Matthias H. Deckert

Beitrag zur Entwicklung eines hochdynamischen variothermen Temperiersystems für Spritzgießwerkzeuge

Matthias H. Deckert

Beitrag zur Entwicklung eines hochdynamischen variothermen Temperiersystems für Spritzgießwerkzeuge

TECHNISCHE UNIVERSITÄT
CHEMNITZ

Universitätsverlag Chemnitz
2012

Impressum

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Zugl.: Chemnitz, Techn. Univ., Diss., 2012

Technische Universität Chemnitz/Universitätsbibliothek
Universitätsverlag Chemnitz
09107 Chemnitz
http://www.bibliothek.tu-chemnitz.de/UniVerlag/

Herstellung und Auslieferung
Verlagshaus Monsenstein und Vannerdat OHG
Am Hawerkamp 31
48155 Münster
http://www.mv-verlag.de

ISBN 978-3-941003-64-4

http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa-91506

TECHNISCHE UNIVERSITÄT CHEMNITZ

Beitrag zur Entwicklung eines hochdynamischen variothermen Temperiersystems für Spritzgießwerkzeuge

Von der Fakultät für Maschinenbau der
Technischen Universität Chemnitz
genehmigte

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur
(Dr.-Ing.)

vorgelegt

von Dipl.-Ing. (FH) Matthias H. Deckert
geboren am 15.03.1982 in Heilbronn
eingereicht am 16. September 2011

Gutachter:
Prof. Dr.-Ing. habil. Lothar Kroll
Prof. Dr.-Ing. Andreas Schubert

Heilbronn, den 24.04.2012

Intelligenz ist anpassungsfähig.

Wilhelm Deckert, 1998

Vorwort

Die Eigenschaften von Kunststoffbauteilen werden durch den gewählten Fertigungsprozess und die eingestellten Prozessparameter bestimmt. Beim Spritzgießverfahren als auch bei Injektions- oder Infusionsverfahren (beispielsweise RTM- oder RIM- Verfahren) ist unter anderem die Werkzeugwandtemperatur ein wichtiger Verfahrensparameter. Die überwiegend quasi-konstante Werkzeugwandtemperatur über einen Fertigungszyklus kann dabei nachteilig für den Fertigungszyklus als auch für die Bauteileigenschaften sein. Durch die sogenannte variotherme Temperierung von formgebenden Werkzeugen können diese Defizite reduziert werden. Mit dem neuartigen Einsatz von Widerstandsheizelementen wurde erstmals ein hochdynamischer variothermer Temperaturwechsel erreicht, bei gleichzeitiger Minimierung der verbrauchten Energie.

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Polymer-Institut Kunststofftechnik der Hochschule Heilbronn. Besonders bedanken möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. August Burr (Hochschule Heilbronn) und bei Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Lothar Kroll (Technische Universität Chemnitz) für die Betreuung der vorliegenden Arbeit. Durch die hervorragende Zusammenarbeit, die eingeräumten Freiheiten und durch die Bereitschaft, mich jederzeit bei allen Fragen zu unterstützen, trugen sie maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit bei.

Zusätzlich möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Andreas Schubert (Technische Universität Chemnitz) für die Übernahme der Gutachtertätigkeit und bei Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Bernd Platzer (Technische Universität Chemnitz) für die Durchführung des Prüfungsvorsitzes bedanken. Ebenso bedanke ich mich bei meinen Kollegen am Polymer-Institut Kunststofftechnik und bei den Mitarbeitern der Professur Strukturleichtbau und Kunststoffverarbeitung für ihre Unterstützung bei der Erstellung dieser Arbeit. Darüber hinaus gilt meine Dankbarkeit allen an diesem Thema beteiligten Institutionen und Firmen, welche durch die angenehme und unkomplizierte Zusammenarbeit zum Gelingen der vorliegenden Arbeit beigetragen haben.

Da diese Arbeit den gelungenen Abschluss meiner Dissertation darstellt, möchte ich an dieser Stelle meiner Frau, meiner Familie und meinen Freunden danken. Sie haben mich während dieser Zeit bei allen Herausforderungen, die ich angenommen habe, stets hervorragend unterstützt und so maßgeblich zu meiner persönlichen und fachlichen Entwicklung beigetragen.

Heilbronn-Sontheim im April 2012 Matthias H. Deckert

Bibliographische Beschreibung

Matthias H. Deckert

Beitrag zur Entwicklung eines hochdynamischen variothermen Temperiersystems für Spritzgießwerkzeuge

Dissertation an der Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Chemnitz
Institut für Strukturleichtbau, Professur für Strukturleichtbau und Kunststoffverarbeitung, Chemnitz, 2011

144 Seiten
72 Abbildungen
8 Tabellen
113 Literaturstellen

Referat

Für die Verarbeitung von thermoplastischen Polymeren im Spritzgießprozess ist die Wahl der Werkzeugwandtemperatur entscheidend für die Formteileigenschaften und die optimale Zykluszeit. Das Spritzgießwerkzeug wird standardmäßig bei einer konstanten Werkzeugwandtemperatur betrieben, die bei speziellen Anwendungen, wie zum Beispiel die Abformung von nanostrukturierten Oberflächen, kaum eingesetzt werden kann. Dafür muss die Werkzeugwandtemperatur aktiv über die Dauer eines Spritzgießzyklus variiert werden. Für die variotherme Temperierung wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit eine neue Technik auf Basis einer elektrischen Widerstandsheizung entwickelt und untersucht. Ziel der Arbeit ist die Entwicklung eines hochdynamischen Temperaturwechsels auf einer formgebenden Werkzeugwand, unter Vorgabe der Temperaturverteilung und ohne die Maschinennebenzeit zu verlängern. Dazu werden verschiedene elektrische Heizelemente konzipiert und untersucht.

Schlagwörter: variotherm, hochdynamisch, Temperierung, Widerstandsheizelement, konturfolgend, Spritzgießwerkzeug, Keramikheizung, Dickschichtheizelement, Kühlung, Thermoplaste

Bibliographic Notes

Matthias H. Deckert

Development contribution of a high dynamical variothermal temperature control system for an injection mold

Dissertation at the Faculty for Mechanical Engineering at Chemnitz University of Technology, Institute of Lightweight Structures, Department of Lightweight Structures and Polymer Technology, Chemnitz, 2011

144 pages
72 figures
8 tables
113 citations

Abstract

For the processing of thermoplastic polymers in an injection molding process is the choice of the cavity temperature a critical property and a shape of the optimum cycle time. The standard injection molding process with a quasi constant mold wall temperature cannot be used in the case of special applications, such as the replication of nanostructured surfaces. For this the mold wall temperature has to be varied actively over the duration of an injection molding cycle. These variothermal temperature process is within the scope of the present study especially using a new developed technique based on an electrical resistance heating device. The aim of this work is to develop a highly dynamic temperature change on an injection mold wall by a defined temperature destribution and without an extended machine idle time. Various electric heating elements are designed and tested.

Keywords: variothermal, high dynamical, temperature control system, resitance heating device, conformal, injection mold, ceramic heater, layered heaters, cooling, thermoplastics

Inhaltsverzeichnis

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis **XV**

1 Einleitung **1**

2 Problemstellung und Zielsetzung **3**

3 Stand der Technik **5**

3.1 Literaturübersicht 5

3.2 Variotherme Verfahrenstechnik 7

3.3 Systeme zur Durchführung variothermer Temperaturwechsel 9

4 Anwendungen variothermer Werkzeugtemperierungen **17**

4.1 Abformung von Kleinststrukturen 17

4.2 Gefüge in der Formteilrandschicht 19

4.2.1 Reduzierung von mechanischen Eigenspannungen 19

4.2.2 Sphärolithverteilung 20

5 Konzeptentwicklung zur Umsetzung einer hochdynamischen variothermen Temperierung **23**

5.1 Anforderungen an variotherme Temperaturwechselsysteme 23

5.2 Verwendung von Widerstandsheizelementen 24

5.3 Hochdynamische Heizsysteme 24

5.3.1 Keramische Heizungen 25

5.3.2 Dickschichtheizelemente 32

5.4 Systeme zur schnellen Abkühlung 36

5.4.1 Konturnahe Wassertemperierung 36

5.4.2 Verdampfung von Kältemittel 37
5.4.3 Sprühwasserkühlung 39
5.5 Schlussfolgerung für die Umsetzung 41

6 Prozessablauf mit den konzipierten variothermen Temperiersystemen 43
6.1 Instationäre Wärmeleitung 43
6.1.1 Differenzengleichung zur thermischen Auslegung 44
6.1.2 Formulierung der Randbedingungen 45
6.2 Berechnung der Temperaturwechseldynamik unter Verwendung der neu entwickelten Temperiersysteme 46
6.2.1 Keramische Heizung 46
6.2.2 Dickschichtheizelement 50
6.3 Numerische Berechnung der Abkühlung von Polymeren 52
6.3.1 Bestimmung der Randbedingung 52
6.3.2 Ermittlung der Temperaturleitfähigkeit 53
6.3.3 Kristallisation bei teilkristallinen Thermoplasten 55
6.4 Variotherme Abkühlung thermoplastischer Polymere für die konzipierten Temperaturwechselsysteme 61
6.4.1 Zykluszeiten unter Variation der Temperatur im Kühlmodul 62
6.4.2 Einfluss des Temperatursprungs auf die Zykluszeit 65
6.5 Folgerungen aus den Berechnungsergebnissen 68

7 Versuche mit keramischen Heizungen 69
7.1 Werkzeugtechnik 69
7.1.1 Allgemeiner Aufbau 69
7.1.2 Werkzeugeinsatz 69
7.2 Ansteuerung der Heizelemente 72
7.3 Temperaturmessungen 74
7.3.1 Dynamik 74
7.3.2 Verteilung 76

8 Verwendung und Charakterisierung von Dickschichtheizelementen 79

8.1 Spritzgießwerkzeug 79

8.1.1 Aufbau 79

8.1.2 Formeinsätze 81

8.2 Regelung elektrischer Widerstandsheizelemente 83

8.3 Thermisches Verhalten der Formeinsätze 86

8.3.1 Heizelement im Werkzeug 86

8.3.2 Dickschichtheizelement als Werkzeugwand 91

9 Erkenntnisse aus der Temperierung mit Widerstandheizelementen 95

9.1 Keramische Heizungen 95

9.2 Dickschichtheizelemente 98

9.3 Vergleich der entwickelten Heizelementarten 101

10 Zusammenfassung und Ausblick 103

11 Verzeichnisse 107

11.1 Literaturverzeichnis 107

11.2 Abbildungsverzeichnis 116

11.3 Tabellenverzeichnis 122

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

Lateinische Formelzeichen

Symbol	Beschreibung	Einheit
Δh	spezifische Kristallisationswärme	J/kg
$\dot{m}_\mathrm{d}$	Wasserdurchfluss	kg/sm^2
$\dot{q}$	spezifische Leistung	W/m^3
$\dot{q}_\mathrm{H}$	spezifische Heizleistung	W/cm^2
$\dot{q}_\mathrm{K}$	Kristallisationswärmestrom	W/kg
$\dot{Q}_\mathrm{zu}$	Kühlleistung	W
$\dot{X}$	Kristallisationsrate	1/s
$\dot{X}_\mathrm{max}$	maximale Kristallisationsrate	1/s
$\mathrm{R}_\mathrm{s}^{'}$	Thermoschockbeständigkeit	K
A	Fläche	m^2
a	Temperaturleitfähigkeit	m^2/s
a_a	amorphe Temperaturleitfähigkeit	m^2/s
A_K	Fläche der Kühlkanalwand	m^2
a_k	kristalline Temperaturleitfähigkeit	m^2/s
b_H	Breite des Heizleiters	m
c	spezifische Wärmekapazität	W/kgK
d	hydraulischer Durchmesser des Kühlkanals	m^2
d_B	Bauteildicke	mm
d_H	Dicke des Heizleiters	m
E	Elastizitätsmodul	GPa
e	Regelabweichung	K
H_max	maximaler Stellgrad der Heizleistung	%
H_min	minimaler Stellgrad der Heizleistung	%

HRC	Härte nach Rockwell	HRC
HV	Härte nach Vickers	HV
I	elektrische Stromstärke	A
K_B	Proportionalband	K
K_max	maximaler Stellgrad der Kühlleistung	%
K_min	minimaler Stellgrad der Kühlleistung	%
K_P	Verstärkungsfaktor des Reglers	1/K
l	Länge des Heizleiters	m
P	elektrische Leistung	W
p_W	Werkzeuginnendruck	bar
q_ges	gesamte Wärmemenge	J/kg
Q_K	Wärmestrom	J
R	elektrischer Widerstand	Ω
R_m	Zugfestigkeit	MPa
Ra	arithmetischer Mittenrauwert	m
Re	Reynoldszahl	-
t	Zeit	s
t_K	Kühlzeit	s
t_Z	Zykluszeit	s
t_H	Heizzeit	s
T_N	Integralzeit oder Nachstellzeit des Reglers	s
T_V	Differentialzeit oder Verzögerungszeit des Reglers	s
U	elektrische Spannung	V
u	Stellgröße	-
w	Strömungsgeschwindigkeit	m/s
X	Kristallisationsgrad	-
x	Raumrichtung	m
x_E	Spaltbreite	mm
x_S	entstehender Spalt	mm

Griechische Formelzeichen

Symbol	Beschreibung	Einheit
α	Wärmeausdehnungskoeffizient	10^{-6}/K
α_w	Wärmeübergangskoeffizient Kanalwand	W/m^2
λ	Wärmeleitfähigkeit	W/mK
ν	kinematischen Viskosität	m^2/s
Φ	kristallisationsabhängige Kristallisationsrate	-
Ψ	temperaturabhängige Kristallisationsrate	-
ρ	Dichte	kg/m^3
ρ_{el}	spezifischer elektrischer Widerstand	Ωm
σ_B	Biegebruchfestigkeit	MPa
ϑ	Temperatur	°C
ϑ_0	Starttemperatur	°C
ϑ_A	Temperatur im Rücklauf	°C
ϑ_E	Temperatur im Vorlauf	°C
ϑ_M	Massetemperatur	°C
ϑ_O	Obere Werkzeugwandtemperatur	°C
ϑ_U	Untere Werkzeugwandtemperatur	°C
ϑ_W	Werkzeugwandtemperatur	°C
ϑ_K	Temperatur des Kühlmoduls	°C
ϑ_F	Temperatur des Fluids	°C
ϑ_{KW}	Temperatur der Kanalwand	°C
ϑ_Z	Zersetzungstemperatur	°C

Abkürzungen

Symbol	Beschreibung
Al_2O_3	Aluminiumoxid
CO_2	Kohlendioxid
H_2SO_4	Schwefelsäure
$MoSi_2$	Molybdänsilizid
$NiSO_4$	Nickelsulfat

Si_3N_4	Siliziumnitrid
TiB_2	Titandiborid
ZrO_2	Zirkonoxid
AFM	Atomic Force Microscope
AlN	Aluminiumnitrid
AS	Auswerferseite
CBN	Cubic cristallin Bornitrid
CD	Compact Disc
cps	counts per second
DS	Düsenseite
DVD	Digital Versatile Disc
EDX	Energie Dispersive Röntgenspektroskopie
FEM	Finite Element Method
HPSiC	Hot Pressed Siliciumcarbid
LPSSiC	Liquid Phase Sintered Siliciumcarbid
NiCr	Nickelchrom
PC	Polycarbonat
PID	Proportional Integral Differential
PP	Polypropylen
PVD	Physical Vapour Deposition
SEI	Sekundary Elektron Image
SiC	Siliciumcarbid
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
SS	Spotsize
WZ	Werkzeug
POM	Polyoxymethylen
RIM	Reaction Injection Moulding
RTM	Resin Transfer Moulding
TiN	Titannitrid

1 Einleitung

Für die Herstellung von präzisen Spritzgießbauteilen ist ein exaktes und auf das Bauteil abgestimmtes Werkzeug, eine gute Materialvorbereitung und eine optimale Parametereinstellung der Spritzgießmaschine notwendig. Neben der richtigen Wahl der maschinenseitigen Prozessparameter in der Formfüll- und Abkühlphase, ist der Einfluss der Temperatur formgebender Werkzeugoberflächen auf die Bauteileigenschaften von großer Bedeutung. Je nach verwendeter Formmasse können Eigenschaften wie Kristallisationsgrad, Verzug, Schwindung und Oberflächenbeschaffenheit entscheidend durch die Werkzeugwandtemperatur beeinflusst werden. Eine erhöhte Werkzeugwandtemperatur im thermoplastischen Spritzgießprozesses ermöglicht zum Beispiel, spezielle Kleinststrukturen auf Bauteiloberflächen abzuformen.

Im konventionellen, thermoplastischen Spritzgießprozess wird in der Regel eine konstante Werkzeugwandtemperatur angestrebt, die über die Dauer eines Spritzgießzyklus leicht periodisch variiert. Diese Vorgehensweise ist für zahlreiche Bauteile ausreichend. Spritzgießbauteile die dünnwandig sind, können aufgrund der erstarrenden Schmelze während der Formfüllung oftmals nicht vollständig oder nur mit hohen material- und werkzeugschädigenden Einspritzdrücken gefüllt werden. Hierfür ist es vorteilhaft, die Werkzeugwandtemperatur über die Dauer eines Spritzgießzyklus aktiv zu ändern. Für die Herstellung eines dünnwandigen Bauteils kann die Werkzeugwandtemperatur zu Beginn der Formfüllung soweit angehoben werden, dass die Füllung der Kavität gewährleistet ist. Zur formstabilen Entnahme des Bauteils ist die Werkzeugwandtemperatur wieder rasch abzusenken. Im Gegensatz zu dünnwandigen Bauteilen ist die Abkühlzeit von Dickwandbauteilen, zum Beispiel bei optischen Linsen, relativ lang. Insbesondere bei dickwandigen Bauteilen kann durch die variotherme Werkzeugtemperierung oft eine kürzere Kühlzeit erreicht werden.

Im Unterschied zu Thermoplasten wird bei der Verarbeitung von vernetzenden Kunststoffen, wie zum Beispiel Polyurethanen oder Epoxidharzen, die Werkzeugwandtemperatur erst nach der Formfüllung angehoben. So wird die Vernetzung während der Formfüllphase im Kunststoff gemindert, wodurch Eigenspannungen reduziert werden können. Das anschließende Erhöhen der Temperatur beschleunigt die Vernetzungsreaktion und führt zu einer früheren Bauteilentnahme.

Aufgrund der genannten Vorteile soll in dieser Arbeit die Entwicklung und Validierung einer hochdynamischen variothermen Verfahrenstechnik vorgenommen werden. Dadurch kann im Unterschied zu gängigen Temperiersystemen der Prozess verbessert und optimalere Bauteileigenschaften erzielt werden.

2 Problemstellung und Zielsetzung

Für die variotherme Temperierung von Spritzgießwerkzeugen sind verschiedene Systeme bekannt. Derzeit finden vor allem Temperiersysteme auf Basis von Wasser, Wasserdampf, Öl und in einigen Fällen auch in Kombination mit Induktion oder Infrarot-Wärmestrahlung Anwendung. Beim Einsatz dieser Temperiersysteme ist in der Regel mit längeren Zykluszeiten gegenüber dem konventionellen Spritzgießprozess zu rechnen.
Dagegen erlauben variotherme Temperiersysteme auf Basis elektrischer Widerstandsheizelemente einen deutlich schnelleren Temperaturwechsel an der Werkzeugwand. Diese können zusammen mit einem Kühlmodul im Spritzgießwerkzeug eingesetzt werden, wodurch der Prozess verbessert und die Produktivität erhöht werden kann.
Elektrische Widerstandsheizelemente zum Beispiel auf Basis einer elektrisch leitfähigen Keramik können für die variotherme Temperierung von formgebenden Werkzeugen eingesetzt werden. Durch die hohe Druckfestigkeit der Keramik ist die Abstützung des auftretenden Werkzeuginnendrucks durchführbar. Die Sprödigkeit der Keramik ist allerdings im Hinblick auf die auftretenden dynamischen Biegungen durch den Werkzeuginnendruck und die elektrische Isolation gegenüber dem meist metallischen Werkzeug problematisch. Deshalb muss die elektrische Isolation des Widerstandsheizelementes ebenfalls den Werkzeuginnendruck abstützen können und zusätzlich in einem weiten Temperaturbereich eine ausreichende elektrische Isolationswirkung bei einem guten Wärmeübergang gewährleisten.
In der vorliegenden Arbeit sollen neue Verfahren zur Isolation von plattenförmigen, keramischen Widerstandsheizelementen entwickelt werden. Dazu sind elektrisch isolierende Materialien wie Hochtemperatur-Kunststofffolien, Keramiken oder Herstellungsverfahren zur Erzeugung einer elektrischen Isolationsschicht zu untersuchen und umzusetzen. Neben der Entwicklung einer elektrischen Isolation für keramische Widerstandsheizelemente sind die konstruktiven Randbedingungen zu definieren, durch die eine Integration von elektrischen Widerstandsheizelementen in ein Spritzgießwerkzeug möglich wird. Hierfür sind die auftretenden Biegungen während des Spritzgießprozesses und die thermische Ausdehnung zu beachten.
Neben diesen sogenannten keramischen Heizungen sind weitere Widerstandsheizelemente zu entwickeln. Dazu sollen erstmals neuartige, elektrische Widerstandsheizelemente auf Dickschichtbasis entwickelt, hergestellt, in ein Spritzgießwerkzeug integriert und untersucht werden. Damit ein Dickschichtheizelement für die variotherme Temperierung genutzt werden kann, ist deren Herstellungsprozess zu untersuchen und die konstruktiven

Randbedingungen für eine dauerhafte Nutzung unter Spritzgießbedingungen zu ermitteln. Damit ein hochdynamischer Temperaturwechsel an einer formgebenden Werkzeugwand erfolgt, sind die zu konzipierenden elektrischen Widerstandsheizelemente oberflächennah einzubauen. Zur gleichmäßigen Temperierung eines thermoplastischen Spritzgießbauteils und für die gezielte großflächige Verarbeitung eines vernetzenden Polymers, sind die Widerstandsheizelemente auch möglichst konturfolgend der Werkzeugwand anzupassen.

Zum Erreichen einer schnellen Abkühlung sind verschiedene Kühlprinzipien zu untersuchen. Die betrachteten Kühlsysteme sollen in Kombination mit den zu entwickelnden elektrischen Widerstandsheizelementen in ein Spritzgießwerkzeug eingebaut werden können. Neben der Abkühldynamik sind daher auch die konstruktiven Restriktionen zu untersuchen und in der Auswahl und Umsetzung zu berücksichtigen.

Für einen qualitativen, effektiven und wirtschaftlichen Spritzgießprozess ist eine hohe Temperaturwechseldynamik ausschlaggebend. Diese soll durch die konstruktive Gestaltung, den eingesetzten Materialien und der spezifischen Leistung des Widerstandsheizelementes beziehungsweise des Kühlmoduls verbessert werden. Das thermische Verhalten, wie die Aufheiz- und Abkühlphasen, sollen mit einem numerischen Verfahren berechnet werden. Durch die variotherme Werkzeugtemperierung wird speziell die Abkühlung der verarbeiteten Formmasse im Spritzgießprozess beeinflusst. Der Einfluss auf die Zykluszeit, die aus der Aufheiz- und Kühlzeit ermittelt wird, soll anhand des numerischen Verfahrens unter Spritzgießbedingungen berechnet und untersucht werden.

Durch praktische Versuche ist abschließend die Eignung von elektrischen Widerstandsheizelementen für den Einsatz in Spritzgießwerkzeugen zur hochdynamischen variothermen Temperierung darzulegen. Ferner ist die Temperaturwechseldynamik, die Temperaturverteilung auf der formgebenden Werkzeugwand, die gezielte Einstellung und Reproduzierbarkeit der Temperaturverläufe zu charakterisieren. Je nach Anforderung durch das Bauteil soll mit dem zu entwickelten Temperiersystem neben einer homogenen Temperaturverteilung auch eine gezielte, partielle Einstellung der Werkzeugwandtemperatur umsetzbar sein. Dies ist bei der Temperierung von entsprechenden Anwendungsfällen, wie zum Beispiel Bauteilverengungen (Filmscharniere, Airbag-Abdeckungen) oder Materialansammlungen (Verrippungen) zu berücksichtigen.

3 Stand der Technik

3.1 Literaturübersicht

Die variotherme Verfahrenstechnik wird für verschiedene Anwendungen, wie die Abformung von nanostrukturierten Oberflächen oder die Vermeidung der Sichtbarkeit von Bindenähten, eingesetzt. Die derzeit verwendeten Verfahren haben oft eine niedrige Aufheizdynamik bei einem gleichzeitig hohen Energieaufwand. Weit verbreitet sind vergleichsweise einfache variotherme Temperiersysteme auf Basis eines Wasser-Wasser-Systems (vgl. [Het05, XZ08]). Temperierkanäle im Werkzeug werden in der Aufheizphase mit heißem Wasser durchströmt. Hat die Werkzeugwand die gewünschte Temperatur erreicht, wird mit kaltem Wasser auf ein unteres Temperaturniveau abgekühlt, beziehungsweise bis das Bauteil formstabil ist und entnommen werden kann. Das erreichbare Temperaturniveau und die Temperaturwechseldynamik sind bei der Anwendung dieser Methode stark eingeschränkt. Zur Verbesserung der Temperaturwechseldynamik können konturangepasste Kühlkanäle verwendet werden (vgl. [Xu99, XS09]).
Neben fluidischen Temperiersystemen wurde die induktive Erwärmung theoretisch und experimentell untersucht. Dabei wurden Spritzgießwerkzeuge unter Einsatz von externen und internen Induktoren aufgeheizt. Für die Erwärmung der Werkzeugwand können externe und interne Induktoren eingesetzt werden. Ein externer Induktor wird in das geöffnete Spritzgießwerkzeug eingefahren und erwärmt die Werkzeugwand oberflächennah. Durch einen internen Induktor entfällt der Ein- und Ausschwenkvorgangs, wobei die Werkzeugwand gezielt erwärmt wird. Eine geringere Aufheizrate ist die Folge und damit verbunden eine eventuell längere Maschinennebenzeit. Zur Abkühlung wird meist temperiertes Wasser durch konturnahe Temperierkanäle geleitet (vgl. [Tew97, Sch01, Gär05, KLK$^+$06, CJC06, Hin08]).
Ein weiteres Prinzip für die Werkzeugwanderwärmung ist die Wärmestrahlung (vgl. [CH06, YYH07, SSK02]). Ein Infrarot-Wärmestrahler wird in das geöffnete Werkzeug eingefahren und erwärmt die Werkzeugwand ebenfalls oberflächennah. Die Abkühlung erfolgt mit kaltem Wasser, das durch konturnahe Kühlkanäle gepumpt wird. Das Einfahren des Infrarot-Wärmestrahlers hat jedoch eine entsprechende Verlängerung der Zykluszeit zur Folge. Diese Verlängerung kann durch einen zyklusparallelen Ablauf minimiert werden, wofür zwei identische Formeinsätze zur Anwendung kommen (vgl. [Gie08]). Die beiden Formeinsätze sind beispielsweise auf einer beweglichen Aufspannplatte montiert. Ein erwärmter Formeinsatz wird im Werkzeugbereich platziert. Während mit diesem

Formeinsatz produziert wird, erwärmt ein Infrarot-Wärmestrahler gleichzeitig den zweiten Formeinsatz.

Ein weiteres Verfahren - auf Basis von gesättigtem Wasserdampf - kann ebenfalls für die variotherme Temperierung der Werkzeugwand eingesetzt werden. Dazu sind konturangepasste Temperierkanäle in dem Spritzgießwerkzeug notwendig. In der Aufheizphase wird gesättigter Wasserdampf durch diese Temperierkanäle geleitet, welche die Werkzeugwand erwärmen. Abgekühlt wird anschließend mit kaltem Wasser (vgl. [WZL+09, LZG+09, Hen80]).

Ferner können flächige, elektrische Widerstandsheizungen für die variotherme Temperierung eingesetzt werden. Hierzu werden beispielsweise elektrische Widerstandsheizungen aus einem keramischen Werkstoff in Kombination mit konturangepassten Kühlkanälen verwendet (vgl. [Mül06, YCK08, Gri09]).

Die Methoden zum variothermen Temperieren von Spritzgießwerkzeugen durch Mikrowelleneinwirkung (vgl. [Kwa98, Ako07]), Gasflammen (vgl. [KKC01]), Laserstrahlung (vgl. [MKS10]) oder Peltierelementen (vgl. [WMC+03, Mül06]) wurden ebenfalls bereits untersucht. Für die Durchführung einer mikrowellenbasierten Erwärmung sind spezielle Oberflächenbeschichtungen notwendig. Für die Abkühlung kommen ebenfalls wasserdurchflossene Temperierkanäle zur Anwendung. Bei der Erwärmung mit einer Gasflamme wird ein gasförmiger Energieträger und eine Zündeinrichtung im Werkzeug verbaut. Die beim Verbrennen entstehende Wärme wird durch Wärmestrahlung und Konvektion an das Spritzgießwerkzeug abgegeben, die Werkzeugwandtemperatur steigt. Peltierelemente können durch den thermoelektrischen Effekt heizen und kühlen. Die geringe Druckbeständigkeit lässt den Einsatz in Spritzgießwerkzeugen jedoch nur eingeschränkt zu. Damit eine Erwärmung mit Laserstrahlung erfolgt, müssen speziell auf die Wellenlänge der Laserstrahlen entsprechend abgestimmte, transparente Formeinsätze verbaut werden.

Für die thermische Auslegung der Heizsysteme können unterschiedliche Berechungsverfahren eingesetzt werden (vgl. [WZG10, YK02]). Eine analytische Lösung der Wärmeleitungsgleichung (vgl. [YS92, XK99, Ste03]) kann für die Berechnung bedingt herangezogen werden, da hier konstante Materialparameter im Spritzgießwerkzeug eine Voraussetzung sind. Bei der variothermen Temperierung mit Widerstandsheizelementen werden verschiedene Materialien im Spritzgießwerkzeug eingesetzt, deren Stoffwerte zum Teil von der Temperatur abhängen (vgl. [BS06]).

Die erhöhte Werkzeugwandtemperatur zu Beginn der Formfüllung beeinflusst die Abkühlung des Formteils. Anhand eines numerischen Differenzenverfahrens kann der Abkühlvorgang unter Berücksichtigung von temperaturabhängigen Stoffwerten oder Kristallisationsvorgängen in der abkühlenden Formmasse berechnet werden (vgl. [NC04]). Zur Ermittlung dieser temperaturabhängigen Stoffwerte sind verschiedene Messmethoden beziehungsweise Modelle bekannt (vgl. [MHM+02, Mon01, Die81, Avr39]). Einflüsse durch den Spritzgießprozess können dabei nur bedingt berücksichtigt werden. Erste Untersuchungen hinsichtlich der Abkühlung von Polymeren unter Verarbeitungsbedingungen wurden durchgeführt (vgl. [NCB81]).

3.2 Variotherme Verfahrenstechnik

Die Materialeigenschaften der verschiedenen Kunststoffarten erfordern einen unterschiedlich ablaufenden variothermen Prozess. Thermoplastische Polymere werden für die Verarbeitung aufgeschmolzen und in die gewünschte Geometrie geformt. Variotherme Temperiersysteme werden hier vor allem beim Spritzgießen eingesetzt. Vernetzende Polymere können nicht aufgeschmolzen werden, deshalb ist eine Vermischung - meist mehrerer Komponenten - direkt vor oder während der Formgebung eines Bauteils vorzunehmen. Nach der Vermischung vernetzen die meist flüssigen Komponenten. Zu dieser Werkstoffgruppe zählen Elastomere oder Duroplaste. Diese Kunststoffarten unterscheiden sich durch die Anzahl der Quervernetzungen. Elastomere haben weitmaschige Verzweigungen und sind deshalb elastisch, während Duroplaste viel engmaschiger und dadurch spröde sind. Mit variothermen Temperiersystemen kann eine gezielte Beeinflussung der Vernetzungsreaktion durchgeführt und damit verbunden der Herstellungsprozesses eines Bauteils systematisch beschleunigt werden.

Thermoplastischer Spritzgießprozess

Für die isotherme Spritzgießverarbeitung von thermoplastischen Polymeren wird in der Regel ein möglichst konstanter Verlauf der Werkzeugwandtemperatur angestrebt. Während eines Spritzgießzyklus schwankt die Temperatur der formgebenden Werkzeugoberflächen leicht durch den Kontakt mit der heißen Schmelze. Die Temperatur der Werkzeugwand wird bei diesem Fertigungsprozess nicht aktiv variiert. Bei der variothermen Spritzgießverarbeitung von thermoplastischen Polymeren wird im Unterschied zur isothermen Verarbeitung die Werkzeugwandtemperatur zum Zeitpunkt der Formfüllung (4) angehoben (Bild 3.1).
Die obere Werkzeugwandtemperatur ist dabei von der verarbeiteten Formmasse, dem angestrebten Anwendungsfall oder dem eingesetzten Heizsystem abhängig. Ist die Werkzeugkavität volumetrisch gefüllt, wird im einfachsten Fall die Temperatur der gesamten, formgebenden Werkzeugwand abgesenkt, wobei die untere Werkzeugwandtemperatur meist von der eingesetzten Formmasse oder der Leistungsfähigkeit des eingesetzten Kühlsystems abhängt.
Wird die Werkzeugwandtemperatur so schnell geändert, dass keine Verlängerung der Zykluszeit gegenüber einem vergleichbaren isothermen Spritzgießprozess stattfindet, wird dies als hochdynamischer variothermer Spritzgießprozess bezeichnet. Das bedeutet, dass die Erwärmung der Werkzeugwandoberfläche während der Maschinennebenzeit stattfindet und die Abkühlung des Kunststoffes nicht länger als bei einem isothermen Spritzgießprozess dauert (vgl. [DBK+08a]).

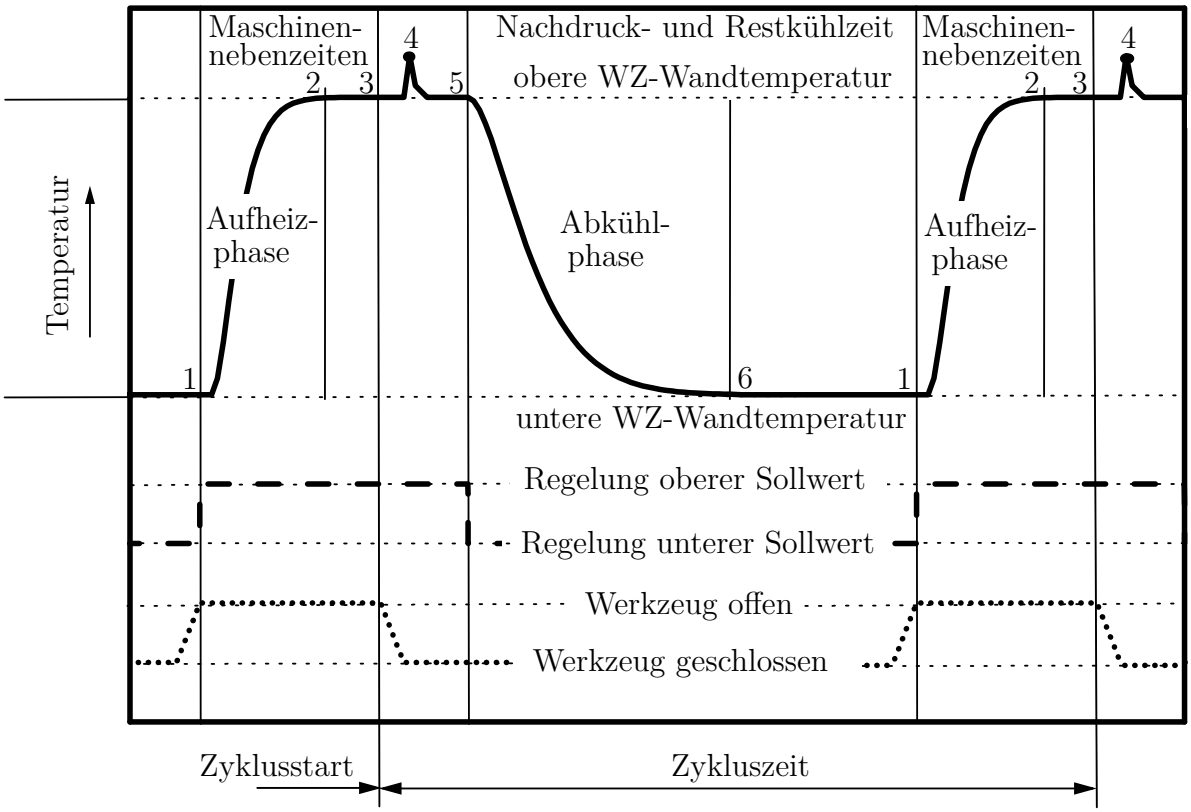

Bild 3.1: Ablauf des variothermen Spritzgießprozess (1: Start Heizen, 2: Obere Werkzeugwandtemperatur erreicht, 3: Freigabe Einspritzen, 4: Start Einspritzen, 5: Start Kühlen, 6: Untere Werkzeugwandtemperatur erreicht)

Verarbeitung vernetzender Polymere

Vernetzende Polymere bestehen oft aus niederviskosen, flüssigen Mehrkomponentensystemen. Die Verarbeitungszeit nach der Vermischung der Komponenten kann über die Zugabe von Katalysatoren eingestellt werden. Dies hat zur Folge, dass bei der Verarbeitung in der Regel eine Vermengung der einzelnen Komponenten unmittelbar vor jeder Dosierung erfolgen muss [DBK+09b].

Bei der Verarbeitung vernetzender Polymere im RIM- oder RTM-Verfahren, sowie bei sogenannten In-Mould-Coating Verfahren wird die Werkzeugwand auf eine bestimmte, materialspezifische Temperatur eingestellt (vgl. [KSW09]). Diese Temperatur ist so gewählt, dass die Formfüllung durch die Vernetzung nicht beeinträchtigt wird. Zur Beschleunigung der Vernetzung kann die Werkzeugwandtemperatur anschließend angehoben werden (vgl. [FZR99]).

Die derzeit eingesetzten Temperiersysteme haben meist eine geringe Aufheizrate. Durch den Einsatz eines hochdynamischen variothermen Temperiersystems kann eine Reduzierung der Zykluszeit um bis zu 80 % erreicht werden (vgl. [Küb10, DBK+09c]). Ist der Gelpunkt und damit eine robuste Struktur des vernetzenden Polymers erreicht, kann das Formteil entformt werden (Bild 3.2). Für den nächsten Zyklus muss zwecks einer einwandfreien Formfüllung die erwärmte Werkzeugwand wieder abgekühlt werden.

Je höher die obere Werkzeugwandtemperatur ist, desto schneller verläuft die Vernetzungs-

reaktion. Ausgewählte Polymere sind hinsichtlich der thermischen Induzierung modifiziert. Damit die Vernetzungsreaktion induziert wird, ist das Überschreiten einer Temperatur erforderlich. Hier ist keine Vermischung der einzelnen Komponenten unmittelbar vor dem Herstellungsprozess vorzunehmen (vgl. [SSH+10]).

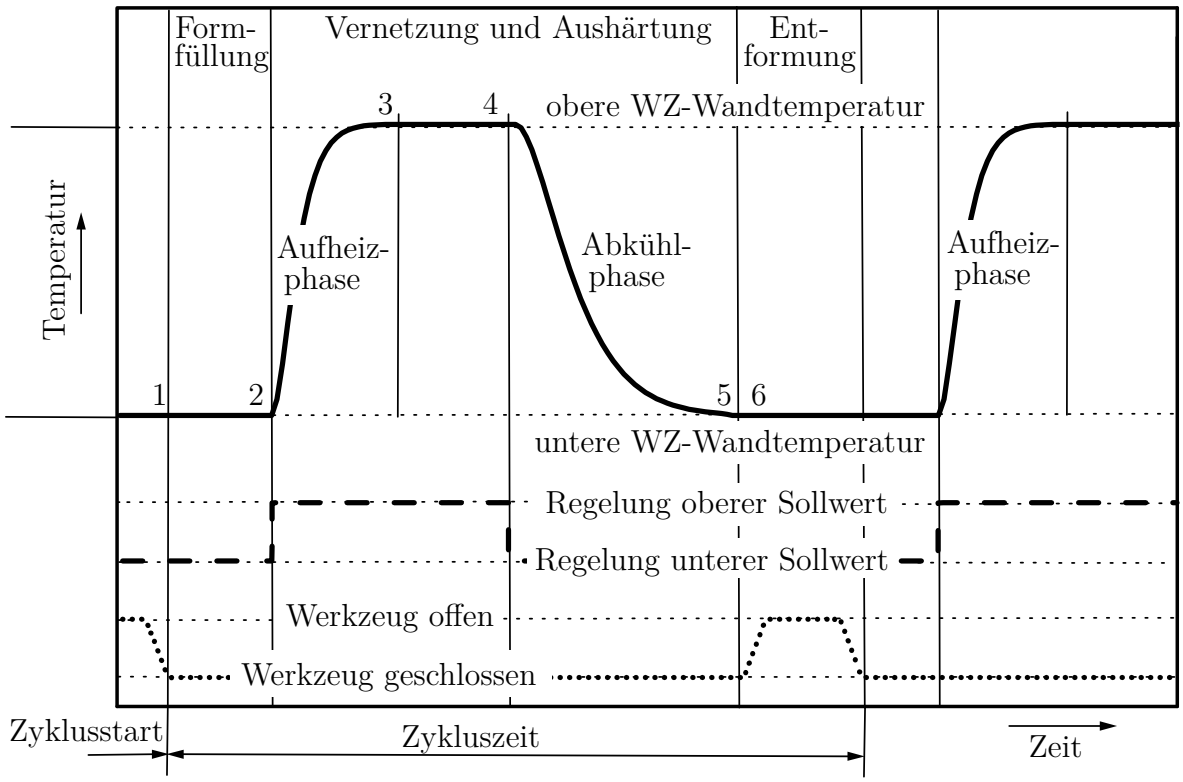

Bild 3.2: Ablauf der variothermen Verfahrenstechnik für vernetzende Polymere (1: Start Einspritzen, 2: Start Heizen, 3: Obere Werkzeugwandtemperatur erreicht, 4: Start Kühlen, 5: Untere Werkzeugwandtemperatur erreicht, 6: Auswerfen)

3.3 Systeme zur Durchführung variothermer Temperaturwechsel

Derzeit sind verschiedene variotherme Temperiersysteme verbreitet. Dazu zählen Temperaturwechselsysteme auf fluidischer und dampfförmiger Basis und deren Kombination mit induktiven Heizsystemen oder Infrarot-Wärmestrahlern. Aus diesen Systemen kann anhand des angestrebten Temperatursprungs, der unter anderem durch das herzustellende Formteil bestimmt ist, ausgewählt werden.

Fluide

Bei der variothermen Temperierung mit einem fluidischen Wärmeträgermedium sind mindestens zwei unterschiedlich temperierte Medien signifikant, die abwechselnd durch Kanäle im Spritzgießwerkzeug geleitet werden. Die Wärmeübertragung zwischen Fluid und Ka-

nalwand erfolgt durch Konvektion. Von dieser Kanalwand wird die Wärme an die Werkzeugoberfläche durch Wärmeleitung transportiert (vgl. [EFH93]).
Für Temperaturbereiche bis 200 °C (Temperatur im Vorlauf) sind wasserbasierte Temperiersyteme einzusetzen. Bis 300 °C werden Systeme auf Basis von Öl verwendet. Kommen wasserbasierte Systeme zum Einsatz, ist bei Temperaturen über 80 °C eine Drucküberlagerung notwendig, damit ein Sieden des Wassers unterbunden wird. Die zyklische Umschaltung zwischen Heiß- und Kaltwassersystem erfordert somit ebenfalls eine Drucküberlagerung des kalten Wassers. Mit einem Ventilblock (5) wird zwischen den beiden Kreisläufen umgeschaltet (Bild 3.3). Dadurch wird wechselseitig das kalte oder das warme Fluid aus den Temperierkanälen verdrängt (vgl. [Mül01]).

