [76]. Durch diese Art der Wiederholungseinheit in der chemischen Struktur lässt sich deshalb auch eine intrinsische Doppelbrechung beschreiben [71,73]. Intrinsische Werte für $T < T_g$ liegen für PMMA bei 0,0043 und für PC bei 0,106. Der höhere Wert zeigt die größere Sensibilität gegenüber Orientierungsdoppelbrechungseffekten an [74].

2.2.3.2 Einflussgrößen auf die Transmissionen

Die spektrale Transmission $\tau(\lambda)$ ist ein Maß für die Lichtmenge, die durch ein Material hindurchgeht und beschreibt somit die Durchlässigkeit für Strahlung. Anhand von Bild 2.4 lässt sich die spektrale Transmission $\tau(\lambda)$ durch den einfallenden Lichtstrahl $(\Phi_\lambda)_0$ und den austretenden Lichtstrahl $(\Phi_\lambda)_t$ definieren:

$$\tau(\lambda) = \frac{(\Phi_\lambda)_t}{(\Phi_\lambda)_0} \quad 2.8$$

$\tau(\lambda)$ wird durch Spektralphotometer bestimmt. Hierbei wird die Wellenlänge des einfallenden Lichtstrahles variiert und der durchgelassene Anteil in Abhängigkeit der

Wellenlänge registriert [31]. In Bild 2.10 sind so gemessene Transmissionskurven für Polycarbonat dargestellt.

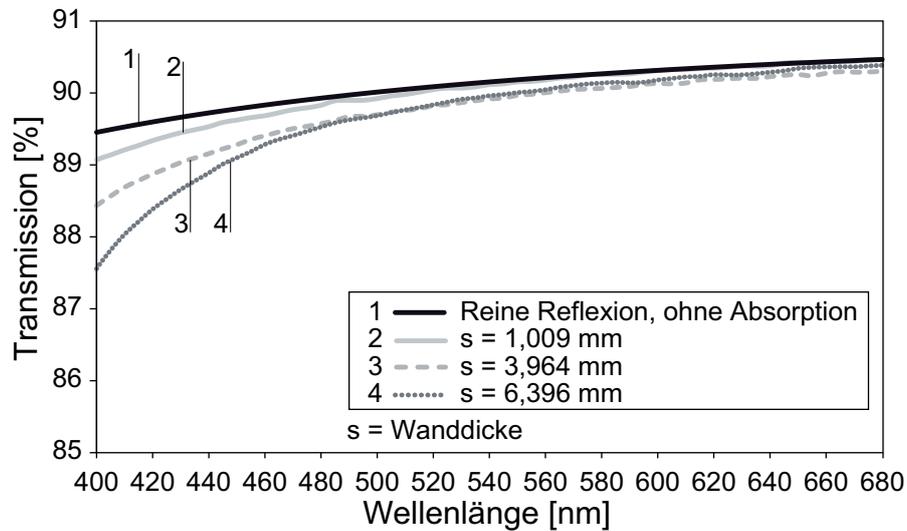


Bild 2.10 Reflexions- und wanddickenabhängige Transmission für PC [58]

Die Brechzahl bestimmt die theoretisch maximal erreichbare Transmission gemessen gegenüber Luft. Bedingt durch die Wellenlängenabhängigkeit der Brechzahl (höhere Werte im kurzwelligen Bereich) ist die Transmission im kurzwelligen Bereich deshalb etwas geringer (Kurve 1 in Bild 2.10). Daneben hat die Wanddicke ebenfalls Einfluss auf die Transmission. Wie in Bild 2.10 zu erkennen ist, nimmt die Transmission mit zunehmender Wanddicke ab. Dies wird als Extinktion bezeichnet und ist eine Stoffkonstante, die die spezifische Abschwächung des Lichtstrahls und Umwandlung in Wärme innerhalb eines Materials charakterisiert. Mathematisch beschreiben lässt sich die Extinktion E durch das Lambert-Beer'sche Gesetz, wonach die optische Leistung durch absorbierte Strahlungsanteile mit der in der Materie zurückgelegter Wegstrecke t abnimmt [31, 58, 65, 77].

Dies gilt für alle transparenten Thermoplaste gleichermaßen. Allerdings wirken sich in der Absorption auch direkt die molekulare Struktur und Gestalt des Kunststoffes aus. Es wirken hierbei verschiedene interatomare/intermolekulare Wechselwirkungen in einem Polymer absorbierend, wie beispielsweise Benzol-Ring-Strukturen in den Phenyl-Gruppen im Polycarbonat und Polystyrol. In Verbindung mit den reflexionsbedingten Transmissionsverlusten ist dies der Grund für die unterschiedlichen Transmissionspektren der transparenten Kunststoffe.

Bild 2.11 zeigt dies exemplarisch für PMMA, COC und PC für eine Wanddicke von ca. 2 mm. Die meisten transparenten Kunststoffe zeigen im sichtbaren Spektralbereich (ab 400 nm aufwärts) keine spezifische Absorption, d. h., sie erscheinen, falls sie nicht eingefärbt sind, farblos [77].

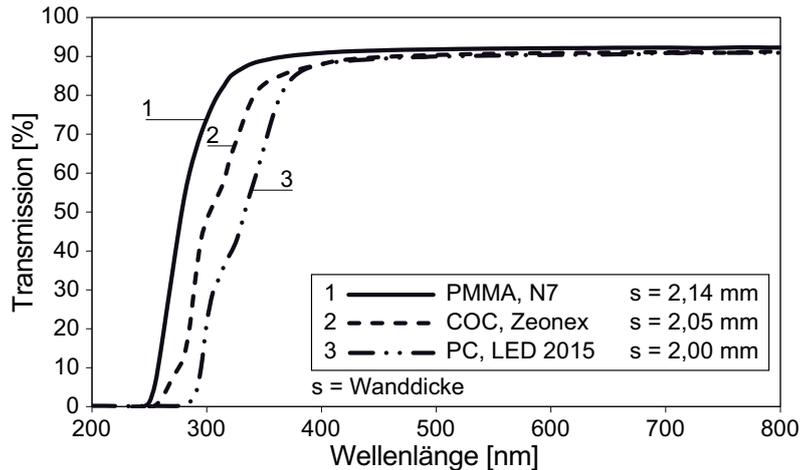


Bild 2.11 Wellenlängenabhängigkeit der Transmission von verschiedenen transparenten Kunststoffen und einer Wanddicke s von ca. 2 mm [58]

Eine Veränderung der Absorption kann auch gezielt durch Zugabe von Additiven wie z. B. UV-Absorbern erreicht werden. Weiterhin verändert sich die Absorption auch durch die Veränderung des molekularen Aufbaus, wie es z. B. bei langzeitiger Lichteinwirkung oder durch verarbeitungsbedingte Schädigungen (zu hohe Temperaturen, Scherungen) auftreten kann [65].

2.2.3.3 Yellowness-Index

Bei einigen Kunststoffen tritt aufgrund ihrer chemischen Struktur bei niedrigen Wellenlängen des sichtbaren (blauen) Spektrums Absorption auf. Diese kann zu einem leichten Gelbstich führen. In Bild 2.12 ist am Beispiel eines transparenten Polycarbonates der hierfür relevante Wellenlängenbereich farblich hinterlegt. Mit zunehmender Wanddicke nimmt dieser Bereich durch eine erhöhte Absorption im blauen Wellenlängenbereich (380 nm bis 500 nm) zu. Der Werkstoff erscheint gelber.

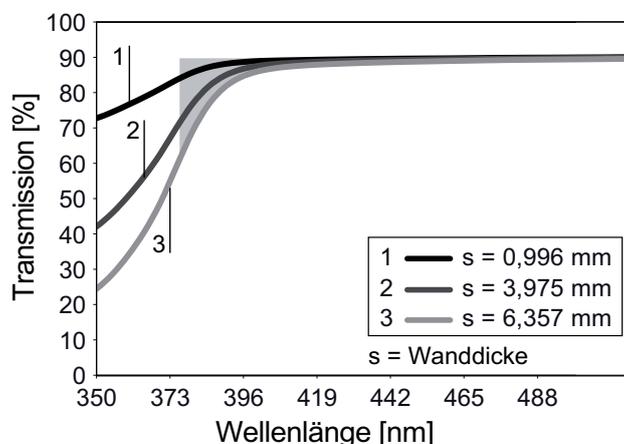


Bild 2.12 Absorption bei unterschiedlichen Wanddicken für Polycarbonat im blauen Wellenlängenbereich als Grund für einen leichten Gelbwert [25]

Die Vergilbung lässt sich nach ASTM E313 aus den gemessenen Transmissionskurven mit Hilfe von den CIE-Normfarbwerten X, Y; Z berechnen [78]. Sichtbare Vergilbung ist neben dem oben beschriebenen Effekt auch auf eine generelle Produktdegeneration durch Licht, Temperatur, chemische Beeinträchtigung oder unsachgemäße Verarbeitung zurückzuführen.

Eine Farbkorrektur durch blaue und/oder violette Farbstoffe wirkt diesem Effekt entgegen. Sie sorgt für eine Absorption im Lichtwellenlängenbereich zwischen 550 nm und 650 nm und lässt so den Werkstoff bläulich erscheinen.

2.3 Herstellverfahren für Optiken aus transparenten Thermoplasten

2.3.1 Verarbeitungsrelevantes Werkstoffverhalten

Wie in Kap. 2.2.3.1 bereits angesprochen, erfahren die Kunststoffe während der Spritzgießverarbeitung einen Temperaturwechsel der von Verformung, Scherung und Druckbeaufschlagung begleitet wird. Es entsteht eine komplexe zeitabhängige Druck- und Temperaturverteilung in dem erstarrenden Formteil, die entlang des Fließweges und in Dickenrichtung stark variiert und großen Einfluss auf die Dichte des erstarrenden Kunststoffs nimmt. Während der Abkühlung durchläuft die erstarrende Schmelze eines amorphen Thermoplasts, wie das in dieser Arbeit betrachtete Polycarbonat, die Zustandsbereiche viskoelastisch (Schmelze), entropieelastisch (Gummi) und energieelastisch (Glaszustand) [80]. Dies lässt sich anschaulich in einem pV -Diagramm darstellen, Bild 2.13.

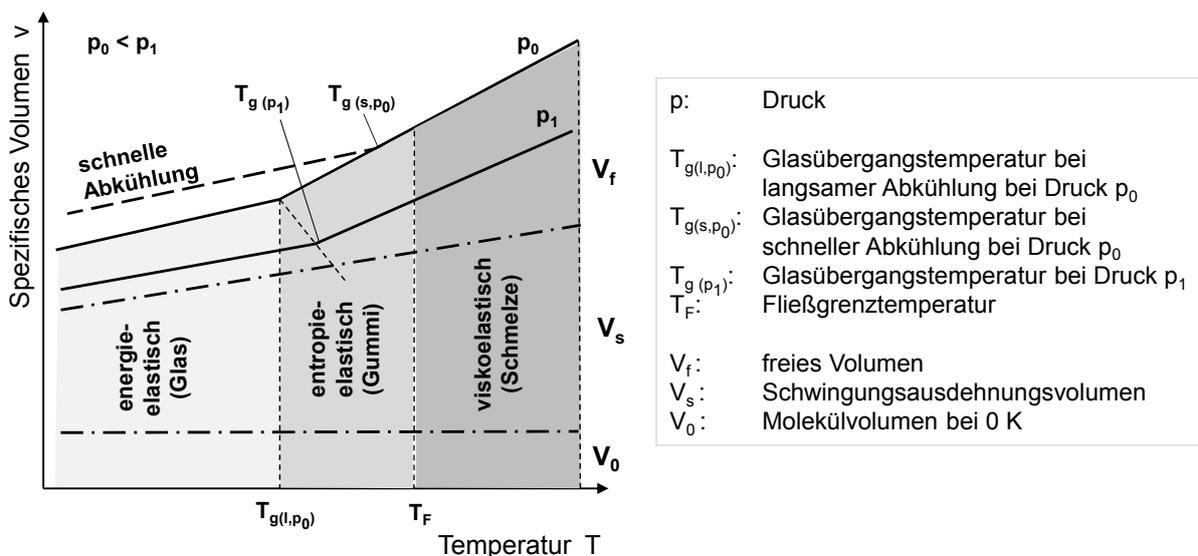


Bild 2.13 Zusammenhang zwischen spezifischem Volumen, Druck und Temperatur [79, 80]

Im schmelzeflüssigen oder viskoelastischen Zustand liegt hohe Beweglichkeit der Moleküle vor. Die Relaxationszeiten sind sehr kurz, so dass die durch Verformung aufgebrachten Spannungen und Orientierungen durch Umlagerungen ausgeglichen werden können. Bei Abkühlung verringert sich das spezifische Volumen durch das abnehmende Schwingungsausdehnungsvolumen und durch die Abnahme des freien Volumens. Bei weiterer Abkühlung durchschreitet die Schmelze die Fließgrenztemperatur T_F . Diese markiert den Übergang in einen weiteren Zustandsbereich, den entropieelastischen Bereich. Hier liegt der Kunststoff in zäher, gummi-ähnlicher Form vor. Die Beweglichkeit der Moleküle ist noch so groß, dass erzwungene Formänderungen, Spannungen und Orientierungen durch Rückstellkräfte abgebaut werden können und ein Gleichgewichtszustand mit möglichst geringer Entropie angestrebt wird. [80, 81]. Die hierzu notwendigen Relaxationszeiten sind kurz. Durchläuft der weiter abkühlende Thermoplast die Glasübergangstemperatur T_g , gelangt er in den energieelastischen Zustand und liegt als sogenannte unterkühlte Flüssigkeit im Glaszustand vor. Die Beweglichkeit der Moleküle wird stark reduziert und nur nahe unterhalb der Glasübergangstemperatur können sich noch Spannungen abbauen [65, 80]. Unterhalb von T_g ändert sich das spezifische Volumen nur noch durch die Abnahme des Schwingungsausdehnungsvolumens, das freie Volumen bleibt konstant. Die Übergänge zwischen den Zuständen und den damit verbundenen strukturellen Umwandlungen der Thermoplaste sind nicht sprunghaft, sondern erstrecken sich über einen bestimmten Temperaturbereich [80]. Bei der Erwärmung des amorphen Kunststoffes werden diese Zustandsbereiche wieder durchlaufen.

Der Spritzdruck und die beim Spritzgießen vorliegenden hohen Abkühlgeschwindigkeiten haben Einfluss auf den Glasübergang. Bei erhöhtem Druck verschiebt sich durch die höhere Packungsdichte und der damit verbundenen eingeschränkten Beweglichkeit der Moleküle der Glasübergang zu höheren Temperaturen. Durch eine erhöhte Abkühlgeschwindigkeit wird die Zeit für die Einstellung des notwendigen Gleichgewichtszustandes reduziert und das Material geht bei höheren Temperaturen in den Glaszustand über. Es wird ein höheres freies Volumen eingefroren [79, 80, 82].

Bei der Spritzgießverarbeitung kann es zu einer Entformung unter Restdruck und zu einer Kompression eines erstarrten Kunststoffbauteils beim Überspritzen (z. B. beim Mehrkomponentenspritzgießen) kommen. Beide Verhaltensweisen lassen sich im p v T -Diagramm verdeutlichen, Bild 2.14.

Isotherme Kompression: Verringerung des spezifischen Volumens durch das Schwingungsausdehnungsvolumen bei Kompression (1). Bei Erwärmung nimmt das komprimierte spezifische Volumen durch das zunehmende Schwingungsausdehnungsvolumen zu (2). Am Glasübergang wird dies durch das abnehmende freie Volumen überlagert, welches den Gleichgewichtszustand bei dem entsprechenden Druck anstrebt (Einsattlungseffekt). Durch die InkompRESSibilität des freien Volumens wird bei einer Abkühlung unter Druck (3) ein niedriges spezifisches Volumen im Glaszustand erreicht.

Expansion eines Festkörpers (Entformung unter Restdruck): Eine auf Verarbeitungstemperatur aufgeheizte Schmelze (4) wird mit Druck beaufschlagt (5) und kühlt auf Raumtemperatur unter Druck ab (6). Wird der komprimierte Festkörper entspannt (7), so strebt das Volumen der Probe den Gleichgewichtszustand an, wie er sich bei einer langsamen, drucklosen Abkühlung einstellen würde. Allerdings stellt sich zunächst nur eine energieelastische Vergrößerung ein. Der zeit- und temperaturabhängige entropieelastische Anteil, also das freie Volumen, bleibt „eingefroren“ [80, 82, 83]. Entropieelastisch meint hier nicht den vorher beschriebenen Zustandsbereich, sondern drückt die Zeit- und Temperaturabhängigkeit dieses Vorgangs aus. Bei einer Erwärmung (8) (z. B. Temperung) nimmt das Volumen durch das Schwingungsausdehnungsvolumen zu. Im Bereich des Glasübergangs wird dies durch die Ausdehnung des freien Volumens überlagert, das sich nun entsprechend des Gleichgewichtszustands einstellen kann. Nach [80, 83] ist die Steigerungsänderung des spezifischen Volumens bei tieferen Temperaturen als T_g auf gespeicherte Deformationsenergie zurückzuführen, die z. B. aus deformierten Bindungswinkeln resultiert [80, 83]. Das bedeutet, dass sich zwei Effekte – die Ausdehnung des freien Volumens und der Abbau von Deformationsenergie – bei der Änderung eines komprimierten Volumens überlagern.

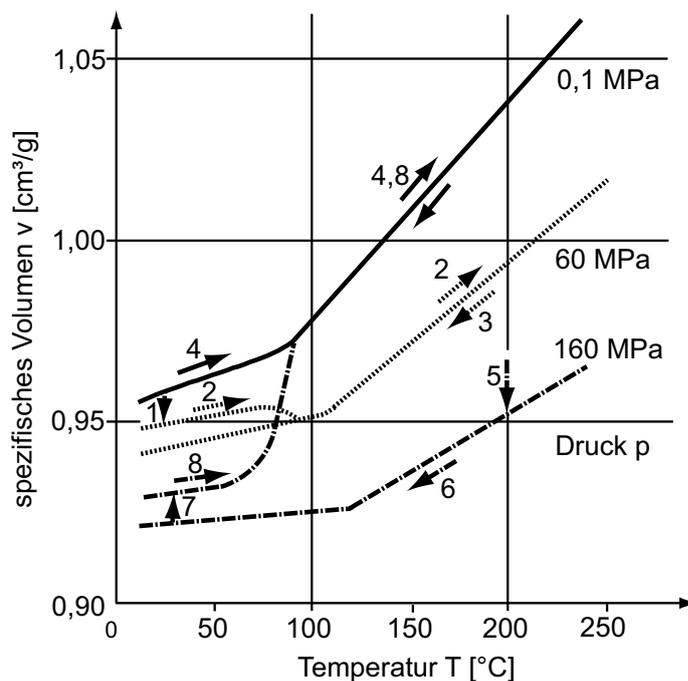


Bild 2.14 Verhalten von PS bei der Festkörperkompression und Expansion [80, 82]

Mit Kenntnis der geschilderten Zusammenhänge wird im Nachfolgenden das Spritzgießen, Spritzprägen und das Mehrschichtverfahren beschrieben und miteinander verglichen.

2.3.2 Spritzgießen und Spritzprägen

Zwischen beiden Verfahren gibt es technologische Gemeinsamkeiten und Unterschiede in Bezug auf die Formteillfüllung und die Druckübertragung in die erstarrende Schmelze, die anhand von pvT-Diagrammen gezeigt werden können, Bild 2.15.

Beim Spritzgießen erfolgt das Einspritzen der Kunststoffschmelze in ein kälteres Werkzeug ausschließlich durch die Vorwärtsbewegung der Spritzgießschnecke, Bild 2.15 links Punkt 1. Bei den hier betrachteten dickwandigen Bauteilen ergibt sich im angussnahen Formteilmittelbereich eine komplexe Strömungssituation. Neben den durch Scherung in Strömungsrichtung erzeugten Molekulantorientierungen, sind die durch Dehnströmungen erzeugten Orientierungen besonders groß. Mit fortschreitender Formfüllung überwiegen dann wieder die Scherströmungseffekte. Hierdurch werden ortsabhängige Molekulantorientierungen im Bauteil erzeugt, deren Ausprägung durch die Formteilgeometrie und die Prozessparameter wie Einspritzgeschwindigkeit und Schmelzetemperatur bestimmt wird [71].

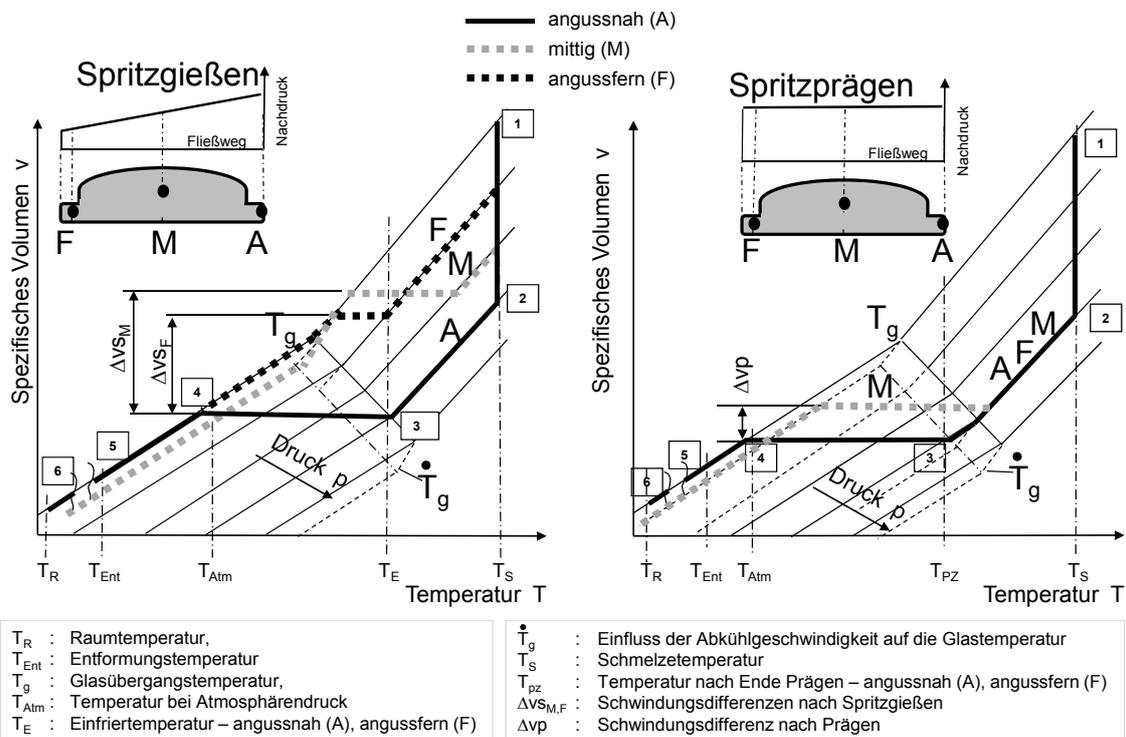


Bild 2.15 Qualitativer Zustandsverlauf im pvT-Diagramm amorpher Thermoplaste bei der Herstellung von Linsen [24, 80, 82, 83, 84]

links: *Spritzgießen*

rechts: *Spritzprägen*

Nach der vollständigen Formteillfüllung und Erreichen des maximalen Spritzdrucks (Punkt 2 in Bild 2.13 links – angenommene isotherme Füllung) wird auf einen konstanten Nachdruck umgeschaltet und gehalten. Hierdurch ergibt sich eine annähernd isobare Abkühlung (Punkt 3 in Bild 2.15 links). Über den eingestellten

Nachdruck wird versucht, die Oberflächen einfallsfrei und konturgenau abzuformen [32, 71]. Beim Spritzgießen lässt sich nur durch die Höhe und die Wirkzeit des Nachdruckes Einfluss auf die Abformung nehmen. Limitierender zeitlicher Faktor ist das Einfrieren des Anschnittbereiches. Durch die immer noch stattfindenden Schmelzebewegungen in der Nachdruckphase entstehen inhomogene Bauteileigenschaften wie Orientierungen und Eigenspannungen. Durch die fortschreitende Abkühlung ist eine ausreichende Relaxation der induzierten Nachdruckorientierungen kaum mehr möglich [71, 72]. Nach Einfrieren des Anschnitts (Punkt 3 in Bild 2.15 links) beginnt die isochore Schwindung, bei der das Bauteilvolumen dem Kavitätsumfang entspricht. Ist der Druck durch die thermische Schwindung abgebaut und der Atmosphärendruck erreicht (Punkt 4 in Bild 2.15 links) kann das Bauteil frei schwinden und wird bei Punkt 5 entformt und kühlt auf Raumtemperatur ab, Punkt 6 [83, 84]. Der eingestellte Nachdruck wirkt bedingt durch die erstarrende Kunststoffschmelze entlang des Fließweges nicht überall gleich. Dies kann zu unterschiedlichen Schwindungskompensationen entlang des Fließweges führen und hierdurch zusätzlich zu stark anisotropen Formteileigenschaften. So bewirkt der niedrigere Nachdruck am Fließwegende auch bei gleicher Wanddicke und deshalb gleichen Abkühlzeiten eine Schwindungsdifferenz (Δv_{sF}) im Vergleich zu dem angussnahen Bereich. Die 1-bar-Linie wird angussfern bei höheren Temperaturen erreicht. Besonders ausgeprägt ist das unterschiedliche Schwindungsverhalten in Bereichen mit unterschiedlichen Wanddicken. Durch die geringe Wärmeleitfähigkeit der Kunststoffe ist die Abkühlgeschwindigkeit in dickwandigen Bereichen langsamer als in den dünnwandigen Bereichen. Hierdurch ergeben sich zu gleichen Zeiten unterschiedliche Temperaturen und spezifische Volumina. Durch die zusätzlich vorliegenden niedrigen Drücke und Druckwirkzeiten ist das Schwindungspotential (Δv_{sM}) an diesen Stellen höher, so dass bedingt durch die unterschiedlichen Erstarrungen und der viel größeren thermischen Ausdehnung der Schmelze Schwindungsunterschiede und Eigenspannungen sowie Einfallstellen die Folge sind [71, 80, 82, 83, 84].

Beim Spritzprägen ergeben sich andere Verhältnisse. Der wesentliche Unterschied zum Spritzgießen besteht in der Art der Druckübertragung von der Spritzgießmaschine auf die Schmelze. Beim Spritzprägen wird nach der Einspritzphase Druck und Bewegung durch beweglich gestaltete Maschinen- und Werkzeugelemente zusätzlich aufgebracht. Beim Ausprägen der Schmelze zur fertigen Formteilgeometrie wirkt so während der Abkühlung, auch nach der Versiegelung des Anschnittes (Punkte 3 in Bild 2.15 rechts), der Druck flächig auf dem gesamten Formteil. Die beim Spritzgießen vorliegenden Druckunterschiede entlang des Fließweges werden hierdurch stark reduziert und damit die beschriebene Entstehung von druckinduzierten Schwindungsunterschieden und Eigenspannungen verringert. Abkühlbedingte Schwindungsunterschiede und Spannungen können jedoch weiterhin vorliegen (Δv_p). Anders als in der Nachdruckphase des Spritzgießens,

liegen in der Prägephase des Spritzprägens kaum Schmelzebewegungen vor, so dass durch geeignete Einspritz- und Prägeparameter auch Orientierungen reduziert werden können [16, 24, 32, 45, 71, 72, 76, 86, 87, 88]. Neben einer exakteren Abformung und geringeren Formabweichung werden hierdurch auch bessere optische Eigenschaften wie Doppelbrechung, Aberration der Wellenfront erzielt und die Abbildungsleistung verbessert [24, 71, 72]. Nach einer eingestellten Prägezeit wird der Druck reduziert und durch entsprechende Prozessparameter stellt sich eine isochore Schwindung ein (Punkt 4 in Bild 2.15 rechts). Nach Erreichen des Atmosphärendrucks kühlt das Formteil auf Entformungstemperatur und anschließend auf Raumtemperatur ab (Verlauf bis 6 in Bild 2.15 rechts).

Das Spritzprägen wird seit vielen Jahren entwickelt und es liegen heute eine Vielzahl von unterschiedlichen Werkzeugtechniken wie Prägerahmen, Tauchkanten, Kerne oder Schieberelement vor. Hierdurch ergeben sich für die Prozesstechnik Möglichkeiten, welche sich in zusätzlichen Parametern wie Prägehub, Prägedruck und Prägegeschwindigkeit darstellen [45, 86, 87, 88].

Bei komplexen Geometrien wie in Bild 2.16 dargestellt, findet die Anwendung des Spritzprägens Grenzen. Sind die Wanddickenverteilung und -unterschiede im Formteil zu groß, besteht die Gefahr, dass durch die frühere Erstarrung der dünnen Bereiche und durch weiteres Prägen hohe Spannungen induziert werden. Die dickwandigen Bereiche benötigen aber gleichzeitig längere Prägezeiten, um Lunker und Einfallstellen zu vermeiden. Auch Teilprägen auf den optischen Flächen ist nicht oder nur sehr eingeschränkt möglich, denn durch Prägespaltmarkierungen und durch die damit verbundenen erhöhten Spannungen wird die optische Funktion der Flächen stark behindert.

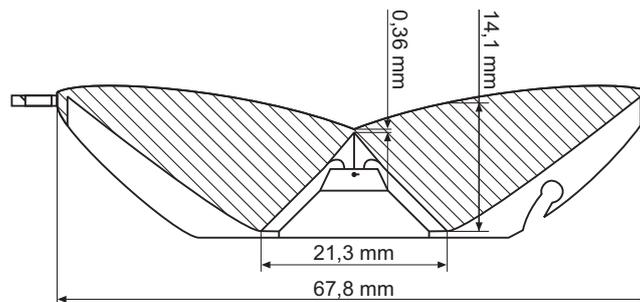


Bild 2.16 Optische Geometrie, bei der das Spritzprägen nicht oder nur sehr eingeschränkt möglich ist [62].

Durch die beschriebenen prozess- und geometrierelevanten Größen ergeben sich örtlich und zeitlich unterschiedliche Temperatur- und Druckverteilungen im Formteil. Diese verursachen zum Zeitpunkt der Erstarrung mehr oder weniger stark lokal anisotrope Schwindungspotentiale und somit letztendlich lokal unterschiedliche werkstoffliche Eigenschaften im Formteil. Das Spritzprägen kann, wie dargestellt durch eine Vergleichmäßigung der Druckverteilung, positiven Einfluss auf die Materialeigenschaften ausüben. Ein unter der Bezeichnung Druckverfestigung in der Ent-

wicklung befindliches Verfahren geht noch einen Schritt weiter und trennt die Erstarrung der Schmelze von der Abkühlung. Hierdurch soll die beschriebene abkühlbedingte, zeitlich und lokal ungleichmäßige Erstarrung vermieden werden [80, 85, 89]. Ausgenutzt wird hierbei die druckabhängige Verschiebung der Glasübergangstemperatur hin zu höheren Temperaturen, so dass der Phasenübergang von flüssig nach fest nicht durch die Abkühlung erreicht wird, sondern durch die einheitliche Verdichtung des gesamten Formteilmolumens mittels hydrostatischem Druck. Da dann der Punkt der größten Eigenschaftsänderung (T_g) für alle Bauteilbereiche (unabhängig von der Wanddicke) gleichzeitig erfolgt, können die für optische Bauteile notwendigen isotropen Eigenschaften (gleichmäßige Dichteverteilungen, Brechzahl, geringe Spannungen) leichter erzielt werden [80]. Die nachfolgende Abkühlung des Werkzeuges und des festen Formteils geschieht bei gleichzeitiger Druckentlastung. Es überlagern sich hierbei die thermische Schwindung durch die Temperaturreduzierung und die Expansion aufgrund der Druckentlastung [80, 89].

Spritzgießen und Spritzprägen sind Verarbeitungsverfahren, die heute für die Herstellung von optischen Komponenten aus Thermoplasten eingesetzt werden. In wissenschaftlichen Untersuchungen und praktischen Anwendungen wurden hierbei für die nachfolgenden Prozessparameter die prinzipiellen Einstellungen ermittelt:

Verlängerte Restkühlzeit: Eine verlängerte Restkühlzeit, auch über Punkt 5 in Bild 2.15 hinausgehende Abkühlung unter Formzwang, ergibt eine gleichmäßigere Abformungen der Formteilkontur und bessere optische Eigenschaften [71, 72]. Es wirkt hier ein Tempereffekt, der u.a. geringere Temperaturgradienten im Formteil zum Zeitpunkt der Entformung erzeugt und so geringere Abkühlspannung entstehen lässt.

Langsame Einspritzgeschwindigkeit: Um Fließstörungen, Quetschfalten und Oberflächenstörungen wie z. B. Rillen zu vermeiden und Orientierungen gering zu halten, ist es wichtig, dass durch eine angepasste, langsame Einspritzgeschwindigkeit, direkt mit dem Eintreten der Schmelze in den Formhohlraum, eine Quellströmung der Schmelze entsteht [32, 35, 71].

Niedrige Massetemperatur: Die Massetemperatur wird sehr oft an die untere Grenze der vom Rohstoffhersteller empfohlenen Werte eingestellt. Hierdurch wird versucht, das Schwindungspotential zu reduzieren, den thermischen Abbau durch die langen Verweilzeiten zu kompensieren und die Kühlzeit zu reduzieren.

Hohe Formnesttemperaturen: Die Formnesttemperatur sollte generell hoch sein. Hierdurch wird die Abformung der optischen Flächen durch eine bessere und längere Druckübertragung erleichtert. Daneben wird durch hohe Einstellwerte der Formnesttemperatur die Abkühlung der Kunststoffschmelze verlangsamt. Hierdurch werden Abkühlspannungen reduziert und eine gleichmäßigere Ausbildung der werkstofflich gebundenen Eigenschaften unterstützt [90, 91, 92].

2.3.3 Mehrschichtspritzgießen

Bei diesem Verfahren handelt es sich um eine an das Mehrkomponentenspritzgießen angelehnte Prozesstechnik. Das optische Formteil wird hierbei in mehreren Schichten nacheinander oder simultan gespritzt. Dies wird durch ein Drehtisch- oder Indexplattenwerkzeug und/oder Kernzüge realisiert, wobei entsprechende Vorspritzlinge und anschließend die fertige Geometrie in verschiedenen Schichtkombinationen gespritzt werden können, Bild 2.17. Je nach Bauteilgeometrie können Vor- und Nachspritzling geometrisch sehr verschieden sein. Die Aufteilung in die Einzelschichten richtet sich nach einer bestmöglichen Einzelherstellung der Schichten.

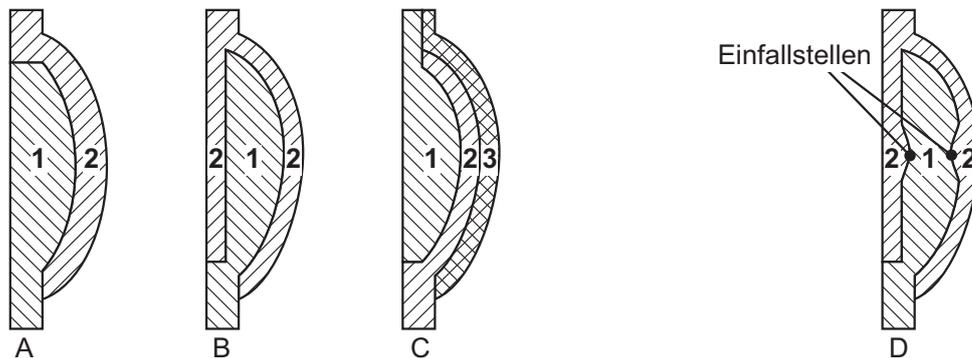


Bild 2.17 Beispiele verschiedener Mehrschichtverfahren
 1,2,3 : Reihenfolge der Schichtenherstellung,
 A: Zweischicht B: Dreischicht-Sandwich C: Dreischicht sequenziell,
 D: Dreischicht mit Einfallstellen im Vorspritzling

Die in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen grundsätzlichen Prozess- und Zustandsverläufe des Spritzgießens und Spritzprägens können auf die Herstellung des Vor- und Nachspritzling übertragen werden. Allerdings ergibt sich bei den Mehrschichtsystemen durch die Überspritzung eine Wechselwirkung zwischen den Teilgeometrien, die Auswirkung auf das Abkühlverhalten und die p_vT -Zustandsverläufe haben wird. Betrachtet man hierzu die Abkühlsimulation einer 20 mm dicken Linse aus Polycarbonat für eine Ein- und eine Dreischichtausführung in Bild 2.18, so zeigen sich unterschiedliche Temperaturverläufe und Abkühlbedingungen.

Beim Spritzgießen und -prägen kühlt die Kunststoffschmelze nach der Formteilkfüllung ab. Bei der Prägetechnik entsteht durch den länger anhaltenden Kontakt mit der Kavitätsoberfläche kein isolierender Luftspalt. Dies hat jedoch keinen für die Praxis relevanten Kühlzeiteffekt, so dass hier zwischen diesen beiden Verfahren nicht unterschieden wird. An der Formnestwand ergibt sich eine Kontakttemperatur zwischen Formnestwand und Schmelze, die bedingt durch die hohe Wärmeindringfähigkeit von Werkzeugstahl in der Nähe der Formnesttemperatur liegt [90]. Es entsteht ein Temperaturgefälle, dessen weiterer Verlauf durch die Wärmeleitung im Thermoplast und die Wärmeübergangsbedingungen zum Werkzeug bestimmt wird. Durch die schlechten Wärmeleiteigenschaften der Thermoplaste entsteht das

charakteristische Abkühlen von außen nach innen, dessen Temperaturgradient Abkühlspannungen erzeugt [90, 91]. Das Formteil durchläuft hierbei die in Bild 2.13 beschriebenen Zustände flüssig, entropieelastisch und fest.

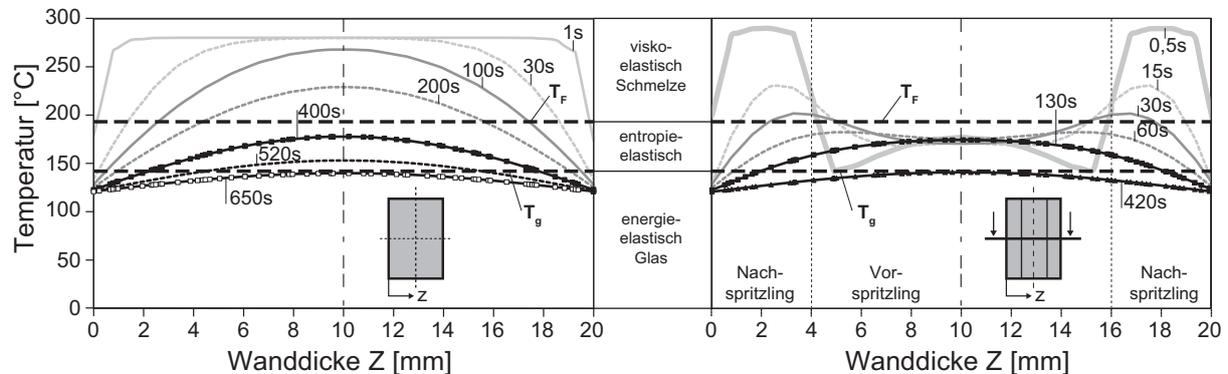


Bild 2.18 Vergleich des berechneten Abkühlverhaltens einer 20 mm dicken Linse aus Polycarbonat

links : Standard Spritzgießen/-prägen

rechts : Mehrschichtspritzgießen – Dreischicht-Sandwich

T_F : Fließgrenztemperatur, T_g : Glasübergangstemperatur

Massetemperatur 280 °C, Formnesttemperatur = 120 °C,

Wärmeübergangskoeffizient $\alpha = 2000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

Beim Mehrschichtspritzgießen unterliegt der Vorspritzling dem beschriebenen Abkühlverlauf des Standardspritzgießens und er wird abhängig von den Prozesstemperaturen ein bestimmtes Temperaturprofil bei der Überspritzung haben. Durch die Überspritzung stellt sich eine Kontakttemperatur direkt an der Grenzschicht von Vor- und Nachspritzling ein, die wegen gleicher Wärmeeindringfähigkeiten etwa dem Mittelwert zwischen Vorspritzlingsoberflächentemperatur und Nachspritzlingsschmelztemperatur entspricht. Im weiteren Verlauf der Abkühlung kommt es zu einem Temperatenausgleich zwischen Vor- und Nachspritzling. Die abgekühlten Schichten des Vorspritzlings können hierbei wieder weit über T_g erwärmt werden und kommen somit in den bei amorphen Thermoplasten vorliegenden gummi- oder entropieelastischen Bereich. Im weiteren Verlauf kühlt der Verbund durch Temperatenausgleich zwischen Vor- und Nachspritzling ab. Hierdurch können sich dann wieder Spannungen aufbauen.

Eine besondere Bedeutung kommt bei den Mehrschichtsystemen deshalb dem Vorspritzling zu. Es ist davon auszugehen, dass durch die Überspritzung der Vorspritzling nicht nur wie gezeigt thermisch beeinflusst wird, sondern durch den Spritz- oder Prägedruck des Nachspritzlings belastet wird. Je nach Temperaturverlauf, und damit vorliegendem Zustandsbereich während der Überspritzung, werden sich hierbei Spannungen aufbauen. Diese können wie oben beschrieben nur dann relaxieren, wenn die entsprechenden Formteilbereiche nah oder über die Glastemperatur der

verwendeten Thermoplaste durch die Überspritzung erwärmt werden. Es ist also davon auszugehen, dass sich bezüglich Temperatur- und Druckausgleich ein komplexes Zusammenspiel zwischen beiden Teilgeometrien einstellt.

Trotz des komplexeren Abkühlverhaltens werden bei den Mehrschichtsystemen verarbeitungstechnische Vorteile erwartet. Ein Vorteil besteht zunächst darin, dass die Wanddicken der Teilgeometrien dünner sind als das fertige Bauteil. Hierdurch wird das Schwindungspotential pro Spritzling reduziert und es können eventuell niedrige Nachdrücke eingesetzt werden. Durch eine entsprechende Gestaltung von Vor- und Nachspritzling können große Wanddickenunterschiede reduziert oder ganz vermieden werden. Hierdurch werden gleichmäßige Abkühlgeschwindigkeiten und damit ähnliche Temperaturen zu gleichen Zeiten in allen Formteilbereichen erzielt. Die in Kap. 2.3.2 beschriebenen inhomogenen Schwindungen und Eigenspannungen, die auf die ungleichmäßigen Abkühlbedingungen und auch Druckverteilungen durch unterschiedliche Wanddicken zurück zu führen sind, können so reduziert werden. Durch die Kombination mit der Prägetechnik kann besonders bei dem Nachspritzling zusätzlich noch die beim Prägen erreichte gleichmäßige Druckverteilung während der Abkühlung erzielt werden.

Bei den Dreischichtbauteilen stellen die Oberflächen der innen liegenden Schichten nicht die Außenkontur dar. Es könnte also möglich sein, diese unter anderen Bedingungen (wie z. B. niedrige Formnesttemperaturen, geringe Nachdrücke) zu spritzen. Dabei entstehende Einfallstellen könnten durch die darauf gespritzte Schicht wieder ausgeglichen werden, Bild 2.17 D. Durch derartige Verfahrenskombinationen bei der Herstellung der Schichten kann somit effektiv Zykluszeit eingespart werden. Besonders interessant ist das in Bild 2.17 B dargestellte Sandwich-Verfahren, denn hierbei wird ein Dreischichtbauteil in zwei Verfahrensschritten hergestellt.

Bei einer Schichtenaufteilung wird die Wanddicke der Einzelschichten reduziert. Wie aus der Kühlzeitabschätzung für ein plattenförmiges Formteil (Näherung der Differenzialgleichung der eindimensionalen, instationären Wärmeleitung für eine mittlere Entformungstemperatur $\bar{\vartheta}_E$) abgeleitet werden kann [90], ist der dominierende Faktor auf die Kühlzeit die Wanddicke s . Ihr Einfluss ist quadratisch.

$$t_k = \frac{s^2}{\pi^2 \cdot a_{\text{eff}}} \cdot \ln\left(\frac{8}{\pi^2} \cdot \Theta\right) \quad \text{mit} \quad \Theta = \left(\frac{\vartheta_M - \bar{\vartheta}_W}{\bar{\vartheta}_E - \bar{\vartheta}_W}\right) \quad 2.9$$

s : Wanddicke, a_{eff} : effektive Temperaturleitfähigkeit, ϑ_M : Massetemperatur, $\bar{\vartheta}_W$: mittlere Formnesttemperatur, $\bar{\vartheta}_E$: mittlere Entformungstemperatur

Eine Verkürzung der Einzelkühlzeiten gemäß Gleichung 2.9 ist durch die Schichtenaufteilung zu erwarten. Hierbei ist aber zu beachten, dass nur für den Vorspritzling ein Wärmetransport in beide Werkzeughälften vorliegt. Bei den Nachspritzlingen wird der Wärmetransport zur Seite des Vorspritzling stark reduziert. Deshalb ist es sinnvoll, von einer unterschiedlichen Wanddickenverteilung zwischen Vor- und

Nachspritzling auszugehen, um den beschriebenen Temperatenausgleichvorgängen Rechnung zu tragen. Verfahrenstechnisches Ziel ist es hierbei, gleichlange Einzelkühlzeiten der Schichten zu erreichen.

Durch eine simulative Abschätzung lässt sich dies darstellen [93]. Bild 2.19 zeigt für das Zwei- und das Dreischichtspritzgießen die Ergebnisse einer Optimierungsrechnung für eine 20 mm dicke Polycarbonatlinse. Ermittelt wurde die kürzeste Kühlzeit unter der Vorgabe, dass die Einzelkühlzeiten für Vor- und Nachspritzling gleich lang sind. Hierzu werden die ermittelten Entformungszeitpunkte für Vor- und Nachspritzling entsprechend der gerechneten Wanddickenkonfiguration in dem Diagramm dargestellt.

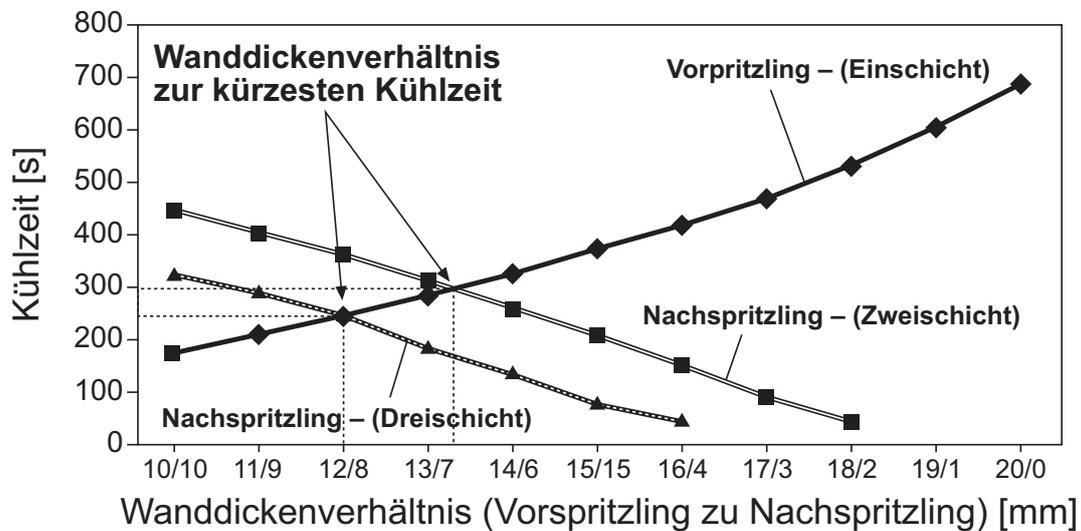


Bild 2.19 Berechnete Kühlzeit in Abhängigkeit vom Wanddickenverhältnis [93]
 Gesamtwanddicke = 20 mm, Werkstoff: Polycarbonat,
 Massetemperatur = 280 °C, Entformungstemperatur in Formteilmittle = 150 °C,
 Formnesttemperatur = 120 °C, Wärmeübergangskoeffizient $\alpha = 2000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

Es ist zu erkennen, dass bei einer Vergrößerung der Vorspritzlingswanddicke (Einschichtlinse) die benötigte Kühlzeit gemäß Gleichung 2.9 überproportional zunimmt. Analog verkleinert sich bei unveränderter Gesamtdicke die benötigte Kühlzeit des Nachspritzlings. Am Schnittpunkt der Kurven ist die Kühlzeit für beide Spritzlinge identisch. Für die Zweischichtlinse gibt es ein Optimum, das bei einer Schichteneinteilung von 66 % zu 33 % zwischen Vor- und Nachspritzling liegt. Die kürzeste Kühlzeit liegt für beide bei ca. 290 s. Im Dreischichtspritzguss – gleichzeitiges Spritzgießen der Ober- und Unterschicht – liegt das Optimum für die geringste Kühlzeit laut den Berechnungen bei einer 60%ige zu 40%ige Aufteilung zwischen Vor- und Nachspritzling und beträgt 240 s. Wobei der Nachspritzling jeweils 20 % für die Ober- und Unterschicht hat. Im Vergleich mit einer 20 mm dicken im Standardspritzguss hergestellten Linse, deren Kühlzeit größer als 600 s ist, muss die Werkzeug- und Verfahrenstechnik betrachtet werden. Die Produktion der

Mehrschichtlinse sollte mit der Produktion der Einschichtlinse in einem normalen Zweifach-Werkzeug verglichen werden. Während ein Drehtisch-Indexplattenwerkzeug in 290 s Kühlzeit für die Zweischichtlinsen auskommt und je ein Teil herstellt, kommen aus dem Zweifach-Werkzeug nach etwa der doppelten Zeit zwei Einschichtlinsen heraus. Die Anzahl der pro Stunde hergestellten Teile ist somit in beiden Fällen etwa gleich groß. Bei einer Dreischichtfertigung dieser Linse werden günstigere Ergebnisse für eine mögliche Kühlzeitreduzierung berechnet. Es ergibt sich nun ein Kühlzeitvorteil von mehr als 120 s, da in der Kühlzeit der Einschichtlinse (> 600 s) zwei Dreischichtlinsen mit insgesamt 480 s ($2 * 240$ s) hergestellt werden könnten [19, 20, 94].

Die theoretischen Betrachtungen zeigen das mögliche Potential des Mehrschichtspritzgießens, insbesondere das der Dreischichtlinsen deren Nachspritzlinge simultan gespritzt werden. Weiteres Potential zur Kühlzeitreduzierung liegt in der Herstellung von Vorspritzlingen, die mit kälteren Formnesttemperaturen und geringeren Nachdrücken gefertigt werden.

Die prinzipielle Herstellbarkeit von Beleuchtungsoptiken in Mehrschichtspritzgießen wurde bereits nachgewiesen [62] und eine erste Serienanwendung einer Zweischichtlinse für einen KFZ-Scheinwerfer konnte von der Firma Hella, Lipstadt erfolgreich produziert werden [95]. Des Weiteren liegen Industriepatentanmeldungen vor, die sich mit dieser Thematik beschäftigen [96, 97, 98, 99, 100]. Eingehende wissenschaftliche Untersuchungen, die die Unterschiede der Mehrschichtverfahren gegenüber dem Einschichtspritzgießen darstellen, liegen noch nicht vor.

2.4 Zusammenfassende Bewertung des Kenntnisstandes

Optische Komponenten für LED-Beleuchtungen werden vermehrt asphärische Gestalt oder Freiformflächen haben. Durch die Spritzgießverarbeitung mit Kunststoffen kann eine Funktionsintegration und die notwendige Gestaltungsfreiheit bei gleichzeitiger Massenfertigung im Gegensatz zu Glas sehr gut umgesetzt werden. Das Ziel ist es, die hierfür notwendigen komplexen dickwandigen Optiken in der geforderten Qualität in Bezug auf Geometrie und werkstofflichen Eigenschaften bei möglichst kurzer Zykluszeit, herzustellen.

Neben dem Standard-Spritzgießen wird heute das Spritzprägen mit seinen Varianten bereits eingesetzt. Beim Spritzgießen und -prägen ist der Einfluss der Prozessparameter „Zeit-Temperatur-Druck“ auf die optischen Eigenschaften von Einschichtlinsen recht gut untersucht. Bei beiden Verfahren kommt es durch die Druck- und Temperaturverteilungen in der erstarrenden Kunststoffschmelze zu inhomogenen Schwindungen und Eigenspannungen.

Basierend auf dem vorliegenden Kenntnisstand, ergibt sich das Besondere an dem Mehrschichtverfahren wie folgt:

- Durch die geringeren Wanddicken der Teilgeometrien, insbesondere bei dem Sandwich-Dreischichtverfahren Bild 2.16 B, ergibt sich eine signifikante Kühlzeitreduzierung gegenüber dem Spritzgießen und -prägen.
- Durch die dünneren Einzelschichten wird das Schwindungspotential, besonders das der Nachspritzlinge, reduziert und es ergibt sich ein günstigeres Verhältnis von der Siegelzeit des Anschnitts zur Erstarrungszeit der Vor- und Nachspritzlingswanddicken.
- Durch eine mögliche gleichmäßige Wanddickenverteilung können die abkühl- und druckbedingten Schwindungsunterschiede und Spannungen reduziert werden. Es kann hierdurch möglich sein, mit geringeren Nachdrücken im Vergleich zum Spritzgießen zu arbeiten.
- Die qualitätsbedingte Verlängerung der Restkühlzeiten des Spritzgießens und -prägens kann eventuell reduziert werden.
- Es wird sich eine Wechselwirkung bezüglich Temperatur- und Druckausgleich zwischen den Teilgeometrien ergeben, deren Einfluss auf die optischen Eigenschaften noch nicht bekannt ist.
- Des Weiteren wird erwartet, dass der Vorspritzling bei dem Sandwich-Dreischichtverfahren nicht sehr präzise gefertigt werden muss und damit weiteres Potential zur Vereinfachung des Herstellprozesses und zur Zykluszeitreduzierung bietet, Bild 2.17 D.

In dieser Arbeit sollen diese Besonderheiten durch einen praktischen Vergleich an einer Geometrie, die im Einschicht- und im Mehrschichtverfahren hergestellt wird, untersucht werden.

Des Weiteren sind alle bislang vorliegenden Untersuchungen zu optisch relevanten Eigenschaften ausschließlich durch eine integrale Betrachtung des Einflusses der Geometrie und der inneren, werkstofflich gebundenen Eigenschaften durchgeführt worden. In dieser Arbeit soll deshalb ein Messverfahren untersucht werden, mit dem der Einfluss von bestimmten Prozessparametern auf die inneren Eigenschaften wie Lichtstrahlableitung oder optische Verzerrung, weitgehend unabhängig von der äußeren Geometrie untersucht werden kann.

3 Werkstoff und Spritzgießversuche

3.1 Werkstoff

Für die Untersuchung wurde Polycarbonat als Vertreter der transparenten Thermoplaste ausgewählt. Das hier verwendete Makrolon[®] LED 2245 der Bayer Material-Science AG, Leverkusen ist ein leichtfließender linearer Spritzgießtyp auf Basis Bisphenol-A mit niedrigem Molekulargewicht. In Tabelle 3.1 sind einige Eigenschaften dargestellt. Verarbeitungsempfehlungen für die Massetemperatur liegen zwischen 280 °C – 300 °C und für die Formnesttemperatur zwischen 80 °C – 120 °C [101].

Brechzahl	Abbe-Zahl	Transmission	Wasseraufnahme	Dichte	E-Modul	Wärmeausdehnungskoeffizient
ISO 489 Methode A	v _d	ISO 13468-2	ISO 62 (23 °C, 50 % rel. F.)	ISO 1183-1	ISO 527-1,2	ISO 11359-1,23.1
1,586	34	90 %	0,12 %	1,19 g/cm ³	2350 N/mm ²	6,6 * 10 ⁻⁵ /°C

Tabelle 3.1 Eigenschaften von Makrolon[®] LED 2245 [101]

Bild 3.1.a zeigt die gemessenen Verläufe von Speichermodul und Verlustmodul, aus denen die Zustandsbereiche fest, entropieelastisch und viskoelastisch ermittelt werden können. Hiermit sind Aussagen bezüglich bestimmter Effekte durch Eigenstressungen und Orientierungen bei den Mehrschichtsystemen möglich.

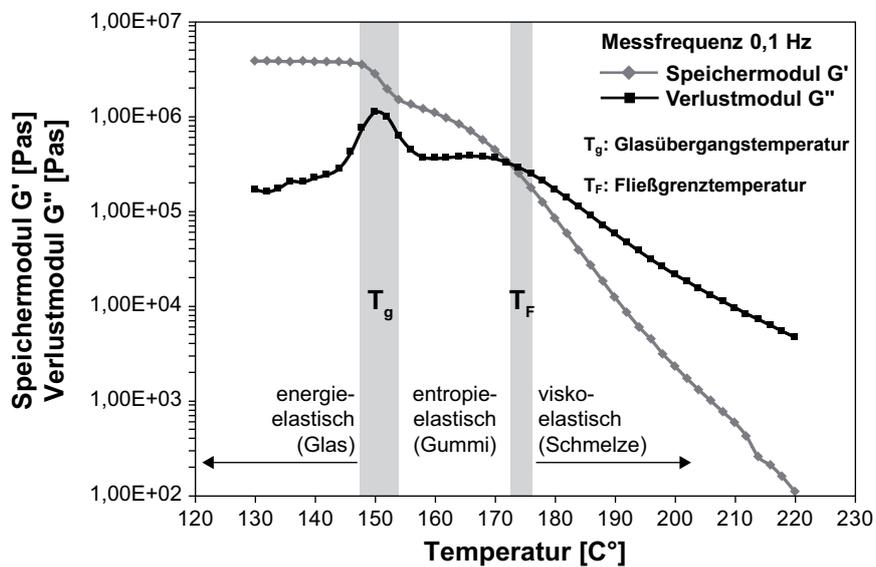


Bild 3.1 a Speicher- und Verlustmodul T_g = 147 °C, T_F = 173 °C
 Platte-Platte Messsystem: Normalkraft 0,5 N,
 Deformation 0,2 % Makrolon[®] LED 2245 [102]

Die gemessene Viskosität gibt einen Eindruck von der Beweglichkeit der Moleküle. Hier zeigt sich ein sehr großer Steilabfall im Bereich der Glasübergangstemperatur.

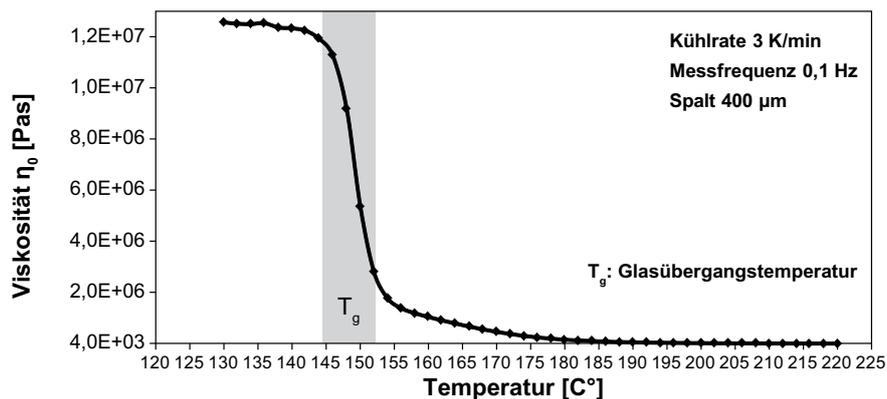


Bild 3.1 b Nullviskosität in Abhängigkeit von der Temperatur
*Platte-Platte Messsystem: Normalkraft 0,5 N,
 Deformation 0,2 % Makrolon® LED 2245 [102]*

Ein pvT-Diagramm, der gemessene Wärmeausdehnungskoeffizient und die Wärmekapazität als Funktion der Temperatur bei 200 bar sind in Bild 3.1.c gezeigt [103]

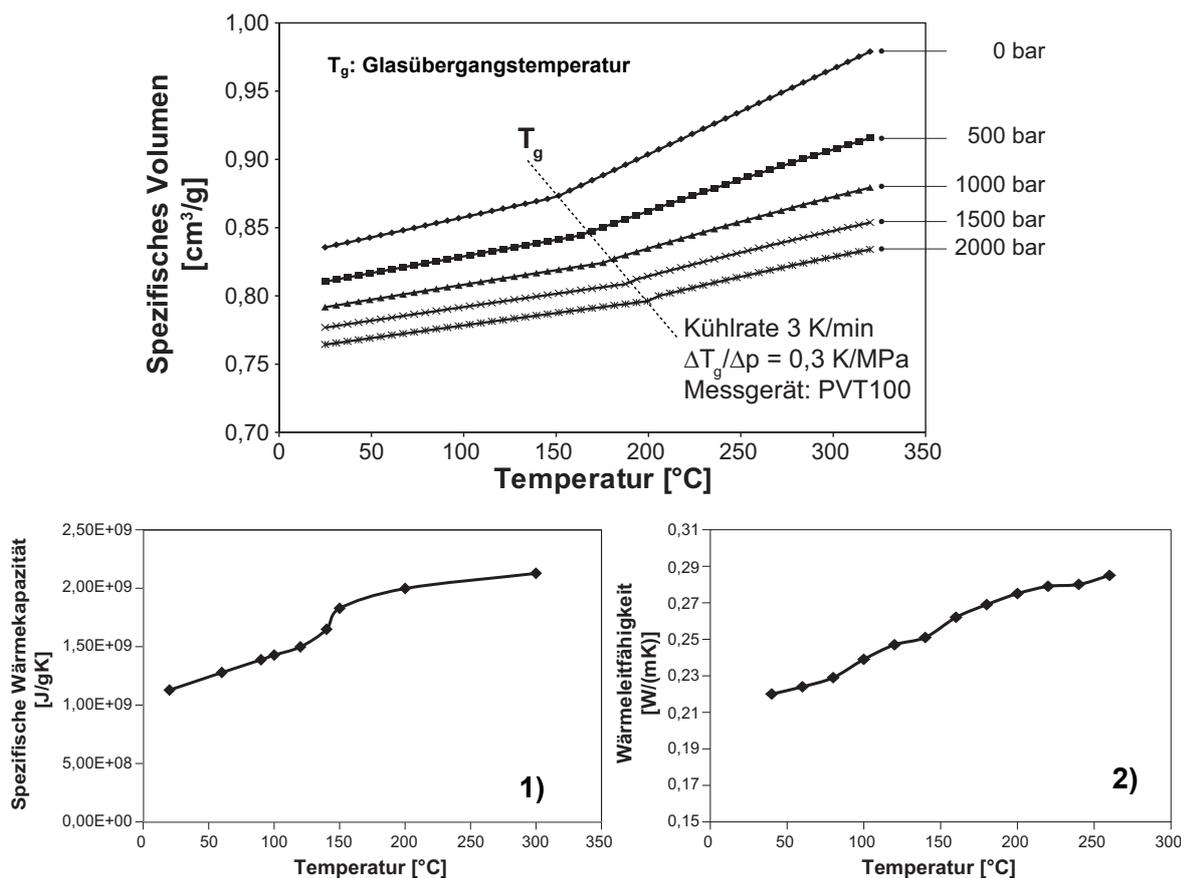


Bild 3.1 c pvT-Diagramm (oben), Wärmekapazität (unten links) und Wärmeleitfähigkeit (unten rechts) bei 200 bar für Makrolon® LED 2245
 1) Perkin Elmer DSC7, temperaturmodulierte Messung [103]
 2) pvT-Messgerät und nadelförmige Wärmequelle [103]

3.2 Prüfkörpergeometrien

Werkzeugkavitätsmaß der Dicke = 20,1 mm

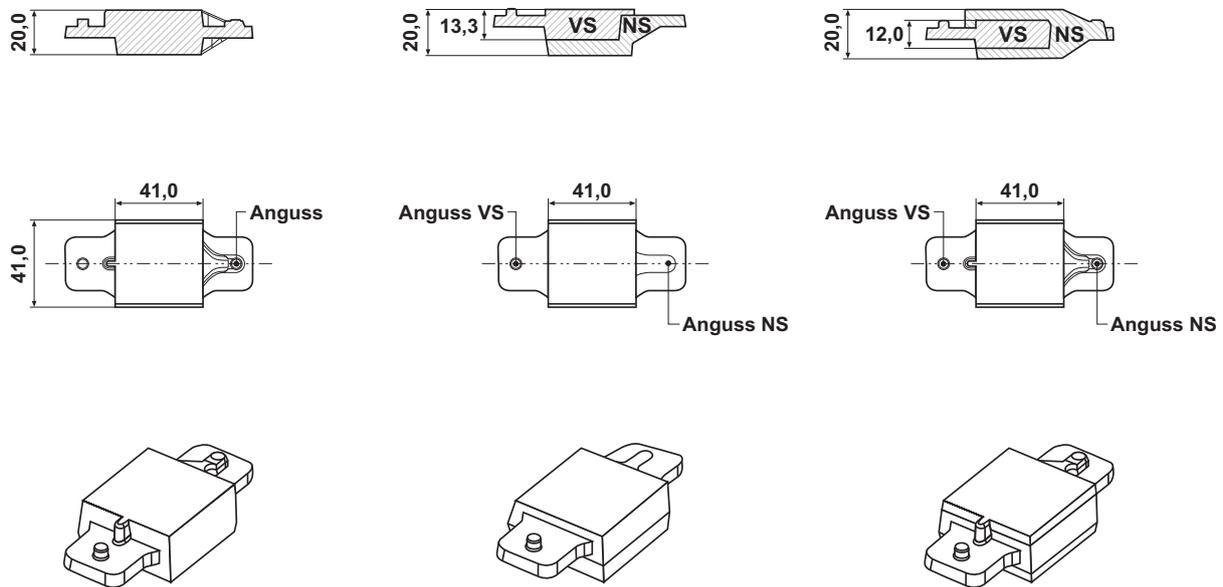


Bild 3.2 Geometrie der Ein-, Zwei- und Dreischichtprüfkörper
 VS: Vorspritzling NS: Nachspritzling

Die Prüfkörpergeometrien sind so gestaltet, dass in demselben Spritzgießwerkzeug ausgehend von einer Basisgeometrie des Einschichtprüfkörpers, durch Wechseleinsätze im Werkzeug, Zwei- und Dreischichtprüfkörper hergestellt werden können. Alle Prüfkörper haben die Außenabmessungen 41 mm * 41 mm * 20,0 mm (Werkzeugmaß 20,1 mm). Die zur Verfügung stehenden optischen Prüfflächen sind auf beiden Seiten plan. Links und rechts an den Prüfkörpern befinden sich Angusslaschen, die entsprechend zur Herstellung der Vor- und Nachspritzlinge benutzt werden. Die Wanddickenaufteilung für den Zwei- und Dreischichtprüfkörper ist durch die in Bild 2.19 beschriebenen Berechnungen festgelegt. Das Kriterium hierbei ist eine gleichlange Kühlzeit von Vor- und Nachspritzling. Diese Wanddickeneinteilungen werden während der Versuche nicht verändert. Für den Zweischichtprüfkörper ergibt sich eine Wanddicke im Vorspritzling von $s = 13,3$ mm und im Nachspritzling von $s = 6,7$ mm. Für den Dreischichtprüfkörper beträgt die Wanddicke im Vorspritzling 12,0 mm und in den beiden Nachspritzlingsschichten jeweils 4,0 mm.

Der Zweischichtprüfkörper wird durch die Verwendung eines vollautomatischen Drehtellers hergestellt. Zur Herstellung des Dreischichtenprüfkörpers wird der Vorspritzling durch Handumsetzen in die Nachspritzlingskavität platziert, durch Haltestifte positioniert und anschließend überspritzt. Die Umspritzung des Dreischichtprüfkörpers erfolgt simultan auf der Ober- und Unterseite des Vorspritzlings. Die Prüfkörper werden durch Stiftauswerfer entformt, die sich auf jeder Angusslasche befinden.

3.3 Versuchswerkzeug und Spritzgießmaschine

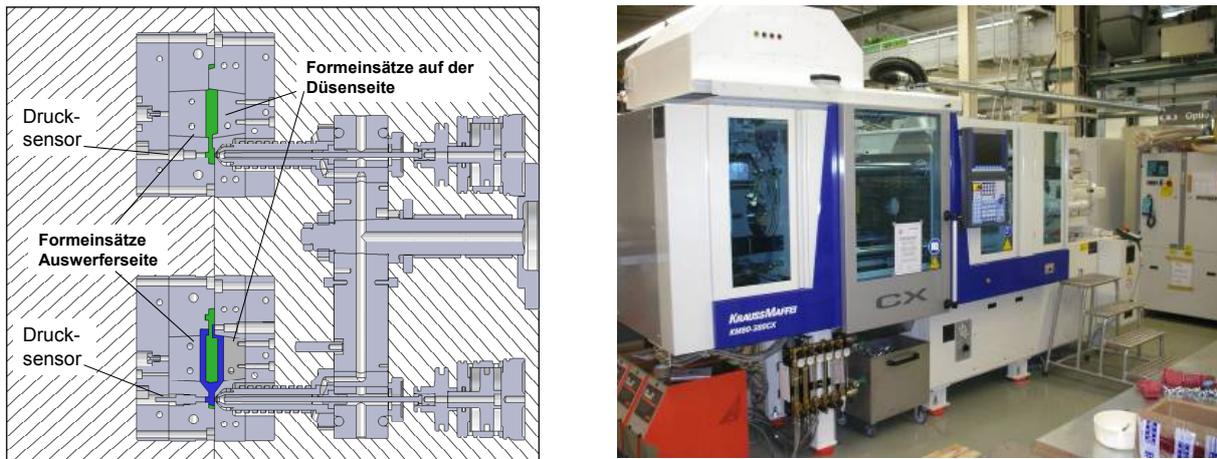


Bild 3.3 Spritzgießwerkzeug und Spritzgießmaschine
 links: Spritzgießwerkzeug mit Darstellung des Dreischichtprüfkörpers
 rechts: benutzte Spritzgießmaschine KraussMaffei 80-CX380

Es handelt sich um ein Drehtellerwerkzeug, in dem Vorspritzling (obere Kavität) und Nachspritzling (untere Kavität) jeweils durch eine Heißkanaldüse mit Nadelverschluss angespritzt werden. Die Ausführung mittels Heißkanal ermöglicht einen geringeren Materialverlust, als bei entsprechender Gestaltung eines Kaltkanalsystems und schafft weiterhin die Möglichkeit Vor- und Nachspritzlinge durch entsprechende Nadelsteuerung separat zu fertigen. Zur Realisierung der beschriebenen Formteilgeometrien werden die Kavitätsbereiche durch auswechselbare Einsätze gebildet. Die Anbindung von Vor- und Nachspritzling erfolgt über sehr kurze Kaltverteiler. Die hochglanzpolierten Formeinsätze von Vor- und Nachspritzling lassen sich separat temperieren, so dass der Einfluss von unterschiedlichen Formnesttemperaturen auf die Qualität und die Kühl- und Zykluszeiten untersucht werden kann. Über Drucksensoren an den Angusslaschen wurde die Konstanz der eingestellten Nachdrücke überwacht.

Alle Versuche werden auf einer KraussMaffei 80-CX380 Einkomponenten-Spritzgießmaschine durchgeführt, Bild 3.3 rechts. Diese verfügt über eine maximale Schließkraft von 800 kN, läuft voll hydraulisch und ist in Zweiplattentechnik aufgebaut. Für die Versuche wird eine Chromnitrid beschichtete Schnecke mit einem Durchmesser von 25 mm benutzt. Die Granulattrocknung erfolgt in einem Trockenlufttrockner mit automatischer Granulatförderung an die Maschine. Die Entformung der Bauteile aus dem Werkzeug erfolgt durch Handentnahme. Die Maschine ist schließseitig komplett eingehaust und mit einer Laminar-Flow-Box versehen. Dadurch können zwischen den Werkzeughälften Bedingungen eines Sauberraums Klasse ISO 4 erreicht werden. Da sich Vor- und Nachspritzling im Schussvolumen unterscheiden, wird die Steuerungssoftware der Maschine so modifiziert, dass zwei aufeinander folgende Spritzzyklen mit unterschiedlichen und abgestimmten Prozessparametern

(Einspritzgeschwindigkeit, Nachdruckhöhe, usw.) gefahren werden können. Hierdurch wird eine Zwei-Komponenten-Spritzgießmaschine „simuliert“, wie sie für die Herstellung von Mehrschichtlinsen notwendig ist.

3.4 Spritzgießversuche zur Herstellung der Prüfkörper

3.4.1 Auswahl der Prozessparameter für die Versuchspläne

Wie in Kap. 2.3.2 beschrieben, führen bei der Herstellung von Einschichtlinsen aus transparenten Kunststoffen im Spritzgießverfahren insbesondere eine hohe Formnesttemperatur, eine lange Kühlzeit, höhere Nachdrücke und eine langsame Einspritzgeschwindigkeit zu besseren optischen Eigenschaften. Bei den Mehrschichtlinsen liegen bislang noch keine eingehenden Untersuchungen des Einflusses der genannten Prozessparameter auf die erreichbaren werkstofflichen und geometrischen Eigenschaften vor. Zur Schaffung einer Wissensgrundlage werden deshalb die aus der Herstellung von Einschichtlinsen als technologisch wichtig identifizierten Verarbeitungsparameter Formnesttemperatur, Nachdruck und Kühlzeit als Hauptstellgrößen in dieser Arbeit untersucht. Die Festlegung der Variationsgrenzen und der Einstellwerte für die ausgewählten Prozessparameter wird im Nachfolgenden beschrieben. Die hier nicht variierten Parameter werden ebenfalls vorgestellt.

Bei allen Einstellungen wurde auf eine gute und sichere Entformung und eine stabile Prozessführung geachtet. Weiterhin sollten keine sichtbaren inneren und äußeren Fehlstellen wie Lunker, Fließlinien, Schallplattenrillen, Quetschfalten, Schlieren, Gelkörper oder thermisch abgebautes Material in Form von sog. „Black Specs“ in den Probekörpern enthalten sein.

Nachdruck:

Durch Nachdruckvariation werden die Grenzen der Nachdruckhöhen ermittelt. Die unteren Grenzen ergeben sich durch das Auftreten so großer Einfallstellen, dass eine taktile Messung nicht möglich ist. Die oberen Werte werden durch eine sichere, klemmfreie Entformung begrenzt. Die Vorspritzlinge der Dreischichtprüfkörper werden hiervon ausgenommen, da bewusst große Einfallstellen durch niedrige Nachdrücke hergestellt werden sollen. Die Überprüfung des eingestellten Nachdruckes wird über Druckaufnehmer im Schneckenraum und in den Angusflaschen durchgeführt. Die hierbei gemessenen Standardabweichungen für die Einstellung betragen weniger als 1 %. Die Nachdruckzeit ergibt sich aus der jeweiligen Siegelzeit des Prüfkörperanschnittes und einer bei allen Einstellungen und Prüfkörpern konstanten, zusätzlichen Wirkzeit von 10 s, sowie einer Zeit von 15 s zum Druckabbau. Durch die zusätzliche Wirkzeit soll die Siegelzeit sicher ausgenutzt werden. Die Siegelzeit der

Anschnitte wird durch die Gewichtsmessung von Formteilen mit unterschiedlichen Nachdruckzeiten ermittelt.

Kühlzeit:

Die Kühlzeiten werden mit Hilfe von Finite-Elemente Abkühlrechnungen näherungsweise bestimmt und dann durch Vorversuche verifiziert. Die oben ermittelten Werte der Nachdruckzeiten werden dann durch Restkühlzeiten entsprechend verlängert, um auf die berechneten Kühlzeiten zu gelangen. Im Nachfolgenden werden die Ermittlungen der Kühlzeiten für die Prüfkörper dargestellt:

Einschichtprüfkörper:

Die mittlere Einstellung (560 s) wird für eine maximale Temperatur von 150 °C in der Formteilmittte berechnet. Der obere Einstellungswert (728 s) ergibt sich aus der Berechnung für eine Temperatur von 135 °C in der Formteilmittte. Die untere Einstellung (390 s) wird durch Abzug der Differenz zwischen mittlerer und oberer Grenze von der mittleren Einstellung bestimmt.

Zweischichtprüfkörper:

Für den Zweischichtprüfkörper kann die mittlere Einstellung (290 s) in Anlehnung an die in Kap 2.3.3, Bild 2.19 berechneten Kühlzeiten übernommen werden. Die obere Einstellung (410 s) wird analog zu den Einschichtprüfkörpern für eine Entformungstemperatur von 135 °C ermittelt. Die untere Einstellung (240 s) kann allerdings nicht entsprechend der Differenz der oberen Einstellung zu mittleren Einstellung gewählt werden, da es bei einigen Einstellkombinationen mit den anderen Parametern zu Entformungsproblemen kam. Die untere Grenze wird deshalb etwas angehoben.

Dreischichtprüfkörper:

Die mittlere Einstellung für den Nachspritzling (275 s) kann aus verfahrenstechnischen Gründen, wie Entformungsproblemen und Oberflächenstörungen bei einigen Einstellkombinationen in Anlehnung an die in Bild 2.1.9 durchgeführten Abkühlrechnungen, nicht genau übernommen werden. Die Einstellwerte werden deshalb leicht verändert und an die geometrischen, verfahrenstechnischen Bedingungen angepasst. Die obere Einstellung ergibt sich durch eine berechnete Temperatur von 135 °C in der Formteilmittte, die untere Einstellung analog zur Differenz zwischen mittlerer und oberer Einstellung. Die Herstellung des Vorspritzlings (VS) ist vom Anspruch einer Fertigung im Drehteller oder Indexplattenwerkzeug entkoppelt. Ziel ist es vielmehr, durch die gewählte Einstellung der Kühlzeit VS und einer Variation der Formnesttemperatur VS zu überprüfen, wie die Qualität des Vorspritzlings in Bezug auf Einfallstellen, Oberfläche und Spannungen, die Gesamtqualität des Bauteiles beeinflusst. Die Kühlzeit des Vorspritzlings wird mit 155 s konstant gehalten.

Formnesttemperaturen:

Die Einstellungen der Formnesttemperaturen werden aus den in Kap. 2.3.2 geschilderten Gründen hoch gewählt. Ihre Spannweite wird nur so weit ausgedehnt,

dass immer optisch gute Teile hergestellt werden. Eine Ausnahme bildet hierbei der Vorspritzling des Dreischichtprüfkörpers. Da der Vorspritzling des Dreischichtsystems keine optische Außenfläche abbilden muss, ist die Untersuchung insbesondere von niedrigen Formnesttemperaturen in Hinblick auf eine zu erwartende niedrige Gesamtkühlzeit und die hieraus resultierenden geometrischen und werkstofflich gebundenen Eigenschaften sehr interessant. Die obere und untere Grenze ergibt sich hierbei durch die im Spritzgießwerkzeug realisierbaren Differenzen der Formnesttemperatur zwischen Vorspritzlings- und Nachspritzlingskavität.

Die Überprüfung der eingestellten Formnesttemperatur wird durch die Messung der real vorliegenden Temperaturen in den Kavitätsoberflächen mit einem externen Messfühler durchgeführt. Die Messungen werden zu Beginn einer Versuchseinstellung und während des Versuches durchgeführt. Hierbei wird an fünf verschiedenen Positionen (angussnah, angussfern und im Bereich dazwischen) direkt auf der Kavitätsoberfläche die Temperatur gemessen und notiert. Aufgrund der konturnahen Lage der Temperierkanäle lagen die gemessenen Temperaturdifferenzen in der Kavität bei kleiner 0,3 °C.

Nicht variierte Parameter

Einspritzgeschwindigkeit:

Wie in der Literatur beschrieben, soll die Einspritzgeschwindigkeit zur Erzielung einer Quellströmung und geringen Orientierungen, zur Vermeidung von Freistrahleffekten und Quetschfalten (Oberflächenstörungen) entsprechend der jeweiligen Formteil- und Anzugsgeometrie niedrig sein, Kap. 2.3.2. Werden diese Anforderungen erfüllt, so ist die Variationsbreite der Einspritzgeschwindigkeiten oft begrenzt. Untersuchungen haben allerdings gezeigt, dass ihr Einfluss auf die optische Qualität im Vergleich zu den anderen Parametern wie Nachdruck und Formnesttemperatur gering ist [72]. Bei der vorliegenden Untersuchung konnte in Kombination mit niedrigen Formnesttemperaturen die Einspritzgeschwindigkeit nicht in einem aussagefähigen Bereich variiert werden und wird deshalb nicht in die Versuchspläne mit aufgenommen. Sie wird aber, abgestimmt auf Linsengeometrie und Angussystem, jeweils sehr gering gehalten und gestuft eingestellt, so dass optisch einwandfreie Prüfkörper hergestellt werden.

Massetemperatur:

Bei allen Versuchen ist die Massetemperatur auf 280 °C eingestellt. Dies ist ein üblicher Wert bei der Herstellung von optischen Linsen aus Polycarbonat, wodurch bei den langen Zykluszeiten die thermische Belastung reduziert werden soll.

Umsetzzeit/Verzögerungszeit:

Die Zeit zum Umsetzen der Vorspritzlinge in die Nachspritzlingskavität wird nicht variiert. Eine Veränderung der Umsetzzeit bewirkt eine Veränderung der Vorspritzlingstemperaturen. Ein ähnlicher Effekt wird bereits durch die Variation der Vorspritzlings-Formnesttemperaturen erzielt.

3.4.2. Versuchspläne und Versuchsablauf

Die Spritzgießversuche zur Untersuchung des Einflusses der Einstellparameter Formnesttemperatur, Nachdruck und Kühlzeit auf geometrische und werkstoffliche Qualitätskenngrößen werden durch eine gezielte Variation mit Hilfe von Versuchsplänen durchgeführt. Eine Bewertung der statistischen Signifikanz der Einstellparameter auf die Qualitätsmerkmale ist hierdurch möglich. Um auch Wechselwirkungen zwischen den Einstellparametern zu untersuchen, werden vollfaktorielle Versuchspläne gewählt.

Für die Einschichtlinsen werden drei Einstellparameter mit jeweils zwei Einstellungen gewählt. Dies entspricht einem 2^3 -vollfaktoriellen Versuchsplan. Die Zweischichtlinsen sind mit vier und die Dreischichtlinsen mit fünf Einstellparametern in einem 2^4 - bzw. 2^5 -vollfaktoriellen Versuchsplan hergestellt, Tabellen 3.2 bis 3.4. Zusätzlich werden zu Beginn und am Ende der jeweiligen Versuchsreihen Zentralpunkte eingestellt.

Die Auswertung der Versuchsdaten erfolgt mit einer Varianzanalyse. Hierzu wurde die „Statistical and Power Analysis“ Software der Fa. NCSS [104] verwendet. Die Varianzanalyse gehört innerhalb der multivariaten Statistik zu den sog. strukturprüfenden Verfahren und prüft dabei auf Mittelwertsunterschiede zwischen verschiedenen Gruppen (Klassen). Im vorliegenden Fall werden die Gruppen durch Formteilmessergebnisse bei gleichen Spritzgießmaschineneinstellungen bzw. Einstellkombinationen gebildet. Hier wird ein lineares Modell mit Wechselwirkungen angenommen. Die Prüfgrößen der Varianzanalyse testen, ob die Varianz zwischen den Gruppen größer ist als die Varianz innerhalb der Gruppen. Dadurch wird ermittelt ob sich die Gruppen signifikant unterscheiden, was im vorliegenden Fall bedeutet, dass eine Maschineneinstellgröße bzw. eine Maschineneinstellgrößenkombination (Wechselwirkung) signifikanten Einfluss auf das betrachtete Formteilmerkmal hat. Durch die Anwendung des zweistufigen Versuchsplanes ergeben sich für die betrachteten Maschineneinstellgrößen bzw. Einstellgrößenkombinationen jeweils zwei Gruppen, deren Mittelwertsunterschied auf Signifikanz getestet wird. Ausgegangen wird dabei von der sog. Nullhypothese H_0 , dass die Mittelwerte μ_1 und μ_2 der beiden Gruppen sich nicht signifikant unterscheiden [105]:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2$$

3.1

Die Signifikanzprüfung erfolgt über einen F-Test [106], bei dem die Wahrscheinlichkeit der Richtigkeit der Nullhypothese ermittelt wird. Dieser Wahrscheinlichkeitswert wird mit einer wählbaren Grenzwahrscheinlichkeit (Irrtumswahrscheinlichkeit α) verglichen. Hier wird eine in der Praxis übliche Grenzwahrscheinlichkeit von 5 % ($\alpha = 0,05$) angesetzt. Ist die ermittelte Wahrscheinlichkeit kleiner als die vorgegebene Grenzwahrscheinlichkeit, wird die Nullhypothese – die Mittelwerte sind gleich – abgelehnt. Hierdurch wird angenommen, dass der die Gruppe definierende Einflussfaktor signifikanten Einfluss hat [105]. In der graphischen Darstellung werden auf der

X-Achse die vorhandenen Gruppen kategorisch aufgetragen (z. B. Kühlzeit in Bild 3.4). Die die Gruppenwerte verbindende Linie stellt somit keinen funktionalen Zusammenhang dar. In der Darstellung der Effektdiagramme der Varianzanalysen ist das Mittelwterergebnis der Zentralpunkteinstellung der jeweiligen Einflussgröße separat angegeben. Dieses Mittelwterergebnis der Zentralpunkteinstellung des jeweiligen Einstellwertes beruht im Gegensatz zu den Mittelwerten der restlichen Versuchseinstellungen auf nur einer Einstellung innerhalb des Versuchsplanes. Die Varianzanalyse stellt die Ergebnisse in leicht verständlicher Form von Effekten, die in der Einheit des betrachteten Zielmerkmals angegeben werden, dar. Des Weiteren erfolgt die Darstellung der Auswirkungen getrennt nach den Einflussfaktoren, was für die praktische Nutzung einfacher ist, als die formelmäßige Darstellung durch ein Regressionspolynom [105].

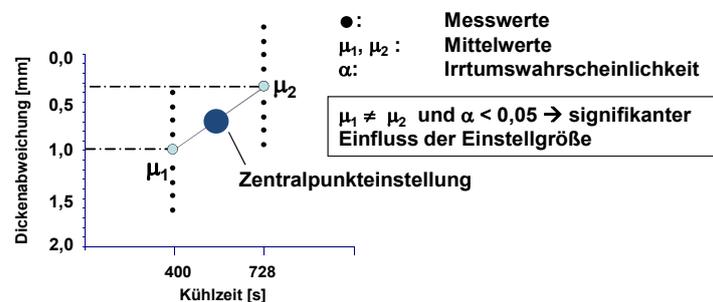


Bild 3.4 Auswertungsbeispiel der Effekte aus der Varianzanalyse

Es werden je Einstellung acht Probekörper hergestellt, wobei vor jeder Einstellung zusätzlich fünf Probekörper zu Stabilisierung der neuen Parameter und zum Erreichen eines thermischen Gleichgewichts hergestellt werden. Nach der Entformung werden die Linsen auf eine Abkühlvorrichtung platziert, wo sie frei liegend vollständig abkühlen können. Die Versuchspläne und der prinzipielle Ablauf der Spritzgießversuche sind im Nachfolgenden dargestellt.

Einschichtprüfkörper:

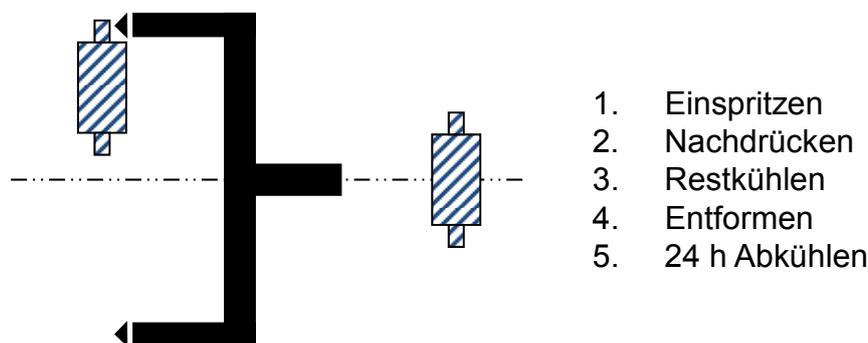


Bild 3.5 Prinzipieller Ablauf der Herstellung des Einschichtprüfkörpers

Einstellparameter	Einheit	Einstellniveau		
		-	o	+
Kühlzeit	[s]	390	560	728
Formnesttemperatur	[°C]	115	120	125
Nachdruckhöhe	[bar]	900	1100	1300

Tabelle 3.2 Vollfaktorieller Versuchsplan 2³ des Einschichtspritzgießens
Detaillierter Plan im Anhang Tabelle 10.3

Anmerkung: Die Nachdruckzeit beträgt bei allen Versuchen 60 s, die Siegelzeit 35 s und die Einspritzzeit 7 s.

Zweischichtprüfkörper

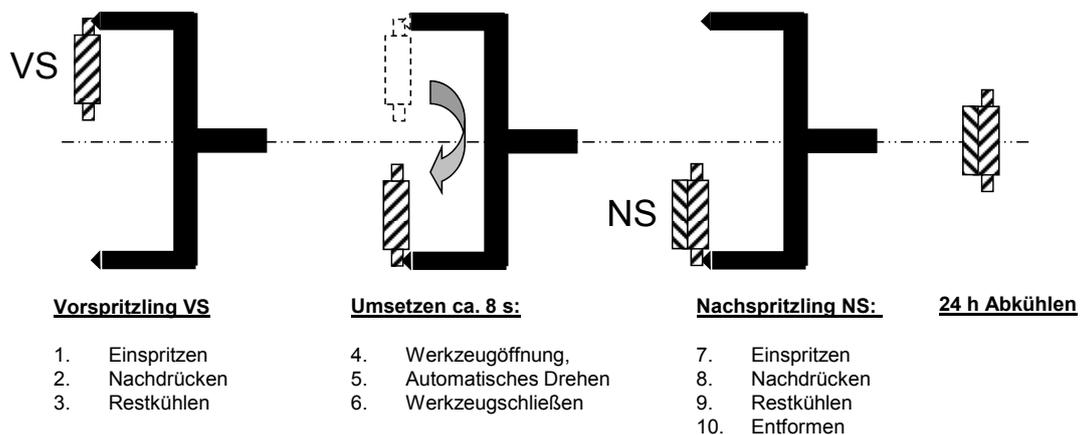


Bild 3.6 Prinzipieller Ablauf der Herstellung des Zweischichtprüfkörpers

Einstellparameter		Einheit	Einstellniveau		
			-	o	+
Kühlzeit	beide	[s]	240	290	410
Formnesttemperatur	beide	[°C]	110	115	120
Nachdruckhöhe	Vorspritzling	[bar]	1075	1110	1150
Nachdruckhöhe	Nachspritzling	[bar]	600	675	750

Tabelle 3.3 Vollfaktorieller Versuchsplan 2⁴ des Zweischichtspritzgießens
Detaillierter Plan im Anhang Tabelle 10.4

Anmerkung:

- Für den Vorspritzling und den Nachspritzling betragen bei allen Versuchen die Nachdruckzeit 45 s, die Siegelzeit 20 s und die Einspritzzeit 7,3 s.

- Da Vor- und Nachspritzling jeweils eine optisch relevante Außenfläche haben, werden die Formnesttemperaturen und die Kühlzeit jeweils gleich gehalten.
- Bei Nachdrücken > 750 bar im Nachspritzling klemmen die Teile im Werkzeug.
- Bei geringeren Nachdrücken des Vorspritzlings als 1075 bar ist die Einfallstelle auf der optischen Fläche zu groß und es kommt zu sichtbarer Kaltverformung auf dieser Seite durch den Nachdruck des Nachspritzlings.

Dreischichtprüfkörper

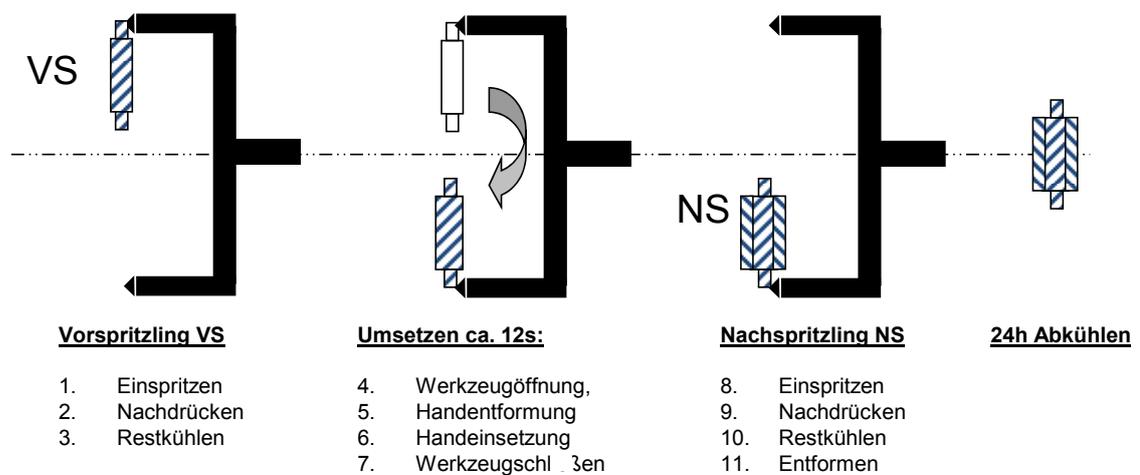


Bild 3.7 Prinzipieller Ablauf der Herstellung des Dreischichtprüfkörpers

Einstellparameter		Einheit	Einstellniveau		
			-	o	+
Formnesttemperatur	Vorspritzling	[°C]	70	95	120
Nachdruckhöhe	Vorspritzling	[bar]	350	575	800
Formnesttemperatur	Nachspritzling	[°C]	110	115	120
Nachdruckhöhe	Nachspritzling	[bar]	800	900	1000
Kühlzeit	Nachspritzling	[s]	130	275	420

Tabelle 3.4 Vollfaktorieller Versuchsplan 2⁵ des Dreischichtspritzgießens
Detaillierter Plan im Anhang Tabellen 10.5 und 10.6

Anmerkung:

- Für den Vor- und Nachspritzling betragen bei allen Versuchen die Nachdruckzeit 45 s, die Siegelzeit 20 s und die Einspritzzeit 7,2 s.
- Kühlzeit des Vorspritzlings = 155 s = konst.

automatisch durch eine Steuereinheit an- und abgefahren. Pro Reihe werden zehn Messpunkte aufgenommen. Die gemessenen Abweichungen werden direkt an einen angeschlossenen Computer geleitet und dort abgespeichert. Die reproduzierbare Positionierung der Prüfkörper wird durch drei feste Anschläge und zwei Fixierungsfedern sichergestellt.

Messgröße und Messdurchführung:

Die Lage der Einfallstellen des Einschichtprüfkörpers variiert unregelmäßig zwischen Düsen- und Auswerferseite. Dies führt dazu, dass z. B. bei einer Erhöhung des Nachdrucks die Düsenseite eine verbesserte Ebenheit aufweist und auf der Auswerferseite schlechtere Ergebnisse vorliegen. Eine statistische Auswertung ist somit bei einer getrennten Betrachtung von Düsen- und Auswerferseite kaum möglich. Als Maß für die Varianzanalyse wird deshalb der Maximalwert der Dickenabweichung eingeführt, der im Nachfolgenden näher erläutert wird: Vor jeder neuen Prüfkörpermessreihe wird die Messuhr mit einem hochpräzisen 20 mm dicken Endmaß auf „0“ kalibriert. Die gemessenen Abweichungen pro Prüfkörperseite (Δt_{Ai} und Δt_{Di} , Bild 4.1) beziehen sich auf diesen Wert. Die Messergebnisse von gegenüberliegenden Messpunkten werden addiert, so dass sich für diese Stellen eine Dickenabweichung von der Normdicke ergibt.

$$t_i = \Delta t_{Ai} + \Delta t_{Di} \quad 4.1$$

Der maximale Wert der Dickenabweichung ergibt sich dann aus der Differenz zwischen der maximalen und minimalen Dickenabweichung pro Prüfkörperseite.

$$MaxD = \Delta t_{max} - \Delta t_{min} \quad 4.2$$

Bild 4.2 zeigt die Ermittlung der maximalen Dickenabweichung MaxD exemplarisch für angenommene Einfallstellen auf Düsen- und Auswerferseite.

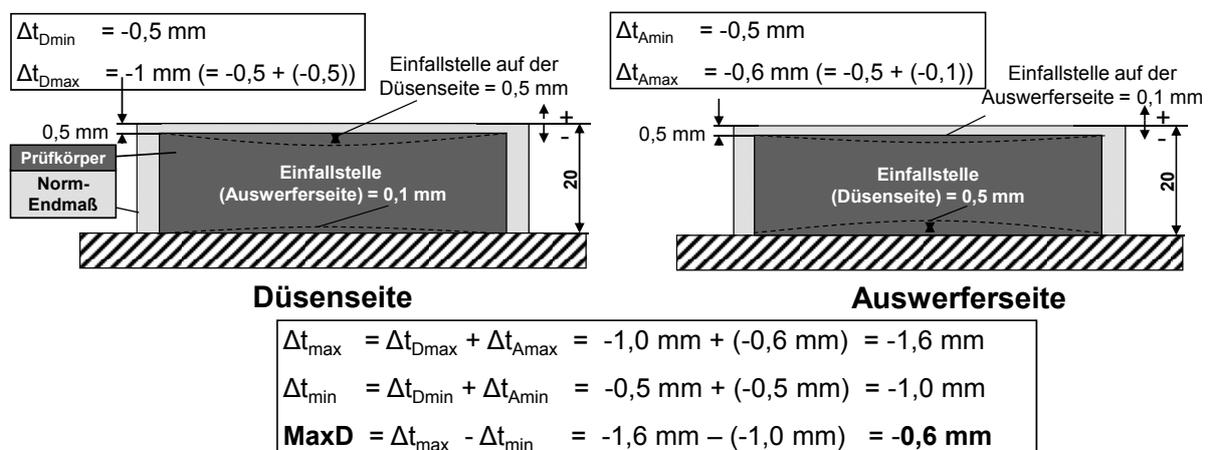


Bild 4.2 Ermittlung des Maximalwerts der Dickenabweichung MaxD

Δt_{max} : maximale Dickenabweichung, Δt_{min} : minimale Dickenabweichung

4.1.2 Messungengenauigkeit und Reproduzierbarkeit

Resultierend aus den Fertigungstoleranzen des Messtisches liegen die Formteile bei der Messung nicht ganz waagrecht auf. Hierdurch entsteht bei der Vermessung der Prüfkörper eine konstante Verkippung, die sich in einem kontinuierlichen Anstieg der Messergebnisse in Längs- und Querrichtung äußert. Die Verkippung in Längsrichtung beträgt 0,01 mm und in Querrichtung 0,008 mm. Die Verkippungen werden aus allen Messwerten vor der Auswertung herausgerechnet. Die Ermittlung der Verkippung anhand von 20 mm Stahlendmaßen ist im Anhang in Tabelle 10.1 dargestellt.

Zur Überprüfung der Wiederholbarkeit und der Replaziergenauigkeit wird eine Zweischichtlinse zehnmal von Prüftisch aufgenommen, wieder eingesetzt und wiederholt vermessen. Hierbei werden Standardabweichungen berechnet, die zwischen 0,5 μm und 0,9 μm auf einem sehr niedrigen Niveau liegen. Die Ergebnisse der gemessenen Mittelwerte und berechneten Standardabweichungen sind in Tabelle 10.2 im Anhang dargestellt.

4.2 Werkstofflich gebundene Eigenschaft – Verzerrung eines Punktemusters

Das in dieser Arbeit entwickelte Messverfahren soll es ermöglichen, die zu erwartenden Unterschiede in den inneren Eigenschaften zwischen den einzelnen Prüfkörpergeometrien zu untersuchen. Hierbei wird der Einfluss der Formteilaußengeometrie weitgehend ausgeschaltet. Prüfaufbau, Funktionsweise und Auswertung werden im Nachfolgenden vorgestellt.

4.2.1 Prüfungsaufbau und Funktionsprinzip

Zur Untersuchung des werkstofflichen Verhaltens wird die Verschiebung eines Punktemusters aus seiner Soll-Lage bestimmt, wenn dieses durch den Prüfkörper hindurch aufgenommen wird. Dies wird in einer ausführlichen Varianzanalyse mit den in Kap. 3.4.2 beschriebenen Versuchsplänen ausgewertet. Zu diesem Zweck ist folgender Aufbau realisiert worden, Bild 4.3.

Die Messvorrichtung besteht aus einer digitalen Kamera (IDS μEye CMOS), mit der über ein 200 mm Objektiv eine Punktematrix durch den Prüfkörper aufgenommen wird. Die Punktematrix besteht aus einer roten Filterfolie mit 1 mm großen schwarzen Punkten, die auf einem Leuchtkasten montiert ist. Um Helligkeitsschwankungen zu vermeiden, wird die Leuchtstoffröhre mit 500 Hz betrieben. Die Aufnahmen werden mit einer Integrationszeit von 109 ms und einer Bildrate von 5,8 fps aufgenommen. Die Bilder besitzen eine Größe von 2.560 x 1.920 Pixel bei einer Pixelauflösung von 24,4 $\mu\text{m}/\text{Pixel}$ (Bildfeld: 46,83 x 62,44 mm). Um Oberflächeneffekte wie Einfallstellen, Verformungen und Kratzer des Prüfkörpers auszuschließen, wird dieser in einer Kü-

vette umgeben von Immersionsöl gleicher Brechzahl vermessen. Die Küvette besteht aus einem Metallrahmen mit Führungen zur optimalen Positionierung des Bauteils und zwei Borosilikatglas Fenstern, die parallel zueinander angeordnet sind. Alle Messungen werden in einem mit 21 °C klimatisierten, staubreduzierten Messraum durchgeführt. Das Eintauchen der Prüfkörper in das Immersionsöl erfolgt immer blasenfrei. Konvektionsströme im Öl werden nicht beobachtet.

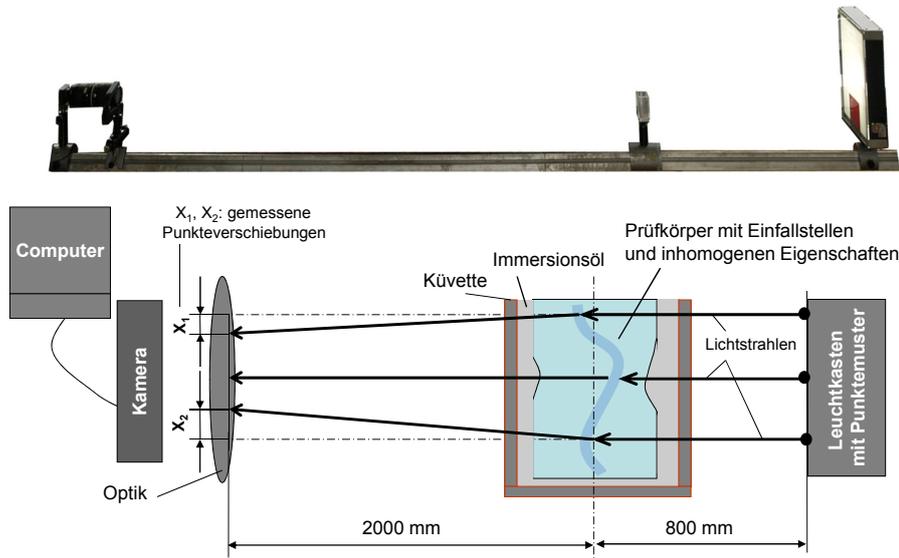


Bild 4.3 Messung der Verschiebung eines Punktemusters [107, 108]
 oben: *realer Messaufbau*
 unten: *Messprinzip*

Tritt ein Lichtstrahl in eine Optik ein und aus, so wird er durch Unebenheiten wie z. B. eine Einfeldstelle abgelenkt oder durch zu große Rauigkeiten an den Oberflächen gestreut, Kap. 2.2.2.1. Dies soll durch die Verwendung eines Immersionsöls weitgehend ausgeschlossen werden. Beim weiteren Durchgang durch einen spritzgegossenen optischen Prüfkörper trifft der Lichtstrahl auf ein anisotropes Volumen und wird abgelenkt. Die Gründe dieser Inhomogenität wurden bereits in den vorherigen Kapiteln 2.2.3.1 und 2.3 benannt: Durch die beschriebenen komplexen Temperatur- und Druckverteilungen entlang des Fließweges während der Erstarrung der Kunststoffschmelze entstehen inhomogene Schwindungen und Eigenspannungen. Des Weiteren liegen Eigenspannungen durch Abkühlung, Strömungs- und Expansionseffekte in den Formteilrändern und -ecken vor. Bei den Mehrschichtprüfkörpern können die angesprochene Wechselwirkung zwischen Vor- und Nachspritzling bei der Überspritzung und nach der Entformung Spannungen im Formteil und an der Oberfläche (Expansionseffekt) verursachen. Schlussendlich ergibt sich so eine inhomogene Dichte- und damit inhomogene Brechzahlverteilung. An den „Grenzen“ dieser Volumenbereiche gilt das Brechungsgesetz und der Lichtstrahl wird entsprechend den Brechzahlunterschieden abgelenkt. Addiert man diese Änderungen über den gesamten Durchgang durch das inhomogene Medium auf,

ergibt sich ein im Allgemeinen nicht gerader Lichtweg. Der Lichtstrahl wird abgelenkt und tritt aus dem Linsenkörper mit einer bestimmten Winkelverschiebung aus. Liegt zusätzlich noch Doppelbrechung vor (Kap. 2.2.3.1 – die Brechzahl und auch ihr Gradientenfeld sind in einem anisotropen Medium für die zwei Polarisationsrichtungen verschieden), so kommt es zusätzlich zu einer Lichtstrahlaufspaltung. Die aus der Winkelabweichung resultierende Punkteverschiebung kann nun durch die verwendete Messtechnik ermittelt werden.

4.2.2 Wirkungsweise des Immersionsöls

In Bild 4.4 ist der Dispersionsverlauf des verwendeten Polycarbonats und des Immersionsöl Cargille LL 5763 dargestellt. Das Öl ist ein Siloxan-Polyether-Gemisch und besitzt bei 25 °C eine kinematische Viskosität von 233 mm²/s. Eine gute Übereinstimmung mit einer maximalen Brechzahldifferenz von 0,0007 ergibt sich in einem Wellenlängenbereich von ca. 600 nm bis 850 nm, also im roten Spektralbereich. Zur Feinabstimmung der Brechzahl des Immersionsöls mit den Polycarbonat-Prüfkörpern wird deshalb durch die benannte rote Filterfolie die Abstrahlcharakteristik der Leuchtstofflampe auf diesen Wellenbereich reduziert.

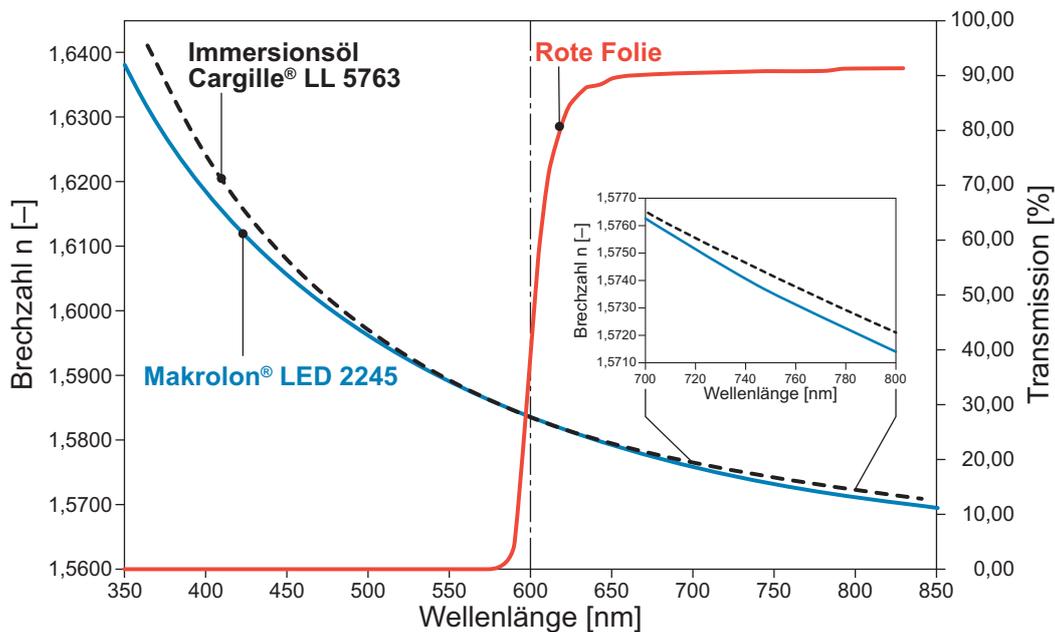


Bild 4.4 Dispersionsverlauf von Makrolon[®] LED 2245, dem verwendeten Immersionsöl Cargille[®] LL 5763, Transmission der roten Folie [108]
Messmethode zur Brechzahlbestimmung: Durchlicht-Interferenzmikroskopie

Bild 4.5 zeigt die Wirkweise des Immersionsöls. Liegen relativ ebene Oberflächen vor, wie an der im Bild 4.5 links gezeigten spritzgegossenen 6 mm dicken Polycarbonat-Platte (ohne Immersionsöl), so werden im Mittelbereich keine Punkteverzerrungen festgestellt. An den Formteilstenrändern liegen höhere Abkühlgeschwindig-

keitsunterschiede und hierdurch höhere Abkühlspannungen vor. Das beobachtete Punktemuster wird an diesen Stellen verzerrt. Es treten sowohl Ablenkungen als auch Doppelbrechungen auf. Bei tiefen Einfallstellen auf der Formteileroberfläche und Messung ohne Immersionsöl wird durch die damit verbundene erhöhte Lichtablenkung ein Punktemuster verzerrt dargestellt, Bild 4.5 Mitte. Durch die Verwendung des beschriebenen Prüfaufbaus ist der Effekt der Einfallstelle verschwunden, Bild 4.6 rechts. Es verbleibt eine sichtbare Verzerrung des Punktemusters an den linken und rechten Formteilerändern, deren Ursachen in den inneren Eigenschaften liegen.

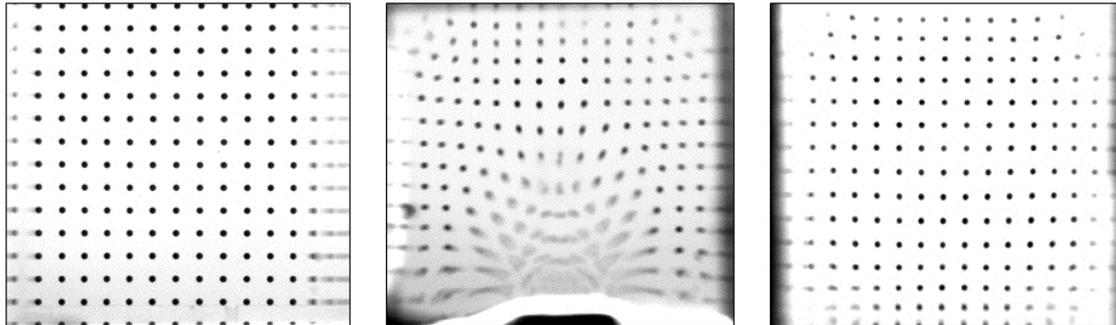


Bild 4.5 Punkteverschiebungen

links: spritzgegossene PC Platte ohne Einfall, $s = 6 \text{ mm}$, ohne Immersionsöl

mitte: Dreischichtprüfkörper, Einfallstelle $0,1 \text{ mm}$ tief, ohne Immersionsöl

rechts: Dreischichtprüfkörper, Einfallstelle $0,1 \text{ mm}$ tief, mit Immersionsöl

4.2.3 Auswertung der gemessenen Punkteverschiebungen

Eine Softwareauswerteeinheit ist mit der Beobachtungseinheit datentechnisch verbunden. Die Betriebsweise der Auswerteeinheit beruht darauf, dass die Abweichung der Lage der beobachteten Punkte zu der Ursprungslage bestimmt wird.

Hierzu wird zunächst ein Nullbild des Punktemusters durch die Küvette und Immersionsöl ohne Prüfkörper aufgenommen. Über eine Grauwertabstufung werden alle Pixel mit einem Grauwert von < 65 erkannt und Regionen mit > 900 Pixel als „Messpunkte“ interpretiert. Aus drei Nullbildaufnahmen wird jeweils ein Mittelwert gebildet.