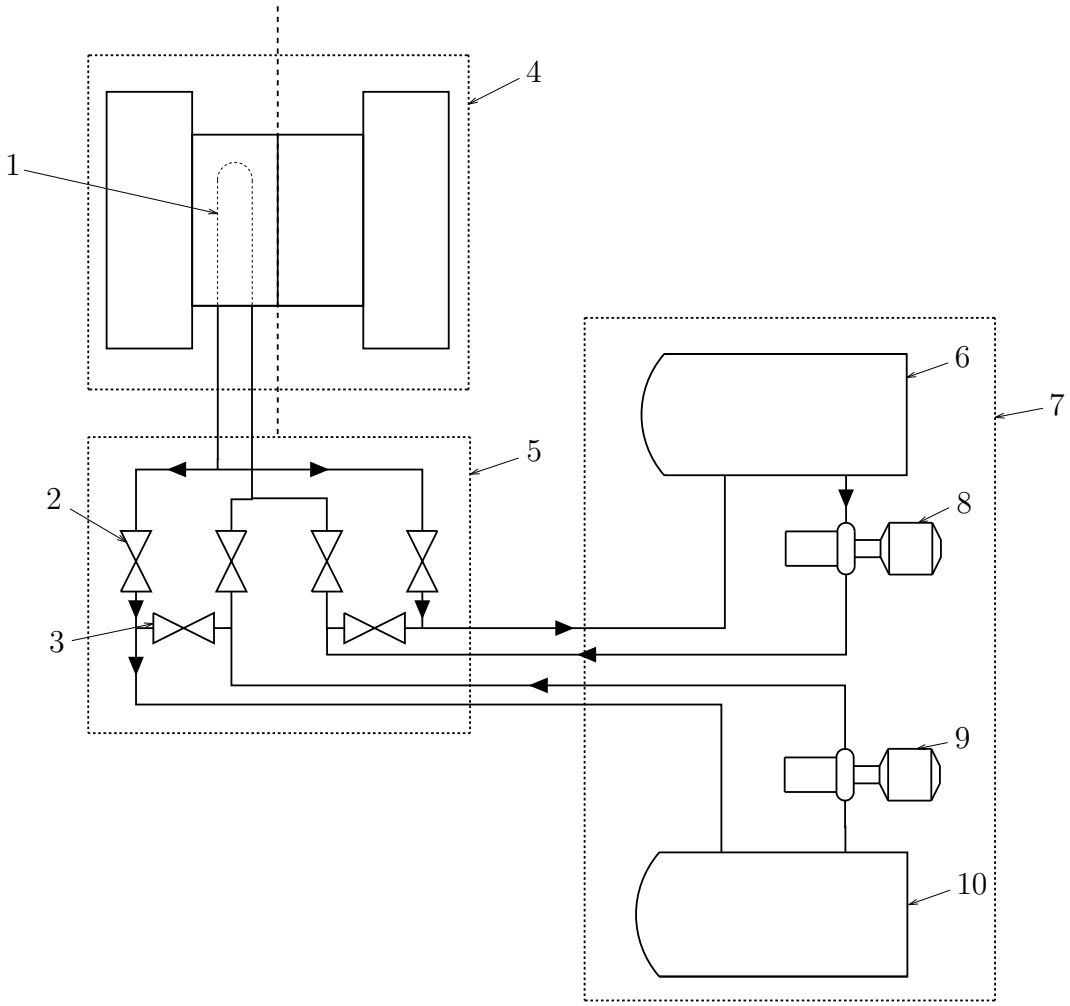

Bild 3.3: Schematischer Aufbau eines variothermen Temperiersystems mit Wasser (1: Schematischer Temperierkanal, 2: Rücklauf Kaltwasserventil, 3: Bypass-Ventil, 4: Spritzgießwerkzeug, 5: Ventilblock, 6: Heißwasserbehälter, 7: Temperaturwechselsystem, 8: Pumpe für den Heißwasserkreis, 9: Pumpe für den Kaltwasserkreis, 10: Kaltwasserbehälter)

Für eine hohe Temperaturwechseldynamik ist bei der Konstruktion des Werkzeugeinsatzes darauf zu achten, dass der Abstand zwischen Temperierkanal und Werkzeugwand minimal wird, ohne dabei die mechanische Stabilität des Werkzeugs zu beeinflussen. Die Tempe-

rierung wird in die Werkzeugeinsätze durch bohren, löten oder das Laserumschmelzverfahren eingebracht. Zur weiteren Verbesserung der Temperaturwechseldyanmik ist die Leitungslänge zwischen Werkzeug (4) und Ventilblock (5) gering zu halten. Deshalb ist eine werkzeugnahe Umschaltung anzustreben. Die beiden Medien werden über ein Bypass-Ventil (3) dauerhaft im Kreis gepumpt. Wird ein entsprechendes Medium gebraucht, werden die entsprechenden Vor- und Rücklaufventile (2) geöffnet. Durch diese werkzeugnahe Umschaltung wird die Latenzzeit zwischen Umschaltung und Temperatursprung an der Werkzeugwand minimiert. Das wechselseitige Verdrängen und Vermischen der beiden Temperierkreisläufe kann ebenfalls durch gezieltes schalten der Vor- und Rücklaufventile reduziert werden. Durch die geringere Vermischung der eingesetzten Temperiermedien wird eine bessere Energieeffizienz erreicht (vgl. [GM08]).
Die Temperaturwechseldynamik bei fluidischen Medien kann ebenfalls durch getrennte Temperierkanäle erhöht werden (vgl. [Eic05, Eic10]). Hierzu wird ein Temperierkanal direkt hinter der Werkzeugwand eingebracht, der zweite Temperierkreis liegt dahinter. Mit diesem hinteren Temperierkanal wird der komplette Formeinsatz aufgeheizt. Der vordere Temperierkanal wird nur für die Kühlung der Werkzeugwand verwendet. Dadurch kann die Aufheiz- und Abkühlzeit ebenfalls minimiert werden, da die Temperatur nur für die Dauer der Abkühlung abgesenkt wird.

Wasserdampf

Für die variotherme Temperierung mit Wasserdampf müssen verschiedene Systeme kombiniert werden, damit ein Temperaturwechsel an der Werkzeugwand erreicht wird (vgl. [GGH$^+$09]). In der Aufheizphase wird gesättigter Wasserdampf durch Temperierkanäle im Werkzeug geleitet (vgl. [Gel06]). Abhängig von der gewünschten Aufheizdynamik, wird die Temperatur des gesättigten Wasserdampfes und damit der Druck in den Leitungen eingestellt (Bild 3.4).
Ist die obere Werkzeugwandtemperatur erreicht, beziehungsweise eine bestimmte Heizzeit abgelaufen, wird das Ventil zur Steuerung des Wasserdampfes geschlossen und die Werkzeugkavität gefüllt. Anschließend wird zur Kühlung kaltes Wasser durch die gleichen Temperierkanäle geleitet, bis eine untere Werkzeugwandtemperatur oder eine definierte Kühlzeit erreicht ist. Für eine schnellere Aufheizung im nachfolgenden Zyklus und zur Vermeidung von weiterem Abkühlen, wird das Wasser durch Druckluft aus den Temperierkanälen verdrängt.
Die Verwendung von gesättigtem Wasserdampf zur variothermen Temperierung setzt eine entsprechende kosten- und platzintensive Zusatzausrüstung voraus. Es wird ein Dampferzeuger, eine Regelungseinheit, ein Kondensator, flexible Hochdruckleitungen und Druckluft benötigt. Zur Vermeidung von Korrosion durch den aggressiven Wasserdampf ist zusätzlich ein geeigneter Werkstoff für die Temperiereinsätze erforderlich.

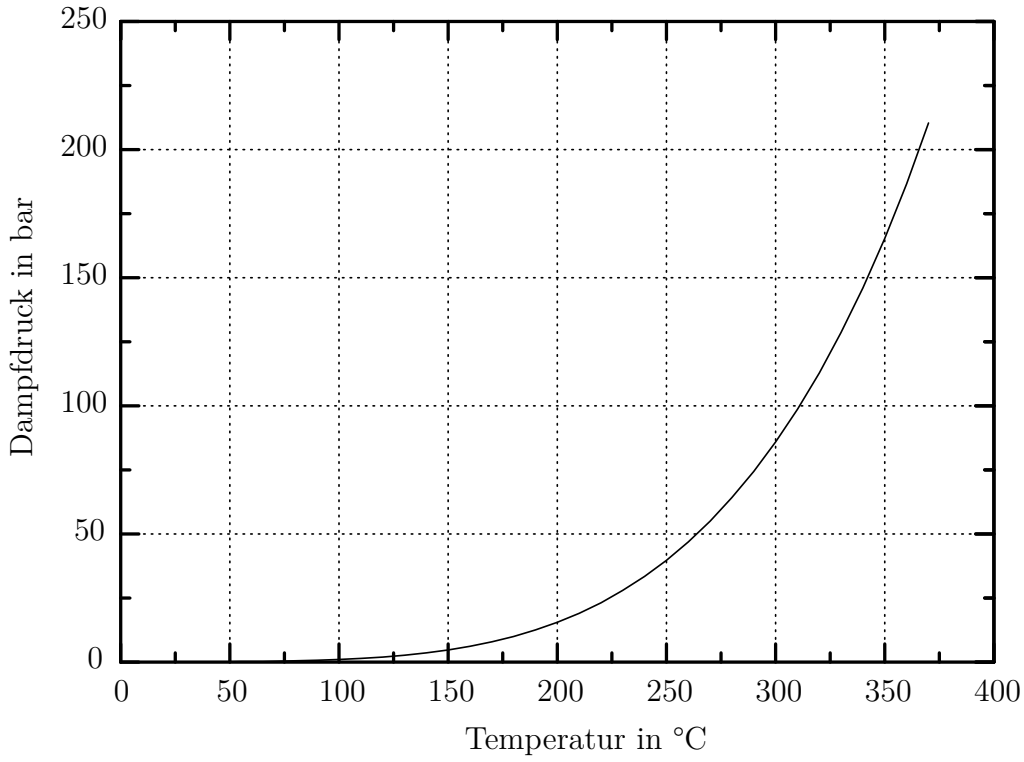

Bild 3.4: Dampfdruckkurve von Wasser

Wärmestrahlung

Die Erwärmung einer Werkzeugwand mit einem Infrarot-Wärmestrahler erfolgt durch elektromagnetische Wellen mit einer Wellenlänge zwischen 0,8 µm und 400 µm (vgl. [BW05]). Treffen die elektromagnetischen Wellen auf einen Körper, werden diese absorbiert, transmittiert oder reflektiert. Diese drei Eigenschaften stellen material- und oberflächenspezifische Größen dar (Bild 3.5). Für eine effektive Erwärmung der Werkzeugwand muss der Infrarot-Wärmestrahler auf die Material- und Oberflächeneigenschaften abgestimmt werden. Der Absorptionsgrad steigt bei Metallen mit abnehmender Wellenlänge der Wärmestrahlung an (vgl. [HM09]).
Bei geöffnetem Werkzeug wird ein Infrarot-Wärmestrahler zwischen die beiden Werkzeughälften gefahren. Da die Strahlungsdichte mit abnehmender Entfernung von der Wärmequelle quadratisch abnimmt, ist ein geringerer Abstand zwischen der Werkzeugwand und dem Infrarot-Wärmestrahler anzustreben. Nach der Erwärmung der Werkzeugoberfläche und dem Aufbau der Schließkraft wird die Kavität gefüllt.
Wärmeleitung und Wärmeabstrahlung verringern die Werkzeugwandtemperatur in der Zeit zwischen dem Abschalten des Infrarot-Wärmestrahlers und dem Füllen der Kavität. Damit diese Wärmeverluste ausgeglichen werden ist die Werkzeugwand zu überhitzen, wodurch die gewünschte Werkzeugwandtemperatur zum Zeitpunkt der Füllung erlangt wird.
Eine zyklusparallele Aufheizung der Werkzeugwand und eine kurze Maschinennebenzeit wurden beispielsweise durch die Verwendung einer drehbaren Aufspannplatte erreicht (vgl.

[Gie08]). Dazu wird eine zu erwärmende Werkzeughälfte außerhalb der Schließeinheit mit einem Wärmestrahler auf die benötigte Temperatur gebracht. Die erwärmte Werkzeughälfte wird in die Schließeinheit gedreht und kann für den folgenden Fertigungszyklus verwendet werden. Parallel dazu wird aus der Schließeinheit die zweite Werkzeughälfte für die Erwärmung vor den Strahler gedreht.

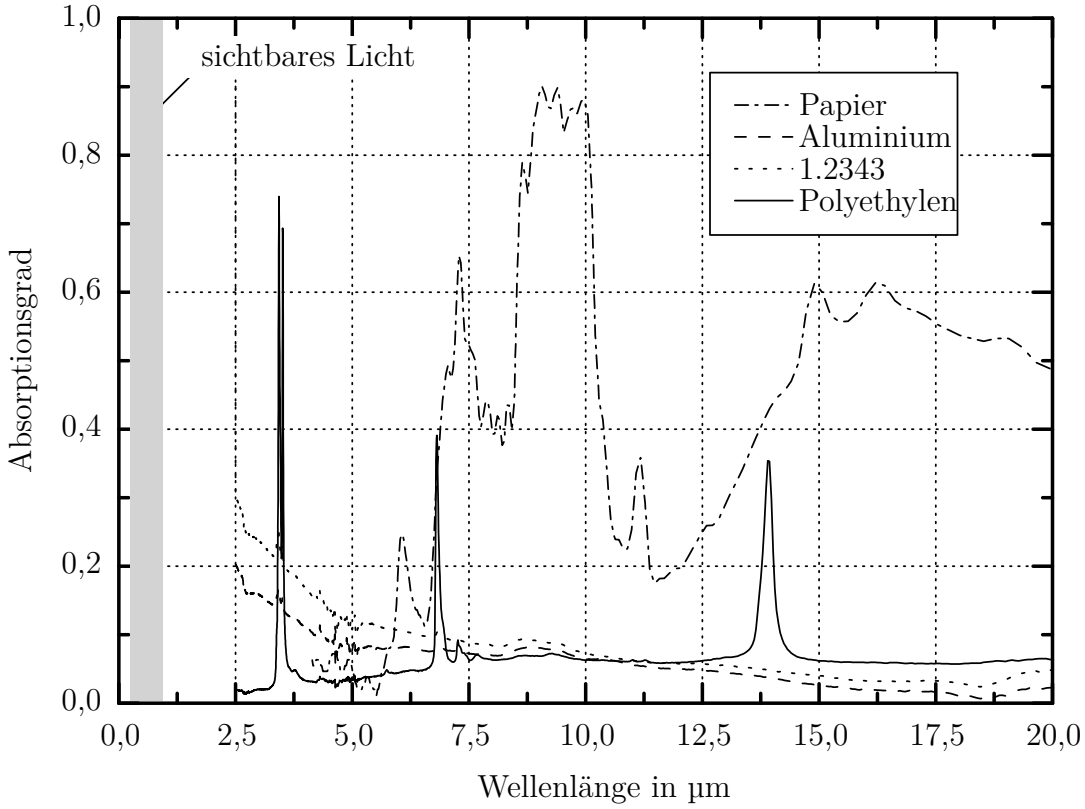

Bild 3.5: Absorptionsgrad verschiedener Materialien

Induktion

Bei der induktiven Erwärmung wird ein elektromagnetisches Wechselfeld eingesetzt. Dieses wird durch eine mit hochfrequentem Strom durchflossene Spule erzeugt (Bild 3.6). Durch die auftretenden Wirbelströme im ferromagnetischen Werkzeug entsteht Verlustwärme, welche die Temperatur im Körper erhöht. Die übertragene Wärmeleistung ist dabei vom Abstand zwischen Induktor und Werkzeugwand, dessen Geometrie und den ferromagnetischen Eigenschaften des eingesetzten Werkzeugstahls abhängig.

Die Spule (Induktor) wird in unterschiedlichen Ausführungen zur Erwärmung eines Spritzgießwerkzeuges eingesetzt. Ein externer Induktor wird in das geöffnete Werkzeug eingefahren und erwärmt die Werkzeugwand oberflächennah. Anschließend wird das Werkzeug geschlossen und die Kavität mit der heißen Formmasse gefüllt. Für die Abkühlung werden Temperierkanäle in den Werkzeugeinsätzen mit kaltem Wasser durchflossen.

Eine weitere Variante besteht darin, dass der Induktor im Spritzgießwerkzeug verbaut wird. Dadurch entfällt das Einschwenken in das geöffnete Werkzeug. Die Aufheizzeit ge-

genüber einem externen Induktor wird verlängert, da die Wärme nicht oberflächennah, sondern im Werkzeug entsteht. Die Werkzeugwand wird somit durch Wärmeleitung erhitzt.

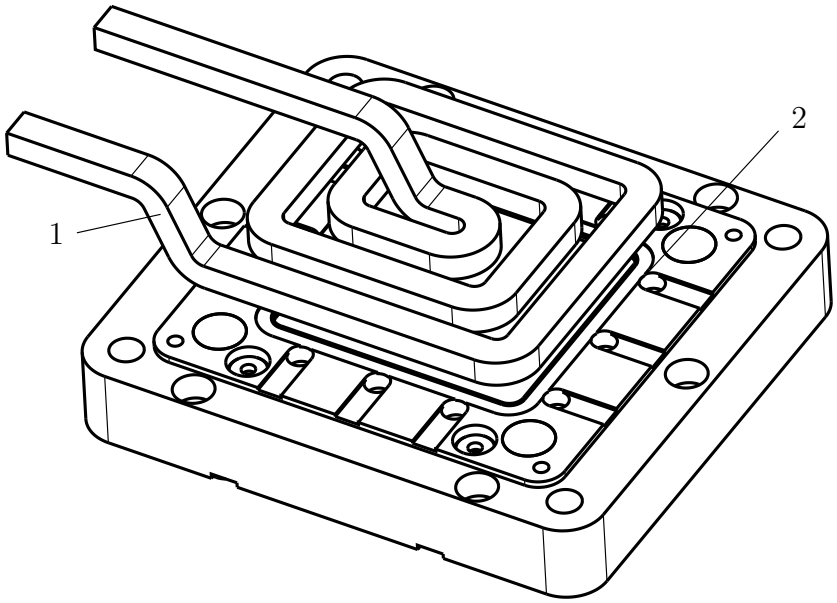

Bild 3.6: Induktionsspule mit Formeinsatz (1: Induktionsspule, 2: Formeinsatz)

Widerstandsheizelemente

Für die variotherme Temperierung können elektrische Widerstandsheizungen eingesetzt werden. Hierzu wurden Heizpatronen oder beispielsweise elektrische Widerstandsheizungen aus einem keramischen Werkstoff in Kombination mit konturangepassten Kühlkanälen verwendet (vgl. [BBM+07, YCK08, WZG10, DKB11]). Für die Aufheizphase wird das Widerstandsheizelement konturnah in einem Spritzgießwerkzeug eingebracht, während in der Abkühlphase die konturangepassten Kühlkanäle zur Anwendung kommen (vgl. [DBK+08a, BK09, ERB+11]).
Die elektrische Leistung wird in Wärme umgesetzt und durch Wärmeleitung an die formgebende Werkzeugwand transportiert. Der variotherme Temperaturwechsel wird mit einem Mantelthermoelement verfolgt und kann durch einen Regler gezielt beeinflusst werden. Mit Widerstandsheizelementen können vor allem kleine Werkzeugoberflächen beheizt werden (vgl. [DBK+09a]). Daher sind diese beispielsweise zur Vermeidung von Bindenähten einzusetzen (vgl. [DBK+08b, Gri09]).
Problematisch ist beim Einbau in ein Spritzgießwerkzeug das spröde Verhalten der Keramik, die durch den zyklisch wiederkehrenden Werkzeuginnendruck zerstört werden kann. Ferner ist die konstruktive Integration in ein Spritzgießwerkzeug, wie die elektrische Isolation und Kontaktierung, nicht ausreichend definiert.

Vergleich der Temperiersysteme

Die variothermen Temperiersysteme wurden anhand eines Spritzgießwerkzeugs, das eine zu temperierende Werkzeugoberfläche von 40 mm × 46 mm aufweist, verglichen. Dafür ist ein Temperatursprung von 65 °C auf 125 °C mit den erwähnten Heizsystemen durchgeführt worden. In Bild 3.7 sind die Aufheizzeiten und die dafür notwendige Arbeit dargestellt (vgl. [Mül06]).
Etabliert sind variotherme Temperiersysteme mit flüssigen Wärmeträgermedien wie Wasser, da deren Temperierkanäle flexibel der Formteilgeometrie durch neue Fertigungsverfahren angepasst werden können. Nachteilig ist deren vergleichsweise schlechter Wirkungsgrad, verursacht durch Leitungsverluste und die unzureichende Dynamik bei einem Temperaturwechsel. Bei Verwendung von Wasser ist zudem der zur Verfügung stehende Temperaturbereich eingeschränkt. Mit speziellen drucküberlagerten Temperiergeräten lassen sich maximale Wassertemperaturen von 220 °C erreichen. Ein wasserbasiertes Temperaturwechselsystem benötigt für den vorgegebenen Temperatursprung 23 s (Bild 3.7).

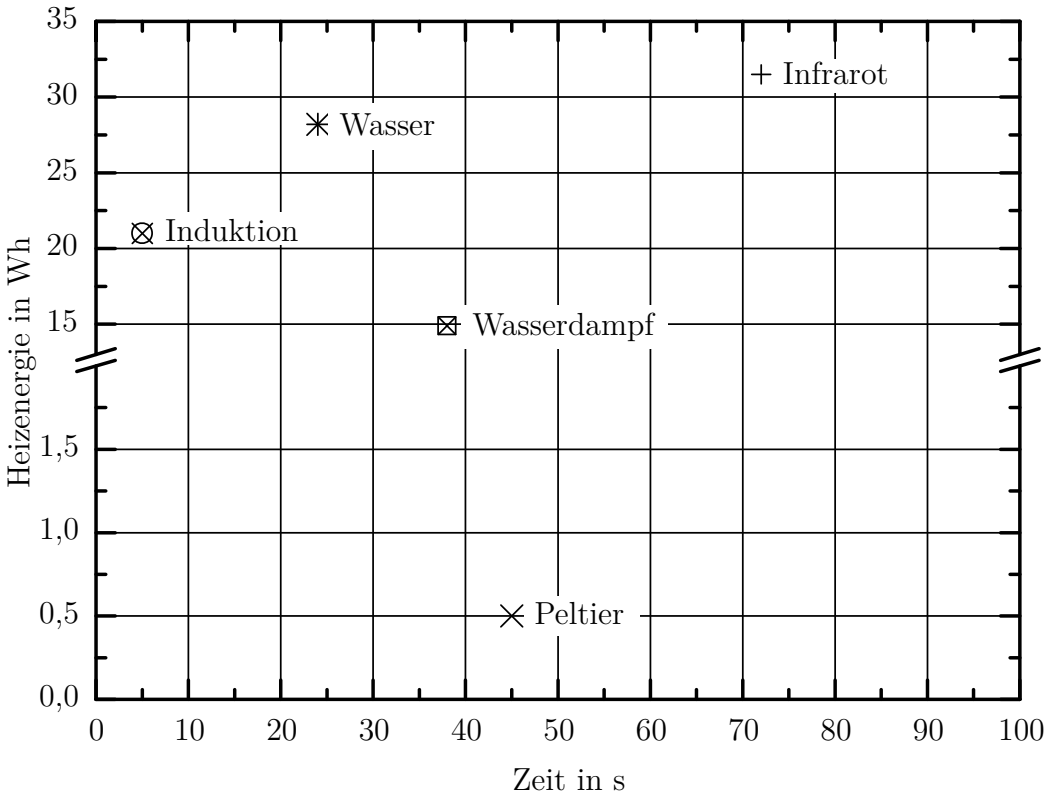

Bild 3.7: Vergleich variothermer Temperiersysteme an einer Werkzeugoberfläche von 40 mm × 46 mm für einen Temperatursprung von 65 °C auf 125 °C

Bei der Verwendung von Wasserdampf als Heizsystem sind hohe Investitionskosten in die Anlagentechnik und in die Sicherheit vonnöten. Der Temperaturbereich ist gegenüber reinen Temperaturwechselsystemen mit Wasser höher. Die Temperaturwechseldynamik ist durch Leistungsverluste in der Dampferzeugung und in den Zuleitungen nicht ausreichend

für einen effektiven Spritzgießprozess (vgl. [WZL+09]).
Infrarotstrahler heizen die Kavitätsoberfläche bei geöffnetem Werkzeug von außen mit Wärmestrahlen auf. Dabei reduziert der niedrige Emissionsfaktor bei spiegelnd polierten Stahloberflächen den Wirkungsgrad drastisch. Die Baugröße und die begrenzte flächenbezogene Leistungsdichte der Strahler schränken zudem die Aufheizdynamik und die maximal erreichbare Temperatur stark ein. Für den gewählten Temperatursprung ist deshalb eine Aufheizzeit von 72 s erforderlich.
Mit einer Induktionsheizung ist es dagegen möglich, die Werkzeugwand mit einer hohen Dynamik aufzuheizen. Einschränkungen ergeben sich jedoch bei der Anforderung einer homogenen Erwärmung von Spritzgießwerkzeugen mit dreidimensionalen Formteilgeometrien. Hier ist eine aufwändige Auslegung der Magnetkreise und des Induktors erforderlich. Zusätzlich ist durch das Einfahren des Induktors in das offene Werkzeug mit einer längeren Maschinennebenzeit zu rechnen. Diese kann durch die Integration eines Induktors im Werkzeuginneren verringert werden. Jedoch ist die Aufheizzeit länger, die Verringerung der Maschinennebenzeit dadurch minimal. Die Erwärmung findet nicht, wie beim externen Induktor oberflächennah, sondern im Spritzgießwerkzeug statt.
Vergleichend zu den beschriebenen Temperiersystemen wurden Peltierelemente betrachtet. Hochleistungspeltierelemente sind grundsätzlich vom physikalischen Effekt für die variotherme Temperierung geeignet. Die Leistung und mechanische Belastbarkeit verfügbarer Peltierelemente ist jedoch für einen erfolgreichen Einsatz im Spritzgießwerkzeug unzureichend (vgl. [Mül06]). Die beschriebenen Temperiersysteme sind daher für schnelle Temperaturwechsel und für eine wirtschaftliche Fertigung eingeschränkt geeignet. Ausschlaggebend für diese Beurteilung sind sowohl die erreichbare Dynamik als auch die dafür benötigte Heizenergie (Bild 3.7).

4 Anwendungen variothermer Werkzeugtemperierungen

Bei der Verarbeitung von Kunststoffen ist der Temperatureinfluss im Herstellungsprozess für die Bauteilqualität entscheidend. Insbesondere im thermoplastischen Spritzgießverfahren geht die Erhöhung der Werkzeugwandtemperatur zum Zeitpunkt der Formfüllung mit deutlichen Auswirkungen auf das Bauteil und den Prozess einher (vgl. [DBK+09a]):

- Geringerer Fülldruckverlust und Einspritzdruckbedarf
- Gezielte Beeinflussung des Kristallinitätsgrades bei der Verarbeitung teilkristalliner Polymere (minimierte Nachkristallisation, ...)
- Exakte Konturtreue und hervorragende Oberflächenbeschaffenheit
- Herstellung von geschäumten Bauteilen mit geschlossenen, hochglänzenden Oberflächen

Darüber hinaus sind weitere Anwendungen für hochdynamische variotherme Temperiersysteme in der Kunststoffverarbeitung bekannt:

- Verbesserung der Imprägnation bei der Herstellung von Faserverbundbauteilen (vgl. [KTH09, KT10])
- Gezielte Aktivierung von Vernetzungsreaktionen bei Duroplasten und Elastomeren
- Kombination von Spritzgieß- und RTM-Technologien für die Herstellung von Faserverbundbauteilen (vgl. [KC09])

Bei der Verarbeitung von Duroplasten oder Elastomeren, deren Vernetzungsreaktionen unter anderem thermisch induziert werden, ist es sinnvoll, zunächst die Werkzeugkavität volumetrisch zu füllen, bevor die Temperatur erhöht wird. Erst nach der volumetrischen Formfüllung wird die Werkzeugwandtemperatur erhöht und damit die Vernetzungsreaktion iniziert. Dadurch können formgebende Werkzeuge für die Duroplast- oder Elastomerverarbeitung bei durchschnittlich niedrigeren Temperaturen eingesetzt werden.

4.1 Abformung von Kleinststrukturen

Den derzeitiger Stand der Technik bei der Abformung von kleinststrukturierten Werkzeugwandoberflächen im Spritzgieß- beziehungsweise Spritzprägeprozess sind optische Datenträger (Bild 4.1). Die Oberflächenstruktur einer DVD (minimale Pitlänge 400 nm) wird heute direkt im Spritzgießverfahren repliziert. Dagegen können Datenträger mit einer höheren Informationsdichte (zum Beispiel BluRay-Format) im etablierten isothermen

Spritzprägeprozess nicht mehr hergestellt werden.

Weitere Beispiele für den Einsatz von Kunststoffbauteilen mit mikroskaligen Oberflächenstrukturen sind in der Diagnostik und Biotechnologie, wie beispielsweise Lab-on-Chip Systemen, zu finden. Die mikrostrukturierten Oberflächen dieser Bauteile werden in Form kleinster Kanäle für mikrofluidische Anwendungen oder der gezielten Beeinflussung des Wachstumverhaltens von aufgebrachten Zellstrukturen eingesetzt (vgl. [LPB+07, MRR10]). Darüber hinaus werden mikrostrukturierte Oberflächen bei der Beeinflussung der tribologischen Eigenschaften zwischen zwei Festkörpern eingesetzt. Ziel aktueller Entwicklungen ist es dabei den Reibwert und den Verschleiß zu reduzieren (vgl. [SES+11]).

Mit der variothermen Spritzgießtechnologie wird die komplette Abformung dieser definierten, kleinststrukturierten Oberflächen zugänglich. Eine Erhöhung der Werkzeugwandtemperatur zu Beginn der Formfüllung ermöglicht die Abformung von nanostrukturierten Oberflächen bei der Verarbeitung von thermoplastischen Polymeren (vgl. [DBK+10, DBK+11b]).

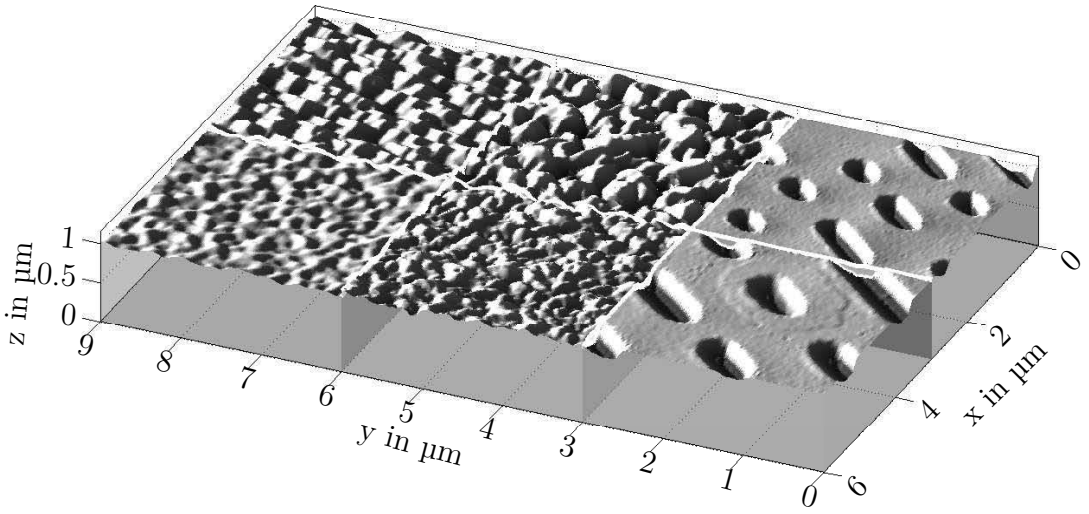

Bild 4.1: AFM-Aufnahmen verschiedener Kleinststrukturen (links oben: Formeinsatz mit stochastischer TiAlN-Struktur, links unten: Abformteil der stochastischen TiAlN-Struktur, mitte oben: Formeinsatz mit stochastischer TiOx-Struktur, mitte unten: Abformteil der stochastischen TiOx-Struktur, rechts oben: abgeformte DVD-Struktur, rechts unten: abgeformte CD-Strukturen) (vgl. [DBK+09c])

Beim isothermen Spritzgießprozess wird ein Formteil bei einer quasi-stationären Werkzeugwandtemperatur hergestellt. Die heiße Formmasse trifft bei der Füllung der Kavität auf die meist deutlich kältere Werkzeugwand. Dabei entsteht eine so genannte Randschicht. Der nanostrukturierte Formeinsatz wird nur teilweise abgeformt. Durch den variothermen Spritzgießprozess wird die Werkzeugwandtemperatur zum Zeitpunkt der Formfüllung angehoben, die Viskosität der Formmasse in der Randschicht ist niedriger. Kleinste

Oberflächenstrukturen können so abgeformt werden (vgl. [DBK+11a, BMH03]).
In einer Versuchsreihe (Bild 4.2) wurde gezeigt, dass mit zunehmender Werkzeugwandtemperatur der Abformgrad von Nanostrukturen zunimmt. Dazu wurde eine stochastische Oberflächenstruktur, wie in Bild 4.1 dargestellt, zur Entspiegelung mit einer Strukturbreite von durchschnittlich 280 nm abgeformt. Diese Strukturen wurden durch Abscheidung keramischer Hartstoffschichten in einem entsprechend angepassten PVD-Verfahren auf einem Formeinsatz hergestellt (vgl. [Kre99, BSK+05, Tün03, Bru35]).

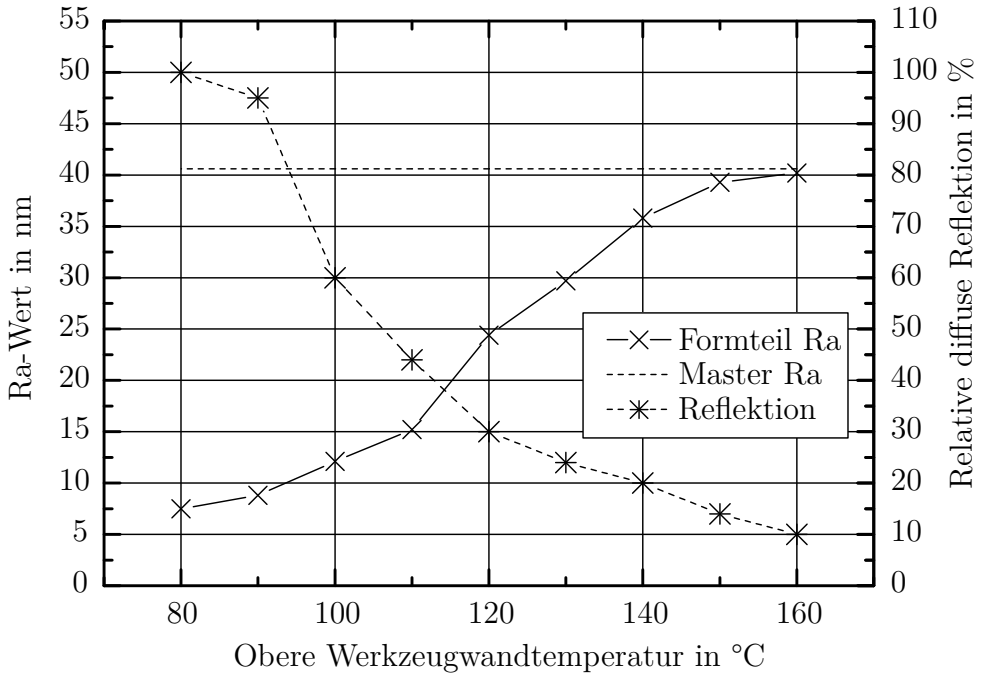

Bild 4.2: Ra-Werte abgeformter Nanostrukturen in Polycarbonat (Bayer Makrolon DP-1265) bei einer Massetemperatur von 310 °C

4.2 Gefüge in der Formteilrandschicht

4.2.1 Reduzierung von mechanischen Eigenspannungen

Entstehende Eigenspannungen durch den Formfüllprozess (vgl. [JM04]) können bei höheren Werkzeugwandtemperaturen verringert werden (vgl. [Men10]). Mechanische Eigenspannungen im Formteil entstehen insbesondere während des Herstellungsprozesses.

- Scherspannungen während der Füllphase,
- Kaltverschiebungen in der Nachdruckphase,
- Schwindungsbehinderung in der Restkühlphase.

Sind die auftretenden, inneren Spannungen zu groß, versagt das Bauteil im Einsatz beziehungsweise ist unbrauchbar. Scherspannungen und Kaltverschiebungen können insbesondere durch die Einspritzgeschwindigkeit, die Nachdruckhöhe und die Nachdruckdauer beeinflusst werden. Innere Spannungen, die durch Schwindungsbehinderung entstehen, können durch eine höhere Werkzeugwandtemperatur zum Zeitpunkt der Formfüllung re-

duziert werden (Bild 4.3). Beim isothermen Spritzgießprozess trifft die heiße Formmasse auf die kalte Werkzeugwand, durch den deutlichen Temperaturunterschied kühlt das Formteil in Dickenrichtung unterschiedlich ab, so dass Eigenspannungen entstehen.

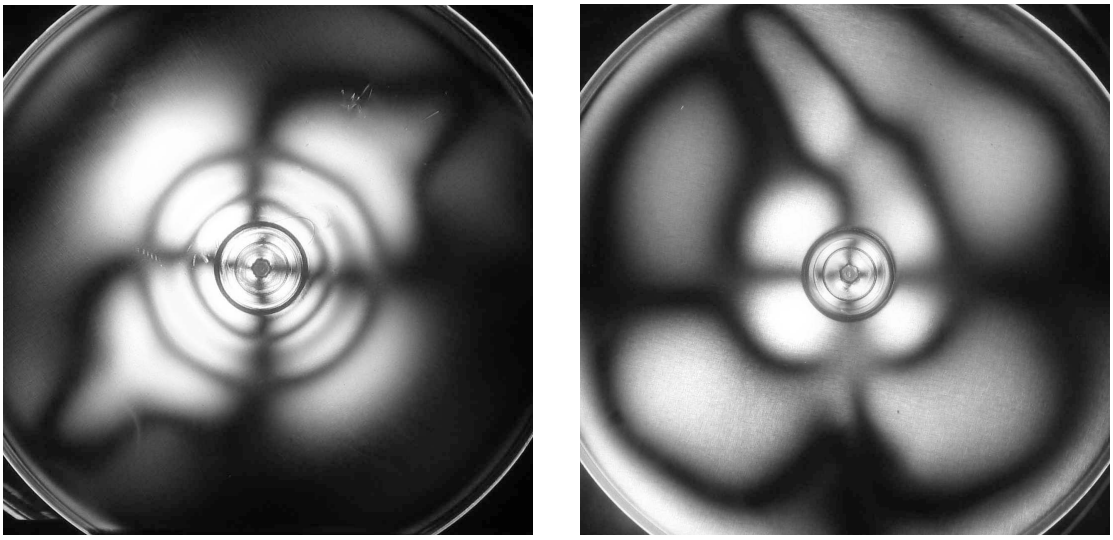

Bild 4.3: Darstellung von Eigenspannungen mit einer Polarisationsoptik bei einer isothermen Werkzeugwandtemperatur (links) von 70 °C und einer variothermen Werkzeugwandtemperatur (rechts) beim Einspritzen von 150 °C und 70 °C beim Entformen für ein Polycarbonat (Bayer Makrolon DP1-1265)

Der innen liegende Bereich der Formmasse würde weitaus stärker kontrahieren, wenn die äußere, bereits erstarrte Randschicht dies nicht behindert. Durch die Kontraktion entstehen in der Formteilmitte Zugspannungen, während im Randbereich Druckspannungen erzeugt werden (vgl. [Ehr07]). Derartige Eigenspannungen sind umso größer,

- je heterogener (ungleichmäßiger) die Temperaturverteilung,
- je höher die Abkühlgeschwindigkeit,
- je höher der Wärmeausdehnungskoeffizient im Formteil ist.

Die variotherme Temperierung kann den Temperaturunterschied zwischen Werkzeugwand und Formteilmitte zum Zeitpunkt der Formfüllung reduzieren und dadurch die Eigenspannungen. An amorphen, transparenten Formmassen kann mit einer Polarisations-Optik die Minimierung dargestellt werden (Bild 4.3). Die Orientierung der Kunststoffmoleküle durch die Verarbeitung wird zwischen zwei gekreuzten Pol-Filtern durch Isoklinen und Isochromaten sichtbar. Große Helligkeitsunterschiede stehen für hohe Eigenspannungen.

4.2.2 Sphärolithverteilung

Werden teilkristalline Thermoplaste im isothermen Spritzgießprozess verarbeitet, kann eine Randschicht bei Mikrotomschnitten festgestellt werden. Die heiße Formmasse trifft beim Einspritzen in das Spritzgießwerkzeug auf eine deutlich kältere Werkzeugwand. Die Abkühlung der Formmasse erfolgt schlagartig. Die Umordnung der Molekülketten in kristalline Bereiche wird durch die niedrigere Temperatur der Formmasse extrem behindert (vgl. [Mon01, Die81]).

Im variothermen Spritzgießprozess kann dagegen eine gleichmäßigere Verteilung der Sphärolithgröße über die Formteildicke erreicht werden. Durch die erhöhte Werkzeugwandtemperatur ist der Temperaturunterschied zur Formmasse geringer. Eine Neuordnung der Molekülketten ist aufgrund der langsameren Abkühlung möglich. Ist die Werkzeugwandtemperatur zum Zeitpunkt der Formfüllung über der Kristallitbildungstemperatur, kann eine homogene Sphärotithverteilung im Formteil festgestellt werden (Bild 4.4).

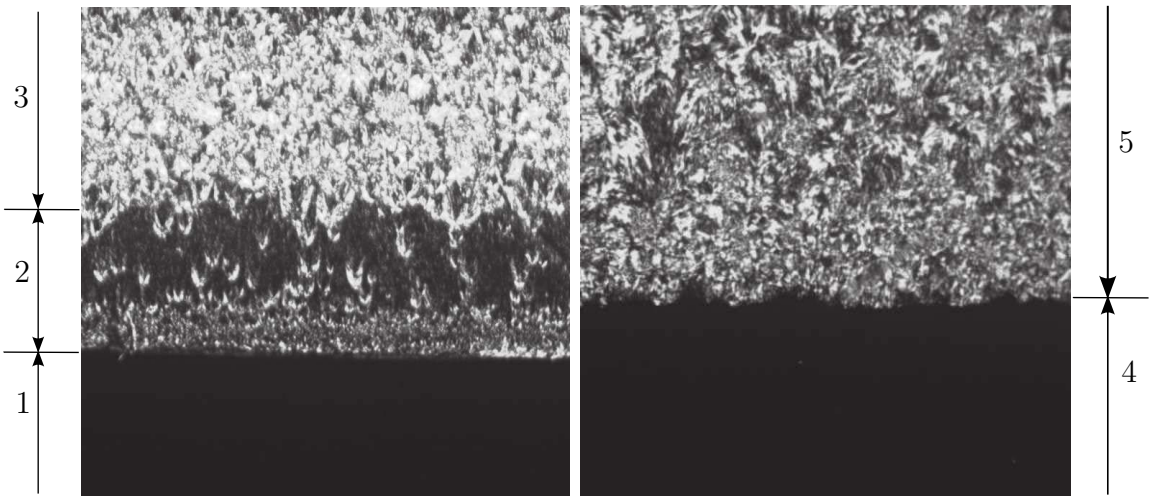

Bild 4.4: POM (DuPont Delrin 500 NC 010) Gefüge im Formteilrand, links isotherme Werkzeugwandtemperatur von 80 °C, rechts variotherme Temperierung von 140 °C beim Einspritzen und 80 °C bei der Entformung (1 Einbettmasse, 2 Randschicht, 3 Formteilkern, 4 Einbettmasse, 5 Formteilkern)

Durch die gezielte Herstellung von teilkristallinen Randbereichen werden die Oberflächeneigenschaften verändert. Förderelemente, wie Ketten oder Bauteile für den Antrieb, zum Beispiel Zahnräder, haben durch die höhere, erzielbare Kristallinität im Randbereich einen geringeren Verschleiß und können deshalb länger eingesetzt werden.

5 Konzeptentwicklung zur Umsetzung einer hochdynamischen variothermen Temperierung

5.1 Anforderungen an variotherme Temperaturwechselsysteme

Aufgrund der großen Bandbreite an Verarbeitungsmöglichkeiten für Kunststoffe, werden im Folgenden die Anforderungen an variotherme Temperiersysteme speziell für den thermoplastischen Spritzgießprozess aufgeführt (vgl. [DBK+08b]).

- Zyklusparalleler, hochdynamischer Ablauf
  Derzeit eingesetzte Systeme verlängern die Zykluszeit durch einen langsamen Temperaturwechsel oder durch eine längere Maschinennebenzeit. Für eine effiziente Aufheizung der Werkzeugwand, ohne die Zykluszeit zu verlängern, ist daher ein zyklusparalleles, hochdynamisches Temperiersystem zu entwickeln.
- Integrationsfähig in den Spritzgießprozess
  Die konstruktiven Voraussetzungen an das Spritzgießwerkzeug sind durch das eingesetzte Aufheiz- und Abkühlsystem bestimmt. Abhängig vom eingesetzten System müssen Kühlkanäle oder Beschichtungen im Spritzgießwerkzeug eingebracht, beziehungsweise es muss die Peripherie der Spritzgießmaschine erweitert werden. Eine Anpassung sollte für unterschiedliche Formteilgeometrien möglich sein.
- Regelbarer, wiederholgenauer Temperaturverlauf
  Die Werkzeugwandtemperatur beeinflusst die Abkühlung des Bauteils. Dies wirkt sich auf die Ausbildung des Gefüges im Kunststoff aus. Damit bei jedem Fertigungszyklus Formteile mit den gleichen Eigenschaften hergestellt werden, muss der Temperaturverlauf regelbar und wiederholgenau sein.
- Gezielte Einstellung der Temperaturverteilung
  Die Temperaturverteilung über die Kavitätsoberfläche ist beispielsweise entscheidend für Maßhaltigkeit, Verzug oder Glanzgradunterschiede. Stehen diese Forderungen im Vordergrund, ist eine gleichmäßige Temperaturverteilung an der Werkzeugwand zwingend notwendig. Dagegen ist zum Beispiel bei Filmscharnieren oder Verrippungen, eine partielle Temperaturänderung an der Werkzeugwand ausreichend.
- Wirtschaftlichkeit
  Für die Durchführung eines Temperaturwechsels im Spritzgießwerkzeug wird zusätzlich Energie verbraucht. Bei einem effektiven variothermen Temperiersystem ist der Energieverbrauch minimal und somit der Spritzgießprozess wirtschaftlich.

5.2 Verwendung von Widerstandsheizelementen

Bei vielen Produkten, die im thermoplastischen Spritzgießverfahren hergestellt werden, ist die Maschinennebenzeit deutlich kürzer als die Kühlzeit. Daher ist der Zeitraum für die Aufheizphase, welche parallel zur Maschinennebenzeit ablaufen soll, entsprechend kleiner. Damit die Erwärmung in der Maschinennebenzeit durchgeführt werden kann, ist das Heizmodul über der Kühleinheit anzuordnen. Diese Anordnung verringert zusätzlich den unkontrollierten Abfluss an Heizwärme in das umgebende Stammwerkzeug.
In der Aufheizphase des variothermen Spritzgießprozesses können hierfür, neben den benannten Verfahren, wie Induktion und Infrarot-Wärmestrahlung, elektrische Widerstandsheizelemente eingesetzt werden. Für eine kurze Aufheizzeit müssen diese eine hohe, thermische Flächenleistung an das Spritzgießwerkzeug abgeben können. Für die Abkühlphase werden Module eingesetzt, die wasserdurchströmte Kühlkanäle nutzen oder Kältemittel verdampfen lassen. Werden diese Module kompakt im Spritzgießwerkzeug verbaut, ist die thermische Masse gering und der Zeitraum für einen Temperaturwechsel kurz.
Neben der einfachen und wiederholgenauen Regelbarkeit elektrischer Heizelemente bis zum Einspritzzeitpunkt, kann zusätzlich auch während der Abkühlphase eine geregelte und reproduzierbare Temperaturabsenkung erfolgen. Dies erlaubt erstmals bei einem Werkzeug eine identische, variotherme Abkühlung zwischen der auswerfer- und düsenseitigen Werkzeugwand im Spritzgießprozess. Verzug aufgrund von unterschiedlichen Temperaturverläufen, zum Beispiel zwischen auswerfer- und düsenseitiger Werkzeugwand, wird minimiert.
In der kunststoffverarbeitenden Industrie sind Heizpatronen beziehungsweise Heizbänder etabliert. Diese können nur bedingt für die variotherme Temperierung eingesetzt werden. Die zylindrische Heizpatrone wird in eine passgenaue Bohrung, die parallel zur temperierten Werkzeugwand verläuft, eingebracht. Die dadurch entstehenden unterschiedlichen Abstände zur Werkzeugwand führen zu einem inhomogenen Temperaturfeld. Eine gezielte Erwärmung ist nicht möglich. Ferner können Heizpatronen, wie auch Heizbänder, nicht unmittelbar hinter der Werkzeugwand verbaut werden, da die mechanische Flächenbelastung durch den auftretenden Werkzeuginnendruck zu groß ist. Damit eine gezielte Erwärmung erreicht wird, muss das Heizelement flächig und konturfolgend aufgebaut sein.