Die Abstände des Messaufbaus sind so gewählt, dass die Verschiebung der Punkte aus ihrer Soll-Lage (Nullpunkt) optimal (genügend messbare Pixelverschiebung) im Durchlicht beobachtet werden kann. Wichtig hierbei ist die genaue Zuordnung der verschobenen Punkte zu den zugehörigen Nullpunkten. Voruntersuchungen zeigen, dass alle Probekörper ein ähnliches Abbildungsmuster ergeben. Resultierend daraus kann eine immer ähnliche Verschiebung beobachtet und die im nachfolgenden beschriebene Vorgehensweise benutzt werden. Die Ermittlung der Punkteverschiebung durch den Prüfkörper erfolgt ebenfalls über eine Pixelauswertung. Da der Kontrast durch den Prüfkörper schwächer ist als bei den Nullbildern, werden alle Pixel mit einem Grauwert < 75 erfasst und dann hieraus zusammenhängende „Regionen“ mit mindestens 150 Pixel identifiziert. Durch diese Vorgehensweise

werden die Punkteverschiebungen als vollständige Kreise erfasst und Doppelbrechungseffekte als längliche „Regionen“ berücksichtigt. Bild 4.6 zeigt dies für verschiedene „Regionen“. Anschließend wird die Position der verzerrten Kreise/Flächen bestimmt. Hierzu werden in einem Iterationsverfahren die nächstliegenden Nullkreise zu den verzerrten Kreisbildern zugeordnet. Um Fehlzuordnung zu vermeiden, geschieht dies in kleinen Schritten von 10-20 Pixeln. Punkteverschiebungen, die von der Software nicht eindeutig zugeordnet werden können, werden manuell zugewiesen.

Der ausgewertete Abstand der Punkte zum Nullpunkt ist immer der Absolutbetrag der kürzesten Diagonale und wird durch die zugehörigen x- und y-Koordinaten der Verschiebung ermittelt. Da in der Varianzanalyse nur die Verschiebung durch die beschriebenen anisotropen Eigenschaften von Interesse ist, wird keine separate Betrachtung der x- und y-Verschiebung durchgeführt.

Die Verschiebungen aller abgebildeten Punkte werden als farbcodierte Regionebilder mit überlagerten Nullregionen ausgegeben. Die schwarze Zahl über der Region gibt die Pixelverschiebung an. Die weiße Zahl ist die Nummer der Region.

Ziel der Untersuchung ist es, den Einfluss der Schichten und des Volumens der Mehrschichtprüfkörper im Vergleich zu dem Einschichtprüfkörper zu ermitteln. Einflüsse der prüfkörperspezifischen Angussbereiche sollen dabei weitgehend unberücksichtigt bleiben. Effekte an den Formteilrändern (Abkühlung, Expansionseffekte) und lokale Anisotropien sollen erfasst werden. Aus ihnen wird eine Häufigkeitsverteilung beobachteter Verschiebungen in einem 11 * 11 Punkte großen Auswertebereich in der Formteilmittte bestimmt, Bild 4.6. Eine separate Auswertung nach den lokalen Unterschieden erfolgt bei der Ermittlung der charakteristischen Punkteverschiebungsmuster in Kap. 5.7 und 5.8.

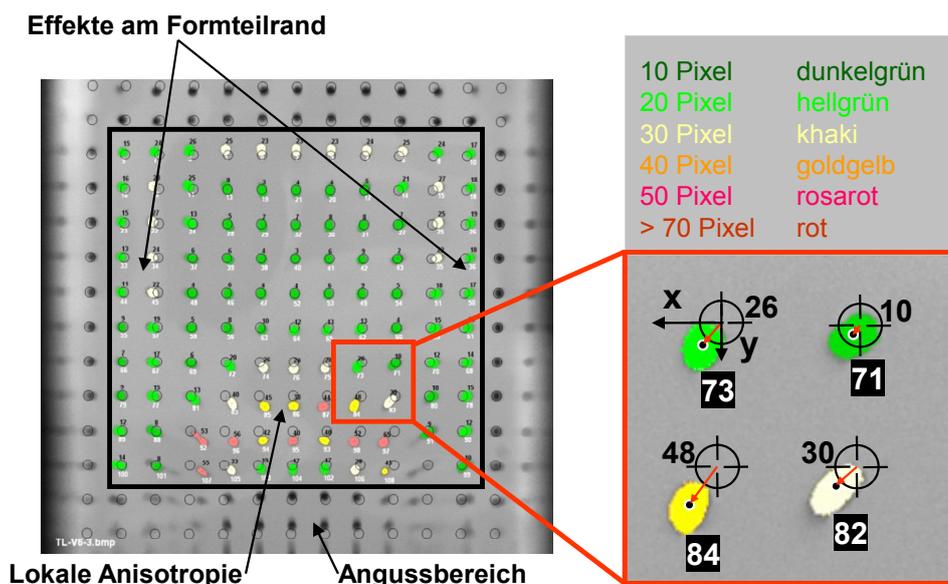


Bild 4.6 Punkteverschiebung als farblich gekennzeichnete Regionen bestimmter Auflösung und Pixelgröße. Auswertebereich 11 * 11 Punktefeld [107, 108]

Zur grafischen Darstellung der Häufigkeitsverteilung der gemessenen Punkteverschiebungen wird zunächst ein Histogramm erstellt. Hierzu wird für jede Versuchseinstellung aus den dazugehörigen acht Wiederholungen eine mittlere Punkteverteilung gebildet. Die Punkteverschiebungen werden in Anlehnung an die genannte farbliche Einteilung in konstante Häufigkeitsklassen von je fünf Pixeln Breite eingeteilt. Die Höhe der Balken zeigt die auftretende Häufigkeit der gemessenen Verschiebungen in der jeweiligen Klasse auf.

Bild 4.7 zeigt hierzu exemplarisch zwei Histogramme der gemessenen Punkteverschiebungen für den Einschichtprüfkörper, der mit unterschiedlichen Einstellparametern hergestellt wurde. Zur Sicherstellung der Vergleichbarkeit der Punkteverschiebung wird darauf geachtet, dass möglichst dieselbe Anzahl von Punkten in dem 11×11 Punktfeld von der Software erkannt wird. Dies ist in Bild 4.7 durch die Angabe der prozentual richtig zugeordneten und damit ausgewerteten Punkte vermerkt. Anhand dieser Punkteverschiebungshistogramme lässt sich der Einfluss der Einstellgrößen aus den Versuchsplänen erkennen. Im Bild 4.7 ist die Kühlzeit von 728 s auf 390 s reduziert, wodurch eine breitere Verteilung zu höheren Punkteverschiebungen gemessen wird.

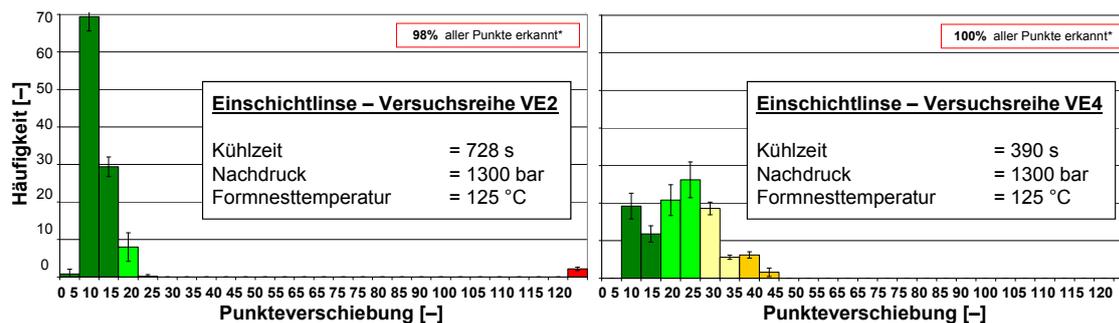


Bild 4.7 Histogramme der Punkteverschiebungen eines Einschichtprüfkörper
links: Kühlzeit 728 s, rechts: Kühlzeit: 390 s

4.2.4 Qualitätszahl der Punkteverschiebung

Zur statistischen Auswertung durch die in Kap. 3.4.2 beschriebene Varianzanalyse können die Verteilungsfunktionen in der dargestellten Form nicht genutzt werden. Angestrebt wird deshalb die Möglichkeit, durch ein einzelnes, quantitatives Gütemaß den Zusammenhang zwischen Einstellparametern (Druck, Temperatur, Zeit) und Punkteverschiebung für die jeweiligen drei Prüfkörpergeometrien zu beschreiben. Dieses Gütemaß wird Qualitätszahl genannt. Bild 4.8 zeigt schematisch die gewählte Vorgehensweise.

Ausgehend von den gemessenen Punkteverschiebungen werden die Verteilungsfunktionen erstellt. Als Basis geeigneter Qualitätszahlen werden die mit den Verteilungen verbundenen Kastendiagramme (Boxplots) benutzt. In einem Kastendiagramm werden verschiedene, robuste Streuungs- und Lagekennwerte zusammen-

gefasst. Der Vorteil dieser Darstellung besteht darin, dass so Kennwerte der Verteilung direkt aus der grafischen Darstellung abgelesen werden können [106]. Hierzu zählen der kleinste und größte aufgetretene Datenwert, der Median oder der Mittelwert, die Spannweite der Punkteverschiebung und über die Ausdehnung der Box, den sog. Quartilabstand, der Bereich, in dem 50 % der Daten liegen. Die Länge der Box entspricht dem Interquartilsabstand. Dieser ist ein Maß der Streuung der Daten, welches durch die Differenz des oberen Quartils (75 % der Daten sind kleiner oder gleich dieses Wertes) und unteren Quartils (25 % der Daten sind kleiner oder gleich dieses Wertes) bestimmt wird. Der Median ist als durchgehender Strich in der Box eingezeichnet. Dieser Strich teilt das gesamte Diagramm in zwei Hälften, in denen jeweils 50 % der Daten liegen. Durch seine Lage innerhalb der Box bekommt man also einen Eindruck von der Schiefe, der den Daten zugrunde liegenden Verteilung, vermittelt. Ist der Median im linken Teil der Box, so ist die Verteilung rechtsschief und umgekehrt [106].

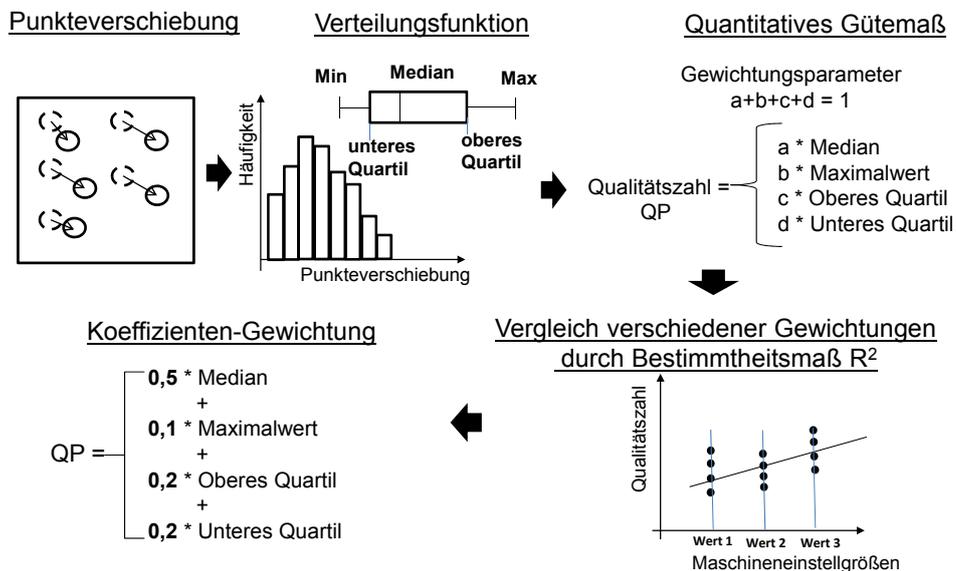


Bild 4.8 Vorgehensweisen zur Bestimmung der Qualitätszahl QP

Zur Ermittlung der Qualitätszahl werden folgende Lage und Streuungsparameter betrachtet:

- Median, Maximalwert, unteres Quartil, oberes Quartil

Die gewählten Parameter beschreiben die Verteilungsfunktionen hinreichend, so dass sie durch eine gewichtete Linearkombination zu einer Qualitätszahl zusammengefasst werden können. Die Summe der Gewichtungsfaktoren a , b , c , d wurde dabei zu eins definiert.

$$QP = a * \text{Median} + b * \text{Maximalwert} + c * \text{oberes Quartil} + d * \text{unteres Quartil} \quad 4.3$$

Hierbei wird eine schmale Verteilungsfunktion geringe Werte der vier Parameter erzeugen, so dass prinzipiell kleine QP-Werte geringere Punkteabweichungen widerspiegeln und auf bessere werkstoffliche Eigenschaften deuten. Damit kennzeichnet die Qualitätszahl die Höhe der Anisotropie im Werkstoff. Allerdings wird nicht zwischen verschiedenen Ursachen (Spannungen, Orientierungen) unterschieden.

Im nächsten Schritt wird die Wirksamkeit der Beschreibung der beobachteten Verteilungen der Punkteverschiebung durch die beliebig definierbaren Qualitätszahlen miteinander verglichen. Hierbei muss herausgefunden werden, welche Gewichtung der Parameter a , b , c , und d die beobachtete Änderung der Qualitätszahl durch die Änderung der beteiligten Maschineneinstellgrößen der Versuchseinstellung möglichst genau beschreibt. Hierzu wird das Bestimmtheitsmaß R^2 der linearen Regression des funktionalen Zusammenhanges

Qualitätszahl = f (Maschineneinstellgrößen) gewählt.

Das Bestimmtheitsmaß R^2 ist ein indirektes statistisches Maß für den Zusammenhang zwischen einer abhängigen und den unabhängigen Variablen eines statistischen Modells und ist somit eine Möglichkeit zur Bewertung der Güte einer Modellanpassung einer Regressionsanalyse. Das Bestimmtheitsmaß ist weiterhin das in der Regressionsanalyse verwendete Standardkriterium zur Variablenauswahl für ein lineares statistisches Modell und wird deshalb als Gütekriterium für die Qualitätszahlen gewählt. Das Bestimmtheitsmaß bewegt sich zwischen 0 und 1 (0 % und 100 %), wobei 0 kein linearer Zusammenhang und 1 perfekter linearer Zusammenhang bedeutet [104, 106, 109].

Ziel ist es also, dass sich ein möglichst exakter funktionaler Zusammenhang zwischen den variierten Maschineneinstellgrößen und der zu verwendenden Qualitätszahl durch eine lineare Regression ermitteln lässt. Die beste Linearkombination der Verteilungsparameter (a , b , c , d) zur Definition der Qualitätszahl wird dabei empirisch ermittelt. Hierzu werden unterschiedlich gewichtete Qualitätszahlen mittels Regressionsanalyse für lineare Modelle erster und zweiter Ordnung und Berechnung des Bestimmtheitsmaßes bewertet, Tabelle 4.1

Qualitätszahl	Gewichtung				Einschichtprüfkörper		Zweischichtprüfkörper		Dreischichtprüfkörper	
	Median	Maximalwert	oberes Quartil	unteres Quartil	R^2 (2. Ord.)	R^2 (1. Ord.)	R^2 (2. Ord.)	R^2 (1. Ord.)	R^2 (2. Ord.)	R^2 (1. Ord.)
	a	b	c	d						
QP1	0,5	0,1	0,2	0,2	0,9621	0,8674	0,9375	0,5865	0,9204	0,3915
QP2	0,4	0,2	0,2	0,2	0,9650	0,8370	0,9536	0,5336	0,8594	0,4365
QP3	0,6	0,1	0,15	0,15	0,9620	0,8654	0,9369	0,5951	0,9197	0,3900
QP4	1	0	0	0	0,9611	0,8652	0,9348	0,6783	0,6308	0,3548

Tabelle 4.1 Bestimmtheitsmaß der Qualitätsziffer bei unterschiedlicher Gewichtung

R^2 : Bestimmtheitsmaß, a , b , c , d : Gewichtungsfaktoren

R^2 (1. Ord.): lineares Modell 1. Ordnung,

R^2 (2. Ord.): lineares Modell 2. Ordnung

Für die hier dargestellten Qualitätszahlen QP1 bis QP4 ist zu erkennen, dass QP1 über alle Prüfkörpergeometrien gesehen das höchste Bestimmtheitsmaß für eine lineare Regression 2. Ordnung hat. Insbesondere zeigt die alleinige Betrachtung des Medianwertes (QP4 - Median = 1) durch das niedrige Bestimmtheitsmaß bei dem Dreischichtprüfkörper keinen ausreichend genauen Zusammenhang zwischen Qualitätszahl und Maschineneinstellungen. Ein direkter Vergleich der verschiedenen Versuchseinstellungen der Einschichtprüfkörper und die dazugehörigen Qualitätszahlen der Punkteverschiebungen mit der Gewichtung von QP1 aus Tabelle 4.1 zeigt Bild 4.9. Entsprechend den Einstellungen ändern sich die Qualitätszahlen. Die zugehörige Verteilungsfunktion ist durch die Kastengrafiken repräsentiert.

Versuchseinstellungen	Formnesttemperatur [°C]	Kühlzeit [s]	Nachdruck [bar]	Qualitätszahl der Punkteverschiebung [-]	Kastengrafik
VE 1	120	560	1100	QP = 13,5	
VE 2	125	728	1300	QP = 6	
VE 3	125	728	900	QP = 8,2	
VE 4	125	390	1300	QP = 19,4	
VE 5	125	390	900	QP = 11,7	
VE 6	115	728	1300	QP = 11,4	
VE 7	115	728	900	QP = 9,3	
VE 8	115	390	1300	QP = 20	
VE 9	115	390	900	QP = 15,8	
VE 10	120	560	1100	QP = 13,7	

Bild 4.9 Funktioneller Zusammenhang der Qualitätszahl QP mit den Prozesseinstellungen für den Einschichtprüfkörper [107]

Gewichtung:

Median = 0,5; Maximalwert = 0,1; oberes und unteres Quartil = 0,2

Bei einer Reduzierung der Formnesttemperatur von 125 °C auf 115 °C (vgl. z. B. VE 2 mit VE 6 oder VE 3 mit VE 7) wird die Qualitätszahl größer, d. h. die inneren optischen Eigenschaften (z. B. größere Abkühlspannungen) werden schlechter. Durch die Verringerung der Kühlzeit von 728 s auf 390 s (vgl. VE 2 mit VE 4 oder VE 3 mit VE 5) wird die Qualitätszahl ebenfalls größer. Wie im Stand der Technik beschrieben, werden durch eine frühzeitige Entformung die inneren optischen Eigenschaften schlechter z. B. Erhöhung des Doppelbrechungseffekts [71]. Die Kastengrafik beschreibt dies durch eine breite Verteilung der Punkteabweichungen und damit einer größeren Qualitätszahl. Eine Reduzierung des Nachdrucks von 1300 bar auf 900 bar reduziert die Belastung der erstarrenden Kunststoffschmelze und schafft so, wie im Stand der Technik beschrieben, bessere innere optische Eigenschaften. Dies

wird bei allen Einstellungen mit verringertem Nachdruck durch eine geringere Qualitätszahl auch so festgestellt (vgl. VE 4 mit VE 5, VE 6 mit VE 7, VE 8 mit VE 9). Nur bei der Einstellung VE 3 wird bei reduziertem Nachdruck eine leicht vergrößerte Qualitätszahl im Vergleich zu VE 2 mit 1300 bar Nachdruck ermittelt. Es zeigt sich bei VE 3 eine breitere Kastengrafik im Vergleich zu VE 2, d. h. die Punkteverschiebungen streuen mehr als bei der hohen Nachdruckeinstellung. Die hohe Formnesttemperatur und die lange Kühlzeit scheinen die Qualitätszahl bei VE 2 und VE 3 zu dominieren. Da aber bei allen anderen Einstellungen mit niedrigem Nachdruck durchweg geringere (bessere) Qualitätszahlen ermittelt werden, kann auch für den Einfluss des Nachdrucks eine gute Übereinstimmung mit den ermittelten Qualitätszahlen festgestellt werden.

Das Beispiel des Einschichtprüfkörpers zeigt, dass die ermittelte Qualitätszahl QP mit der Gewichtung von QP1 aus Tabelle 4.1 die Unterschiede in den Punkteverschiebungen in dem gewünschten funktionalen Zusammenhang beschreiben kann. Eine Untersuchung des Einflusses der Einstellgrößen in einer ausführlichen Prozessanalyse für alle drei Prüfkörpergeometrien in Kap. 5.2 ist somit möglich. Hierbei weisen kleinere Qualitätszahlen auf günstigere innere Eigenschaften hin. Die QP-Zahl wird in Pixeln gemessen. Hieraus könnte eine Längen- oder Winkelabweichung ermittelt werden. Da dies jedoch vom Prüfaufbau abhängt und hier primär der Vergleich zwischen den Geometrien interessiert, wird im Nachfolgenden die QP-Zahl als einheitenlose Größe dargestellt.

4.2.5 Reproduzierbarkeit der Messmethode

Zur Untersuchung der Empfindlichkeit der Messungen in realer Messsituation wird ein Prüfkörper 10-mal aus der Küvette mit Immersionsöl herausgenommen, wieder eingesetzt, fotografiert und anschließend optisch ausgewertet. Das nachfolgende Bild zeigt in Histogrammform die Mittelwerte mit den Standardabweichungen der gemessenen Punkteverschiebungen aus den jeweiligen 10 Messungen.

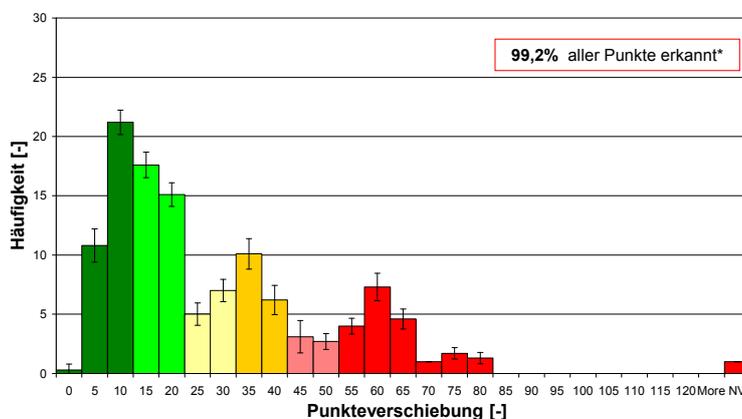


Bild 4.10 Mittelwerte und Standardabweichung einer zehnfachen Auswertung mit Herausnehmen der Prüfkörper aus der Küvette

Die errechnete, mittlere Standardabweichung über alle Klassen ist 0,89. Tabelle 10.8 a und b zeigen die hierzu gehörenden Punkteverschiebungen aus den zehnfachen Messungen. Hieraus ergibt sich eine Standardabweichung von unter ± 1 Pixel und zeigt damit die hohe Reproduzierbarkeit der Messmethode. Alle in Kap. 5.2 beschriebenen Messungen der Punkteabweichungen sind nach dieser Methode durchgeführt worden und somit untereinander vergleichbar.

4.2.6 Auflösungsvermögen bei großen Einfallstellen

Aufgrund der nicht vollständigen Übereinstimmung des Dispersionsverlaufs des Polycarbonates und des Immersionsöls ergibt sich in dem betrachteten Wellenlängenbereich des Prüfaufbaus ein maximaler Brechzahlunterschied von Δn 0,0007, Bild 4.4. Trotz der geringen Differenz wird hierdurch eine „inhärente“ Punkteverschiebung in dem Prüfaufbau verursacht, die von der vorliegenden Prüfkörperoberfläche, also von der Größe der Einfallstelle abhängt. Als beschreibende Größe für eine Einfallstelle kann ihr Flankenwinkel α herangezogen werden, Bild 4.11.

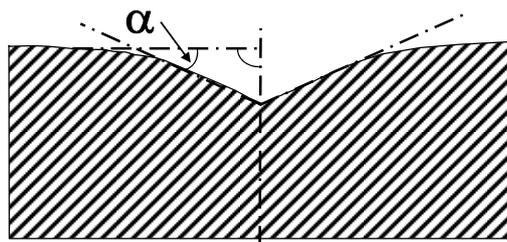


Bild 4.11 Flankenwinkel einer Einfallstelle

Zur Beschreibung dieses Effekts zeigt Bild 4.12 in vereinfachter Form die Lichtstrahl- ablenkung an einer Einfallstelle. Der Einfluss der Küvette ist durch die Nullbild- erstellung berücksichtigt und wird hier nicht dargestellt. Ein senkrecht auf den Prüf- aufbau eintreffender Lichtstrahl (1) würde bei vollkommener Brechzahlüberein- stimmung, trotz vorliegender Einfallstelle mit dem Flankenwinkel α , nur durch das anisotrope Volumen abgelenkt (ε_{vol} - gestrichelter Pfeil 2). Es entsteht die Punktever- schiebung X_{vol} . Aufgrund des Brechzahlunterschiedes zwischen PC und Immer- sionsöl wird der Lichtstrahl jedoch zusätzlich an den Übergangsflächen PC und Öl gebrochen (3). Es entsteht eine zusätzliche Ablenkung $\varepsilon_{\Delta n}$ und Punkteverschiebung $X_{\Delta n}$. Die Gesamtablenkung ε_{ges} bzw. Gesamtpunkteverschiebung X_{ges} ist die Summe aus beiden Anteilen. Aus den Messwerten der taktilen Vermessung in Bild 4.1 an den Reihen 2/5 können die bei den drei Prüfkörpern vorliegenden Flankenwinkel α der Einfallstellen ermittelt werden:

Einschichtprüfkörper: α bis maximal 25°

Zweischichtprüfkörper : $\alpha < 1,5^\circ$ (einmalig maximal bei 3°)

Dreischichtprüfkörper: $\alpha < 1^\circ$

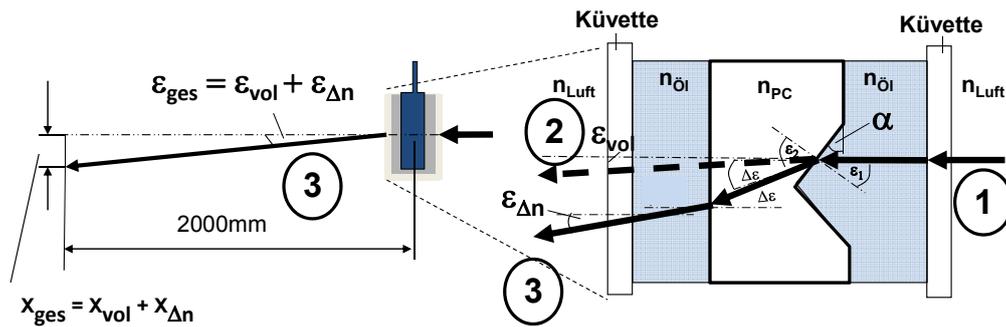


Bild 4.12 Schematische Darstellung der Lichtstrahlablenkung ohne Küvetten/Luft-Einfluss

1-2: gleiche Brechzahlen von PC und Immersionsöl

1-3: nur unterschiedliche Brechzahlen zwischen PC und Immersionsöl

n : Brechzahl

ε_{vol} , X_{vol} : Brechungswinkel/Verschiebung durch anisotropes Volumen

$\varepsilon_{\Delta n}$, $X_{\Delta n}$: Brechungswinkel/Verschiebung durch unterschiedliche Brechzahlen

ε_{ges} , X_{ges} : gesamter Brechungswinkel/gesamte Verschiebung

Um den Einfluss des Einfallstellenflankenwinkels auf die gemessene Punkteverschiebung zu ermitteln, werden spezielle Prüfkörper aus extrudiertem Polycarbonat mit den Abmessungen 20 mm * 20 mm * 63 mm hergestellt. Diese Prüfkörper sind an einer Längsseite bis zur halben Höhe mit einer Schrägen versehen, deren Winkel zwischen 3° und 30° in jeweils 3°-Schritten variiert wird. In Vorversuchen wurde festgestellt, dass durch die mechanische Bearbeitung der Keile unscharfe Punktebilder und Verzerrungen auftreten, die wiederum durch eine Temperung eliminiert werden können. Deshalb werden alle Prüfkörper bei 125 °C, 6 Stunden zunächst wärmebehandelt und danach mit dem Prüfaufbau zur Messung der Punkteverschiebung nach Bild 4.3 mit dem Immersionsöl untersucht. Die gemessenen Punkteverschiebungen in horizontaler und vertikaler Richtung sind in Abhängigkeit vom Winkel der Schrägen in Bild 4.13 dargestellt. Da in horizontaler Richtung keine Schräge vorliegt, ist auch die gemessene horizontale Punkteverschiebung erwartungsgemäß fast null. Hingegen nimmt die vertikale Verschiebung bedingt durch die Schrägen mit zunehmendem Winkel fast linear zu.

Aus der Messung wird ersichtlich, dass für die Zwei- und Dreischichtprüfkörper (maximaler Einfallstellenwinkel < 3°), die zusätzlichen durch den Brechzahlunterschied vorliegenden Punkteabweichungen kleiner als 1 bis 2 Pixel sind, und sich somit im Bereich der Messgenauigkeit des Prüfaufbaus (Kap. 4.2.5) befinden. Allerdings wird für die Flankenwinkel der Einschichtprüfkörper, die bis zu 25° gemessen werden, ein signifikanter Einfluss des Brechzahlunterschiedes auf die Punkteverschiebung festgestellt. Aufgrund dieser Ergebnisse wird bei allen Einschichtprüfkörpern, unabhängig von dem tatsächlich vorliegenden Flankenwinkel der Einfallstellen, der Punktebereich der Einfallstellen aus den Messungen

herausgenommen, Bild 4.14. Hiermit wurden die Untersuchungen für den Einschichtprüfkörper in Kap. 5.2.1 durchgeführt.

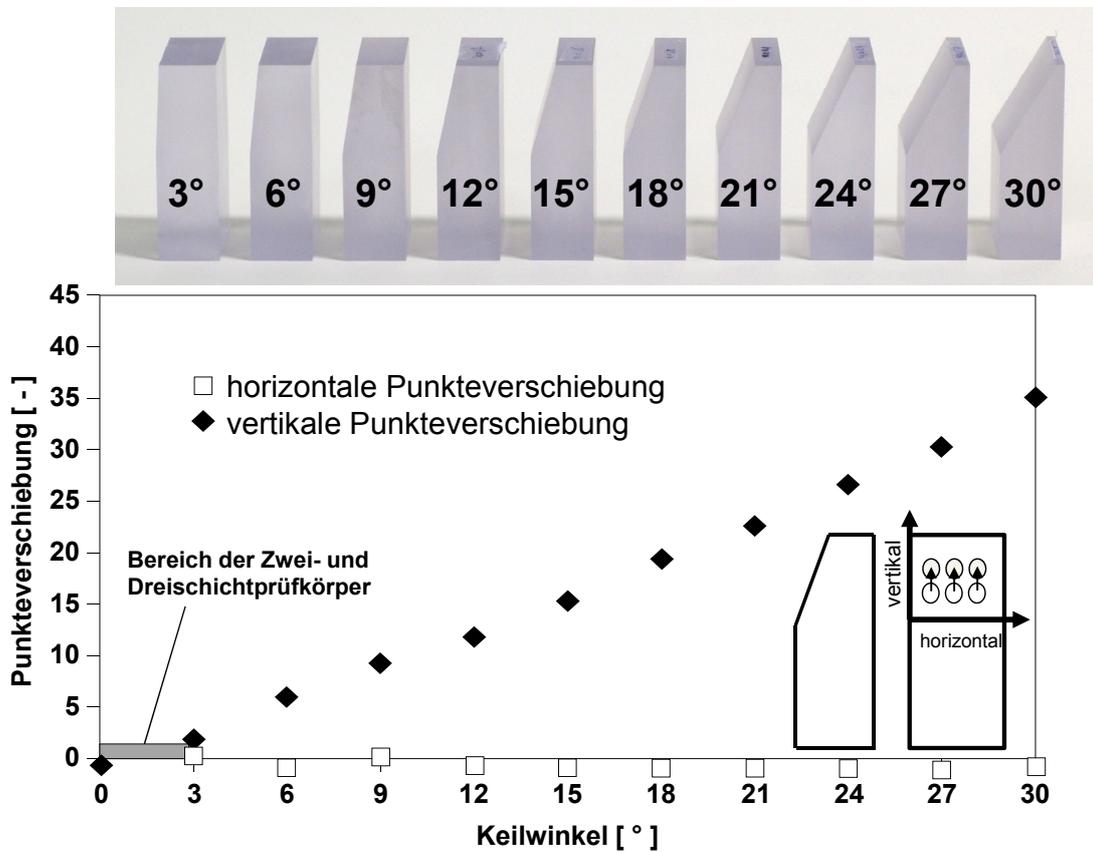


Bild 4.13 Punkteverschiebung als Funktion des Keilprüfkörperwinkels durch Brechzahldifferenz zwischen PC und Immersionsöl

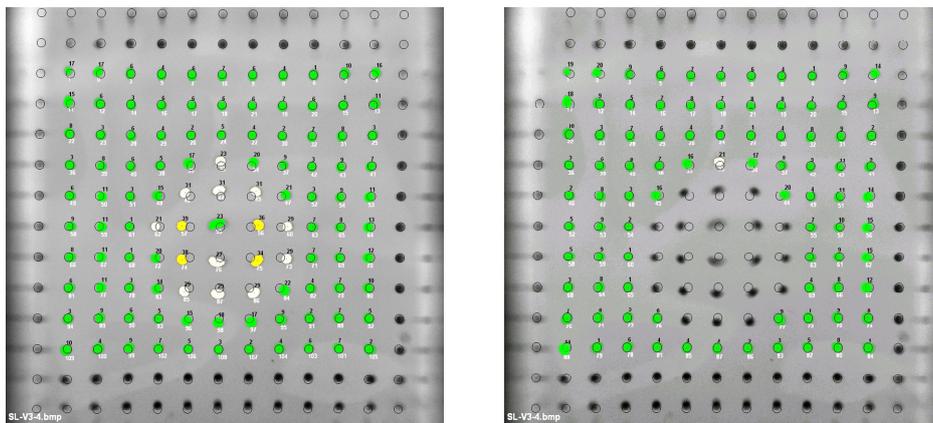


Bild 4.14 Gemessene Punkteverschiebungen an einem Einschichtprüfkörper mit einem Einfallstellenflankenwinkel von 25°
 links: vollständiger Messbereich
 rechts: ausgeblendeter Einfallstellenbereich

4.3 Transmission und Gelbwert (Yellowness Index)

Durch die Betrachtung der Lichttransmission und einer sichtbaren Vergilbung der Probekörper lassen sich Rückschlüsse auf eine Veränderung der Absorption bei den drei Prüfkörpern, wie sie z. B. durch den Abbau der Molekülketten durch den Einfluss einer langen Verweilzeit bei Schmelztemperatur entstehen kann.

Die Messung der Transmission an den Probekörpern wird mit dem Farbmessgerät der Fa. Hunter Ultra Scan Pro in Anlehnung an DIN EN ISO 13468-2 durchgeführt. Die anschließende Ermittlung der Normfarbwerte erfolgte nach ASTM 308 und die Berechnung des Yellowness Index nach ASTM 313.

Die Vorgehensweise wird im Nachfolgenden beschrieben:

Es wird zunächst der totale spektrale Transmissionsgrad $\tau(\lambda)$ aus dem Verhältnis des hindurchgelassenen Strahlungsflusses (gerichtet und diffus) zum auffallenden Strahlungsfluss für die Wellenlängen 380 bis 780 nm bestimmt. Hieraus wird dann der totale (Licht-)Transmissionsgrad τ_t nach DIN EN ISO 13468-2 bestimmt. Hierbei wird die verwendete Lichtart unter der Annahme eines bestimmten Beobachters (hier: Normalbeobachter mit 10°-Sichtfeld) und dem Helligkeitsempfinden des menschlichen Auges (hier CIE-Normlichtart D65-standard Taglicht) berücksichtigt [58, 110, 111].

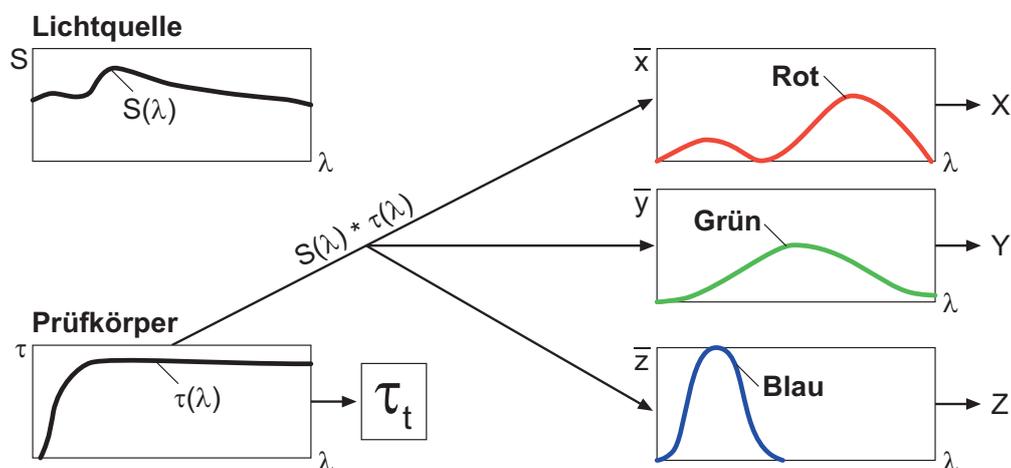


Bild 4.15 Prinzip zur Messung der spektralen Transmission und der Normfarbwerte X, Y, Z [58, 110, 111]

$S(\lambda)$:	Strahlungsintensität des Farbmessgerätes
$\tau(\lambda)$:	Wellenlängenabhängige Transmission
τ_t :	Transmissionsgrad
$\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$:	CIE Normspektralwertfunktionen
X, Y, Z:	Normfarbwerte für Rot, Grün und Blau

Aus den gemessenen Transmissionsgraden $\tau_1(\lambda)$ werden die Normfarbwerte X, Y und Z (Rot, Grün und Blau) ermittelt. $S(\lambda)$ repräsentiert die wellenlängenabhängige

Strahlungsintensität des Farbmessgerätes und $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ und $\bar{z}(\lambda)$ sind die experimentell ermittelten CIE Normspektralwertfunktionen. Bis auf die Transmission sind alle Werte durch Normung festgelegt und in den Farbmessgeräten für verschiedene Lichtarten und Beobachter gespeichert. Gemessen wird nur die Transmission [111].

Bei Kenntnis der Normfarbwerte X, Y, Z kann unter Verwendung der Gleichung 4.4 nach ASTM 308 der dimensionslose Yellowness-Index berechnet werden.

$$YI = 100 \cdot \frac{C_X \cdot X - C_Z \cdot Z}{Y} \quad 4.4$$

Hierbei sind C_X und C_Z Koeffizienten, die sowohl die Lichtquelle (hier D65) als auch den Beobachter (hier 10°) charakterisieren und können aus der Norm ASTM 318 entnommen werden.

Prüfung ohne Immersionsöl

Für die im Kap. 5.3 dargestellten Untersuchungsergebnisse der spektralen Eigenschaften Transmission und Yellowness-Index wird das Immersionsöl aus dem Versuchsaufbau zur Messung der Punkteverschiebung (Kap. 4.2.1) nicht verwendet. Der Grund ist zum einen der Eigen-Gelbwert des Öls und zum anderen die Gefahr der Staubkontamination des Öls während der Messung. Beides hätte die Interpretation der Messergebnisse erschwert. Es wird hierbei in Kauf genommen, dass durch geometrische Abweichungen (wie z. B. Einfallstellen) der Lichtein- und Lichtaustrittsflächen die Streuverluste bei der Messung so groß werden können, dass hierdurch die gemessenen Transmissionswerte reduziert werden. Dies kann besonders bei bestimmten Versuchseinstellungen der Einschichtlinsen durch eine vorhandene zu große Einfallstelle möglich sein. Diese Einstellungen wurden bei der Auswertung kenntlich gemacht.

Bei der Ermittlung des Yellowness-Index haben geometrisch bedingte Streuverluste einen weniger großen Einfluss, da er wie oben beschrieben, durch drei Messgrößen ermittelt wird:

$$YI = 100 \cdot \frac{\text{Rot} - \text{Blau}}{\text{Grün}} \quad 4.5$$

Man erkennt, dass hierbei eine Art Normierung der Differenz Rot-Blau auf die gemessene Helligkeit (= Grün) erfolgt. Dies bedeutet wiederum, dass in dieser Berechnung alle drei möglicherweise durch Oberflächendefekte verfälschten (verringerten) Messdaten der Normfarbwerte X, Y, Z eingehen. Durch das Beziehen auf die Helligkeit wird die ursprüngliche Relation (fast) wieder hergestellt. Auch diese Aussage hat natürlich Grenzen und grundsätzlich ist es so, dass jeder Streulicht erzeugende Probendefekt auch den Gelbwert beeinflussen kann.

4.4 Spannungsoptische Messungen

Zur weiteren Unterstützung der Ergebnisse aus der Punkteverschiebung (Kap 4.2.1) sollen vorhandene fertigungsbedingte Eigenspannungen, die durch Abkühlung und/oder Expansionseffekt nach der Entformung entstanden sind, sowie eingefrorene Orientierungen in den Prüfkörpern betrachtet werden. Hierzu wird der Doppelbrechungseffekt anhand von polarisationsoptischen Aufnahmen mit dem Messgerät SV 2000 von der Firma Strainoptic Technologies, Inc. (USA) untersucht. Das Messprinzip beruht darauf, dass eine einfallende polarisierte Lichtwelle (Schwingung nur in einer Ebene) sich unterschiedlich schnell in Stoffbereichen verschiedener Zustände ausbreitet. Es entstehen zwei Teilwellen, die den Körper mit unterschiedlichen Wellenlängen durchlaufen. Der austretende Lichtstrahl weist dadurch eine Phasenverschiebung auf, die als optischer Gangunterschied oder optische Retardation bezeichnet wird und ein Maß für die Doppelbrechung ist. Vorhandene Doppelbrechungen im Bauteil werden durch farbige und dunkle Linien, die sogenannten Isochromaten und Isoklinen durch Verdrehen des Analysators sichtbar gemacht. Die Isoklinen geben die Orientierungsrichtung und die Isochromaten den Orientierungsgrad, d. h. Aussage über die Anisotropie innerhalb des Formteils an [65, 113, 114]. Durch die Verwendung von $\lambda/4$ -Platten im Prüfaufbau wurden die Isoklinen ausgeschaltet, so dass nur die Isochromatenverläufe ausgewertet werden können [31]. Die Verteilung und die Anzahl von Isochromaten geben einen qualitativen Aufschluss über die im Bauteil vorhandenen Spannungen und Orientierungen.

Für die polarisationsoptische Untersuchung werden aus den Prüfkörpern Scheiben von 2 mm Dicke herausgeschnitten, eben geschliffen und polarisationsoptisch analysiert, Bild 4.16.

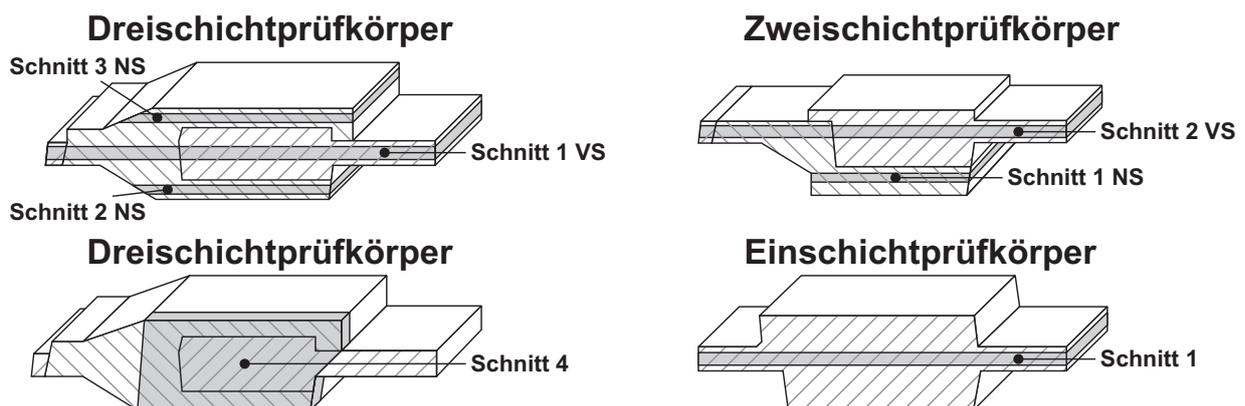


Bild 4.16 Positionen der Schnitte zur polarisationsoptischen Untersuchung
Schnitthöhe $s = 2 \text{ mm}$ VS: Vorspritzling NS: Nachspritzling

Es werden Schnitte in Quer- und in Dickenrichtung aus den Prüfkörpern entnommen. Die Schnitte 4 in Dickenrichtung ermöglichen die Betrachtung des Isochromatenver-

laufs über der Formteildicke. Die Querschnitte 1, 2, 3 ermöglichen die Untersuchung in bestimmten Dickenschichten in den jeweiligen Vor- und Nachspritzlingen.

Die Auswertungen erfolgen rein qualitativ. Sehr enge Isochromatenscharen deuten hierbei auf große, örtliche Hauptspannungsdifferenzen hin. Als homogen wird eine Isochromatenverteilung angesehen, die einen breiten Verlauf jeder vorkommenden Interferenzfarbe enthält. Weniger Farbverläufe sind hierbei vorteilhaft.

4.5 Simulation des Abkühlverhaltens

Die Simulation der Abkühlverläufe soll Aufschluss über die Temperatenausgleichsvorgänge zwischen Vor- und Nachspritzling der Mehrschichtprüfkörper und der Temperaturverteilungen bei Entformung aller Prüfkörper geben. Hierzu werden an den in Bild 4.17 für den Dreischichtprüfkörper gezeigten Querschnittspositionen 1 (durch Vor- und Nachspritzling) und 2 (nur im Vorspritzling) die Temperaturprofile über der Kühlzeit berechnet. Analog gelten diese Positionen auch für den Zweischichtprüfkörper bzw. für den Einschichtprüfkörper die Position 2. Die Berechnungen werden mit der Finite-Elemente-Software – Abaqus/Standard – der Firma Dassault Systèmes Simulia Corp., USA, durchgeführt. Die gewählten Randbedingungen zeigt Tabelle 4.2.

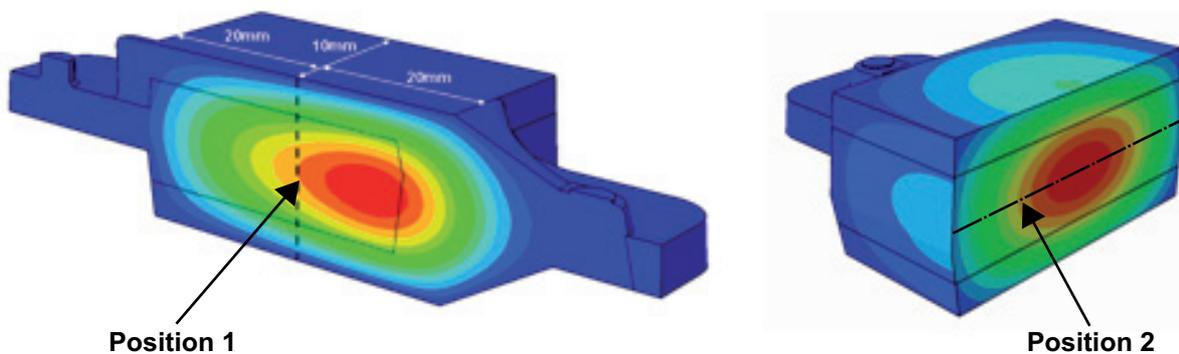


Bild 4.17 Positionen der berechneten Temperaturprofile
Position 1: Berechnung der Temperaturverteilung zwischen Vor- und Nachspritzling
Position 2: Berechnung der Temperaturverteilung nur im Vorspritzling und im Einschichtprüfkörper

Die Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität werden als Funktion der Temperatur berücksichtigt, Bilder 3.1. c. Die Dichte wird mit $\rho = 1,2 \text{ g/cm}^3$ als konstant angenommen. Der Wärmeübergangskoeffizient α wird nach [93, 115] festgelegt und berücksichtigt durch seine Höhe den unterschiedlichen Wärmeübergang vom Thermo- plast zur Werkzeugwand in den verschiedenen Phasen des Spritzgießzyklus.

Nachdruckphase		Restkühlphase	
Einschichtprüfkörper			
t = 60 s, $\alpha = 2000 \text{ W/m}^2\text{K}$ Massestarttemp. 280 °C; Formnesttemp. 115 °C / 125 °C		t = 330 s bzw. 668 s, $\alpha = 1000 \text{ W/m}^2\text{K}$ Formnesttemperatur 115 °C / 125 °C,	
Zweischichtprüfkörper			
Vorspritzling			
t = 45 s, $\alpha = 2000 \text{ W/m}^2\text{K}$ Massestarttemp. 280 °C; Formnesttemp. 110 °C / 120 °C		t = 195 s bzw. 365 s, $\alpha = 1000 \text{ W/m}^2\text{K}$ Formnesttemperatur 110 °C / 120 °C	
Nachspritzling			
t = 45 s Massestarttemp. 280 °C; Formnesttemp. 120 °C α : NS zur Formnestwand: 2000 W/m ² K α : VS zur Formnestwand: 500 W/m ² K α : VS zum NS: Wärmeleitung		t = 195 s bzw. 365 s Formnesttemperatur 120 °C α : NS zur Formnestwand: 1000 W/m ² K α : VS zur Formnestwand: 500 W/m ² K α : VS zum NS: Wärmeleitung	
Dreischichtprüfkörper			
Vorspritzling			
t = 45 s, $\alpha = 2000 \text{ W/m}^2\text{K}$ Massestarttemp. 280 °C, Formnesttemp. 70 °C / 120 °C		t = 110 s, $\alpha = 1000 \text{ W/m}^2\text{K}$ Formnesttemperatur 70 ° / 120 °C	
Nachspritzling			
t = 45 s Massestarttemp. VS: 280 °C, Formnesttemp. 120 °C α : NS zur Formnestwand: 2000 W/m ² K α : VS zur Formnestwand: 500 W/m ² K VS zum NS: Wärmeleitung		t = 85 s bzw. 375 s Formnesttemperatur 120 °C α : NS zur Formnestwand: 1000 W/m ² K α : VS zur Formnestwand: 500 W/m ² K VS zum NS: Wärmeleitung	

Tabelle 4.2 Verwendete Parameter für die Abkühlberechnungen

t: Zeit; α : Wärmeübergangskoeffizient; VS: Vorspritzling; NS: Nachspritzling

4.6 Wärmelagerung

Die Untersuchung des Einflusses von fertigungsbedingten Spannungen auf Geometrie und Punkteverschiebungen soll durch die Wärmelagerung unterstützt werden. Hierdurch können wichtige Erkenntnisse für eine Empfehlung der Integration eines Temperschrittes in eine Produktion von dickwandigen Beleuchtungsoptiken gemacht werden. Unter Wärmelagerung oder Tempern versteht man die Wärmebehandlung eines Werkstoffs, um gezielte Eigenschaften zu erhalten. Bei Kunststoffen geschieht

dies durch Wärmelagern, um bessere Wärmebeständigkeit zu erzielen, innere Spannungen abzubauen und eine Nachschwindung vorwegzunehmen. Bei Kunststoffen nimmt die hierzu notwendige Beweglichkeit der Molekülketten mit zunehmender Temperatur zu. Allerdings ist hierbei zu berücksichtigen, dass im Bereich der Glasübergangstemperatur die Formbeständigkeit stark abnimmt. Bei dem hier betrachteten Polycarbonat liegt ein steiler Abfall in der Schubmodulkurve bei ca. 140 °C vor, Bild 3.1. a. Zur Ermittlung einer aussagefähigen Wärmelagerungstemperatur und Wärmelagerungszeit werden Vorversuche durchgeführt. Hieraus wird festgestellt, bei welcher Kombination aus Temperatur und Zeit sich eine messbare Änderung der Qualitätszahl der Punkteverschiebung ergibt.

- Voruntersuchungen zur Ermittlung des Einflusses verschiedener Wärmelagerungstemperaturen und -zeiten
 - Temperaturen von 120 °C und 125 °C
 - Zeiten bei 3 h, 4 h, 6 h und 9 h.
- Hauptuntersuchung bei 125 °C und 5 h

Der Wärmelagerungs-ofen wird zunächst auf die Zieltemperatur erhitzt. Die Teile werden in den Ofen auf die Gitterroste abgelegt und zwar so, dass sie nicht auf der optischen Fläche liegen. Nach Ablauf der jeweiligen Zeit werden die Teile entnommen und 24 h abgekühlt. Danach werden sie taktil und in Bezug auf die Punkteverschiebung neu vermessen.

5 Untersuchungsergebnisse

Zunächst werden die durchgeführten Prozessanalysen für die Ein-, Zwei- und Dreischichtprüfkörper dargestellt. In danach folgenden Kapiteln werden weitere Prüfergebnisse wie die der Wanddickenausbildung, der Wärmelagerung und der polarisationsoptischen Untersuchungen vorgestellt. Die Untersuchungen haben das Ziel, Unterschiede zwischen den Geometrien näher zu erforschen und erste Hinweise auf vorhandene unterschiedliche Herstellstrategien zu geben.

5.1 Prozessanalyse zur Untersuchung des geometrischen Qualitätsmerkmals

Um den Einfluss der Verarbeitungsparameter auf die geometrische Form der drei Prüfkörpergeometrien zu untersuchen, werden die in Kap. 3.4.2 beschriebenen vollfaktoriellen Versuchspläne durchgeführt und in einer Varianzanalyse ausgewertet. Zielgröße ist die in Kap. 4.1 beschriebene maximale Dickenabweichung. Hierbei werden alle Haupteffekte auf die maximale Dickenabweichung gezeigt. Signifikante Zweifach-Wechselwirkungen sind immer nur dann einbezogen, wenn sie für die Ergebnisinterpretation genutzt werden können.

5.1.1 Einschichtprüfkörper

Das Bild 5.1 zeigt den Einfluss der signifikanten Haupteffekte des Nachdruckes, der Kühlzeit und der Formnesttemperatur auf die maximale Dickenabweichung.

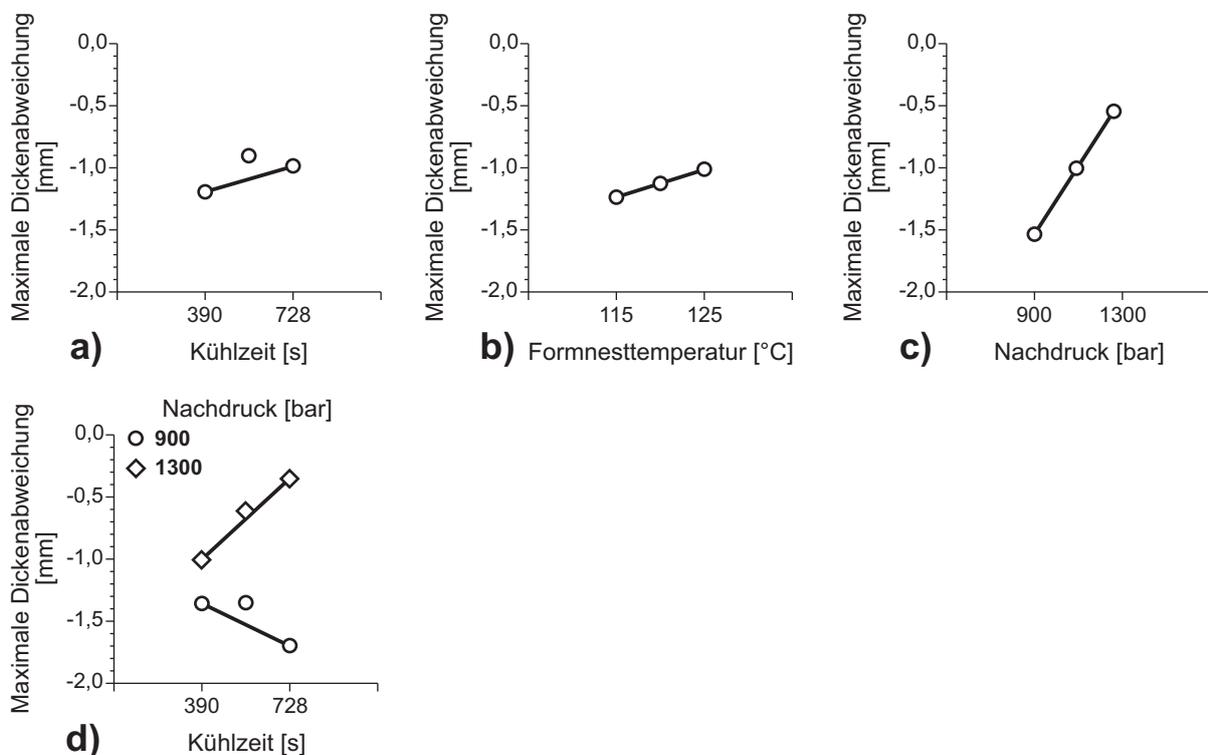


Bild 5.1 Haupteffekte / Wechselwirkung auf die maximale Dickenabweichung
Einschichtprüfkörper – vollfaktorieller Versuchsplan 2^3

Die grafische Darstellung der Einstellgrößen zeigt, dass der Nachdruck den stärksten Einfluss auf das Qualitätsmerkmal „maximale Dickenabweichung“ hat. Durch eine Erhöhung des Nachdruckes wird die thermische Schwindung des Kunststoffes reduziert und die Werkzeugoberfläche besser abgeformt. Die Effekte der Kühlzeit und der Formnesttemperatur sind in den Teilbildern 5.1 a und b gezeigt. Sie haben beide einen ähnlich großen Effekt. Die Zweifach-Wechselwirkung zwischen Kühlzeit und Nachdruck zeigt, dass bei langer Kühlzeit ein niedriger Nachdruck zu einer schlechteren Abformung führt, Bild 5.1 d. Die höhere thermische Schwindung und die damit größere Formabweichung bei niedrigem Druck verstärken sich bei längeren Kühlzeiten. Bei hohem Nachdruck ist der Effekt genau umgekehrt. Ein hoher Nachdruck in Verbindung mit hoher Kühlzeit bringt die besten Abformergebnisse.