5.3 Hochdynamische Heizsysteme

Für den Einsatz im Spritzgießwerkzeug werden Widerstandsheizelemente genutzt, welche die mechanischen als auch die thermischen Anforderungen erfüllen können. Hierfür werden in dieser Arbeit konturangepasste Heizelemente mit einem keramischen Heizleiter entwickelt und erprobt. Darüber hinaus sollen hier Heizelemente auf Dickschichtbasis untersucht und auf den Einsatz im Spritzgießwerkzeug angepasst werden.

5.3.1 Keramische Heizungen

Für die variotherme Temperierung von Spritzgießwerkzeugen können keramische Heizungen aufgrund der hohen Druckfestigkeit eingesetzt werden. Bei keramischen Heizungen wird prinzipiell zwischen zwei Herstellungsmethoden unterschieden - der integralen und der sequentiellen Fertigung. Bei der integralen Herstellung wird der Heizleiter während der Produktion der Keramik definiert und mit der elektrischen Isolation formschlüssig verbunden (vgl. [Gri09, Sch08]). Im Gegensatz dazu wird bei der sequentiellen Fertigung eines keramischen Heizelementes der Heizleiter erst nach der Formgebung der Keramik durch eine mechanische Bearbeitung definiert. Die sequentielle Fertigung erlaubt eine individuelle und einfache Anpassung auf das eingesetzte Spritzgießwerkzeug, wie beispielsweise das Einstellen einer Leistungsverteilung und dadurch eine bessere Temperaturhomogenität. Deshalb wird im Folgenden die Herstellung eines sequentiellen Keramikheizelementes näher betrachtet und weiterentwickelt.

Elektrischer Heizleiter

Im Gegensatz zu einer Heizpatrone, besteht der Widerstandsheizleiter einer keramischen Heizung aus einer elektrisch leitfähigen Keramik. Als Heizleitermaterialien kommen Titandiborid (TiB_2), Titannitrid (TiN), Molybdänsilizid ($MoSi_2$) und deren Mischungen mit Aluminiumoxid und Siliziumnitrid zum Einsatz (vgl. [SS07, SPM08]). Die zyklische, thermische Wechselbelastung erfordert eine hohe Thermoschockbeständigkeit und aufgrund der mechanischen Belastung eine hohe Druckbeständigkeit. Deshalb wird für die Entwicklung eines neuartigen Heizelementes eine elektrisch leitfähige Mischkeramik aus Siliziumnitrid/Titannitrid (Tabelle 5.1) ausgewählt.

Tabelle 5.1: Kennwerte der verwendeten Siliziumnitrid-Keramik

Bezeichnung	**Si_3N_4/TiN**
Hersteller	ESK Ceramics GmbH & Co.KG
Anteil TiN in %	22,5
E-Modul E in GPa	248
Biegebruchfestigkeit σ_B in MPa	265
Dichte ρ in kg/m^3	3200
Wärmeausdehnungskoeffizient α in 10^{-6}/K	5,3 (500 °C bis 1000 °C)
Wärmeleitfähigkeit λ in W/mK	22 (bei 20 °C)
spezifische Wärmekapazität c in J/gK	0,7 (bei 20 °C)
spezifischer elektr. Widerstand ρ_{el} in mΩcm	8,5 (bei 20 °C)
Thermoschockbeständigkeit $R_s^{'}$ in K	300

Diese elektrisch leitfähige Keramik wird durch heißisostatisches Pressen hergestellt (vgl. [Kol04]). Die beiden Materialien werden in Pulverform gemischt und zu einem Grünling verpresst. Beim anschließenden heißisostatischen Pressen wird bei Temperaturen bis

1800 °C und bei Drücken bis zu 15 MPa das Pulvergemisch gesintert. Auf diese Weise können plattenförmige Halbzeuge mit einer Dicke von 3 mm bis 5 mm hergestellt werden. Das Titannitrid (TiN) bildet beim Sintervorgang, abhängig von den Verfahrensparametern, durch die Perkolation eine elektrisch leitende Struktur (vgl. [Sto02]). Die elektrische Leitfähigkeit kann über das Mischungsverhältnis von Siliziumnitrid und Titannitrid eingestellt werden (Bild 5.1).

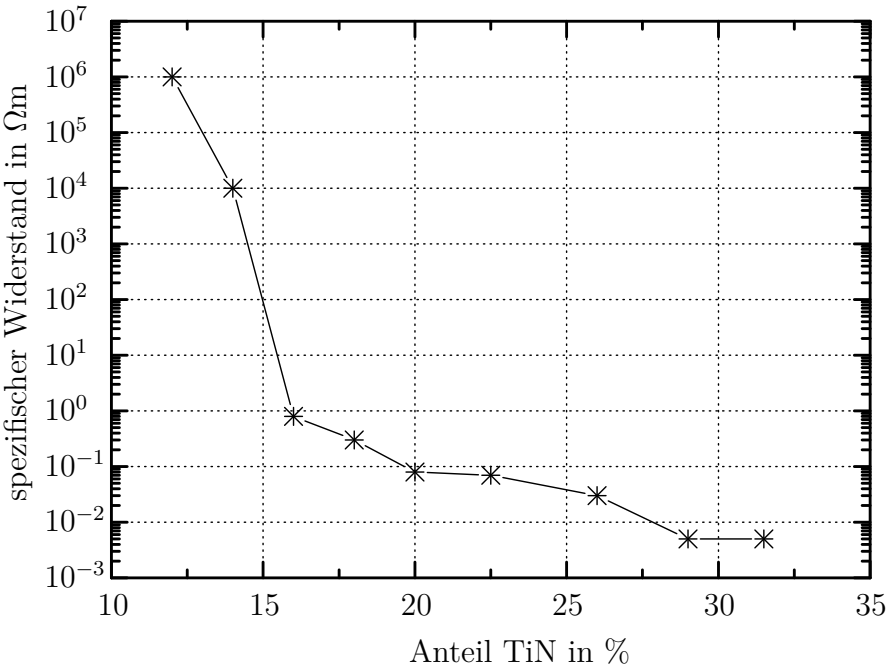

Bild 5.1: Abhängigkeit des spezifischen elektrischen Widerstandes vom TiN-Anteil

Varianten zur Isolation

Die elektrisch leitfähige Siliziumnitrid/Titannitrid-Mischung muss gegenüber dem metallischen Spritzgießwerkzeug elektrisch isoliert werden. Daher muss die Isolation eine hohe Druck- und Temperaturbeständigkeit sowie eine gute thermische Leitfähigkeit aufweisen. Die verwendete Mischkeramik (Si_3N_4/TiN) besteht aus einer elektrisch leitfähigen Komponente (TiN) und einem nicht leitfähigen Anteil (Si_3N_4). Eine elektrische Isolation des Heizelementes kann durch die Entfernung des leitfähigen Titannitrids erreicht werden. Dazu wird ein chemisches Ätzverfahren eingesetzt, bei dem das Titannitrid aus der Oberfläche selektiv herausgelöst wird, ohne das Siliziumnitrid anzugreifen. Die besten Ergebnisse hinsichtlich der Ätzrate werden mit Schwefelsäure erzielt (vgl. [Sch04]). Die Ätzrate wird durch die Temperatur und die Konzentration der Schwefelsäure beeinflusst.
Bild 5.2 zeigt die Abhängigkeit der Ätztiefe und der Härte in Abhängigkeit der Ätzdauer. Beim Ätzen der Mischkeramik wird das TiN gelöst und es entsteht eine Porosität (vgl. [HW03]). Die erreichbaren mechanischen und elektrischen Eigenschaften sind jedoch für den Spritzgießprozess nicht ausreichend. Dadurch ist das selektive Ätzen als Isolationsmethode nicht einzusetzen.

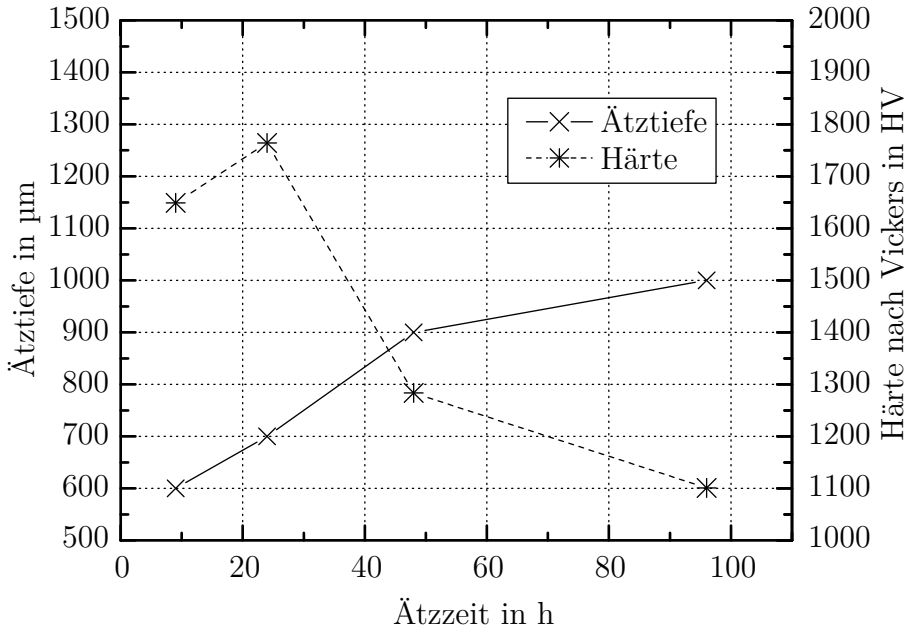

Bild 5.2: Einfluss der Ätzzeit auf die Isolationsdicke und die Oberflächenhärte bei einer Temperatur von 90 °C und einer 1n - H_2SO_4

Für niedrige Heizelementtemperaturen (bis 260 °C) können zur Isolation spezielle Kunststofffolien (zum Beispiel aus Polyimid) verwendet werden. Diese sind auch als Klebeband verfügbar und begünstigen die Positionierung im Spritzgießwerkzeug. Damit die Werkzeugwand zügig aufgeheizt werden kann, ist aufgrund der schlechten Wärmeleitfähigkeit der Kunststofffolie eine deutlich höhere Heizelementtemperatur notwendig. Deshalb können Kunststofffolien aus Polyimid nur in speziellen Anwendungen eingesetzt werden, bei denen der zulässige materialspezifische Temperaturbereich nicht überschritten wird.

Als weitere Isolationsmethode können ausgewählte, elektrisch nicht leitfähige Keramiken, eingesetzt werden, mit denen eine hohe temperatur- und druckbeständige Isolation möglich ist. Keramiken aus Aluminiumnitrid (AlN), Siliziumcarbid (SiC) und Zirkonoxid (ZrO_2) sind für eine Verwendung nicht geeignet. Beim Aluminiumnitrid und Zirkonoxid ist die Druckbeständigkeit zu niedrig und die eingesetzten Platten brechen unter dem Werkzeuginnendruck. Siliziumcarbid wird je nach Herstellungsmethode (Heiß gepresstes Siliziumcarbid (HPSiC) oder flüssigphasengesintertes Siliziumcarbid (LPSSiC)) bei höheren Temperaturen elektrisch leitfähig, ein Kriechstrom kann fließen. Somit ist die elektrische Sicherheit nicht mehr gewährleistet (vgl. [Ber06]). Mit Siliziumnitrid ist eine elektrische Isolation auch bei hohen Temperaturen (bis $\vartheta_Z = 1800\,°C$) und hohen mechanischen Belastungen möglich. Das Siliziumnitrid wird in Form von mehr als 1 mm dicken Platten zwischen Heizelement und Spritzgießwerkzeug gelegt.

Das Heizelement besteht demnach aus drei Schichten, zwei Isolationen und einer Heizschicht. Der Wärmeübergang zwischen den Schichten wird durch die Oberflächenbeschaffenheit und den Anpressdruck bestimmt. Eine feste Verbindung der einzelnen Schichten liefert einen hohen Wärmeübergang, eine bessere Montage und einen optimalen Wärmeabfluss. Darüberhinaus wird der Schichtaufbau mechanisch besser belastbarer. Dieser

Verbund kann bereits beim heißisostatischen Pressen durch die entsprechende Grünlingsgestaltung hergestellt werden. Die minimalen Schichtdicken für die Isolation und den Heizleiter liegen jeweils bei einem Millimeter. Die Presse wird schichtweise mit dem isolierenden Material und dem elektrisch leitfähigen Siliziumnitrid gefüllt. Anschließend wird der Verbund als Ganzes gesintert. Zur Anpassung der unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten wird der isolierenden Keramikschicht ein Additiv beigemischt, was den Bruch durch thermisch induzierte Spannungen verhindert.

Einstellung der Heizleistung

Das physikalische Prinzip der elektrischen Widerstandsheizung basiert auf der Entstehung von Wärme in einem stromdurchflossenen ohmschen Leiter (vgl. [Pau93]). Dabei wird die elektrische Leistung (P) in Wärme durch anlegen einer elektrischen Spannung (U) an einen ohmschen Widerstand (R) umgewandelt.

$$P = \frac{U^2}{R} = U \cdot I \tag{5.1}$$

Die Leistung des Heizelementes wird somit durch die Spannungsversorgung und den Heizleiterwiderstand eingestellt. Die Spannung darf dabei nicht zu niedrig gewählt werden. Ansonsten ist der für die gewünschte Leistung notwendige Strom (I) zu groß. Die elektrische Zuleitung und die Kontaktierung des Heizelementes würden aufgrund von Platzmangel im Spritzgießwerkzeug nicht mehr möglich sein.
Der ohmsche Widerstand des Heizelementes wird durch die Schichtdicke (d_H) und Breite (b_H) des Heizleiters, sowie durch den spezifischen Widerstand des Materials bestimmt. Mit dem spezifischen Widerstand der Mischkeramik ρ_el und der Leiterlänge (l_H) kann der Gesamtwiderstand berechnet werden.

$$R = \rho_\mathrm{el}(\vartheta) \cdot \frac{l_\mathrm{H}}{A} = \rho_\mathrm{el}(\vartheta) \cdot \frac{l_\mathrm{H}}{d_\mathrm{H} \cdot b_\mathrm{H}} \tag{5.2}$$

In der Regel werden Konstantspannungsquellen für die elektrische Versorgung von Widerstandsheizelementen verwendet. Dabei ist mit einer sinkenden Heizleistung zu rechnen, da der spezifische, elektrische Widerstand der leitfähigen Si_3N_4/TiN-Keramik mit steigender Temperatur zunimmt.
Die Heizleistung wird neben dieser materialspezifischen Abhängigkeit durch die Geometrie des Heizleiters beeinflusst. Der Heizleiterverlauf bestimmt dabei die Homogenität der Temperatur auf der Werkzeugwand. Für die Generierung des Heizleiterverlaufs ist deshalb folgendes zu beachten:

- Unkontrollierte Temperaturüberhöhungen
  Damit eine gewünschte Heizleistung erreicht wird, ist ein entsprechender ohmscher Widerstand notwendig. Dazu wird der Heizleiter durch Schlitze in der Si_3N_4/TiN-Keramikplatte definiert (Bild 5.3). Diese Schlitze sind je nach Bearbeitungsverfahren 0,3 mm bis 1,0 mm breit. Am Schlitzende kann eine Änderung

der Stromlaufrichtung (4) entstehen, zum Beispiel durch eine scharfkantige 180° Biegung. In solchen Bereichen steigt die Stromdichte an, da die Elektronen den geringsten Widerstand und somit den kürzesten Weg durchlaufen. Damit eine geringere Temperaturüberhöhung stattfindet und zusätzlich die mechanische Kerbwirkung unterbunden wird, ist am Ende des Schlitzes eine Bohrung einzubringen.

- Einstellung partieller Flächenleistungen
  Über die Fläche des Heizelementes können unterschiedliche, spezifische Heizleistungen generiert werden. Eingesetzt wird dies bei Anwendungen, die im Randbereich einen Wärmeabfluss, zum Beispiel in das umliegende Werkzeug, haben. Ist die flächige Heizleistung homogen über das Heizelement verteilt, ist infolgedessen die Werkzeugwandtemperatur am Randbereich niedriger. Eine höhere spezifische Heizleistung im Randbereich gleicht den Wärmeabfluss aus.

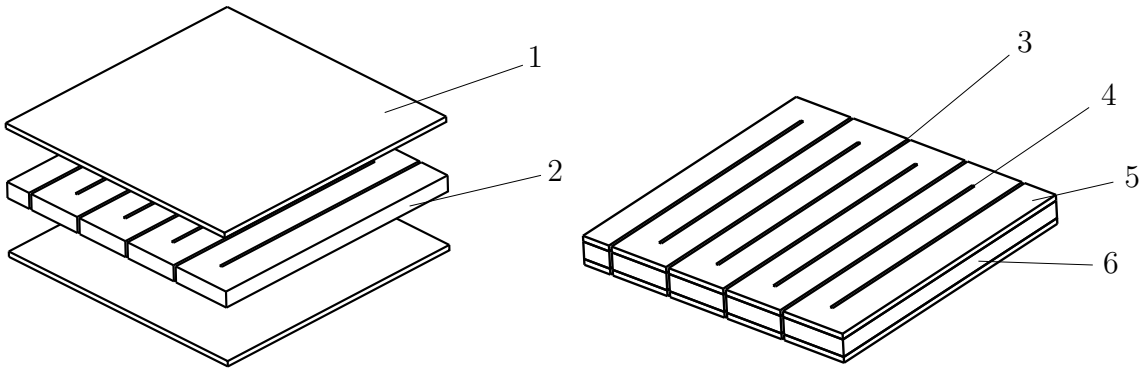

Bild 5.3: Aufbau keramischer Heizelemente mit Heizleiter, links Aufbau mit keramischen Isolationsplatten, rechts Schichtverbund (1: Isolationsplatte, 2: Si_3N_4/TiN-Mischkeramik, 3: Wasserstrahl- oder Sägeschlitz, 4: Umkehrpunkt für den elektrischen Strom, 5: gesinterte Isolation, 6: Heizleiter)

Für die Herstellung des Heizleiters in einer nicht isolierten Si_3N_4/TiN-Keramik, können funkenerosive Verfahren eingesetzt werden. Ist dagegen während der Herstellung der Mischkeramik die Isolationsschicht zusammen mit dem Heizleiter gesintert worden, kann das funkenerosive Verfahren nicht mehr verwendet werden. Die Bearbeitung der Keramik muss dann mit einem Laser- oder Wasserstrahl erfolgen. Bei der Laserbearbeitung entstehen durch den thermischen Abtrag Mikrorisse, welche durch die mechanische Belastung des Spritzgießprozesses wachsen und zum Versagen führen. Die Schnittkante beim Wasserstrahlschneiden ist dagegen glatt. Es können jedoch nicht alle gewünschten Geometrien hergestellt werden. Bedingt durch die Härte der Si_3N_4-Keramik müssen abrasive Materialien wie Diamant, SiC oder CBN, dem Wasserstrahl beigesetzt werden. Dadurch wird die Lebensdauer der Strahldüse gemindert. Lange Schnitte sind daher nahezu ausgeschlossen und sehr kostenintensiv.

Mit einem weiteren Verfahren, dem Drahtsägen, ist ebenfalls eine Bearbeitung der eingesetzten Keramik möglich. Dieses Verfahren, bekannt aus der Herstellung von Wafern in der Halbleiterindustrie, verwendet einen Draht, der mit Diamantsplittern besetzt ist (vgl. [GVK97]). Mit einem Koordinatentisch ist es möglich, eine zweidimensionale Heiz-

leitergeometrie in der Keramik zu erzeugen. Der Draht hinterlässt dabei keine Mikrorisse an der Schnittkante, die bei einem Einsatz im Spritzgießwerkzeug zur Zerstörung des Heizelementes führen.

Elektrische Kontaktierung

Die elektrische Verbindung muss in einem großen Temperaturbereich gewährleistet werden. Klemmverbindungen, bei denen ein weiches Metall (beispielsweise Messing oder Kupfer) auf die Kontaktstelle der Keramik gepresst wird, eignen sich aufgrund der hohen Übergangswiderstände von ungefähr 500 mΩ nicht. Liegt zwischen dem Heizleiterwiderstand und dem Übergangswiderstand eine geringe Differenz vor, kann diese Methode nicht für die Kontaktierung eingesetzt werden, da dies zur lokalen Überhitzung des Kontaktes und damit zu einer unkontrollierten Erwärmung führt. Dieser Effekt ist vor allem bei einem Heizleiterwiderstand unter 2 Ω festzustellen. Darüber hinaus ist bei einer inhomogenen Erwärmung mit einem thermisch induzierten Bruch der Keramik aufgrund zu großer Temperaturunterschiede zu rechnen.
Für eine gute elektrische Kontaktierung der Si_3N_4/TiN-Keramik ist deshalb eine stoffschlüssige Verbindung zwischen Keramik und einer metallischen Zuleitung herzustellen. Elektrische Verbindungen, die durch einen keramischen Kleber hergestellt werden (vgl. [Mül06]), können aufgrund von noch größeren Übergangswiderständen (bis zu 2 Ω) ebenfalls nicht eingesetzt werden. Zudem sind diese Klebeverbindungen nur bis ca. 260 °C stabil, danach ist mit einer Ablösung zu rechnen.
Eine dauerhafte elektrische Verbindung kann durch das Aktivlöten der Keramik erreicht werden. Dabei wird ein Kontakt im Hochvakuum (bei etwa 10^{-5} bar) und bei einer Löttemperatur von 1050 °C (abhängig vom eingesetzten Lot) auf die elektrisch leitfähige Si_3N_4/TiN-Keramik gelötet. Eingesetzt werden Aktivlote mit einem Silber- und Titan-Anteil. Das Silber ist ein guter elektrischer Leiter, während das Titan durch eine gute Haftung zur Keramik einen guten elektrischen Kontakt herstellt (vgl. [MR03]). Erzielt werden dabei elektrische Übergangswiderstände, die kleiner als 100 mΩ sind.
Die hohe Löttemperatur kann, aufgrund der unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten zu thermischen Spannungen zwischen dem Kontaktmaterial und dem Heizleiter führen. Ein flaches Auflöten von Metallen, wie Kupfer oder Nickel, auf die Si_3N_4/TiN-Keramik, führt zu Zugspannungen und kann deshalb nicht angewendet werden. Da die Keramik eine hohe Druckbeständigkeit hat, wird in die leitfähige Keramik eine Bohrung eingebracht. In diese Bohrung wird eine Buchse aus Kupfer oder Nickel gelötet (Bild 5.4 links). Die Wärmeausdehnung dieser beiden Metalle führt zu einer Druckspannung in der Keramik. Aufgrund des geringeren Wärmeausdehnungskoeffizienten und der besseren Oxidationsbeständigkeit, ist Nickel einzusetzen. In diese Buchse wird in einem anschließenden Hartlot-Prozess eine flexible Kupfer- oder Nickelleitung bei einer Temperatur von 710 °C (abhängig vom eingesetzten Lot) eingelötet. Dadurch können nahezu keine mechanischen Spannungen durch Bewegungen der Zuleitungen im Keramik-Metall-Verbund entstehen.

Ferner kann ein elektrisch leitfähiges oder isolierendes Keramikplättchen mit dem gleichen Wärmeausdehnungskoeffizienten, wie der Heizleiter, flach auf die Kontaktstelle gelötet werden. Dazu wird in das Keramikplättchen eine Nut eingesägt. Das Plättchen wird mit einem Nickeldraht in der Nut auf die Kontaktfläche des Heizleiters gelötet (Bild 5.4 rechts).

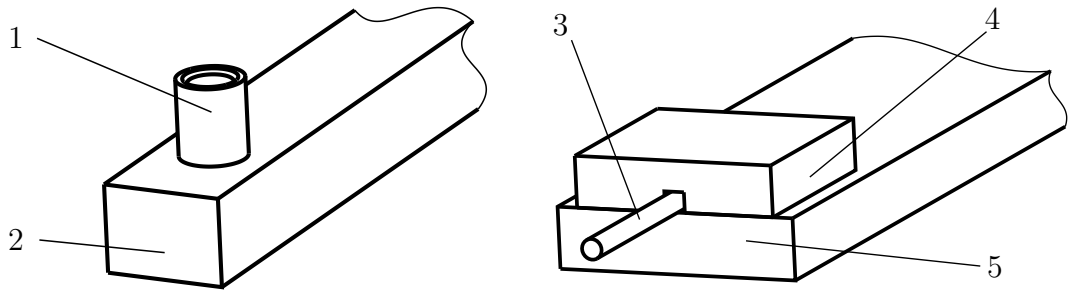

Bild 5.4: Elektrische Kontaktierung von Keramikheizelementen, links senkrechte Kontaktierung, rechts waagrechte Kontaktierung (1: Metallbuchse, 2: Si_3N_4/TiN-Mischkeramik, 3: Nickeldraht, 4: Keramikplättchen, 5: Si_3N_4/TiN-Mischkeramik)

Abhängig von den Platzverhältnissen im Spritzgießwerkzeug kann die Lösung mit der Metallbuchse für eine senkrechte Kontaktierung eingesetzt werden. Eine Umsetzung mit dem Keramikplättchen ist für eine waagrechte Kontaktierung zu nutzen. Mit nicht leitfähigen, keramischen Plättchen kann der Kontakt direkt isoliert werden. Vor dem Einbau des fertigen Heizelementes sind die Zuleitungen durch Keramikperlen oder mit einem keramischen Hochtemperaturschlauch zu isolieren.

Einbau in ein Spritzgießwerkzeug

Die Sprödigkeit keramischer Heizelemente erfordert einen steifen und präzisen Werkzeugaufbau. Wird der Si_3N_4/TiN - Heizleiter im Spritzgießwerkzeug verbaut, darf dabei die maximale Biegefestigkeit nicht überschritten werden (Tabelle 5.1). Neben den mechanischen Anforderungen an das Spritzgießwerkzeug sind temperaturabhängige Kennwerte, wie zum Beispiel die Härte der eingesetzten Stähle, zu beachten. Für diese Anwendungen eignen sich sekundärhärtende Stähle (Tabelle 5.2).

Tabelle 5.2: Kennwerte für einsetzbare Werkzeugstähle

Werkstoffnummer	**1.2343**	**1.2379**
E-Modul E in GPa	210	210
Zugfestigkeit R_m in MPa	980	820
Härte HRC (bei 100 °C)	52	62
Härte HRC (bei 200 °C)	52	60
Härte HRC (bei 400 °C)	52	62
Wärmeausdehnungskoeffizient α in 10^{-6}/K (bei 20 °C)	12,7	13,0
Wärmeleitfähigkeit λ in W/mK (bei 20 °C)	26,8	16,7

Eine formschlüssige Verbindung zwischen keramischer Heizung und dem Spritzgießwerkzeug soll vermieden werden. Damit trotzdem ein guter Wärmeübergang und eine thermische Ausdehnung stattfinden kann, ist das Heizelement durch eine Klemmung zu fixieren. Es können zwei unterschiedliche Methoden eingesetzt werden:

- Das keramische Heizelement, aufgebaut im Schichtverbund, wird in eine geschliffene Aussparung im Spritzgießwerkzeug gelegt. In einem darauffolgenden Schleifprozess werden beide Bauteile auf ein Endmaß gleichzeitig überschliffen. Anschließend wird das Heizelement mit einem Bauteil, welches die Werkzeugwand bildet, abgedeckt. Durch diese Klemmung wird das Heizelement nicht mechanisch belastet. Eine thermische Ausdehnung in der Aufheizphase ist zulässig und der Werkzeuginnendruck wird trotzdem abgestützt.
- Bei einem schichtweisen Zusammensetzen des Heizelementes mit Isolationsplatten, oder wenn ein nachträgliches Überschleifen des Heizelementes im verbauten Zustand nicht umsetzbar ist, muss das Heizelement vor dem Aktivlöten bereits auf eine definierte Dicke gebracht werden. Dies ist zum Beispiel erforderlich, wenn die elektrischen Kontakte das Schleifen behindern oder das Spritzgießwerkzeug aufgrund seiner komplexen Geometrie nicht überschliffen werden kann. Die Tiefe der Aussparung, in die das Heizelement eingelegt wird, muss ebenfalls auf die Höhe des Heizelementes genau abgestimmt sein.

Abhängig von der Bauteilgeometrie und dem Werkzeugaufbau können unterschiedliche Isolations-, Kontaktierungs- und Einbauvarianten gewählt werden.

5.3.2 Dickschichtheizelemente

Herstellung

Dickschichtheizelemente bestehen aus einem Schichtverbund. Ein metallischer Heizleiter wird von zwei isolierenden Keramikschichten umschlossen. Damit der Verbund in der Aufheizphase nicht durch die unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten zerstört wird, ist eine entsprechende Materialpaarung zu wählen. Eine Materialpaarung aus einer NiCr-Legierung als elektrischen Heizleiter und einer Al_2O_3-Keramik als Isolation können eingesetzt werden. Dieser Materialverbund wird auf ein Stahlsubstrat aufgetragen. Zur Abscheidung der Schichten wird ein thermisches Beschichtungsverfahren, wie Flamm- oder Plasmaspritzen, eingesetzt. Dabei wird das in Pulverform vorliegende Material durch eine Gasflamme (Flammspritzen, Bild 5.5) oder einen Lichtbogen (Plasmaspritzen) erwärmt und auf das Substrat aufgetragen. Die Beschichtung geht eine formschlüssige Verbindung mit der Stahloberfläche ein. Die Haftung wird dabei durch die Oberflächenrauheit und die Partikelgeschwindigkeit beeinflusst. Die abgeschiedenen Schichten weisen durch die zufällige Anordnung der beschleunigten Partikel auf der Oberfläche eine Porosität auf. Erreicht werden dabei Schichten mit einer Dichte von 90 % bis 95 %, bezogen auf das kompakte Material (vgl. [Lug02]). Beim Plasmaspritzen entstehen dichtere Schichten als beim Flammspritzen, da die Partikel eine höhere Geschwindigkeit aufweisen.

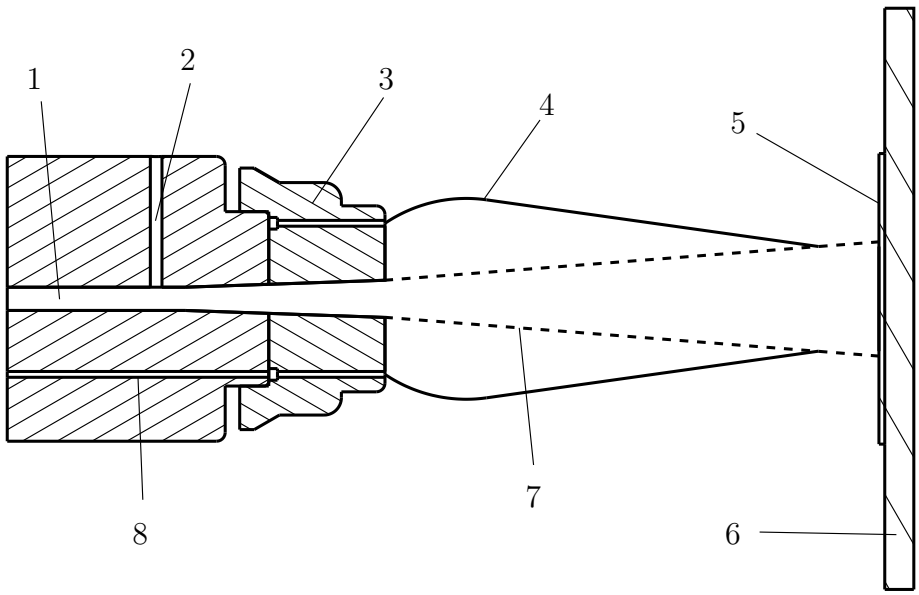

Bild 5.5: Prinzip des Flammspritzens von Pulver (1: Zuführung Brenngas, 2: Zuführung Schichtmaterial, 3: Düsenkopf, 4: Gasflamme, 5: Abgeschiedene Schicht, 6: Heizelementsubstrat, 7: Sprühstrahl, 8: Zuführung Sauerstoff)

Für die Herstellung eines Dickschichtheizelementes wird, zur Erhöhung der Haftung, zunächst die Oberfläche durch Strahlen angeraut. Beim Strahlen werden abrasive Medien, wie beispielsweise Korund, mit Luftdruck auf die anzurauende Oberfläche beschleunigt. Dadurch werden Teile der Oberfläche herausgelöst und abgetragen. Anschließend wird die Oberfläche mit einer Al_2O_3-Keramik als Isolation und dem Heizleiter, einer NiCr Legierung, beschichtet. Im nächsten Schritt wird die Schicht durch ein Laser-Verfahren strukturiert (vgl. [Rus03]). Dies ermöglicht eine gezielte Einstellung der Heizleistung (Bild 5.6).

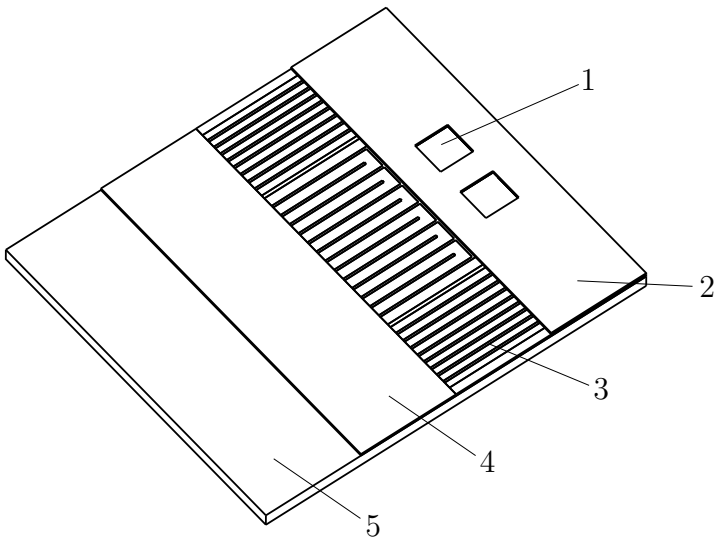

Bild 5.6: Aufbau eines Dickschichtheizelementes (1: Elektrische Kontaktfläche, 2: Obere Al_2O_3-Isolation, 3: Strukturierter NiCr-Heizleiter, 4: Untere Al_2O_3-Isolation, 5: Stahlsubstrat)

Dabei ist die temperaturabhängige Veränderung des spezifischen Widerstands der NiCr-Legierung bei der Auslegung des Heizleistung zu beachten. Die entsprechenden Bereiche, an denen Durchbrüche für Auswerfer, Druck- oder Temperatursensoren vorgesehen sind, werden durch einen zusätzlichen, umlaufenden Laserschnitt isoliert. Am Anfang und Ende des Heizleiters werden durch größere Oberflächenbereiche elektrische Kontaktflächen definiert. Nach Fertigstellung der Leiterbahnen und der unteren Isolation wird eine weitere Isolationsschicht aus einer Al_2O_3-Keramik aufgetragen, wobei die elektrischen Kontaktflächen durch eine Metallfolie abgedeckt werden.
Dieser Schichtverbund kann aufgrund der unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten bis maximal 300 °C eingesetzt werden. Wird diese Temperatur überschritten, können Risse im Verbund beziehungsweise eine lokale Delamination stattfinden. Die sichere Funktion des Heizelementes kann in diesem Fall nicht mehr gewährleistet werden.

Elektrische Versorgung

Die Fertigung der Leiterbahnen eines Dickschichtheizelementes kann durch die Laserstrukturierung präzise hergestellt werden. Dies erleichtert die Auslegung und ermöglicht den Betrieb bei einer Netzspannung von 230 V oder 400 V. Je nach Heizleistung können Ströme bis zu 30 A fließen. Die entsprechenden Leistungen werden über die Kontaktflächen an das Heizelement übertragen. Dazu kann eine lösbare oder eine feste elektrische Verbindung hergestellt werden.

- Die lösbare, elektrische Verbindung wird durch Federkontaktstifte realisiert. Federkontaktstifte können für Stromstärken bis zu 50 A und bis zu Temperaturen von 250 °C eingesetzt werden (Bild 5.7 links). Durch eine entsprechende Oberflächenbehandlung (zum Beispiel Schleifen) der Kontakte am Heizelement kann der Übergangswiderstand bis auf unter 100 mΩ minimiert werden.
- Für höhere Temperaturen kann ein Draht durch Laserschweißen auf den Kontaktflächen angebracht werden (vgl. [RL08]). Bei dieser Art der elektrischen Verbindung ist zusätzlich eine Zugentlastung für das Kabel anzubringen. Dazu wird auf dem Stahlsubstrat ein Rohr angeschweißt. Durch dieses Rohr wird das Kabel gelegt und anschließend mechanisch gequetscht. Der komplette Aufbau wird mit einem Hochtemperatursilikon ($\vartheta_Z > 300\,°C$) vergossen und mit einem Epoxidharz-Deckel gegen mechanische Belastungen abgedeckt (Bild 5.7 rechts).

Integration in ein Spritzgießwerkzeug

Damit die keramischen Isolationsschichten aus Al_2O_3 nicht durch auftretende mechanische Spannungen oder Kräfte zerstört werden, darf die Biegebruchspannung nicht überschritten werden. Für die Integration eines Dickschichtheizelementes im Spritzgießwerkzeug ist deshalb darauf zu achten, dass die maximale Biegebruchfestigkeit der Isolationskeramik nicht überschritten wird. Die durch das Abscheideverfahren entstehende Porosität und die Dicke lassen gegenüber dem dichten Material höhere Durchbiegungen zu.

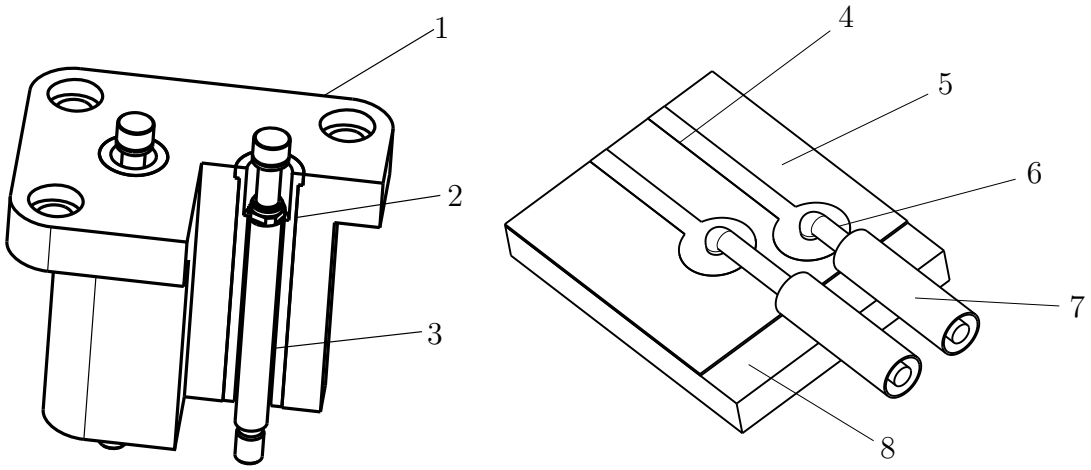

Bild 5.7: Elektrische Kontaktierung von Dickschichtheizelementen links lösbare Verbindung durch Federkontakte, rechts feste Verbindung durch aufgeschweißte Leitungen (1: Kontaktblock, 2: Isolationshülse, 3: Federkontaktstift, 4: Heizleiter, 5: Isolationsschicht, 6: Elektrische Zuleitung, 7: Zugentlastung, 8: Substrat)

Das Dickschichtheizelement wird durch auftragen einer zweiten, abschließenden Isolationsschicht funktionsfähig hergestellt. Danach muss das Heizelement auf eine definierte Dicke abgestimmt werden. Die Bearbeitung der abschließenden Isolationsschicht aus Al_2O_3 kann nur mit speziellen Schleifmedien, wie CBN- oder Diamant-Werkzeugen, erfolgen. Damit diese teuren Verfahren nicht zur Anwendung kommen müssen, kann auf die abschließende Isolation eine Stahlschicht aufgetragen werden. Durch die Stahlschicht wird ein zusätzlicher, mechanischer Schutz für das Dickschichtheizelement erzielt.

Durch diese Herstellungsmethode von Dickschichtheizelementen können verschiedene Konstruktionen, je nach Anforderung an das Formteil und durch den variothermen Spritzgießprozess, gewendet werden.

- Das Dickschichtheizelement wird auf ein Stahlsubstrat aufgetragen. Dabei ist eine Seite des Stahlsubstrats die Werkzeugwand (Bild 5.6). Durch eine anschließende, mechanische Bearbeitung erfolgt eine Höhenabstimmung des Heizelementes auf eine definierte Dicke. Das Verbundbauteil (Heizelement und Substrat) wird auf das Spritzgießwerkzeug mit Bundschrauben fixiert. Eine thermische Ausdehnung in der Aufheizphase sowie ein guter thermischer Kontakt zum Spritzgießwerkzeug sind gegeben. Bei größeren Heizelementabmessungen und Heizleistungen können unkontrollierte Wölbungen durch die unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten zwischen Heizelement und Stahlsubstrat entstehen. Zu deren Vermeidung kann die Substratdicke erhöht werden, wodurch aber die Aufheizdynamik an der Werkzeugwand gemindert wird.
- Um diese unkontrollierten Wölbungen zu vermeiden, wird das Heizelement direkt auf das Spritzgießwerkzeug beziehungsweise den Kühlblock aufgetragen. Das abgeschiedene Dickschichtheizelement ist dann auf die gewünschte Höhe zu schleifen. Abgedeckt wird die bearbeitete Fläche mit einem Bauteil, das die Werkzeugwand

bildet. Dadurch können spezielle Anforderungen an die Oberfläche wie Mikro- oder Nanostrukturen oder hochglanzpolierte Oberflächen umgesetzt werden. Ein Wechsel der Oberflächengeometrie oder -struktur ist schnell und einfach durchzuführen.

- Ein direkter Einsatz des Dickschichtheizelementes als Werkzeugwand ist nur bedingt denkbar. Durch den Herstellungsprozess entstehen Schichten mit einer offenporigen Struktur. Hochglänzende oder kleinststrukturierte Oberflächen können deshalb nicht hergestellt werden. Die abdeckende, elektrisch leitfähige Stahlschicht des Dickschichtheizelementes ermöglicht zum Beispiel einen Galvanikprozess, wodurch eine geschlossene Oberfläche hergestellt werden kann.

5.4 Systeme zur schnellen Abkühlung

5.4.1 Konturnahe Wassertemperierung

Damit das Formteil innerhalb kurzer Zeit schnell abkühlt und formstabil entnommen werden kann, muss nach dem Einspritzvorgang die Werkzeugwandtemperatur schnellstmöglich wieder abgesenkt werden. Für die Abkühlung der Werkzeugwand stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung. Aus der isothermen Verarbeitung von thermoplastischen Formmassen sind konturangepasste Temperierungen bekannt (vgl. [Koc02]). Durch die Formteilgeometrie kann der Abstand zwischen gebohrtem Temperierkanal und Werkzeugwand variieren. Es entstehen lokale Temperaturunterschiede. Damit eine gleichmäßige Abkühlung des Formteils stattfindet, werden die Temperierkreisläufe der Werkzeugwand angepasst. Dadurch ist eine auf das Formteil abgestimmte Temperierung möglich. Insbesondere bei flächigen Bauteilen können konturangepasste Kühlungen durch Bohrungen umgesetzt werden. Mit Gewindestiften und einem Dichtmittel werden die Bohrungen verschlossen und der Lauf des Wassers durch das Kühlmodul vorgegeben. Für Formteilgeometrien, bei denen gebohrte Kühlkreisläufe nicht ausreichend sind, können gelötete oder im Laserumschmelzverfahren hergestellte Formeinsätze verwendet werden (vgl. [MF10, Geb07]).
Der Wärmetransport von der Formmasse und der Heizung an die Kanalwand basiert auf Wärmeleitung. Durch einen konvektiven Wärmeübergang an der Innenwand des Temperierkanals wird die Wärme an das Fluid abgegeben. Ein größerer Temperaturunterschied zwischen Kanalwand und Fluid erhöht den Wärmestrom. Dieser kann mit dem Wärmeübergangskoeffizient (α_w), der Kanalwandoberfläche (A_K) und deren Temperaturdifferenz zum Wasser ($\vartheta_\mathrm{KW} - \vartheta_\mathrm{F}$) berechnet werden.

$$\dot{Q}_\mathrm{K} = \alpha_\mathrm{w} \cdot A_\mathrm{K} \cdot (\vartheta_\mathrm{KW} - \vartheta_\mathrm{F}) \tag{5.3}$$

Der Wärmeübergangskoeffizient des Wassers ist von der Strömungsform und -geschwindigkeit, der Kanallänge und dem Kanaldurchmesser, abhängig. Über die Pumpenleistung des eingesetzten Temperiergerätes und der hergestellten Kühlkanalgeometrie wird die Strömungsform und -geschwindigkeit beeinflusst. Aus der resultierenden Durchflussmenge des Fluids und dem Temperaturunterschied zwischen Ein- und Auslass des Temperierkanals

kann die aufgenommene Wärmemenge und damit ebenfalls die Kühlleistung ermittelt werden.

$$\dot{Q}_{\mathrm{K}} = \dot{m}_{\mathrm{d}} \cdot c \cdot (\vartheta_{\mathrm{A}} - \vartheta_{\mathrm{E}}) \tag{5.4}$$

Bedingt durch die Kühlkanalgeometrie und der eingesetzten Pumpe wird beim Durchfließen der Kühlkanäle zwischen laminarer und turbulenter Strömung unterschieden. Eine turbulente Strömung entsteht üblicherweise in einem kreisförmigen Temperierkanal, wenn die Reynolds-Zahl größer als 2320 ist (vgl. [Tru08]). Die Reynolds-Zahl wird aus der Strömungsgeschwindigkeit (w), dem Kanaldurchmesser (d) und der kinematischen Viskosität (ν) berechnet.

$$Re = \frac{w \cdot d}{\nu} \tag{5.5}$$

Durch die Wasserverwirbelungen bei turbulenten Strömungen, können höhere Wärmeübergangskoeffizienten aufgrund von Bewegungsvorgängen, welche senkrecht zur Kanalwand verlaufen, gegenüber laminaren Strömungen erreicht werden.
Zum Erreichen einer hohen Kühlleistung, ist daher ein hoher Durchfluss und ein hoher Wärmeübergangskoeffizient zwischen Fluid und Kanalwand notwendig. Ein hoher Durchfluss kann mit parallel verlaufenden Kühlkanälen erreicht werden. Durch eine entsprechende Kühlkanallänge oder einem kleinen Temperierkanaldurchmesser wird das Entstehen einer turbulenten Strömung begünstigt. Damit die parallel verlaufenden Kanäle nicht durch Ablagerungen verengt werden und dadurch lokale Temperaturinhomogenitäten durch lokale Unterschiede des Wärmeübergangs entstehen, ist es möglich, die Kanalwand durch eine Nickelschicht zu schützen (vgl. [Dan04]). Mit zusätzlichen Biegungen in der Kanalführung können weitere Turbulenzen im Fluid erzeugt und eine hohe Kühlleistung erreicht werden (vgl. [Boe07]).
Damit die Sollwerttemperaturen beim variothermen Temperatursprung angefahren werden können, ist eine Regelung der Kühlleistung erforderlich. Dazu wird der Durchfluss in den konturangepassten Kühlkanälen durch Ventile gesteuert. Eingesetzt wird im einfachsten Fall ein Magnetventil, das den Durchfluss ein- beziehungsweise ausschaltet. Ferner können Proportionalventile eingesetzt werden, mit denen die Durchflussmenge geregelt wird.
Für einen dynamischen Abkühlprozess ist der Abstand zwischen Kanal- und Werkzeugwand zu minimieren. Limitiert wird diese Forderung durch die Biegefestigkeit des eingesetzten Werkstoffs für den Formeinsatz und der zulässigen Durchbiegung für das eingesetzte Widerstandsheizelementes. Zur Ermittlung der Durchbiegung von Formeinsätzen aufgrund der Kühlkanalgeometrie können FEM-Programme eingesetzt werden (vgl. [Koe04, ERB+11]).

5.4.2 Verdampfung von Kältemittel

Zur Kühlung von Spritzgießwerkzeugen können auch Medien genutzt werden, die bei der Verdüsung in einen Raum verdampfen. Dazu werden so genannte natürliche Kältemittel

wie CO_2 (vgl. [MMM07]) oder synthetische Kältemittel (vgl. [Ste06]) zum Beispiel R404 (Mischung aus R134a, R125, R143a und R32) eingesetzt. Unter Umgebungsbedingungen sind die Kältemittel gasförmig. Durch komprimieren mit einem Hub- oder Drehkolbenverdichter auf einen höheren Druck, wird das Kältemittel überhitzt. In einem anschließenden Kühlprozess wird dem überhitzen Gas Wärme entzogen. Ist der Taupunkt erreicht, wird das Kältemittel flüssig (vgl. [BK06]).

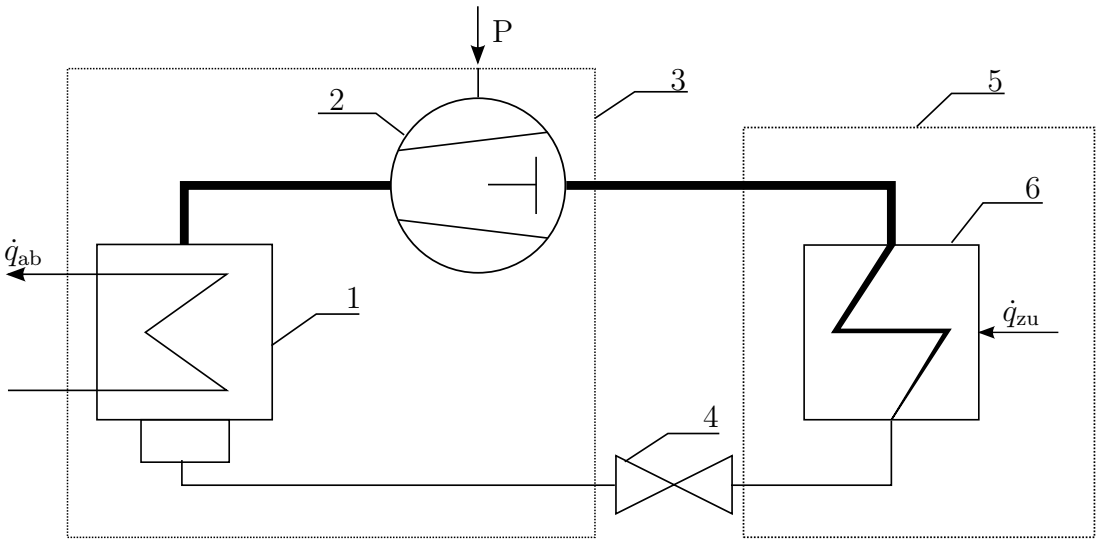

Bild 5.8: Aufbau einer Kältemaschine (1: Wärmetauscher, 2: Kompressor, 3: Kälteeinheit, 4: Drosselventil, 5: Spritzgießwerkzeug, 6: Verdampfer)

Das unter Druck stehende, flüssige Kältemittel wird mit Leitungen bis an die Stelle im Werkzeug geleitet, an der eine endotherme Expansion notwendig ist (Bild 5.8). Mit einem Magnetventil (4) kann das komprimierte Kältemittel dosiert werden. Dadurch ist die Regelung auf eine konstante Temperatur möglich. Die minimal erreichbare Temperatur ist durch den Siedepunkt des Kältemittels und den Druck im Verdampfungsraum (6) bestimmt. Die Kühlleistung des expandierenden Kältemittels kann aus dem Massestrom ($\dot{m}$) und der Entalphiedifferenz zwischen gasförmigem und flüssigem Zustand berechnet werden (vgl. [BK06]).

$$\dot{Q}_{zu} = \dot{m} \cdot (h_1 - h_3) \tag{5.6}$$

Für eine optimale Kühlung muss die Expansion des Kältemittels unmittelbar hinter dem Heizelement erfolgen. Das Magnetventil ist aus konstruktiven Gründen an der Außenseite des Spritzgießwerkzeugs befestigt.

Der Verdampfungsraum für das Kältemittel wird hinter dem Heizelement durch Bohrungen oder konturangepasste Kanäle geschaffen. Wenn das Kältemittel eingespritzt wird, kühlt die Kanalwand durch Wärmeleitung ab. Dabei sind die Kühlkanäle entsprechend groß zu dimensionieren, damit das Kältemittel vollständig expandiert. Ist der Verdampfungsraum zu klein, kommt es zur Abkühlung in den Rückleitungen zum Verdichter.

5.4.3 Sprühwasserkühlung

Bei diesem Abkühlverfahren wird Wasser fein zerstäubt und mit einer überlagerten Luftströmung als Wasserspray auf die zu kühlende Oberfläche gesprüht (vgl. [Rei87]). Im Idealfall verdampfen die Einzeltropfen durch den Temperaturunterschied zwischen Wasserspray und der heißen Oberfläche ($\vartheta_\mathrm{O} - \vartheta_\mathrm{F}$) vollständig, bevor der nächste Tropfen nachgeführt wird, so dass die Effektivität einer Verdampfungskühlung erreicht wird (Bild 5.9 rechts). Dies wird als Sprühnebelkühlung bezeichnet. Im Gegensatz zur Verdampfungskühlung (siehe Kapitel 5.4.2) wird die Oberfläche direkt abgekühlt. Der abgeführte Wärmestrom kann mit der spezifischen Entalphie Δh_V und der Wasserbeaufschlagungsdichte ($\dot{m}$) berechnet werden.

$$\dot{q} = \Delta h_\mathrm{V} \cdot \dot{\mathrm{m}} = \alpha \cdot (\vartheta_\mathrm{O} - \vartheta_\mathrm{F}) \tag{5.7}$$

Ist die Wasserbeaufschlagungsdichte höher als die Menge an verdampfendem Wasser, wird dies als Spritzwasserkühlung bezeichnet (vgl. [Pus03]). Dies entsteht, wenn die Oberfläche abkühlt und das Wasser nicht mehr vollständig verdampft oder die Wassermenge im Sprühstrahl zu hoch eingestellt ist (Bild 5.9 links).

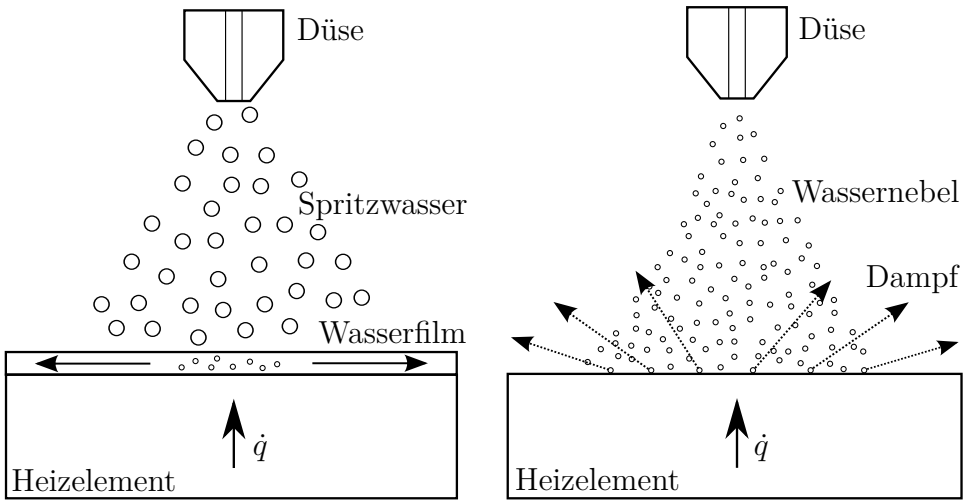

Bild 5.9: Verfahrensprinzip der Spritzwasserkühlung (links) und der Sprühnebelkühlung (rechts)

Bei der Spritzwasserkühlung trifft der Einzeltropfen auf die Wand, interagiert thermisch mit dieser und prallt wieder ab. Dabei erhöht sich die Wassertemperatur vom ersten Kontakt (ϑ_WB) bis zum Ablösen (ϑ_WA). Anschließend wird der Tropfen durch die Luftströmung, die in der Nähe der zu kühlenden Oberfläche verläuft, fortgetragen. Die Wärme wird durch den Kontakt fest-flüssig an den Tropfen abgegeben (vgl. [Vis07]).

$$\dot{q} = \dot{m} \cdot c \cdot (\vartheta_\mathrm{WA} - \vartheta_\mathrm{WB}) \tag{5.8}$$

Die Verdampfungszeit des auftreffenden Wassertropfens ist abhängig von dem Wärmeübergang, welcher durch die Oberflächentemperatur, der Tropfengröße und der auftreffenden Wassermenge bestimmt ist. In Bild 5.10 ist die Verdampfungszeit eines Wassertropfens

in Abhängigkeit der Tropfengröße und der Oberflächentemperatur einer Heizplatte dargestellt. Zur Ermittlung wurden Wassertropfen auf eine Heizplatte mit einer Mikropipette aufgelegt.

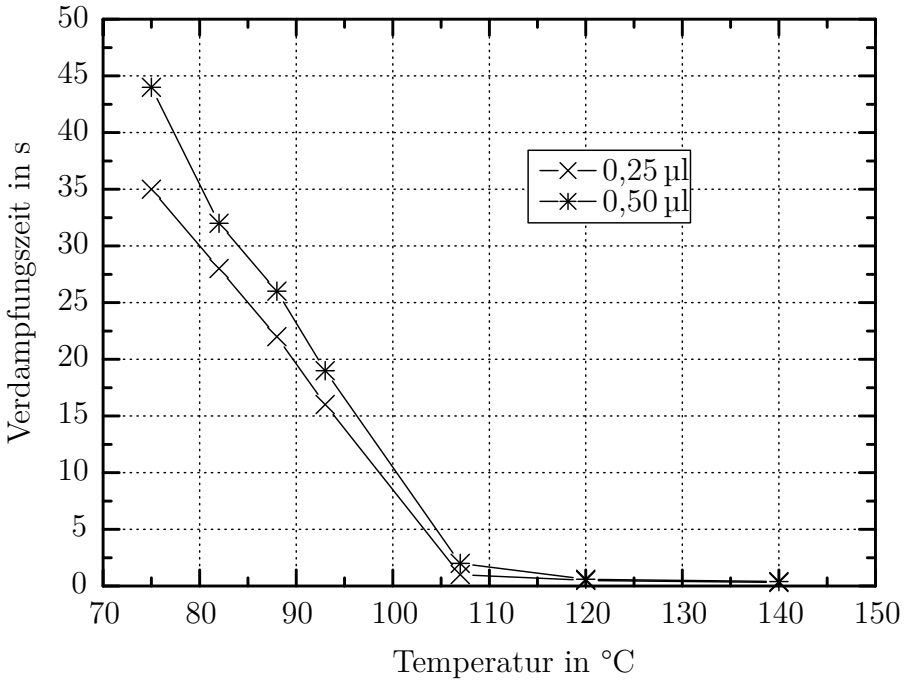

Bild 5.10: Verdampfungszeit eines Wassertropfens in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur einer Heizplatte und der Wassermenge

Für die Umsetzung eines Wassersprays stehen verschiedene Einstoff- oder Zweistoffdüsen zur Verfügung. Bei Einstoffdüsen wird die zugeführte Druckenergie in eine kinetische Energie am Düsenaustritt umgewandelt. Während bei Zweistoffdüsen die Flüssigkeit mittels eines Gases (zum Beispiel Druckluft) zerstäubt wird. Es wird dabei zwischen Unterdruck- und Überdruckdüsen unterschieden. Bei den Unterdruckdüsen wird die zu versprühende Flüssigkeit durch das Venturi-Prinzip angesaugt. Eine Venturi-Düse besteht aus einem Rohr mit einer Verengung. An dieser Stelle ist ein Abnahmerohr platziert. Fließt durch die Venturi-Düse ein gasförmiges oder flüssiges Medium, so ist an der engsten Stelle des Rohres der dynamische Druck (Staudruck) maximal und der statische Druck (Ruhedruck) minimal. Dadurch kann über das Abnahmerohr ein zweites Medium angesaugt werden. Im Gegensatz dazu sind bei den Überdruckdüsen sowohl die Flüssigkeits- als auch die Gaskomponente unter Druck. Die Ein- und Zweistoffdüsen unterscheiden sich in der Zerstäubungsfähigkeit. Zweistoffdüsen produzieren einen feineren Flüssigkeitsnebel (vgl. [VM99]). Eingesetzt wird die Sprühwasserkühlung, indem das Luft-Wasser-Gemisch erzeugt und anschließend durch die Kühlkanäle im Spritzgießwerkzeug geleitet wird. Diese Kühlkanäle dürfen keine Biegungen aufweisen, in denen sich Wasser ansammeln kann. Trifft der Sprühwassernebel auf die Kanalwand, zum Beispiel in einer 180° Biegung, wird die kinetische Energie des Wassertropfens absorbiert. Da keine Zwangsführung des Sprühnebels besteht, kann das Wasser nur dann abfließen, wenn der folgende Verlauf des Kühlkanals

ein schwerkraftbedingtes Abfließen ermöglicht.
Die Effektivität einer Sprühwasserkühlung wird durch direktes Besprühen des zu kühlenden Heizelementes verbessert. Dazu muss die Düse senkrecht auf das Heizelement gerichtet sein. Ein Abfließen des versprühten Wassers ist dabei ebenfalls zu gewährleisten. Durch das direkte Besprühen des Heizelementes wird eine höhere Wasserbeaufschlagungsdichte und damit verbunden ein höherer konvektiver Wärmeübergang erzeugt.

5.5 Schlussfolgerung für die Umsetzung

Keramische Heizungen können aufgrund der hohen Druckfestigkeit in Spritzgießwerkzeugen eingesetzt werden. Die hohe Thermoschockbeständigkeit der untersuchten Si_3N_4/TiN-Mischkeramik erlaubt hohe spezifische Heizleistungen und eine hochdynamische Aufheizung. Isoliert wird die Mischkeramik durch nicht leitfähige Keramikplättchen. Bei der Herstellung des Grünlings kann eine Schichtung in der Presse aus einem elektrisch leitfähigen und einem isolierenden Pulver erfolgen, wobei die Isolationsschichten direkt mit dem Heizleiter verbunden werden. Eine alternative Isolation mit Kunststofffolien ist für den dauerhaften Einsatz im Spritzgießwerkzeug nicht geeignet. Geätzte Isolationsschichten weisen eine offenporige Randschicht auf, wodurch die notwendige Druckfestigkeit nicht gewährleistet ist.
Dickschichtheizelemente erfüllen ebenfalls die mechanischen und thermischen Voraussetzungen für die Durchführung von hochdynamischen Temperaturwechseln und können den hohen Werkzeuginnendruck abstützen. Je nach Anforderung kann das Heizelement direkt auf die Werkzeugwand aufgetragen oder im Spritzgießwerkzeug verbaut werden. Die elektrische Kontaktierung wird durch Federkontakte oder durch aufgeschweißte Drähte hergestellt.
Die Kühlung mit konturangepassten Temperierkanälen ist etabliert und kann durch unterschiedliche Verfahrenstechniken auf die Formteilgeometrie angepasst werden. Die Kanalgeometrie, die Wassertemperatur und die Durchflussmenge bestimmen die Kühlleistung. Dagegen ist die Sprühwasserkühlung für einen Einsatz in Spritzgießwerkzeugen aufgrund der konstruktiven Restriktionen durch die Düse und die Zu- und Abfuhr der Medien nicht realisierbar. Zur schnellen Abkühlung ist das Heizelement direkt zu besprühen. Für eine homogene Abkühlung muss der Sprühstrahl ausgebildet sein. Dies wird durch einen entsprechenden Abstand zwischen Düse und zu kühlender Oberfläche erreicht. Hinzu kommt der große Herstellungsaufwand der Formeinsätze durch die Zuführung von Wasser und Luft, welche nicht immer gewährleistet werden können. Zusätzlich können Ablagerungen in der Düse und dadurch bedingte Verstopfungen entstehen.
Auf Basis der entwickelten Konzepte wird ein Versuchswerkzeug für die keramische Heizung in Kombination mit einem konturangepassten Wassertemperiersystem aufgebaut. In einem zweiten Versuchswerkzeug werden Dickschichtheizelemente eingesetzt, welche ebenfalls in Kombination mit einer konturangepassten Wassertemperierung, als Werkzeugwand und im Werkzeug selbst, ausgeführt sind.

6 Prozessablauf mit den konzipierten variothermen Temperiersystemen

Für einen variothermen Spritzgießprozess ist eine reproduzierbare, konstante obere Werkzeugwandtemperatur zu Beginn der Formfüllung erforderlich. Damit die Zykluszeit nicht verlängert wird, muss diese obere Werkzeugwandtemperatur schnell erreicht werden. Die Temperaturwechseldynamik für die konzipierten Heizelemente wird deshalb berechnet, damit eine grundsätzliche, thermische Auslegung für ein Spritzgießwerkzeug möglich ist. Die Auslegung des variothermen Temperiersystems hat einen Einfluss auf die Abkühlung der verarbeiteten, thermoplastischen Formmasse. Deshalb werden zunächst die thermischen Eigenschaften ausgewählter Formmassen unter Spritzgießbedingungen ermittelt. Anschließend wird damit die Abkühlzeit berechnet. Dadurch ist die Charakterisierung der Dauer eines variothermen Fertigungszyklus vorzunehmen. Der Fertigungszyklus besteht aus einer Aufheizphase auf einen oberen Sollwert und einer Abkühlphase auf einen unteren Sollwert. Diese sind wiederum abhängig von der Konstruktion des Spritzgießwerkzeugs, der eingesetzten Formmasse und den Prozessparametern für einen variothermen Temperatursprung.

6.1 Instationäre Wärmeleitung

Der Betrieb eines elektrischen Widerstandsheizelementes in einem Spritzgießwerkzeug erwärmt die Werkzeugwand aufgrund von Wärmeleitung. Verluste durch Wärmestrahlung und Konvektion an der Werkzeugwand können wegen des niedrigen Temperaturniveaus auf der Werkzeugwand (bei thermoplastischen Polymeren in der Regel unter 200 °C) vernachlässigt werden. Die Berechnung der Temperaturverteilung kann daher mit der Differentialgleichung für instationäre Wärmeleitung durchgeführt werden (vgl. [BS06]).

$$\rho \cdot c \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \left[\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda \frac{\partial \vartheta}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda \frac{\partial \vartheta}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda \frac{\partial \vartheta}{\partial z}\right) \right] + \dot{q}\,(x, y, z, t, \vartheta) \tag{6.1}$$

Die Differentialgleichung beschreibt die Temperaturverteilung dreidimensional im Spritzgießwerkzeug. Die elektrische Leistung des Widerstandsheizelementes wird in Wärme umgesetzt. Die dadurch entstehende Temperaturerhöhung erwärmt die Werkzeugwand durch Wärmeleitung. Für eine dreidimensionale Berechnung der Temperaturverteilung muss der konstruktive Aufbau des Spritzgießwerkzeugs und des Heizelementes bekannt sein. Da-

durch ist es möglich, die Temperaturwechseldynamik und die Temperaturhomogenität an der Werkzeugwand zu berechnen. Für eine erste Simulation der Temperaturwechseldynamik wird ein Heizelement angenommen, das eine plane Werkzeugwand über die gesamte Fläche gleichmäßig erwärmt. Inhomogenitäten durch Wärmeabfluss in das umliegende Werkzeug können deshalb vernachlässigt werden. Für großflächige Heizelemente ist diese Vereinfachung besonders geeignet. Für eine detaillierte Berechnung der Temperaturverteilung an der Werkzeugwand kann das Spritzgießwerkzeug mit einem FEM-Programm thermisch berechnet werden. Die eindimensionale Wärmeleitungsgleichung dient lediglich einer ersten grundlegenden Berechnung des Temperaturverlaufs mit variothermen Temperiersystemen.

$$\rho \cdot c \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left(\lambda \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right) + \dot{q}_{(x,t,\vartheta)} \tag{6.2}$$

Diese Differentialgleichung kann aufgrund der nicht linearen Stoffwerte im Heizelement und den Randbedingungen nicht analytisch gelöst werden, da das entwickelte, elektrische Widerstandsheizelement aus mindestens drei unterschiedlichen Schichten aufgebaut ist.

6.1.1 Differenzengleichung zur thermischen Auslegung

Für die thermische Auslegung eines mehrschichtigen Widerstandsheizelementes werden die in der Differentialgleichung (Gleichung 6.2) auftretenden Ableitungen durch Differenzenquotienten ersetzt. Der Differenzenquotient approximiert die Lösung der Differentialgleichung an diskreten Stellen (vgl. [BS06]). Durch Berücksichtigung des Diskretisierungsfehlers, der beim Differenzenverfahren entsteht, gilt:

$$\text{Ableitung} = \text{Differenzenquotient} + \text{Diskretisierungsfehler} \tag{6.3}$$

Die diskreten Stellen werden durch ein zeitliches und räumliches Gitternetz gebildet. Dabei ist Δx und Δt die Maschenweite (Bild 6.1). Ein Gitterpunkt hat die Koordinaten:

$$x_i = x_0 + i \cdot \Delta x \tag{6.4}$$

$$t_k = t_0 + k \cdot \Delta t \tag{6.5}$$

Die zweite Ableitung in x-Richtung kann zur Zeit t_k an der Stelle x_i durch den Differenzenquotienten ersetzt werden:

$$\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} = \frac{\vartheta_{k,i+1} - 2\vartheta_{k,i} + \vartheta_{k,i-1}}{\Delta x^2} + O(\Delta x^2) \tag{6.6}$$

Der Diskretisierungsfehler (O) wird kleiner, je geringer die Maschenweite im Gitter gewählt ist. Für die erste zeitliche Ableitung zum Zeitpunkt t_k an der Stelle x_i entsteht folgender Differenzenquotient.

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \frac{\vartheta_{k+1,i} - \vartheta_{k,i}}{\Delta t} + O(\Delta t) \tag{6.7}$$

Werden die beiden Ableitungen in Gleichung 6.2 durch die Differenzenquotienten ersetzt, kann der zeitliche Verlauf der Temperatur mit temperaturabhängigen Stoffwerten berechnet werden.

$$\vartheta_{k+1,i} = \vartheta_{k,i} - \frac{2a_{k,i}\Delta t}{\Delta x^2} \cdot \vartheta_{k,i} + \frac{a_{k,i}\Delta t}{\Delta x^2} \cdot \vartheta_{k,i+1} + \frac{a_{k,i}\Delta t}{\Delta x_2} \cdot \vartheta_{k,i-1} + \frac{\Delta t}{\rho_{k,i} \cdot c_{\mathrm{p}k,i}} \cdot \dot{q}_{k,i} \tag{6.8}$$

Dabei ist die Temperaturleitfähigkeit ($a_{k,i}$) zusammengesetzt aus den drei Stoffwerten, der Wärmeleitfähigkeit ($\lambda_{k,i}$), der Dichte ($\rho_{k,i}$) und der Wärmekapazität ($c_{k,i}$).

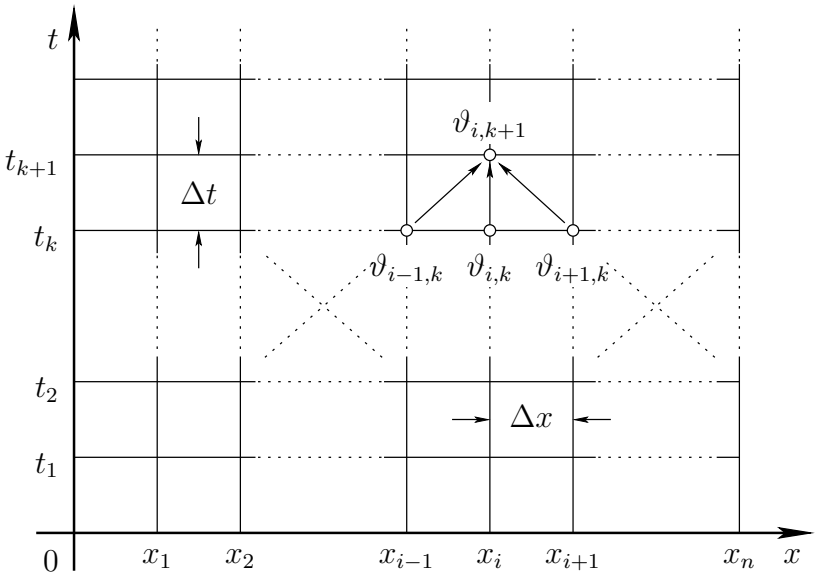

Bild 6.1: Diskretisierung der eindimensionalen instationären Wärmeleitungsgleichung (vgl. [Küb10])

6.1.2 Formulierung der Randbedingungen

An den Übergängen der einzelnen Schichten des Heizelementes ändern sich die Stoffparameter c, ρ und λ. Unter der Annahme eines idealen Wärmekontaktes an den Schichtübergängen, kann dies wie folgt bei der Bildung des Differenzenquotienten berücksichtigt werden (vgl. [BS06]).

$$a_{k,i} \cdot \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} = \frac{a_{k,i+\frac{1}{2}} \cdot (\vartheta_{k,i+1} - \vartheta_{k,i}) - a_{k,i-\frac{1}{2}} \cdot (\vartheta_{k,i} - \vartheta_{i-1})}{\Delta x^2} + O(\Delta x^2) \tag{6.9}$$

Für die Stoffwerte $a_{k,i+\frac{1}{2}}$ und $a_{k,i-\frac{1}{2}}$, die zwischen zwei diskreten Berechnungsstellen liegen, muss ein Mittelwert gebildet werden. Hierfür wird der harmonische Mittelwert verwendet (vgl. [Mar89]).

$$a_{k,i\pm\frac{1}{2}} = \frac{2a_{k,i\pm1}a_{k,i}}{a_{k,i\pm1} + a_{k,i}} \tag{6.10}$$

Dadurch können räumliche und thermische Änderungen der Stoffwerte berücksichtigt werden. Es kann die folgende Gleichung zur Berechnung des Temperaturverlaufs an den Ma-

terialübergängen zur Anwendung kommen:

$$\vartheta_{k+1,i} = \vartheta_{k,i} + \frac{2a_{k,i}\Delta t}{\Delta x^2} \cdot \left[\frac{\vartheta_{k,i+1} - \vartheta_{k,i}}{1 + \frac{a_{k,i}}{a_{k,i+1}}} - \frac{\vartheta_{k,i} - \vartheta_{k,i-1}}{1 + \frac{a_{k,i}}{a_{k,i-1}}} \right] + \frac{\Delta t}{\rho_{k,i} \cdot c_{\mathrm{p}k,i}} \cdot \dot{q}_{k,i} \tag{6.11}$$

Um die Stabilität des Differenzenverfahrens sicherzustellen, muss bei der Wahl der Zeit- und Ortsschrittweite Δt und Δx darauf geachtet werden, dass folgendes Konvergenzkriterium erfüllt ist:

$$\frac{2a_{k,i}\Delta t}{\Delta x^2} \cdot \left[\frac{1}{1 + \frac{a_{k,i}}{a_{k,i+1}}} - \frac{1}{1 + \frac{a_{k,i}}{a_{k,i-1}}} \right] < \frac{1}{2} \tag{6.12}$$

Ausgehend von einer gewünschten Ortsauflösung (Δx) sowie den Stoffdaten (a) und der Stabilitätsbedingung (beispielsweise Vorgabe = $\frac{1}{2}$), kann mit Hilfe der Gleichung 6.12 die zulässige, maximale Zeitschrittweite Δt berechnet werden.

6.2 Berechnung der Temperaturwechseldynamik unter Verwendung der neu entwickelten Temperiersysteme

6.2.1 Keramische Heizung

Zur Berechnung der Erwärmung einer Werkzeugwand mit einem elektrischen Widerstandsheizelement muss die Starttemperatur zum Zeitpunkt t_0, die spezifische Heizleistung $\dot{q}_{\mathrm{H}}$ und die Heizzeit t_{H} vorgegeben werden. Für die Abkühlung wird eine konstante Temperatur im Randbereich des Berechnungsgitters angenommen. Diese Temperatur wird durch das eingesetzte Kühlmodul bestimmt. Ist der konstruktive Aufbau des Temperiermoduls bekannt, kann mit der Gleichung 6.11 der Temperaturwechsel berechnet werden.
Keramische Heizelemente können zum einen aus mehreren einzelnen Platten oder durch einen Schichtverbund aufgebaut werden. Beim Aufbau aus mehreren einzelnen Platten wird für den Heizleiter, wie in Kapitel 5.3.1 beschrieben, eine minimale Dicke von 3 mm und für die Isolationsplatten aus Siliziumnitrid eine Dicke von 1 mm gewählt. Für den Spritzgießprozess kann die obere Isolationsplatte als Werkzeugwand direkt eingesetzt werden. Zur Abkühlung wird eine konstante Temperatur 3 mm hinter der unteren Isolationsschicht verwendet.
In Bild 6.2 ist der Temperaturverlauf in den einzelnen Schichten dargestellt. Dieser Berechnung liegen die Werte aus Tabelle 6.1 zugrunde. Zu erkennen ist ein Temperaturunterschied zwischen Werkzeugwand und Heizelement, der durch die spezifische Heizleistung und der Dicke des darüberliegenden Einsatzes beeinflusst wird. Je dicker der Werkzeugeinsatz ist, desto langsamer verläuft der Temperaturwechsel. Diese Abhängigkeit ist in Bild 6.3 dargestellt. Hierfür wurde die Aufheizdynamik bei einer konstanten spezifischen Heizleistung von 50 W/cm^2 für unterschiedliche Dicken der Werkzeugeinsätze berechnet. Durch die Erhöhung der spezifischen Heizleistung kann die Aufheizdynamik bei einer entsprechenden Dicke des Einsatzes verbessert werden.

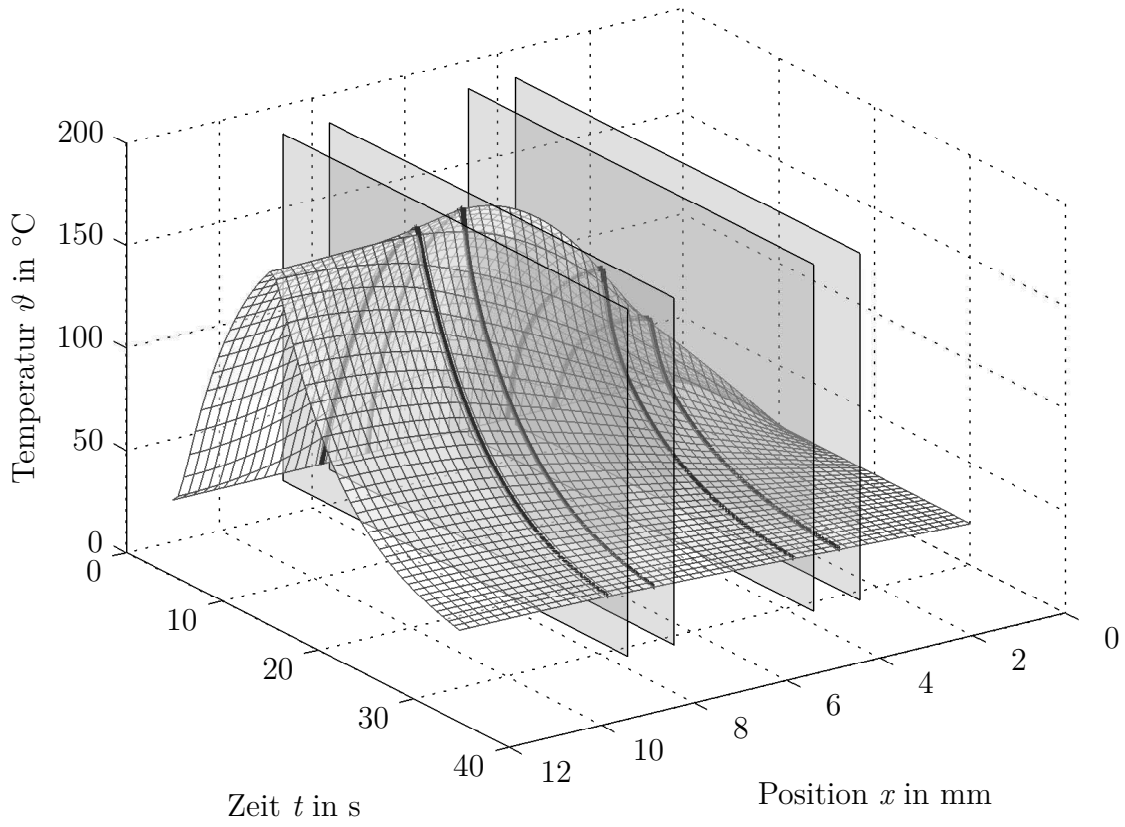

Bild 6.2: Temperaturverlauf in den einzelnen Schichten bei einer spezifischen Heizleistung ($\dot{q}_\mathrm{H}$) von 50 W/cm^2, einer Heizzeit (t_H) von 10 s und einer Dicke des Einsatzes von 3 mm (Schichtaufbau von links nach rechts: Einsatz, obere Isolationsschicht, Heizleiter, untere Isolationsschicht, Kühleinsatz)

Tabelle 6.1: Randbedingungen für die in Bild 6.2 bis Bild 6.4 dargestellten Ergebnisse

Bezeichnung	**Kühlung**	**Isolation**	**Heizleiter**	**Isolation**	**Einsatz**
Material	1.2343	Si_3N_4	Si_3N_4/TiN	Si_3N_4	1.2343
Abmessung x in mm	0 bis 3	3 bis 4	4 bis 7	7 bis 8	> 8
Starttemperatur ϑ_0 in °C	25	25	25	25	25
Temperatur des Kühlmoduls ϑ_K in °C	10	-	-	-	-
Dichte ρ in kg/m^3	7,85	3,4	3,2	3,4	7,85
Wärmeleitfähigkeit λ in W/mK	25,3	20	22	20	25,3
spez. Wärmekapazität c in J/kgK	480	750	700	750	480
spez. Heizleistung $\dot{q}_\mathrm{H}$ in W/cm^2	-	-	40 bis 100	-	-
Heizzeit t_H in s	-	-	1 bis 10	-	-

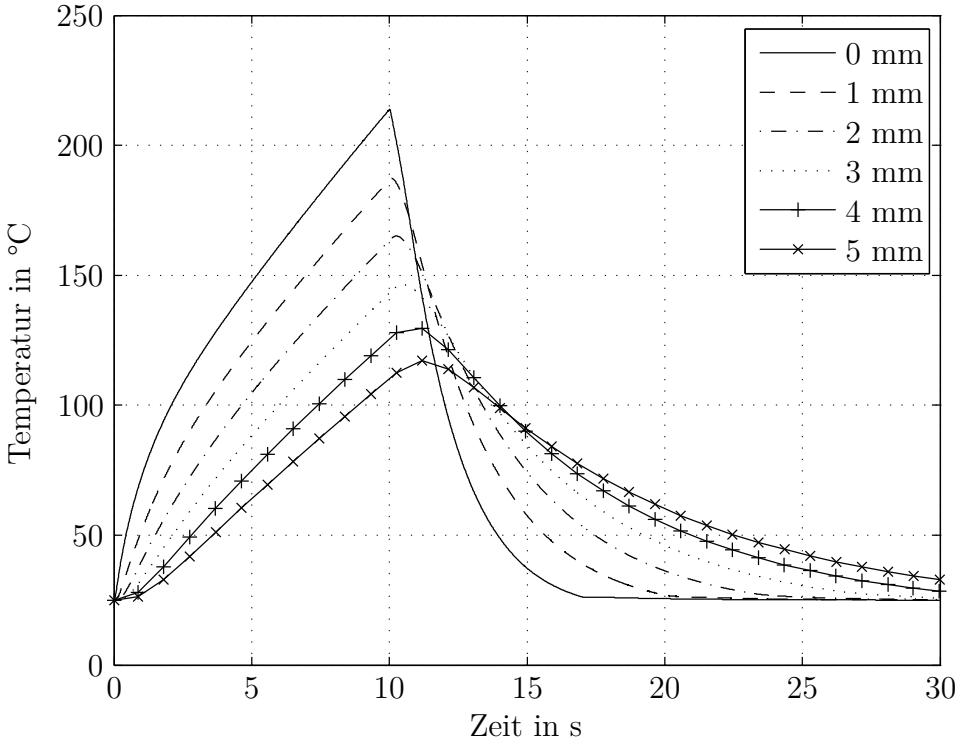

Bild 6.3: Einfluss des Heizelementabstands zur Werkzeugwand auf deren Temperatur (ϑ_W) bei einer spezifischen Heizleistung ($\dot{q}_\mathrm{H}$) von 50 W/cm^2 und einer Heizzeit (t_H) von 10 s für ein Keramikheizelement, aufgebaut aus einzelnen Platten

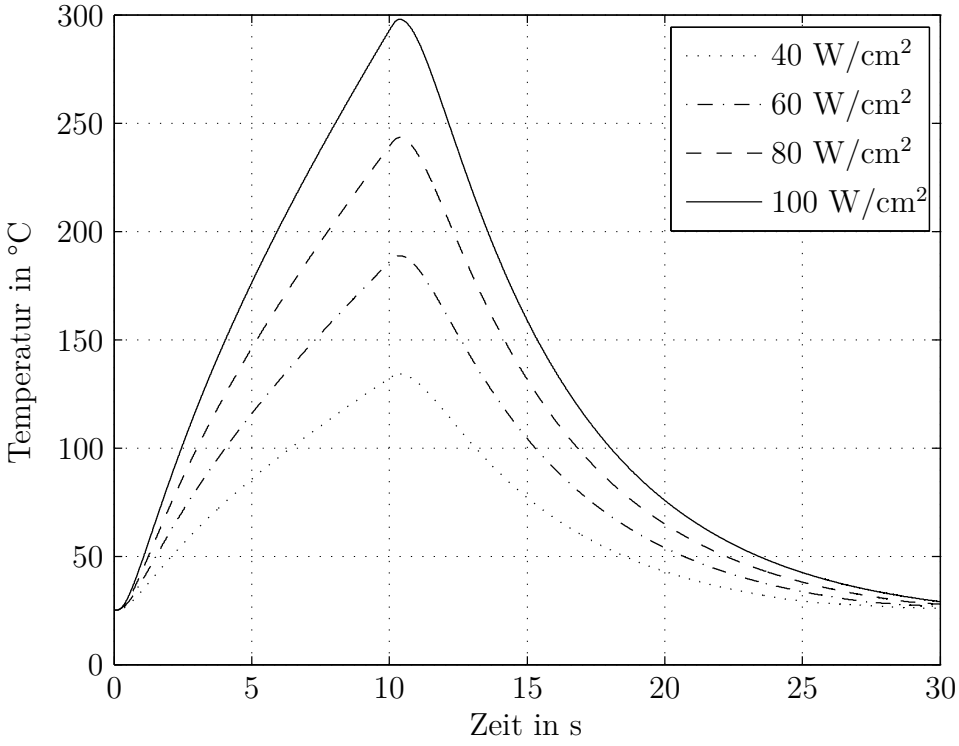

Bild 6.4: Einfluss der spezifischen Heizleistung ($\dot{q}_\mathrm{H}$) auf die Werkzeugwandtemperatur (ϑ_W) bei einer Dicke des Einsatzes von 2 mm und einer Heizzeit (t_H) von 10 s für ein Keramikheizelement, aufgebaut aus einzelnen Platten

In Bild 6.4 ist der Verlauf der Werkzeugwandtemperatur bei einer konstanten Dicke des Werkzeugeinsatzes von 3 mm bei unterschiedlichen spezifischen Heizleistungen dargestellt. Je größer die spezifische Heizleistung ist, desto schneller wird die Werkzeugwand erwärmt, wobei die Abhängigkeit der Werkzeugwandtemperatur von der spezifischen Heizleistung nahezu linear ist.

Bei der Herstellung eines Schichtverbunds mittels heißisostatischem Pressen, kann der Heizleiter auf eine Dicke von 1 mm reduziert werden. Die beiden umliegenden Isolationschichten lassen sich ebenfalls auf eine Dicke von 1 mm abschleifen. Dadurch ergibt sich ein gesamter Heizelementaufbau von 3 mm. Durch die anschließende Herstellung der Heizleitergeometrie kann das Heizelement nicht als Werkzeugwand eingesetzt werden. Das Heizelement ist mit einer Platte, welche die Werkzeugwand definiert, abzudecken. Für die Berechnung der Abkühlung wird hier von einer konstanten Temperatur 3 mm hinter dem Heizelement ausgegangen (Bild 6.5).

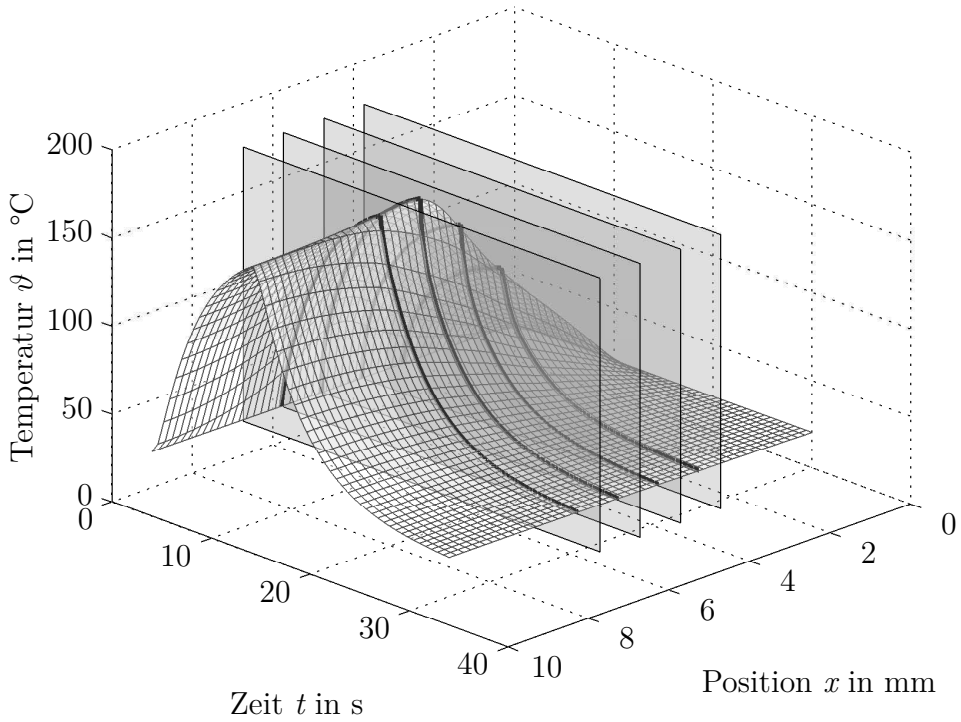

Bild 6.5: Temperaturverlauf in den einzelnen Schichten bei einer spezifischen Heizleistung ($\dot{q}_\mathrm{H}$) von 50 W/cm^2, einer Heizzeit (t_H) von 10 s und einer Dicke des Einsatzes von 3 mm (Schichtaufbau von links nach rechts: Einsatz, obere Isolationsschicht, Heizleiter, untere Isolationsschicht, Kühleinsatz)

Der Abstand vom Kühlmodul zur Werkzeugwand ist geringer, als bei einem Heizelementaufbau aus separaten Platten, wodurch mehr Wärme in der Aufheizphase an das Kühlmodul abgegeben wird. Dies wirkt sich auf die maximal erreichbare Werkzeugwandtemperatur aus. Der Vergleich der Berechnungsergebnisse mit dem Temperaturverlauf in Bild 6.2 lässt erkennen, dass die maximal erreichbare Temperatur beim Schichtverbund geringer ist.