Wie die Ergebnisse zeigen, und auch aus der Literatur [71, 72] bekannt ist, dominiert der Einfluss des Nachdrucks bei Einschichtlinsen die anderen beiden Einstellgrößen. Zur Überprüfung der Stärke der Einzeleffekte von Formnesttemperatur und Kühlzeit wurde deshalb eine reduzierte Versuchsauswertung 2^2 bei konstantem Nachdruck von 1300 bar durchgeführt, Bild 5.2. Beide Parameter haben wieder einen signifikanten Einfluss, wobei der der Kühlzeit stärker ist. Dies wird in dieser Form bereits bei [71, 72] berichtet und kann deshalb als eine Bestätigung dieses Messverfahrens und dieser Varianzanalyse gewertet werden. Der Effekteinfluss der Formnesttemperatur bleibt in derselben Größenordnung wie bei dem erweiterten Versuchsplan. Auch hier werden die bekannten Gründe bestätigt, dass eine hohe Formnesttemperatur eine verbesserte und längere Druckübertragung in der Nachdruckphase und damit eine bessere Abformung der Werkzeugoberfläche ermöglicht. Durch eine längere Kühlzeit kühlt der Prüfkörper länger unter Formzwang ab, was zu einer verbesserten Abformung der Werkzeugoberfläche führt.

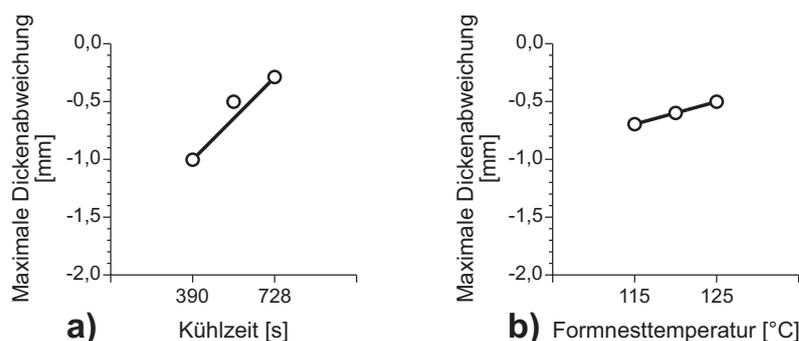


Bild 5.2 Haupteffekte der Kühlzeit und Formnesttemperatur
Einschichtprüfkörper – Reduzierter 2^2 -Versuchsplan

5.1.2 Zweischichtprüfkörper

Der Herstellungsablauf der Prüfkörper ist in Bild 3.6 beschrieben. Vor- und Nachspritzling sind dabei in den Wanddicken so ausgelegt, dass sie in derselben Kühlzeit hergestellt werden. In Bild 5.3 sind die signifikanten Haupteffekte auf die maximale Dickenabweichung für den Zweischichtprüfkörper dargestellt. Die Dickenabweich-

ungen sind geringer als bei den Einschichtprüfkörpern. Auffallend ist der negative Effekt einer längeren Kühlzeit, Bild 5.3 a. Längere Kühlzeiten erzeugen größere Dickenabweichungen. Dies wird bei den Einschichtlinsen nicht festgestellt. Die Formnesttemperatur (jeweils gleich bei Vor- und Nachspritzling), der Nachdruck des Vorspritzlings und Nachdruck des Nachspritzlings erzeugen bei jeweils höheren Einstellwerten geringere Dickenabweichungen. Hierbei ist der Effekt der Formnesttemperatur stärker als der der Nachdrücke von Vor- und Nachspritzling. Der bei den Einschichtprüfkörpern beobachtete sehr dominante Einfluss des Nachdruckes (Bild 5.1) wird bei den Zweischichtprüfkörpern nicht festgestellt.

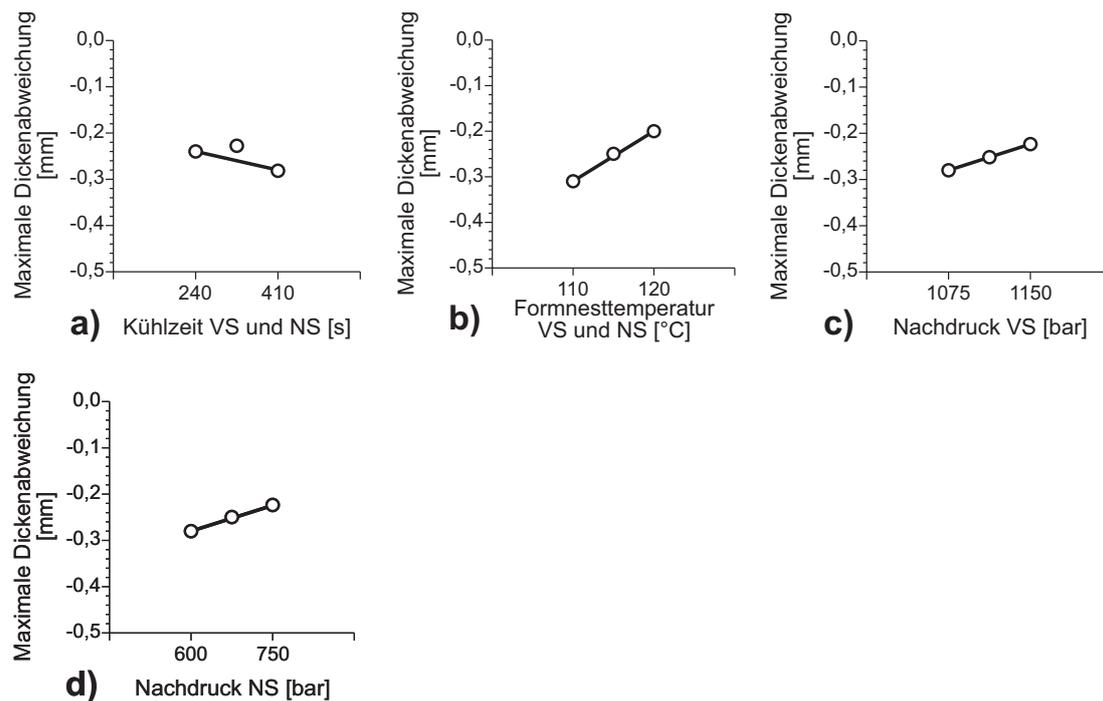


Bild 5.3 Effekte der Prozessparameter auf die maximale Dickenabweichung
Zweischichtprüfkörper – vollfaktorieller Versuchsplan 2^4

Der negative Effekt einer längeren Kühlzeit auf die Formabweichung lässt sich durch die Zweifach-Wechselwirkungen auf die Kühlzeit untersuchen. Bei der Betrachtung der Wechselwirkungen der Kühlzeit mit der Formnesttemperatur (Bild 5.4 a) fällt auf, dass der Einfluss der Formnesttemperatur bei niedrigen Einstellungen (110 °C) einen hohen negativen Effekt erzeugt. Offenbar bewirkt eine längere Abkühlung unter Formzwang bei kälteren Formnesttemperaturen größere Formabweichungen. Die Kombination der Kühlzeit mit dem Nachdruck Vorspritzling zeigt Bild 5.4 b. Hier entstehen durch geringere Nachdrücke bei längerem Abkühlen unter Formzwang schlechtere Oberflächen. Beide Effekte aus den Bildern 5.4 a und b ergeben den in Bild 5.3 a dargestellten negativen Effekt einer längeren Kühlzeit auf die maximale Formabweichung. Der aus den Ergebnissen der Einschichtprüfkörper zu erwartende positive Effekt einer langen Kühlzeit (Bild 5.2 a) tritt bei den Zweischichtprüfkörpern nur bei hohen Einstellwerten von Temperatur und Druck auf.

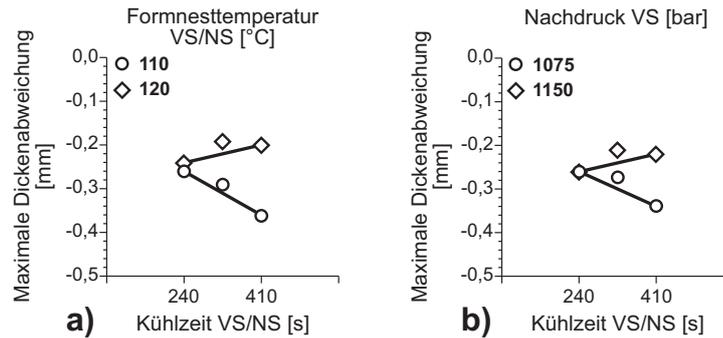


Bild 5.4 Zweifach-Wechselwirkungen der Kühlzeit
Zweischichtprüfkörper – vollfaktorieller Versuchsplan 2⁴

5.1.3 Dreischichtprüfkörper

Der Herstellungsablauf der Prüfkörper ist in Bild 3.7 beschrieben. Bild 5.5 zeigt die Effekte der Einstellparameter des vollfaktoriellen Versuchsplans 2⁵ auf die maximale Dickenabweichung. Insgesamt sind die gemessenen Formabweichungen auch bei den Dreischichtprüfkörpern viel geringer als bei den Einschichtprüfkörpern und liegen in vergleichbarer Größenordnung wie die der Zweischichtprüfkörper. Die Effekte der Einstellparameter des Nachdruckes im Nachspritzling und der Formnesttemperatur des Nachspritzlings sind nicht signifikant (Bild 5.5 c und e). Dies sind zwei unerwartete Ergebnisse.

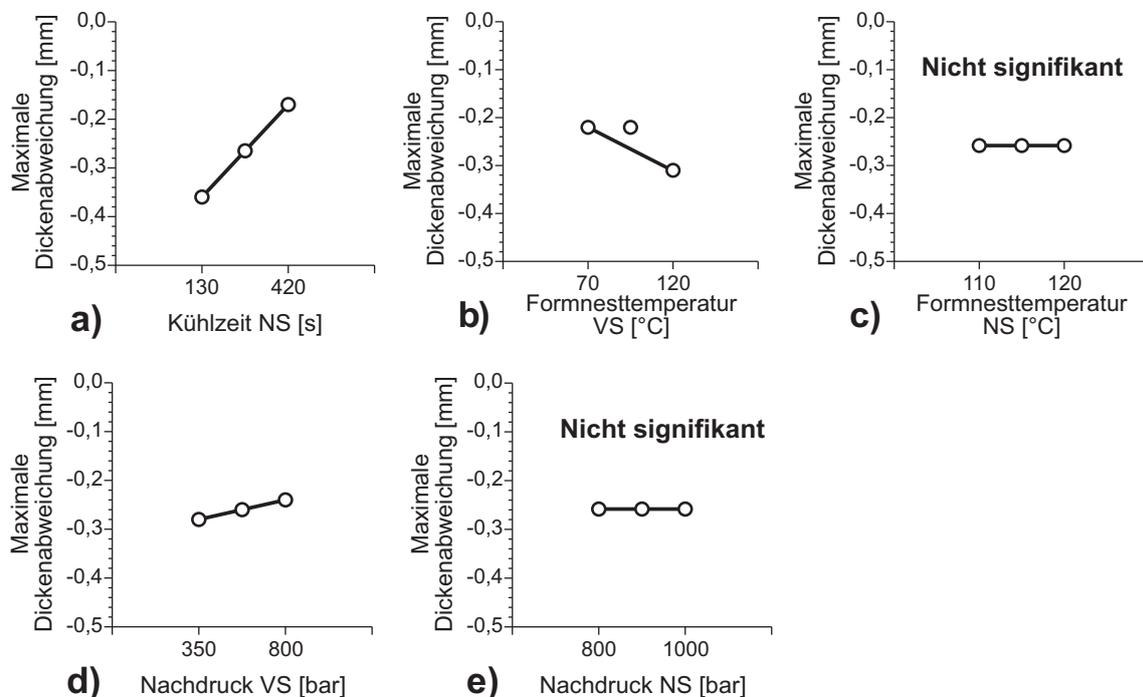


Bild 5.5 Effekte der Prozessparameter auf die maximale Dickenabweichung
Dreischichtprüfkörper – vollfaktorieller Versuchsplan 2⁵

Der Effekt der Kühlzeit des Nachspritzlings auf die Dickenabweichung ist stark signifikant (Bild 5.5 a) und erzeugt bei höheren Einstellungen bessere Oberflächenabformungen. Eine Abkühlung unter Formzwang erzeugt hiernach wie bei den Einschichtlinsen (Bild 5.2. a) bessere Oberflächenabformungen.

Der Einfluss der Formnesttemperatur des Vorspritzlings auf die Dickenabweichung ist in Bild 5.5 b gezeigt. Bei höheren Einstellungen werden schlechtere Werte erreicht. Eine höhere Verdichtung des Vorspritzlings (Bild 5.5 d) führt zu besseren Abformungen im Gesamtverbund.

Der Effekt der Formnesttemperatur des Vorspritzlings weicht von dem erwarteten Verlauf ab. Interessant sind in diesem Zusammenhang die Zweifach-Wechselwirkungen der Formnesttemperatur mit anderen Prozessparametern. Bild 5.6 zeigt hierzu die signifikante Zweifach-Wechselwirkung der Formnesttemperatur des Vorspritzlings mit der Kühlzeit des Nachspritzlings. Bei der langen Kühlzeit ist der Effekt der Formnesttemperatur des Vorspritzlings reduziert, zeigt aber bei hoher Formnesttemperatur geringere Dickenabweichungen. Ein starker negativer Effekt hingegen ergibt sich bei kurzen Kühlzeiten. Hier stellen sich bei hohen Formnesttemperaturen im Vorspritzling größere Wanddickenabweichungen ein.

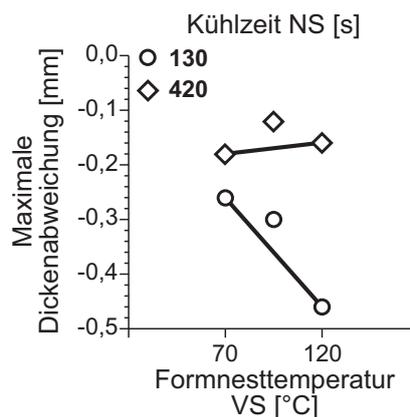


Bild 5.6 Signifikante Zweifach-Wechselwirkung auf die maximale Dickenabweichung
Dreischichtprüfkörper – vollfaktorieller Versuchsplan 2⁵

Zur Überprüfung des nichtsignifikanten Effekts des Nachdrucks im Nachspritzling auf die Gesamtdickenabweichung wurde bei den Versuchsreihen VD4 und VD5 die beiden Einstellungen des Nachdruckes im Nachspritzling durch drei weitere Einstellungen (700 bar, 500 bar und 300 bar) ergänzt. Hierdurch soll festgestellt werden, bei welchem Einstellwert des Nachdruckes im Nachspritzlings ein Effekt auf die Gesamtwanddickenabweichung festgestellt wird. Bild 5.7 zeigt die gemessene Wanddickenabweichung.

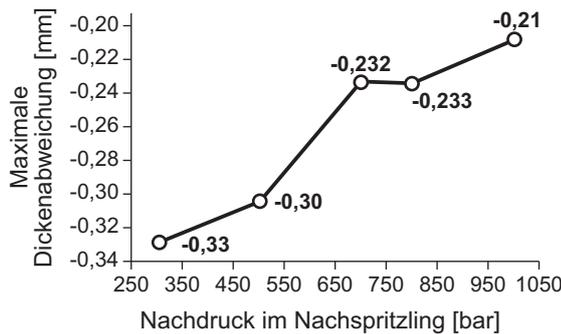


Bild 5.7 Einfluss des Druckes im Nachspritzling mit Einstellungen außerhalb der Varianzanalyse
Dreischichtprüfkörper – Versuchseinstellungen VD 4 und VD 5

Es ist ersichtlich, dass bei der vorliegenden Einstellung (800-1000 bar) der Nachdruck NS nur einen kleinen Effekt von 0,023 mm hat. Bis 700 bar ist kein Effekt mehr feststellbar. Bei kleineren Nachdrücken NS steigt die Höhe des Effektes dann wieder an (0,1 mm – Differenz zwischen 700 bar und 300 bar). Dieser Versuch bestätigt den geringen Effekt von dem Nachdruck NS in dem gewählten Einstellbereich.

5.2 Prozessanalyse zur Untersuchung des werkstofflichen Qualitätsmerkmals

Der Einfluss der Verarbeitungsparameter auf die optisch relevanten Eigenschaften wird durch den in Kap 4.2 beschriebenen Prüfaufbau zur Messung einer Punkteverschiebung untersucht. Hierzu werden die in Kap 3.4.2 beschriebenen vollfaktoriellen Versuchspläne benutzt. Die Ergebnisse werden im Nachfolgenden vorgestellt.

5.2.1 Einschichtprüfkörper

Bild 5.8 zeigt die signifikanten Haupteffekte und eine signifikante Zweifach-Wechselwirkung der betrachteten Prozessparameter auf die Qualitätszahl der Punkteabweichungen für die Einschichtprüfkörper. Bei der Kühlzeit ist der Einfluss besonders stark. Lange Kühlzeiten erzeugen weniger starke Punkteabweichungen und damit geringere (bessere) Qualitätszahlen. Dieselbe Wirkung hat auch die Formnesttemperatur (Bild 5.8 b). Ihr Einfluss ist aber weniger stark ausgeprägt. Durch längere Abkühlung im Werkzeug (längere Kühlzeiten) und höhere Formnesttemperaturen werden Spannungen im Formteil reduziert und damit bessere optische Eigenschaften erzielt.

Der Haupteffekt des Nachdruckes ist in Bild 5.8 c dargestellt. Höhere Nachdruckwerte erzeugen schlechtere Qualitätszahlen und damit schlechte Punkteabweich-

ungen. Bei Einschichtlinsen erzeugen höhere Nachdrücke in der abkühlenden Kunststoffschmelze höhere Spannungen und damit die zu erwartenden schlechteren inneren Eigenschaften, dies wird durch den verwendeten Prüfaufbau bestätigt. Die drei Haupteffekte bestätigen den Stand der Technik.

Die statistisch signifikante Zweifach-Wechselwirkung zwischen dem Nachdruck und der Kühlzeit ist in Bild 5.8 d gezeigt. Der Effekt des Nachdruckes wird bei langen Kühlzeiten sehr stark reduziert. Hingegen wird der Einfluss bei kurzen Kühlzeiten verstärkt. Hieraus wird nochmals der starke positive Einfluss einer langen Kühlzeit bei den Einschichtlinsen erkennbar. Kurze Einstellungen der Kühlzeit können die durch den Nachdruck eingebrachten Spannungen dagegen nicht ausgleichen.

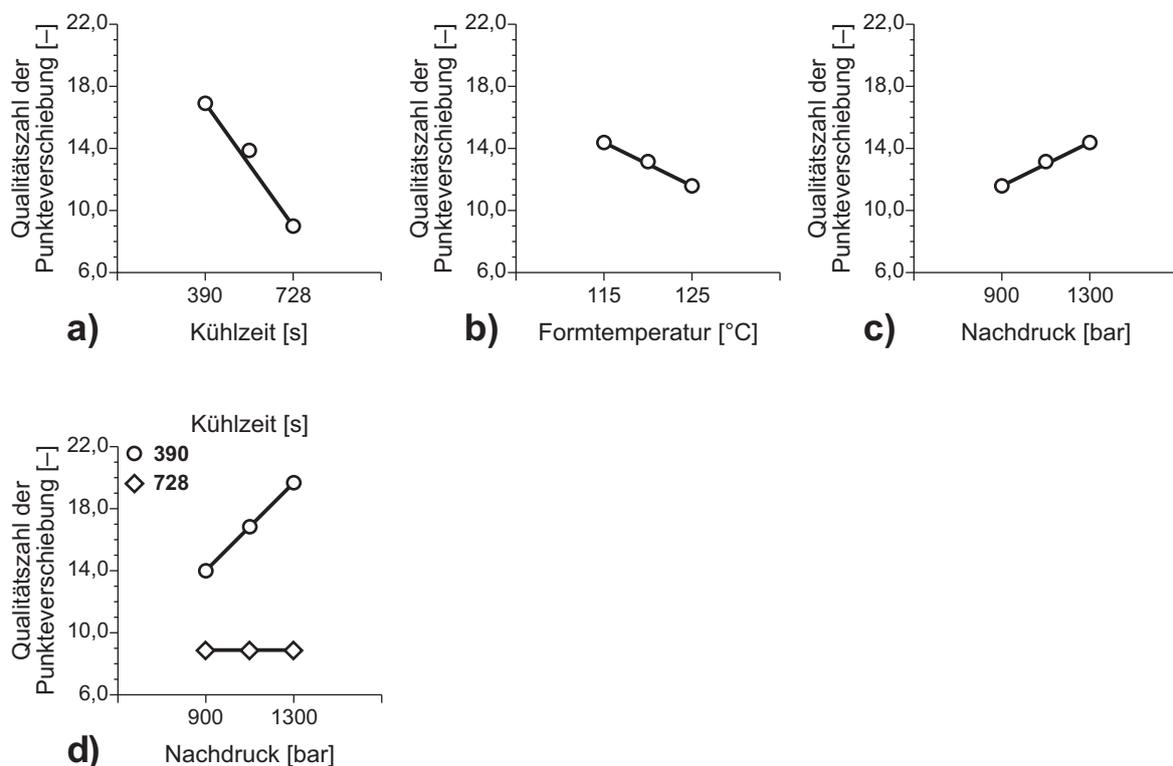


Bild 5.8 Effekte der Prozessparameter auf die Qualitätszahl
Einschichtprüfkörper – vollfaktorierter Versuchsplan 2^3

5.2.2 Zweischichtprüfkörper

Bild 5.9 zeigt die signifikanten Haupteffekte der variierten Prozessparameter auf die Qualitätszahl QP. Der Haupteffekt der Kühlzeit ist stark signifikant. Eine Erhöhung der Kühlzeit, und damit eine längere Abkühlung unter Formzwang, hat eine Verbesserung der hier betrachteten werkstofflichen Eigenschaften zur Folge. Dieselbe Tendenz, jedoch weniger stark ausgeprägt, hat die Formnesttemperatur. Obwohl der hier betrachtete Temperaturbereich (verfahrens- und werkzeugtechnische Gründe vgl. Kap. 3.4.1) mit $\Delta\vartheta = 10\text{ °C}$ nicht sehr groß gewählt werden konnte, ist der beobachtete Effekt signifikant.

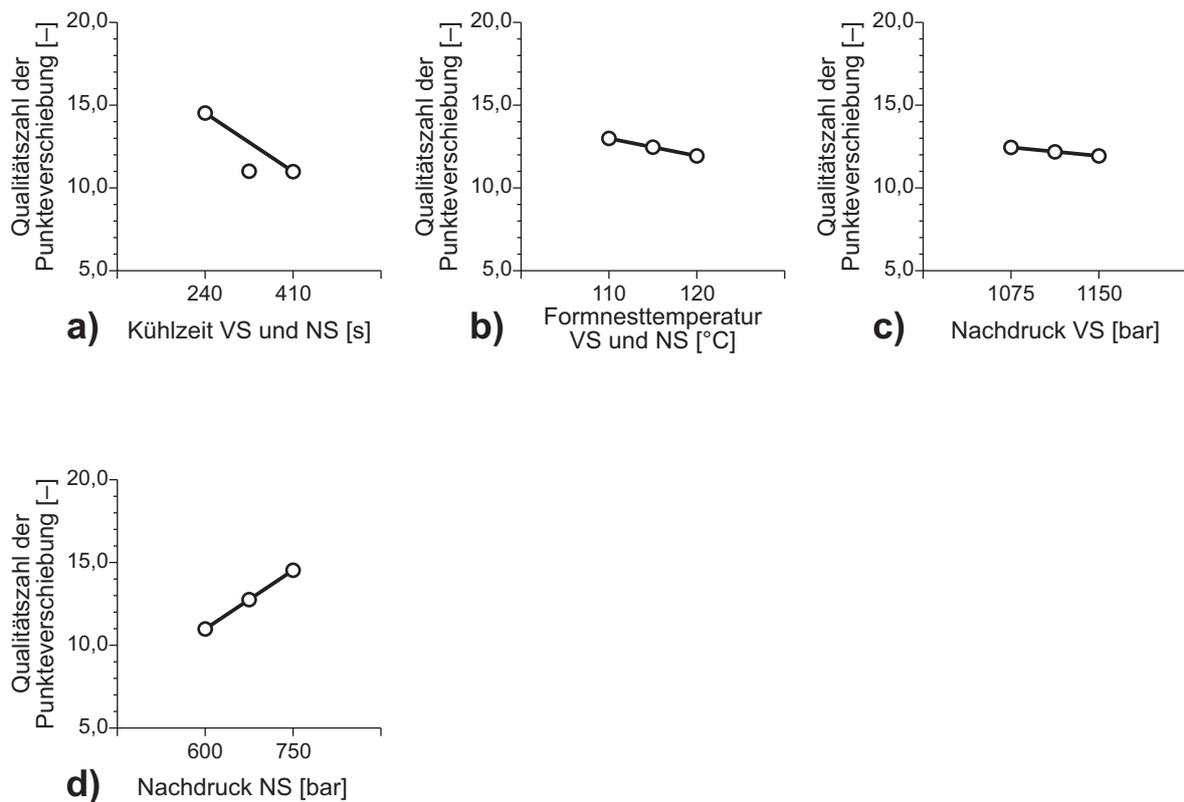


Bild 5.9 Effekte der Prozessparameter auf die Qualitätszahl
Zweischichtprüfkörper – vollfaktorieller Versuchsplan 2^4

Interessant sind die ermittelten Effekte der beiden Nachdrücke. Der Nachdruck des Vorspritzlings wirkt sich durch eine Erhöhung positiv auf die Qualitätszahl aus. Hierzu zeigt die Zweifach-Wechselwirkung mit dem Nachdruck im Nachspritzling (Bild 5.10 a), dass die geringsten Punkteverschiebungen bei hoher Einstellung des Nachdrucks VS und bei niedriger Einstellung des Nachdrucks NS entstehen. Bei hoher Einstellung des Nachdrucks NS verschwindet der Einfluss des Nachdrucks VS. Dieses Verhalten scheint durch folgende Beobachtung während der Versuchsdurchführungen erklärbar: Bei niedrigen Nachdrücken entstehen im Vorspritzling größere Einfallstellen auf der Auswerferseite. Diese werden dann durch den Nachdruck NS teilweise weggedrückt und erzeugen durch Kaltverschiebungen/-verformungen stärkere innere Spannungen, die zu der beobachteten Verschlechterung der Qualitätszahl führen. Bild 5.10 a zeigt aber auch nochmal den positiven Einfluss eines niedrigen Nachdruck NS auf die Qualitätszahl und damit auf die inneren Eigenschaften.

Der Effekt des Nachdruckes des Nachspritzlings auf die Qualitätszahl zeigt einen negativen Einfluss bei höheren Einstellwerten, Bild 5.9 d. Dies deutet darauf hin, dass durch den Nachdruck des Nachspritzlings, ähnlich der Wirkung des Nachdrucks bei den Einschichtprüfkörpern, höhere Spannungen im Gesamtverbund erzeugt werden. In Bild 5.10 b ist der Einfluss der Kühlzeit auf den Effekt der Formnesttemperatur dargestellt. Bei niedrigen Formnesttemperaturen hat die Kühlzeit

keinen Einfluss. Hier scheint die niedrige Formnesttemperatur (110 °C) die betrachteten inneren Eigenschaften zu dominieren. Bei hohem Einstellwert der Formnesttemperatur (120 °C) wirkt sich die kurze Kühlzeit negativ und eine lange Kühlzeit positiv aus. Wichtig für die inneren optischen Eigenschaften ist somit eine lange Kühlzeit bei hoher Formnesttemperatur bei den Zweischichtprüfkörpern. Dies ist ein Ergebnis, das den Erfahrungen aus den Einschichtlinsen entspricht.

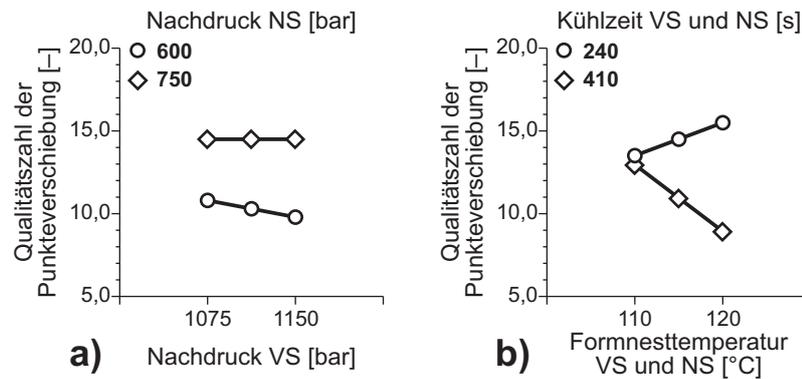


Bild 5.10 Zweifach-Wechselwirkungen auf die Qualitätszahl Zweischichtprüfkörper – vollfaktorieller Versuchsplan 2^4

5.2.3 Dreischichtprüfkörper

Bei den Dreischichtprüfkörpern haben alle fünf Einstellgrößen einen signifikanten Effekt auf die Qualitätszahl QP (Bild 5.11). Generell lässt sich feststellen, dass die erreichbaren Werte für QP alle auf einem höheren Niveau als bei den Einschicht- und Zweischichtprüfkörpern liegen. Dies deutet darauf hin, dass die inneren optisch relevanten Eigenschaften in dem Dreischichtsystem stärker durch den Herstellprozess beeinflusst werden.

Die Kühlzeit des Gesamtverbundes (Bild 5.11 a) zeigt bei höherer Einstellung einen negativen Effekt auf QP. Dies wird bei den Ein- und Zweischichtprüfkörpern nicht festgestellt. Hier hat bei beiden die Kühlzeit einen positiven Effekt auf die Qualitätszahl und damit auf die werkstofflichen Eigenschaften.

Die Formnesttemperatur des Vorspritzlings (Bild 5.11 b) zeigt ebenfalls bei höherer Einstellung einen negativen Effekt. Hingegen verbessert die Formnesttemperatur des Nachspritzlings (Gesamtverbundes) bei hohen Einstellwerten die Qualitätszahl stark (Bild 5.11 c).

Die Effekte der Nachdrücke von Vor- und Nachspritzling verhalten sich umgekehrt zueinander, Bilder 5.11 d und e. Durch eine Erhöhung des Nachdruckes im Vorspritzling werden bessere Qualitätszahlen erzeugt, hingegen ergibt eine Erhöhung des Nachdruckes im Nachspritzling schlechtere Werte. Der Nachdruck im Nachspritzling erzeugt also durch erhöhte Kompression mehr Spannungen im Gesamtverbund – vergleichbar dem Effekt bei den Ein- und Zweischichtprüfkörpern.

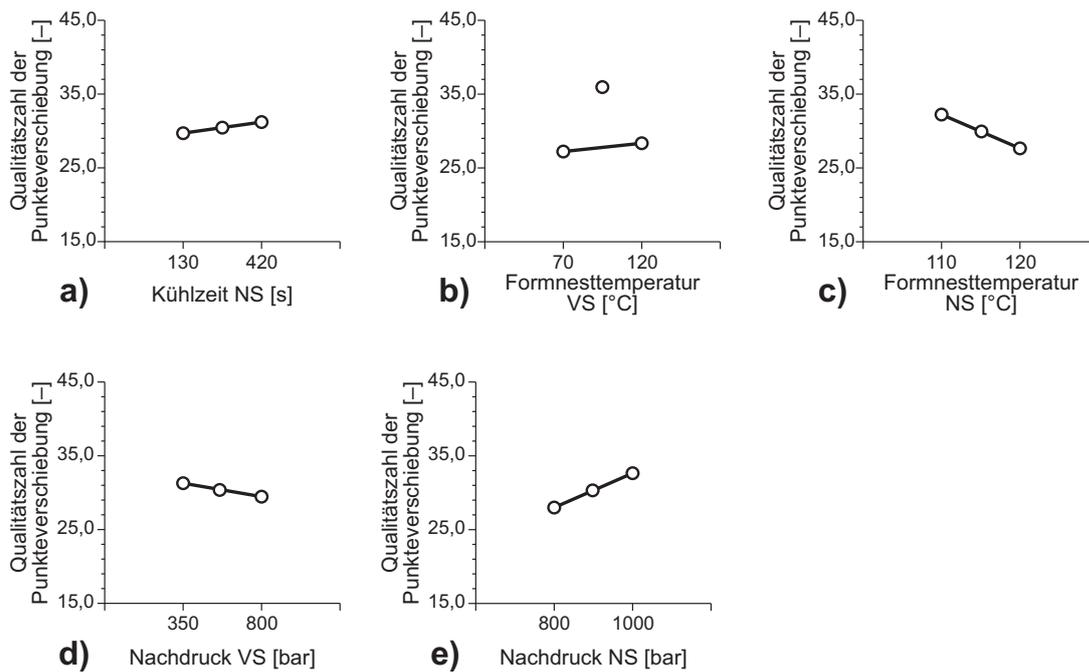


Bild 5.11 Effekte Prozessparameter auf die Qualitätszahl Dreischichtprüfkörper – vollfaktorieller Versuchsplan 2⁵

Bild 5.12 a zeigt die signifikante Wechselwirkung zwischen der Formnesttemperatur des Vorspritzlings (VS) und der Kühlzeit des Nachspritzlings (NS). Hiernach verstärkt oder schwächt die Formnesttemperatur VS, je nach Einstellung, den Effekt der Kühlzeit des Nachspritzlings. Bei 70 °C Formnesttemperatur VS führen lange Kühlzeiten zu besseren Qualitätszahlen, und bei 120 °C Formnesttemperatur VS ergeben kurze Kühlzeiten bessere Qualitätszahlen.

Der Effekt des Nachdrucks im Vorspritzling wird bei kurzer Kühlzeit des Nachspritzlings stark reduziert. Bei langer Kühlzeit ergeben höhere Drücke bessere Qualitätszahlen, Bild 5.12 b.

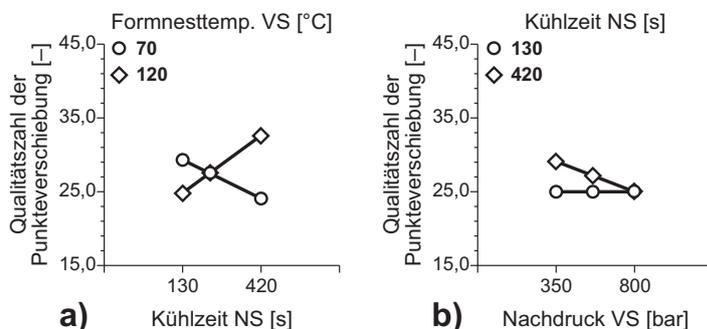


Bild 5.12 Zweifach-Wechselwirkungen auf die Qualitätszahl Dreischichtprüfkörper – vollfaktorieller Versuchsplan 2⁵

5.3 Spektraloptische Eigenschaften

Transmission und Yellowness-Index (Gelbwert) sind wichtige spektrale Eigenschaften, die die Funktion einer Beleuchtungsoptik beeinflussen. Die Kenntnis möglicher Unterschiede zwischen den Ein- und Mehrschichtsystemen ist daher für die Anwendungen wichtig. Die nachfolgenden Ergebnisse werden mit dem in Kap. 4.3 vorgestellten Prüfaufbau ermittelt.

Bild 5.13 zeigt die aus allen Versuchseinstellungen gemittelten spektralen Transmissionskurven für die drei Prüfkörpergeometrien. Die höchsten Transmissionen werden bei den Dreischichtprüfkörper gemessen. Durch die Messung ohne Immersionsöl und die damit verbundenen Streuverluste aufgrund von Formabweichungen können diese bei allen drei Geometrien reduziert sein.

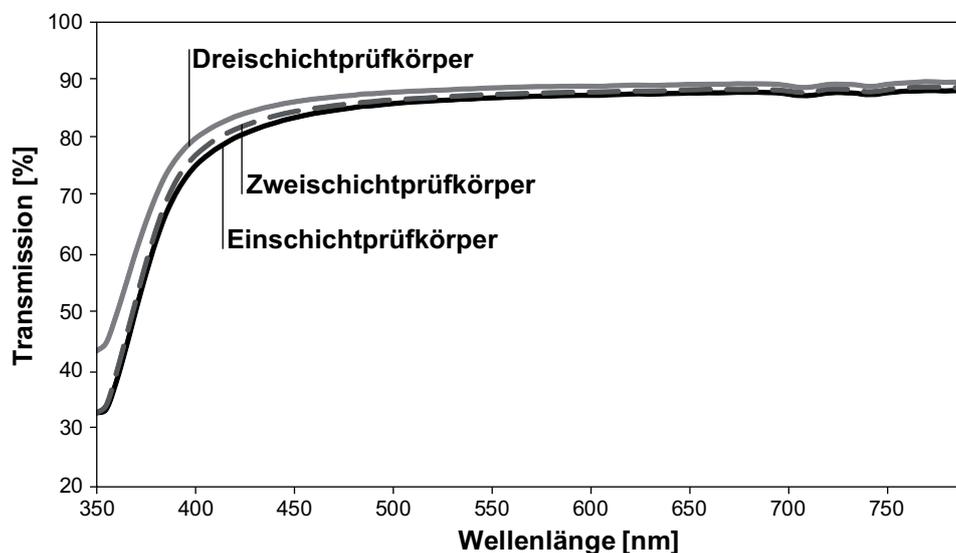


Bild 5.13 Mittelwerte der gemessenen Transmissionskurven aus allen Versuchseinstellungen für die drei Prüfkörpergeometrien

Dies wird offensichtlicher bei der Betrachtung der aus den einzelnen spektralen Transmissionskurven ermittelten totalen Transmissionsgraden, Bild 5.14 oben. Die Transmissionsgrade sind als Mittelwerte der entsprechenden jeweiligen acht Formteile pro Versuchseinstellung dargestellt. Die Linien stellen den hieraus erstellten Gesamtmittelwert dar. Der Einfluss von Verarbeitungsparametern wie Kühlzeit und Nachdruck zeigt sich integral besonders in den ermittelten Transmissionsgraden der Einschichtprüfkörper. Bei hohen Nachdrücken und entsprechend geringen Oberflächenabweichungen (zweite und sechste Versuchseinstellung bei den Einschichtlinsen) liegen die Transmissionsgrade höher.

Der für Oberflächeneffekte weniger anfällige Wert des Yellowness-Index ist in Bild 5.14 unten ebenfalls als Mittelwert aus den zugehörigen acht Formteilen pro Versuchseinstellung dargestellt. Bei den Einschichtprüfkörpern schwanken die Einzel-

werte um die eingezeichneten Mittelwerte, ohne eine Tendenz des Einflusses der Prozessparameter klar erkennen zu lassen.

Bei den Dreischichtprüfkörpern werden die geringsten Yellowness-Werte ermittelt und die Schwankungen um den Mittelwert sind weniger groß. Zwei- und Dreischichtprüfkörper zeigen einen Einfluss der Kühlzeiten. Die Einzelwerte unterhalb der Gesamtmittelwerte (Linien) sind jeweils bei den kurzen Zeiten ermittelt.

Die Transmissionswerte der Ein- und Zweischichtprüfkörper aus Bild 5.13 sind in dem für die Yellowness-Werte verantwortlichen Wellenlängenbereich zwischen 380 nm und ca. 600 nm (Kap. 2.2.3.3) reduziert. Dies korreliert durchaus mit den höheren Yellowness-Werten aus Bild 5.14 unten. Hieraus lässt sich schließen, dass die Transmissionsreduzierung nicht nur aus den Streuverlusten, sondern auch durch die erhöhte Absorption in diesem Wellenlängenbereich durch Abbau von Molekülketten entsteht.

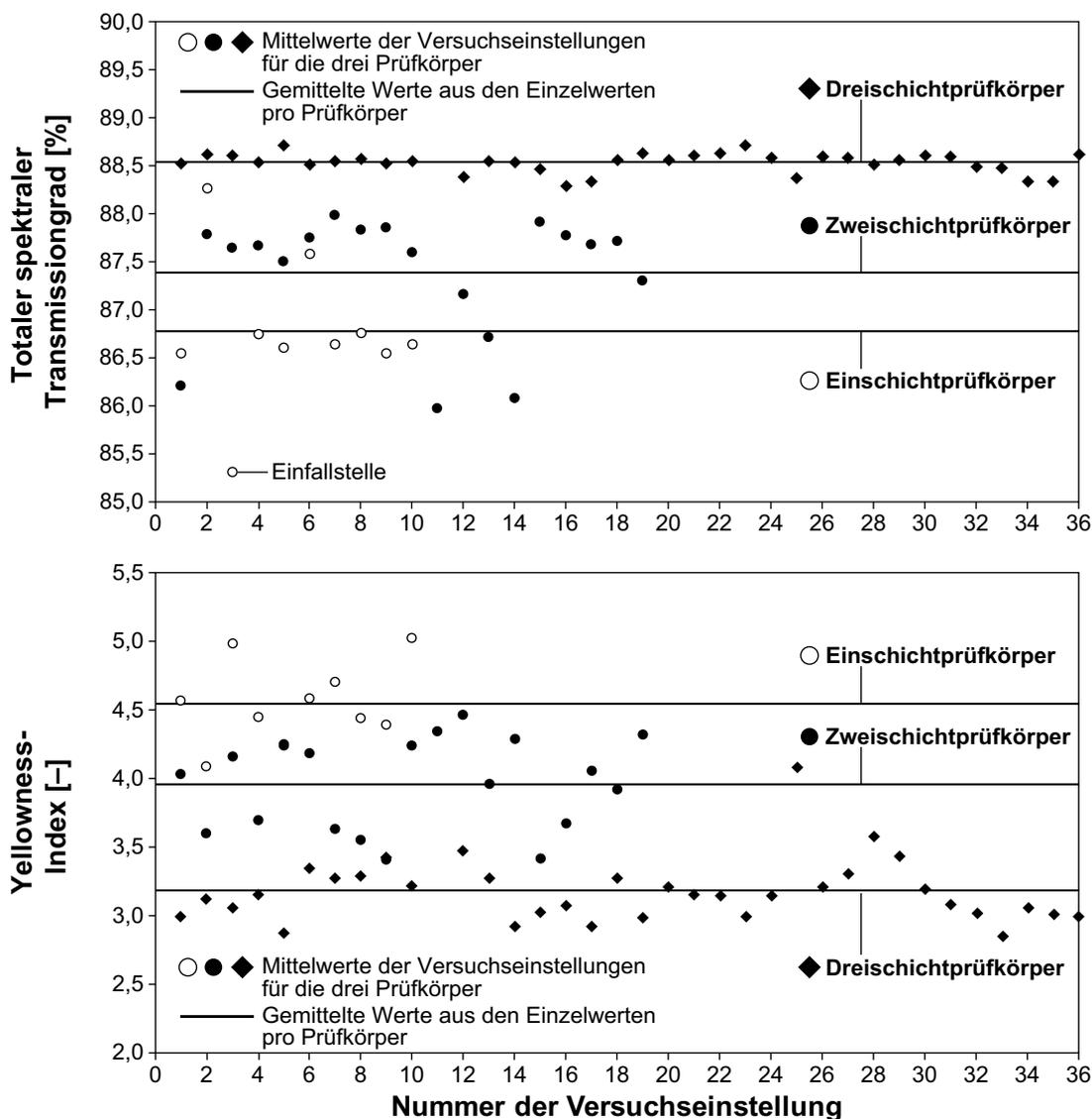


Bild 5.14 Transmissionsgrad und Yellowness-Index der Prüfkörper

5.4 Simulation des Abkühlverhaltens

Durch die Berechnung des Abkühlverhaltens sollen Informationen über den Zustand der Proben (Glas, entropieelastisch, Schmelze) während der Überspritzung bei den Mehrschichtprüfkörpern und bei der Abkühlung aller Prüfkörper gewonnen werden. Den nachfolgenden Berechnungsergebnissen liegen die in Kap. 4.5 beschriebenen Annahmen zugrunde.

5.4.1 Einschichtprüfkörper

Bild 5.15 zeigt den berechneten Abkühlverlauf im Einschichtprüfkörper beginnend 1 s nach der volumetrischen Formteilfüllung für beide Formnesttemperaturen (115 °C/125 °C). Die Glasübergangstemperatur T_g und Fließgrenztemperatur T_F sind durch Strichlinien gekennzeichnet. Weiterhin sind die Zustandsbereiche energieelastisch, entropieelastisch und viskoelastisch (Schmelze) nach Bild 3.1 a eingetragen.

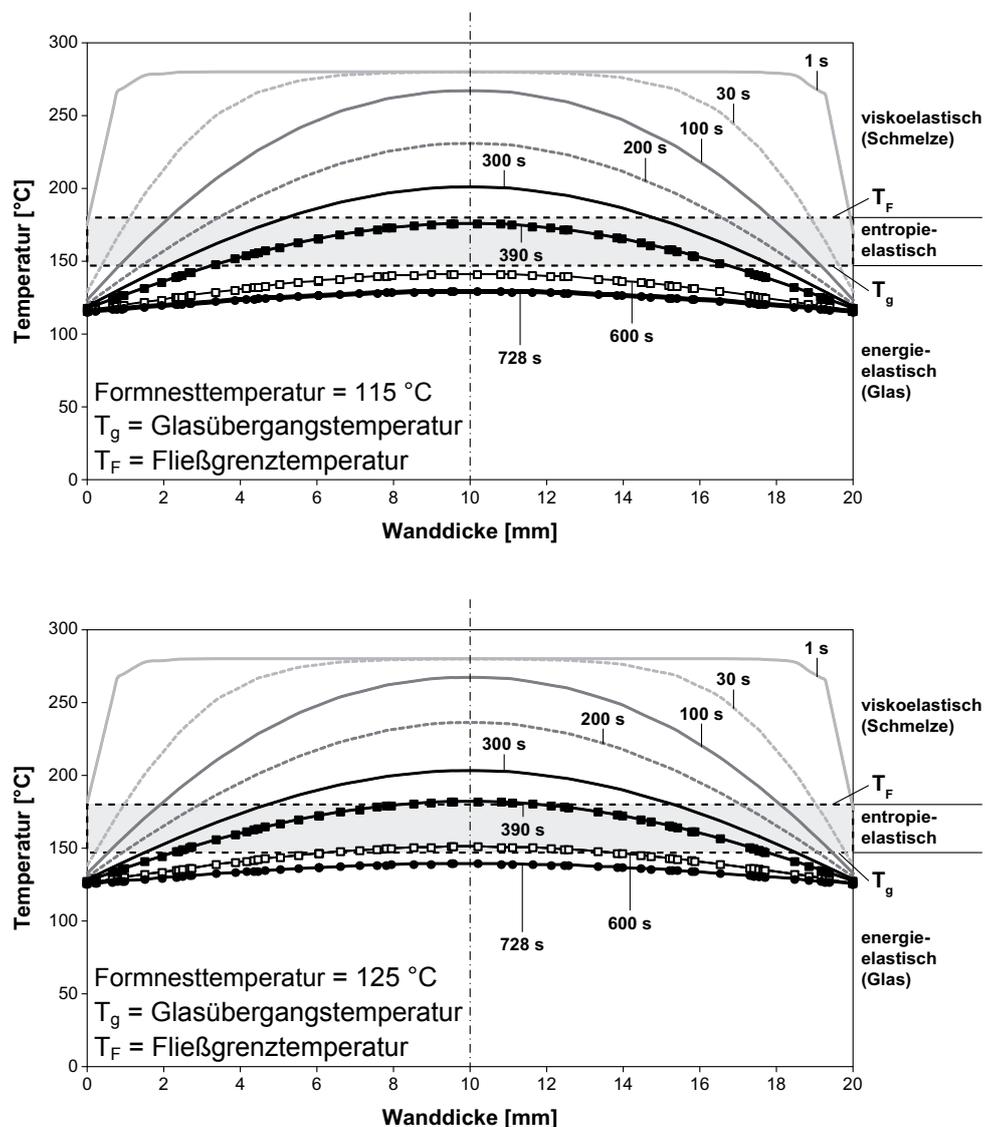


Bild 5.15 Berechnetes Abkühlverhalten – Einschichtprüfkörper
oben: Formnesttemperatur = 115 °C unten: Formnesttemperatur = 125 °C

Es ist das charakteristische Abkühlverhalten von außen nach innen erkennbar. Bei der niedrigen Formnesttemperatur sind die Temperaturen erwartungsgemäß nach beiden Kühlzeiten (390 s und 728 s) niedriger. Die mittigen Formteillbereiche befinden sich nach der kurzen Kühlzeit (390 s) bei beiden Formnesttemperaturen über T_g und damit im entropieelastischen Zustandsbereich.

5.4.2 Zweischichtprüfkörper

Die Simulation des Abkühlverhaltens der Zweischichtprüfkörper ist im Bild 5.16 und 5.17 exemplarisch für die Formnesttemperatur von 120 °C gezeigt (Zustandsbereiche nach Bild 3.1 a). Bild 5.16 zeigt die berechneten Abkühlverläufe für die Kühlzeit von 240 s und Bild 5.17 die für 410 s Kühlzeit. Für Vor- und Nachspritzling gelten jeweils dieselben Kühlzeiten.

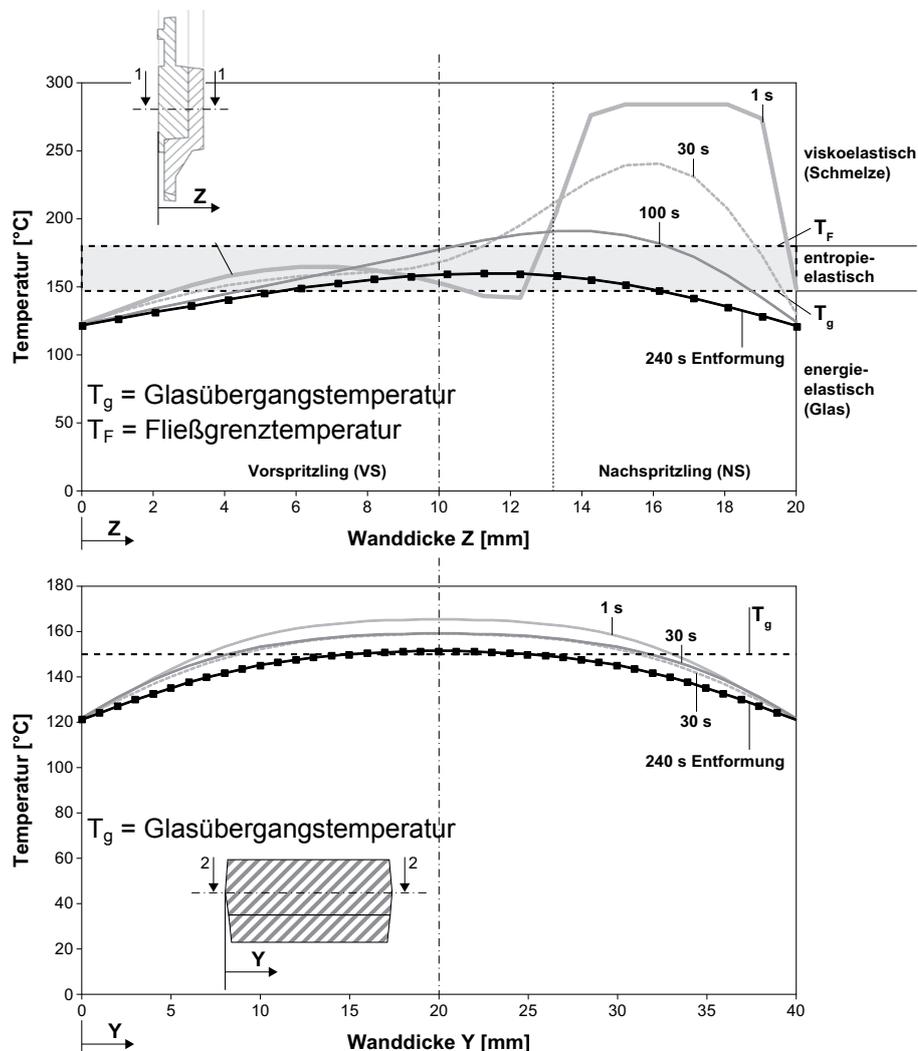


Bild 5.16 Berechnetes Abkühlverhalten – Zweischichtprüfkörper
 Formnesttemperatur VS / NS = 120 °C und Kühlzeit VS / NS = 240 s
 oben: in Position 1 Schnitt durch Gesamtverbund
 unten: in Position 2 Schnitt durch die Mitte des Vorspritzlings (VS)

Es werden die berechneten Temperaturverläufe in der Position 1 (Schnitt durch Gesamtverbund – links Vorspritzling und rechts Nachspritzling) und Position 2 (Schnitt nur durch die Mitte des Vorspritzlings) gezeigt. Der Startpunkt der Abkühlberechnung liegt bei 1 s nach einer vollständigen Überspritzung des Vorspritzlings.

Bei der kürzeren Kühlzeit (Bild 5.16) ist während der Überspritzung und der gemeinsamen Abkühlung der Vorspritzling wärmer. Dies hat seinen Grund darin, dass auch der Vorspritzling mit der kurzen Kühlzeit hergestellt wird, und dieser so höhere Temperaturen zum Startpunkt der Überspritzung aufweist. In beiden Schnitten ist zu erkennen, wie ein großer Anteil des Vorspritzlings auf Temperaturen oberhalb von T_g erwärmt wird und damit in den für den Abbau bzw. die Reduzierung von Spannungen und Orientierungen relevanten entropieelastischen Bereich kommt.

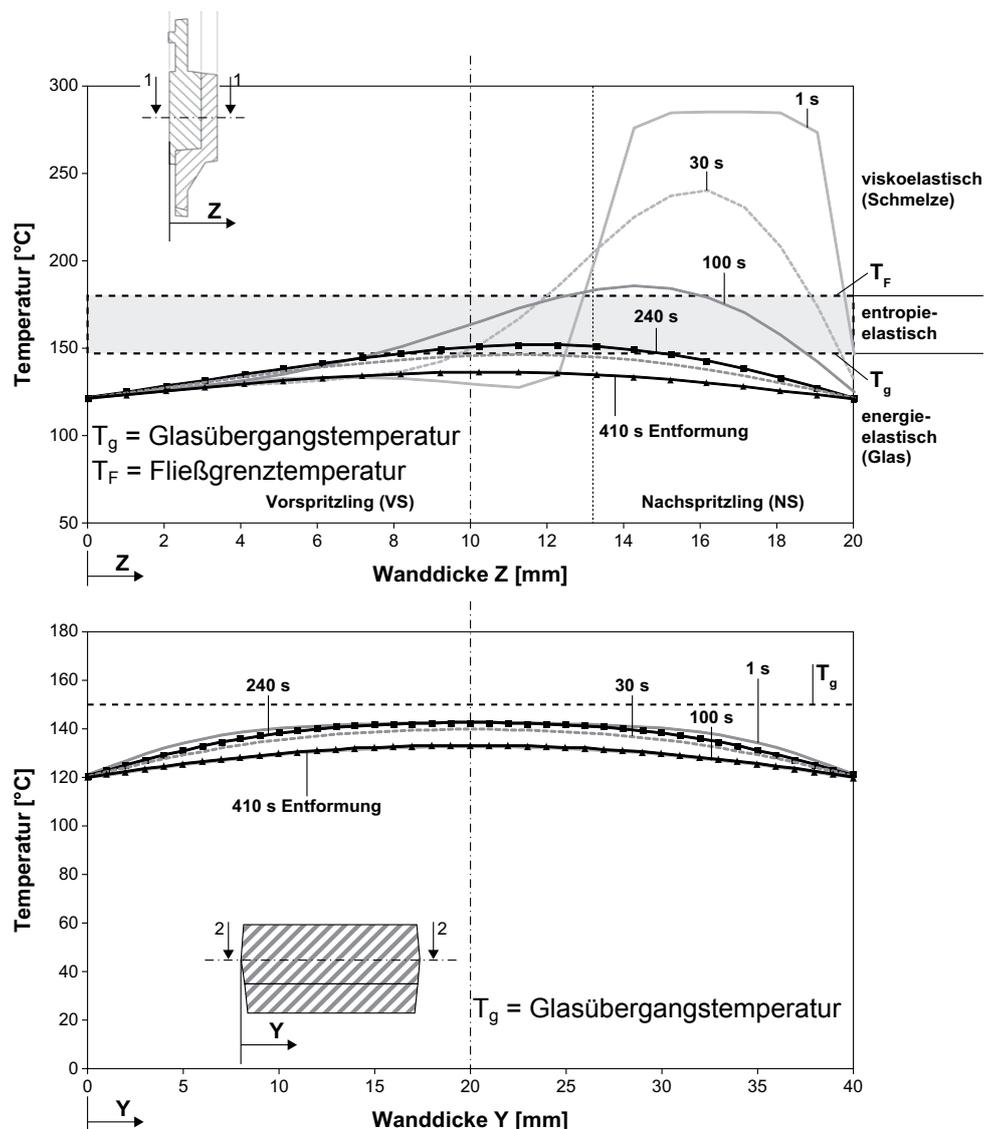


Bild 5.17 Berechnetes Abkühlverhalten – Zweischnittprüfkörper
 Formnesttemperatur VS / NS = 120 °C und Kühlzeit VS / NS = 410 s
 oben: in Position 1 Schnitt durch Gesamtverbund
 unten: in Position 2 Schnitt durch die Mitte des Vorspritzlings (VS)

Die Abkühlberechnung für die längere Kühlzeit zeigt einen kälteren Vorspritzling, Bild 5.17. Dies ist an dem Temperaturverlauf bei 1 s zu erkennen. Es werden nur die Schichten des Vorspritzlings in unmittelbarer Nähe des Nachspritzlings erwärmt. Sehr deutlich wird dieser Unterschied in den berechneten Temperaturverteilungen in Position 2: Bei der langen Kühlzeit sind die Mittenbereiche viel kälter und erreichen nicht die Temperaturwerte wie bei der kurzen Kühlzeit (vgl. mit Bild 5.16 Position 2).

5.4.3 Dreischichtprüfkörper

Eine rechnerische Abschätzung des Abkühlverhaltens der Dreischichtprüfkörper bei vier möglichen Verfahrenskombinationen ist in den Bildern 5.18 und 5.19 dargestellt, (Zustandsbereiche nach Bild 3.1 a). Der Startpunkt der Abkühlungsberechnung liegt bei 0,5 s nach einer vollständigen Überspritzung des Vorspritzlings.

Bild 5.18 zeigt die Abkühlberechnung für die Kombination Formnesttemperatur Vorspritzling $VS = 70\text{ °C}$ mit einer Kühlzeit des Nachspritzlings von 130 s und 420 s jeweils für die Schnittposition 1 (oben) und Position 2 (unten). Ausgehend von einer Temperaturverteilung bei 0,5 s ergibt sich der dargestellte Temperatenausgleich zwischen Vor- und Nachspritzling. Die Schichten des Vorspritzlings im Kontaktbereich mit dem Nachspritzling werden durch den Temperatenausgleich mit dem Nachspritzling weit über die Glastemperatur T_g erwärmt. Sie befinden sich somit im entropieelastischen Bereich. Spannungen und Orientierungen können hier abgebaut werden. Im Positionsschnitt 2 ist erkennbar, wie die äußeren Schichten des Vorspritzlings von ca. 70 °C auf 120 °C erwärmt werden. Bis 30 s Abkühlzeit fällt die Temperatur in der Formteilmittle ab, um danach durch den weiteren Temperatenausgleich mit dem Nachspritzling wieder anzusteigen. Zum Zeitpunkt der Entformung bei 130 s hat ein Großteil der Schichten im Vorspritzling Temperaturen nahe T_g .

Bei einer Verlängerung der Kühlzeit des Nachspritzlings bleibt zunächst die Temperaturverteilung im Gesamtverbund bis 130 s unverändert. Durch die darüber hinaus gehende Abkühlung unter Formzwang bis zur Entformung bei 420 s, kühlen alle Formteilmittelbereiche bis unterhalb T_g ab. Es entsteht so eine sehr flache Temperaturverteilung innerhalb des Dreischichtprüfkörpers zum Zeitpunkt der Entformung.

Bild 5.19 zeigt die berechneten Abkühlkurven bei 120 °C Formnesttemperatur des Vorspritzlings und einer Kühlzeit des Nachspritzlings von 130 s und 420 s in beiden Schnittpositionen. Durch die Erhöhung der Formnesttemperatur des Vorspritzlings auf 120 °C werden veränderte Abkühlverläufe berechnet. Erwartungsgemäß liegen die Temperaturverläufe im Vorspritzling höher als bei der kälteren Einstellung von 70 °C . Hierdurch erreichen die Mittenbereiche des Vorspritzlings Temperaturen, die weit oberhalb von T_g liegen. Bei der Entformung bei 420 s liegt ein flaches Temperaturprofil unterhalb von T_g im Prüfkörper in beiden Schnittpositionen vor. Durch eine

frühere Entformung nach bereits 130 s ergibt sich eine Temperaturverteilung, bei der ein großer Teil des Probenquerschnittes Temperaturen weit oberhalb von T_g aufweist.

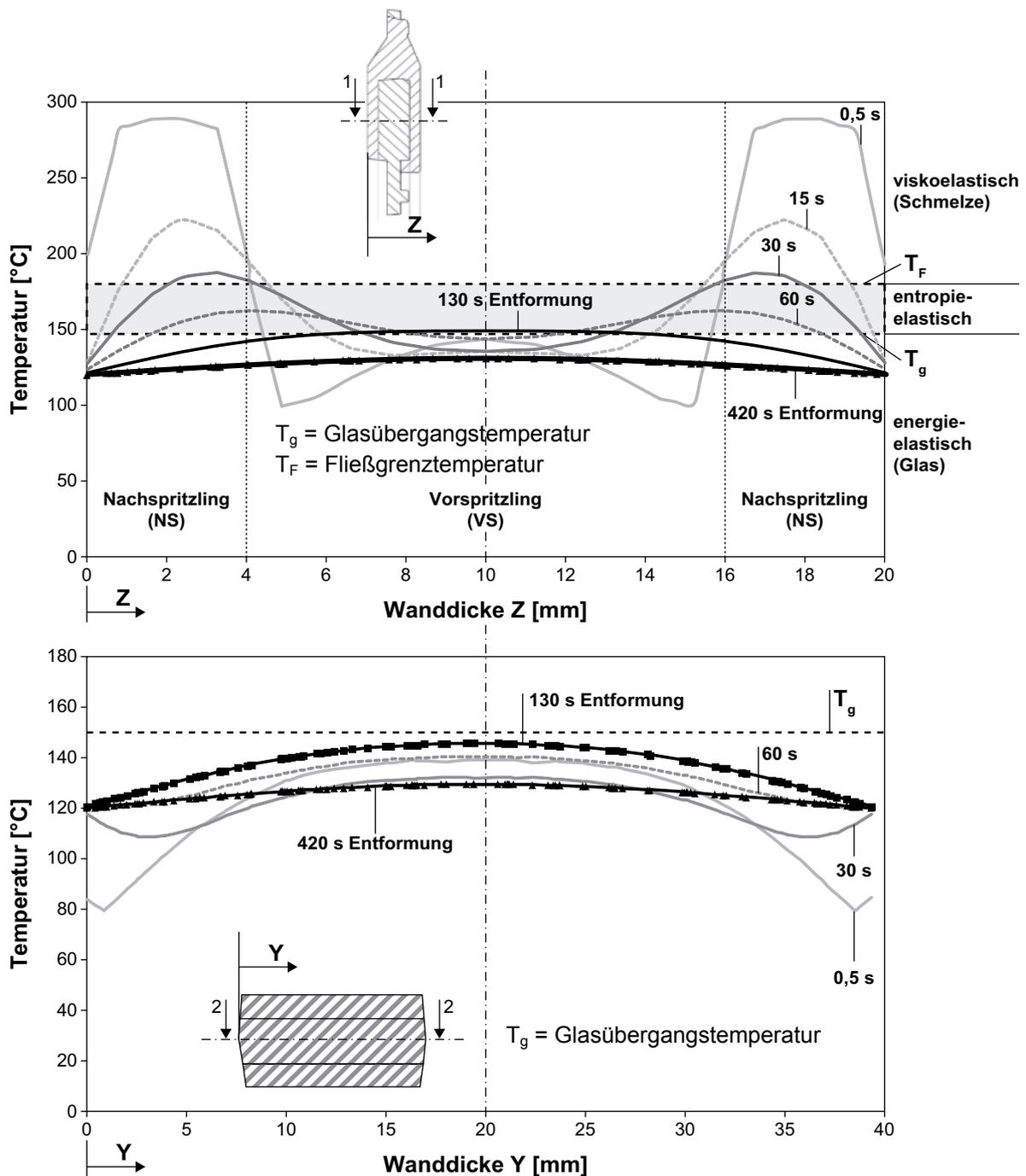


Bild 5.18 Berechnetes Abkühlverhalten – Dreischichtprüfkörper
 VS: Vorspritzling, NS: Nachspritzling
 Formnesttemperatur VS = 70 °C, Kühlzeit NS = 130 s und 420 s
 oben: in Position 1 Schnitt durch Gesamtverbund
 unten: in Position 2 Schnitt durch die Mitte des Vorspritzlings

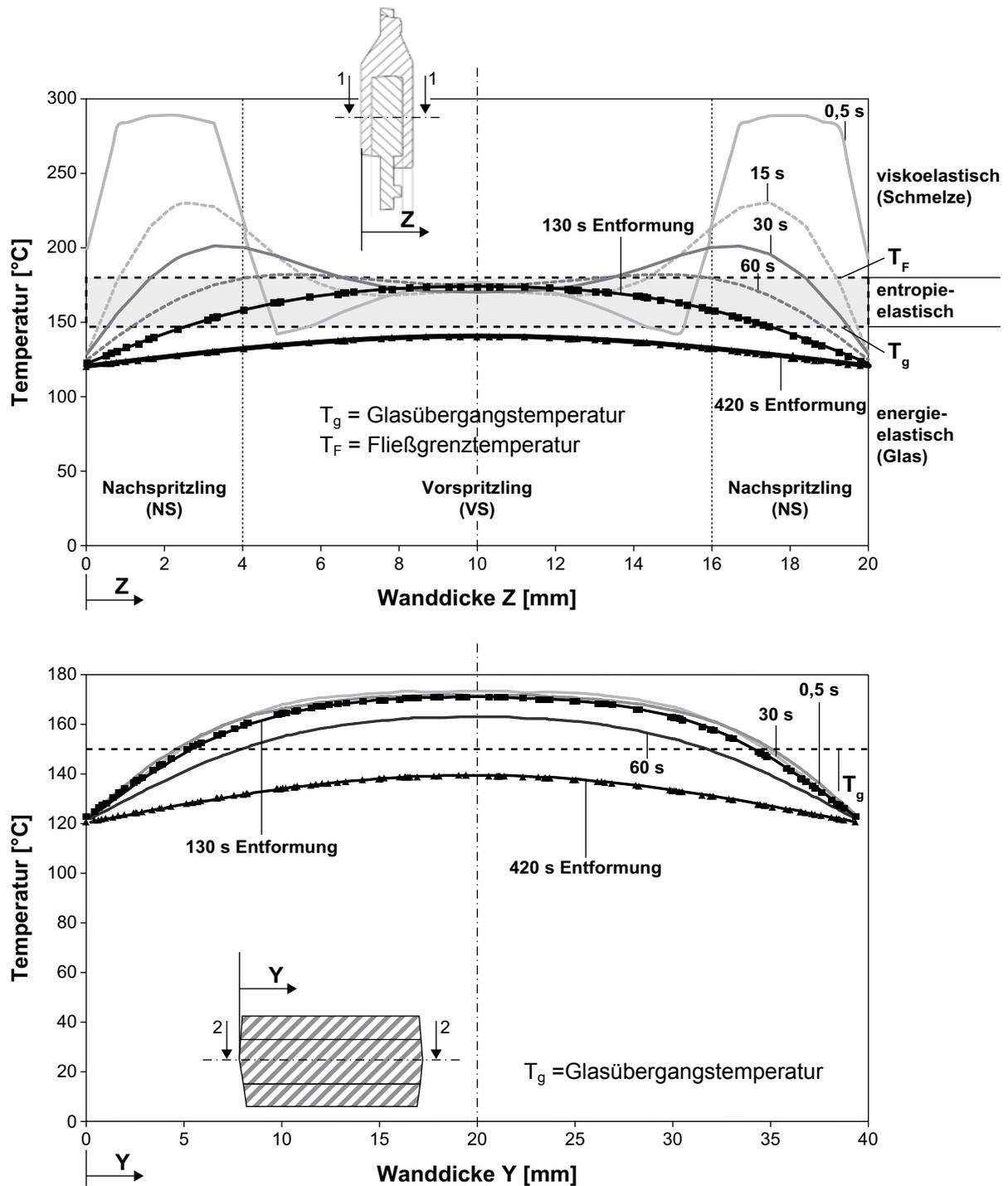


Bild 5.19 Berechnetes Abkühlverhalten – Dreischichtprüfkörper
 VS: Vorspritzling, NS: Nachspritzling
 Formnesttemperatur VS = 120 °C, Kühlzeit NS = 130 s und = 420 s
 oben: in Position 1 Schnitt durch Gesamtverbund
 unten: in Position 2 Schnitt durch die Mitte des Vorspritzlings

5.5 Prozessabhängige Wanddicken nach dem Spritzgießen

Ergänzend zu der Prozessanalyse der Form- oder maximalen Dickenabweichung werden die Wanddicken der Prüfkörper nach dem Spritzgießen vermessen. Um die Prüfkörper untereinander besser vergleichen zu können, werden hierbei nur die Daten der äußeren Messreihen 1 und 3 verwendet (Kap. 4.1.1, Bild 4.1). Zum einen werden so die in der Mitte liegenden großen Einfallstellen der Einschichtprüfkörper nicht gemessen. Zum anderen werden bei den beiden Mehrschichtprüfkörpern nur die Formteilbereiche berücksichtigt, in denen ausschließlich Schichten vorliegen (vgl. Bild 3.2).

Einschichtprüfkörper

Bild 5.20 stellt die gemessenen Wanddicken der Einschichtprüfkörper dar. Die Wanddickenverteilung über die gesamte Prozessparametervariation liegt zwischen 20,05 mm und 19,95 mm, also mit einer maximalen Differenz von 0,1 mm. Alle Maße liegen unter der Istwanddicke (20,1 mm) der Kavität. Die hohen Versuchseinstellungen des Nachdruckes sind schraffiert und die niedrige Einstellung weiß dargestellt. Die Zentralpunkte sind durch graue Balken gekennzeichnet. Wie zu erkennen ist, hat der Nachdruck den größten Einfluss auf die Dicke der Bauteile. Bei 1300 bar liegen höhere Werte vor. Dies lässt sich durch die reduzierte thermische Schwindung durch den höheren Nachdruck erklären. Sehr ausgeprägt ist dies bei der kurzen Kühlzeit (390 s) und hoher Formnesttemperatur (125 °C).

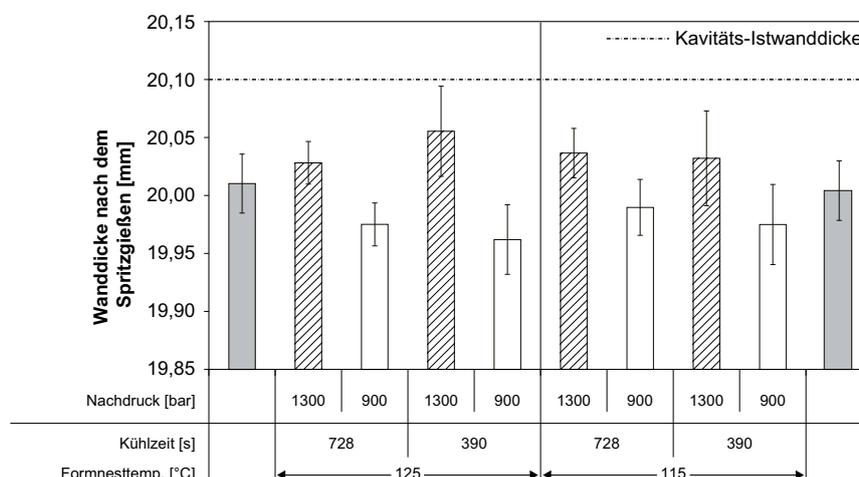


Bild 5.20 Wanddicken nach dem Spritzgießen – Einschichtprüfkörper
 graue Balken: Zentralpunkte; gestreifte Balken: hohe Druckeinstellungen

Die Kühlzeit wirkt sich viel schwächer aus. Bis auf die Einstellung mit der Kühlzeit = 390 s und Nachdruck = 1300 bar bei einer Formnesttemperatur = 125 °C werden die Bauteile durch eine kürzere Kühlzeit tendenziell dünner. Bei einer niedrigen Formnesttemperatur (115 °C) sind die gemessenen Wanddicken tendenziell etwas größer.

Zweischichtprüfkörper

Die Betrachtung der gemessenen Wanddicken für den Zweischichtprüfkörper ergibt einen ähnlichen Zusammenhang zwischen den Einstellgrößen der Prozessparameter und den Wanddicken wie beim Einschichtprüfkörper. Die Wanddickenvariation über alle Prozessparameter liegt bei dem Zweischichtprüfkörper zwischen 20,05 mm und 19,97 mm (Differenz von 0,08 mm) und damit in vergleichbarer Größenordnung zu den Einschichtprüfkörpern. Auch hier sind alle Wanddicken kleiner als die der Kavität (20,1 mm). Hohe Nachdrücke im Nachspritzling (gestreifte Balken) haben einen großen Einfluss auf die gemessene Wanddicke. Die Wirkung des Nachdrucks im Vorspritzling ist im Vergleich hierzu vernachlässigbar, zeigt aber bei hoher Einstellung (1150 bar) geringere Wanddicken. Auch bei den Zweischichtprüfkörpern werden die Formteile bei der kälteren Formtemperatur (110 °C) tendenziell wie die Einschichtlinsen dicker. Der Einfluss der Kühlzeit ist wie bei den Einschichtprüfkörpern viel geringer als der des Nachdruckes des Nachspritzlings. Die Bauteile werden bei kürzerer Kühlzeit (240 s) dünner.

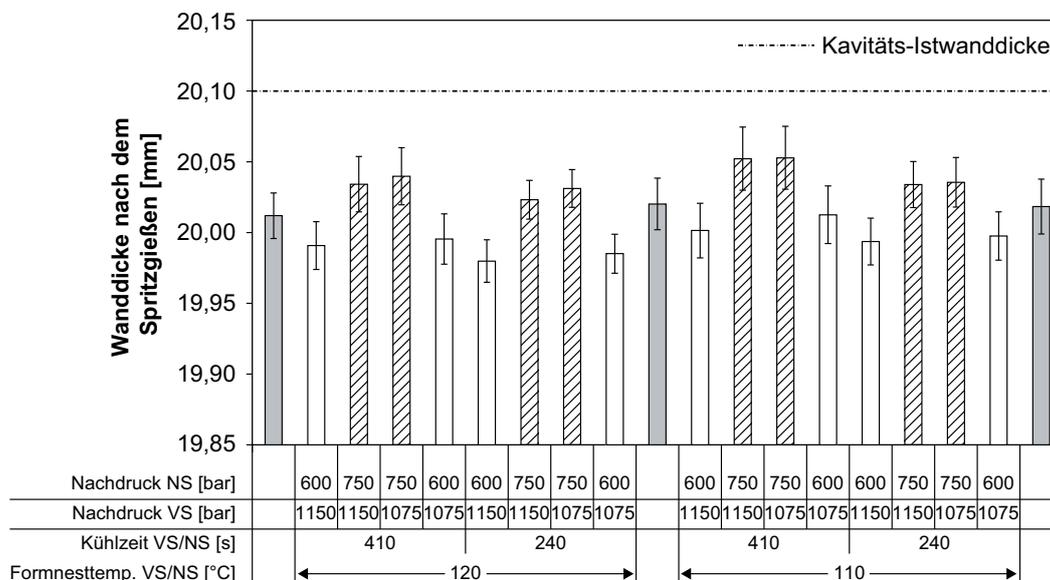


Bild 5.21 Wanddicken nach dem Spritzgießen – Zweischichtprüfkörper
 graue Balken: Zentralpunkte, gestreifte Balken: hohe Druckeinstellungen NS

Dreischichtprüfkörper:

Bild 5.22 stellt die gemessenen Wanddicken bei unterschiedlichen Prozessparametereinstellungen für den Dreischichtprüfkörper dar. Die Wanddickenvariation über alle Prozessparameter liegt bei dem Dreischichtprüfkörper zwischen 20,27 mm und 20,09 mm, dies entspricht einer maximalen Differenz von 0,18 mm. Es werden fast ausschließlich Wanddicken größer als die Ist-Kavitätswanddicke von 20,1 mm gemessen, was auf eine elastische Verformung der Proben hinweist. Auch hier zeigt sich zunächst der Einfluss des hohen Nachdrucks im Nachspritzling (gestreifte Balken). Die Unterschiede zwischen hoher und niedriger Einstellung sind größer als

0,05 mm. Der Einfluss des Nachdrucks im Vorspritzling ist sehr gering. Sein Einfluss ist nur bei 130 s Kühlzeit und 120 °C Formnesttemperatur etwas stärker ausgeprägt.

Betrachtet man aber den Einfluss der Kühlzeit im Nachspritzling, so stellt sich ein anderer Zusammenhang als bei dem Ein- und Zweischichtprüfkörper dar. Bei den Dreischichtprüfkörpern werden die Wanddicken bei höheren Kühlzeiten (420 s) um 0,05 mm bis 0,065 mm dünner. Dies liegt in vergleichbarer Größenordnung zum Einfluss des Nachdruckes.

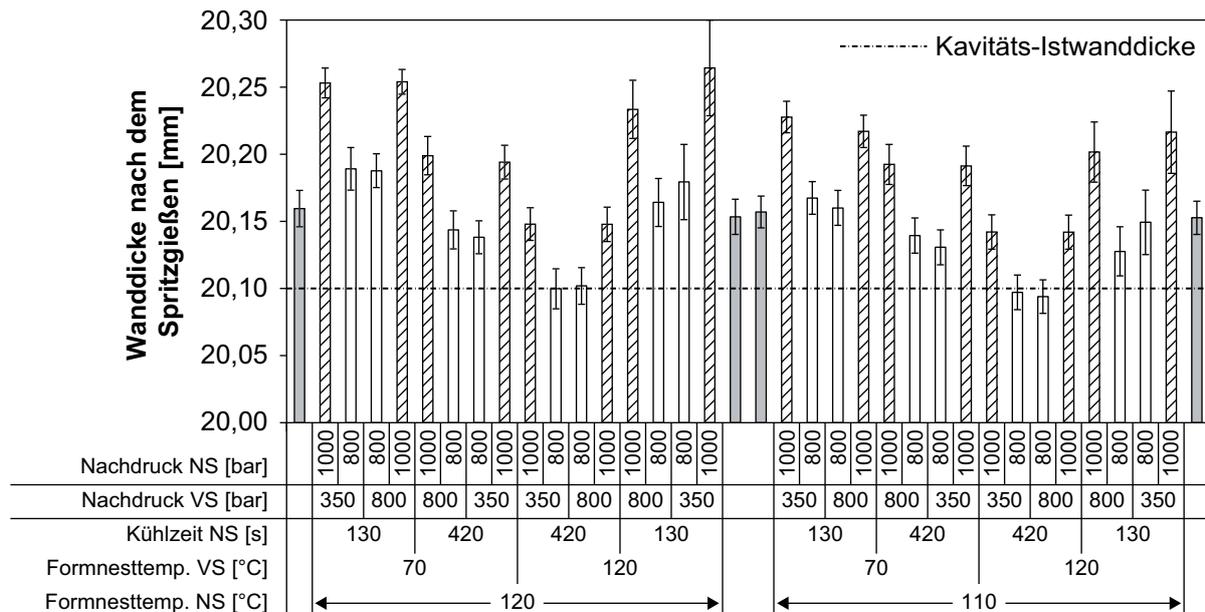


Bild 5.22 Wanddicken nach dem Spritzgießen – Dreischichtprüfkörper
graue Balken: Zentralpunkte; gestreifte Balken: hohe Druckeinstellungen NS

Bei erhöhter Formnesttemperatur des Vorspritzlings (120 °C) werden die gemessenen Wanddicken noch mal um durchschnittlich 0,05 mm dünner. Durch eine erneute Verringerung der Kühlzeit auf 130 s, stellen sich wieder höhere Wanddicken ein, die in vergleichbarer Größenordnung liegen wie bei niedriger Formnesttemperatur im Vorspritzling. Durch eine Reduzierung der Formnesttemperatur im Nachspritzling (115 °C) wird das Wanddickenniveau generell gesenkt, was bei den anderen Prüfkörpergeometrien auch nicht beobachtet wird. Bei dem Dreischichtprüfkörper zeigt sich neben dem Druckeinfluss ein ausgeprägter, kombinierter Effekt von Kühlzeit im Nachspritzling und Formnesttemperatur im Vorspritzling auf die Ausbildung der Bauteilwanddicken nach dem Spritzgießprozess.

5.6 Einfluss der Wärmebehandlung auf geometrische und innere Eigenschaften

Durch eine Wärmebehandlung in der Nähe der Glasübergangstemperatur sollen weitere Hinweise auf die Entstehungsmechanismen der bislang beobachteten prüfkörperspezifischen Unterschiede in geometrischen und werkstofflichen Eigenschaften analysiert werden. Zur Untersuchung des Verhaltens wird die in Kap. 4.6 vorgestellte Wärmebehandlung durchgeführt.

5.6.1 Vorversuche

Zur Ermittlung von geeigneten Wärmebehandlungstemperaturen und -zeiten werden Vorversuche durchgeführt. Hierbei werden jeweils drei Einschichtprüfkörper aus der Versuchsreihe VE 1 und jeweils drei Dreischichtprüfkörper aus den Versuchsreihen VD 9 und VD 10 bei folgenden Temperaturen und Zeiten einer Wärmebehandlung unterzogen:

Einschichtprüfkörper VE 1: 120 °C 3 h, 6 h, 9 h

Dreischichtprüfkörper VD 9 und VD 10: 120 °C/125 °C 3 h, 4 h, 6 h, 9 h

Für jede Versuchseinstellung werden die Punkteverschiebung, die zugehörige Qualitätszahl und die Wanddicke neu bestimmt. Bild 5.23 zeigt die gemessenen Qualitätszahlen als Mittelwerte aus jeweils drei Messwerten. Als Vergleich dient immer eine ungetemperte Probe.

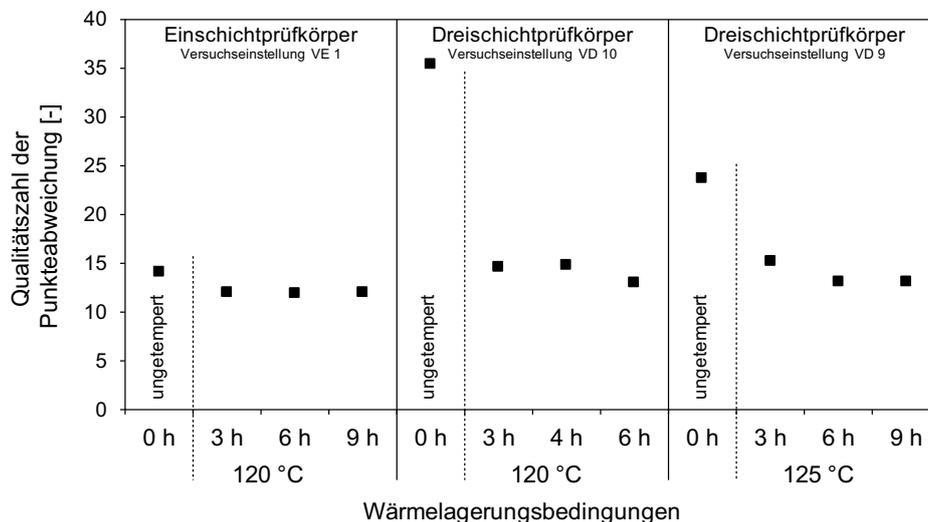


Bild 5.23 Qualitätszahlen nach Wärmelagerung
Mittelwerte aus jeweils drei Proben

Die Einschichtprüfkörper verändern die Qualitätszahl mit zunehmender Wärmebehandlungszeit nur minimal. Bei den Dreischichtprüfkörpern stellen sich für beide Temperaturen die größten Änderungen bereits nach 3 Stunden ein. Bei 120 °C

verringert sich die Qualitätszahl nach sechs Stunden noch einmal auf einen Wert von 13. Auf diesen Wert verringern sich die Qualitätszahlen auch bei 125 °C bei der Versuchseinstellung VD 9.

In den Vorversuchen wird weiterhin festgestellt, dass es je nach Prüfkörpergeometrie und Versuchseinstellung zu einer Wanddickenerhöhung kommt. Diese Wanddickenerhöhung erfolgt in Form eines „Offsets“, d. h. alle vermessenen Formteilbereiche nehmen gleichmäßig an der Wanddickenerhöhung teil. Wie bei der Überprüfung der Veränderung der Qualitätszahl, ergibt sich auch für die Wanddickenzunahme keine Veränderung bei längeren Zeiten als sechs Stunden und einer Wärmebehandlungstemperatur von 125 °C. Bild 5.24 zeigt exemplarisch die gemessenen Wanddickenzunahmen eines Ein- und eines Dreischichtprüfkörpers, gemessen im mittigen Formteilbereiche (Messpunkte 11-20 aus Bild 4.1) nach der Wärmebehandlung.

Die Veränderung der QP Zahl bei unveränderter Kontur der Prüfkörper nach Wärmelagerung zeigt nochmal die Wirkweise des Immersionsöls in der Trennung von geometrischen und werkstofflich gebundenen Eigenschaften auf.

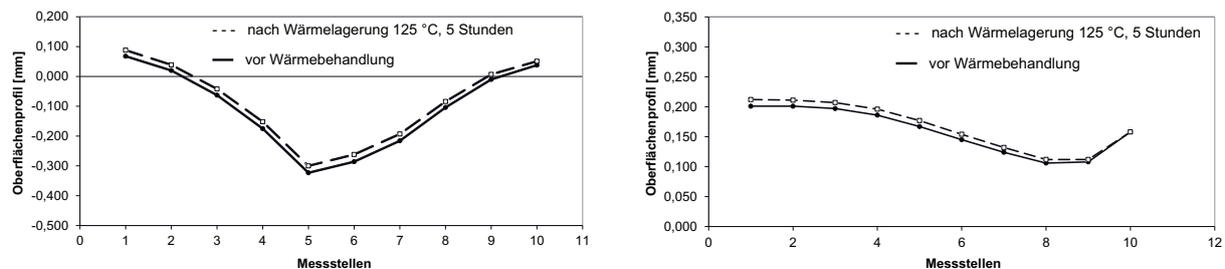


Bild 5.24 Wanddickenerhöhung im Formteilbereich der Messpunkte 11-20 auf der Düsenseite
 Wärmebehandlung 5 Stunden bei 125 °C
 links: *Einschichtprüfkörper*
 rechts: *Dreischichtprüfkörper*

Basierend auf den Ergebnissen der Vorversuche für die Änderung der Qualitätszahl und Wanddickenzunahmen, werden eine Temperatur von 125 °C und eine Zeit von 5 Stunden für die weiterführenden Wärmebehandlungen ausgewählt. Die Wärmebehandlung wird nicht an allen Versuchseinstellungen der jeweiligen Prüfkörper durchgeführt. Bei der Auswahl der Prüfkörper wurde darauf geachtet, dass sowohl solche mit guten und schlechten Qualitätszahlen als auch Versuchseinstellungen berücksichtigt wurden, die in den vorangegangenen Untersuchungen bestimmte Effekte erzeugt haben. Hierzu zählt u. a. die Kombination von Kühlzeit des Nachspritzlings und Formnesttemperatur des Vorspritzlings bei den Dreischichtprüfkörpern. Die Untersuchung der Wärmebehandlung wird jeweils an drei Prüfkörpern pro Einstellung durchgeführt. Eine statistische Aussage ist hierdurch nur bedingt möglich. Jedoch sollen die Ergebnisse dazu genutzt werden, um in Kombination mit anderen Prüfergebnissen bestimmte Verhaltensweisen der Prüfkörper besser interpretieren zu können.

5.6.2 Einschichtprüfkörper

Die Änderung der Wanddicke für den Einschichtprüfkörper nach der Wärmebehandlung ist in Bild 5.25 dargestellt. Die Versuchseinstellungen sind im Bild unter der Grafik dargestellt. Bei allen Versuchseinstellungen werden Wanddickenerhöhungen nach der Wärmebehandlung gemessen, diese liegen unterhalb von 0,015 mm – bis auf eine Ausnahme. Hierbei zeigt sich ein deutlicher Einfluss des Nachdruckes (gestreifte Balken). Die Kühlzeit hat einen geringen Einfluss. Tendenziell werden bei der längeren Kühlzeit (728 s) größere Wanddickenveränderungen festgestellt. Bei einer niedrigeren Formnesttemperatur (115 °C) werden ebenfalls tendenziell größere Wanddicken nach der Wärmelagerung gemessen. Die Gesamtwanddicke (nicht dargestellt) nach der Wärmelagerung ist entsprechend den Ergebnissen der Wärmelagerung bei den Proben mit dem hohen Nachdruck größer.

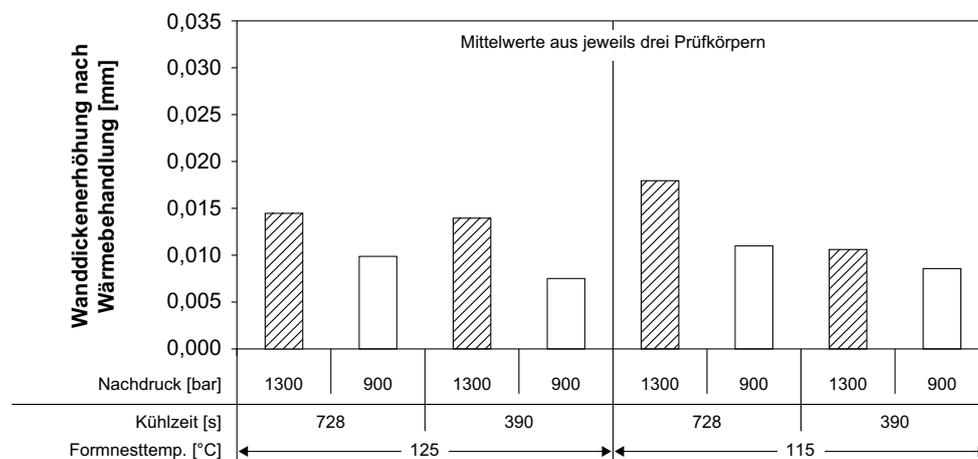


Bild 5.25 Veränderung der Wanddicken – Einschichtprüfkörper
Wärmebehandlung: 5 Stunden bei 125 °C
gestreifte Balken: hohe Druckeinstellungen

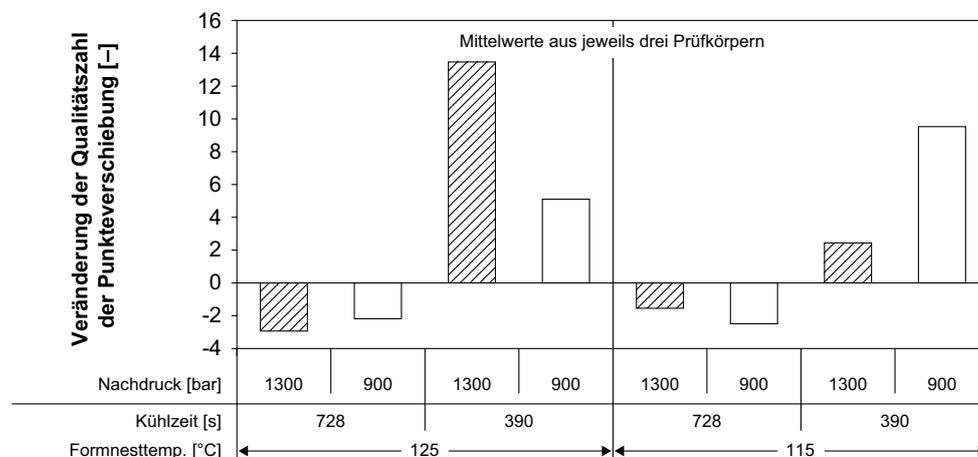


Bild 5.26 Veränderungen der Qualitätszahl – Einschichtprüfkörper
Wärmebehandlung: 5 Stunden bei 125 °C
gestreifte Balken: hohe Druckeinstellungen, (-): Verschlechterung

Die Veränderung der Qualitätszahl nach der Wärmebehandlung wird in Bild 5.26 gezeigt. Bei dem Einschichtprüfkörper wird festgestellt, dass es bei der langen Kühlzeit (728 s) zu einer Verschlechterung der Qualitätszahl (negative Veränderung) nach der Wärmebehandlung kommt. Bei den kürzeren Kühlzeiten (390 s) werden Verbesserungen der Qualitätszahl (positive Veränderungen) nach der Wärmebehandlung gemessen. Bei hoher Formnesttemperatur (125 °C) ist dieser Effekt bei hohem Nachdruck (gestreifte Balken) stärker ausgeprägt, hingegen tritt bei niedriger Formnesttemperatur (115 °C) die größte Veränderung bei niedrigem Nachdruck auf.

5.6.3 Zweischichtprüfkörper

Bild 5.27 zeigt die gemessene Wanddickenerhöhung nach der Wärmebehandlung für den Zweischichtprüfkörper.

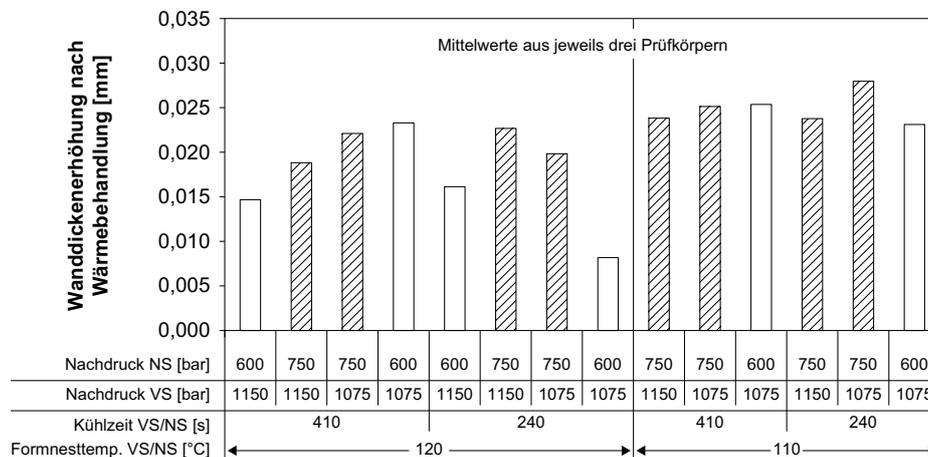


Bild 5.27 Veränderung der Wanddicken – Zweischichtprüfkörper
 Wärmebehandlung: 5 Stunden bei 125 °C
 gestreifte Balken: hohe Druckeinstellungen im Nachspritzling

Die Wanddickenerhöhung der Zweischichtprüfkörper ist größer als die der Einschichtprüfkörper. Die gemessene Spannweite der Wanddickenzunahme liegt hierbei zwischen 0,08 mm und 0,028 mm. Ähnlich dem Verhalten der Einschichtprüfkörper ist die Wanddickenzunahme bei hohen Nachdrücken im Nachspritzling (schraffierte Balken) größer als bei niedrigen Nachdrücken im Nachspritzling. Durch kürzere Kühlzeiten (240 s) ist die Wanddickenzunahme etwas geringer als bei der langen Einstellung (410 s). Bei der unteren Einstellung der Formnesttemperatur im Nachspritzling (110 °C) ist der Einfluss der anderen Parameter reduziert. Die Wanddickenzunahme ist jedoch generell größer. Interessant ist der Einfluss des Nachdrucks im Vorspritzling bei 120 °C Formnesttemperatur. Bei der langen Kühlzeit (410 s) ist die Wanddickenerhöhung bei niedriger Einstellung (1075 bar) größer. Bei der kurzen Kühlzeit (240 s) kehrt sich dies um. Hier werden bei der hohen Einstellung (1150 bar) höhere Werte gemessen. Durch die Verringerung der Formnesttemperatur auf

115 °C wird dieses Verhalten abgeschwächt. Die Gesamtwanddicke (nicht dargestellt) nach der Wärmelagerung ist auch hier entsprechend den Ergebnissen der Wärmelagerung bei den Proben mit dem hohen Nachdruck größer. Es wird keine einheitliche Endwanddicke erreicht.

Die Veränderung der Qualitätszahl nach der Wärmebehandlung wird in Bild 5.28 gezeigt. Für die Zweischichtprüfkörper liegen bei allen Versuchseinstellungen bessere Qualitätszahlen nach der Wärmebehandlung vor. Bei beiden Formnesttemperaturen werden bei der Einstellung mit der kurzen Kühlzeit (240 s) größere Verbesserungen der Qualitätszahl festgestellt als bei der langen Kühlzeit (420 s). Besonders ist dies bei 120 °C Formnesttemperatur ausgeprägt. Offensichtlich haben die längeren Kühlzeiten bereits solche innere Eigenschaften und damit Qualitätszahlen erzeugt, die zumindest bei diesen Wärmelagerungsbedingungen nicht mehr wesentlich das Qualitätsmerkmal „Punkteverschiebung“ verbessern.

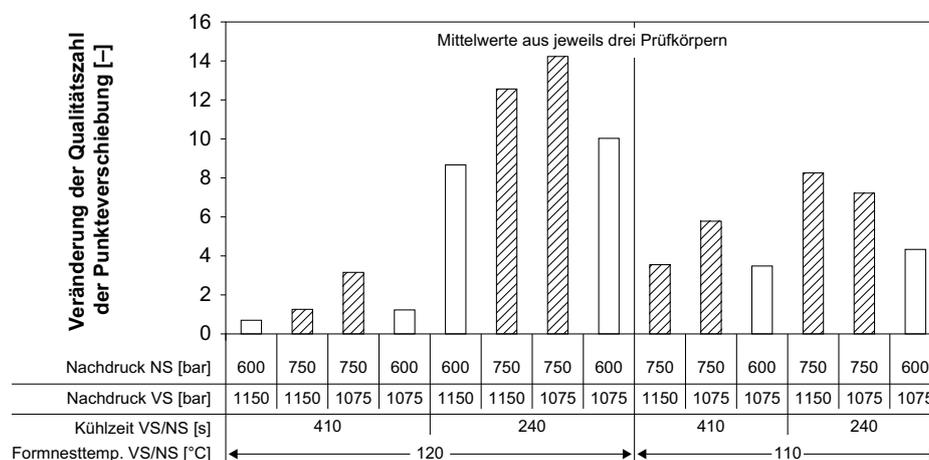


Bild 5.28 Veränderung (Verbesserung) der Qualitätszahl – Zweischichtprüfkörper
Wärmebehandlung: 5 Stunden bei 125 °C
gestreifte Balken: hohe Druckeinstellungen im Nachspritzling

Die Verbesserung der Qualitätszahl ist bei der Einstellung mit hohem Nachdruck im Nachspritzling größer (gestreifte Balken). Dies wird bei beiden Einstellungen der Formnesttemperatur beobachtet. Der Einfluss des Nachdrucks im Vorspritzling ist ebenfalls erkennbar. Bei niedriger Einstellung (1075 bar) werden größere Qualitätszahlverbesserungen festgestellt (bis auf die Proben mit der kurzen Kühlzeit bei der niedrigen Formnesttemperatur). Dies ist umgekehrt zum Einfluss des Nachdrucks im Nachspritzling.

5.6.4 Dreischichtprüfkörper

Bei den Dreischichtprüfkörpern werden Versuchseinstellungen gewählt, die mit unterschiedlichen Kombinationen von Formnesttemperatur des Vorspritzlings (70 °C und 120 °C) und Kühlzeiten des Nachspritzlings (130 s und 420 s) hergestellt sind.

Bild 5.29 zeigt die gemessene Wanddickenveränderung nach der Wärmebehandlung. Es ist zu erkennen, dass es bei allen Versuchseinstellungen zu einer Wanddicken-erhöhung kommt. Zunächst sollen die Versuchseinstellungen mit 120 °C Formnesttemperatur im Nachspritzling betrachtet werden. Es zeigt sich hier sehr deutlich, dass die Wanddicke bei Einstellungen mit kürzerer Kühlzeit (130 s) weniger stark erhöht wird als bei der langen Einstellung. Daneben ist zu erkennen, dass Einstellungen mit hohem Nachdruck im Nachspritzling (gestreifte Balken) zu einer größeren Wanddicke führen. Niedrige Einstellungen des Nachdruckes im Vorspritzling (350 bar) scheinen auch zu höheren Wanddickenerhöhungen zu führen.

Dominierender Faktor ist jedoch die Kombination aus Kühlzeit des Nachspritzling und Formnesttemperatur des Vorspritzlings. Bei niedriger Einstellung der Formnesttemperatur des Nachspritzlings (110 °C) zeigt sich ein ähnliches Verhalten. Generell liegt die Wanddickenzunahme jedoch auf höherem Niveau. Es stellt sich nach der Wärmelagerung auch bei dem Dreischichtprüfkörper keine einheitlich große Wanddicke ein.

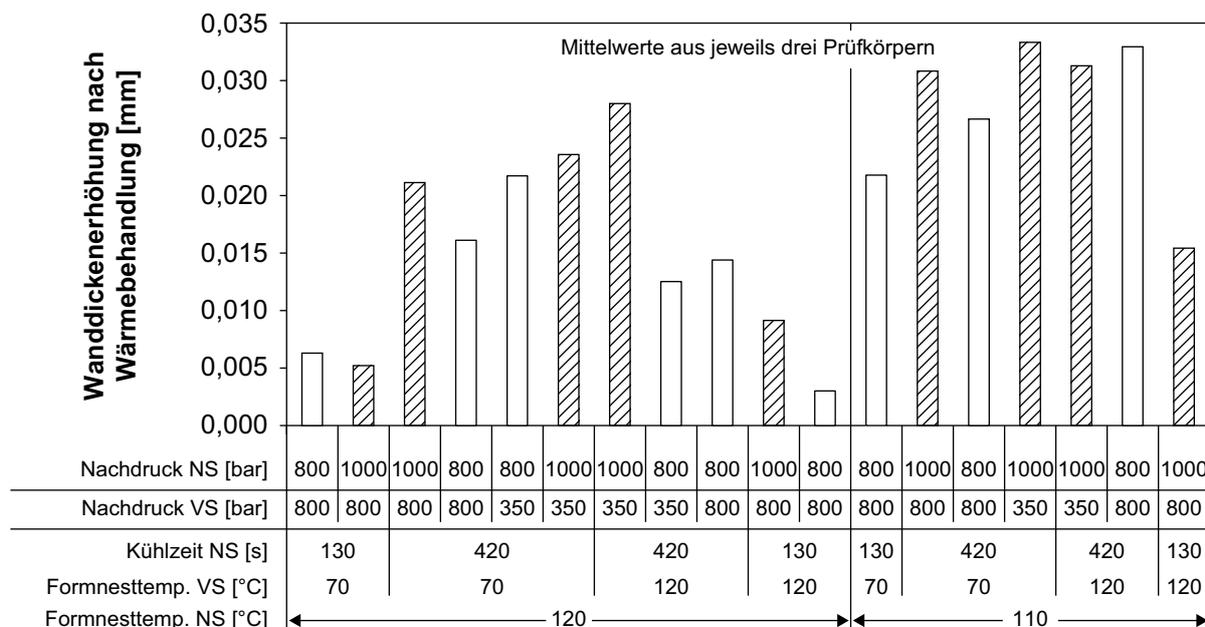


Bild 5.29 Veränderungen der Wanddicken – Dreischichtprüfkörper
Wärmebehandlung: 5 Stunden bei 125 °C
gestreifte Balken: hohe Druckeinstellungen im Nachspritzling

Die Veränderung der Qualitätszahl der Punkteverschiebung durch die Wärmebehandlung ist in Bild 5.30 dargestellt. Generell zeigt sich bei allen untersuchten Versuchseinstellungen eine teilweise große Verbesserung der Qualitätszahl durch die Wärmebehandlung.

Weiterhin ist zu erkennen, dass die Verbesserung bei den Versuchseinstellungen mit 420 s Kühlzeit und 70 °C Formnesttemperatur im Vorspritzling gegenüber den anderen Einstellungen geringer ist. Hohe Qualitätszahlverbesserungen nach der

Wärmelagerung stellen sich bei den Versuchseinstellungen mit 130 s Kühlzeit ein. Anscheinend sind durch die frühzeitige Entformung und die beobachtete Expansion in Bild 5.22 direkt nach der Entformung nur noch sehr geringe Spannungen im Formteil vorhanden, die wiederum sehr gut durch die Wärmebehandlung reduziert werden können. Ebenfalls große Verbesserungen werden bei der Einstellung mit 420 s Kühlzeit und 120 °C Formnesttemperatur VS gemessen. Ein eindeutiger Einfluss des Nachdrucks im Nachspritzling kann nicht festgestellt werden.

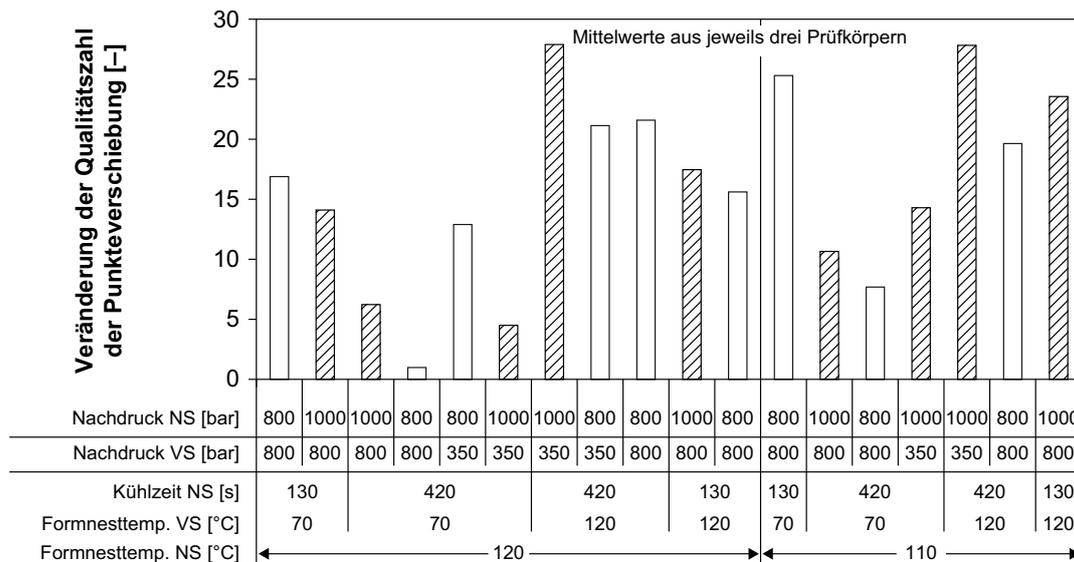


Bild 5.30 Veränderung (Verbesserung) der Qualitätszahl – Dreischichtprüfkörper
Wärmebehandlung: 5 Stunden bei 125 °C
gestreifte Balken: hohe Druckeinstellungen im Nachspritzling

5.7 Charakteristisches Punkteverschiebungsmuster

Zusätzlich zu der Untersuchung der prüfkörperabhängigen Wanddickenausbildung und Punkteverschiebungen soll nun festgestellt werden, ob es auch in Bezug auf die Art der Punkteverschiebungen Unterschiede zwischen den drei Prüfkörpergeometrien gibt. Hierzu werden die Punkteverschiebungen aller Versuchseinstellungen der Prüfkörpergeometrien auf bestimmte immer wiederkehrende Muster untersucht.

5.7.1 Ein- und Zweischichtprüfkörper

Bild 5.31 zeigt für den Ein- und den Zweischichtprüfkörper je drei Punkteverschiebungsbilder als Bildausschnitt. Der betrachtete Formteilbereich ist in der Punkteverschiebungsskizze dargestellt. Ausgehend von einer bestimmten Einstellung (A, D) ist die Kühlzeit (B, E) und der Nachdruck (C, F) reduziert worden. Bei den Ein- und

Zweischichtprüfkörpern wird festgestellt, dass die Punkte je nach Prozessparameter-einstellung mehr oder weniger stark nach innen gezogen werden. Haupt-einflussgrößen auf dieses Punktemuster sind die Kühlzeit und der Nachdruck. Hierbei erzeugen ein hoher Nachdruck und eine kurze Kühlzeit eine Verschiebung nach innen. Andere typische Punktemuster werden darüber hinaus nicht erkannt.

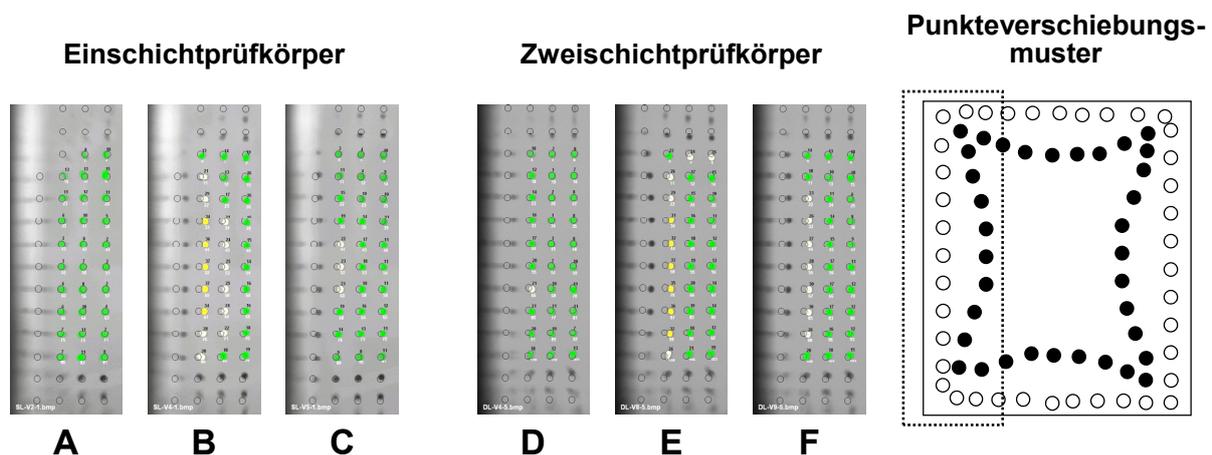


Bild 5.31 Charakteristisches Punkteverschiebungsmuster

Einschichtprüfkörper

A : *Einstellung VE 2* *Nachdruck = 1300 bar, Kühlzeit = 728 s*

B : *Einstellung VE 4* *Nachdruck = 1300 bar, Kühlzeit = 390 s*

C : *Einstellung VE 5* *Nachdruck = 900 bar, Kühlzeit = 390 s*

Zweischichtprüfkörper, NS: Nachspritzling

D : *Einstellung VZ 4* *Nachdruck NS = 750 bar, Kühlzeit = 410 s*

E : *Einstellung VZ 8* *Nachdruck NS = 750 bar, Kühlzeit = 210 s*

F : *Einstellung VZ 5* *Nachdruck NS = 600 bar, Kühlzeit = 210 s*

5.7.2 Dreischichtprüfkörper

Bei den Dreischichtprüfkörpern wird ein komplexeres Punkteverschiebungsmuster festgestellt. Betrachtet man die jeweiligen Punkteverschiebungen für die entsprechenden Versuchsblöcke mit jeweils konstanter Formnesttemperatur Vorspritzling und Kühlzeit Nachspritzling, so fällt das in Bild 5.32 dargestellte charakteristische Punkteverschiebungsmuster auf. Dieses wird maßgeblich durch die Kombination von Formnesttemperatur des Vorspritzlings (70 °C oder 120 °C) und der Kühlzeit des Nachspritzlings (130 s und 410 s) erzeugt. Durch die Nachdrücke von Vor- und Nachspritzling werden die Muster nur jeweils verstärkt oder abgeschwächt. Die Muster treten sowohl bei 120 °C als auch bei 110 °C Formnesttemperatur im Nachspritzling auf.