6.2.2 Dickschichtheizelement

Dickschichtheizelemente sind als Schichtverbund aufgebaut, der auf ein Stahlsubstrat aufgetragen wird. Für die Berechnung des Temperaturverlaufs wird angenommen, dass ein Dickschichtheizelement auf einen Kühlblock abgeschieden wird. Die Schichtdicken der Isolationen werden mit 250 µm, die Heizleiterschicht mit 20 µm und die metallische Schutzschicht mit 300 µm gewählt. Für die Abkühlung wird eine konstante Temperatur 3 mm hinter dieser Dickschichtheizung zu Grunde gelegt. Dieses Heizelement kann ebenfalls mit einem Einsatz, der die Werkzeugwand bildet, abgedeckt werden. In Bild 6.6 ist die Erwärmung für eine spezifische Heizleistung von 50 W/cm^2 und einer Dicke des Einsatzes von 3 mm dargestellt. Eine detaillierte Aufstellung der Berechnungsparameter ist in Tabelle 6.2 aufgelistet.

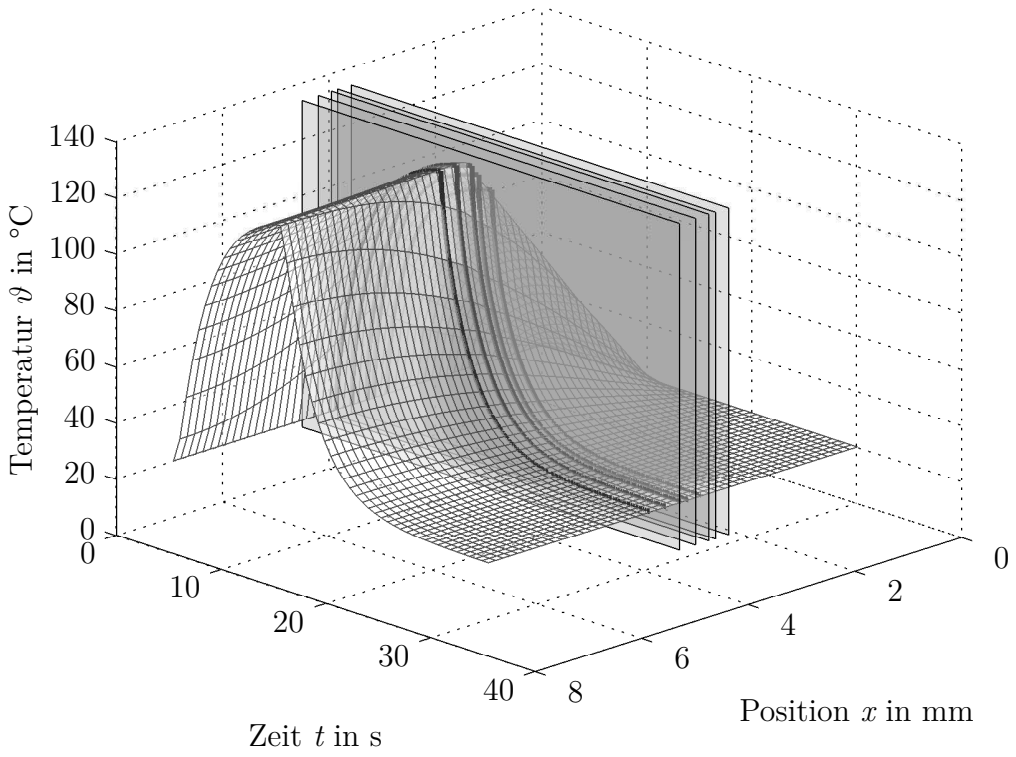

Bild 6.6: Temperaturverlauf in den einzelnen Schichten für ein Dickschichtheizelement bei einer spezifischen Heizleistung ($\dot{q}_\mathrm{H}$) von 50 W/cm^2 und einer Heizzeit (t_H) von 10 s (Schichtaufbau von links nach rechts: Einsatz, Schutzmetallisierung, obere Isolationsschicht, Heizleiter, untere Isolationsschicht, Kühleinsatz)

Zur Ermittlung der Temperaturwechseldynamik wird der Abstand zur Werkzeugwand, sowie die spezifische Heizleistung variiert. Bild 6.7 verdeutlicht den Temperaturverlauf an der Werkzeugwand bei unterschiedlichen Werkzeugeinsatzdicken. Wird kein Werkzeugeinsatz verwendet (0 mm), wird die schnellste Erwärmung der Werkzeugwand erreicht. Es ist zu erkennen, dass mit zunehmender Dicke des Werkzeugeinsatzes die maximale Werkzeugwandtemperatur sinkt und die Zeit zur Abkühlung auf eine niedrigere Werkzeugwandtemperatur steigt.

Tabelle 6.2: Randbedingungen für die in Bild 6.6 bis Bild 6.8 dargestellten Ergebnisse

Bezeichnung	**Kühlung**	**Isolation**	**Heizleiter**	**Isolation**	**Schutz**	**Einsatz**
Material	1.2343	Al_2O_3	NiCr	Al_3O_3	1.4016	1.2343
Position x in mm	0 bis 3	3 bis 3,25	3,25 bis 3,27	3,27 bis 3,52	3,52 bis 3,82	>3,82
Starttemperatur ϑ_0 in °C	20	20	20	20	20	20
Temperatur des Kühlmoduls ϑ_W in °C	25	-	-	-	-	-
Dichte ρ in kg/m^3	7850	3700	8910	3700	7700	7850
Wärmeleitfähigkeit λ in W/mK	25,3	25	15	25	25	25,3
spez. Wärmekapazität c in J/kgK	480	900	440	900	460	480
spez. Heizleistung $\dot{q}_H$ in W/cm^2	-	-	40 bis 100	-	-	-
Heizzeit t_H in s	-	-	1 bis 10	-	-	-

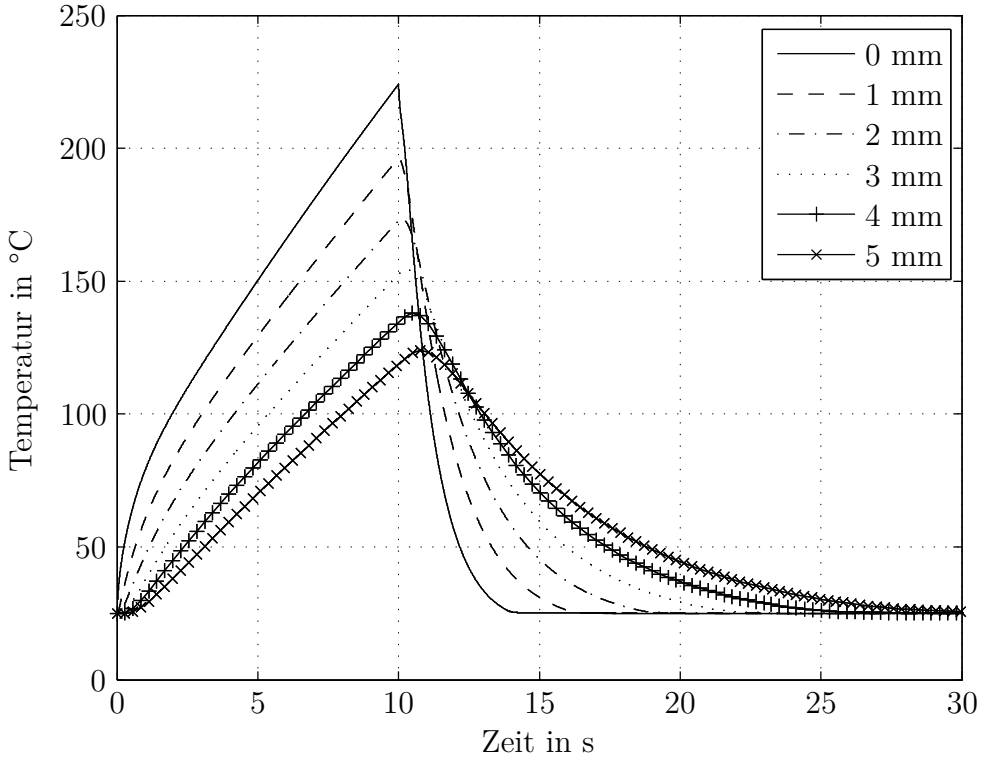

Bild 6.7: Einfluss der Dicke des Werkzeugeinsatzes auf die Werkzeugwandtemperatur (ϑ_W) bei einer spezifischen Heizleistung ($\dot{q}_H$) von 50 W/cm^2 und einer Heizzeit (t_H) von 10 s mit einem Dickschichtheizelement

Zur Verbesserung der Temperaturwechseldynamik kann die spezifische Heizleistung erhöht werden (Bild 6.8). Der Temperaturunterschied zwischen Werkzeugwand und Heizleiter ist in diesem Fall größer, wodurch eine schnellere Erwärmung erreicht wird. Bei der Umsetzung in einem Spritzgießwerkzeug können durch eine derartige Überhitzung des Heizleiters größere Temperaturdifferenzen über der Dicke des darüberliegenden, werkzeugwandbildenden Einsatzes entstehen und zu Verformungen und dadurch partiell ein Abheben vom Heizelement verursachen. Die Temperaturerhöhung des Heizleiters bei einer spezifischen Heizleistung von 50 W/cm^2 gegenüber der Werkzeugwand bei einer Dicke des Einsatzes von 3 mm beträgt beispielsweise 10 K (vgl. Bild 6.6).

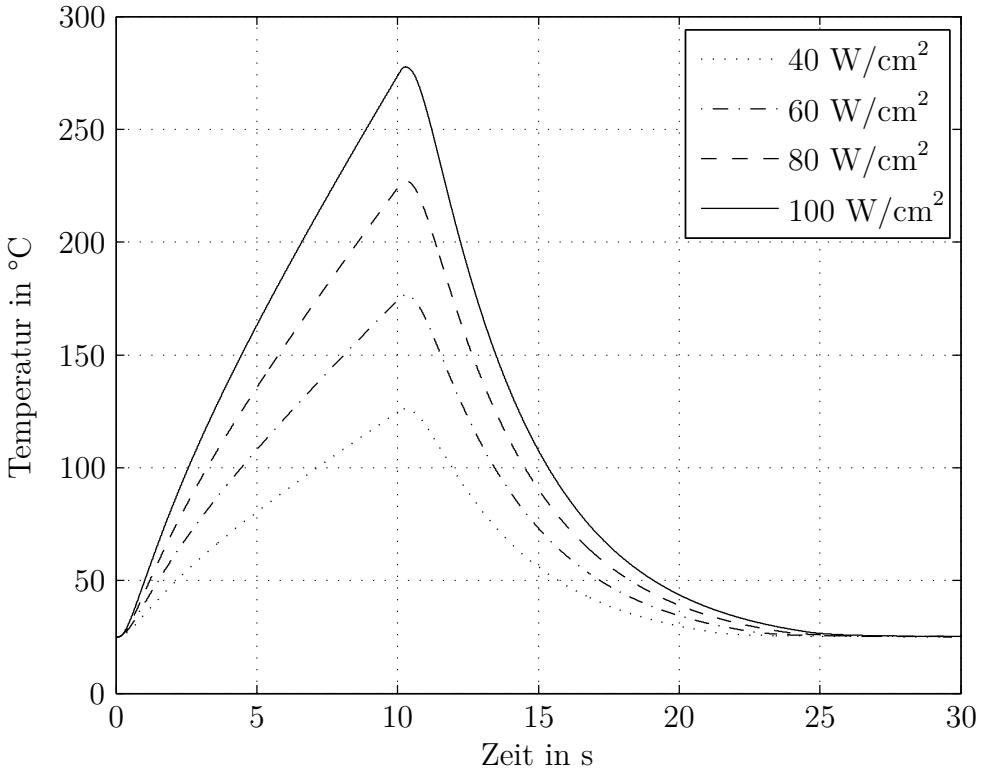

Bild 6.8: Einfluss der spezifischen Heizleistung ($\dot{q}_\mathrm{H}$) auf die Oberflächentemperatur (ϑ_W) bei einem Abstand zur Werkzeugwand von 3 mm und einer Heizzeit (t_H) von 10 s mit einem Dickschichtheizelement

6.3 Numerische Berechnung der Abkühlung von Polymeren

6.3.1 Bestimmung der Randbedingung

Für die Berechnung der Abkühlung eines Polymers unter Spritzgießbedingungen müssen dessen thermische Eigenschaften und die Randbedingungen für eine numerische Berechnung bekannt sein. Während des Einspritzens der heißen Formmasse beginnt deren Abkühlung, wodurch eine sogenannte erstarrte Randschicht entsteht. Die Kühlzeit beim Spritzgießen beginnt nach dem Einspritzen, zum Zeitpunkt der volumetrischen Formfül-

lung. Deshalb wird für die Berechnung bereits dieser erste Kontakt mit der Werkzeugwand berücksichtigt. Unter der Annahme der Kompensation von Temperaturverlusten durch die während der Formfüllung zusätzlich entstandenen Schererwärmung der Schmelze, kann in der Formteilmitte, der sogenannten plastischen Seele, die gemessene Massetemperatur in der Plastifizierdüse zugrunde gelegt werden.
Neben der Bauteilgeometrie, den Stoffdaten und der Massetemperatur ist die Werkzeugwandtemperatur für die Abkühlung des Formteils entscheidend. Diese wird zunächst durch den zusätzlichen Eintrag an Wärmeenergie aus der heißen Formmasse erhöht. In der Formfüll- und Nachdruckphase kann diese Erhöhung der Werkzeugwandtemperatur durch die Annahme eines idealen Kontaktes zwischen der Formmasse und der Werkzeugwand berechnet werden.
Sobald der Siegelzeitpunkt erreicht ist, kann die Formteilschwindung nicht mehr durch den Nachdruck ausgeglichen werden. Aufgrund des entstehenden Spalts zwischen Formteil und Werkzeugwand wird der Kontaktwärmewiderstand größer, die Abkühlung des Formteils dauert länger. Dieser Kontaktwärmewiderstand wird mit einem mathematischen Modell (vgl. [NCB81]), bestimmt aus experimentell ermittelten Werten, empirisch beschrieben.

6.3.2 Ermittlung der Temperaturleitfähigkeit

Unter Verwendung der in Kapitel 6.1.1 hergeleiteten eindimensionalen Wärmeleitungsgleichung wird der Temperaturverlauf in der Formmasse berechnet. Beeinflusst wird die Abkühlung der Formmasse durch die materialspezifischen, temperaturabhängigen Stoffwerte - die Wärmeleitfähigkeit λ, die Dichte ρ und die spezifische Wärmekapazität c - des verarbeiteten Kunststoffes. Diese können zur sogenannten Temperaturleitfähigkeit a zusammengefasst werden.

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \tag{6.13}$$

Die Temperaturleitfähigkeit wird oft mit Hilfe von Standardmessgeräten bestimmt (vgl. [Mon01]). Dabei finden jedoch die spritzgießtechnischen Randbedingungen keine Berücksichtigung. Dazu zählt insbesondere die schnelle Abkühlung unter hohem veränderlichem Druck. Daher ist eine Übertragung der dadurch gewonnenen Messergebnisse in den Spritzgießprozess nur bedingt möglich. Eine direkte Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit aus Spritzgießversuchen kann durch die Auswertung der Gleichung 6.2 erfolgen, wenn keine Wärmequelle in der verarbeiteten Formmasse vorhanden ist.

$$\frac{\lambda}{\rho \cdot c} = \frac{\frac{\partial \vartheta}{\partial t}}{\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2}} \tag{6.14}$$

Damit unter Spritzgießbedingungen die Temperaturleitfähigkeit bestimmt werden kann, muss sowohl der zeitliche als auch der räumliche Temperaturverlauf im Formteil bekannt sein. Dazu werden in die Kavität eines Spritzgießwerkzeugs dünne, sogenannte verlorene Thermoelemente, gespannt (Bild 6.9).

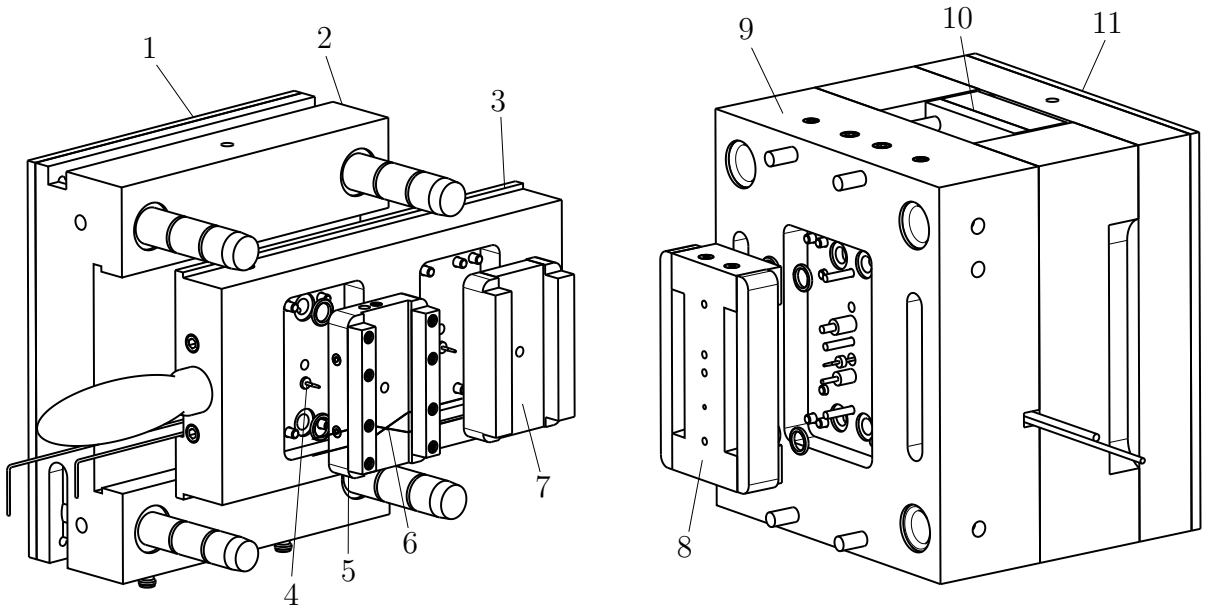

Bild 6.9: Aufbau des Spritzgießwerkzeugs zur Bestimmung von Abkühlkurven im Spritzgießprozess (1: Isolationsplatte DS, 2: Düsenseitige Aufspannplatte, 3: Schieber, 4: Indirekter Temperatursensor der Messkavität, 5: Messkavität, 6: Eingespanntes, verlorenes Thermoelement, 7: Produktionskavität, 8: Formeinsatz AS, 9: Formplatte AS, 10: Auswerferpaket, 11: Isolationsplatten AS)

Diese Thermoelemente werden durch verlöten von zwei Drähten mit unterschiedlichen Segregationskoeffizienten hergestellt. Ein kleiner Lötpunkt gewährleistet eine kleine thermische Masse, wodurch eine kurze Ansprechzeit erreicht wird. Dadurch können schnelle Abkühlvorgänge im Spritzgießprozess erfasst werden. Damit das räumliche Temperaturfeld ermittelt werden kann, sind die Thermoelemente in einem definierten Abstand zur Werkzeugwand in der Kavität zu platzieren. Beim Füllen werden diese in die Formmasse eingespritzt und der Temperaturverlauf gemessen.

Um einen reproduzierbaren Abkühlvorgang ermitteln zu können, muss eine homogene Schmelze vorliegen. Deshalb wird ein Spritzgießwerkzeug (Bild 6.9) mit zwei Kavitäten, einer sogenannten Produktionskavität und einer Messkavität, verwendet. In die Messkavität sind die verlorenen Thermoelemente eingespannt. Zunächst werden mit der Produktionskavität Formteile hergestellt, bis ein quasi-stationärer Fertigungszyklus erreicht ist, da es in der Anfahrphase zu Schwankungen in der Aufbereitung der Formmasse kommt. Danach wird ein Schieber manuell betätigt, der die Messkavität in die Position der Produktionskavität versetzt. Im darauf folgenden Fertigungszyklus werden die Thermoelemente umspritzt und der zeitliche Temperaturverlauf erfasst.

In der Formfüll- und Nachdruckphase können die eingespannten Thermoelemente von der Position abweichen. Deshalb werden die Formteile aufgeschnitten, mit Tellerschleifscheiben abgeschliffen und poliert, damit die Position der Thermoelemente mit einem Auflichtmikroskop nachträglich erfasst werden kann. Dabei konnte festgestellt werden, dass die Abweichungen von der ursprünglichen Einspannposition geringfügig ($< 0{,}01$ mm) sind. Die gemessenen Temperaturwerte können daher für die Berechnung der Temperaturleit-

fähigkeit eingesetzt werden. Dazu wird die diskretisierte Gleichung 6.8 verwendet.

$$a_{\mathrm{Sp}}(\vartheta) = \frac{\vartheta_{k+1,i} - \vartheta_{k,i}}{(2 \cdot \vartheta_{k,i} + \vartheta_{k,i+1} + \vartheta_{k,i-1})} \cdot \frac{\Delta x^2}{\Delta t} \tag{6.15}$$

Mit dieser Gleichung ist die Temperaturleitfähigkeit für amorphe Thermoplaste unter Spritzgießbedingungen zu ermitteln (Bild 6.10). Die Gleichung 6.15 kann allerdings bei teilkristallinen Thermoplasten aufgrund der entstehenden Kristallisationswärme, nicht eingesetzt werden.

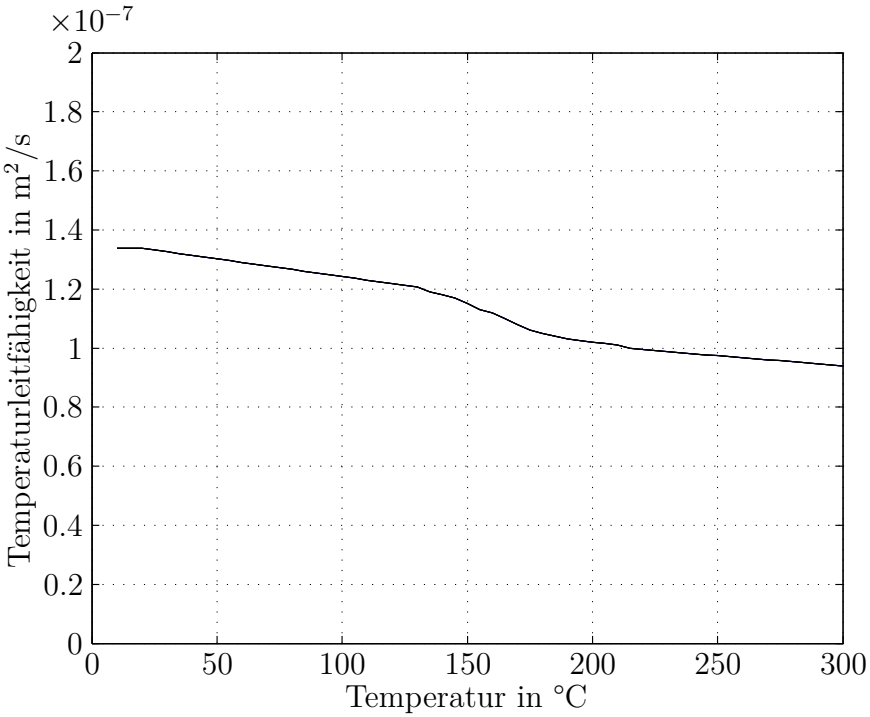

Bild 6.10: Gemessene Temperaturleitfähigkeit (a_{Sp}) für ein Polycarbonat (Bayer Makrolon 8035)

6.3.3 Kristallisation bei teilkristallinen Thermoplasten

Bei der Kristallisation entstehen in der Formmasse orientierte Bereiche durch eine Neuordnung der Molekülketten. Für die Ermittlung der temperaturabhängigen Stoffwerte für teilkristalline Thermoplaste sind daher die Kristallisationswärme und die daraus resultierende Änderung der Temperaturleitfähigkeit zu berücksichtigen. Folgende Effekte sind bei der Kristallisation zu beobachten:

- Die Anzahl an Molekülen beziehungsweise Atome pro Volumen steigt, die Dichte nimmt zu.
- Die Bewegungsmöglichkeiten der Moleküle nehmen ab, dadurch sinkt die Wärmekapazität.
- Der Wärmetransport und dadurch die Wärmeleitfähigkeit nimmt zu, da die Atome die Wärmebewegung durch den geringeren Abstand zueinander schneller abgeben.

Die Temperaturleitfähigkeit ist somit vom Kristallisationsgrad der Formmasse und von der Temperatur abhängig. Zur Beschreibung der Kristallisation müssen deshalb zunächst diese Abhängigkeiten der Temperaturleitfähigkeit der verarbeiteten Formmasse ermittelt werden. Bekannt ist, dass die Ausbildung eines Kristallisationsgefüges bei einer schnellen Abkühlung unterdrückt wird (vgl. [Men01, RHB06]). Diese Bedingung kann im Randbereich, eines im Spritzgießprozess hergestellten Formteils, bei einer entsprechend kalten Werkzeugwand erfüllt werden. Im Bauteilkern ist, abhängig von der Formteildicke, die Abkühlrate niedriger, was zu einem hohen Kristallisationsgrad führt.
Bei einem linearen Zusammenhang zwischen Kristallisationsgrad und Zunahme der Temperaturleitfähigkeit kann folgende Gleichung aufgestellt werden:

$$a_{\mathrm{ges}}(\vartheta, X) = a_{\mathrm{a}}(\vartheta) \cdot (1 - X) + a_{\mathrm{k}}(\vartheta) \cdot X \tag{6.16}$$

Diese Gleichung beschreibt, dass beim Kristallisationsvorgang die Änderung der Gefügestruktur direkt mit der Änderung der Temperaturleitfähigkeit zusammenhängt. Dabei kann die Temperaturleitfähigkeit $a_a(\vartheta)$ im amorphen Zustand direkt aus Messwerten gemäß der Gleichung 6.15 für ein im Randbereich schnell abkühlendes Polymer bestimmt werden (Bild 6.11).

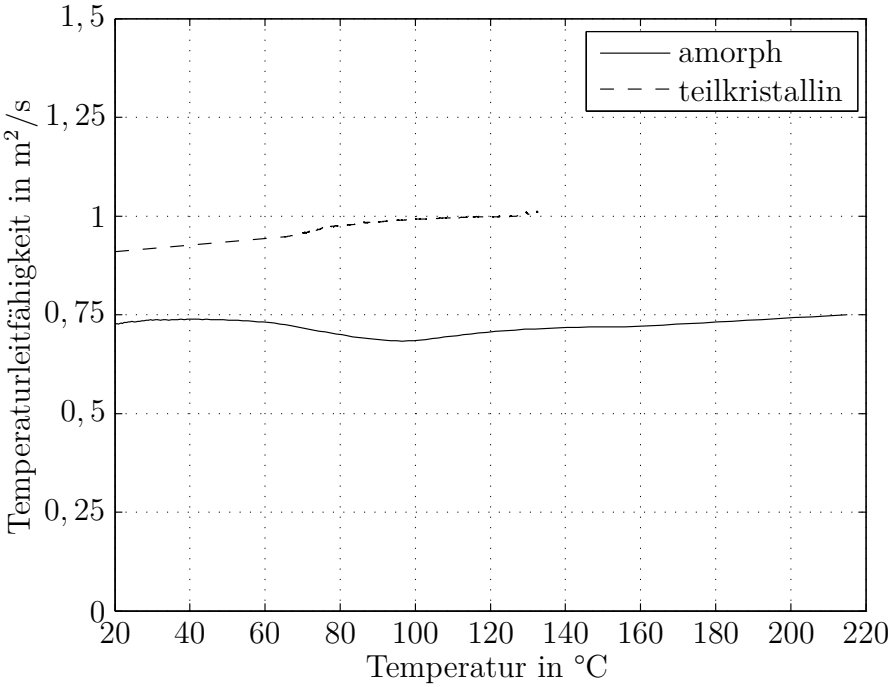

Bild 6.11: Gemessene Temperaturleitfähigkeiten (a_{Sp}) für ein Polypropylen (BASF Novolen 1100L), bei schneller Abkühlung (amorph) und unter Erwärmung (teilkristallin)

Für die Ermittlung der Temperaturleitfähigkeit im kristallinen Zustand wird ein Formteil mit einem hohen Kristallisationsgrad durch langsames Abkühlen hergestellt. Bei einer erneuten Erwärmung des hergestellten Formteils kann die temperaturabhängige Tempe-

raturleitfähigkeit für einen teilkristallinen Zustand ermittelt werden. Anschließend wird beispielsweise mit einer DSC-Messung und mit Referenzwerten der erreichte Kristallisationsgrad bestimmt.

Unter Verwendung der Gleichung 6.16 wird die Temperaturleitfähigkeit $a_{\mathrm{k}}(\vartheta)$ im kristallinen Zustand in Abhängigkeit der Temperatur und unter der Annahme, dass keine Kristallisationsvorgänge mehr stattfinden, berechnet. In Bild 6.11 ist der Verlauf der Temperaturleitfähigkeit im amorphen und kristallinen Zustand für ein Polypropylen (BASF Novolen 1100L) dargestellt. Dadurch wird die Temperaturleitfähigkeit unter Ausschluss der Kristallisationswärme beschreiben.

Für die Berechnung des Abkühlprozesses muss die Kristallisation als Wärmequelle abgebildet werden. Damit muss ein Zusammenhang zwischen dem während des Kristallisationsprozesses frei werdenden Wärmestrom ($\dot{q}_{\mathrm{K}}(t)$), der gesamten umgesetzten Wärmemenge (q_{ges}) und dem zeitlichen Verlauf des Kristallisationsgrades gegeben sein:

$$X(t) \approx \frac{1}{q_{\mathrm{ges}}} \int_0^t \dot{q}_{\mathrm{K}}(t)\,\mathrm{d}t \tag{6.17}$$

Die Gleichung 6.17 beschreibt eine direkte Proportionalität zwischen dem frei werdenden Wärmestrom und dem Kristallisationsgrad. Während des Abkühlprozesses entstehen in teilkristallinen Thermoplasten Überstrukturen aus der Schmelze. Anfänglich entstehen einzelne Keime, die abhängig von der Temperatur und dem Kristallisationsgrad anwachsen. Treffen die Keime durch das Anwachsen aufeinander, wird der Kristallisationsprozess dadurch abgeschlossen (vgl. [Mon01, Die81]). Für die mathematische Beschreibung der Kristallisationsrate $\dot{X}(X,T)$ wird ein zusammengesetzter Ansatz aus einem temperaturabhängigen Faktor sowie einem kristallisationsabhängigen Faktor verfolgt.

$$\dot{X}(X,T) = \dot{X}_{\max} \cdot \Phi(X) \cdot \Psi(\vartheta) = \frac{\mathrm{d}X}{\mathrm{d}t} \tag{6.18}$$

Für die Berechnung der Kristallisation wurden die Temperatur als prozesstechnische Größe und der entstehende Kristallisationsgrad verwendet. Spezielle Phänomene, wie Transkristallisation oder anisotropes Wachstum der Überstrukturen werden nicht berücksichtigt, sofern kein Einfluss auf die beiden temperatur- und kristallisationsabhängigen Faktoren besteht.

Die temperaturabhängige Kristallitbildungsrate beschreibt die zufällige Bildung von Kristallen und das daraus entstehende Wachstum. Das Anwachsen dieser Kristalle beschleunigt die Neuordnung der erstarrenden Molekülketten, bis eine gegenseitige Annäherung der sphärischen Überstrukturen stattfindet. Dadurch wird die Bildung von Kristallen verlangsamt und ein maximaler Kristallisationsgrad erreicht.

Zur Ermittlung der temperatur- und kristallisationsabhängigen Kurve wird eine inverse Parameteridentifikation verwendet. Dazu werden die beiden Kurven (temperatur- und kristallisationsabhängiger Faktor) und die maximale Kristallisationsrate ($\dot{X}_{\max}$) anhand

von Messungen iterativ berechnet. Für die Berechnung der Abkühlung eines teilkristallinen Thermoplastes wird die diskretisierte Wärmeleitungsgleichung (Gleichung 6.11) eingesetzt. Dabei wird die Kristallisation als Wärmequelle durch die Kristallisationsrate $\dot{X}(X, \vartheta)$ und die spezifische Kristallisationswärme (Δh) für das vollständig kristallisierte Polymer beschrieben.

$$\dot{q}_{k,i} = \Delta h \cdot \rho \cdot \dot{X}(X_{k,i}, \vartheta_{k,i}) \tag{6.19}$$

Die iterative Berechnung der Kristallisationsrate $\dot{X}(X, \vartheta)$ wurde anhand gemessener Abkühlkurven bei einer Formteildicke von 2,4 mm und einer Werkzeugwandtemperatur von 0 °C durchgeführt. Exemplarisch sind in Bild 6.12 die Mess- und Berechnungskurven für zwei unterschiedliche Positionen dargestellt.

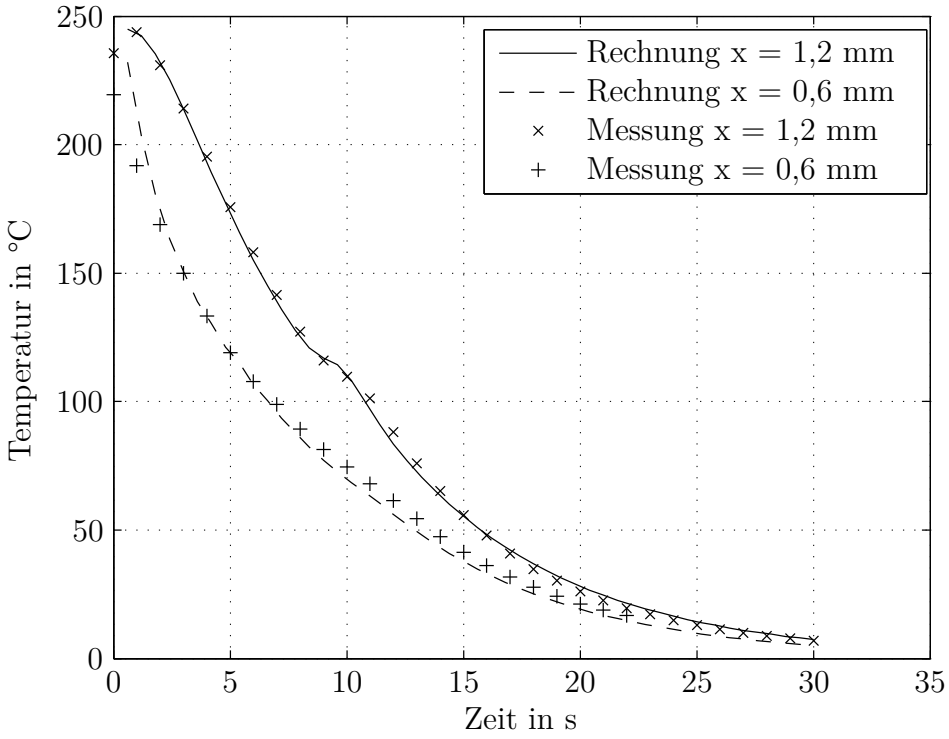

Bild 6.12: Berechneter und gemessener Temperaturverlauf bei einem 2,4 mm dicken Formteil und einer Werkzeugwandtemperatur von 0 °C für ein PP (BASF Novolen 1100L)

Die dabei entstandenen Kurven für die kristallisations- und temperaturabhängige Kristallisationsrate sind in Bild 6.13 und Bild 6.14 dargestellt. Die maximale Kristallisationsrate $X_{\max}$ wurde durch die inverse Parameteridentifikation mit 0,06 1/s bestimmt. Zur Überprüfung und Verifikation der ermittelten Kurven für die kristallisations- und temperaturabhängigen Kristallisationsrate werden Berechnungen unter veränderten Prozessbedingungen durchgeführt. Hierfür werden weitere Abkühlkurven unter Spritzgießbedingungen gemessen. Dabei divergieren die Formteildicke und die Werkzeugwandtemperatur. Diese variierten Randbedingungen werden als Vorgabe für die Berechnung verwendet und anschließend mit den gemessenen Abkühlkurven verglichen.

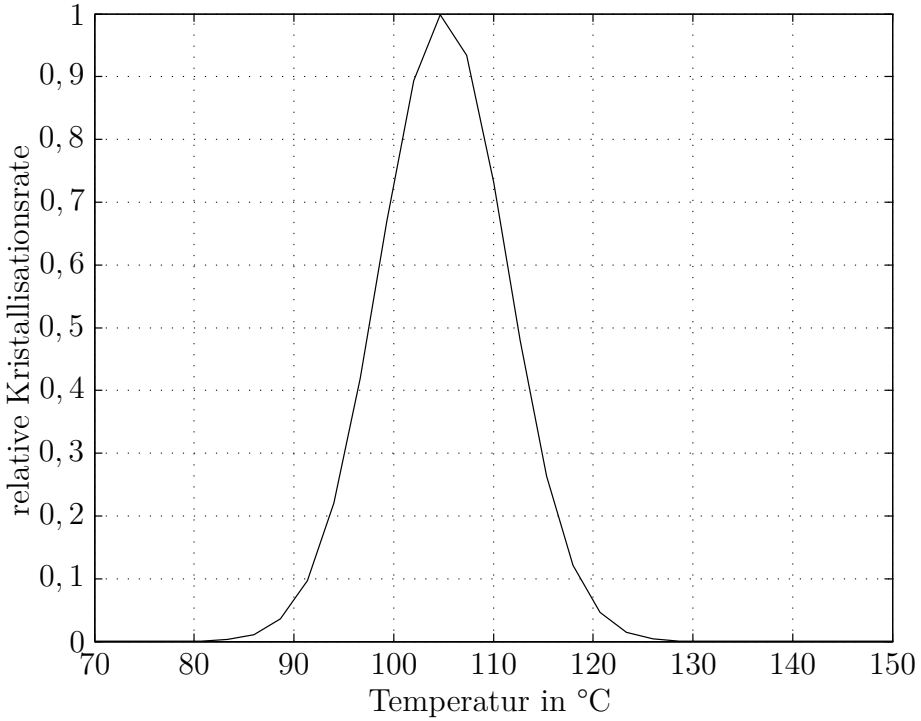

Bild 6.13: Iterativ ermittelte, temperaturabhängige Kristallisationsrate (Ψ) für ein Polypropylen (BASF Novolen 1100L)

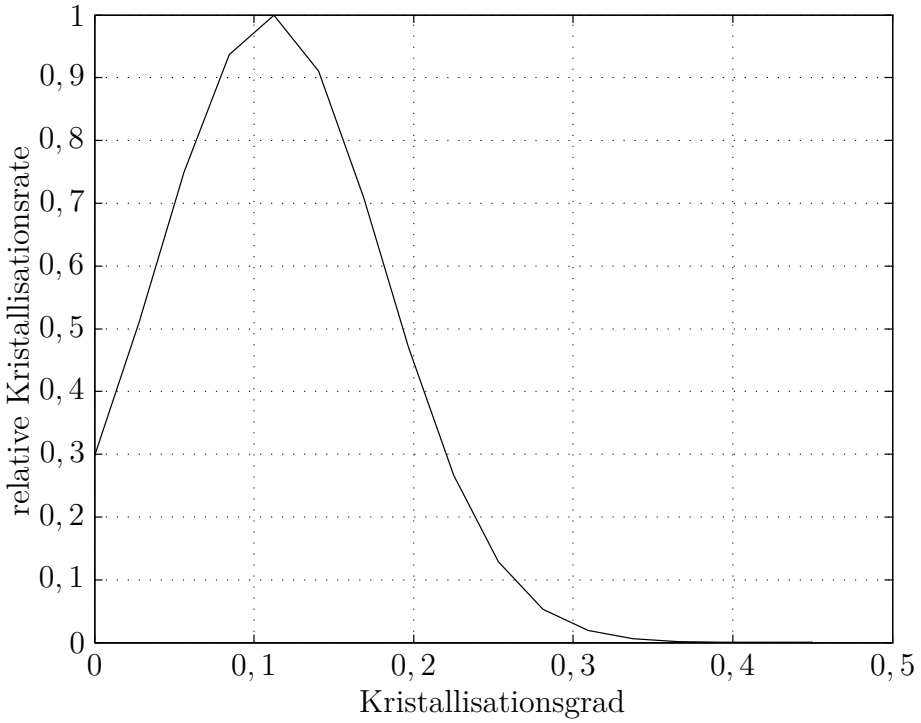

Bild 6.14: Iterative ermittelte, kristallisationsabhängige Kristallisationsrate (Φ) für ein Polypropylen (BASF Novolen 1100L)

In einer ersten Messung wird ein Formteil mit einer Dicke von 5 mm bei einer Werkzeugwandtemperatur von 30 °C hergestellt. Die Massetemperatur ist auf 245 °C eingestellt. In Bild 6.15 sind die Ergebnisse der Messung und der Berechnung ersichtlich. Hervorzuheben ist der geringe Temperaturunterschied zwischen beiden Kurven von unter 3 K.

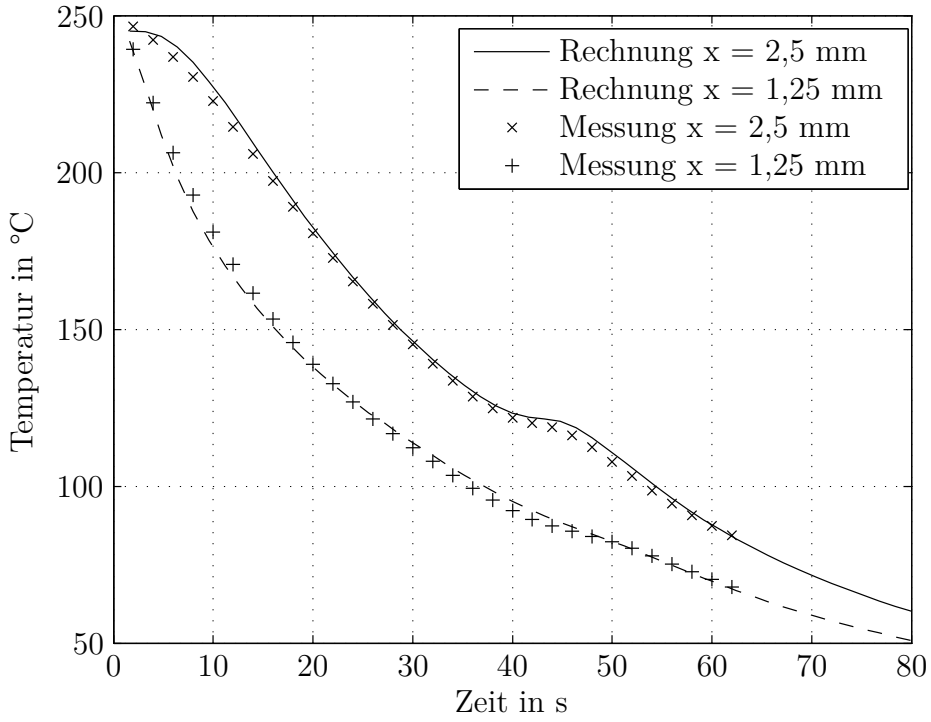

Bild 6.15: Verifikation des aufgestellten Modells für ein 5 mm dickes Formteil aus Polypropylen (BASF Novolen 1100L) bei einer Werkzeugwandtemperatur (ϑ_W) von 30 °C und einer Massetemperatur von 245 °C

Zur weiteren Verifikation des Kristallisationsmodells wird die Werkzeugwandtemperatur über den Spritzgießzyklus variiert. Zur Bestimmung des Temperaturverlaufs erlaubt das eingesetzte Spritzgießwerkzeug eine variotherme Temperierung durch konturnahe Temperierkanäle mit einem wasserbasierten Temperaturwechselsystem. Für den variothermen Spritzgießprozess wird zum Heizen eine Vorlauftemperatur von 120 °C gewählt. Dadurch wird nach 30 s Heizzeit eine Werkzeugwandtemperatur von 100 °C erreicht. Sobald die Werkzeugkavität gefüllt ist, wird auf den Kaltwasserkreis mit 20 °C temperiertem Wasser umgeschaltet. Der gemessene und berechnete Temperaturverlauf ist in Bild 6.16 dargestellt. Als Randbedingung für die Berechnung wurden die gemessenen Temperaturwerte der beiden Mantelthermoelemente verwendet die auf jeder Hälfte des Spritzgießwerkzeugs 1,2 mm hinter der Werkzeugwand verbaut sind.

In den beiden durchgeführten Versuchen - variotherme und isotherme Temperierung - wurden geringe Abweichungen zwischen Mess- und Berechnungswert nachgewiesen. Daher kann das aufgestellte Modell für weitere Abkühlberechnungen mit den konzipierten variothermen Temperaturwechselsystemen zur Ermittlung der Zykluszeit eingesetzt werden.