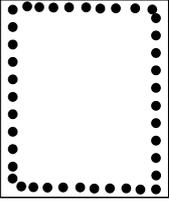
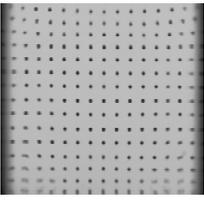
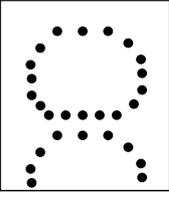
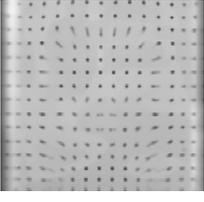
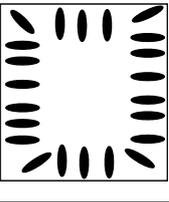
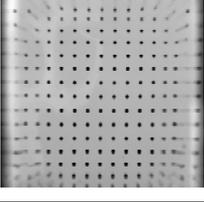
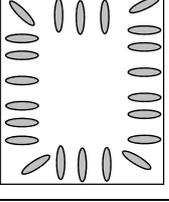
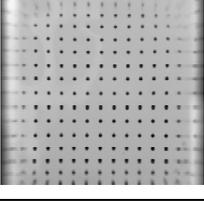
Schemaskizze	Punktebild	Merkmal	Prozessparameter	
		Gleichmäßige Punkteverschiebung nach innen	Formnesttemperatur Vorspritzling	Kühlzeit Nachspritzling
			70 °C	130 s
		Ausbildung einer verschmierten Acht im Inneren	Formnesttemperatur Vorspritzling	Kühlzeit Nachspritzling
			70 °C	420 s
		Starkes längliches Verziehen der äußeren Punkte nach innen	Formnesttemperatur Vorspritzling	Kühlzeit Nachspritzling
			120 °C	420 s
		Schwaches längliches Verziehen der äußeren Punkte nach innen	Formnesttemperatur Vorspritzling	Kühlzeit Nachspritzling
			120 °C	130 s

Bild 5.32 Charakteristische Punkteverschiebungsmuster
Dreischichtprüfkörper

5.7.3 Einfluss des Werkzeugs auf das Punktemuster der Dreischichtprüfkörper

Da das Verhalten von Ein- und Zweischichtprüfkörper zum Dreischichtprüfkörper in Bezug auf das beobachtete Punkteverschiebungsmuster so signifikant verschieden ist, muss untersucht werden, ob werkzeugtechnische Ursachen hierfür verantwortlich sind. Bedingt durch die Formteil- und Werkzeugkonstruktion und des damit verbundenen Angusskonzeptes könnte es bei der Überspritzung des Vorspritzlings zu einer Klemmung des Werkzeuges auf die Angusslaschen kommen und hierdurch die thermische Schwindung und das Punktemuster beeinflusst werden. Um dies auszuschließen, werden Testmessungen durchgeführt, bei denen eine Angusslasche am Vorspritzling vor der Überspritzung abgeschnitten wird. Bild 5.33 zeigt die Gegenüberstellung von gemessenen Punkteverschiebungen und ermittelten Qualitätskennzahlen für Dreischichtprüfkörper mit und ohne zweite Angusslasche. Die angegebenen Qualitätszahlen sind Mittelwerte aus vier Messungen.

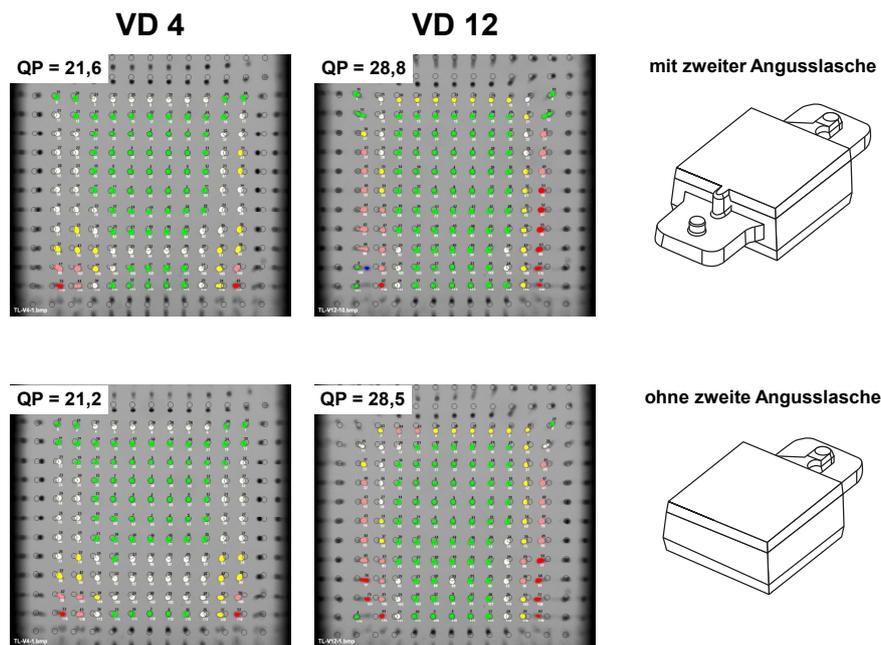


Bild 5.33 Gemessene Punkteverschiebung und ermittelte Qualitätskennzahl Dreischichtprüfkörper der Versuchseinstellungen VD 4 und VD 12
 oben: mit Angusslasche, Mittelwerte aus jeweils vier Messungen
 unten: ohne zweite Angusslasche, Mittelwerte aus jeweils vier Messungen

Die Gegenüberstellung zeigt keine nennenswerten Unterschiede für die Versuchseinstellungen VD 4 und VD 12 des Dreischichtprüfkörpers in den ermittelten Qualitätszahlen. Weiterhin gibt es auch keine nennenswerten Unterschiede in den Punkteverschiebungen in den äußeren Randbereichen. Ein nennenswerter Einfluss der Werkzeugklemmung auf die beobachteten Punkteverschiebungsmuster bei den Dreischichtprüfkörpern kann somit ausgeschlossen werden.

5.8 Verhalten des Vorspritzlings beim Dreischichtprüfkörper

Die bislang durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass der Ein- und Zweischichtprüfkörper ähnliches Verhalten in Bezug auf Wanddickenausbildung und Punktemuster hat. Bei dem Dreischichtprüfkörper scheinen andere Mechanismen zu wirken. Für die Erforschung des Verhaltens der Dreischichtprüfkörper ist die Kenntnis des Einflusses des Vorspritzlings von großer Bedeutung. Die nachfolgend beschriebenen Ergebnisse sollen deshalb helfen, folgende Fragen zu beantworten:

Entstehen die Punkteverschiebung und damit die entsprechende Qualitätszahl QP, sowie das charakteristische Punkteverschiebungsmuster im Dreischichtverbund bereits im Vorspritzling, oder hat die Überspritzung den größten Anteil an der be-

obachteten Punkteverschiebung? Hat die Oberfläche (z. B. Einfallstellen) der Vorspritzlinge Einfluss auf die Punkteverschiebung?

5.8.1 Punkteverschiebung im Vorspritzling ohne Überspritzung

Zur Untersuchung der Punkteverschiebung werden zunächst vier Vorspritzlinge mit den vier möglichen Kombinationen aus Formnesttemperatur (70 °C oder 120 °C) und Nachdruck (350 bar oder 800 bar) hergestellt. Danach werden die Punkteverschiebungen in den so gefertigten Vorspritzlingen durch den Messaufbau aus Kap. 4.2 bestimmt. Anschließend werden diese Ergebnisse mit ausgewählten Dreischichtprüfkörpern verglichen, die aus diesen Vorspritzlingskombinationen hergestellt werden. Die Auswahl der Dreischichtprüfkörper wurde entsprechend den beobachteten Punktemustern durchgeführt.

Bild 5.34 zeigt die Gegenüberstellung der Punkteverschiebungen in den Vorspritzlingen und in den hieraus hergestellten Dreischichtprüfkörpern. Die eingerahmten Felder in den Bildern der Vorspritzlinge sind Aussparungen im Vorspritzling, die zur späteren Herstellung der Dreischichtenkörper benutzt werden, und brauchen somit nicht berücksichtigt werden. Da der Durchbruch im Vorspritzling im Messbereich der 11 * 11 Punkte liegt, ist die Ermittlung der Qualitätszahlen in den Vorspritzlingen nicht möglich.

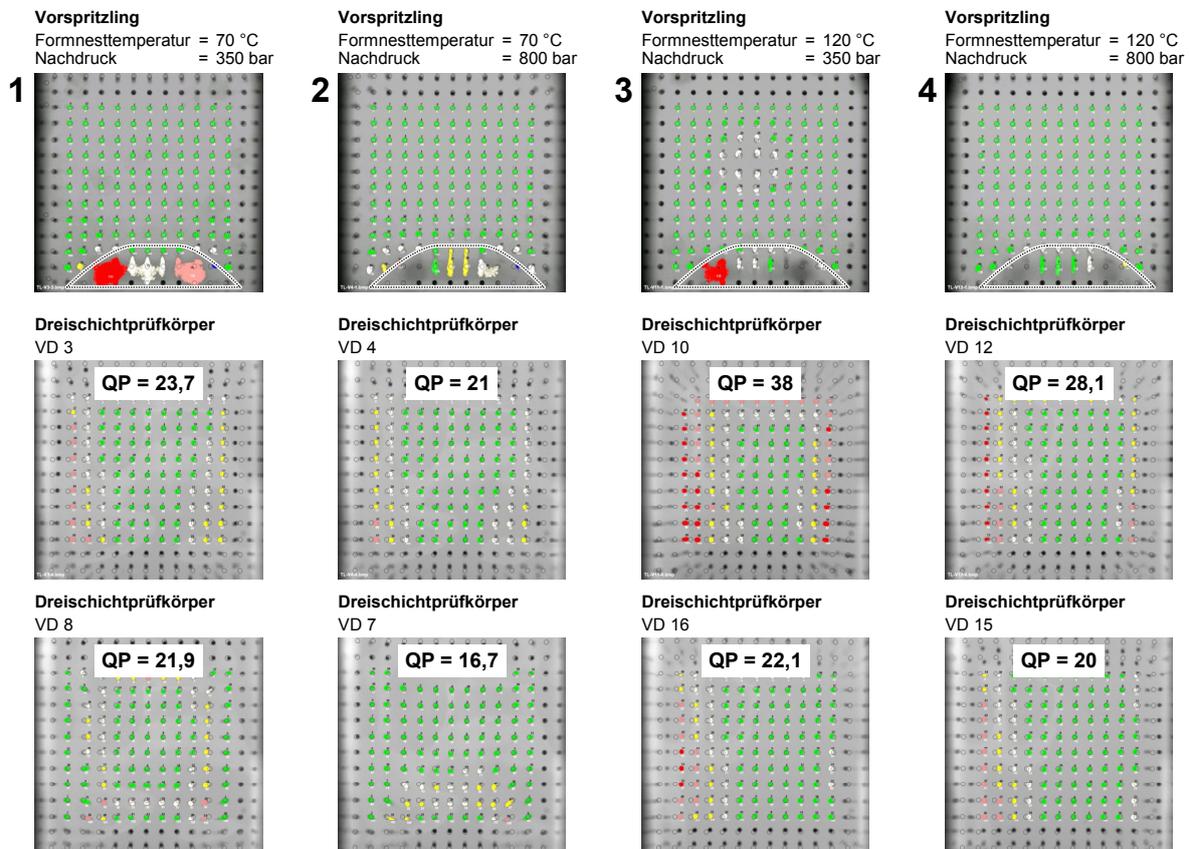


Bild 5.34 Punkteverschiebung verschiedener Dreischichtprüfkörper, die aus demselben Vorspritzling hergestellt wurden
VD 3, VD 4, VD 10, usw.: verschiedene Versuchseinstellungen

Die Punkteverschiebungen in den Vorspritzlingen sind alle sehr ähnlich und weisen keine großen Unterschiede in dem betrachteten Bauteilbereich auf. Eine Ausnahme bildet der Vorspritzling in Reihe 3, der mit einer Formnesttemperatur von 120 °C und einem Nachdruck von 350 bar hergestellt wurde. Er weist eine 2,5 mm tiefe Einfallstelle auf, die vom Immersionsöl nicht mehr ausgeglichen wird. Die entsprechenden Dreischichtprüfkörper sind unter den Vorspritzlingen dargestellt. Alle zeigen andere Punkteverschiebungen als die zugehörigen Vorspritzlinge. Wie zu erkennen ist, können aus einem Vorspritzling mit einer bestimmten Einstellung verschiedene Dreischichtprüfkörper mit unterschiedlichen Punkteverschiebungen und Qualitätszahlen hergestellt werden. Selbst die sehr große Einfallstelle im Vorspritzling aus Reihe 3 ist in der Punkteverschiebung der entsprechenden Dreischichtkörper nicht mehr sichtbar. Sie wird durch die Überspritzung derart ausgeglichen, dass kein durch die Messung erkennbarer Brechzahlunterschied mehr vorliegt und somit die Lichtstrahlen in diesem Bereich nicht abgelenkt werden.

5.8.2 Punkteverschiebung nach Überspritzen und Schichtentrennung

Aufbauend auf den Ergebnissen aus dem vorangegangenen Kapitel wird ein Dreischichtprüfkörper durch das Auftragen von Farbe so präpariert, dass die Haftung zwischen Vor- und Nachspritzlingen stark reduziert wird und eine vollständige Trennung der Schichten nach dem Spritzgießen möglich ist. Hierzu werden die Versuchsreihen VD 11 und VD 8 verwendet, die folgende Einstellungen haben: Formnesttemperatur VS = 120 °C, Nachdruck VS = 350 bar, Formnesttemperatur NS = 120 °C, Nachdruck NS = 800 bar und Kühlzeit NS = 420 s. Bei VD 8 ist die Formnesttemperatur VS = 70 °C und die anderen Parameter sind wie bei VD 11. In Bild 5.35 links ist die Punkteverschiebung der Versuchsreihe VD 11 und rechts daneben die der Versuchsreihe VD 8 gezeigt.

Das Punktemuster im Vorspritzling (Bild 5.35 oben links) zeigt analog zu den Ergebnissen in Bild 5.34 Reihe 3 eine tiefe Einfallstelle in der Mitte der Vorspritzlingsoberfläche. Nach dem Überspritzen ist diese im Dreischichtkörper nicht mehr erkennbar, Bild 5.35 oben Mitte. Es stellt sich vielmehr das für diese Prozessparameter charakteristische Punktemuster „starkes längliches Verziehen der äußeren Punkte nach innen“ dar.

Die beiden unteren Bilder zeigen die gemessenen Punkteverschiebungen im Vorspritzling (unten links) und in einer Schicht des „Nachspritzlings“ (unten Mitte) nach der Trennung der Schichten aus dem Dreischichtprüfkörper. Sehr gut ist die charakteristische Punkteverschiebung, die im Dreischichtkörper gemessen wird, auch im Vorspritzling zu erkennen. Hingegen zeigt die überspritzte Schicht ein homogenes und weitgehend verzerrungsfreies Punktbild. Zur Verifizierung dieser Beobachtung wurde der Dreischichtprüfkörper der Versuchsreihe VD 8 entsprechend präpariert und nach dem Überspritzen getrennt. Bild 5.35 rechts zeigt hierzu die gemessene Punkteverschiebung des Dreischichtprüfkörpers und die Punkteverschiebung

(verschmierte Acht) in dem entsprechenden Vorspritzling nach der Schichten-trennung. Auch dieses Ergebnis zeigt, dass das charakteristische Punktemuster fast ausschließlich im Vorspritzling nach der Überspritzung vorliegt.

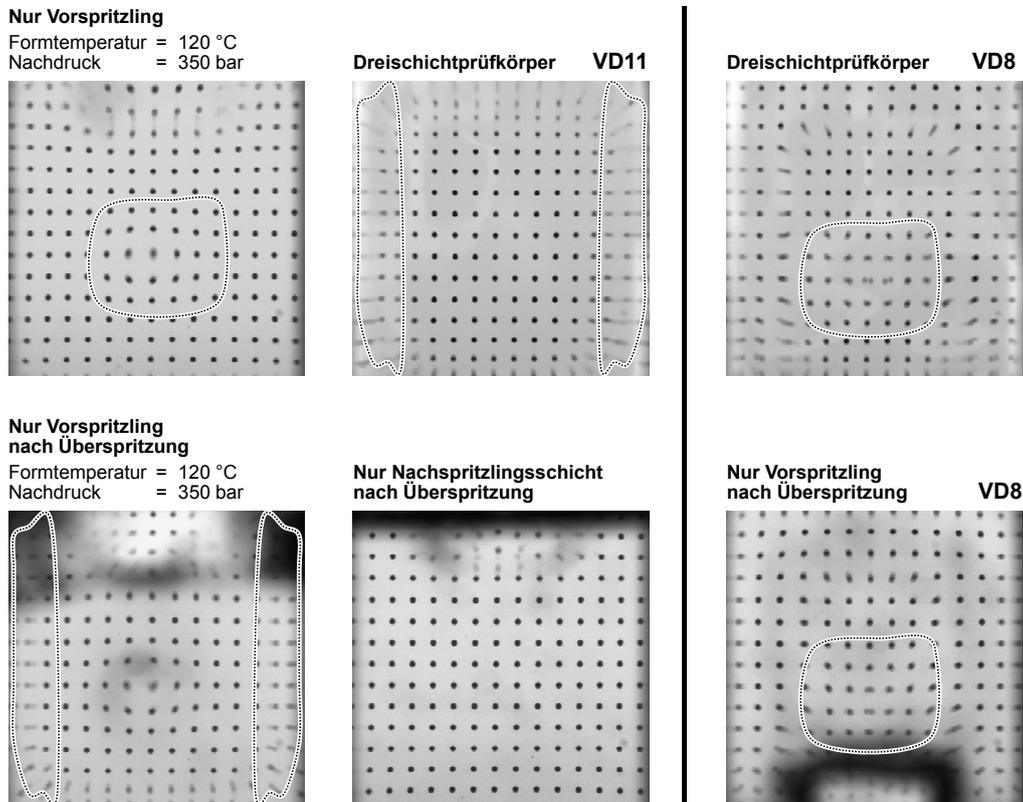


Bild 5.35 Punkteverschiebung in Vor- und Nachspritzling vor und nach der Überspritzung

links: Versuchsreihe VD 11

rechts: Versuchsreihe VD 8

5.9 Ergebnisse der Polarisationsoptik

Die beobachteten Doppelbrechungseffekte werden durch Spannungen und Orientierungen erzeugt. Durch die Untersuchung dieser Eigenspannungen und Molekülorientierungen in den Prüfkörpern sollen Anhaltspunkte für die unterschiedlichen Entstehungsursachen und hieraus abgeleitet für die Ursachen der beobachteten Punkteverschiebungsmuster und anderer prüfkörperspezifischer Verhaltensweisen gefunden werden. Die dargestellten Schnittpositionen sind in Kap. 4.4 beschrieben.

5.9.1 Einschicht- und Zweischichtprüfkörper

Einschichtprüfkörper

In Bild 5.36 sind die polarisationsoptischen Aufnahmen entsprechend der Schnittposition 1 aus Bild 4.16 (Formteilmitte bei dem Einschichtprüfkörper) dargestellt.

Ausgesucht wurden Versuchseinstellungen mit hohem und niedrigem Nachdruck, sowie kurzer und langer Kühlzeit. Zusätzlich wurden zwei Versuchseinstellungen noch gemäß Kap. 4.6 wärmebehandelt und danach wieder polarisationsoptisch untersucht. Zunächst werden die nicht wärmebehandelten Proben betrachtet. Hierbei wird im Vergleich der beiden Proben VE 2 und VE 3 der Einfluss des Nachdrucks sichtbar. Die Probe mit dem höheren Nachdruck (VE 2) hat angussnah Isochromatenlinien, die bei VE 3 nicht erkennbar sind. Allerdings zeigen die Isochromatenverläufe bei dem hohen Nachdruck eine gleichmäßig dichte Verteilung, was auf eine gleichmäßige Wirkung des Nachdrucks schließen lässt. Bei der niedrigen Nachdruckeinstellung sind die Ränder der Probe mit dichten Isochromatenlinien versehen und zusätzlich liegen gegenüber dem Anguss Isochromatenverdichtungen vor. Durch die Reduzierung der Kühlzeit (VE 4) verstärken sich diese Isochromatenverdichtungen, was ein Grund für die gemessenen schlechteren Punkteverschiebungen sein könnte.

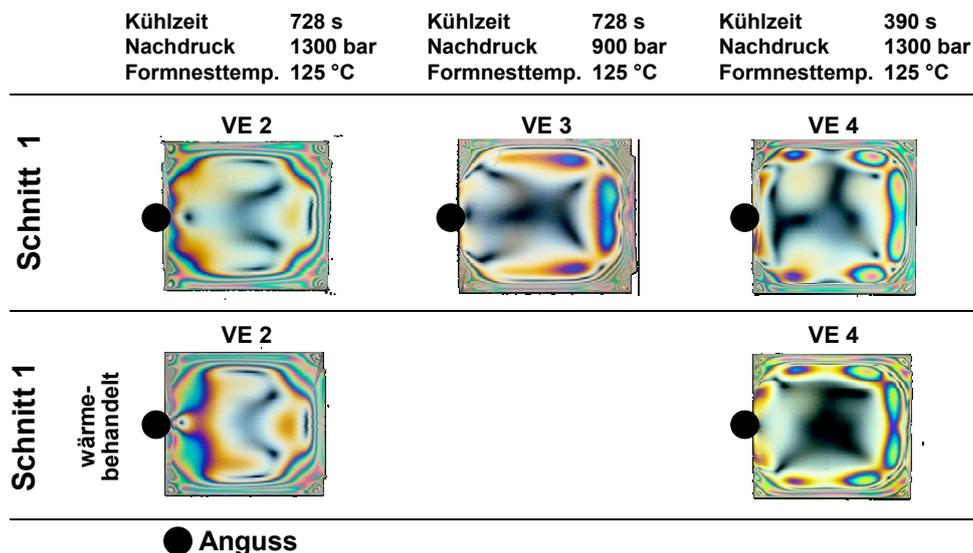


Bild 5.36 Polarisationsoptische Aufnahmen an Einschichtprüfkörpern
oben: nicht wärmebehandelt, unten: wärmebehandelt
VE 2, VE 3, VE 4: Versuchseinstellung

Der Vergleich der wärmegeagerten und nicht wärmegeagerten Proben zeigt, dass es bei der langen Kühlzeit (vgl. VE 2) zu einer Erhöhung der Isochromatendichte im Innern im angussnahen Bereich der wärmegeagerten Probe kommt. Am Rand wird die Verteilung etwas breiter, was auf einen leichten Abbau von Spannungen hinweist. Insgesamt wird hierdurch die in Bild 5.26 gezeigte Verschlechterung der Punkteverschiebung sichtbar gemacht und dargestellt, dass der bei den langen Kühlzeiten vorliegende Spannungshaushalt der Probe kaum durch die hier verwendeten Wärmelagerungsbedingungen verbessert wird. Die Probe mit der kurzen Kühlzeit (VE 4) zeigt nach der Wärmelagerung besonders in der Formteilmitte kaum noch Isochromatenlinien und am Rand eine etwas breitere Verteilung. Dies deutet auf eine

Spannungsreduzierung in der Probe hin und bestätigt die Verbesserung der Punkteverschiebung aus Bild 5.26.

Zweischichtprüfkörper

In Bild 5.37 sind ausgewählte Einstellungen des Zweischichtprüfkörpers polarisationsoptisch untersucht worden, um den Einfluss des Nachdrucks im Nachspritzling, der Kühlzeit und der Formnesttemperatur zu untersuchen. Schnitt 1 liegt im Nachspritzling und Schnitt 2 im Vorspritzling analog Kap. 4.4.

Ein höherer Nachdruck im Nachspritzling erzeugt dichtere Isochromatenverteilungen im Vorspritzling (vgl. Einstellung VZ 4 mit VZ 5). Dies wird prinzipiell auch im Vergleich der Proben VZ 8 (750 bar) und VZ 9 (600 bar) festgestellt. Hieraus kann geschlossen werden, dass höhere Nachdrücke im Nachspritzling höhere Spannungen im Vorspritzling erzeugen, was die Ergebnisse der Varianzanalyse (Bild 5.9 d) sichtbar macht, wonach höhere Nachdrücke im Nachspritzling schlechte Qualitätszahlen erzeugen.

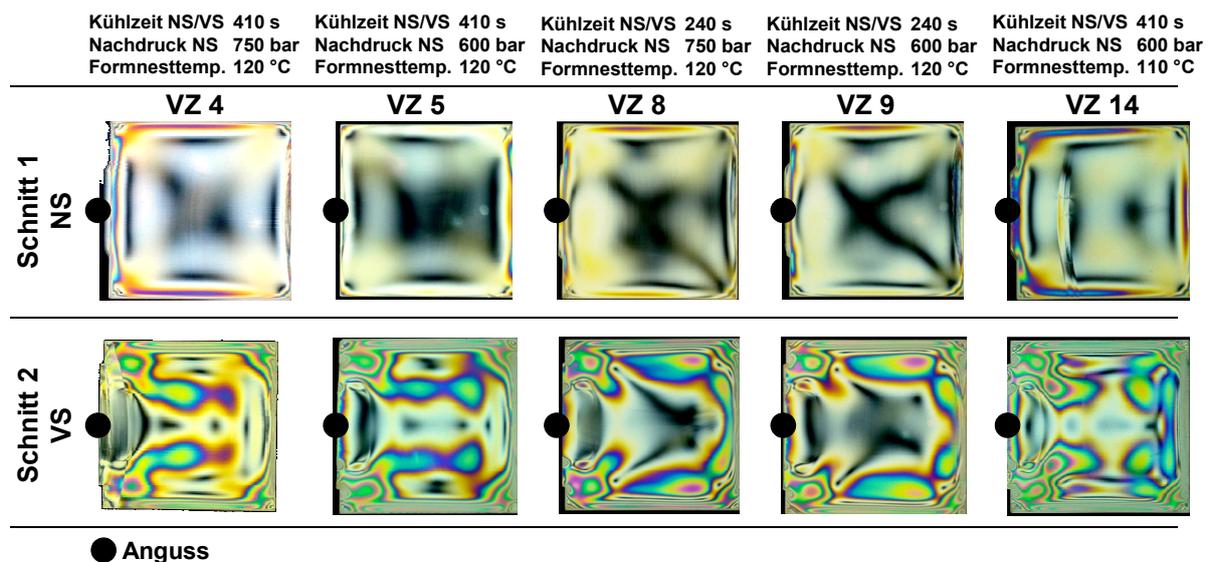


Bild 5.37 Polarisationsoptische Aufnahmen an Zweischichtprüfkörpern

VS: Vorspritzling, NS: Nachspritzling

VZ 4, VZ 5, VZ 8, VZ 9, VZ 14: Versuchseinstellung

Kurze Kühlzeiten erzeugen jedoch weniger Isochromaten in der Formteilmitte des Vorspritzlings, aber eine komplexere Verteilung an den Formteilträndern (vgl. z. B. VZ 4 mit VZ 8). Die Nachspritzlinge zeigen im Vergleich zu den Vorspritzlingen nur in den Formteilträndern dichte Isochromatenlinien. Dies deutet darauf hin, dass maßgeblich die Vorspritzlinge durch das Überspritzen beeinflusst werden. Die Probe VZ 14 zeigt im Vergleich zur Probe VZ 5 den Einfluss der Formnesttemperatur. Bei niedriger Formnesttemperatur (VZ 14) wird die Isochromatenverteilung sowohl im Vorspritzling als auch im Nachspritzling dichter. Besonders ausgeprägt ist dies im

Vorspritzling in den Formteilecken. Dies weist auf einen erhöhten Spannungshaushalt hin.

5.9.2 Dreischichtprüfkörper

Bild 5.38 zeigt die polarisationsoptischen Ergebnisse, die mit der in Kap. 4.4 vorgestellten Prüfmethode hergestellt wurden. Im Bild 5.38 sind außerdem die bei den gewählten Einstellungen beobachteten Punkteverschiebungsmuster abgebildet.

Vergleich von VD 4 mit VD 7

Die Versuchseinstellungen VD 4 und VD 7 sind mit kalter Einstellung der Formnesttemperatur VS (70 °C) hergestellt worden. Wobei VD 7 eine längere Kühlzeit hat. Durch die niedrige Formnesttemperatur sind beide Vorspritzlinge während des Überspritzvorgangs kälter. Dies zeigt sich deutlich in der Isochromatenverteilung in Schnitt 4. An den Stellen, wo der Vorspritzling vermutet werden kann, befinden sich sehr enge Verteilungen, was als Zentren hoher Spannungen zu deuten ist. Betrachtet man dazu die Mittenschnitte 1 der beiden Einstellungen, so zeigen die Isochromaten von VD 7 eine engere Verteilung, was auf höhere Spannung in der Mitte des Vorspritzlings hindeutet. Durch ein längeres Abkühlen unter Formzwang scheinen sich höhere Spannungen im Formteil aufzubauen, was die Ursache für die beobachteten Punkteverschiebungsmuster von VD 7 sein könnte. Bei VD 4 liegen im Mittelschnitt 1 in den Randbereichen sehr enge Isochromatenlinien vor, was an dieser Stelle auf hohe Gangunterschiede (Spannungen) verweist, wodurch die Verschiebung der Punkte (Muster 1) nach innen zu erklären wäre.

Vergleich von VD 12 mit VD 15

Die Versuchseinstellungen VD 12 und VD 15 sind mit warmer Einstellung der Formnesttemperatur des Vorspritzlings (120 °C) hergestellt worden. Es sind deshalb die scharf abgetrennten Bereiche zwischen Vor- und Nachspritzling im Schnitt 4 nicht mehr vorhanden. Die Isochromatenverteilung der Einstellung VD 15 ist relativ gleichmäßig, was in einer schnelleren Entformung und damit Abkühlung ohne Formzwang im Vergleich zu VD 12 seinen Ursprung haben könnte. Betrachtet man auch hier wieder die Mittelschnitte 1, so erkennt man für die Einstellung VD 15 eine homogene Verteilung im Inneren. Hingegen deuten die engen Isochromatenverteilungen bei VD 12 auf eine erhöhte Spannungskonzentration hin. Die ist allerdings weniger stark ausgeprägt als bei der Einstellung VD 7, die dieselbe Kühlzeit hat, aber mit einer kälteren Formnesttemperatur hergestellt wurde. Auffallend sind bei VD 12 und VD 15 die engen Isochromatenverteilungen an den Rändern der Schnitte 1. Dies könnte eine Erklärung für die beobachteten Punkteverschiebungen sein. Stärker ausgeprägt ist das Phänomen bei VD 12, wodurch auch das Punktemuster stärker ausgeprägt ist als bei VD 15.

Die äußeren Schnitte 2 und 3 sind bei allen vier Prozesseinstellungen in den Mittenbereichen sehr homogen. Dies bestätigt die Ergebnisse aus Kap 5.8, wonach die

Punktemuster fast ausschließlich im überspritzten Vorspritzling entstehen. Auch hier sind die Randbereiche mit einer engen Isochromatenverteilung belegt, was auf Spannungen hinweist.

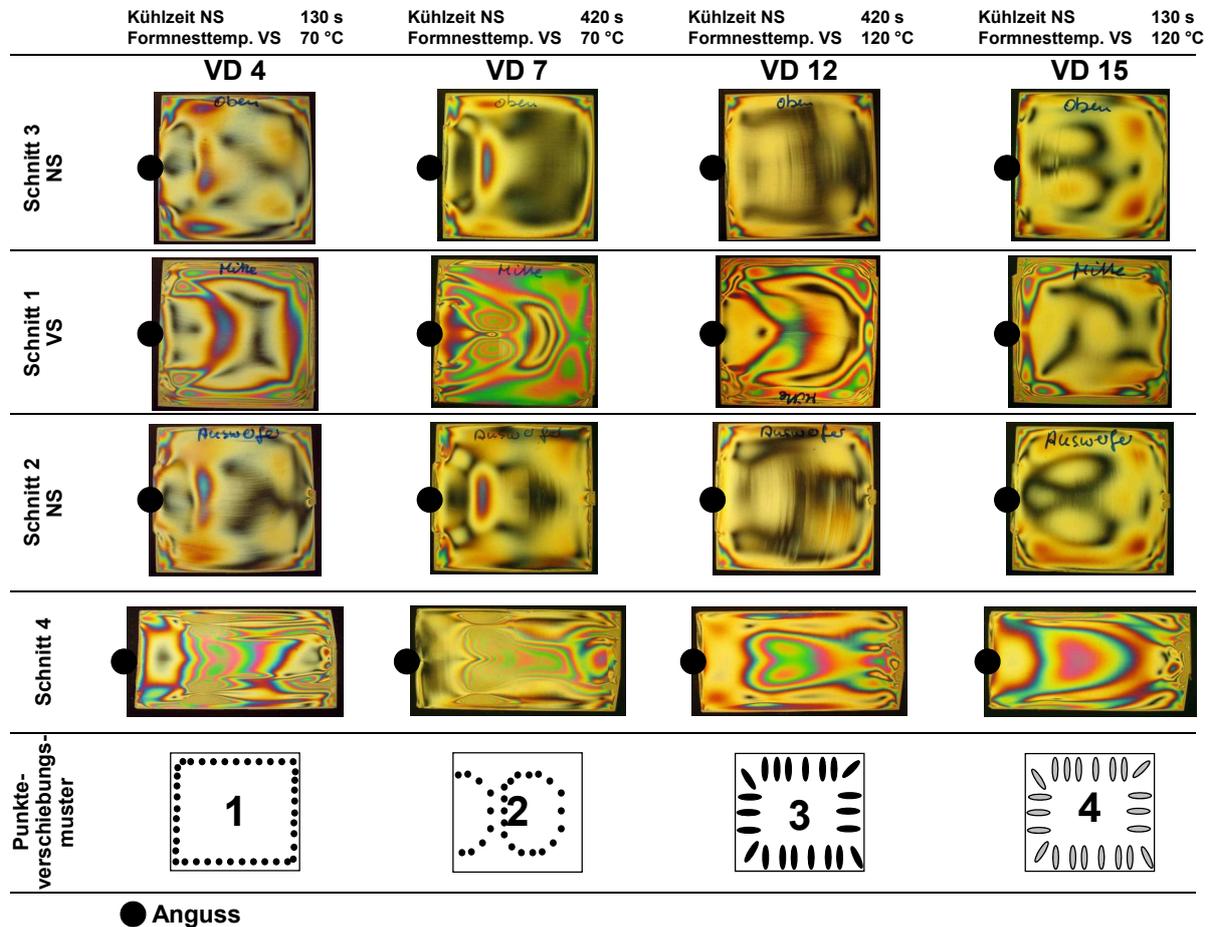


Bild 5.38 Polarisationsoptische Aufnahmen an Dreischichtprüfkörpern
 Nachdruck im Nachspritzling und Vorspritzling: 800 bar
 VS: Vorspritzling; NS: Nachspritzling; Schwarze Punkte: Angussbereich
 VD 4, VD 7, VD 12, VD 15: Versuchseinstellungen

Aus den Ergebnissen der polarisationsoptischen Untersuchung kann geschlossen werden, dass die Kombinationen von Formnesttemperaturen und Kühlzeit im Nachspritzling die Isochromatenverteilung und damit auch die Spannungsverteilung stark beeinflussen. Die beobachteten Punktemuster lassen sich durch die Isochromatenverteilung erklären. Es scheint, dass besonders die langen Kühlzeiten erhöhte Spannungen verursachen (VD 7 und VD 12). Die Untersuchungen bestätigen ebenfalls die bisherigen Ergebnisse, wonach der Hauptteil der spannungsinduzierten Punkteverschiebungen in den Vorspritzlingen während des Überspritzens und der nachfolgenden Abkühlung entsteht.

6 Diskussion und Bewertung der Ergebnisse

Zur Untersuchung der Effekte und Verhaltensweise der Mehrschichtsysteme war es neben der Prozessanalyse notwendig, durch Zusatzuntersuchungen die Wirkmechanismen bei der Herstellung zu betrachten. In der nachfolgenden Diskussion und Bewertung der Ergebnisse werden deshalb zunächst die erkannten Wirkmechanismen bei der Herstellung dargestellt. Danach wird die Prozessanalyse diskutiert, und abschließend werden die drei Prüfkörpergeometrie in Bezug auf Abformgenauigkeit, erreichbare Kühlzeiten und innere Eigenschaften miteinander verglichen.

6.1 Wirkmechanismen bei der Herstellung

Die bei der Herstellung wirkenden Drücke und die bei der Abkühlung vorliegenden Temperaturen haben maßgeblichen Einfluss auf die entstehenden Werkstoffeigenschaften und damit auf das Verhalten der Prüfgeometrien unter den durchgeführten Versuchsbedingungen. Eine Analyse der Verhaltensweisen unter der Berücksichtigung der Drücke und Temperaturen soll deshalb Erkenntnisse über mögliche unterschiedliche Effekte zwischen den Prüfkörpergeometrien aufzeigen. Hierzu fasst Tabelle 6.1 die aus dem Stand der Technik bekannten Prozessgrößen zusammen, die auf die Herstellbedingungen und Eigenschaften der Prüfkörper Einfluss nehmen. Zusätzlich sind die Abkühlgeschwindigkeit und die Wärmelagerung mit angegeben.

Prozessgrößen und -bedingungen	Einfluss
Nachdruck	Verdichtung, Schwindung, Spannungen, Orientierungen, Entformung unter Restdruck, Kompression von Vor- und Nachspritzling
Massetemperatur	Zustandsbereich (Glas, entropieelastisch, Schmelze), Relaxationszeit (Spannungen, Orientierungen)
Formnesttemperatur	Temperaturverlauf, Zustandsbereiche, Abkühlgeschwindigkeit, Volumen der Vorspritzlinge, Spannungen
Kühlzeit	Eingefrorene Wanddicken, Formzwang, Spannungen, Temperaturen
Abkühlgeschwindigkeit	freies Volumen, Deformationsenergie, Spannungen
Wärmelagerung	Rückstellung von Deformationsenergie, Verringerung des freien Volumens, Vergrößerung des „eingefrorenen“ freien Volumens

Tabelle 6.1 Prozessgrößen und deren Einfluss

Die Einflüsse der Prozessgrößen überlagern sich bei der Herstellung der Probekörper. Trotzdem lassen sich bestimmte Effekte recht eindeutig bestimmten Prozessgrößen zuordnen. Da die Prozessgrößen ihrerseits wieder Druck, Temperatur und Zeit beeinflussen, lassen sich durch die oben benannte separate Betrachtung von Druck, Temperatur und Zeit die Effekte untersuchen.

6.1.1 Einfluss des Drucks

Nachdruck, Nachdruck in den Nachspritzlingen

Die Betrachtung der Wanddicken nach dem Spritzgießen zeigt bei allen Prüfkörpern einen großen Einfluss des Nachdrucks (Nachdruck im Nachspritzling bei den Mehrschichtprüfkörpern), Bilder 5.20, 5.21, 5.22. Hierbei entstehen durch hohe Nachdrücke größere Wanddicken. Der hohe Nachdruck bewirkt eine höhere Verdichtung des Materials (bei den Mehrschichtsystemen das der Nachspritzlinge), so dass die thermische Schwindung reduziert wird. Durch die Wärmelagerung kommt es zu einer Vergrößerung der Proben, besonders bei den hohen Druckeinstellungen, Bilder 5.25, 5.27, 5.29. Hieraus lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

Die thermische Schwindung überwiegt bei der Herstellung der Ein- und Zweischichtprüfkörper (Wanddicken werden alle kleiner als die Kavitäts-Istwanddicke). Sie lässt sich durch die bekannte Wirkung des Nachdrucks beeinflussen. Durch die Wanddickenerhöhung nach der Wärmebehandlung wird sichtbar, dass es zu einer bleibenden Kompression bestimmter Volumenbereiche bei der Entformung kommt, die sich bei der Wärmelagerung „entspannen“. Es treten hiernach folgende Effekte überlagernd auf:

Thermische Schwindung bei der Abkühlung nach Kap. 2.3.2 Bild 2.15.

Rückstellung des Volumens mittels eingefrorener Deformationsenergie und Ausdehnung des „eingefrorenen“ zu geringen, freien Volumens durch Kompression während der Abkühlung sowohl bei Entformung als auch nach Warmlagerung (Kap. 2.3.1 Bild 2.14).

Überlagert wird dies bei der Warmlagerung durch Reduzierung des zu großen, eingefrorenen freien Volumens im Fall schneller Abkühlung (Nachschwindung) (Kap. 2.3.1 Bild 2.13).

Bei der Entformung wird sich direkt eine energieelastische Vergrößerung des komprimierten Schwingungsausdehnungsvolumens und der Deformationsenergie einstellen (vgl. Punkt 7 in Bild 2.14). Der zeit- und temperaturabhängige Volumenanteil und das freie Volumen bleiben eingefroren [80, 82, 83]. Sichtbar wird bei der Entformung bei den Ein- und Zweischichtprüfkörpern die thermische Schwindung. Durch die Wärmelagerung streben die überverdichteten Volumenanteile den Gleichgewichtszustand an (vgl. Punkt 8 in Bild 2.14). In der Nähe der Glasübergangstemperatur kann sich das komprimierte freie Volumen entsprechend dem Gleichgewichtszustand bei Raumtemperatur einstellen. Begleitet wird dies durch den weiteren Abbau von gespeicherter Deformationsenergie [80, 82]. Überlagert werden diese Effekte bei der Wärmelagerung durch Reduzierung (Nachschwindung) eines zu großen freien Volumens, welches sich durch zu schnelle Abkühlung eingestellt hat. Dieser Effekt ist jedoch der beschriebenen Expansion untergeordnet.

Bei den Dreischichtprüfkörpern treten die beschriebenen Effekte durch den Nachdruck des Nachspritzlings ebenfalls auf. Wie oben erwähnt werden die Wand-

dicken bei der Entformung durch die reduzierte Schwindung der Nachspritzlinge ebenfalls größer. Nach der Wärmelagerung zeigen die Prüfkörper mit hohem Nachdruck im Nachspritzling auch größere Wanddicken, so dass die beschriebenen Effekte des Drucks auf das freie Volumen und auf die Deformationsenergie hier auch wirken. Allerdings zeigt sich bei den Dreischichtprüfkörpern ein ausgeprägter Einfluss von Kühlzeit des Nachspritzlings und Formnesttemperatur des Vorspritzlings bei der Wanddickenausbildung nach Entformung und nach der Wärmelagerung. Dies wird in Kap. 6.1.2.3 näher untersucht.

Nachdruck im Vorspritzling:

Der Nachdruck im Vorspritzling des Dreischichtprüfkörpers hat einen sehr geringen Einfluss auf die hier betrachteten Ergebnisse, Bild 5.22.

Dies bestätigt sich auch bei den Zweischichtprüfkörpern. Der Einfluss des Nachdrucks im Vorspritzling ist ebenfalls sehr gering, Bild 5.21. Hierbei werden bei der hohen Einstellung (1150 bar) leicht niedrigere Wanddicken gemessen. Der Vorspritzling wird sich bei seiner Herstellung wie ein Einschichtprüfkörper mit einer Reduktion der Schwindung und durchaus auch mit Expansionseffekten bei der hohen Druckeinstellung verhalten. Hierdurch wird bei den hohen Einstellungen (1150 bar) das Volumen der Vorspritzlinge größer und somit werden dünnere Nachspritzlinge erzeugt, Bild 6.1 unten. Durch das damit verbundene reduzierte Expansionspotential der Nachspritzlinge wird die Wanddickenvergrößerung dann reduziert. Weiterhin wird durch die Erwärmung des Vorspritzlings bei der Überspritzung sein Expansionspotential reduziert. Bei der niedrigen Druckeinstellung (1075 bar) haben die Vorspritzlinge tendenziell ein kleineres Volumen, die Nachspritzlinge werden dadurch tendenziell größer, haben damit ein höheres Kompressionsvolumen und höheres Potential zur Expansion nach der Entformung. Die Wanddicken werden so etwas größer. Dieser Zusammenhang gilt für beide Kühlzeiten, Formnesttemperaturen und Nachdrücke im Nachspritzling.

Der Nachdruck im Vorspritzling des Zweischichtprüfkörpers, hergestellt mit 120 °C Formnesttemperatur, zeigt bei der Wärmebehandlung bei den beiden Kühlzeiten einen unterschiedlichen Effekt auf die Wanddickenausbildung, Bild 5.27: Bei der langen Kühlzeit (410 s) vergrößern sich die Proben mit geringerem Nachdruck im Vorspritzling (1075 bar) und bei der kurzen Kühlzeit (240 s) vergrößern sich die Proben mit dem hohen Nachdruck VS (1150 bar), Bild 6.1 unten rechts.

Beide Effekte haben ihre Ursache darin, dass bei der Wärmebehandlung die oben beschriebene Expansion durch die zeit- und temperaturabhängigen Anteile eines komprimierten freien Volumens in Verbindung mit dem Abbau von Deformationsenergie (vgl. Kap. 2.3.1) stattfindet. Durch die kombinierte Betrachtung von Nachdruck und Kühlzeit lässt sich dies untersuchen: Bei der kurzen Kühlzeit (240 s) haben die Vorspritzlinge aufgrund der höheren Formteiltemperaturen bei Entformung generell ein größeres Volumen und die Nachspritzlinge damit ein geringeres Volumen (Bild 6.1 oben). Durch die zusätzliche höhere Verdichtung (1150 bar)

während des Herstellens der Vorspritzlinge stellt sich dann auch im Vorspritzling ein Expansionspotential ein, das die Wanddickenerhöhung nach der Wärmebehandlung bewirkt. Ein Teil dieses Expansionspotentials wird sich bei der Überspritzung und der damit verbundenen Erwärmung über T_g abbauen.

Bei der langen Kühlzeit (410 s) sind die Vorspritzlinge kälter und haben somit ein kleineres Volumen. Hierdurch sind die Nachspritzlinge tendenziell größer und haben ein höheres Expansionspotential nach der Entformung, so dass deren Volumenzunahme bei der Wärmebehandlung überwiegt. In Bild 6.1 ist die beobachtete Wechselwirkung der Parameter eingetragen. Die Einzeleffekte von Nachdruck und Kühlzeit verstärken sich bei der jeweiligen Kombination und führen zu dem dargestellten Verhalten.

Prozessparameter	Wanddickenausbildung						
	Spritzgießen		Entformung		Wärmebehandlung		
Kühlzeit VS/NS	NS						
	VS						
Nachdruck VS	NS						
	VS						

Bild 6.1 Qualitativer Effekt des Nachdrucks und der Kühlzeit auf die Wanddickenausbildung
Zweischichtprüfkörper, VS: Vorspritzling, NS: Nachspritzling

Die beschriebenen Effekte werden bei beiden Kühlzeiten in der Wärmebehandlung durch eine Reduzierung des überschüssigen freien Volumens (Nachschwindung) überlagert. Diese Überlagerung und die beschriebenen Druckeffekte werden bei der niedrigeren Formnesttemperatur (110 °C) zu Gunsten einer Reduzierung der höheren Deformationsenergie durch die erhöhte Abkühlgeschwindigkeit verschoben. Die vorher beschriebenen Effekte sind kaum mehr sichtbar (Bild 5.27 rechts).

Die Messergebnisse lassen sich durch die bekannte Theorie erklären. Allerdings ist auch zu erkennen, dass die Überlagerung der beschriebenen Effekte nicht eindeutig aus den Messergebnissen hervorgeht. Eine Überprüfung dieser Erklärung könnte durch Wanddickenvermessungen von Schnitten erfolgen. Dies konnte in dieser Arbeit jedoch nicht durchgeführt werden.

6.1.2 Einfluss der Temperatur

Die Betrachtung des Temperaturverlaufes während der Abkühlung gibt Aufschluss darüber, in welchem Zustandsbereich (Glas, entropieelastisch, Schmelze), insbesondere unter der Einwirkung des Nachdrucks, sich die Probe befindet. Hierdurch

lassen sich Rückschlüsse auf Spannungen und Orientierungen im Formteil ziehen. Insbesondere lässt sich hierdurch die Ursache der Waddickenausbildungen der Prüfkörper weiter untersuchen. Wichtig ist es deshalb, die Parameter zu identifizieren, die den Temperaturverlauf maßgeblich beeinflussen, Bild 6.2. Neben dem Werkstoff und der Wanddicke haben die Verarbeitungsparameter Massetemperatur und Formnesttemperatur Einfluss. Da die Massetemperatur bei allen Versuchen konstant gehalten wurde, wird ihr Einfluss nicht betrachtet. Die Formnesttemperatur nimmt Einfluss auf die Abkühlgeschwindigkeit. Bei den Mehrschichtsystemen kommt zusätzlich die gegenseitige Beeinflussung von Vor- und Nachspritzling bei der Herstellung der Teilgeometrien hinzu. Hierbei sind die Kühlzeit und die Formnesttemperatur des Vorspritzlings wichtige Größen, denn sie bestimmen die Temperaturen in den Vorspritzlingen vor der Überspritzung.

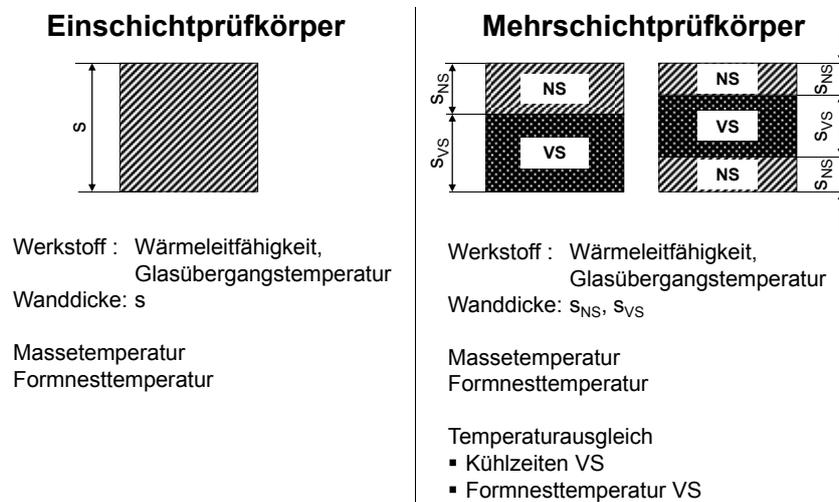


Bild 6.2 Einflussgrößen auf den Temperaturverlauf während der Abkühlung und bei Entformung
 VS: Vorspritzling, NS: Nachspritzling

Des Weiteren wird die Temperaturverteilung zum Zeitpunkt der Entformung Einfluss auf die Verhaltensweisen der Prüfkörper nehmen. Hierdurch werden u. a. das Verhältnis zwischen der Steifigkeit des Formteils (eingefrorene Randschichten) und einem möglichen Deformationspotential bestimmt. Um dies zu erfassen, werden der Einfluss der Abkühlgeschwindigkeit und die Ausbildung des Temperaturverlaufs durch andere Einflussgrößen separat diskutiert.

6.1.2.1 Temperaturverlauf bei dem Einschichtprüfkörper

Das Abkühlverhalten des Einschichtprüfkörpers und die berechneten Temperaturverteilungen entsprechen dem bekannten Verlauf einer abkühlenden Polymerschmelze im Spritzgießprozess. Bei der kurzen Kühlzeit (390 s) liegen bei der Entformung

höhere Temperaturen oberhalb von T_g in dem Probenquerschnitt vor, Bild 5.15 unten. Das immer noch unter Restdruck stehende Material kann sich auf Grund des gummielastischen Zustandes durch die beobachtete sehr große Expansion entspannen, Bild 5.20. Der Werkstoff ist in diesem Zustandsbereich in der Lage auf äußere Belastungen durch entsprechende Verschiebungen aus dem angestrebten Gleichgewicht zu reagieren. Fällt diese Belastung frühzeitig weg (hier Entformung), so führen die im Werkstoff befindlichen Rückstellkräfte in eine neue Gleichgewichtslage [80, 82]- hier die beobachtete Wanddickenerhöhung. Begünstigt wird die Expansion durch die kleineren eingefrorenen Wanddicken zum Zeitpunkt der Entformung. Hierdurch sind die Steifigkeit und damit der Widerstand gegen die Expansionskräfte geringer. Auffällig ist, dass der Einschichtprüfkörper eine Verschlechterung der Punkteverschiebung nach der Wärmebehandlung bei Prüfkörpern zeigt, die mit langer Kühlzeit hergestellt wurden (vgl. Bild 5.26). Die polarisationsoptischen Untersuchungen (Bild 5.36) zeigen hierzu, dass nach der Wärmebehandlung der Isochromatenverlauf in der Formteilmittle bei dem Prüfkörper mit langer Kühlzeit stärker ausgeprägt ist. Dies visualisiert, dass die hier durchgeführte Wärmebehandlung keine Verbesserungen der Qualitätszahl erzielt. Durch die oben beschriebene Veränderung des freien Volumens und durch die zusätzliche Expansion der Proben nach der Wärmelagerung könnten sich Effekte einstellen, die eine Art „Verzerrung“ der inneren Bereiche bewirkt, so dass es zu dem beobachteten Verhalten kommt. Allerdings wird dies bei anderen Prozesseinstellungen nicht beobachtet.

6.1.2.2 Temperaturverlauf bei dem Zweischichtprüfkörper

Die Ausbildung des Temperaturverlaufs bei den Mehrschichtsystemen wird maßgeblich durch die Beeinflussung zwischen Vor- und Nachspritzling bestimmt. Durch eine Reduzierung der Kühlzeit für Vor- und Nachspritzling verändern sich die berechneten Temperaturverläufe. Es lässt sich feststellen, dass während der Überspritzung und Abkühlung die Temperaturen bei der kürzen Kühlzeit höher sind, Bilder 5.16 und 5.17. Damit sind die Relaxationszeiten kürzer. Hierdurch können sich Spannungen und Deformationsenergien abbauen und es kann sich eher ein Gleichgewichtsvolumen einstellen. Bei der Entformung wird so weniger „Expansionspotential“ vorliegen als bei der langen Kühlzeit (410 s) und sich das Gesamtniveau der Wanddicken reduzieren, Bilder 5.21 und 6.1.

Dies wird in den polarisationsoptischen Untersuchungen sichtbar, Bild 5.37. Die Proben mit der kurzen Kühlzeit haben weniger dichte Isochromaten in der Formteilmittle als die Proben mit der langen Kühlzeit. Weiterhin haben die wärmeren Vorspritzlinge auch ein größeres Volumen. Dies bedeutet, dass bei allen Parameterkombinationen bei kurzer Kühlzeit die Nachspritzlinge tendenziell dünner sind und damit das Expansionspotential ebenfalls reduziert wird, Bild 6.1.

Nach der Wärmebehandlung ist zu erkennen, dass die Proben mit der kurzen Kühlzeit tendenziell eher dünner bleiben. Dies ist auf die kürzere Relaxationszeit

durch die höheren Temperaturen bei der kurzen Kühlzeit zurückzuführen, die bei der Überspritzung vorliegen.

Der Zweischichtprüfkörper zeigt einen großen Einfluss der kurzen Kühlzeit (240 s) auf die Verbesserung der Punkteverschiebung nach der Wärmebehandlung und hier besonders bei den Prüfkörpern, die mit hohem Nachdruck im Nachspritzling hergestellt wurden (vgl. Bild 5.28). Dies lässt sich in Verbindung mit den höheren Temperaturen bei der Überspritzung erklären. Hiermit verbunden ist, wie beschrieben, eine kurze Relaxationszeit zur Erreichung eines Gleichgewichtszustandes. Orientierungen und Spannungen können sich im Inneren der Proben abbauen bzw. reduzieren. An den Formteilrändern ergibt sich ein komplexeres Verhalten. Hier entstehen durch die Kompression, besonders der Formteilränder unterhalb von T_g , Spannungen. Diese werden durch höhere Abkühleigenspannungen (steileres Temperaturprofil) überlagert. Die so entstehende Struktur am Formteilrand lässt sich dann durch die Wärmebehandlung sehr positiv beeinflussen. Die Isochromatenverteilung bei 240 s Kühlzeit deutet dieses Verhalten ebenfalls an. Es finden sich kaum Isochromaten in der Probenmitte, aber dichte Isochromatenverteilungen und damit die angesprochenen Spannungen am Rand.

6.1.2.3 Temperaturverlauf bei dem Dreischichtprüfkörper

Bei allen Prozesseinstellungen werden Wanddicken über der Istkavitätswanddicke von 20,1 mm gemessen, Bild 5.22. Das bedeutet, dass bei allen Einstellungen eine elastische Verformung der Proben nach der Entformung stattgefunden hat. Eine Einflussgröße ist der oben diskutierte Nachdruck im Nachspritzling. Daneben erkennt man aber ein ausgeprägtes Verhaltensmuster auf die Wanddickenausbildung, das maßgeblich durch die Kombination von Kühlzeit im Nachspritzling und Formnesttemperatur des Vorspritzlings und damit von den vorliegenden Temperaturverläufen während der Abkühlung und bei der Entformung bestimmt wird.

Des Weiteren wird ein „übergeordnetes“ Punktemuster festgestellt, dass auch von der Kühlzeit im Nachspritzling und der Formnesttemperatur im Vorspritzling bestimmt wird (vgl. Bild 5.32). Ein Einfluss der Werkzeugkonstruktion auf diese Punktemuster konnte durch die Versuche aus Kap. 5.7.3 ausgeschlossen werden. In diesem Zusammenhang war die Erkenntnis sehr wichtig, dass das charakteristische Punktemuster im Dreischichtsystem durch die Überspritzung des Vorspritzlings entsteht (vgl. Bild 5.34). Durch eine Trennung von Vor- und Nachspritzling konnte nachgewiesen werden, dass das Punktemuster auch fast ausschließlich im Vorspritzling vorliegt. Die Nachspritzlinge weisen im Vergleich hierzu ein verzerrungsfreies Punktbild auf (vgl. Bild 5.35).

Mit den vorgenannten Erkenntnissen lassen sich die in der Prozessanalyse festgestellten Effekte von Kühlzeit im Nachspritzling und Formnesttemperatur im Vorspritzling und die starke Wechselwirkung zwischen diesen beiden Parametern insbeson-

dere auf die sich ausbildenden Temperaturverteilungen erklären. Bild 6.3 zeigt hierzu schematisch mögliche, aus den Versuchsergebnissen abgeleitete Effekte der Prozessparameter auf die Wanddickenausbildung nach der Entformung und nach der Wärmebehandlung. Die vier identifizierten Punktemuster sind ebenfalls schematisch dargestellt.

Kühlzeit NS = 130 s / Formnesttemperatur VS = 70 °C – Punktemuster 1:

Bei der Verfahrenskombination die zum Punktemuster 1 führt, liegt eine niedrige Formnesttemperatur im Vorspritzling vor. Das Volumen des Vorspritzlings wird deshalb kleiner sein und der Nachspritzling kann hierdurch ein etwas größeres Volumen einnehmen, so dass das Expansionspotential des Nachspritzlings größer werden kann und zur Wanddickenvergrößerung beiträgt. Die Temperaturverteilung (Bild 5.18) zeigt bei der Entformung Temperaturen nahe T_g in der Formteilmitte, und die Randschichten werden durch die Überspritzung auf die vorliegende 120 °C Formnesttemperatur des Nachspritzlings erwärmt. Das Temperaturniveau ist also durch die frühzeitige Entformung noch so hoch, dass ein Freiwerden der Deformationsenergie durch die festgestellte Expansion der Formteile ($\Delta s = 0,09$ mm bis 0,16 mm über der Istwanddicke der Kavität, vgl. Bild 5.22) möglich ist. Es stellt sich ein Gleichgewichtszustand aus dem Widerstand der eingefrorenen Randschicht und dem Expansionspotential durch die inneren Spannungen ein. Ohne Formzwang können sich so Spannungen im Mittelbereich abbauen.

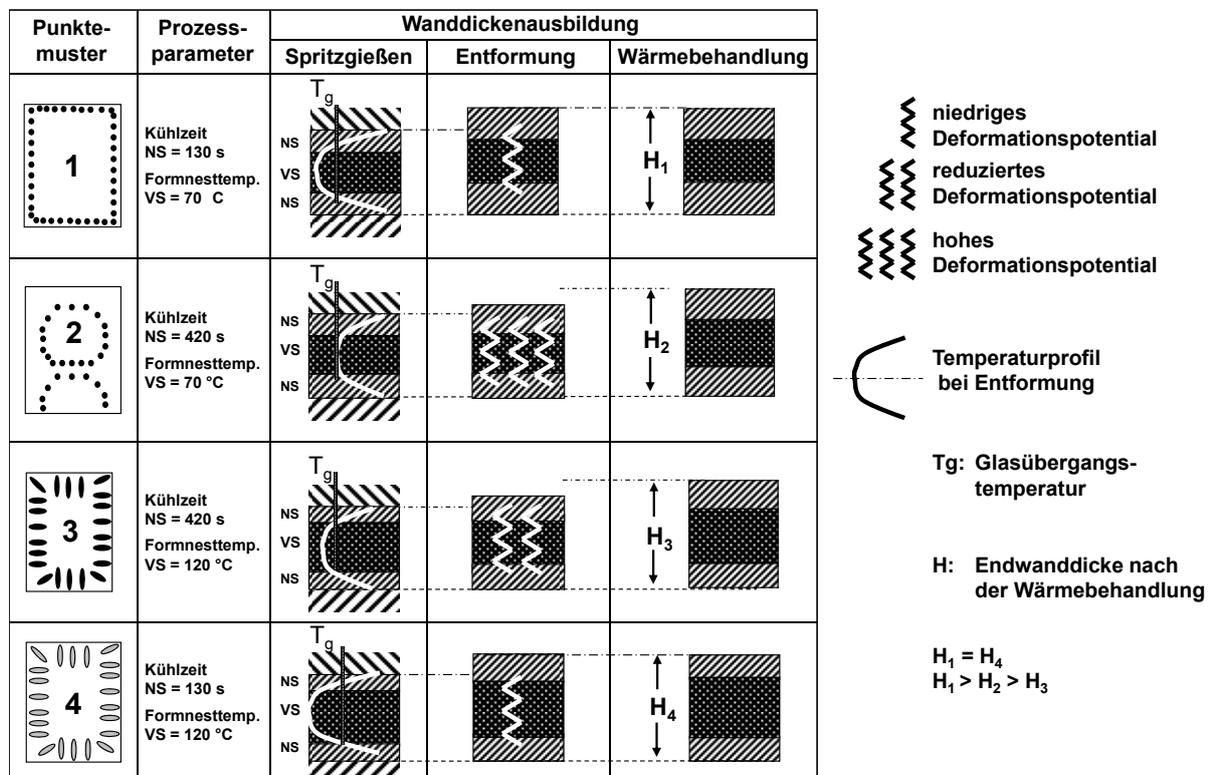


Bild 6.3

Qualitative Effekte auf die Wanddickenausbildung

Dreischichtprüfkörper, VS: Vorspritzling, NS: Nachspritzling

Die Isochromatenverteilung in Bild 5.38 zeigt in Schnitt 1 VD 4 eine homogene Verteilung in der Mitte und eine Verdichtung der Isochromaten an den Rändern, was ein Indiz für geringe Spannungen in der Formteilmitte und für höhere Spannungen an den Formteilerändern nach der Entformung ist. Dies ist durchaus auch eine Erklärung für das beobachtete Punktemuster. Der niedrige Spannungshaushalt dieser Prüfkörper wird durch die sehr geringe Wanddickenzunahme nach der Wärmebehandlung bestätigt, Bild 5.29. Die Verbesserung der Punkteverschiebung ist wiederum relativ groß und liegt hauptsächlich in den äußeren Formteilmitteln, die durch die Wärmebehandlung sehr gut beeinflusst werden können (vgl. Bild 5.30).

Kühlzeit NS = 420 s / Formnesttemperatur VS = 70 °C – Punktemuster 2:

Im Vergleich zur kurzen Kühlzeit (130 s) kühlt bei der längeren Kühlzeit (420 s) der Gesamtverbund im Werkzeug unter Spannung ab. Zum Zeitpunkt der Entformung ist das Temperaturniveau weit unter T_g abgefallen (vgl. Bild 5.18). Die bei der längeren Abkühlung vorliegenden größeren eingefrorenen Wanddicken bieten dem sich entspannenden Formteilen einen höheren Widerstand. Es bildet sich ein Gleichgewichtszustand zwischen der geringen Wanddickenerhöhung (Δs von 0,04 mm bis 0,1 mm über der Istwanddicke der Kavität, vgl. Bild 5.22) und dem bei der Entformung noch vorliegenden Expansionspotential aus. Es kommt so zu der Punkteverschiebung im Inneren der Formteile, die sich in Form der dargestellten „Acht“ zeigt. Sichtbar ist dieser Effekt durch die dichte Isochromatenverteilung in der Formteilmitte (vgl. Bild 5.38 Versuch VD 7 – Schnitt 1). Erst durch die Wärmebehandlung kommt es bei Formteilen mit diesen Verarbeitungsparametern zu einer relativ großen Wanddickenerhöhung (Δs von ca. 0,023 mm, vgl. Bild 5.29). Allerdings wird nicht die Endwanddicke nach der Wärmebehandlung erreicht, die bei der kurzen Kühlzeit vorliegt (Bild 6.3, $H_2 < H_1$). Dies begründet sich darin, dass bei der längeren Kühlzeit unter Formzwang bereits plastische Verformungen stattgefunden haben.

Die Verbesserung der Punkteverschiebung nach der Wärmebehandlung ist wiederum nicht sehr groß, was darauf hindeutet, dass trotz starker Expansion nach der Entformung und Wärmebehandlung der Formteile immer noch innere Anisotropien in den Formteilen vorliegen, Bild 5.30.

Kühlzeit NS = 420 s / Formnesttemperatur VS = 120 °C – Punktemuster 3:

Durch die Erhöhung der Formnesttemperatur im Vorspritzling auf 120 °C wird das Volumen der Vorspritzlinge größer sein. Das Volumen der Nachspritzlinge wird hierdurch kleiner, so dass deren Expansionspotential reduziert wird. Allerdings ergibt sich eine günstigere Temperaturverteilung im Gesamtverbund, so dass größere Formteilmitteln über T_g erwärmt werden (vgl. Bild 5.19). Die Relaxationszeiten werden verkürzt und es liegen im Inneren der Formteile weniger stark ausgeprägte Spannungen vor. Dies zeigen die Isochromatenverteilungen von VD 12 und VD 15 in Bild 5.38 sehr deutlich. Weiterhin kommt es wahrscheinlich im Gegensatz zu der

kälteren Formnesttemperatur (70 °C) durch die höhere Formnesttemperatur (120 °C) zu einer einheitlichen Schwindung von Vor- und Nachspritzling und damit zu einer Verschiebung der Punkte nach innen.

Bei der längeren Kühlzeit (420 s) liegt die Temperaturverteilung zum Zeitpunkt der Entformung unterhalb von T_g , Bild 5.19. Es stellt sich auch hier ein Gleichgewichtszustand zwischen der Steifigkeit der Randschichten und dem verbleibenden Deformationspotential ein. Da sich dieses durch die hohen Temperaturen während der Herstellung abbauen konnte, wird die Istwanddicke der Werkzeugkavität nahezu erreicht, Bild 5.22. Die geringere Expansion erzeugt auch hier die verbleibenden Isochromatendichten in dem Vorspritzling, Bild 5.38, VD 12, Schnitt 1. Allerdings sind weniger enge Isochromaten in der Formteilmittle erkennbar als bei der niedrigen Formnesttemperatur, VD 7. Vielmehr ist die Isochromatendichte in den Formteilerändern sehr stark ausgeprägt. Dies erklärt das stark nach innen gezogene Punktemuster und hat seine Ursache in den Schwindungseffekten von Vor- und Nachspritzling und den vorliegenden Abkühlspannungen an den Formteilerändern.

Eine nachträgliche Wärmebehandlung lässt die Prüfkörper mit dieser Versuchseinstellung wieder wachsen (Bild 5.29, $\Delta s = 0,013$ mm bis 0,028 mm). Hierbei werden die Proben mit dem hohen Nachdruck im Nachspritzling viel größer. Dies hat seine Ursache in der Vergrößerung des zeit- und temperaturabhängigen „entropieelastischen“ Anteils des freien Volumens und dem Abbau von Deformationsenergie (vergleichbar mit dem Einfluss des Nachdrucks beim Einschichtprüfkörper). Die nach der Wärmebehandlung erreichten Wanddicken sind kleiner als bei den zuvor diskutierten Einstellungen, (Bild 6.3, $H_3 < H_2 < H_1$). Dies deutet auf einen relativ großen Anteil an plastischer Deformation hin, die im entropieelastischen Zustandsbereich während der Überspritzung und Abkühlung im Werkzeug stattgefunden hat.

Die Verbesserung der Punktverschiebung ist bei diesen Prüfkörpern relativ groß im Vergleich zu den anderen Einstellungen. Durch die Wärmebehandlung werden die spannungsreichen äußeren Schichten positiv beeinflusst, so dass sich die beobachtete Verbesserung einstellt, Bild 5.30.

Kühlzeit NS = 130 s / Formnesttemperatur VS = 120 °C – Punktemuster 4:

Bei dieser Versuchseinstellung werden die größten Wanddicken nach der Entformung gemessen ($\Delta s = 0,07$ mm bis 0,17 mm – vgl. Bild 5.22). Betrachtet man hierzu wieder die berechnete Temperaturverteilung, so zeigen sich bei der Entformung sehr hohe Temperaturen in der Probe und ein großer Teil liegt weit über T_g im entropieelastischen Bereich, Bild 5.19. Wie oben beim Einschichtprüfkörper bereits erwähnt, ist der Werkstoff in diesem Zustandsbereich in der Lage, auf äußere Belastungen durch entsprechende Verschiebungen aus dem angestrebten Gleichgewicht zu reagieren. Durch die frühzeitige Entformung fällt diese Belastung weg. Hierbei sind die eingefrorenen Randschichten sehr dünn und die im Werkstoff befindlichen Rück-

stellkräfte bringen den Werkstoff in eine neue Gleichgewichtslage [80] – hier die beobachtete Wanddickenerhöhung. Spannungen und Deformationsenergien werden hierdurch abgebaut. Die polarisationsoptische Untersuchung für diese Versuchseinstellung (VD 15 in Bild 5.38) zeigt in Schnittposition 1 kaum Isochromaten und bestätigt die Vermutung des Spannungsabbaus durch die hohen Temperaturen bei der Herstellung und Entformung.

Durch den beschriebenen Abbau des Deformationspotential sind die Wanddickenerhöhungen nach der Wärmelagerung erwartungsgemäß gering ($\Delta s = 0,003$ mm bis 0,009 mm, Bild 5.29).

Die Verbesserung der Qualitätszahl ist wie bei Punktemuster 3 sehr hoch und zeigt, dass die im Rand vorliegenden Abkühl- und Expansionsspannungen sehr gut durch die Wärmelagerung reduziert werden können, Bild 5.30.

6.1.2.4 Einfluss der Abkühlgeschwindigkeit

Der Einfluss einer höheren Abkühlgeschwindigkeit wird bei Reduzierung der Formnesttemperaturen sichtbar. Hierdurch verkürzt sich die mögliche Zeit für die Einstellung eines Gleichgewichtszustandes und es wird ein größeres freies Volumen eingefroren [80, 82, 83]. Bei den Ein- und Zweischichtprüfkörpern werden deshalb größere Wanddicken bei kälteren Temperaturen gemessen, Bilder 5.20, 5.21. Allerdings wird auch ein größerer Anteil der oben beschriebenen Deformationsenergie vorliegen. Bei den Dreischichtprüfkörpern werden dünnere Wanddicken gemessen, Bild 5.22. Dies zeigt, dass hier durch eine Reduzierung der Formnesttemperatur mehr Deformationsenergie und evtl. komprimiertes, freies Volumen nach der Entformung eingefroren bleibt. Unterstützt wird dies durch eine Reduzierung des Nachdrucks im Nachspritzling bei kälteren Formtemperaturen. Die Dicken der eingefrorenen Randschichten bei der Entformung sind hierbei ebenfalls größer, so dass sich ein größerer Widerstand gegenüber einer Expansion einstellt. Dieser Effekt scheint zu überwiegen, so dass das Gesamtexpansionspotential reduziert wird.

Die Proben der Ein- und Zweischichtprüfkörper, die bei niedrigen Formnesttemperaturen hergestellt wurden, zeigen in der Wärmelagerung höhere Volumenzunahmen, als die bei hohen Formnesttemperaturen hergestellten, Bilder 5.25, 5.27. Durch das höhere freie Volumen (schnelle Abkühlung) dieser Proben wäre eine geringere Ausdehnung oder sogar Nachschwindung zu erwarten gewesen. Dieser Effekt ist hiernach vernachlässigbar gegenüber der reduzierten Relaxation durch das niedrigere Temperaturniveau, so dass die Volumenzunahme durch die bei der Wärmelagerung freiwerdende, eingefrorene Deformationsenergie der Moleküle und die sich vergrößernden „entropieelastischen“ Anteile des freien Volumens überwiegt [80, 82]. Prinzipiell überlagern sich jedoch alle Effekte.

Bei den Dreischichtprüfkörpern ergeben sich bei niedriger Formnesttemperatur (110 °C) nach der Wärmebehandlung durchweg ebenfalls größere Wanddicken als

bei der hohen Formnesttemperatur, Bild 5.29. Dies bestätigt die Annahme der eingefrorenen, höheren Deformationsenergie und des größeren eingefrorenen, freien Volumens, welches durch die Wärmelagerung frei wird bzw. sich vergrößert. Auch die Verbesserung der Qualitätszahl ist größer. Dies lässt sich durch die bei 110 °C vorliegenden höheren Abkühlspannungen und bedingt durch die kälteren Randschichten auch höheren Expansionsspannungen erklären. Diese können wiederum durch die Wärmelagerung reduziert werden.

6.1.3 Zusammenfassung

Bild 6.4 zeigt eine Zusammenstellung der erkannten Effekte bei der Herstellung der Mehrschichtprüfkörper:

Es wirken sich Einflüsse von Druck, Temperatur und Zeit aus. Hierdurch überlagern sich die thermische Schwindung, ein zu großes eingefrorenes Volumen (Abkühlung) und eine Verdichtung sowie die entstehende Deformationsenergie bei der Herstellung der Prüfkörper.

Durch die Überspritzung entstehen eine Druckbelastung des Vorspritzlings und eine Verdichtung des Volumens des Nachspritzlings.

Durch die Herstellbedingungen der Vorspritzlinge ändern sich deren Volumina und so nehmen die Vorspritzlinge Einfluss auf das Volumen der Nachspritzlinge.

Des Weiteren beeinflussen die Herstellbedingungen des Vorspritzlings dessen Temperaturverteilungen bei der Überspritzung. Somit nimmt der Vorspritzling Einfluss auf den Temperatúrausgleich mit dem Nachspritzling und bestimmt dadurch maßgeblich die Abkühlbedingungen, Relaxationszeiten und Zustandsverläufe bei der Herstellung der Mehrschichtsysteme.

Die Zeit des Gesamtverbundes im Werkzeug bestimmt das Verhältnis von eingefrorenen Randschichten zu verbleibenden Eigenspannungen. Hierdurch wird die elastische Verformung (Wanddickenzunahme) der Formteile mitbestimmt.



Bild 6.4 Effekte bei der Herstellung der Mehrschichtprüfkörper

Eine Volumenkompression des Vorspritzlings durch den Nachdruck in den Nachspritzlingen konnte nicht festgestellt werden. Dies erscheint aber zumindest theoretisch denkbar, wenn man das Verhalten einer Festkörperkompression im pV -Diagramm betrachtet, Bild 6.5.

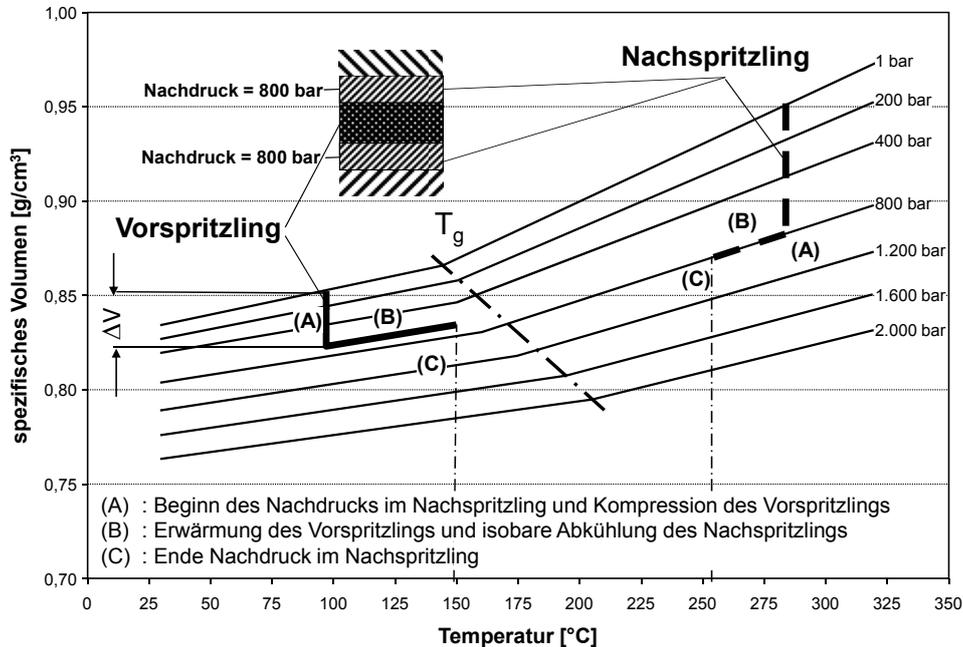


Bild 6.5 Theoretische Volumenkompression des Vorspritzlings durch den Nachspritzling am Beispiel des Dreischichtprüfkörpers
 T_g : Glasübergangstemperatur, pV -Diagramm für Makrolon® LED 2245
 ΔV : theoretisch komprimierbares Vorspritzlingsvolumen

Ein möglicher Zustandsverlauf im Vor- und Nachspritzling bis zum Ende der Nachdruckphase ist bei einem Nachdruck im Nachspritzling von jeweils 800 bar gezeigt. Bei einer angenommenen mittleren Temperatur von ca. 100 °C wird der Vorspritzling mit 800 bar komprimiert (A). Da sich bei der Festkörperkompression die Volumenkontraktion hauptsächlich durch die Reduzierung des besetzten Volumens oder Schwingungsausdehnungsvolumens ergibt, und das freie Volumen unverändert bleibt, stellt sich nicht das theoretisch mögliche Volumen bei 800 bar ein [82]. Allerdings wäre hierbei eine theoretische Volumenreduktion von ca. 2-3 % des Ausgangsvolumens möglich. Bei der Erwärmung durch den Nachspritzling nimmt das Volumen durch die thermische Ausdehnung (Bewegung der Moleküle) zu (B). Je nach Temperaturverlauf während der Kompression wird die Glasübergangstemperatur erreicht. Bei Druckentlastung (C) sollte der Vorspritzling dann, falls noch genügend hohe Temperatur vorliegt, durch eine Dekompression seinerseits Druck auf den Nachspritzling ausüben. Überlagert werden kann dies durch eine Wärmedehnung kalter Vorspritzlinge, die so ebenfalls Druck auf die Nachspritzlinge ausüben würden. Die Frage stellt sich an dieser Stelle, ob dies in einem realen Spritzgießwerkzeug

auftreten kann. Die im pvT-Diagramm vorliegenden idealen Druck- und Temperaturbedingungen werden sich in einem realen Spritzgießprozess nicht einstellen. Allerdings deutet die signifikant bessere Wanddickenabformung der Drei- und auch der Zweischichtprüfkörper an (vgl. Bilder 5.1, 5.3, 5.5), dass zusätzliche Kompressions- und Dekompressionseffekte, sowie Wärmedehnungen der Vorspritzlinge vorliegen könnten. Auch die gemessene elastische Vergrößerung der Dreischichtprüfkörper könnte ein Hinweis auf Dekompressionseffekte oder Wärmedehnungen des Vorspritzlings sein. Dies könnte anhand von Schnitten an Vorspritzlingen und Mehrschichtprüfkörpern in Nachfolgearbeiten tiefgreifender untersucht werden.

6.2 Prozessanalyse

Mit den in Kap. 6.1 erkannten Effekten und Zusammenhängen lassen sich nun die Ergebnisse der Prozessanalyse beschreiben.

Bei der Herstellung von optischen Bauteilen im Spritzgießverfahren haben die Verarbeitungsparameter einen maßgeblichen Einfluss auf die Abformung der Werkzeuggeometrie und auf die Ausbildung der werkstofflich gebundenen Eigenschaften.

Eine Fragestellung bei der Untersuchung des Herstellprozesses war, ob bestimmte Prozessparameter bei Ein- und Mehrschichtlinsen denselben Effekt auf die optischen Eigenschaften haben. Hierzu war es notwendig, die geometrischen und die inneren Eigenschaften getrennt voneinander zu bestimmen.

Als geometrische Eigenschaft wird die maximale Wanddickenabweichung gewählt. Die werkstofflich gebundenen (inneren) Eigenschaften werden durch die Verschiebung eines Punktemusters untersucht. Hierdurch werden integral Einflussgrößen wie Spannungen, Orientierungen, Doppelbrechungen, die einen Lichtstrahl beim Durchgang durch ein optisches Bauteil ablenken, berücksichtigt.

Für die Untersuchung der Einschichtprüfkörper werden die Kühlzeit, die Formnesttemperatur und der Nachdruck als Prozessgrößen ausgewählt. Ihr Einfluss auf die optischen Eigenschaften bei Einschichtlinsen ist von [24, 71, 72] gut untersucht und konnte anhand der durchgeführten Prozessanalyse an den Einschichtlinsen bestätigt werden (Kap. 5.1.1 und 5.2.1). Insbesondere war es möglich, durch das verwendete neue Messverfahren den bekannten Einfluss der Prozessparameter auf die inneren Eigenschaften darzustellen. Dies kann als weitere Validierung des Prüfverfahrens gewertet werden, so dass ein Vergleich mit den Mehrschichtprüfkörpern durchgeführt werden konnte.

Tabelle 6.2 zeigt eine qualitative Zusammenfassung und Gegenüberstellung der Effekte der Prozessparameter aus der Prozessanalyse auf das Qualitätsmerkmal „Wanddickenabweichung“ und „Qualitätszahl der Punkteverschiebung“. Die Untersuchungen der Effekte der Einstellgrößen zeigen, dass es Unterschiede in der Wirkung ähnlicher Einstellgrößen auf die erreichbaren Oberflächenabformungen und

Punkteverschiebungen zwischen Ein- und Mehrschichtprüfkörper gibt. Diese sind grau hinterlegt.

	Wanddickenabweichung					Qualitätszahl der Punkteabweichung QP				
	Kühlzeit 1)	Formnesttemperatur		Nachdruck		Kühlzeit 1)	Formnesttemperatur		Nachdruck	
		VS	NS	VS	NS		VS	NS	VS	NS
Einschicht- prüfkörper										
	+	+	+	++	++	+	-	-	-	-
Zweischicht- prüfkörper										
	-	+	+	+	++	+	0	0	-	-
Dreischicht- prüfkörper										
	++	-	n.s.	+	n.s.	-	-	+	0	-

Tabelle 6.2 Qualitative Effekte der Prozessparameter auf die Wanddickenabweichung und die Qualitätszahl der Punkteverschiebung

0,1: unterer bzw. oberer Einstellwert des Parameters,

+/- gutes bzw. schlechtes Ergebnis des Qualitätsmerkmals

++ große Verbesserung, + Verbesserung, - Verschlechterung,

0 geringer Effekt n.s. nicht signifikant

NS: Nachspritzling, VS: Vorspritzling

1) Kühlzeit NS bei Dreischicht- und Kühlzeit NS/VS bei Zweischichtprüfkörper

2) Wechselwirkung zwischen beiden Parametern erzeugt geringe QP-Zahlen

Zweischichtprüfkörper:

Bei den Zweischichtprüfkörpern liegen die Effekte der Formnesttemperaturen und der Nachdrücke im Vor- und Nachspritzling mit dem zu erwartenden Verhalten bezüglich der geometrischen Eigenschaften im Einklang. Höhere Einstellwerte dieser Parameter erzeugen geringere Formabweichungen (vgl. Bild 5.3). Dies ist nachvollziehbar, da bei dem Zweischichtprüfkörper der Vorspritzling bereits eine optische Außenfläche hat, für die eine exakte Abformung der Oberfläche notwendig ist. Alle drei Einstellgrößen haben dieselbe Einflussstärke (Gewichtung).

Allerdings hat die Kühlzeit bei höheren Einstellungen einen negativen Effekt auf die geometrische Qualitätsgröße „Dickenabweichung“. Dies ist bei dem Einschichtprüfkörper nicht der Fall und lässt sich durch die Einbeziehung von Zweifach-Wechselwirkungen mit der Formnesttemperatur und dem Nachdruck untersuchen (Kap. 5.1.2). Hiernach verstärkt eine lange Kühlzeit die negativen Effekte einer niedrigen Formnesttemperatur und eines niedrigen Nachdrucks auf die Formabweichung (vgl. Bilder 5.1 d mit 5.4).

In Bezug auf die Punkteverschiebung wird ebenfalls ein sehr ähnliches Verhalten zum Einschichtprüfkörper ermittelt. Es zeigt sich auch hier, dass bei dem Zwei-

schichtprüfkörper zwei hochwertige Teilgeometrien (Vor- und Nachspritzling) gefertigt werden. Besonders der Vorspritzling verhält sich vergleichbar einem Einschichtprüfkörper mit entsprechend geringerer Wanddicke und es gelten hierbei die bekannten Effekte von Kühlzeit und Formnesttemperatur auf die inneren Eigenschaften. Hierbei hat die Kühlzeit den stärksten positiven Einfluss (++) , was sich ebenfalls auch bei den Einschichtprüfkörpern zeigt. Eine lange Kühlzeit wirkt grundsätzlich wie eine Art Temperung. Bei der kurzen Kühlzeit bildet sich das Punktemuster am Formteilrand stärker aus. Dies lässt sich damit begründen, dass die bei der Überspritzung vorliegenden höheren Temperaturen in der Formteilmittle ein steiles Temperaturprofil mit höheren Gradienten am Rand erzeugen (vgl. Bild 5.16 mit 5.17). Hierdurch entstehen verstärkt Abkühlspannungen, so dass die Qualitätszahl bei den kurzen Kühlzeiten schlechter wird.

Einzigste Ausnahme ist der Nachdruck im Vorspritzling. Dieser erzeugt bei höherer Einstellung bessere Qualitätszahlen. Das Verhalten lässt sich durch die Wechselwirkung mit dem Nachdruck im Nachspritzling beschreiben (Kap 5.2.2). Allerdings ist der Effekt des Nachdrucks im Vorspritzling sehr gering, und bei hohen Nachdrücken im Nachspritzling nicht mehr vorhanden (vgl. Bild 5.10 a)

Durch die Überspritzung zum fertigen Zweischichtprüfkörper werden die inneren Eigenschaften durch hohe Nachdrücke im Nachspritzling negativ beeinflusst, d. h. Spannungen in Vor- und Nachspritzling (besonders in den Vorspritzling) eingebracht. Dies bestätigen die polarisationsoptischen Untersuchungen in Kap. 5.9.1, Bild 5.37 durch dichtere Isochromatenlinien bei den Proben mit höheren Nachdrücken im Nachspritzling.

Dreischichtprüfkörper

Das beobachtete Verhalten des Dreischichtprüfkörpers weicht hingegen sehr stark von dem des Ein- und des Zweischichtprüfkörpers ab.

Die Kühlzeit des Gesamtverbundes (mit starker Verbesserung ++) und der Nachdruck des Vorspritzlings (mit einer Verbesserung +) erzeugen bei höheren Einstellungen geringere Formabweichungen und decken sich damit prinzipiell mit dem Verhalten von Einschichtprüfkörpern.

Der beobachtete Effekt der Formnesttemperatur des Vorspritzlings lässt sich durch die Betrachtung der Zweifach-Wechselwirkung zwischen Formnesttemperatur VS und der Kühlzeit NS näher analysieren, Bild 5.6. Hiernach erzeugt eine hohe Formnesttemperatur VS (120 °C) nur bei der langen Kühlzeiteinstellung (420 s) geringe Formabweichungen. Bei der niedrigen Formnesttemperatur (70 °C) führt dagegen auch die kurze Kühlzeit (130 s) zu geringeren Formabweichungen. Die Ursache hierzu liegt in den hohen Temperaturen bei der Entformung der Proben, die mit kurzer Kühlzeit (130 s) und hoher Formnesttemperatur VS (120 °C) hergestellt werden, Bild 5.19. Diese beiden Einstellungen markieren eine Grenze, bei der die

Formstabilität sehr gering ist und eine sehr hohe freie Schwindung außerhalb des Werkzeugs vorliegt. Dieser Effekt ist so stark, dass sich der negative Einfluss der hohen Formnesttemperatur VS ergibt. Dies zeigt die hohe Bedeutung des Temperaturengleiches zwischen Vor- und Nachspritzling.

Die Formnesttemperatur und der Nachdruck im Nachspritzling haben beide einen statistisch nicht signifikanten Einfluss auf die Formabweichung. Zusatzuntersuchungen haben gezeigt, dass der Einfluss des Nachdrucks bei niedrigen Einstellgrößen wieder ansteigt, aber in dem betrachteten Einstellbereich sehr gering ist (vgl. Bild 5.7). Die gewählten Nachdruckhöhen führen nicht zu einer weiteren Verbesserung der Oberflächenabformung. Jedoch wird durch höhere Nachdrücke die Expansion nach der Entformung vergrößert. Ähnliches gilt für die gewählten Formnesttemperaturen im Nachspritzling. In dem betrachteten Bereich ist ihr Einfluss auf die Abformgenauigkeit mit der verwendeten Messeinrichtung nicht feststellbar. Allerdings wird durch die Variation der Formnesttemperatur der in Kap. 6.1.2.4 diskutierte Einfluss auf die Waddickenausbildung nach dem Spritzgießen und nach der Wärmebehandlung erkennbar (vgl. Bild 5.22 und 5.29).

Wie bei der Auswertung des geometrischen Qualitätsmerkmals zeigen sich auch bei dem werkstofflichen Qualitätsmerkmal bei den Dreischichtprüfkörpern andere Effekte der Prozessparameter als bei den Ein- und Zweischichtprüfkörpern. So wirkt sich eine lange Kühlzeit im Nachspritzling (NS) negativ auf die Punkteverschiebung aus. Denselben Effekt hat eine hohe Formnesttemperatur im Vorspritzling (VS). Die Zweifach-Wechselwirkung dieser Parameter (vgl. Bild 5.12 a) zeigt einen starken Effekt aufeinander, so dass die bei der Formabweichung festgestellte Interaktion von Vor- und Nachspritzling bei der Punkteverschiebung eine noch größere Rolle spielt. Durch die Betrachtung der berechneten Temperaturverteilungen bei 420 s Kühlzeit NS und der Einbeziehung der polarisationsoptischen Aufnahmen wird folgendes ersichtlich: Die dichtesten Isochromatenverteilungen liegen im Vorspritzling bei der langen Kühlzeit NS vor und dies bei beiden Formnesttemperaturen VS, Bild 5.38 Schnitte 1 von VD 7 und VD 12. Die Gründe hierfür sind die in Kap. 6.1 erkannten höheren, bleibenden Belastungen der Vorspritzlinge nach der Entformung. Zusätzlich stellen sich bei der langen Kühlzeit NS (420 s) und hohen Formnesttemperatur VS (120 °C) noch dichtere Isochromatenlinien am Formteilrand ein. Durch das steilere Temperaturprofil bei der Entformung entstehen höhere Abkühleigenspannungen. Diese Effekte ergeben die insgesamt negativen Effekte der langen Kühlzeit im Nachspritzling und hohen Formnesttemperatur im Vorspritzling. Bild 5.12 a zeigt jedoch auch, dass bessere Qualitätszahlen mit längerer Kühlzeit NS und mit niedriger Formnesttemperatur VS erreicht werden können.

Die Formnesttemperatur im Nachspritzling ergibt bei höherer Einstellung geringere Punkteverschiebungen (vgl. Bild 5.11 c). Dies entspricht den Erfahrungen aus den Einschichtprüfkörpern und zeigt, dass hohe Formnesttemperaturen auch bei den Dreischichtprüfkörpern positiv die inneren Eigenschaften (wie z. B. Reduzierung von Abkühleigenspannungen) beeinflussen.

Der Effekt des Nachdrucks im Nachspritzling entspricht dem Effekt des Nachdrucks bei den Einschichtprüfkörpern (vgl. Bild 5.11 d). Hohe Einstellungen erzeugen hohe Spannungen in der erstarrenden Schmelze des Nachspritzlings und komprimieren den Vorspritzling, so dass die Punkteverschiebung schlechter wird.

Der Nachdruck im Vorspritzling erzeugt geringere Punkteverschiebungen bei höheren Einstellungen. Der Effekt ist sehr gering und stellt sich auch nur in Verbindung mit einer langen Kühlzeit ein. Bei kurzen Kühlzeiten liegt kein Einfluss des Nachdruckes des Vorspritzlings vor (vgl. Bild 5.12 b).

6.3 Geometrische Eigenschaften im Vergleich

Mit Kenntnis der Verhaltensmuster und der Formbildungsprozesse lassen sich nun die in dieser Untersuchung erreichten geometrischen und inneren Eigenschaften zwischen den Prüfkörpergeometrien vergleichen. Hierzu werden die Ergebnisse aus allen Versuchen (2^3 für den Einschichtprüfkörper, 2^4 für den Zweischichtprüfkörper und 2^5 für den Dreischichtprüfkörper) in Form von Flächendiagrammen dargestellt und miteinander verglichen.

Bild 6.6 zeigt den Einfluss des Nachdrucks auf die maximale Dickenabweichung für alle drei Prüfkörpergeometrien. Dargestellt sind hierbei die aus der Prozessanalyse erreichten Dickenabweichungen in Abhängigkeit vom Nachdruck. Für die Mehrschichtsysteme ist der Einfluss von Vor- und Nachspritzlingsnachdrücken separat dargestellt. Alle Drücke beziehen sich auf die Endwanddicke der jeweiligen Nachspritzlinge. Die gestrichelten Linien zeigen die Position des Medians an. Die äußeren Abmessungen der Flächendiagramme werden durch die jeweils schlechtesten oder besten Einstellungen gebildet. Die Höhen der Flächen geben an, wie groß der Einfluss der variierten Parameter (hier: Kühlzeiten und Formnesttemperaturen) bei der entsprechenden Nachdruckhöhe auf die maximale Dickenabweichung ist. Große Höhen zeigen hierbei einen großen Einfluss an. Die Dickenabweichungen, als reiner Zahlenwert betrachtet, sind für präzise Beleuchtungslinsen hoch. Wichtig ist deshalb der Hinweis, dass die dargestellten Abweichungen aus den Maximalwerten von Auswerfer- und Düsenseite gebildet werden und somit keinen direkten Hinweis auf die Formabweichungen der Einzelseiten geben. Für den hier durchgeführten Vergleich geben die Ergebnisse jedoch gute Hinweise auf die zu erwartenden Unterschiede zwischen den Ein- und den Mehrschichtsystemen:

Bei dem Einschichtprüfkörper werden geringe Formabweichungen, wie sie bei den Mehrschichtprüfkörpern vorliegen, nur durch sehr hohe Nachdrücke erreicht. Hierbei zeigt die parallelogrammförmige Fläche an, dass der Einfluss der Parameter Kühlzeit und Formnesttemperatur bei beiden Druckeinstellungen (900 bar, 1300 bar) gleich groß ist. Die Steilheit der Fläche beschreibt den großen Nachdruckeinfluss.

Die Lage des Medians visualisiert, dass eine höhere Verdichtung von Ergebnissen bei größeren Wanddickenabweichungen vorliegt.

Die erreichten maximalen Dickenabweichungen sind bei den Mehrschichtsystemen um ein Vielfaches geringer als bei den Einschichtprüfkörpern. Wie weiter zu erkennen ist, liegen die Mediane der Mehrschichtprüfkörper im oberen Bereich der Flächen. Dies bedeutet, dass mehr Versuchseinstellungen geringere Wanddickenabweichungen erreichen als größere Wanddickenabweichungen. Wie in der Prozessanalyse gezeigt, haben die Nachdrücke in den Vor- und Nachspritzlingen nicht den dominanten Einfluss wie der Nachdruck beim Einschichtprüfkörper. Nur bei dem Zweischichtprüfkörper zeigt sich der Einfluss der Nachdrücke durch den steileren Verlauf des Medians. Sein Verhalten gleicht dem Einschichtprüfkörper, jedoch auf einem viel besseren Abformungsniveau.

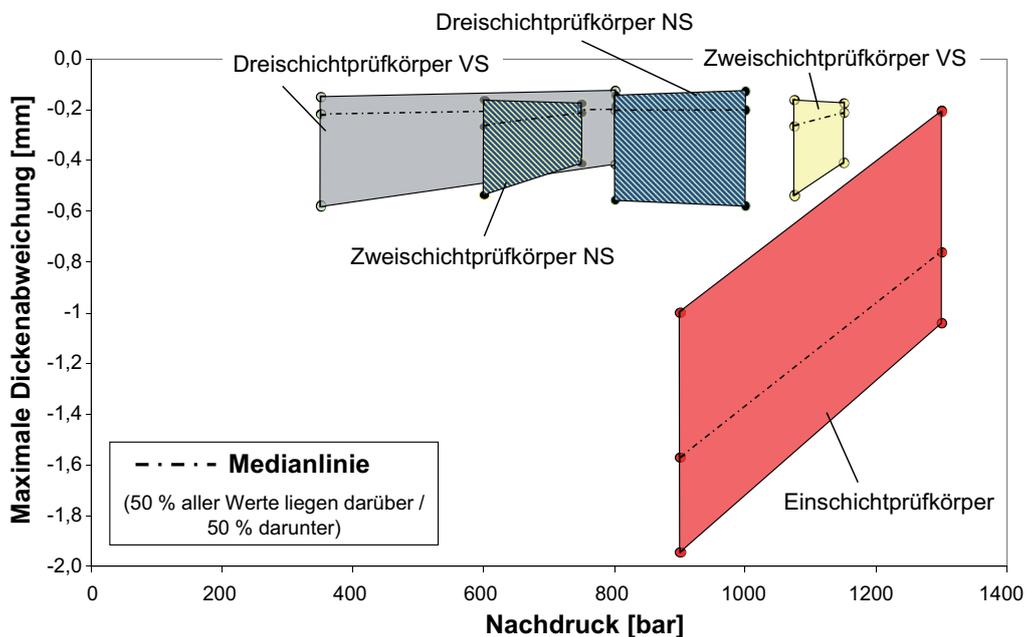


Bild 6.6 Maximale Dickenabweichungen als Funktion des Nachdrucks für die Ein- und Mehrschichtprüfkörper
 VS: Vorspritzling, NS: Nachspritzling
 Nachdrücke VS beziehen sich auf die Dickenabweichungen der Mehrschichtsysteme

Der in Bild 6.6 dargestellte Vergleich zeigt auch, dass die Mehrschichtsysteme mit weniger Druck zur Erreichung der geforderten hohen Abformgenauigkeiten auskommen. Hier wird erkennbar, wie sich das reduzierte Schwindungspotential durch die geringeren Wanddicken der Einzelschichten, besonders die der Nachspritzlinge, auswirkt. Des Weiteren ergeben sich durch das günstigere Wanddickenverhältnis zwischen Anguss-/Anschnittbereich und der Wanddicke der Nachspritzlinge keine großen Unterschiede in den Einfrierzeiten zwischen diesen (Wanddicke des Angusses entspricht ungefähr der Wanddicke des Nachspritzlings, vgl. Bild 3.2). Ein

weiterer Grund für die verbesserte Abformung bei geringeren Drücken ist die einseitige Wärmeabfuhr in den Nachspritzlingen und die damit verbundene verzögerte Abkühlung (vgl. Bild 5.16 bis 5.19). Hierdurch wird eine verlängerte Nachdruckwirkzeit erreicht.

Die Unterschiede in den Abformgenauigkeiten zwischen Ein- und Mehrschichtsystemen sind so groß, dass die im vorherigen Kapitel angesprochenen Kompressions- und Dekompressionseffekte, überlagert von Wärmedehnungen der Vorspritzlinge nicht auszuschließen sind. Dies wurde jedoch nicht weitergehend untersucht.

Für die Auslegung von Optiken aus transparenten Kunststoffen lässt sich zusammenfassend sagen, dass die besten Abformungen der Werkzeuggeometrie mit den Mehrschichtsystemen möglich sind. Allerdings muss bei der Auslegung die bei den Dreischichtsystemen beobachtete Wanddickenexpansion berücksichtigt werden.

6.4 Erreichte Kühlzeiten und optische Eigenschaften

Neben einer besseren Abformgenauigkeit können bei den Mehrschichtsystemen, und hier besonders mit dem Dreischichtprüfkörper, kürzere Kühlzeiten realisiert werden. Bild 6.7 zeigt die Gegenüberstellung der erreichbaren Formabweichungen in den Grenzen der hier gewählten Kühlzeit bzw. der Kühlzeiten für die Nachspritzlinge bei den Mehrschichtsystemen. Die Flächenverhältnisse um den Medianwert sind bei allen drei Geometrien ähnlich, d. h. es liegen bei allen drei Prüfkörpergeometrien Verdichtungen von Ergebnissen mit geringen Wanddickenabweichungen vor.

Bei dem Ein- und Zweischichtsystem zeigen die größeren Höhen der Flächen bei den langen Kühlzeiten an, dass die Variation der anderen Parameter (hier: Nachdruck, Formnesttemperatur) zu großen Änderungen der maximalen Dickenabweichung führt. Dies begründet sich bei den Zweischichtprüfkörpern durch den in der Varianzanalyse (vgl. Bild 5.4) festgestellten erhöhten Einfluss der Formnesttemperatur und des Nachdruckes bei der langen Kühlzeit. Bei dem Einschichtprüfkörper macht sich besonders der hohe Einfluss des Nachdrucks bei der langen Kühlzeit bemerkbar (vgl. Bild 5.1).

Die Dreischichtprüfkörper weisen bei niedrigen Einstellungen der Kühlzeit einen größeren Einfluss der variierten Parameter Nachdruck und Formnesttemperaturen auf. Betrachtet man hierzu die Ergebnisse aus der Prozessanalyse (vgl. Bilder 5.5 a und 5.6), so zeigt sich, dass die gewählte niedrige Einstellung von 130 s Kühlzeit im Nachspritzling eine untere Grenze markiert. Die mit dieser Kühlzeit hergestellten Prüfkörper weisen große Formabweichungen auf. Bei diesen Prozessbedingungen ist eine Entformung möglich, jedoch sind die Formteilmperaturen im Prüfkörper noch so hoch, dass keine ausreichende Formstabilität gewährleistet ist (vgl. Bild 5.19). Dies führt dann zu einer sehr großen freien Schwindung nach der Entformung,

wodurch sich bei der niedrigen Kühlzeit ein größerer Einfluss von Nachdruck und Formnesttemperatur in Bezug auf die Formabweichungen ergeben.

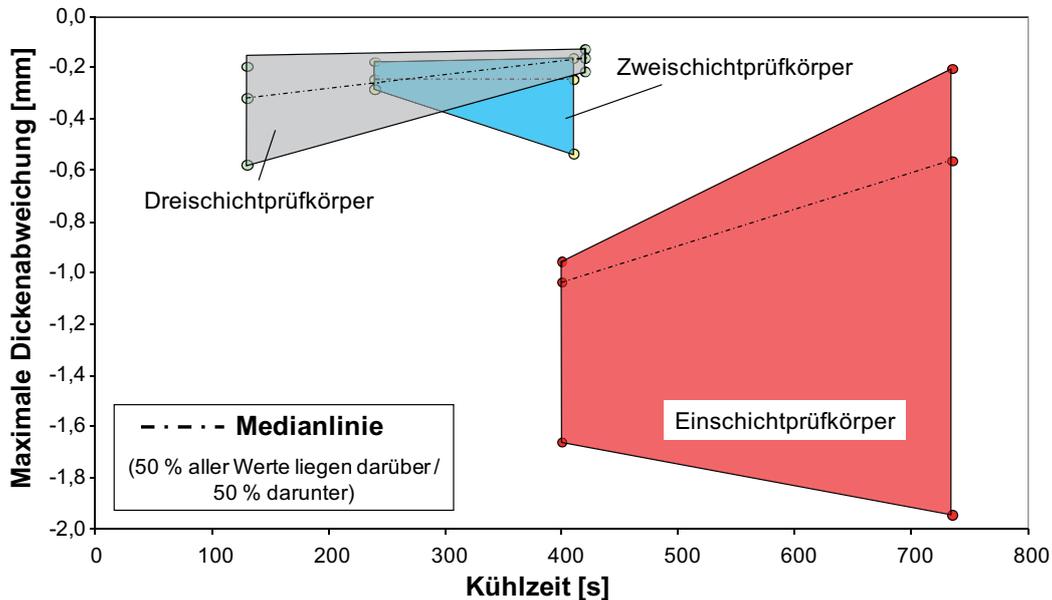


Bild 6.7 Maximale Dickenabweichungen über der Kühlzeit für die Ein- und Mehrschichtprüfkörper
 VS: Vorspritzling, NS: Nachspritzling
 Kühlzeit NS bei Dreischicht- und Kühlzeit NS/VS bei Zweischichtprüfkörper

Bei der Interpretation der Ergebnisse aus Bild 6.7 ist zu berücksichtigen, dass die dargestellten Zeiten für die Mehrschichtsysteme verdoppelt werden müssen. Der Grund hierfür wurde in Kap. 2.3.3 erläutert und hat seine Ursache in dem Vergleich eines Zweifach-Werkzeuges für Einschichtlinsen mit einem Einfach-Drehteller-Indexplattenwerkzeug für Mehrfachlinsen.

Für die Herstellung von Optiken aus transparenten Thermoplasten lässt sich folgendes zusammenfassen: Das Potential, besonders das der Dreischichtlinsen mit der hier untersuchten simultan hergestellten zweiten und dritten Schicht, zur Kühlzeitreduzierung ist sehr groß. Geht man von einer mittleren Kühlzeit von 210 s für die Dreischichtprüfkörper ($2 \cdot 210 \text{ s} = 420 \text{ s}$) und ca. 560 s für die Einschichtprüfkörper aus, so lässt sich bei dieser Untersuchung eine mögliche Kühlzeitreduzierung von ca. 25 % für den Dreischichtprüfkörper erkennen. Hierbei ist noch nicht die schlechtere Abformgenauigkeit bei den Einschichtprüfkörpern berücksichtigt. Die theoretischen Betrachtungen aus Kap. 2.3.3 werden durch die durchgeführten Untersuchungen bestätigt.

Neben den geometrischen Unterschieden haben die Untersuchungen auch die Unterschiede in den inneren Eigenschaften zwischen den Prüfkörpern gezeigt.

Bild 6.8 zeigt hierzu die Gegenüberstellung von erreichbaren Qualitätszahlen der Punkteverschiebungen in den Grenzen der gewählten Kühlzeiten.

Ein- und Zweischichtprüfkörper weisen bessere Qualitätszahlen als die Dreischichtprüfkörper auf und verhalten sich in Bezug auf die Punkteverschiebungen sehr ähnlich. Ihre Medianwerte und Flächen steigen mit kürzerer Kühlzeit an. Auch die Flächenverhältnisse und -größen sind sehr ähnlich. Der parallelogrammförmige Verlauf weist auf einen gleich großen Einfluss der variierten Parameter (Nachdruck und Formnesttemperaturen) bei beiden Einstellungen der Kühlzeiten auf die Qualitätszahl und damit auf die inneren Eigenschaften hin. Allerdings sind die Veränderungen der inneren Eigenschaften durch die anderen Parameter nicht sehr groß. Die Gründe für die auftretende Anisotropie bei dem Einschichtsystem sind die vorliegenden örtlich und zeitlich unterschiedlichen Drücke und Temperaturen während der Herstellung (Kap. 2.3.2). Allerdings hat bei beiden Geometrien die lange Kühlzeit einen dominanten Einfluss. Dies wird auch in der Varianzanalyse sichtbar (vgl. Tabelle 6.2). Lange Kühlzeiten wirken durch ihren Tempereffekt positiv auf die inneren Eigenschaften. Bei der kurzen Kühlzeit wird der Einfluss der anderen Parameter wieder größer. Trotz der Überspritzung verhält sich der Zweischichtprüfkörper in Bezug auf die hier durch die Qualitätszahl ermittelte Anisotropie dem Einschichtsystem ähnlich. Dies bestätigt auch die Varianzanalyse (Tabelle 6.2). Hierdurch wird nochmals sichtbar, dass der Zweischichter aus zwei präzisen Einschichtsystemen besteht.

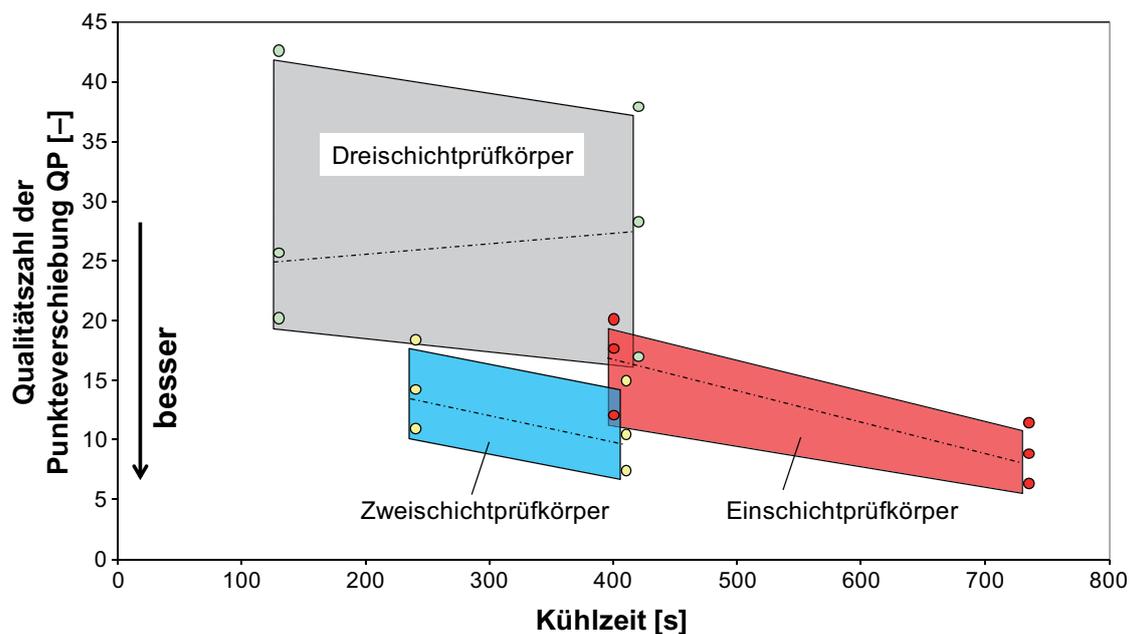


Bild 6.8 Gegenüberstellung der Qualitätszahl der Punkteverschiebung mit der Kühlzeit für die Ein- und Mehrschichtprüfkörper
Kühlzeit NS bei Dreischicht- und Kühlzeit NS/VS bei Zweischichtprüfkörper

Die Flächengröße und das Flächenverhältnis zum Median des Dreischichtprüfkörpers deutet auf ein empfindliches Verhalten gegenüber den Prozessparametern hin und zeigt, dass trotz niedriger Nachdrücke (vgl. Bild 6.6) die beschriebene Formgebung der Dreischichtenprüfkörper eine werkstoffliche Struktur mit komplexerer Spannungs-, Dichte- und Brechzahlverteilung erzeugt. Hierbei liegt bei der kurzen

Kühlzeit eine Verdichtung der Ergebnisse mit niedrigen QP-Zahlen vor (weniger große Anisotropie).

Für den praktischen Gebrauch lässt sich folgendes bezüglich des Dreischichtsystems sagen: Eine Ursache für die komplexere werkstoffliche Struktur ist die erkannte Druck- und Temperaturwechselwirkung zwischen Vor- und Nachspritzling. Besonders wichtig ist hierbei, in welchen Zustandsbereich (fest oder entropieelastisch) der Vorspritzling durch die Überspritzung gelangt. Denn die erzeugte Anisotropie liegt hierbei fast ausschließlich im Vorspritzling vor. Es hat sich herausgestellt, dass die Formnesttemperatur des Vorspritzlings und die Kühlzeit des Gesamtbauteiles (Nachspritzling) einen entscheidenden Einfluss auf die Ausprägung der Temperaturwechselwirkung und damit auf die beobachteten Eigenschaften haben. Eine in den Herstellprozess integrierte Temperung könnte die spannungsbedingten Einflüsse reduzieren (vgl. Kap. 5.6).

Der Dreischichtprüfkörper weist geringere Gelbwerte und höhere Transmission als die beiden anderen Prüfkörpergeometrien auf (vgl. Bilder 5.13, 5.14). Durch die beschriebene, erhöhte Anisotropie ist die Lichtstrahlablenkung bei den Dreischichtprüfkörpern möglicherweise etwas größer, jedoch wird die Lichtstrahlintensität durch den geringeren Gelbwert und die höhere Transmission weniger reduziert.