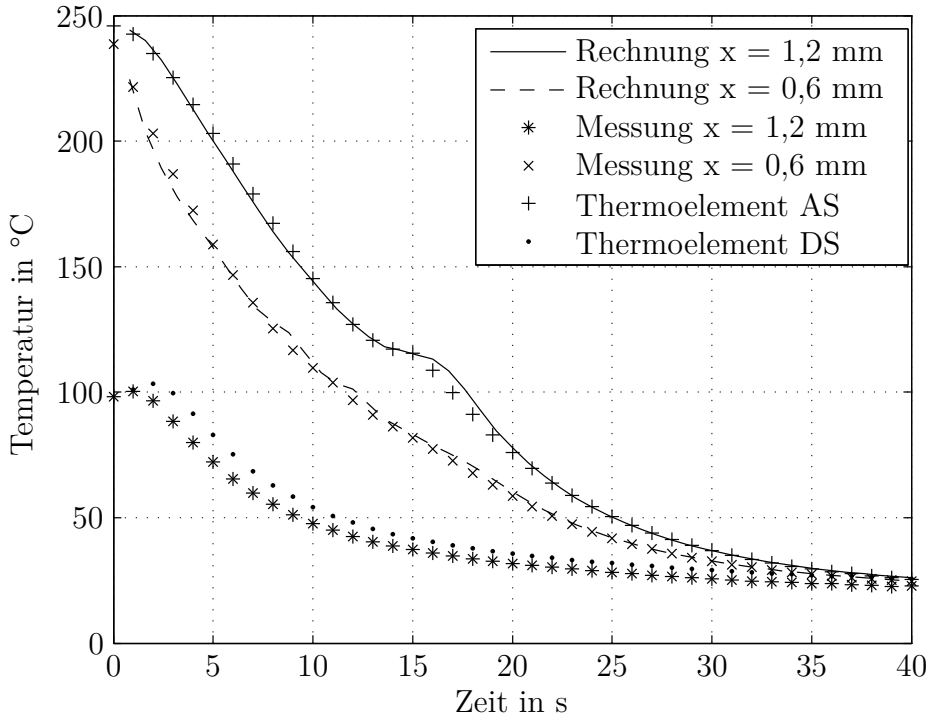

Bild 6.16: Verifikation des aufgestellten Modells für ein 2,4 mm dickes Formteil aus Polypropylen (BASF Novolen 1100L) bei einem variothermen Temperatursprung 100 °C auf 25 °C

6.4 Variotherme Abkühlung thermoplastischer Polymere für die konzipierten Temperaturwechselsysteme

Anhand der ermittelten, materialspezifischen Stoffwerte für amorphe und teilkristalline, thermoplastische Polymere kann deren Abkühlungsverhalten unter spritzgießprozessnahen Bedingungen charakterisiert werden. Das Abkühlverhalten ist dabei zusätzlich vom konstruktiven Einbau des Widerstandsheizelementes, den thermischen Randbedingungen, wie der Massetemperatur oder der Temperatur des Kühlmoduls abhängig.
Entscheidend für den Fertigungszyklus ist der Zeitpunkt, zu dem das Werkzeug geöffnet und das Bauteil entformt werden kann. Die Entformungstemperatur ist vom verarbeiteten Material (siehe Tabelle 6.3) abhängig und für eine formstabile Entnahme - kein Auswerferabdruck und geringer Verzug - des hergestellten Bauteils notwendig (vgl. [BMH02, Bur94]).
Unter Berücksichtigung der Aufheizzeit kann eine minimale Zykluszeit, abhängig vom eingesetzten variothermen Temperiersystem, berechnet werden. Eine Verlängerung der Zykluszeit kann durch weitere ablaufende Prozesse (Werkzeugöffnung, Bauteilentnahme, Einlegezeit, Werkzeugschließung) trotz allem entstehen, da deren Dauer die Aufheizzeit überschreiten kann. Diese Prozesse sind abhängig von der eingesetzten Spritzgießmaschine, dem Werkzeug und von Entnahme- oder Einlegesystemen und werden deshalb in der folgenden Zykluszeitberechnung nicht berücksichtigt.

Tabelle 6.3: Stoffdaten für zwei ausgewählte, thermoplastische Polymere (Polypropylen (BASF Novolen 1100L) und Polycarbonat (Bayer Makrolon 8035))

Bezeichnung	**Polypropylen (BASF Novolen 1100L)**	**Polycarbonat (Bayer Makrolon 8035)**
Massetemperatur ϑ_M in °C	245	300
Entformungstemperatur ϑ_E in °C	93	136
Dichte ρ in kg/m^2	910 (bei 20 °C)	1200 (bei 20 °C)
Wärmeleitfähigkeit λ in W/mK	0.22 (bei 20 °C)	0.21 (bei 20 °C)
spez. Wärmekapazität c in J/kgK	1700 (bei 20 °C)	1170 (bei 20 °C)
Temperaturleitfähigkeit a_{Sp} in m^2/s	siehe Bild 6.11	siehe Bild 6.10
max. Kristallisationsrate $\dot{X}_{max}$ in 1/s	0,06	-
temperaturabhängige Kristallisation	siehe Bild 6.13	-
kristallisationsabhängige Kristallisation	siehe Bild 6.14	-

6.4.1 Zykluszeiten unter Variation der Temperatur im Kühlmodul

Für einen kontinuierlichen, variothermen Spritzgießprozess sind die obere und untere Werkzeugwandtemperatur jeweils auf ein bestimmtes Temperaturniveau zu regeln. Die obere Werkzeugwandtemperatur ist dabei von der gewünschten Anwendung abhängig. Für die Abformung von nanostrukturierten Oberflächen im Spritzgießprozess muss die Werkzeugwandtemperatur zum Zeitpunkt der Formfüllung bei den amorphen Thermoplasten über der Glastemperatur und bei den teilkristallinen beispielsweise über der Kristallisationstemperatur liegen. Anhand dieser Spezifikation wird die Zykluszeit exemplarisch für ein Polypropylen und ein Polycarbonat unter Variation der Temperatur des Kühlmoduls für einen bestimmten variothermen Temperatursprung berechnet.

Für ein Polypropylen (BASF Novolen 1100L) wird ein Temperatursprung an der Werkzeugwand von 50 °C auf 120 °C vorgegeben. Zum Aufheizen wird eine entwickelte Keramikheizung eingesetzt, die aus einzelnen Schichten aufgebaut ist und deren Isolation direkt die Werkzeugwand bildet. Die für die Berechnung verwendeten Werte sind in der Tabelle 6.1 und der Tabelle 6.3 zusammengefasst. Dabei wird über den gesamten Zyklus eine konstante Temperatur (als Kühlung) 3 mm hinter der Heizung angenommen. Bild 6.17 verdeutlicht die Abhängigkeit der Zykluszeit von der Kühltemperatur für unterschiedliche Bauteildicken. Die eingezeichnete gestrichelte Linie beschreibt die minimalen Zykluszeiten bei den einzelnen Bauteildicken.

Ersichtlich ist der geringe Einfluss der Temperatur des Kühlmoduls auf die Zykluszeit. Die ständige Kühlung beeinflusst die Heizzeit auf das angestrebte Temperaturniveau und die anschließende Abkühlung auf ein unteres Temperaturniveau. Während der Abkühlung der thermoplastischen Formmasse wird das untere Temperaturniveau erreicht. Diese Temperatur ist durch eine Regelung nahezu konstant, bis die Entformungstemperatur im Formteil erreicht wird.

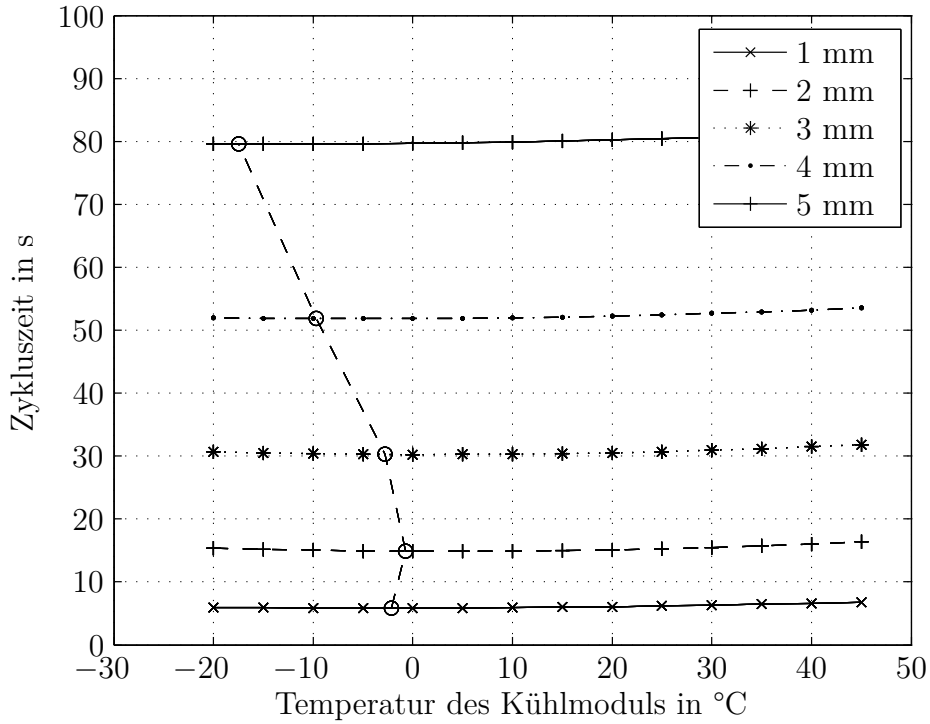

Bild 6.17: Einfluss der Temperatur des Kühlmoduls (ϑ_K) und der Bauteildicke (d_B) auf die Zykluszeit (t_Z) bei einem Temperatursprung von 50 °C auf 120 °C unter Verwendung eines keramischen Heizelementes für das Polypropylen (BASF Novolen 1100L) mit einer Massetemperatur (ϑ_M) von 245 °C

Je niedriger die Temperatur des Kühlmoduls ist, desto länger ist die Heizzeit zum Erreichen des oberen Temperaturniveaus. Dagegen wird die Zeit, bis das untere Temperaturniveau erreicht wird, abhängig von der Bauteildicke kleiner. Daher sinkt die Kühltemperatur für eine minimale Zykluszeit mit zunehmender Bauteildicke. Eine Ausnahme ist die berechnete Kurve für eine Bauteildicke von 1 mm. Die Temperatur des Kühlmoduls für die minimale Zykluszeit ist geringer, verglichen mit einem 2 mm dicken Bauteil. Bei einer Bauteildicke von 1 mm wird, durch die schnelle Abkühlung des Polypropylens, weniger Kristallisationswärme frei.

Thermoplastische Polymere, die bei einem höheren Temperaturniveau (Massetemperatur und Entformungstemperatur) verarbeitet werden, benötigen zur Gewährleistung einer hohen Abformgenauigkeit einen auf das Temperaturniveau angepassten variothermen Temperatursprung. Für die Abformung von nanostrukturierten Oberflächen im Spritzgießprozess ist zum Beispiel bei der Polycarbonatverarbeitung eine obere Werkzeugwandtemperatur von 140 °C erforderlich. Als untere Werkzeugwandtemperatur wird zunächst für die Berechnung 70 °C gewählt. Die berechneten Zykluszeiten für unterschiedliche Bauteildicken in Abhängigkeit der Kühltemperatur sind in Bild 6.18 graphisch dargestellt. Für eine Formteildicke von 1 mm, verglichen mit 2 mm, wird eine höhere Temperatur im Kühlmodul für eine minimale Zykluszeit berechnet. Bei dieser Formteildicke wird die Entformungstemperatur eher erreicht als das untere Temperaturniveau.

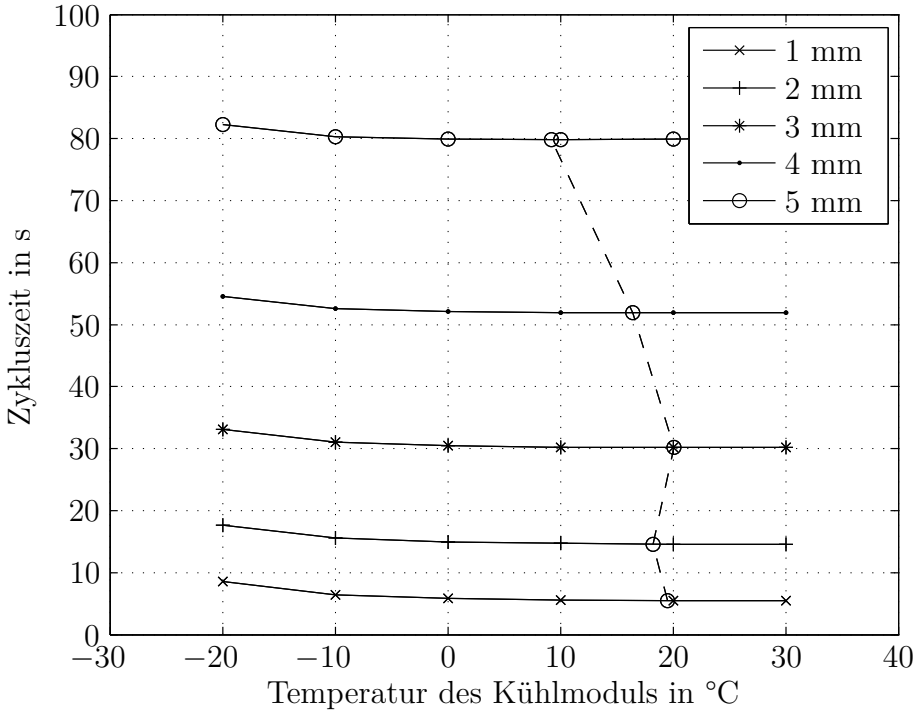

Bild 6.18: Einfluss der Temperatur des Kühlmoduls (ϑ_K) und der Bauteildicke (d_B) auf die Zykluszeit (t_Z) bei einem Temperatursprung von 70 °C auf 140 °C unter Verwendung eines keramischen Heizelementes für das Polycarbonat (Bayer Makrolon 8035) mit einer Massetemperatur (ϑ_M) von 300 °C

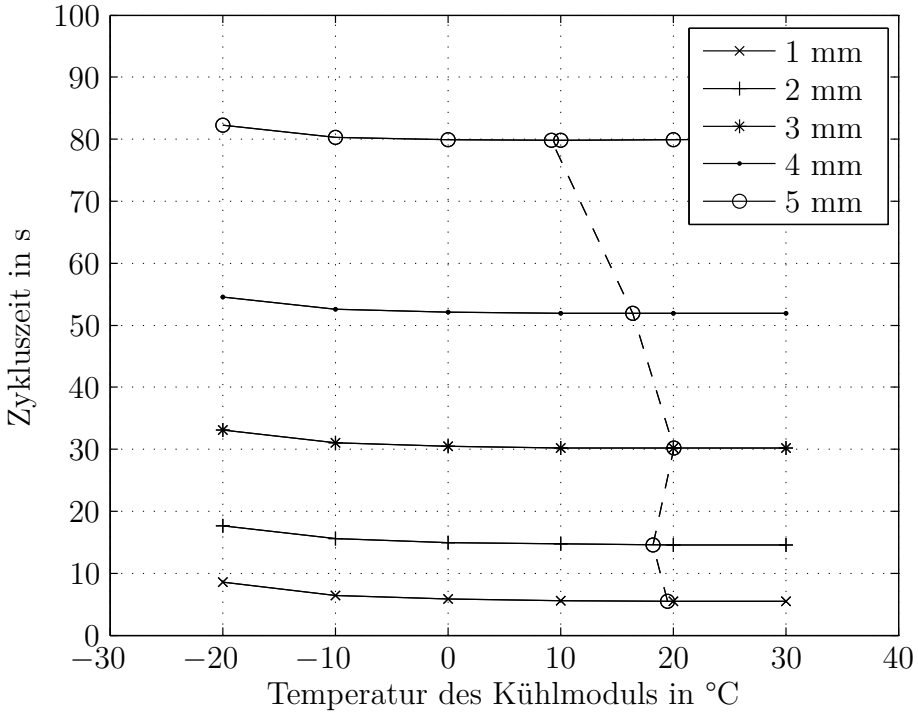

Bild 6.19: Einfluss der Temperatur des Kühlmoduls (ϑ_K) und der Bauteildicke (d_B) auf die Zykluszeit (t_Z) bei einem Temperatursprung von 50 °C auf 120 °C mit einem Dickschichtheizelement auf der Werkzeugwand für das Polypropylen (BASF Novolen 1100L) mit einer Massetemperatur (ϑ_M) von 245 °C

Zum Vergleich mit einem variothermen Temperiersystems auf Basis einer Keramik wird die Zykluszeit für ein Dickschichtheizelement berechnet, welches direkt auf die Werkzeugwand aufgetragen ist (Bild 6.19). Der Abstand der Kühlung zum Heizelement ist konstant bei 3 mm. Weitere konstruktive und stoffliche Parameter für die Berechnungen sind den Tabellen 6.2 und 6.3 zu entnehmen.

Die Abhängigkeit der Zykluszeit von der Temperatur des Kühlmoduls ist bei einem Dickschichtheizelement gering. Durch den kompakten Aufbau (geringer Abstand des Heizelementes zur Werkzeugwand) und die Distanz von 3 mm zwischen Kühlung und Dickschichtheizelement, wird eine optimale Temperatur im Kühlmodul, abhängig von der Bauteildicke, bei Temperaturen von $\vartheta_K = 20\,°C$ erreicht.

In Tabelle 6.4 ist die berechnete Kühlzeit für eine isotherme Verarbeitung angegeben. Für die Berechnung der Zykluszeit des Polypropylens wurde eine Massetemperatur von 245 °C und eine Werkzeugwandtemperatur von 30 °C (Werkzeugwandtemperatur laut Datenblatt) und von 50 °C angenommen. Beim Polycarbonat sind die Berechnungen mit einer Massetemperatur von 300 °C und einer Werkzeugwandtemperatur von 65 °C und 85 °C (Werkzeugwandtemperatur laut Datenblatt) durchgeführt worden. Aus dem Vergleich der Berechnungsergebnisse folgt, dass bei der Verarbeitung des Polypropylens die isotherme Kühlzeit kürzer ist, als bei einer variothermen Verarbeitung. Dagegen ist die variotherme Kühlzeit eines Polycarbonats bei dickwandigen Bauteilen ($\vartheta_W = 85\,°C$) geringer.

Tabelle 6.4: Berechnete, isotherme Zykluszeiten für ein Polycarbonat (Bayer Makrolon 8035) und Polypropylen (BASF Novolen 1100L) jeweils bei zwei unterschiedlichen Werkzeugwandtemperaturen

d_B in mm	**Polypropylen (Novolen 1100L)**		**Polycarbonat (Makrolon 8035)**	
	t_K in s bei $\vartheta_W = 30\,°C$	t_K in s bei $\vartheta_W = 50\,°C$	t_K in s bei $\vartheta_W = 65\,°C$	t_K in s bei $\vartheta_W = 85\,°C$
1	2,25	2,77	1,31	1,61
2	9,20	11,43	5,44	6,58
3	20,25	25,05	12,48	14,93
4	36,12	44,33	22,55	26,54
5	56,10	69,82	35,44	41,40

6.4.2 Einfluss des Temperatursprungs auf die Zykluszeit

Die Variation der unteren Werkzeugwandtemperatur beeinflusst sowohl die Heiz- als auch die Kühlzeit und dadurch die Dauer eines Fertigungszyklus. Für das Polypropylens (Tabelle 6.3) sind berechnete Zykluszeiten für unterschiedliche Temperatursprünge bei einer gleichbleibenden, oberen Werkzeugwandtemperatur von 120 °C und einer Kühltemperatur von 20 °C für den Anwendungsfall eines keramischen Heizelementes in Bild 6.20 dargestellt. Als Temperaturwechselsystem wird eine Keramikheizung eingesetzt, die aus einzelnen Schichten aufgebaut ist und deren Isolation direkt die Werkzeugwand bildet. Die

wesentlichen Daten für die Berechnung sind in der Tabelle 6.1 und der Tabelle 6.3 angegeben. Dabei wurde über den gesamten Zyklus eine konstante Temperatur (als Kühlung) 3 mm hinter der Heizung angenommen.

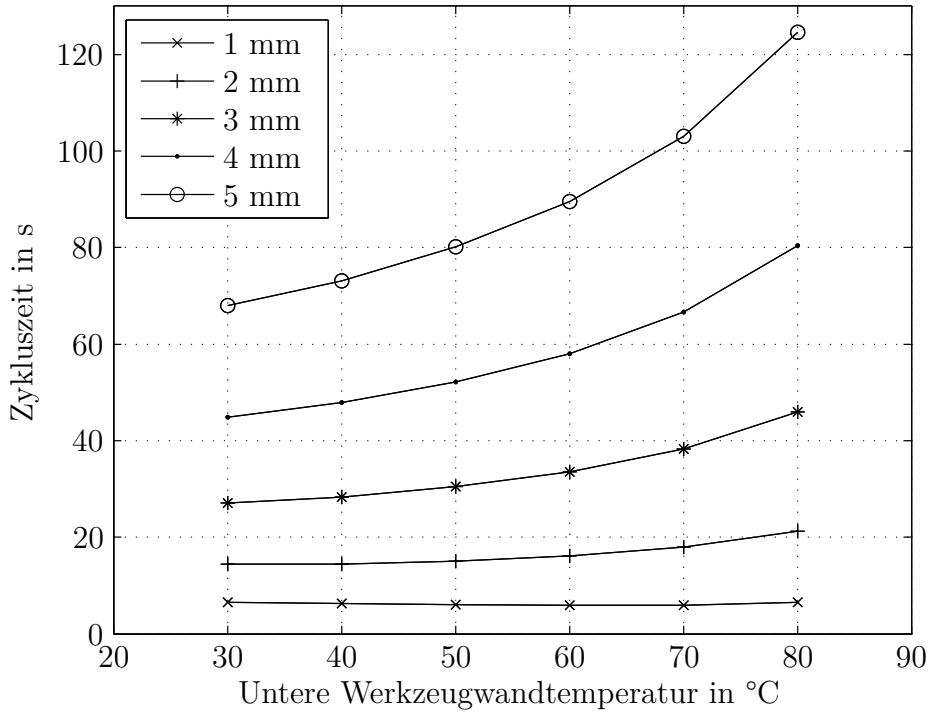

Bild 6.20: Einfluss der unteren Werkzeugwandtemperatur (ϑ_{U}) und der Bauteildicke (d_{B}) auf die Zykluszeit (t_{Z}) bei einer Temperatur des Kühlmoduls von 20 °C unter Verwendung eines keramischen Heizelementes für das Polypropylen (BASF Novolen 1100L) mit einer Massetemperatur (ϑ_{M}) von 245 °C

Bei Polycarbonat (Tabelle 6.3) muss zur Abformung von Nanostrukturen eine obere Werkzeugwandtemperatur von mindestens 140 °C eingestellt werden. Ausgehend von einer Temperatur im Kühlmodul ($\vartheta_{\mathrm{K}} = 20\,°\mathrm{C}$) wurde für verschiedene Bauteildicken die unteren Werkzeugwandtemperatur variiert und die Zykluszeiten berechnet (Bild 6.21). Bei geringen Bauteildicken ist für eine untere Werkzeugwandtemperatur ein Minimum in der Zykluszeit zu erkennen. Mit abnehmender unterer Werkzeugwandtemperatur wird die Zykluszeit bei dickwandigen Bauteilen kürzer und es entsteht eine Zykluszeitreduzierung. Ein Vergleich der berechneten Werte mit den in Tabelle 6.4 dargestellten Zykluszeiten für einen isothermen Spritzgießprozess zeigt, dass ab einer bestimmten, unteren Werkzeugwandtemperatur mit einer variothermen Temperierung eine geringere Zykluszeit erreicht wird.

Exemplarisch wurden die Zykluszeiten für ein variothermes Temperiersystem mit einem Dickschichtheizelement für unterschiedliche Bauteildicken berechnet (Bild 6.22). Angenommen wurde ein Dickschichtheizelement, welches direkt auf einen Kühlblock aufgetragen ist. Bei diesem Aufbau ist das Dickschichtheizelement direkt die Werkzeugwand (siehe Tabelle 6.2).

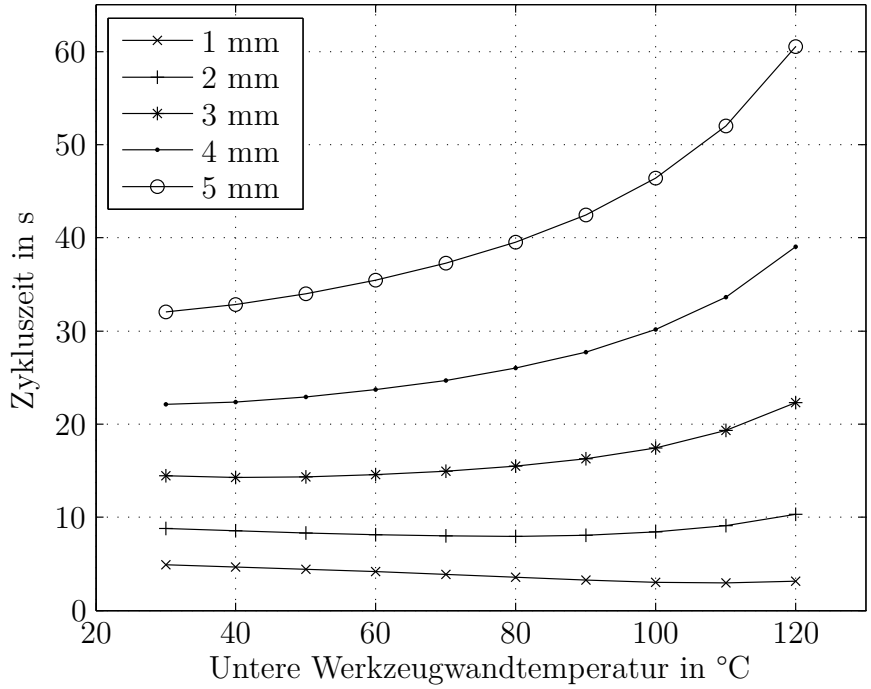

Bild 6.21: Einfluss der unteren Werkzeugwandtemperatur (ϑ_U) und der Bauteildicke (d_B) auf die Zykluszeit (t_Z) bei einer Temperatur des Kühlmoduls von 20 °C unter Verwendung eines keramischen Heizelementes für das Polycarbonat (Bayer Makrolon 8035) mit einer Massetemperatur (ϑ_M) von 300 °C

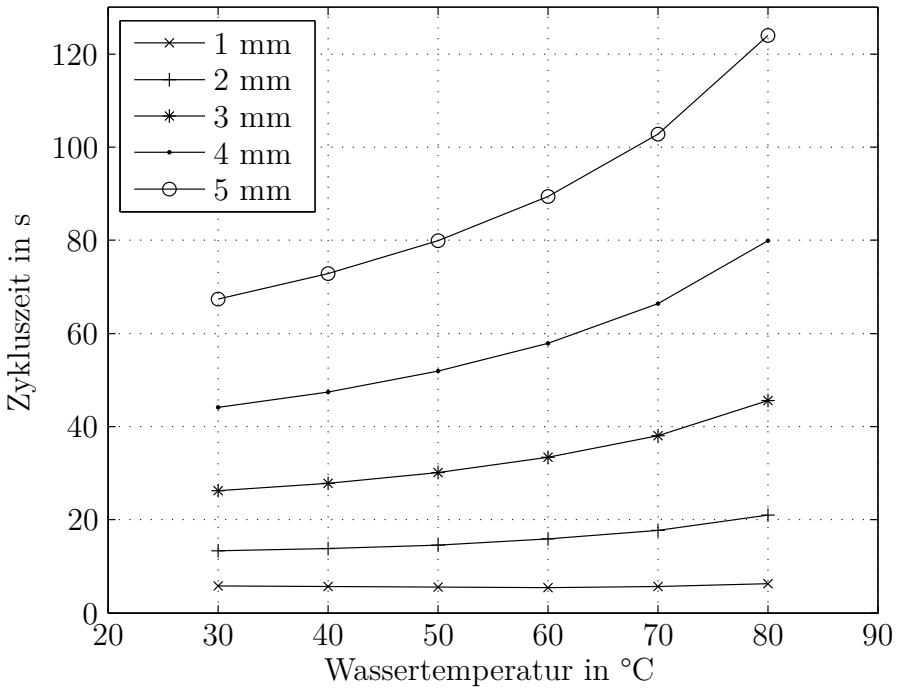

Bild 6.22: Einfluss der unteren Werkzeugwandtemperatur (ϑ_U) und der Bauteildicke (d_B) auf die Zykluszeit (t_Z) bei einer Temperatur des Kühlmoduls von 20 °C unter Verwendung eines Dickschichtheizelementes auf der Werkzeugwand und dem Polypropylen (BASF Novolen 1100L) mit einer Massetemperatur (ϑ_M) von 245 °C

Unterschiede in den Zykluszeiten zwischen den beiden berechneten Heizelementtypen (Dickschichtheizelement und keramisches Heizelement) bei der Polypropylen-Verarbeitung sind gering. So ist bei einem 5 mm dicken Formteil aus Polypropylen und einer unteren Werkzeugwandtemperatur von 80 °C mit einem Dickschichtheizelement eine Zykluszeit von 123 s, während mit einem keramischen Heizelement eine Zykluszeit von 125 s erreicht wird.

6.5 Folgerungen aus den Berechnungsergebnissen

Mit den beiden Heizelementtypen - Keramisches Heizelement und Dickschichtheizung - konnte eine schnelle Erwärmung der Werkzeugwand rechnerisch nachgewiesen werden. Die Aufheizdynamik wird dabei hauptsächlich durch die Dicke des werkzeugwandbildenden Einsatzes und der spezifischen, flächenbezogenen Heizleistung bestimmt. Anzustreben ist ein dünner Einsatz, damit die Heizleistung minimiert und dadurch weniger Energie in der Aufheizphase verbraucht wird.

Mit praktischen Temperaturmessungen unter Spritzgießbedingungen konnten materialspezifische Kenngrößen ermittelt werden. Dadurch ist es möglich, die Kühlzeit der verarbeiteten Polymere präzise zu berechnen. An exemplarischen Berechnungen konnte gezeigt werden, dass die Temperatur des Kühlmoduls einen geringen Einfluss auf die Zykluszeit hat. Wird die untere Werkzeugwandtemperatur bei einer konstanten Temperatur des Kühlmoduls und gleichbleibender oberer Werkzeugwandtemperatur variiert, ist ein deutlicher Einfluss auf die Zykluszeit festzustellen. Unter bestimmten Bedingungen ist es durch die variotherme Verfahrenstechnik möglich, eine kürzere Zykluszeit gegenüber einem isothermen Spritzgießprozess zu erreichen.

7 Versuche mit keramischen Heizungen

7.1 Werkzeugtechnik

7.1.1 Allgemeiner Aufbau

Die Leistungsfähigkeit der entwickelten keramischen Widerstandsheizelementen wird mit Hilfe eines Spritzgießwerkzeugs und wechselbaren Werkzeugeinsätzen untersucht. Dadurch können die Heizelemente in einer Produktionsumgebung getestet werden. Im Spritzgießwerkzeug wird dafür eine Kavität einseitig mit einem derartigen Widerstandsheizelement auf Basis einer elektrisch leitfähigen Keramik ausgerüstet. Das in Bild 7.1 dargestellte Spritzgießwerkzeug wird für die anstehenden Versuche verwendet. Mit dem eingesetzten Spritzgießwerkzeug können zwei gleichgroße Formteile (44 mm $\times$ 38 mm) über ein Kaltverteilerangusssystem (7) hergestellt werden. Die Anbindung der beiden Formteile erfolgt jeweils mit einem rechteckförmigen Anschnitt, der als Filmanguss ausgelegt ist. Die Bauteildicke von 1,5 mm wird durch die düsenseitige Befestigungsbrille definiert.
Das Formteil wird über einen Zentralauswerfer und vier kleinere Auswerferstifte, die auf den Filmanguss drücken, entformt. Zur Entformung hat die düsenseitige Befestigungsbrille eine Entformungsschräge von 1°. Gefederte Rückdrückstifte unterstützen die düsenseitige Entformung. Über dem Zentralauswerfer wird der kalte Pfropfen aufgefangen. Mit dem an dieser Stelle eingebrachten Hinterschnitt wird sichergestellt, dass das Formteil auf der Auswerferseite beim Öffnen des Werkzeugs bleibt. Die Baugruppen des Spritzgießwerkzeugs haben jeweils einen separaten Temperierkreislauf. Diese sind in den beiden Formplatten, den Konturplatten und den Werkzeugeinsätzen, untergebracht. Für die Versuche wird die Stammform auf eine konstante Temperatur temperiert.

7.1.2 Werkzeugeinsatz

Ein düsenseitiger Werkzeugeinsatz wird mit einem variothermen Temperiersystem auf Basis eines keramischen Heizelementes und einer konturnahen Wasserkühlung ausgestattet (Bild 7.2). Dazu wird das Heizelement aus einer elektrisch leitfähigen Si_3N_4/TiN-Platte durch Wasserstrahlschneiden hergestellt. Das hergestellte Heizelement (5) wird mit zwei Isolationsplatten (4 und 6) aus Si_3N_4 gegenüber dem Spritzgießwerkzeug isoliert. Die eingesetzten Isolationsplatten haben eine Dicke von jeweils 1 mm, während das Heizelement 3 mm hoch ist. Die Seitenflächen des Heizelementes werden mit einer selbstklebenden Polyimidfolie gegenüber dem umliegenden Werkzeug isoliert.

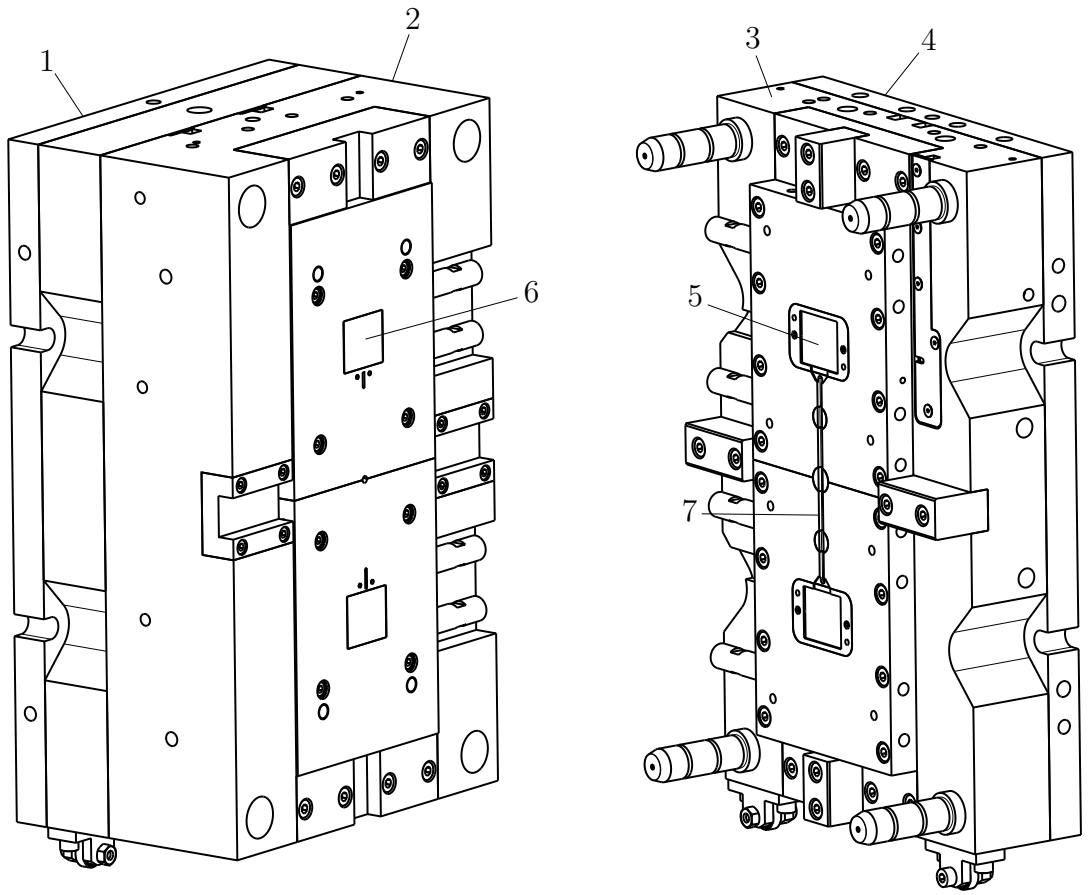

Bild 7.1: Allgemeiner Aufbau des Spritzgießwerkzeugs für die Versuche mit einem Keramikheizelement (1: Aufspannplatte AS, 2: Formplatte AS, 3: Formplatte DS, 4: Aufspannplatte DS, 5: Düsenseitiger Werkzeugeinsatz, 6: Auswerferseitiger Werkzeugeinsatz, 7: Kaltkanalangussverteiler)

Für die konturnahe Wasserkühlung werden in den eingesetzten Kühlblock (2) sieben parallel verlaufende Bohrungen mit einem Durchmesser von jeweils 2 mm eingebracht. Auf der Rückseite des Kühlblocks wird an zwei Stellen (Vor- und Rücklauf) das temperierte Wasser von der Konturplatte (1) übergeben. Zur Abdichtung wird der Kühlblock zusammen mit zwei Dichtungen auf die Konturplatte geschraubt. Das dreiteilige Heizelement wird wiederum mit dem Befestigungsrahmen (7) auf dem Kühlblock befestigt. Mit einem gefederten Mantelthermoelement (Typ J), das auf die untere Isolationsplatte drückt, wird der variotherme Temperaturwechsel aufgezeichnet.

Anhand der Ergebnisse aus Kapitel 5.3.1 wird für die Versuche die in Bild 7.3 dargestellte Variante des keramischen Heizleiters gewählt, wobei die Heizleiterbahn eine Breite von 5,5 mm aufweist. An den Umkehrpunkten im Stromverlauf ist der Abstand auf 2/3 der Heizleiterbahnbreite reduziert. Dadurch wird eine homogene Erwärmung des Heizelementes erreicht (siehe Bild 7.4). Zur Reduzierung von Kerbspannungen und vor allem zur Vermeidung von Temperaturüberhöhungen und zur Verbesserung der Homogenität wird an den Umkehrpunkten zusätzlich eine Bohrung von 0,5 mm am Ende der 0,3 mm breiten Schlitze eingebracht.

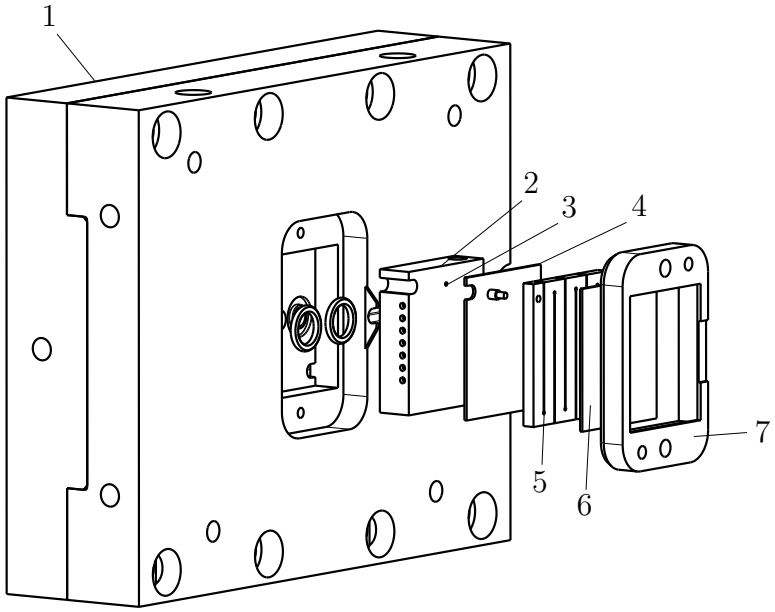

Bild 7.2: Schematischer Aufbau des Formeinsatzes für die Versuche mit einem Keramikheizelement (1: Konturplatte, 2: Wasserbasiertes Kühlmodul, 3: Position Mantelthermoelement, 4: Untere Si_3N_4-Isolationsplatte, 5: Si_3N_4/TiN-Heizelement, 6: Obere Si_3N_4-Isolationsplatte, 7: Befestigungsbrille)

Für die elektrische Kontaktierung werden in den Heizleiter zwei Bohrungen ($d = 1$ mm) erodiert. Die erodierte Oberfläche in den Bohrungen wird abgeschliffen, damit das Aktivlot die Keramik benetzen kann. Die beiden Nickelbuchsen werden, wie in Kapitel 5.3.1 beschrieben, in einem Aktivlotprozess mit dem keramischen Heizleiter verbunden.

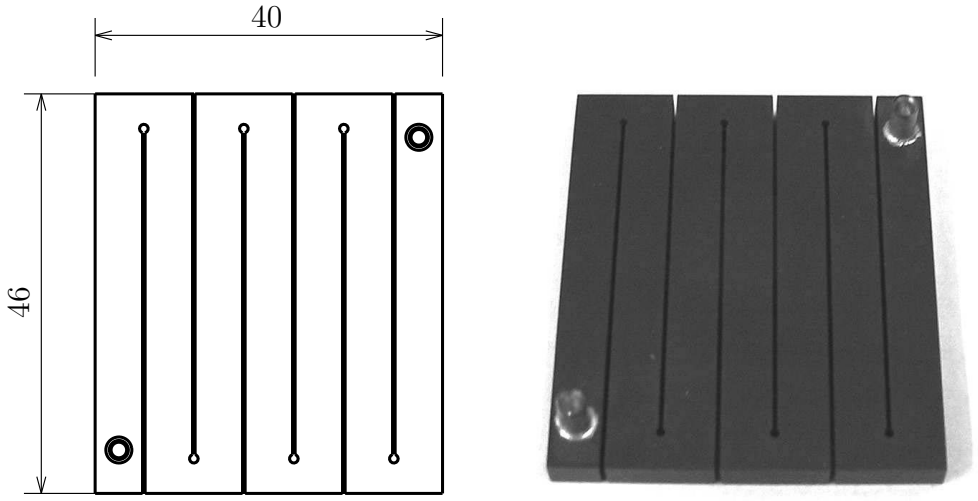

Bild 7.3: Geometrie des Stromleiters und Abmessung des Heizelements (links), Heizleiterverlauf des Keramikheizelements (rechts)

In einem weiteren Schritt wird eine flexible Kupferleitung in einem Hartlotprozess in die beiden Buchsen eingelötet. Isoliert werden diese Zuleitungen gegenüber dem Spritzgießwerkzeug mit einem flexiblen, keramischen Gewebeschlauch. Der elektrische Gesamtwiderstand des hergestellten Heizelementes beträgt bei Raumtemperatur ($\vartheta_R = 23\,°C$) 2,3 Ω.

Bei Erwärmung des Heizelementes steigt der Heizleiterwiderstand linear an. Bei 260 °C wurde ein Widerstand von 3,3 Ω gemessen. Der symmetrische Aufbau des Heizleiters und der konstante Heizleiterquerschnitt (abgesehen von den Umkehrpunkten) lässt eine gleichmäßige Erwärmung zu (Bild 7.4). Nach zehn Sekunden wird auf der Heizleiteroberfläche eine mittlere Temperatur von 185 °C bei einer elektrischen Leistung von 500 W (bei $\vartheta_R = 23\,°C$) erreicht.
In der Temperaturverteilung des keramischen Heizelementes ist zu erkennen, dass eine Kontaktierungsstelle kälter ist, was auf Schwankungen in der Benetzung des Heizleiters durch das Aktivlot und daher auf unterschiedliche Übergangswiderstände zwischen Nickelbuchse und Heizleiter zurückzuführen ist.

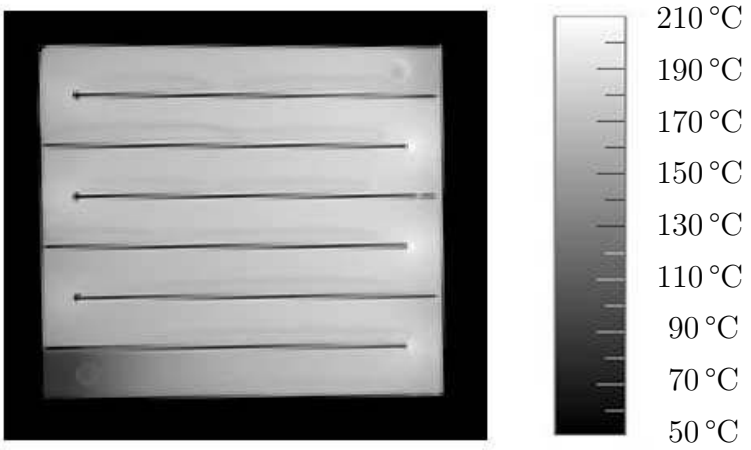

Bild 7.4: Temperaturverteilung des eingesetzten Keramikheizelementes nach einer Heizzeit von 10 s an Luft, bei einer elektrischen Leistung von 500 W bei 23 °C

7.2 Ansteuerung der Heizelemente

Mit dem eingebauten Heizelement soll das in Kapitel 6 berechnete, thermische Verhalten verifiziert werden. Dafür ist das Heizelement mit einer entsprechenden, elektrischen Leistung zu versorgen. Die Spannungsquelle muss Stromstärken bis zu 30 A abgeben können. Dies wird mit einem regelbaren Trenntransformator, welcher bei Spannungen von bis zu 150 V Stromstärken bis zu 30 A abgeben kann, realisiert. Die maximale Flächenleistungen beträgt 110 W/cm^2.
Der elektrische und fluidische Versuchsaufbau ist in Bild 7.5 dargestellt. Die elektrische Leistung beziehungsweise die Spannung des Transformators (2) wird mit einem Halbleiterrelais (4) geschaltet. Zur Kühlung (7) des Werkzeugeinsatzes werden die konturangepassten Temperierkanäle mit der Maschinenkälte (8) der Spritzgießmaschine verbunden. Zusätzlich werden der Durchfluss (9), der Wasserdruck und die Wassertemperaturen (11 und 12) im Vor- und Rücklauf gemessen. Gesteuert wird der Durchfluss mit einem Magnetventil (10).

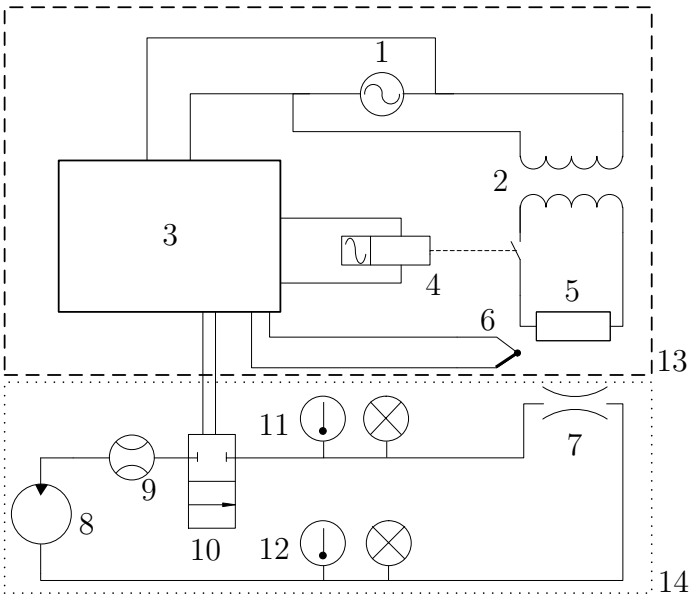

Bild 7.5: Schematischer Aufbau des Versuchsstandes zur Untersuchung des keramischen Heizelementes (1: Spannungsversorgung, 2: Transformator, 3: SPS, 4: Halbleiterrelais, 5: Keramisches Heizelement, 6: Mantelthermoelement, 7: Kühlkanalstruktur, 8: Maschinenkälte, 9: Durchflussmesser, 10: Magnetventil, 11: Druck und Temperaturmessung Vorlauf, 12: Druck und Temperaturmessung Rücklauf, 13: Elektrische Schaltung, 14: Wasserkreislauf)

Mit einer speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) wird das Halbleiterrelais und das Magnetventil angesteuert. Im Programm der SPS ist ein PID-Regler hinterlegt, der auf einen vorgegebenen Sollwert regelt. Die Umschaltung und somit die Vorgabe des Sollwerts für den Regler wird mit einem Taster beziehungsweise durch ein Signal von der Spritzgießmaschine durchgeführt. Der eingesetzte PID-Regler hat eine Parallelstruktur, bestehend aus drei parallel angeordneten Regelgliedern, welche den Stellgrad ($u(t)$) bilden.

$$u(t) = K_\mathrm{P} \cdot \left[e(t) + \frac{1}{T_\mathrm{N}} \int_0^t e(\tau)\mathrm{d}\tau + T_\mathrm{V} \frac{\mathrm{d}e(t)}{\mathrm{d}t} \right] \tag{7.1}$$

Anhand der Gleichung 7.1 kann der Einfluss der drei Regelanteile wie folgt beschrieben werden:

- P-Anteil (K_P)
  Die Regelabweichung ($e(t)$) hat eine direkte Auswirkung auf die Stellgröße und reagiert sofort auf eine Änderung. Mit einem hohen P-Anteil wirkt sich die Regelabweichung unmittelbar und direkt auf die Stellgröße aus.
- I-Anteil (T_N)
  Dieser Anteil integriert die Regelabweichung und soll dadurch eine bleibende Regelabweichung vermeiden. Diese integrierte Regelabweichung hat einen direkten Einfluss auf die Stellgröße. Daher gilt, je größer die zeitliche Regelabweichung ist, desto größer wird dadurch die Stellgröße.

- D-Anteil (T_V)
  Mit diesem Anteil wird auf eine zeitliche Änderung der Regelabweichung reagiert. Bei einer schnellen Änderung der Regelabweichung wird die Stellgröße entsprechend erhöht. Ist die Verstärkung der zeitlichen Regelabweichung hoch, wird deshalb das System schneller.

Für die Einstellung des Reglers kann zunächst ein empirisches Einstellverfahren eingesetzt werden. Anschließend ist eine Feinabstimmung der Regelanteile auf das eingesetzte System durchzuführen (vgl. [LW07, Unb07]).

7.3 Temperaturmessungen

7.3.1 Dynamik

Mit dem beschriebenen Aufbau wurden zunächst Aufheizversuche zur Bestimmung der Temperaturwechseldynamik durchgeführt und die Temperaturverteilung an der Werkzeugwand mit einer Wärmebildkamera gemessen. Die in Bild 7.6 dargestellten Temperaturverläufe sind an der Werkzeugwand mit einer Wärmebildkamera aufgenommen, während im Werkzeug die Temperatur mit einem Mantelthermoelement erfasst worden ist. Der Temperaturverlauf an der Werkzeugwand und am Mantelthermoelement wird einmal für einen Wasserdurchfluss während der Aufheizphase und einmal für ruhendes Wasser in den Kühlkanälen bestimmt. In beiden Fällen wurde auf 12 °C temperiertes Wasser verwendet.

Dabei ist nahezu kein Unterschied zwischen den Temperaturverläufen an der Werkzeugwand und am Temperatursensor festzustellen. Innerhalb von 10 s wird mit der installierten, spezifischen Heizleistung von 50 W/cm^2 (dies entspricht einer Gesamtleistung des keramischen Heizelementes von 1000 W) ein Temperatursprung von 20 °C auf 145 °C erreicht, was einer durchschnittlichen Aufheizrate von 12,5 K/s entspricht.

Die Wärmeaufnahme des Wassers wird durch einen Temperatursensor im Vor- und Rücklauf gemessen (Bild 7.7). Bei einer dauerhaften Kühlung kann ein Temperaturanstieg im Rücklauf bereits während der Aufheizphase festgestellt werden. Im Gegensatz zu einer geschalteten Kühlung, hier wird der Temperaturanstieg erst nach dem erneuten Schalten des Magnetventils erfasst. Das ruhende Wasser im Kühlkanal nimmt bereits während der Aufheizphase teilweise die eingebrachte Heizleistung auf, daher wird kurz nach dem Einschalten des Wasserdurchflusses eine Erhöhung ($\Delta\vartheta_F = 1{,}4$ K) der Wassertemperatur gemessen.

Darüber hinaus sind in Bild 7.6, auf Basis der beschriebenen Versuchseinrichtung, berechnete Temperaturkurven für die Werkzeugwand und an der Position des Mantelthermoelementes eingezeichnet. Dabei ist eine hohe Übereinstimmung mit den Messwerten festzustellen. Dagegen liegt ein deutlicher Unterschied zwischen der Werkzeugwandtemperatur und der Temperatur am Thermoelement vor und muss in der Einstellung der Sollwerte berücksichtigt werden.

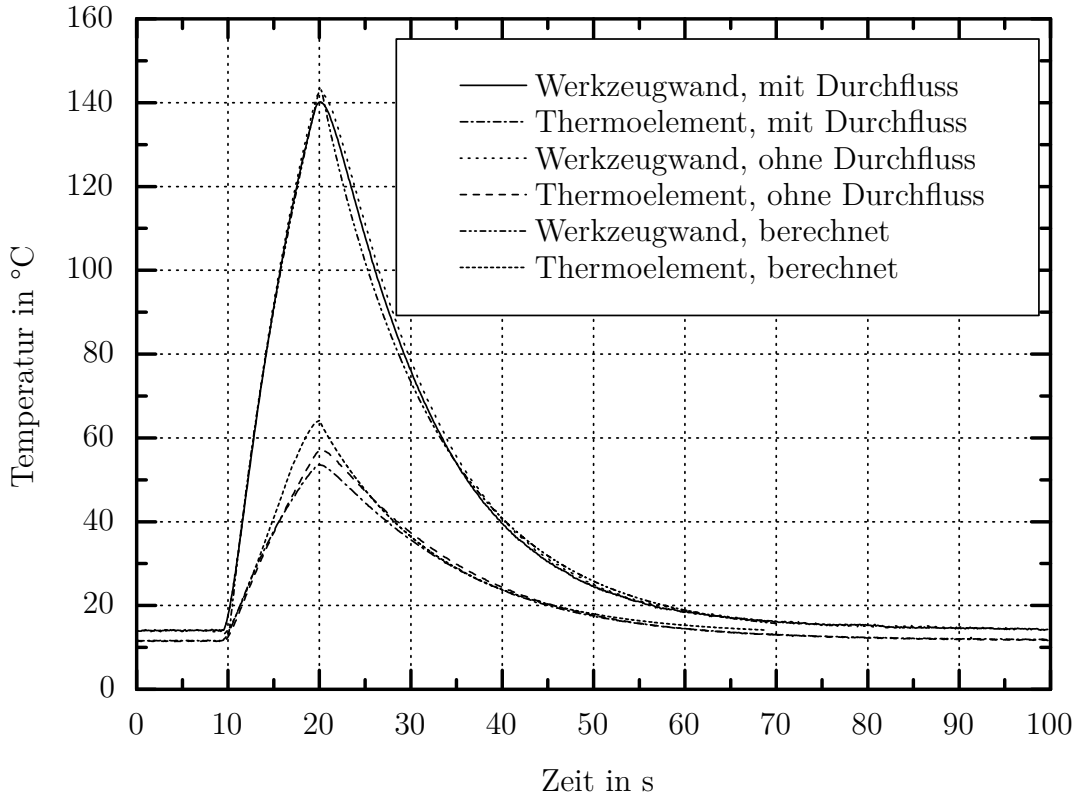

Bild 7.6: Gemessener und berechneter Temperaturverlauf an der Werkzeugwand und am Mantelthermoelement bei dauerhafter und geschalteter Wasserkühlung

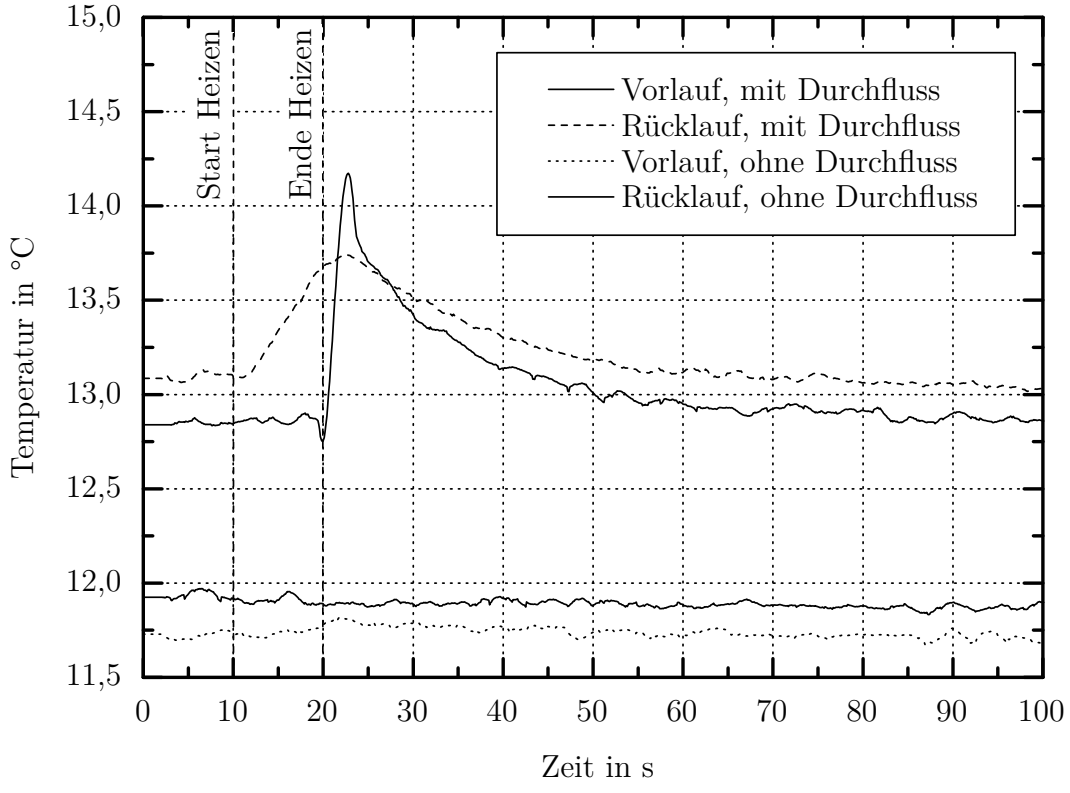

Bild 7.7: Gemessener zeitlicher Temperaturverlauf im Vor- und Rücklauf bei dauerhafter und geschalteter Wasserkühlung

Damit beispielsweise an der Werkzeugwand ein Temperatursprung von 70 °C auf 140 °C durchgeführt wird, muss am Regler ein Temperatursprung von 30 °C auf 60 °C eingestellt sein (Bild 7.8). Für die Ermittlung der Reglerparameter wurde das Verfahren nach Ziegler und Nichols verwendet.

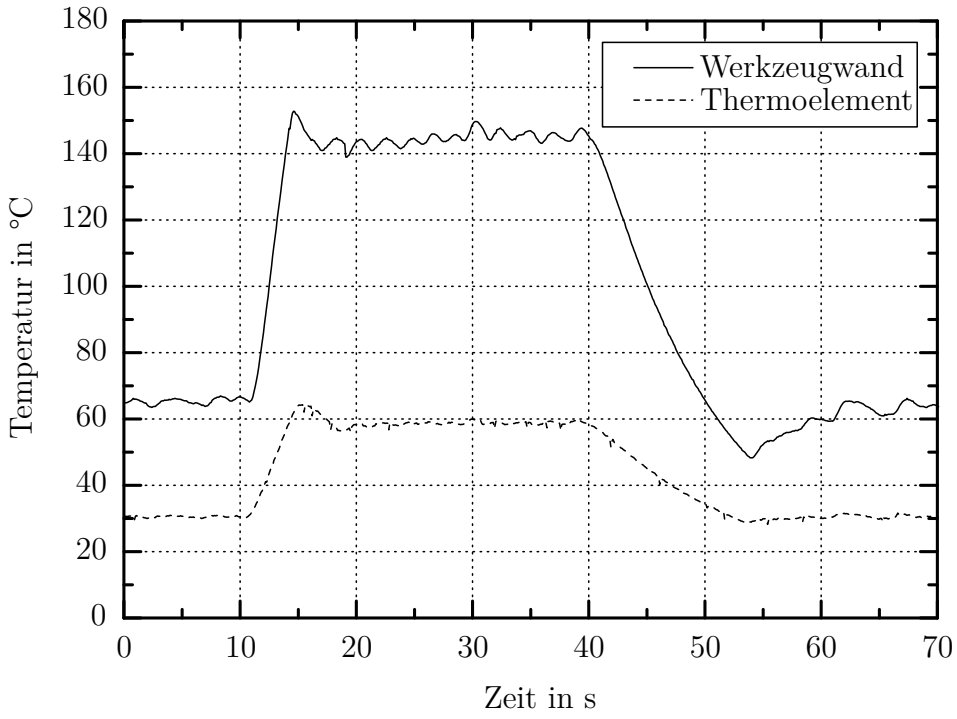

Bild 7.8: Temperaturverlauf an der Werkzeugwand im Vergleich zur Einstellung der Temperatur am Mantelthermoelement ($\dot{q}_\mathrm{H} = 50$ W/cm^2, $K_\mathrm{p} = 2{,}2$ 1/K, $T_\mathrm{N} = 2{,}7$ s, $T_\mathrm{V} = 0{,}6$ s)

Die Temperaturüberhöhung beim Sollwertwechsel von 70 °C auf 140 °C ist neben den Regelparametern auch von der spezifischen Leistung abhängig. Je höher die spezifische Leistung ist, desto größer wird das Überschwingen nach einem Sollwertwechsel sein. Bei einer spezifischen Leistung von 100 W/cm^2 und den ermittelten Regelparametern steigt die Werkzeugwandtemperatur bis auf 170 °C an.

7.3.2 Verteilung

Neben der Aufheizdynamik und Regelung des keramischen Heizelementes, soll eine möglichst homogene Temperaturverteilung auf der Werkzeugwand erreicht werden. Diese Temperaturverteilung ist in Bild 7.9 für die Regelung eines eingestellten, oberen Sollwertes von 140 °C dargestellt.

Die formteilbildende Werkzeugwand ist mit Graphit eingesprüht, damit ein Emissionsfaktor von nahezu eins erreicht wird und keine störenden Effekte wie Spiegelungen auftreten. Dadurch ist eine eindeutige Abgrenzung der Temperaturverteilung im Wärmebild gegenüber dem umliegenden Stammwerkzeug (schwarz dargestellt) zu erkennen (Bild 7.9). Im Randbereich der erfassten, formteilbildenden Werkzeugwand ist dabei ein Absinken der

Temperatur auf 130 °C festgestellt worden, während in den Ecken die Temperatur weiter auf 105 °C abfällt.

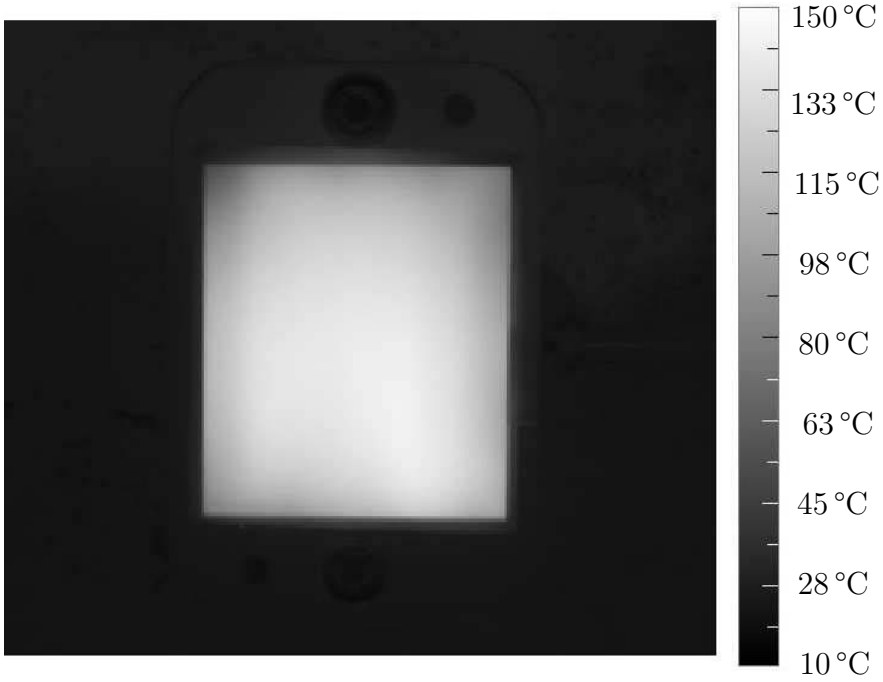

Bild 7.9: Temperaturverteilung auf der Werkzeugwand des eingebauten Keramikheizelementes für die Regelung auf einen oberen Sollwert von 140 °C

8 Verwendung und Charakterisierung von Dickschichtheizelementen

8.1 Spritzgießwerkzeug

8.1.1 Aufbau

Die Untersuchung der thermischen Eigenschaften von Dickschichtheizelementen erfolgt an einem Spritzgießwerkzeug, das wechselbare Werkzeugeinsätze hat. Dies ermöglicht einen modularen Einbau der Dickschichtheizelemente und einen praxisgerechten Test unter Spritzgießbedingungen.
Der Grundaufbau des Spritzgießwerkzeugs (Bild 8.1), wie zum Beispiel Aufspannplatte und Formplatte, besteht aus Normalien. Die Formteildicke kann durch eine Höhenabstimmung des Kavitätenrings (3) und den wechselbaren Distanzleisten (11) von 0,3 mm bis 5,8 mm variiert werden.
Die Heizelemente werden über entsprechende Stecker (1 und 9), welche auf dem Werkzeug sind, mit Spannung versorgt. Für die Regelung der Dickschichtheizelemente sind die Temperatursignale auf freien Kontakten in den elektrischen Verbindungen untergebracht. Die Anbindung an das Formteil erfolgt über einen 10 mm langen Stangenanguss, welcher von einem Heißkanal (16) versorgt wird. Der mittig angebrachte Stangenanguss lässt eine gleichmäßige Formfüllung der Kavität zu. Damit das Formteil beim Öffnen des Werkzeugs auf der Auswerferseite bleibt, hat der Kavitätenring eine umlaufende Entformungsschräge von 1°. Die Angussbuchse (15) weist eine Entformungschräge von 10° auf. Das Formteil wird mit einem zentralen, in der Formteilmitte angeordneten, Auswerferstift entformt. Zur Unterstützung des Entformungsvorgangs wird auf der Düsen- und Auswerferseite Luft zwischen Formteil und Werkzeugwand geblasen.
Die beiden Formplatten (4 und 10) sind mit einer umlaufenden Plattentemperierung ausgestattet, welche im Fall von Spritzgießversuchen in Reihe geschaltet sind. Dadurch ist gewährleistet, dass die Abstände zwischen den vier umliegenden Plattenzentrierungen immer konstant sind und nicht durch den Temperaturwechsel verändert werden. In die Formplatten werden die Formeinsätze mit der konturangepassten Wassertemperierung eingesetzt und verschraubt. Die Wasserversorgung der konturnahen Temperierkanäle erfolgt über die Formplatte.

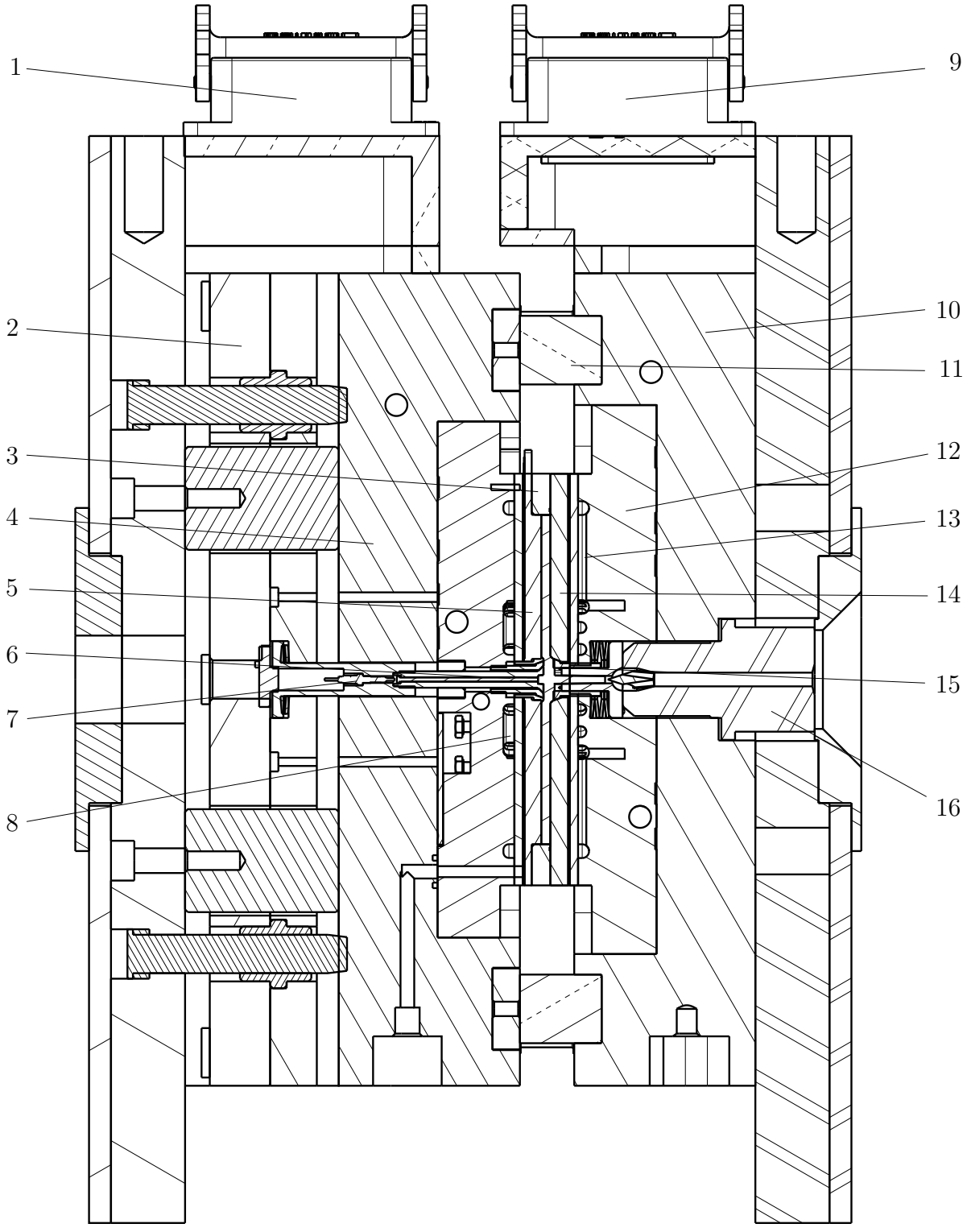

Bild 8.1: Schnittzeichnung des Spritzgießwerkzeugs für die Versuche mit einem Dickschichtheizelement in der Seitenansicht (1: Elektrische Verbindung AS, 2: Auswerferpaket, 3: Kavitätenring, 4: Formplatte AS, 5: Heizelementsubstrat AS, 6: Zentralauswerfer, 7: Drucksensor, 8: Konturnahe Kühlkanäle AS, 9: Elektrische Verbindung DS, 10: Formplatte DS, 11: Distanzleisten, 12: Formeinsatz DS, 13: Konturnahe Kühlkanäle DS, 14: Heizelementsubstrat DS, 15: Angussbuchse, 16: Heißkanal)

8.1.2 Formeinsätze

In Bild 8.2 ist der konstruktive Aufbau für die Einbauvariante mit einer werkzeugwandbildenden Abdeckung dargestellt. Der Formeinsatz besteht aus einem Unterteil mit der konturangepassten Kühlung, die mit einem 3 mm dicken Deckel (4) verlötet ist. Ein Stahlsubstrat (9) mit dem Heizelementverbund, wird auf diesen Kühleinsatz befestigt. Das Stahlsubstrat ist dabei 6 mm dick und dient gleichzeitig als Werkzeugwand. Die elektrische Kontaktierung wird in diesem Fall durch Hochstrom-Federkontakte (3) mit einer Belastungsgrenze von 50 A hergestellt.

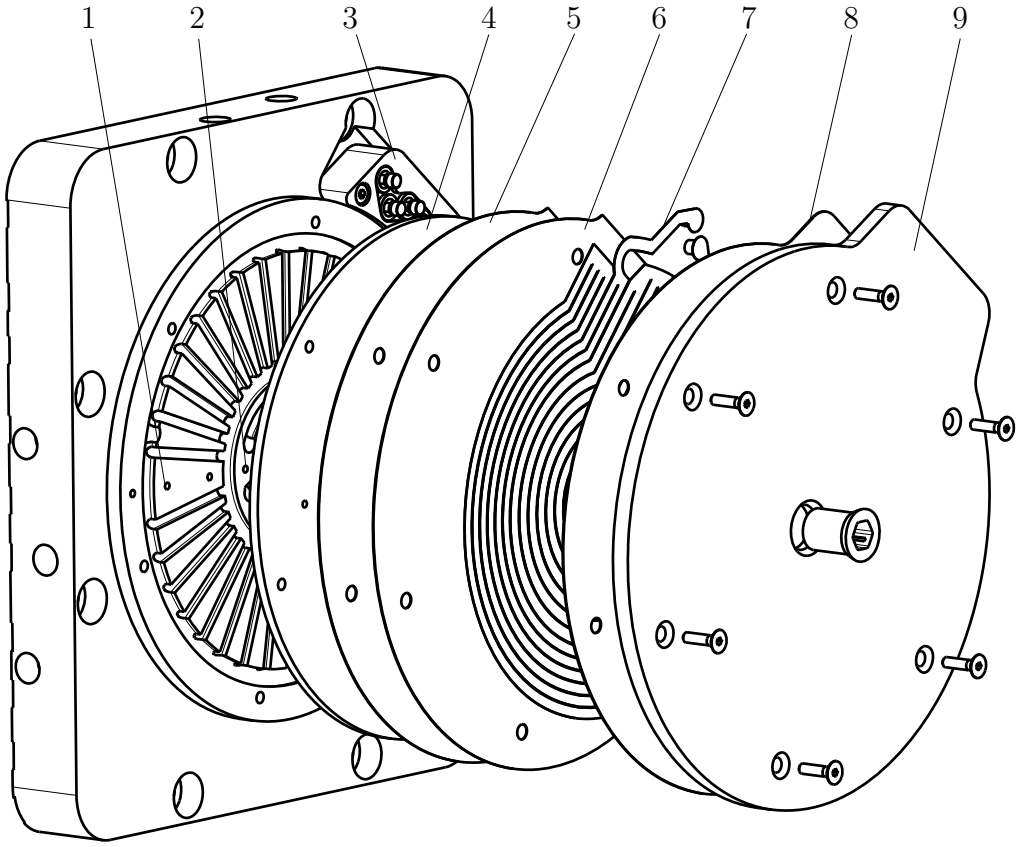

Bild 8.2: Düsenseitiger Formeinsatz mit einem Dickschichtheizelement 6 mm hinter der Werkzeugwand (1: Äußere Position für ein Mantelthermoelement, 2: Innere Position für ein Mantelthermoelement, 3: Elektrische Kontaktierung, 4: Temperierkanalabdeckung, 5: Schutzmetallisierung, 6: Erste Isolationsschicht, 7: Heizleiter, 8: Zweite Isolationsschicht, 9: 6 mm dickes Heizelementsubstrat)

Anders bei der Einbauvariante für das Oberflächenheizelement (Bild 8.3). Hier wird der Formeinsatz mit einer Kühlkanalstruktur hergestellt, auf welche ein 6 mm dickes Stahlsubstrat (4) mit dem Dickschichtheizelement geschraubt. Ein einfacher Austausch des Dickschichtheizelements kann durchgeführt werden. Zur Abdichtung der konturangepassten Kühlung werden O-Ringe aus Peroxidfluorelastomer verwendet. Für die elektrische Kontaktierung wird eine lasergeschweißte, feste Verbindung zwischen dem Heizleiter und den Zuleitungen gewählt. Die Zugentlastung der vier elektrischen Leitungen erfolgt durch Rohre, die auf das Stahlsubstrat geschweißt und mit der Zuleitung verklemmt werden.

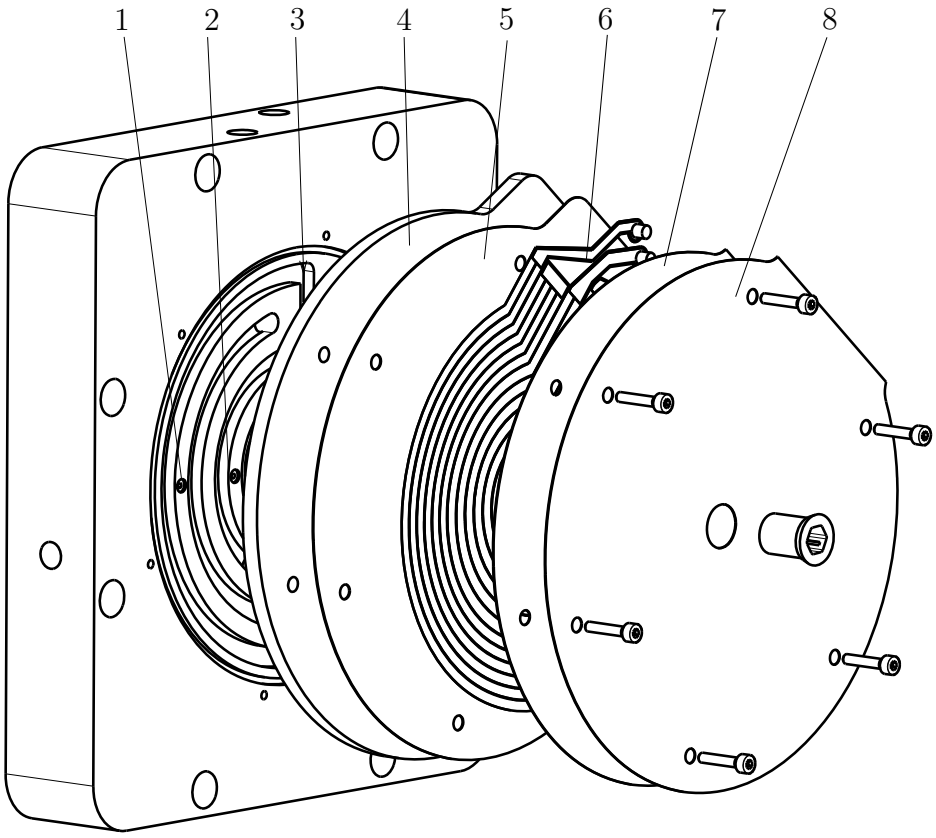

Bild 8.3: Formeinsatz mit Dickschichtheizelement auf der Werkzeugwand (1: Äußere Position für ein Mantelthermoelement, 2: Innere Position für ein Mantelthermoelement, 3: Konturangepasste Kühlkanäle, 4: Heizelementsubstrat, 5: Erste Isolationsschicht, 6: Heizleiter, 7: Zweite Isolationsschicht, 8: Schutzmetallisierung)

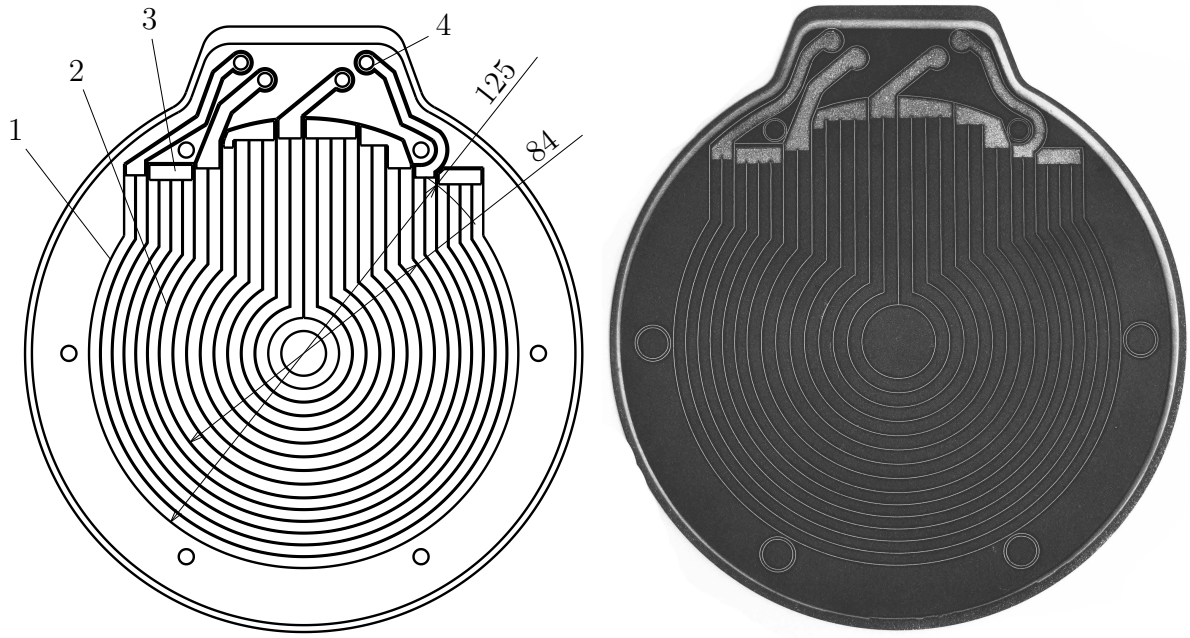

Bild 8.4: Geometrie des Stromleiters und Abmessung des Heizelements (links), Heizleiterverlauf des Dickschichtheizelements ohne zweite Isolationsschicht (rechts) (1: äußere Heizzone, 2: innere Heizzone, 3: Umkehrpunkte, 4: elektrische Kontaktfläche)

Der konstruktive Aufbau der Heizelemente ist für die Auswerfer- und Düsenseite sowie für die beiden Einbauvarianten (oberflächennah und -fern) identisch gelöst. Die Heizelemente bestehen aus zwei unterschiedlichen Heizzonen (1 und 2) - einer inneren und einer äußeren (Bild 8.4). Bereiche mit lokalem Anstieg der Stromdichte (Umkehrpunkte im Stromverlauf, 3) sind außerhalb der zu erwärmenden Werkzeugwand zu platzieren. Folglich entstehen lokale Temperaturerhöhungen außerhalb der formteilbildenden Werkzeugwand, wodurch eine bessere Temperaturhomogenität erreicht wird. Die Leiterbahnen von den Kontaktflächen (4) bis zum eigentlichen Heizleiter liegen ebenfalls außerhalb der formteilbildenden Werkzeugwand um die Temperaturhomogenität zu verbessern.
Die Temperaturabhängigkeiten der Widerstände und der umgesetzten elektrischen Leistungen der beiden Heizzonen sind in Bild 8.5 dargestellt. Mit zunehmender Temperatur ist ein linearer Anstieg der Heizleiterwiderstände und dadurch bedingt ein Sinken der elektrischen Leistung zu erkennen. Mit der umgesetzten Heizleitergeometrie wird bei einer Wechselspannung von 230 V eine Heizleistung von 3150 W (bei 23 °C) in der inneren und 2500 W (bei 23 °C) in der äußeren Heizzone erreicht. Dies entspricht einer spezifischen Heizleistung von 50 W/cm^2, die homogen über die Fläche verteilt ist.

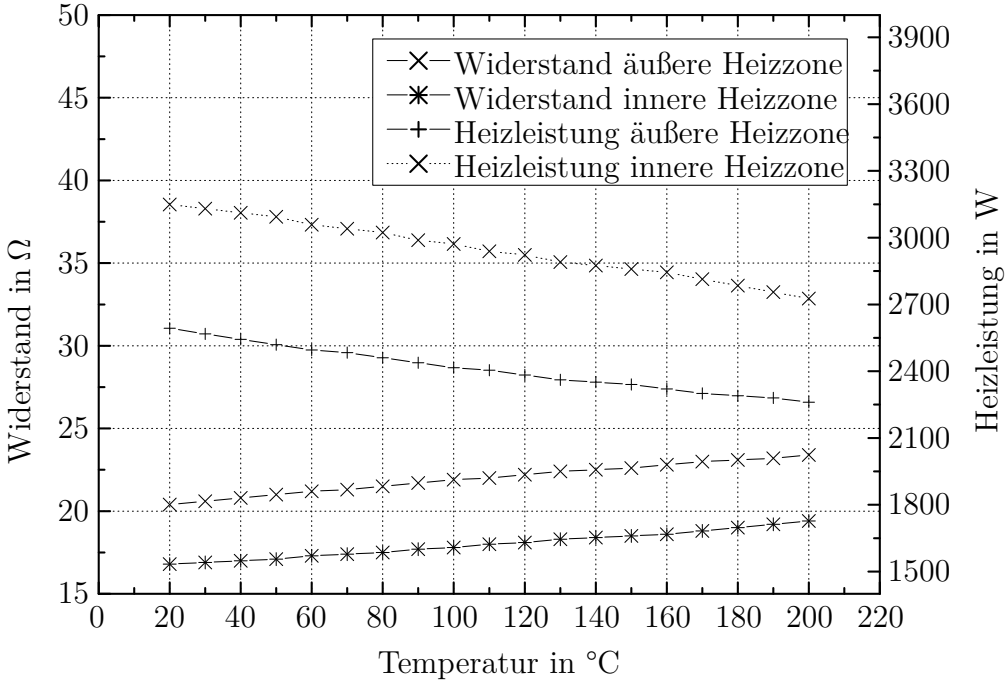

Bild 8.5: Messung der Temperaturabhängigkeit des Heizelementwiderstandes (R) und der Heizleistung (P) der beiden Heizzonen des Dickschichtheizelementes

8.2 Regelung elektrischer Widerstandsheizelemente

Jede Heizzone erfordert einen separaten Temperaturregler. Als Regelgröße werden die gemessenen Temperatursignale der beiden Mantelthermoelemente verwendet. Deshalb ist die Wahl des Temperatursensors, dessen Einbau und Position für die Regelung wichtig. Mit diesem Signal wird das System eingestellt und das thermische Verhalten abgestimmt.

Für die Regelung werden Typ-J Mantelthermoelemente verwendet. Die Positionen der Mantelthermoelemente (siehe jeweils Bild 8.2 und Bild 8.3) für die innere und äußere Heizzone sind dabei so gewählt, dass eine gegenseitige Störung minimal ist. Der Abstand zur Werkzeugwand ist so eingestellt, dass die für den Spritzgießprozess ausschlaggebende Temperatur mit einer hohen Genauigkeit erfasst und geregelt werden kann. Zur Überwachung der Heizelementtemperatur und Vermeidung von thermischen Schäden kann ein zweiter Temperatursensor, der direkt die Oberflächentemperatur des Heizelementes misst, vorgesehen werden. Die Mantelthermoelemente werden in Bohrungen, die senkrecht zur Werkzeugwand eingebracht sind, verbaut. Zur Verbesserung des Wärmekontakts zwischen Mantelthermoelementspitze und dem Bohrungsgrund, werden die beiden Flächen aufeinander abgestimmt. Mit einer Spiralfeder wird zusätzlich das Thermoelement auf den Bohrungsgrund gedrückt. Damit die schnellen Temperaturwechsel erfasst werden können, wurden Mantelthermoelemente mit einem Durchmesser von 1 mm gewählt, wodurch eine geringe thermische Masse gewährleistet ist.
Zusätzlich kann im Prozess der Heizelementwiderstand überwacht werden. Dieser ist, wie in Bild 8.5 zu sehen, von der Temperatur abhängig. Mit dieser indirekten Messung kann eine über die Heizelementfläche gemittelte Temperatur erfasst werden. Die Ermittlung des Widerstands erfolgt im Betrieb durch Messung der Spannung und des Stroms. Daraus wird der Widerstand und die durchschnittliche Heizelementtemperatur berechnet. In der Kühlphase, oder wenn das Heizelement nicht angesteuert wird, ist ein Messimpuls zur Bestimmung des Heizleiterwiderstands notwendig. Eine derartige Temperaturbestimmung kann deshalb nur zu bestimmten Zeiten stattfinden. Für eine Regelung kann diese Methode wegen der geringen erreichbaren Abtastrate und der daraus resultierenden Messungenauigkeit nicht verwendet werden. Stattdessen ist eine Temperaturüberwachung einzusetzen, die das Heizelement bei überschreiten einer bestimmten Temperatur abschaltet. Diese Grenze ist durch die maximal zulässige obere Werkzeugwandtemperatur definiert.
Für die Regelung eines variothermen Spritzgießprozesses ist ein Regler notwendig, der das Dickschichtheizelement und die Kühlung separat ansteuern kann. Zusätzlich muss eine Kommunikation zur Spritzgießmaschine erfolgen können. Dazu wird ein PID-Regler eingesetzt, der digitale, frei programmierbare Ein- und Ausgänge und analoge Eingänge zur Erfassung der Temperatursignale hat. Die digitalen Ein- beziehungsweise Ausgänge schalten mit 24 V Gleichspannung, mit der direkt ein Halbleiterrelais oder ein Magnetventil betrieben werden kann. Durch eine Pulsweitenmodulation (PWM) des Signals ist es möglich, die Leistung der Heizelemente beziehungsweise den Wasserdurchfluss für die Kühlung zu regeln. Das PWM-Signal wechselt zwischen den zwei Spannungszuständen 24 V und 0 V und schaltet die Kühlung an oder aus. Die Dauer der einzelnen Zustände zueinander definiert die ausgegebene Leistung. Der eingesetzte Regler steuert über ein Halbleiterrelais (3) die Heizelemente (5) an (Bild 8.6). Der Wasserdurchfluss in den Kühlkanälen wird mit einem Magnetventil (8) ein- oder ausgeschaltet. Die Kommunikation zwischen Spritzgießmaschine (10) und Regler (1) erfolgt über potentialfreie, digitale Ein- und Ausgänge, da diese unterschiedliche Bezugspotentiale aufweisen.

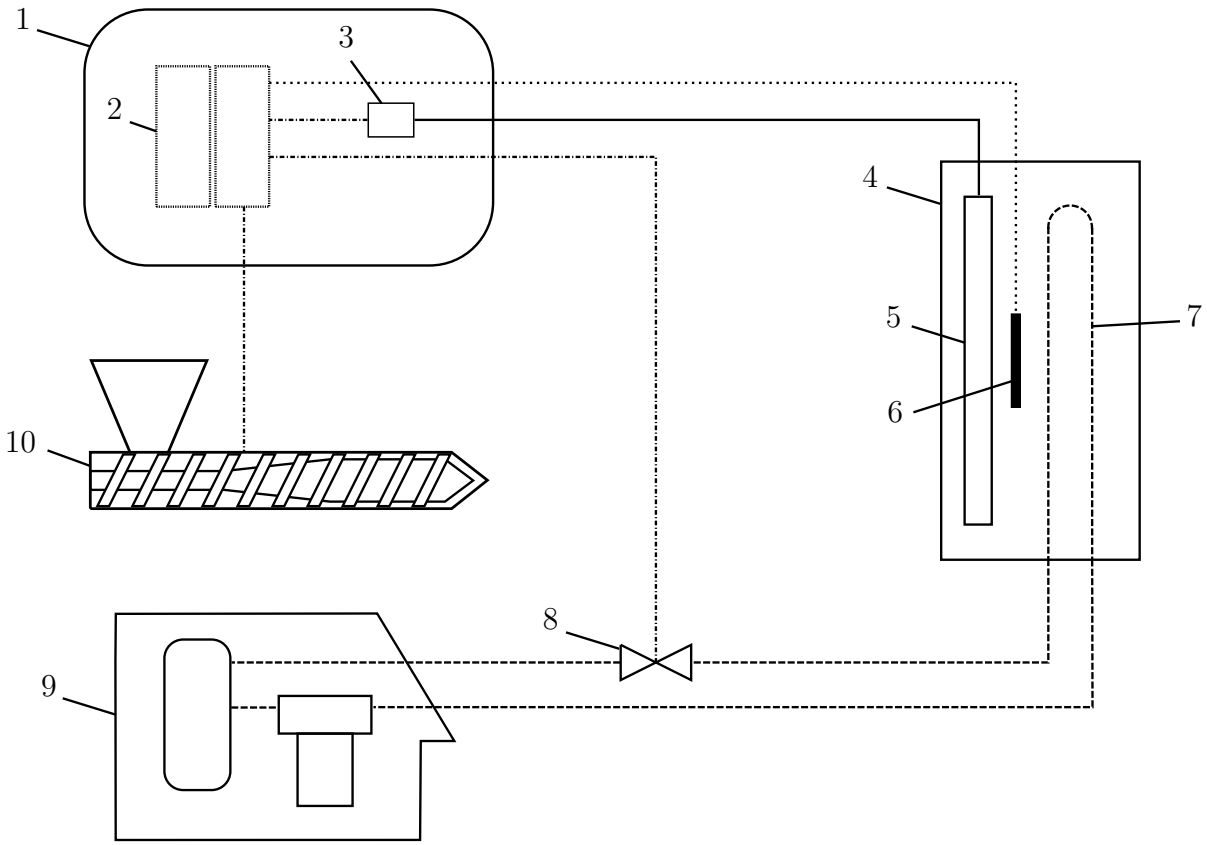

Bild 8.6: Schematischer Aufbau der Versuchsanlage zur Ansteuerung des variothermen Temperiersystems (1: Reglereinheit, 2: PID Regler, 3: Halbleiter-Relais, 4: Spritzgießwerkzeug, 5: Dickschichtheizelement, 6: Thermoelement, 7: Kühlkreislauf, 8: Schaltbares Wasserventil, 9: Temperiergerät, 10: Spritzgießmaschine)

Durch die Spritzgießmaschine bekommt der Regler die Information für die Umschaltung zwischen den Sollwerten. Zusätzlich teilt der Regler der Spritzgießmaschine mit, wann der Messwert den Sollwert erreicht. Dafür sind drei Signale notwendig:

- Start Heizen
  Der Regler erhält das Signal, den oberen Sollwert schnell anzufahren, zum Beispiel nach dem Auswerfen des Formteils aus dem vorangegangen Zyklus.
- Start Einspritzen
  Sobald die oberen Werkzeugwandtemperatur erreicht ist, soll die Spritzgießmaschine die Werkzeugkavität füllen.
- Start Kühlen
  Der Einspritzvorgang ist abgeschlossen, der Regler soll die untere Werkzeugwandtemperatur anfahren.