Das Dreischichtsystem hat ein sehr großes Potential zur Kühlzeitreduzierung. Die vorgestellten Ergebnisse weisen darauf hin, dass hierbei der Vorspritzling ebenfalls eine zentrale Rolle hat. Zum einen müssen die Außenflächen des Vorspritzlings nicht frei von Einfallstellen hergestellt werden. Dies bedeutet, dass kurze Nachdruckzeiten und auch Restkühlzeiten realisiert werden können. Weiterhin werden durch die Überspritzung die bei dieser Untersuchung vorliegenden Einfallstellen nachweislich so überströmt, dass keine hierauf zurückzuführende Punkteverschiebung detektiert wurde (vgl. Kap. 5.8). Es kann also davon ausgegangen werden, dass hierdurch auch keine Brechzahldifferenzen erzeugt werden. Bei anderen Fehlstellen wie z. B. Fließmarkierungen und Schallplattenrillen, die relativ scharfkantige Störungen erzeugen, haben orientierende Versuche gezeigt, dass solche Fehler nur bei sehr hohen Formnesttemperaturen ausgeglichen werden konnten.

Weiteres Potential zur Kühlzeitreduzierung liegt jedoch in der Möglichkeit, den Vorspritzling mit kalten Formnesttemperaturen herzustellen. Die hier mögliche kälteste Einstellung lag bei 70 °C und damit weit unter den normalerweise notwendigen Formnesttemperaturen bei optischen Bauteilen aus Polycarbonat. Die ermittelten geometrischen und werkstofflichen Qualitätsmerkmale haben gezeigt, dass auch mit den niedrigen Formnesttemperaturen gute Ergebnisse erzielt werden können.

7 Zusammenfassung

Kunststoffoptiken haben ein großes Anwendungspotential. Die hierzu benötigten oft sehr dickwandigen optischen Geometrien müssen präzise und mit einer möglichst kurzen Zykluszeit hergestellt werden. Das in dieser Arbeit untersuchte Mehrschicht-spritzgießverfahren ermöglicht die Herstellung von komplexen, dickwandigen Optiken mit hoher Präzision. Hierbei konnten signifikant kürzere Kühlzeiten erreicht werden, als dies mit dem Standardspritzgießen oder Spritzprägen möglich war.

Ziel der Arbeit war es, werkstoffliche, geometrische und prozesstechnische Einflussgrößen und deren Wechselwirkung auf die optischen Eigenschaften zu untersuchen.

Hierzu wurde an einer optischen Geometrie, die im Ein-, Zwei- und Dreischichtverfahren hergestellt wurde, eine Varianzanalyse des Spritzgießprozesses durchgeführt. Mit Hilfe von weiteren Untersuchungen, wie der Wanddickenvermessung, einer Wärmelagerung und polarisationsoptischen Untersuchungen konnten die Unterschiede zwischen den Systemen detailliert betrachtet werden. Theoretische Abkühlberechnungen haben die Interpretation der Ergebnisse unterstützt.

Die Prozessanalyse wurde mit den Parametern Formnesttemperatur, Kühlzeit und Nachdruck durchgeführt. Ihre Effekte auf die optischen Eigenschaften sind bei Einschichtlinsen gut untersucht worden, so dass ein direkter Vergleich und eine Bewertung der Mehrschichtsysteme möglich war. Werkstofflich gebundene und geometrische Eigenschaften wurden getrennt voneinander ermittelt.

Zur Ermittlung der Unterschiede in den werkstofflich gebundenen Eigenschaften ist ein neues Messverfahren entwickelt worden. Hierbei wurde die Verzerrung eines Punktemusters durch den Prüfkörper ermittelt. Durch die Verwendung eines Immersionsöls mit sehr ähnlichem Dispersionsverlauf, wie das des hier verwendeten Polycarbonats, war es möglich, Oberflächendefekte an den Prüfkörpern weitgehend auszuschließen. Hierdurch konnten die inneren Eigenschaften der Prüfkörper und deren Abhängigkeit von Prozessgrößen weitgehend unabhängig von der Aussengeometrie ermittelt werden. Allerdings wurde festgestellt, dass der vorhandene geringe Brechzahlunterschied zwischen Polycarbonat und Öl zu einer inhärenten Punkteverschiebung führt. Deshalb konnten große Einfallstellen mit einem Einfallwinkel von 25° nicht mehr aufgelöst werden. Dies machte es notwendig, alle Einfallstellenbereiche der Einschichtsysteme aus der Messung zu eliminieren.

Zur Unterscheidung des Einflusses der Prozessparameter auf die inneren Eigenschaften wurde ein quantitatives Gütemaß, die Qualitätszahl der Punkteverschiebung, definiert. Diese wurde aus den gemessenen Punkteverschiebungsverteilungen durch unterschiedliche Gewichtung der Lage- und Streuungsparameter der Verteilung ermittelt. Diese Vorgehensweise machte es möglich, dass die Qualitätszahl einen funktionalen Zusammenhang zwischen den Maschinenparametern und den hierdurch verursachten anisotropen Eigenschaften bei den Einschichtprüfkörpern ausreichend genau beschreibt. Hierdurch wurde eine Übertragbarkeit auf die Mehrschichtsysteme

möglich. Die Qualitätszahl kennzeichnet somit die werkstofflich gebundenen Eigenschaften. Die geometrische Qualität konnte durch die taktile Vermessung der beiden Formteilerflächen bestimmt werden.

Nachfolgend sind die verfahrenstechnischen Erkenntnisse zusammengefasst:

Abformgenauigkeit:

- Die Effekte von Druck, Temperatur und Zeit auf die Abformgenauigkeit sind bei dem Ein- und bei dem Zweischichtsystem sehr ähnlich. Dies unterstreicht den Sachverhalt, dass das Zweischichtsystem aus zwei hochwertigen Einschichtsystemen besteht, deren Herstellung den Effekten der Prozessparameter des Einschichtsystems unterliegt.
- Die Effekte von Druck, Temperatur und Zeit werden bei dem Dreischichtsystem stark von der Wechselwirkung zwischen Vor- und Nachspritzling bestimmt. So erzeugen kurze Gesamtkühlzeit und niedrige Formnesttemperatur im Vorspritzling ähnliche hohe Abformgenauigkeiten wie längere Gesamtkühlzeiten und hohe Formnesttemperatur im Vorspritzling.
- Mit den Mehrschichtsystemen können sehr niedrige Formabweichungen erzielt werden. Die hierzu benötigten Nachdrücke sind geringer als bei Einschichtsystemen. Gründe hierfür sind:
 - Die reduzierte Schwindung durch die geringeren Wanddicken der Teilgeometrien – besonders die der Nachspritzlinge.
 - Die ähnlichen Abkühlzeiten von Nachspritzling und Anguss, sowie die reduzierte Abkühlgeschwindigkeit des Nachspritzlings durch die einseitige Wärmeabfuhr.
- Die Dreischichtsysteme neigen zur elastischen Vergrößerung nach der Entformung. Dies wird durch die Temperatenausgleichsvorgänge bestimmt, und diese werden wiederum durch die Formnesttemperatur im Vorspritzling und die Gesamtkühlzeit stark beeinflusst.
- Das Volumen der Vorspritzlinge hat Einfluss auf die Nachspritzlingsdicke und bestimmt so deren Expansionspotential und damit die Wanddickenausbildung.
- Eine Kompression der Vorspritzlinge bei Überspritzung und Dekompression bei Abkühlung, verbunden mit einer Wärmedehnung kalter Vorspritzlinge, konnte bei den Mehrschichtsystemen nicht festgestellt werden. Dies scheint aber theoretisch möglich und sollte in Nachfolgearbeiten untersucht werden.

Werkstoffliche Eigenschaften:

- Die Effekte von Druck, Temperatur und Zeit auf die hier untersuchten werkstofflichen Eigenschaften sind bei dem Ein- und dem Zweischichtsystem sehr ähnlich.
- Abgeleitet von dem Einschichtsystem wurde der Kenntnisstand der Effekte der gewählten Prozessparameter bei dem Zweischichtsystem bestätigt.

- Bei den Dreischichtsystemen wurde ein neuer Kenntnisstand gewonnen: Es ist ein starker Einfluss von Temperatur- und Druckausgleich zwischen Vor- und Nachspritzlingen vorhanden. Die Anisotropien entstehen durch die Überspritzung fast ausschließlich im Vorspritzling. Entscheidend ist deshalb, welche Zustandsverläufe (Glas, entropieelastisch, Schmelze) während der Überspritzung und Abkühlung besonders im Vorspritzling vorliegen. Geringe Anisotropie wird bei kurzer Gesamtkühlzeit und hoher Formnesttemperatur im Vorspritzling sowie bei längerer Gesamtkühlzeit und niedriger Formnesttemperatur im Vorspritzling erzeugt.
- In den Dreischichtsystemen können größere Anisotropien als bei den Ein- und Zweischichtsystemen erzeugt werden. Allerdings lassen sich diese durch eine Temperung wieder signifikant verbessern. Der Einfluss auf die optische Leistungsfähigkeit wird vermutlich gering sein, da die hierdurch bewirkten Lichtstrahl- ablenkungen geringer sein werden, als durch Oberflächenstörungen.
- Höhere Transmissionswerte und geringere Gelbwerte (Yellowness-Index) liegen in den Dreischichtsystemen vor. Hauptgrund sind die geringeren Formabweichungen und die geringere thermische Belastung (Oxidation) durch kürzere Verweilzeiten (Kühl- bzw. Zykluszeiten).

Kühlzeitreduzierung:

Die kürzesten Kühlzeiten werden bei den Dreischichtsystemen erreicht. Gründe hierfür sind:

- Die reduzierten Wanddicken von Vor- und Nachspritzlingen.
- Die Herstellung von Vorspritzlingen mit weitaus niedrigeren Formnesttemperaturen, als es sonst bei der Herstellung von präzisen Optiken notwendig ist.
- Tolerierbare Einfallstellen im Vorspritzling, die bei der Überspritzung nicht mehr sichtbar sind und keinen optischen Einfluss haben.

Die in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse zeigen die Vorteile der Mehrschichtsysteme und hier besonders die des Dreischichtsystems. Kühlzeitreduzierung und sehr gute Abformqualitäten prädestinieren das Dreischichtsystem für optische Anwendungen. Die hierbei vorliegende erhöhte Anisotropie kann, wenn sie die Leistungsfähigkeit einer Optik reduzieren sollte, sehr gut durch eine integrierte Temperung verbessert werden. Nachdem nun die Grundlagen für das Mehrschichtspritzgießen erarbeitet worden sind, sollten in zukünftigen Arbeiten die Fragestellungen einer serienreifen Werkzeugtechnik weiter untersucht werden. Insbesondere die Angusstechnik für die Anbindung der Schichten sollte einen Schwerpunkt bilden. Eine Übertragung der Qualitätszahl auf reale Optiken könnte helfen, die Bedeutung einer werkstofflichen Anisotropie im Vergleich zu geometrischen Abformgenauigkeiten weiter zu erforschen. Eine Untersuchung der Mehrschichtherstellung mit anderen transparenten Thermoplasten ist ebenfalls zu empfehlen.

8 Literaturverzeichnis

- [1] N.N. Branchenbericht 2009, SPECTARIS, Berlin, Deutscher Industrieverband für optische, medizinische und mechatronische Technologien e.V.
- [2] Bundesministerium für Wirtschaft und Entwicklung Optische Technologien – Wirtschaftliche Bedeutung in Deutschland, 2007
- [3] Michaeli, W.; Forster J. Qualität und Effizienz bei der Herstellung optischer Kunststoffbauteile – eine Herausforderung für Produktion und Entwicklung. Tagungsumdruck zum 23. Internationalen Kunststofftechnischen Kolloquium, S. III-XV, Aachen 2006
- [4] Michaeli, W., Schröder, T. Kunststoffoptik – Anwendungsbereiche, Abformgenauigkeit, Eigenschaften, Tagungsbeitrag „Optische Bauteile aus Kunststoff“, Institut für Kunststoffverarbeitung, Aachen, 2005, S. 1-14
- [5] Stade, F; Scholl, M. Never Ending Work in All-LED Headlamps. How and Why Efficiency Increase Initiates Adaption in Reflection and Projection Systems
Tagungsbeitrag 9th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL), Darmstadt, September. 2009, S. 416-421
- [6] Dross, O. Auslegung der Optik am Beispiel von Linsen
Tagungsbeitrag „Optische Kunststoffe in Design und Technik“, SKZ Würzburg, Juni 2008
- [7] Berlitz, S. Design und Lichttechnik, Entwicklung in der Automobilbeleuchtung, Tagungsbeitrag „Spritzgießen hochwertiger optischer Komponenten“, Institut für Kunststoffverarbeitung, Aachen, 2008
- [8] Kuipers, U. Anwendung neuer Beleuchtungstechnologien mit LED, Tagungsbeitrag „Optische Kunststoffe in Design und Technik“, SKZ Würzburg, Juni 2009
- [9] Zöllner, O.; Dorin, F.; Klinkenberg, C. Aufs Licht fokussiert
Kunststoffe Mai (2012), S. 88-90

-
- [10] Zöllner, O. Herstellung und Untersuchung von optischen Kunststoffprodukten. Tagungsbeitrag „Optische Kunststoffe in Design und Technik“, SKZ Würzburg, Juni 2010/2011
- [11] Gold, S. Möglichkeiten und Grenzen der Kunststoffoptik Tagungsbeitrag „Spritzgießen hochwertiger optischer Komponenten“, Institut für Kunststoffverarbeitung, Aachen, 2008
- [12] Beich, W.S. Injection Molding Polymer Optics in the 21st Century Proc. Of SPIE Vol. 58650J-1
- [13] Müller, W. Möglichkeit und Grenzen von Messverfahren zur Qualitätssicherung an optischen Bauteilen Tagungsbeitrag „Spritzgießen hochwertiger optischer Komponenten“. Institut für Kunststoffverarbeitung Aachen, 2008
- [14] Müller, W.; Petzhold S. Optik aus Kunststoff – Möglichkeiten und Grenzen. Jahrbuch für Optik und Feinmechanik, Verlag Schiele & Schön, Berlin
- [15] Bleicher, H., Kosthorst, T. In der Präzision nahezu gleichauf. Kunststoffe 1 (2004) 7, S. 36-42
- [16] Michaeli, W.; Forster, J., Dörner, J., Schmitt, R. Aspekte des Formenbaus für optische Kunststoffbauteile Kunststoffe 12, (2005), S. 72-74
- [17] Bäumer, S. ; De Schipper, R. Kunststoffoptik, neue Perspektiven für Optik großer Stückzahl. Optik & Photonik, 10.2006, S46-49, Wiley VCH-Verlag, Weinheim
- [18] Mäkinen, J. Bäumer – Handbook of Plastic Optics Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2. Auflage
- [19] Pillwein, G. Maschinen- und Prozesstechnik zur Herstellung optischer Bauteile IKV-Seminar: Spritzgießen hochwertiger optischer Komponenten, Aachen 2008
- [20] Döbler, M.; Klinkenberg, C.; Protte, R. Freie Fahrt für weißes Licht. Kunststoffe 99 (2009) 4, S. 83-86

-
- [21] Schmidt, A. PLEXIGLAS® und TROGAMID® für optische Anwendungen, Tagungsbeitrag „Optische Kunststoffe in Design und Technik“, SKZ Würzburg, Juni 2009
- [22] Grimm, D. TOPAS® Cycloolefin Copolymer: Ein innovativer, transparenter Kunststoff, Tagungsbeitrag „Optische Kunststoffe in Design und Technik“, SKZ Würzburg, Juni 2009
- [23] N.N. Cyclo-Olefine Polymer Zeon® Corporation Europe Düsseldorf
- [24] Hessner, S. Spritzprägen sphärischer und asphärischer Kunststofflinsen
Dissertation, RWTH Aachen 2010
- [25] Döbler, M. Linsenoptiken und Lichtleiter aus Polycarbonat
Tagungsbeitrag „Optische Kunststoffe in Design und Technik“,
SKZ Würzburg, Juni 2009
- [26] N.N. Technische Information Optisches Glas BK7
Schott AG, Mainz, August 2007
- [27] N.N. CAMPUS-Datenbank, Version 5.2
- [28] Pfeifle, D. Innovative Silikone für neue Medizinanwendungen.
Momentive Performance Materials, Leverkusen,
Deutschland, 2009
- [29] N.N. Optische Linsen aus LSR.
K-Zeitung 39 (2008) 21,
- [30] N.N. Das Brillenglas Kompendium.
Carl Zeiss Vision GmbH, Aalen 2010
- [31] Schröder, G.;
Treiber, H. Technische Optik – Vogelverlag, 10. Auflage 2007
- [32] Klepek, G. Herstellung optischer Linsen im Spritzprägeverfahren.
Kunststoffe 7 (1987) 11 S. 1147
- [33] Klepek, G. Optische Linsen aus Kunststoffen,
Kunststoffe 78 (1988) 4 S. 340-344
- [34] Günther, G.;
Leitel, A.,
Hofmann, J. Präzisionsbauteile aus Kunststoff in optischen Systemen,
Tagungsbeitrag Internationale Jahrestagung
Spritzgießen, VDI-K, Baden-Baden 2004

-
- [35] Schröder, T. Wirtschaftliche Bedeutung des Kunststoffs im Bereich optischer Anwendungen, Tagungsbeitrag „Optische Bauteile aus Kunststoff – Rohstoffe, Verarbeitungstechnik, Eigenschaften“, Seminar IKV25. und 26. Oktober 2005
- [36] Butler, D.,J. Plastic Optics Challenges Glass
Photonics Spectra, 2000, S. 168-174
- [37] Michaeli, W.;
Heßner, S.;
Klaiber, F. Prozesskette zur optimierten Herstellung von optischen Bauteilen aus Kunststoffen im Spritzgieß- und -prägeverfahren Kunststofftechnik
Kunststofftechnik, Journal of Plastic Technology 2 (2007) 5
- [38] Dross, O. Persönliche Mitteilung vom 17.01.2011
LPI – Light Prescription Innovators, Europe
- [39] Timinger, A. Persönliche Mitteilung vom 16.09.2009
OEC AG – Optics and Energy Concepts, München
- [40] Timinger, A. Auslegung von Kunststoffoptiken, Tagungsbeitrag „Optische Kunststoffe in Design und Technik“, SKZ Würzburg, Juni 2009
- [41] Maucher, T. Optische Komponenten für LED-Scheinwerfer, Tagungsbeitrag „Spritzgießen hochwertiger optischer Komponenten“, Institut für Kunststoffverarbeitung, Aachen, 2008
- [42] Mertin, M.;
Rothweiler, D. Innovative Optics and Optical System for Future Markets Optics – Key Technology for the Future Kolloquium, März 18.-19. 2009, Aachen
- [43] Heßner, S.;
Klaiber, F. Einsatz von PVD-beschichteter Plastifizierschnecken bei der Verarbeitung temperaturempfindlicher Thermoplaste.
24. IKV Kolloquium, Aachen, 2008
- [44] Walter, T.;
Müller, R. Für den richtigen Durchblick, Optische Teile (1)
Kunststoffe 91, (2009) 10, S. 72-76,
- [45] Bürkle, E.;
Klotz, B.;
Lichtinger, P. Durchblick im Spritzguss. Das Herstellen von hochwertigen optischen Formteilen, eine neu Herausforderung.
Kunststoffe 91, (2001) 11, S. 54-57,
- [46] N.N. Schneckengeometrien und Werkstoffe
Allgemeine Technische Information, ATI 1141
Bayer MaterialScience AG, Leverkusen

-
- [47] N.N. Reinraumtechnik In VDI 2083 Blatt 1 Düsseldorf
VDI Verlag, 1995
- [48] Dittel, G.;
Bürkle, E. Das Produkt bestimmt den Reinraum.
International Jahrestagung Spritzgießen 2001. Präzision
im Spritzgießprozess, Düsseldorf,
VDI Verlag 2001, S. 245-278
- [49] Roberts, Th. F. Analyse des Betriebsverhaltens von vollelektrischen
gegenüber hydraulisch angetriebenen Spritzgießma-
schinen basierend auf Vergleichsmessungen
Dissertation RWTH Aachen, 1994
- [50] Schmiederer, S. Schonende Spritzgießverarbeitung von Thermoplasten
Dissertation Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-
Nürnberg, 2008
- [51] N.N. Plastifizierung unter Sauerstoffausschluss von
Polycarbonat, Untersuchung am Lehrstuhl für Kunst-
stofftechnik der Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg, 2010
- [52] Stauß, B. Lichttechnische Entwicklungen bei Kfz – Scheinwerfern
und deren Einfluss auf Design und Material optischer
Komponenten, Tagungsbeitrag „Optische Kunststoffe in
Design und Technik“,
SKZ Würzburg, Juni 2008
- [53] Kräuter, G. Transparente Kunststoffe für LED Anwendungen
Tagungsbeitrag „Optische Kunststoffe in Design und
Technik“,
SKZ Würzburg, Juni 2010
- [54] Pankasem, S.,
Kuczynski, J.,
Thomas, J., K. Macromolecules, 1994, 27 (14), S. 3773-3781
- [55] Abbas, K. , B. Journal of Applied Polymer Science: Applied Polymer
Symposium 35, 1979, S. 345-360
- [56] Trubiroha, P. Grundlagen der Alterung durch Witterungseinwirkungen
Tagungsbeitrag „Bewitterung von Kunststoffen in der
Automobilindustrie“,
SKZ Würzburg, März 1999
- [57] Maucher, T. Optische Komponenten für LED-Scheinwerfer,
Tagungsbeitrag „Optische Komponenten in Design und
Technik“,
SKZ Würzburg 2007

-
- [58] Stollwerk, G. Berechnungs- und Messmethoden für die Farbrezeptierung und Farbstoffstabilität für optische Anwendungen. Interner Forschungsbericht Bayer MaterialScience AG , Leverkusen, 2009
- [59] Steinbichler, G. Methoden und Verfahren zur Optimierung der Bauteilentwicklung für die Spritzgießfertigung Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2007
- [60] Bäumer, S. Prüfung von optischen Bauteilen Tagungsbeitrag Optische Kunststoffe in Design und Technik, SKZ Würzburg, Juni 2010
- [61] Dross, O. Auslegung optischer Systeme Tagungsbeitrag 1. VDI Fachkonferenz – Kunststoffe in optischen Systemen Nov. 2010, Erlangen
- [62] Klinkenberg, C.; Moeller, P. Prozessuntersuchung zum Präzisionsspritzguss optischer Freiformlinsen. Unveröffentlichte Diplomarbeit Fachhochschule Köln, Bayer MaterialScience AG, 2007
- [63] Müller, N. Anspruchsvolle Kunststoffoptiken – Tagungsbeitrag „Optische Kunststoffe in Design und Technik“, SKZ Würzburg, Juni 2009
- [64] Fehr, G. Fertigungstechnische Herausforderungen für das Spritzgießen von optischen Bauteilen Tagungsbeitrag 1. VDI Fachkonferenz – Kunststoffe in optischen Systemen Nov. 2010, Erlangen
- [65] Menges, G. Werkstoffkunde der Kunststoffe. Haberstroh, E; Michaeli, W; Schmachtenberg,E. 5. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, 2002
- [66] Michaeli, W. Einführung in die Kunststoffverarbeitung Carl Hanser Verlag, München, 5. Auflage, 2006
- [67] Stitz, S. Analyse der Formteilbildung beim Spritzgießen von Plastomeren als Grundlage für die Prozesssteuerung Dissertation RWTH Aachen, 1973
- [68] Thienel, P. Der Füllvorgang beim Spritzgießen von Thermoplasten Dissertation RWTH Aachen, 1977

-
- [69] Wimberger-Friedl, R. Orientation, Stress and Density Distribution in Injection Moulded Amorphous Polymers Determined by Optical Techniques.
Dissertation, Technische Universität Eindhoven, 1991
- [70] Waxler, R. M;
Horowitz, D;
Feldmann, A. Applied Optics, Vol.18, (1979) 1, S. 101-104
- [71] Bölinger, S. Spritzgießen und Spritzprägen von Kunststoffoptiken.
Dissertation, RWTH Aachen, 2001
- [72] Forster, D. Vergleich der optischen Leistungsfähigkeit spritzgegossener und spritzgeprägter Kunststofflinsen
Dissertation; RWTH Aachen, 2006
- [73] Hensel, H. Orientierungsdoppelbrechung.
Dissertation RWTH Aachen, 1975
- [74] Bäumer, S. Handbook of Plastic Optics
Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim
- [75] Bruder, K.F. Interne Messungen
Bayer MaterialScience AG Leverkusen
- [76] Woebken, W. Orientierungserscheinungen in Press- und Spritzgießwerkzeugen.
Dissertation RWTH Aachen, 1961
- [77] Schreyer, G. Konstruieren mit Kunststoffen – Kunststoffe in der Optik.
Carl Hanser Verlag München 1972, S. 810-812
- [78] N.N. ASTM E 313 Standard Test Method for Yellowness Index of Plastic
- [79] Batzer, H; Polymere Werkstoffe, Band I: Chemie und Physik
Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 1985
- [80] Rudolph, N. Druckverfestigung amorpher Thermoplaste
Dissertation Friedrich-Alexander-Universität, Erlangen-Nürnberg, 2009
- [81] Rudolph, N. Persönliche Mitteilung vom 17.01.2012
Polymer Engineering Center – Mechanical Engineering Department
University of Wisconsin-Madison, USA
- [82] Menges, G;
Thienel, P;
Kemper, W. Das physikalische Verhalten von Thermoplasten bei der Aufnahmen von pvT-Diagrammen unter verschiedenen Messbedingungen
Plastverarbeiter 28 (1977) 12, S. 632-637

-
- [83] Dlubek, G.; Pionteck, J.; Shaikh, M.S.; Häußler, L.; Thränert, S.; Hassan, E.M.; Krause-Rehberg, R. The free Volume in two untreated, pressure-densified, and CO₂ Gas exposed Polymers from Positron Lifetime and Pressure-Volume-Temperature Experiments e-Polymers 108 (2007)
- [84] Chang, R.; Hsieh, Y.; Hsu, C.. On the pvT and Thermal Shrinkage for the Injection Molding of Plastic Lens. SPE Processing ANTEC 1998, Atlanta, S. 574-578
- [85] Rudolph, N.; Ehrenstein, G.W.; Osswald, T.A. New insights in pvT – Behavior for high Precision in Injection Molding. SPE Processing ANTEC 2010, Orlando, S. 890-895
- [86] Brockmann, J. Spritzprägen technischer Thermoplaste Dissertation RWTH Aachen, 1998
- [87] Pitscheneder, W. Spritzprägen optischer Teile Tagungsbeitrag „Optische Bauteile aus Kunststoff, Rohstoff, Verarbeitungstechnik, Eigenschaft“ Seminar 25. und 26.10.2005, IKV Aachen
- [88] Bürkle, E.; Wohlrab, W. Spritzprägen, Präzisionstechnik für Spritzgußteile ohne Eigenspannungen, Kunststoffe 89, (1999) 9, S. 64-69,
- [89] Ehrenstein, G.W.; Schmachtenberg, E.; Rudolph, N. Mit Hochdruck zur höherer Maßhaltigkeit Kunststoffe 1 2008, S.74-78,
- [90] Wübken, G.. Einfluss der Verarbeitungsbedingungen auf die innere Struktur thermoplastischer Spritzgussteile unter besonderer Berücksichtigung der Abkühlverhältnisse Dissertation RWTH Aachen, 1974
- [91] Knappe, W. Die Festigkeit thermoplastischer Kunststoffe in Abhängigkeit von den Verarbeitungsbedingungen Kunststoffe Bd. 51, 1961
- [92] Yang, S-Y.; Lien, L., Effects of Cooling Time and Mold Temperature on Quality of Moldings with Precise Conture. Advances in Polymer Technologies 14 (1995) 1 S. 15-24

-
- [93] Pelger, C. Validierung und Optimierung der Abkühlsimulation dickwandiger Formteile zur Optimierung der Wanddickenverhältnisse beim Mehrschichtenspritzguss Unveröffentlichte Diplomarbeit Fachhochschule Köln, Bayer MaterialScience AG, 2010
- [94] Zöllner, O. Herstellung von Kunststofflinsen durch Mehrschichtspritzgießen, Tagungsbeitrag Optische Komponenten aus Kunststoff Institut für Kunststoffverarbeitung, Aachen, 2011
- [95] N.N. Innovative Lights and Lighting Concepts for LED Lenses Pressemitteilung Bayer MaterialScience AG, K2010
- [96] Kühn, M.; Müller, W. Spritzgießverfahren für Plastformteile Patentschrift DE 298 620 A5
- [97] Machida, K.; Suginami, K. Method of Manufacturing Optical-use Plastic Products Patentschrift EP 0 839636 B1
- [98] Iatan, G. Injection Molding Process for Forming a Retro-Reflector Patentschrift WO 2005/077636 A1
- [99] Jeffrey, M. Spritzgegossene photochemische Linsen und Verfahren zu deren Herstellung. Patentschrift EP 0 696 955 D1
- [100] Giessauf, J.; Maass, A. Verfahren zur Herstellung optischer Linsen Patentschrift DE 10 2008 034 153 A1
- [101] N.N. PCS-8047, Ausgabe 2009-06-24 Makrolon LED2045 und LED2245 Bayer MaterialScience AG, Leverkusen
- [102] N.N. Polycarbonat Untersuchung am Lehrstuhl für Kunststofftechnik (LKT) der Universität Erlangen-Nürnberg, 2005
- [103] N.N. Prüfbericht vom 16.10.2009 Deutsches Kunststoff-Institut (DKI), Darmstadt
- [104] N.N. Statistical and Power Analysis Software NCSS 329 North 1000 East, Kaysville, Utah 84037, USA
- [105] Gierth, M. Schriftliche Mitteilung vom 5.2.2011 Dr. Gierth Ingenieurgesellschaft mbH
- [106] Hartung, J.; Elpelt, B.; Klösener, K.-H. Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik R. Oldenbourg Verlag, München, S. 835ff

-
- [107] Zöllner, O. Herstellung von optischen Bauteilen aus transparenten Thermoplasten durch Mehrschichtspritzgießen
Tagungsbeitrag 2. VDI Fachkonferenz – Kunststoffe in optischen Systemen Nov. 2011, Baden-Baden
- [108] Zöllner, O.;
Klinkenberg, C.,
Botzen, M.;
Hermansen, C. Verfahren zur Herstellung von optischen Formkörpern
Patentanmeldung PCT/EP2011/070947
- [109] Gierth, M. Schriftliche Mitteilung vom 11.10.2011
Dr. Gierth Ingenieurgesellschaft mbH
- [110] N.N. DIN EN ISO 13468-2 Bestimmung des totalen Lichttransmissionsgrades von transparenten Materialien
- [111] Huff, K. Visuelle Abmusterung und praktische Farbmessung in der Kunststoffindustrie
Bayer MaterialScience AG; Mai 1993, KU 40.254
- [112] N.N. Allgemeine technische Information ATI 8031
Bayer MaterialScience AG, Leverkusen
- [113] Grellmann, W.;
Seidler, S. Kunststoffprüfung
Carl Hanser Verlag München Wien, S. 327-330, 2005
- [114] Menges, G.;
Osswald, T. Optical Properties of Polymers Material Science of Polymers for Engineers
Carl Hanser Verlag München, 2003
- [115] Bluhm, R. Verbesserte Temperaturkontrolle beim Kunststoffspritzgießen,
Dissertation RWTH Aachen, 1996

9 Liste der Formelzeichen und Abkürzungen

Griechische Formelzeichen :

α	[%]	Grenzwahrscheinlichkeit
α	[W/(m ² *K)]	Wärmeübergangskoeffizient
α	[Grad]	Flankenwinkel der Einfallstellen
ϑ_M	[°C]	Massetemperatur
ϑ_W	[°C]	Werkzeugwandtemperatur
ϑ_E	[°C]	Entformungstemperatur
$\rho(T)$	[Kg/m ⁻³]	temperaturabhängige Dichte
ρ	[%]	Reflexionsgrad
ρ_{ges}	[%]	gesamter Reflexionsgrad
$\rho(\lambda)$	[%]	Reflexionsgrad als Funktion der Lichtfrequenz
λ	[nm]	Wellenlänge (Frequenz) des Lichtes
λ_d	[nm]	Wellenlänge bei 587,6 nm, gelbe Spektralfarbe
v	[m/s]	Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes im Medium
ε_g	[Grad]	Grenzwinkel der Totalreflexion
ε_1	[Grad]	Einfallswinkel
ε_2	[Grad]	Brechungswinkel
ε'	[Grad]	Reflexionswinkel
ε_{vol}	[Grad]	Brechungswinkel durch anisotropes Volumen
$\varepsilon_{\Delta n}$	[Grad]	Brechungswinkel bei Brechzahlunterschieden
ε_{ges}	[Grad]	gesamter Brechungswinkel
Φ_λ	[%]	Lichtstrahl als Funktion der Lichtfrequenz
$(\Phi_\lambda)_0$	[%]	einfallender Lichtstrahl
$(\Phi_\lambda)_{\rho 1}$	[%]	reflektierter Lichtstrahl an erster Grenzfläche
$(\Phi_\lambda)_{\rho 2}$	[%]	reflektierter Lichtstrahl an zweiter Grenzfläche
$(\Phi_\lambda)_\alpha$	[%]	absorbierter Lichtstrahl

$(\Phi_\lambda)_\tau$	[%]	ausfallender Lichtstrahl
$(\Phi_\lambda)_1$	[%]	Lichtstrahl direkt hinter erster Grenzfläche
$(\Phi_\lambda)_2$	[%]	Lichtstrahl direkt vor zweiter Grenzfläche
σ	[Pa ⁻¹]	Spannung
$\delta\rho$	[Kg/cm ³]	Änderung der Dichte
δn	[-]	Änderung der Brechzahl
δz	[mm]	Änderung der Wanddicke
τ_t	[%]	totaler (Licht) transmissionsgrad
$\tau_{(\lambda)}$	[%]	spektraler Transmissionsgrad

Lateinische Formelzeichen :

a_{eff}	[mm ² /s]	effektive Temperaturleitfähigkeit
$a(\lambda)$	%	Absorptionskoeffizient
c_o	[m/s]	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum
C	Pa ⁻¹]	Photoelastischer Koeffizient
dn	[-]	Änderung der Brechzahl
dT	[°C]	Änderung der Temperatur
dx	[mm]	Änderung der Wanddicke
H_0	[-]	Null-Hypothese
H	[mm]	Endwanddicke nach der Wärmebehandlung
$n(T)$	[-]	temperaturabhängige Brechzahl
n	[-]	Brechzahl
n_{PC}	[-]	Brechzahl von Polycarbonat
n_{PMMA}	[-]	Brechzahl von PMMA
n_1	[-]	Brechzahl des umgebenden Mediums
n_2	[-]	Brechzahl des Probekörpers
Δns	[Pa ⁻¹]	Spannungsdoppelbrechung
R_{ges}	[%]	Gesamter Reflexionsgrad
R^2	[-]	Bestimmtheitsmaß

$S(\lambda)$	[%]	Strahlungsfunktion (relative spektrale Energieverteilung) der CIE-Normlichtart D65
s	[mm]	Wanddicke
t_k	[s]	Kühlzeit
Δt_{Ai}	[mm]	Wanddickenabweichung auf der Auswerferseite
Δt_{Di}	[mm]	Wanddickenabweichung auf der Düsenseite
Δt_{max}	[mm]	Maximale Wanddickenabweichung
Δt_{min}	[mm]	Minimale Wanddickenabweichung
$MaxD$	[mm]	Gesamtmaximale Wanddickenabweichung
T_{ges}	[%]	gesamter Transmissionsgrad
T	[°C]	Temperatur
$T_{g(l,p_0)}$	[°C]	Glasübergangstemperatur bei langsamer Abkühlung bei Druck p_0
$T_{g(s,p_0)}$	[°C]	Glasübergangstemperatur bei schneller Abkühlung bei Druck p_0
$T_{g(p_1)}$	[°C]	Glasübergangstemperatur bei Druck p_1
T_g	[°C]	Glasübergangstemperatur
T_F	[°C]	Fließgrenztemperatur
T_R	[°C]	Raumtemperatur
T_{Ent}	[°C]	Entformungstemperatur
T_{Ein}	[°C]	Einfriertemperatur
T_{Atm}	[°C]	Temperatur bei Atmosphärendruck
T_E	[°C]	Einfriertemperatur – angussnah (A), angussfern (F)
T_S	[°C]	Schmelzetemperatur
T_{pz}	[°C]	Temperatur nach Ende Prägen – angussnah (A), angussfern (F)
v_f	[cm ³ /g]	Freies Volumen
v_s	[cm ³ /g]	Schwingungsausdehnungsvolumen
v_0	[cm ³ /g]	Molekülvolumen bei 0 K
V_l	[cm ³ /g]	Leerstellenvolumen
ΔV	[cm ³ /g]	Theoretisch komprimierbares Vorspritzlingsvolumen
$\Delta v_{M,F}$	[%]	Schwindungsdifferenz nach Spritzgießen

Δv_p	[%]	Schwindungsdifferenz nach Prägen
v_d	[-]	Dispersion/Abbe-Zahl
$\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$	[-]	CIE Normspektralwertfunktionen
X, Y, Z	[-]	CIE-Normfarbwert für Rot, Grün, Blau
X_{vol}	[mm]	Verschiebung durch anisotropes Volumen
$X_{\Delta n}$	[mm]	Verschiebung durch unterschiedliche Brechzahlen
X_{ges}	[mm]	gesamte Verschiebung
YI	[-]	Gelbwert, Yellowness-Index
z	[mm]	Wanddickenkoordinate im Probekörper

Indices:

a	Index für Absorption
A _i	Einzelwerte der Wanddickenabweichung auf der Auswerferseite
D _i	Einzelwerte der Wanddickenabweichung auf der Düsenseite
g	Glaszustand
g(l)	Glaszustand nach langsamer Abkühlung
g(s)	Glaszustand nach schneller Abkühlung
ges	Gesamter
r	Reflexion
t	Transmission

Abkürzungen:

QP	Qualitätszahl der Punkteverschiebung
VS	Vorspritzling
NS	Nachspritzling
PC	Polycarbonat
PMMA	Polymethylmethacrylat
COC	Cycloolefin-Copolymer
PA	Polyamid

10 Anhang

	Einheit	Pkt.1	Pkt.2	Pkt.3	Pkt.4	Pkt.5	Pkt.6	Pkt.7	Pkt.8	Pkt.9	Pkt.10
Reihe 1	mm	-0,001	-0,002	0,001	0,001	0,002	0,003	0,006	0,008	0,010	0,011
Reihe 2	mm	0,004	0,005	0,006	0,007	0,008	0,010	0,012	0,013	0,015	0,016
Reihe 3	mm	0,006	0,007	0,008	0,009	0,011	0,011	0,012	0,015	0,017	0,017

Tabelle 10.1 Verkippung der Bauteile gemessen an einem 20 mm Stahl-Endmaß, Mittelwert aus 10 Messungen

	Einheit	Pkt. 1	Pkt. 2	Pkt. 3	Pkt. 4	Pkt. 5	Pkt. 6	Pkt. 7	Pkt. 8	Pkt. 9	Pkt. 10
Messung 1	mm	0,0000	-0,0180	-0,0340	-0,0440	-0,0500	-0,0530	-0,0540	-0,0500	-0,0410	-0,0280
Messung 2	mm	-0,0020	-0,0190	-0,0340	-0,0440	-0,0500	-0,0540	-0,0540	-0,0500	-0,0410	-0,0290
Messung 3	mm	-0,0030	-0,0190	-0,0340	-0,0440	-0,0500	-0,0540	-0,0540	-0,0500	-0,0400	-0,0280
Messung 4	mm	-0,0040	-0,0180	-0,0340	-0,0440	-0,0500	-0,0540	-0,0540	-0,0500	-0,0400	-0,0280
Messung 5	mm	-0,0050	-0,0200	-0,0350	-0,0450	-0,0510	-0,0540	-0,0550	-0,0500	-0,0400	-0,0280
Messung 6	mm	-0,0040	-0,0190	-0,0340	-0,0440	-0,0510	-0,0540	-0,0550	-0,0510	-0,0410	-0,0280
Messung 7	mm	-0,0030	-0,0200	-0,0350	-0,0450	-0,0510	-0,0540	-0,0540	-0,0500	-0,0400	-0,0270
Messung 8	mm	-0,0030	-0,0200	-0,0350	-0,0450	-0,0510	-0,0540	-0,0550	-0,0500	-0,0410	-0,0270
Messung 9	mm	-0,0030	-0,0180	-0,0340	-0,0440	-0,0500	-0,0530	-0,0540	-0,0500	-0,0400	-0,0270
Messung 10	mm	-0,0020	-0,0180	-0,0330	-0,0440	-0,0500	-0,0530	-0,0530	-0,0490	-0,0390	-0,0270
Mittelwert	mm	-0,0029	-0,0189	-0,0342	-0,0443	-0,0504	-0,0537	-0,0542	-0,0500	-0,0403	-0,0277
Standard-abweichung	mm	0,0014	0,0009	0,0006	0,0005	0,0005	0,0005	0,0006	0,0005	0,0007	0,0007

Tabelle 10.2 Messwerttabelle einer 10maligen Messung von Reihe 2 nach Bild 4.1 des Zweischichtprüfkörpers durch Aufnahmen und wieder Einsetzen

Versuchsplan Einschichtprüfkörper				
Versuchsreihe	Teile-Nr.	Kühlzeit	Formnesttemperatur	Nachdruck
		[s]	[°C]	[bar]
VE1	1 – 8	560	117	1100
VE2	9 – 16	728	125	1300
VE3	17 – 24	728	125	900
VE4	25 – 32	390	125	1300
VE5	33 – 40	390	125	900
VE6	41 – 48	728	115	1300
VE7	49 – 56	728	115	900
VE8	57 – 64	390	115	1300
VE9	65 – 72	390	115	900
VE10	72 – 80	560	117	1100

Tabelle 10.3 Detaillierter Versuchsplan – Einschichtprüfkörper
grau: Zentralpunkte

Versuchsplan Zweischichtprüfkörper					
Versuchsreihe	Teile-Nr.	Kühlzeit NS /VS	Formnesttemperatur NS /VS	Nachdruck VS	Nachdruck NS
		[s]	[°C]	[bar]	[bar]
VZ1	1 – 8	290	115	1110	675
VZ2	10 – 17	410	120	1150	600
VZ3	18 – 25	410	120	1150	750
VZ4	27 – 34	410	120	1075	750
VZ5	35 – 42	410	120	1075	600
VZ6	43 – 50	240	120	1150	600
VZ7	51 – 58	240	120	1150	750
VZ8	59 – 66	240	120	1075	750
VZ9	67 – 74	240	120	1075	600
VZ10	75 – 82	290	115	1110	675
VZ11	83 – 90	410	110	1150	600
VZ12	91 – 98	410	110	1150	750
VZ13	99 – 106	410	110	1075	750
VZ14	107 – 115	410	110	1075	600
VZ15	116 – 123	240	110	1150	600
VZ16	124 – 131	240	110	1150	750
VZ17	132 – 139	240	110	1075	750
VZ18	140 – 147	240	110	1075	600
VZ19	148 – 155	290	110	1100	675

Tabelle 10.4 Detaillierter Versuchsplan – Zweischichtprüfkörper

*grau: Zentralpunkte**VS: Vorspritzling, NS: Nachspritzling*

Versuchsplan Dreischichtprüfkörper (Teil 1)						
Versuchsreihe	Teile-Nr.	Formnesttemp. VS	Kühlzeit NS	Formnesttemp. NS	Nachdruck VS	Nachdruck NS
		[°C]	[s]	[°C]	[bar]	[bar]
VD1	1 – 8	95	275	115	500	900
VD2	9 – 16	70	130	120	350	1000
VD3	17 – 24	70	130	120	350	800
VD4	25 – 32	70	130	120	800	800
VD5	33 – 40	70	130	120	800	1000
VD6	41 – 48	70	420	120	800	1000
VD7	49 – 56	70	420	120	800	800
VD8	57 – 64	70	420	120	350	800
VD9	65 – 72	70	420	120	350	1000
VD10	73 – 80	120	420	120	350	1000
VD11	81 – 88	120	420	120	350	800
VD12	89 – 96	120	420	120	800	800
VD13	97 – 104	120	420	120	800	1000
VD14	105 – 112	120	130	120	800	1000
VD15	113 – 120	120	130	120	800	800
VD16	121 – 128	120	130	120	350	800
VD17	129 – 136	120	130	120	350	1000
VD18	137 – 144	95	275	115	500	900

Tabelle 10.5 Detaillierter Versuchsplan – Dreischichtprüfkörper, Teil 1

*grau: Zentralpunkte**VS: Vorspritzling, NS: Nachspritzling*

Versuchsplan Dreischichtprüfkörper (Teil 2)						
Versuchsreihe	Teile - Nr.	Formnesttemp. VS	Kühlzeit NS	Formnesttemp. NS	Nachdruck VS	Nachdruck NS
		[°C]	[s]	[°C]	[bar]	[bar]
VD19	145 – 152	95	275	115	500	900
VD20	153 – 160	70	130	110	350	1000
VD21	161 – 168	70	130	110	350	800
VD22	169 – 176	70	130	110	800	800
VD23	177 – 184	70	130	110	800	1000
VD24	185 – 192	70	420	110	800	1000
VD25	193 – 200	70	420	110	800	800
VD26	201 – 208	70	420	110	350	800
VD27	209 – 216	70	420	110	350	1000
VD28	217 – 224	120	420	110	350	1000
VD29	225 – 232	120	420	110	350	800
VD30	233 – 240	120	420	110	800	800
VD31	241 – 248	120	420	110	800	1000
VD32	249 – 256	120	130	110	800	1000
VD33	257 – 264	120	130	110	800	800
VD34	265 – 272	120	130	110	350	800
VD35	273 – 280	120	130	110	350	1000
VD36	281 – 288	95	275	115	500	900

Tabelle 10.6 Detaillierter Versuchsplan – Dreischichtprüfkörper, Teil 2

*grau: Zentralpunkte**VS: Vorspritzling, NS: Nachspritzling*

Prüfkörper	Qualitätsmerkmal	Modell	Modellordnung	Bestimmtheitsmaß R ²
Einschicht	Maximale Dickenabweichung	MaxD = f(ME)	linear 2. Ord.	0,9623
Zweischicht	Maximale Dickenabweichung	MaxD = f(ME)	linear 2. Ord.	0,9167
Dreischicht	Maximale Dickenabweichung	MaxD = f(ME)	linear 2. Ord.	0,9771

Tabelle 10.7 Modellordnung und Anpassungsgüte R² für das Qualitätsmerkmal „Maximale Dickenabweichung“ als Funktion der Maschineneinstellgrößen

MaxD: Maximale Dickenabweichung, ME: Maschineneinstellung

Punkte- nummer	Pixelabweichung [-] für die jeweilige Messung 1 bis 10										Standard- abweichung [-]
	VD30 - 1	VD30 - 2	VD30 - 3	VD30 - 4	VD30 - 5	VD30 - 6	VD30 - 7	VD30 - 8	VD30 - 9	VD30 - 10	
1	61	60	60	59	61	59	61	60	59	60	0,77
2	49	50	49	47	49	48	49	47	47	48	1,00
3	41	42	41	40	41	40	41	40	40	39	0,81
4	37	38	37	37	38	36	37	37	36	36	0,70
5	36	36	35	35	36	34	35	35	34	35	0,70
6	34	35	35	34	35	38	34	34	34	33	1,28
7	35	36	35	35	36	34	35	35	35	34	0,63
8	37	38	37	36	37	36	37	36	36	36	0,66
9	40	42	41	40	41	40	40	41	40	41	0,66
10	49	50	48	49	49	48	48	48	48	49	0,66
11	62	62	62	62	61	62	61	63	62	62	0,54
12	58	59	59	58	58	57	58	57	57	58	0,70
13	35	35	35	34	35	34	35	34	34	34	0,50
14	24	25	24	23	24	23	24	23	23	23	0,66
15	18	19	18	17	18	17	18	17	17	17	0,66
16	16	17	15	15	16	15	15	15	14	15	0,78
17	15	16	15	14	15	14	15	15	14	14	0,64
18	16	17	16	15	16	14	16	15	15	15	0,81
19	18	19	18	18	18	17	18	18	17	18	0,54
20	24	25	24	24	24	23	24	24	24	24	0,45
21	35	36	35	36	35	35	35	35	35	36	0,46
22	56	58	57	58	58	58	57	59	58	58	0,78
23	57	57	58	56	59	58	57	56	57	58	0,90
24	30	31	31	30	31	30	31	29	30	29	0,75
25	17	17	17	16	17	16	17	16	16	15	0,66
26	9	10	9	8	9	8	9	9	8	8	0,64
27	6	7	6	5	6	5	6	5	5	5	0,66
28	5	6	5	5	5	4	5	5	4	5	0,54
29	6	7	6	6	6	5	6	6	6	6	0,45
30	9	10	9	9	9	9	9	9	9	10	0,40
31	16	17	17	17	16	17	16	17	17	17	0,46
32	30	31	30	30	30	30	30	31	30	31	0,46
33	54	55	53	54	54	55	54	57	55	54	1,02
34	56	56	57	56	58	55	55	55	56	57	0,94
35	30	30	30	30	30	30	30	29	29	29	0,46
36	15	15	15	15	15	14	15	14	14	14	0,49
37	7	8	7	7	8	7	8	7	7	6	0,60
38	3	4	2	2	3	2	3	2	2	1	0,80
39	1	2	1	1	1	1	1	1	1	2	0,40
40	3	3	3	3	3	3	3	3	4	4	0,40
41	7	7	8	8	7	8	7	8	8	8	0,49
42	14	15	15	15	15	15	15	15	16	16	0,54
43	29	29	28	29	29	29	29	29	29	29	0,30
44	52	52	50	52	52	52	52	56	53	52	1,42
45	58	58	57	58	57	56	57	57	56	58	0,75
46	31	30	31	30	31	30	31	29	30	30	0,64
47	15	15	15	15	16	15	15	15	15	14	0,45
48	8	8	8	8	8	7	8	7	7	7	0,49
49	3	3	2	2	3	2	3	2	2	2	0,49
50	0	2	1	1	0	1	0	1	1	2	0,70
51	3	3	3	3	2	3	3	3	3	4	0,45
52	7	7	8	8	7	8	8	8	8	9	0,60
53	14	15	15	15	15	15	15	15	15	16	0,45
54	28	28	28	29	28	29	28	29	28	29	0,49
55	52	52	51	52	52	52	52	53	54	53	0,78
56	61	59	62	60	60	60	61	59	59	60	0,94
57	32	31	32	31	32	31	31	30	31	31	0,60
58	16	16	16	16	16	16	16	15	15	15	0,46
59	9	9	9	9	9	8	9	8	8	8	0,49
60	4	5	4	3	4	3	4	3	3	2	0,81

Tabelle 10.8 a Punkteverschiebungen und Standardabweichungen einer zehnfachen Auswertung mit Herausnehmen der Prüfkörper aus Küvette - Dreischichtprüfkörper VD 30, Teil 1

Punkte- nummer	Pixelabweichung [-] für die jeweilige Messung 1 bis 10										Standard- abweichung [-]	
	VD30 - 1	VD30 - 2	VD30 - 3	VD30 - 4	VD30 - 5	VD30 - 6	VD30 - 7	VD30 - 8	VD30 - 9	VD30 - 10		
61	3	4	3	2	3	2	3	3	2	3	0,60	
62	4	5	4	4	4	4	4	4	4	5	0,40	
63	8	9	9	9	9	9	9	9	9	9	0,30	
64	15	15	15	16	15	16	16	16	16	16	0,49	
65	28	29	28	28	29	29	29	29	29	29	0,46	
66	54	54	54	54	54	54	55	55	55	54	0,46	
67	68	67	68	67	68	67	68	66	68	68	0,67	
68	33	33	33	32	33	32	33	31	32	32	0,66	
69	18	18	18	17	18	17	17	17	17	16	0,64	
70	11	12	11	11	11	10	11	10	10	10	0,64	
71	8	9	7	7	8	7	7	7	6	6	0,87	
72	7	8	7	6	7	6	6	7	6	6	0,66	
73	7	9	8	7	8	7	7	8	7	8	0,66	
74	11	12	11	11	11	11	11	11	11	12	0,40	
75	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	0,00	
76	29	30	29	29	30	30	30	30	30	30	0,46	
77	59	60	58	57	58	59	59	60	58	58	0,92	
78	73	73	73	72	72	72	72	72	71	72	0,60	
79	36	35	36	36	36	35	36	35	35	35	0,50	
80	21	22	21	21	21	20	21	20	20	20	0,64	
81	15	16	15	14	15	14	14	14	14	13	0,80	
82	12	13	11	11	11	11	11	11	11	10	0,75	
83	10	11	10	9	10	9	9	10	9	9	0,66	
84	12	13	12	11	12	12	11	12	11	11	0,64	
85	14	15	15	15	15	15	15	15	14	15	0,40	
86	20	21	20	20	20	20	20	21	20	20	0,40	
87	32	33	32	32	32	32	33	33	33	33	0,50	
88	63	65	64	63	64	64	64	65	64	63	0,70	
89	75	76	76	74	75	75	74	75	76	74	0,77	
90	41	41	41	41	41	40	41	40	40	41	0,46	
91	24	24	24	23	24	23	23	23	23	22	0,64	
92	16	17	16	16	16	15	15	16	15	15	0,64	
93	13	14	13	13	13	13	13	13	12	12	0,54	
94	12	14	13	12	13	12	13	13	12	12	0,66	
95	13	14	13	12	13	12	12	13	12	12	0,66	
96	16	17	16	16	16	16	16	16	15	16	0,45	
97	22	23	22	22	22	22	22	22	22	22	0,30	
98	36	37	36	36	36	36	37	37	36	36	0,46	
99	63	64	63	65	64	64	65	65	65	64	0,75	
100	78	77	80	78	77	78	78	78	79	78	0,83	
101	43	42	43	42	42	42	41	41	42	41	0,70	
102	20	21	21	20	20	20	20	20	19	19	0,63	
103	13	14	13	13	13	12	12	12	12	12	0,66	
104	8	9	8	8	8	8	7	8	7	7	0,60	
105	6	7	6	5	6	5	5	6	5	5	0,66	
106	8	8	7	7	8	7	7	8	7	8	0,50	
107	11	12	12	11	12	11	12	12	11	12	0,49	
108	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	0,00	
109	34	36	34	34	35	34	36	35	35	34	0,78	
110	62	64	62	64	62	63	63	63	62	63	0,75	
111	46	45	46	46	46	46	45	44	46	45	0,67	
112	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	0,00	
113	10	10	10	11	10	10	10	10	10	10	0,30	
114	7	6	7	8	7	7	7	7	7	7	0,45	
115	6	5	6	7	6	6	7	6	7	6	0,60	
116	7	6	7	7	7	7	8	7	8	8	0,60	
117	9	9	9	10	10	10	10	10	10	10	0,46	
118	16	16	16	17	17	17	17	17	17	17	0,46	
119	35	36	34	36	35	35	36	36	35	35	0,64	
											durchschnittliche Standardabweichung aus 1-119 [-]	0,60

Tabelle 10.8 b Punkteverschiebungen und Standardabweichungen einer zehnfachen Auswertung mit Herausnehmen der Prüfkörper aus Kuvette - Dreischichtprüfkörper VD 30, Teil 2

Lebenslauf



Persönliche Daten

Name: Olaf Josef Zöllner
Geburtsdatum/Ort: 05.03.1963, Sundern
Familienstand: verheiratet – 2 Kinder
Nationalität: deutsch

Schulbildung

08/1973 – 06/1979 Städtische Realschule, Sundern
08/1982 – 06/1983 Fachoberschule für Technik, Arnsberg

Wehrdienst

07/1987 – 09/1988 2./ Fernmeldebataillon 7, Lippstadt

Studium

09/1983 – 03/1987 Fachhochschule Hagen (Märkische Fachhochschule
Südwestfalen)
Maschinenbau, Fertigungstechnik, Kunststoffverarbeitung

Ausbildung/Berufstätigkeit

09/1979 – 07/1982 Ausbildung zum Werkzeugmacher
04/1987 – 06/1987 Fachhochschule Hagen, Abt. Iserlohn, Laborassistent
11/1988 – 12/2009 Bayer AG Leverkusen, in verschiedenen verantwortlichen
Positionen
Seit 2010 Leiter der Anwendungsentwicklung für Europa in der Business
Unit Polycarbonates

Promotion

2012 Titel: Kunststoffoptiken im Mehrschichtspritzguß