Durch den Einsatz von Halbleiterrelais können kurze, präzise Schaltzeiten erzielt werden, ohne dass Prellvorgänge auftreten. Für die Ansteuerung der Kühlung werden Magnetventile eingesetzt. Dabei ist eine Mindesteinschaltdauer von 0,2 s zu beachten, da die Magnetspule eine Schalthysterese hat.

8.3 Thermisches Verhalten der Formeinsätze

8.3.1 Heizelement im Werkzeug

Mit den Dickschichtheizelementen soll eine dynamische Erwärmung der Werkzeugwand bei einer homogenen Temperaturverteilung zum Zeitpunkt des Einspritzens erreicht werden. Deshalb werden zwei unterschiedliche Einbauvarianten untersucht. Zur Charakterisierung des Verhaltens im Werkzeug wird das Dickschichtheizelement auf ein 6 mm dickes Substrat aufgetragen und wie in Kapitel 8.1.2 beschrieben, auf ein fluidisch temperiertes Kühlmodul geschraubt. Die sternförmige Kühlkanalstruktur ist mit einem 3 mm dicken Deckel verlötet. Dadurch ist die Kühlung 10 mm von der Werkzeugwand entfernt.

Temperaturwechseldynamik

In Bild 8.7 ist exemplarisch der Temperaturverlauf an der Werkzeugwand mit einer Wärmebildkamera aufgenommen worden. Des Weiteren ist das Temperatursignal des Thermoelements für die innere Heizzone dargestellt. Innerhalb von 10 s wird mit der installierten Heizleistung (Bild 8.5) bei einer Spannung von 230 V ein Temperatursprung von 20 °C auf 140 °C erreicht. Dies entspricht einer durchschnittlichen Aufheizrate von 12 K/s. Während dieser Aufheizphase werden die Kühlkanäle mit dem auf 20 °C temperiertem Wasser durchströmt.

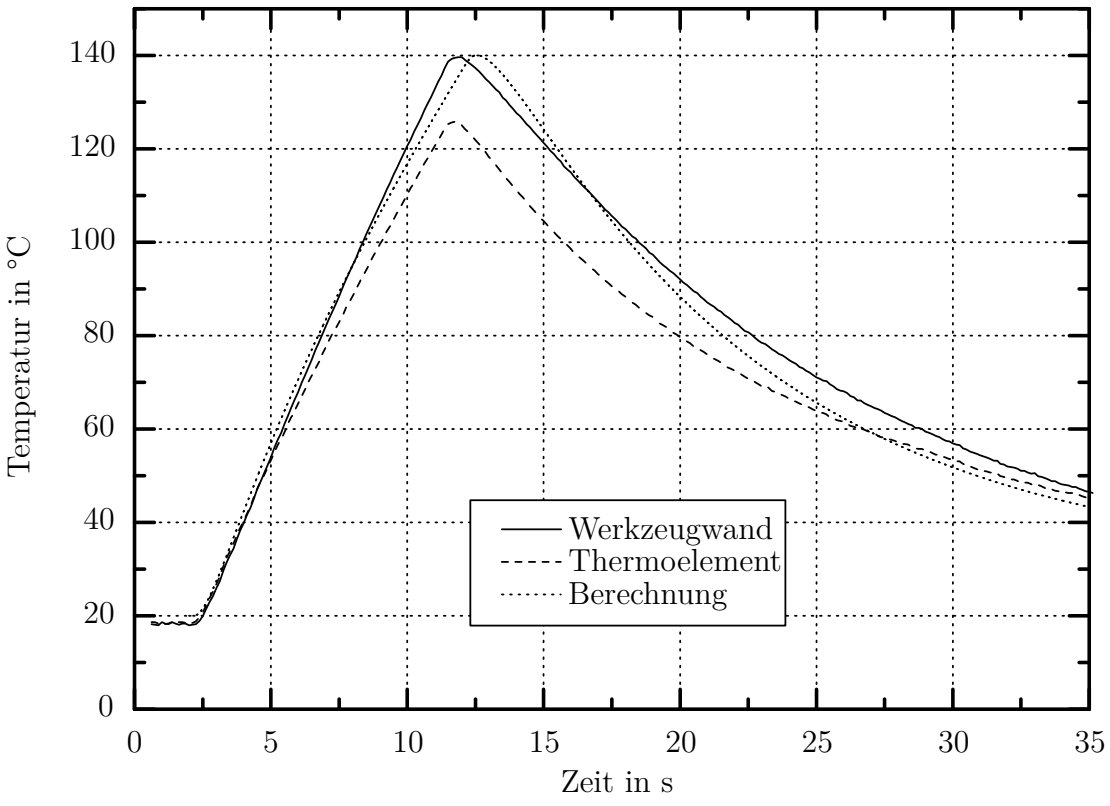

Bild 8.7: Gemessener und berechneter Temperaturverlauf an der Werkzeugwand und am inneren, düsenseitigen Thermoelement

Die gemessene Abweichung von 15 K nach dem Abschalten der Heizung ist durch den Wärmeübergang zur Mantelthermoelementspitze bedingt. Ferner ist in Bild 8.7 der berechnete Temperaturverlauf (gepunktete Linie) anhand der in Kapitel 6.1 aufgestellten Gleichungen dargestellt. Für die Berechnung wurde eine spezifische Heizleistung von 50 W/cm^2, eine Starttemperatur von 20 °C für alle Schichten und eine konstante Kühlwassertemperatur 3 mm hinter dem Heizelement angenommen.

Temperaturverteilung

Neben der Aufheizdynamik der Dickschichtheizelemente soll eine möglichst homogene Temperaturverteilung auf der Werkzeugwand erreicht werden. Die ermittelten Temperaturwerte der düsenseitigen Werkzeugwand nach einer Aufheizzeit von 10 s sind in Bild 8.8 dargestellt.

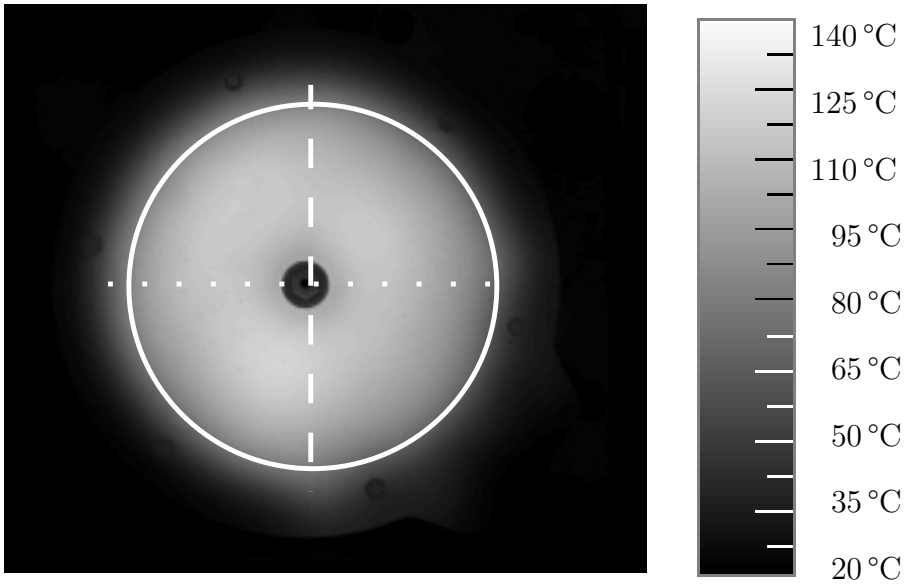

Bild 8.8: Temperaturverteilung auf dem düsenseitigen Formeinsatz (Formteildurchmesser entspricht dem weißen Kreis, der Temperaturverlauf der beiden weißen Linien ist in Bild 8.9 dargestellt)

Dabei wurde die Werkzeugwand ebenfalls innerhalb von 10 s mit dem in Bild 8.5 dargestellten und gemessenen Verlauf der Heizleistung von 20 °C auf 140 °C erwärmt. In Bild 8.9 sind die Temperaturwerte entlang der horizontal gepunkteten und vertikal gestrichelten weißen Linien aus Bild 8.8 aufgeführt. Der Temperaturunterschied im inneren Bereich (- 40 mm bis 40 mm) beträgt $\Delta\vartheta_W = 5$ K. Im Randbereich der beheizten Fläche ist dagegen ein weiteres Absinken der Temperatur ($\Delta\vartheta_W = 10$ K) festzustellen, da hier der Wärmeabfluss in das umliegende Spritzgießwerkzeug nicht kompensiert wird. Weiterhin ist in der gemessenen Temperaturverteilung zu erkennen, dass nur ein begrenzter Bereich der formgebenden Werkzeugwand (Formteildurchmesser 120 mm, weißer Kreis), variotherm temperiert wird.

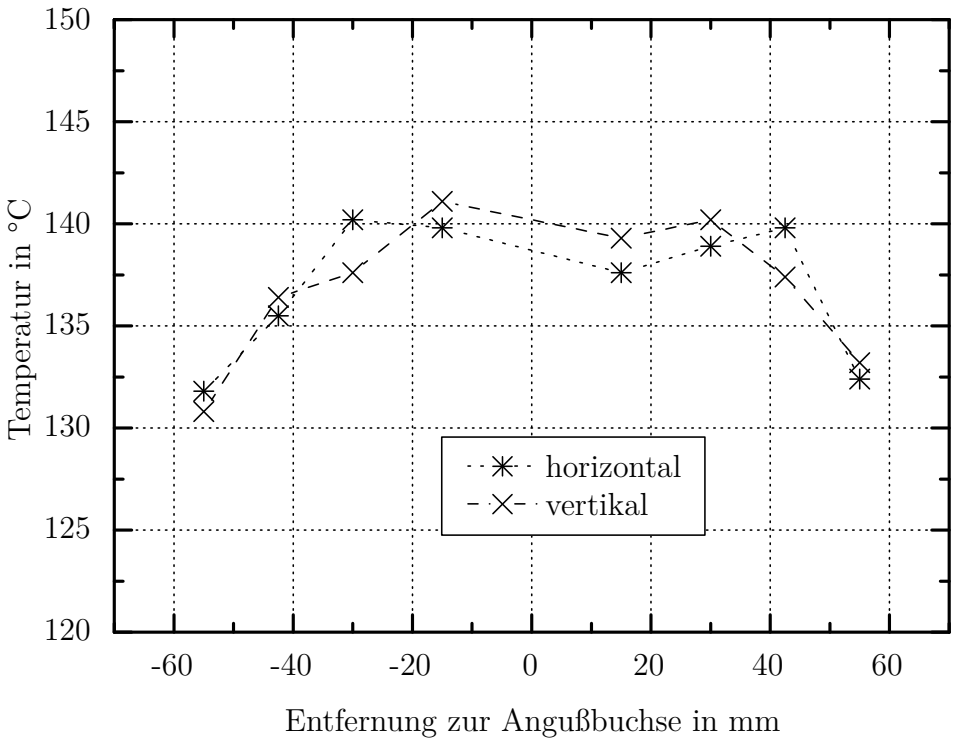

Bild 8.9: Temperaturverteilung auf der düsenseitigen Werkzeugwand in zwei unterschiedlichen Richtungen (horizontal gepunktete und vertikal gestrichelte weiße Linie aus Bild 8.8)

Abgleich der Temperaturverläufe

Sind mehrere Heizelemente in einem Spritzgießwerkzeug verbaut, können Unterschiede im Aufheiz- und Abkühlverhalten auftreten. Diese Unterschiede, insbesondere in der Temperaturwechseldynamik, sind auf Fertigungstoleranzen der Heizelemente oder durch Wärmeabflüsse in das umliegende Werkzeug zurückzuführen.

Mit einer Anpassung der Temperaturverläufe ist eine gleichmäßige Erwärmung und Abkühlung erreichbar. Dazu wird die Heiz- beziehungsweise Kühlleistung der schnellsten Temperierzonen bis zur Annäherung der Temperaturverläufe angepasst. In der Aufheizphase wird dadurch weniger Heizleistung umgesetzt. Die Abkühlung des hergestellten Formteils ist gleichmäßiger und der Verzug geringer.

Eine derartige Anpassung der Temperaturverläufe wird repräsentativ mit den beiden düsenseitigen Dickschichtheizelementen durchgeführt. Das Mantelthermoelement für die äußere, düsenseitige Heizzone misst im Abstand von 55 mm zur zentralen Angussbuchse, während das innere Mantelthermoelement 25 mm davon entfernt ist. Die Temperaturverläufe der beiden düsenseitigen Heizzonen sind bei gleichen Reglereinstellungen (Tabelle 8.1) in Bild 8.10 und Bild 8.11 dargestellt. Zusätzlich sind hierin die vorgegebenen Sollwerte und die Stellgrade für die Kühl- und Heizleistung abgebildet. Dabei ist zu erkennen, dass am äußeren Heizelement die maximal mögliche Heizleistung für 8 s eingeschaltet ist, bevor durch den Regler der Stellgrad abgesenkt wird. Am inneren Heizelement kann bereits nach 4 s ein Abfallen des Stellgrads festgestellt werden.

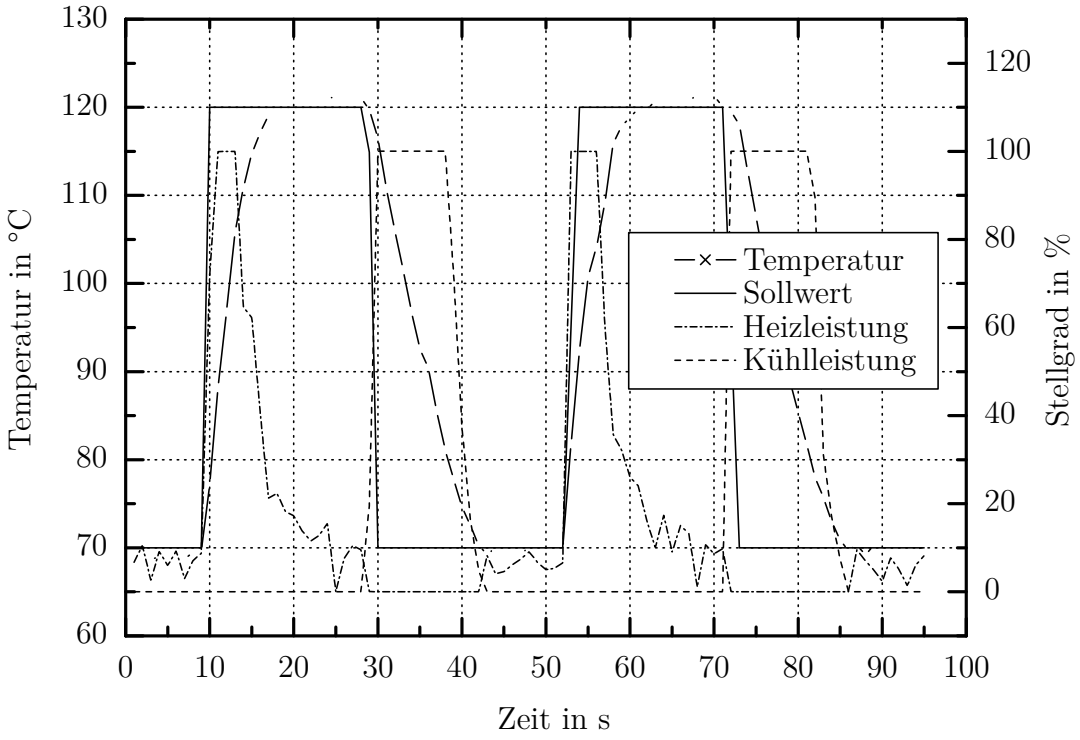

Bild 8.10: Temperaturwechseldynamik und Stellgrade der inneren, düsenseitigen Temperierzone

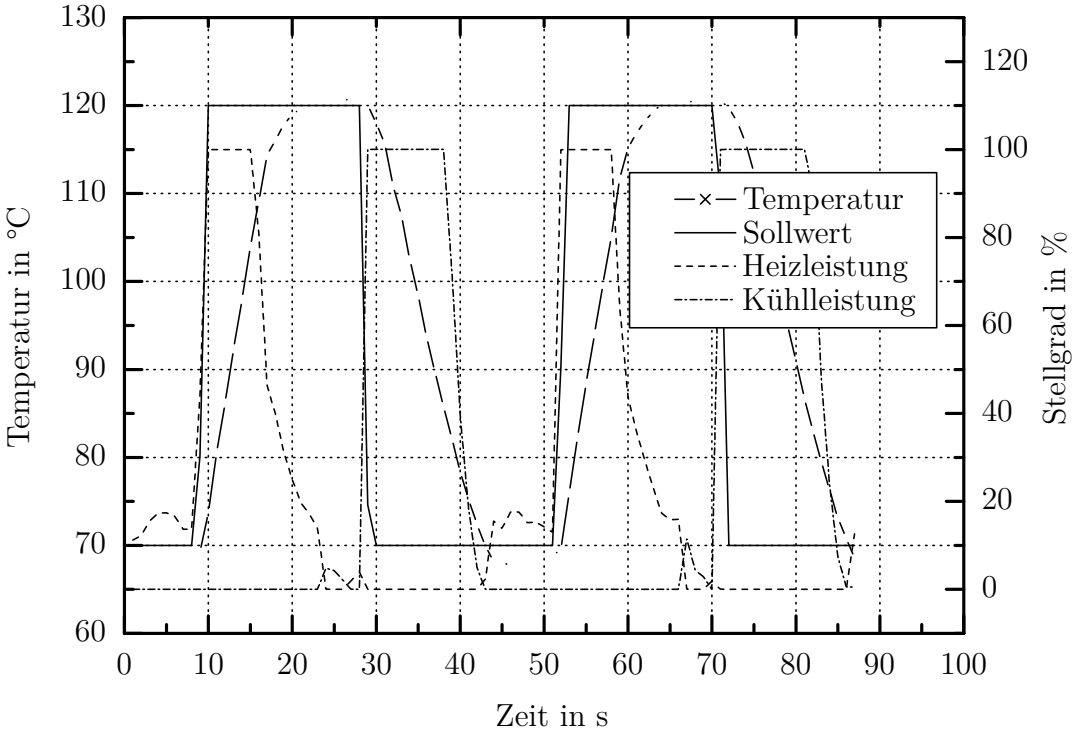

Bild 8.11: Temperaturwechseldynamik und Stellgrade der äußeren, düsenseitigen Temperierzone

Tabelle 8.1: Reglereinstellung für die in Bild 8.10 und Bild 8.11 dargestellten Temperatursprünge von 70 °C auf 120 °C (Ermittelt durch die reglerspezifische Selbstoptimierung)

Bezeichnung	**Wert**
Proportionalband K_B in K	14
Integralzeit T_N in s	18
Differentialzeit T_V in s	1
Grenzwerte Stellgrad Heizleistung $H_\mathrm{min}/H_\mathrm{max}$ in %	0/100
Grenzwerte Stellgrad Kühlleistung $K_\mathrm{min}/K_\mathrm{max}$ in %	0/100

Die innere Temperierzone hat die obere Temperatur nach 6 s erreicht, während die äußere Temperierzone für den selben Temperatursprung 11 s erfordert. Diese Abweichung entsteht durch den Wärmeabfluss ins umliegende Werkzeug. Die Reduzierung der Heizleistung kann mit einer geringeren Versorgungsspannung des inneren Dickschichtheizelementes oder durch Begrenzung des PWM-Signals erfolgen. In Bild 8.12 ist die Abstimmung der beiden Temperierzonen durch Begrenzung des Heizsignals auf einen maximalen Stellgrad von 70 % dargestellt. Dadurch wird die Temperaturdifferenz von 15 K auf 1 K minimiert. Die Kühlleistung kann über eine Drossel im Wasserkreis oder ebenfalls durch eine Limitierung des maximalen Stellgrads für die Kühlung reduziert werden. Bei einer Reduktion der Einschaltdauer auf 50 % kann die maximale Abweichung von 10 K zwischen den beiden Temperaturkurven auf 3 K verkleinert werden.

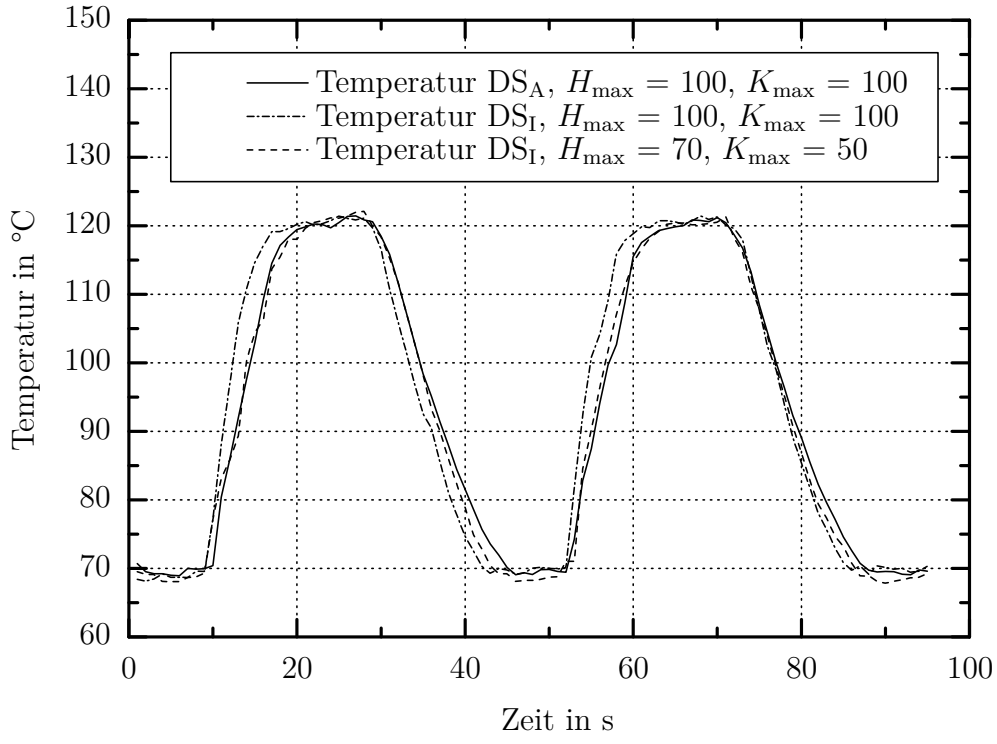

Bild 8.12: Abstimmung des inneren auf den äußeren düsenseitigen Temperaturverlaufs auf eine einheitliche Aufheiz- und Abkühlphase

Wiederholgenauigkeit der Temperaturverläufe

Für einen reproduzierbaren, variothermen Spritzgießprozess ist, wie in Kapitel 5.1 beschrieben, ein vergleichbarer Temperaturverlauf des Temperaturwechselsystems entscheidend. Die Zeiten zum Erreichen der oberen und der unteren Werkzeugwandtemperatur sowie das Anfahren der eingestellten Sollwerttemperatur müssen annähernd gleich sein. Dadurch wird erreicht, dass der Spritzgießprozess in einem quasi-stationären Betrieb ist und Bauteile mit reproduzierbaren Eigenschaften hergestellt werden. In Bild 8.13 sind verschiedene Temperaturverläufe nach unterschiedlichen Fertigungszyklen dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass der Wechsel zwischen den beiden Sollwerten in vergleichbaren Zeiten durchgeführt wird. Die maximale Abweichung zwischen den drei Temperaturverläufen zu den Umschaltzeitpunkten beträgt 5 K.

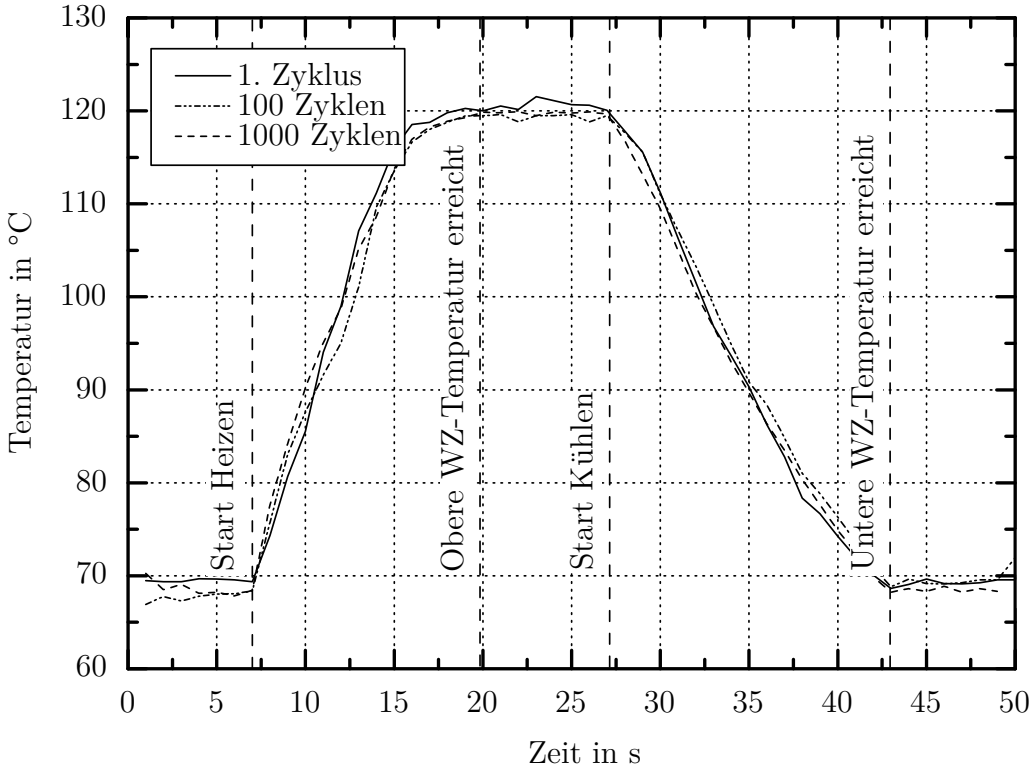

Bild 8.13: Vergleich des Temperaturverlaufs am inneren, düsenseitigen Heizelement nach mehreren Zyklen

8.3.2 Dickschichtheizelement als Werkzeugwand

Das Dickschichtheizelement wird auf ein 6 mm dickes Substrat aufgetragen und, wie in Kapitel 8.1.2 beschrieben, auf ein mit Wasser temperiertes Kühlmodul geschraubt. Dadurch ist die Kühlung 7 mm von der Werkzeugwand entfernt. Der Abstand der beiden Mantelthermoelementspitzen zur Werkzeugwand wird dabei variiert.

Temperaturwechseldynamik

In Bild 8.14 ist der Temperaturverlauf an der Werkzeugwand, gemessen mit einer Wärmebildkamera, im Vergleich mit verschiedenen Mantelthermoelement-Messwerten für die innere Heizzone dargestellt. Dabei wurde der Abstand der Mantelthermoelementspitze zum Dickschichtheizelement variiert. Innerhalb von 10 s wird mit der installierten Heizleistung (vgl. Bild 8.5) bei einer Spannung von 230 V ein Temperatursprung von 20 °C auf 165 °C erreicht. Dies entspricht einer durchschnittlichen Aufheizrate von 22,5 K/s. Während dieser Aufheizphase fand kein Wasserdurchfluss in den Kühlkanälen statt. Nach Ablauf der Aufheizzeit von 10 s ist durch die Kühlkanäle das auf 15 °C temperierte Wasser geströmt.

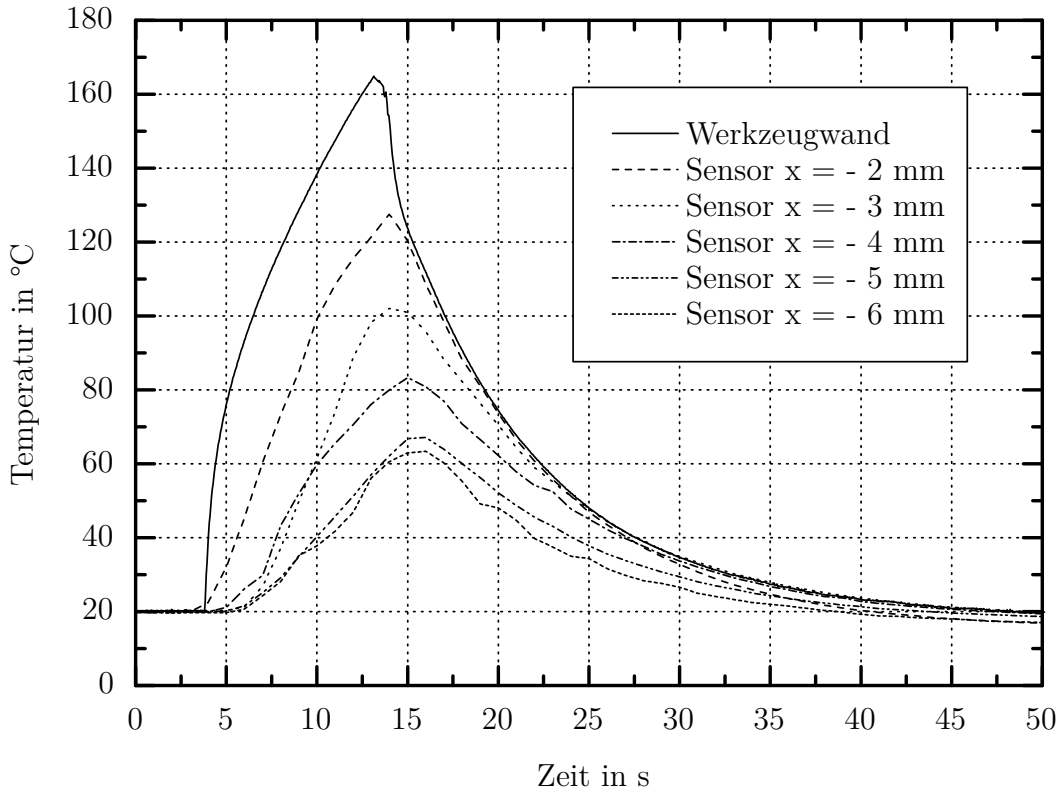

Bild 8.14: Gemessener Temperaturverlauf an der Werkzeugwand mit einer Wärmebildkamera bei unterschiedlichen Abständen des inneren, düsenseitigen Mantelthermoelement

Zu erkennen ist, dass mit geringerem Abstand der Mantelthermoelementspitze zur formgebenden Werkzeugwand die für den Spritzgießprozess relevante Werkzeugwandtemperatur besser erfasst wird. Die Einstellung einer Sollwerttemperatur bei einer Regelung ist bei einem geringen Abstand näher an der tatsächlichen Werkzeugwandtemperatur.

Temperaturverteilung

Neben der Aufheizdynamik der Dickschichtheizelemente soll eine homogene Temperaturverteilung an der Werkzeugwand erreicht werden. Die ermittelten Temperaturwerte der

düsenseitigen Werkzeugwand sind in Bild 8.15 nach einer Aufheizzeit von 10 s dargestellt. Zur Messung der Temperaturverteilung an der Werkzeugwand wurde der formteilbildende Werkzeugwandbereich mit Graphit eingesprüht. Der Temperaturunterschied auf der Werkzeugwand ist gering ($\Delta\vartheta_{\mathrm{W}} < 5$ K) und ein Absinken der Temperatur am Formteilrand ist nicht zu erkennen.

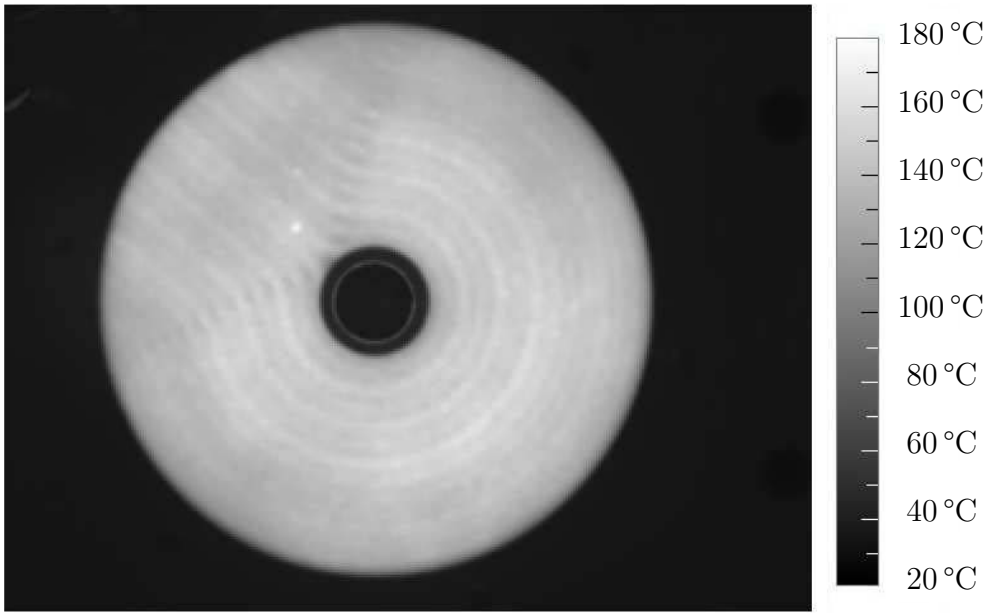

Bild 8.15: Wärmebild der Werkzeugwand nach einer Heizzeit von 10 s und einer spezifischen Heizleistung von 50 W/cm^2 für ein Dickschichtheizelement direkt als Werkzeugwand

Der Heizleiter des Dickschichtheizelementes ist 0,6 mm (Isolationsschicht und Schutzmetallisierung) von der eigentlichen Werkzeugwand entfernt. Dadurch sind im Wärmebild (Bild 8.15) direkt die Heizleiterbahnen beim Aufheizprozess zu sehen. Die Temperaturunterschiede, die auf der Werkzeugwand gemessen wurden, entstanden durch die nicht beheizten Zwischenräume der einzelnen Heizleiterbahnen ($\Delta\vartheta_W < 5$ K).

9 Erkenntnisse aus der Temperierung mit Widerstandheizelementen

Die Ansteuerung der Heizelemente wurde mit verschiedenen Reglern durchgeführt. Dabei konnte mit einem PID-Regelalgorithmus ein optimales Ergebnis erzielt werden. Ist der Aufbau des Reglers bekannt, kann die Einstellung der dafür notwendigen Regelparameter nach verschiedenen Verfahren erfolgen. Ferner können spezielle Temperaturregler eingesetzt werden, die ebenfalls einen PID-Algorithmus verwenden. Eine direkte Einstellung der PID-Werte ist meist nicht gegeben. Die Einstellung der einzelnen PID-Regelanteile erfolgt über systemspezifische Parameter.
Die Temperaturregelung wird maßgeblich durch den Abstand des Mantelthermoelements zur formgebenden Werkzeugoberfläche beeinflusst. Für einen reproduzierbaren, variothermen Spritzgießprozess ist das Mantelthermoelement oberflächennah zu integrieren. Dadurch wird eine adäquate Wiedergabe der Werkzeugwandtemperatur erzielt. Zudem kann die Heizelementtemperatur mit einem weiteren Mantelthermoelement als Temperaturschutz überwacht werden.
Nach dem Füllen der Kavität wird ein unteres Temperaturniveau an der Werkzeugwand angestrebt. Dafür ist eine Kühlung hinter der Widerstandsheizung erforderlich. Für die Abkühlung können verschiedene Systeme eingesetzt werden. Unter der Vorraussetzung, dass das Heizelement oberflächennah verbaut ist und die Temperatur im Kühlmodul konstant gehalten werden kann, hat diese einen geringen Einfluss auf die Zykluszeit. Dagegen wird die Zykluszeit vor allem durch den variothermen Temperatursprung beeinflusst. Bei dickwandigen Bauteilen ist, mit einem entsprechenden variothermen Temperatursprung, eine Verkürzung der Zykluszeit gegenüber einem vergleichbaren isothermen Spritzgießprozess erreicht worden (Kapitel 6.4.2). Unter diesen Voraussetzungen konnte mit den beiden untersuchten Heizelementtypen ein reproduzierbarer und präziser Temperatursprung umgesetzt werden.

9.1 Keramische Heizungen

In Kapitel 7 wurden konstruktive Varianten für den Einbau von keramischen Heizelementen in ein Spritzgießwerkzeug ausführlich beschrieben. Dabei wurde verdeutlicht, dass mit den konzipierten keramischen Heizelementen in Verbindung mit konturangepassten Kühlkanälen eine hochdynamische variotherme Temperierung umsetzbar ist. Die mittels

der durchgeführten Versuche erschlossenen Restriktionen müssen bei einer zukünftigen Serienanwendung berücksichtigt werden.

In einem Versuch mit dem entwickelten keramischen Heizelement wurde bereits nach 44 Zyklen ein Bruch des Heizleiters festgestellt. In Bild 9.1 ist die Bruchfläche abgebildet. Bei näherer Betrachtung dieser Bruchfläche wurden Poren in der Keramik festgestellt, die bei der Herstellung nicht vollständig beseitigt werden konnten und infolge der Kerbwirkung zur Rissentstehung und anschließend zum Materialversagen führten.

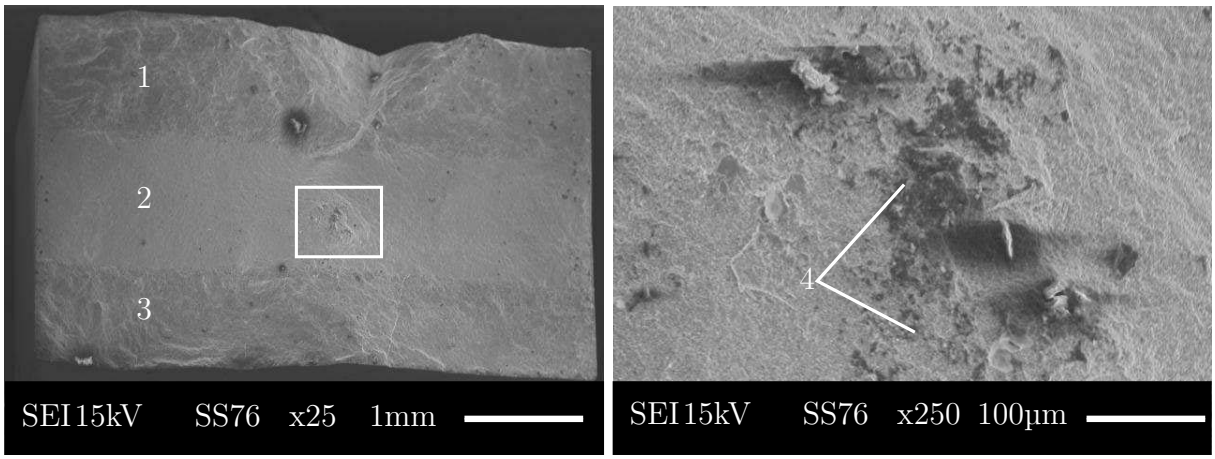

Bild 9.1: Aufnahmen mit einem Rasterelektronenmikroskop eines gebrochenen Keramikheizelements, links Bruchfläche, rechts Vergrößerung der weiß umrahmten Fläche (1: Isolation, 2: Heizschicht, 3: Isolation, 4: Poren)

Weiterer Optimierungsbedarf stellte sich bei der Kontaktierung des keramischen Heizleiters heraus. Der in Bild 9.2 dargestellte elektrische Kontakt, wurde durch Aktivlöten hergestellt und versagte nach neun Spritzgießzyklen. Bei den variothermen Temperierzyklen wurde eine hohe, spezifische Heizleistung von 100 W/cm^2 eingesetzt. Dadurch entstand im Kontakt schneller Wärme, als dass diese abgeführt werden konnte. Dies hatte ein „Entlöten“ und einen Kurzschluss zum Spritzgießwerkzeug zur Folge (Bild 9.2 rechts).

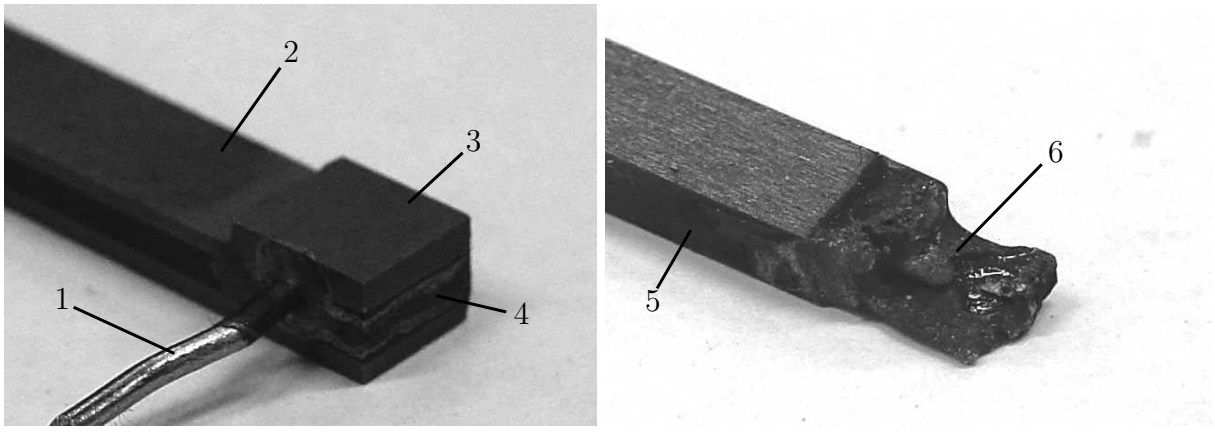

Bild 9.2: Kontaktierung eines keramischen Heizelementes, links intakter, gelöteter Kontakt, rechts Kontakt durch einen Kurzschluss zerstört (1: Nickeldraht, 2: Heizleiter, 3: Keramikplättchen, 4: Lötstelle, 5: Heizleiter, 6: Bereich des Kurzschlusses)

Damit Schädigungen des keramischen Heizelementes vermieden werden beziehungsweise der variotherme Spritzgießprozess sicher ablaufen kann, ist folgendes zu beachten:

- Wird das keramische Heizelement in eine Tasche im Spritzgießwerkzeug eingepasst, muss gewährleistet sein, dass die auftretende Verformung durch den Werkzeuginnendruck die Belastungsgrenze der Keramik nicht überschreitet. Deshalb muss die Taschentiefe, in welche das Heizelement eingelegt wird, ein Aufmaß von 15 µm bis 20 µm in Bezug auf die Heizelementdicke haben. Darüber hinaus muss durch einen steifen Werkzeugaufbau eine geringe Durchbiegung der formgebenden Werkzeugwand gewährleistet werden.
- Das keramische Heizelement darf nicht punktuell mit der gesamten Schließkraft belastet werden. Die in der Heizphase eingebrachte Wärme führt zu einer Wärmeausdehnung des gesamten Formeinsatzes. Die Auswirkungen auf die Formeinsatzhöhe führen dazu, dass die Schließkraft nicht mehr durch das umliegende Stammwerkzeug abgestützt wird, sondern durch den Formeinsatz. Die auftretenden mechanischen Spannungen können die Belastungsgrenze der Keramik überschreiten. Daher muss der gesamte Formeinsatz konstruktiv auf einen bestimmten, angestrebten Temperatursprung abgestimmt werden, so dass die Abstützung durch das umliegende Stammwerkzeug erfolgt.
- Zur Verbesserung der Tempraturhomogenität und der mechanischen Stabilität ist der Herstellungsprozess des keramischen, plattenförmigen Halbzeugs weiter zu optimieren. Geringe Schwankungen in der Verteilung des spezifischen elektrischen Widerstandes über die Fläche der keramischen Platte führen zu einer unterschiedlichen Wärmeentwicklung. Die Entstehung von Poren und Kerben, welche besonders die mechanische Belastungsgrenze verringern, ist durch eine materialgerechte Fertigung zu reduzieren.
- Zur Isolation des keramischen Heizelementes sind Platten aus Si_3N_4 zu verwenden. Die stoffschlüssige Verbindung mit dem leitfähigen Si_3N_4/TiN führt zu einem besseren, thermischen Kontakt. Isolationen aus hochtemperaturbeständigen Kunststofffolien sind zu vermeiden, da deren geringe Biege- und Druckfestigkeit einen Bruch des Heizelementes bei Belastung durch den Werkzeuginnendruck zur Folge haben.
- Für die Bearbeitung des keramischen Halbzeugs sind Verarbeitungsverfahren wie Erodieren oder Laserbearbeitung, aufgrund der Mikrorissbildung auf der Schnittfläche, ungeeignet. Bei der Bearbeitung mit einem Wasserstrahl oder durch Drahtsägen werden weitgehend mikrorissfreie Schnittkanten erzeugt.
- Der keramische Heizleiter ist durch einen Aktivlotprozess elektrisch zu kontaktieren. Dafür kann eine Nickelbuchse in eine Bohrung im Heizleiter oder ein Nickeldraht mit einem Keramikplättchen direkt auf den Heizleiter gelötet werden. Lösbare Verbindungen sind aufgrund des hohen Übergangswiderstandes zu vermeiden.

Werden die beschriebenen Punkte bei der Auslegung und beim Zusammenbau berücksichtigt, ist mit dem keramischen Heizelement ein hochdynamischer, variothermer Spritzgießprozess erreichbar. Mit dem in Kapitel 7 beschriebenen Demonstrationswerkzeug konnte

zum Beispiel ein Dauerlauf von 10 000 Spritzgießzyklen bei einem variothermen Temperatursprung von 60 °C auf 140 °C, einem Werkzeuginnendruck (p_W) von 400 bar (Polycarbonat) und einer Zykluszeit (t_Z) von 25,2 s durchgeführt werden. Anschließend war kein Bruch bzw. eine Schädigung des Heizelementes und des Formeinsatzes festzustellen.

9.2 Dickschichtheizelemente

Bei der Umsetzung der beschriebenen Konzeption eines Dickschichtheizelementes in einem Spritzgießwerkzeug (siehe Kapitel 8) konnten verschiedene material und konstruktive Fragestellungen untersucht werden. Es wurde veranschaulicht, dass mit den entwickelten Dickschichtheizelementen ein hochdynamischer variothermer Temperaturwechsel und gleichzeitig eine homogene Temperaturverteilung auf der formgebenden Werkzeugwand erreicht wird. Während der Umsetzung wurde festgestellt, dass der direkte Kontakt der harten Al_2O_3 Isolationsschicht mit einem Werkzeugeinsatz zu vermeiden ist (Bild 9.3 rechts oben).

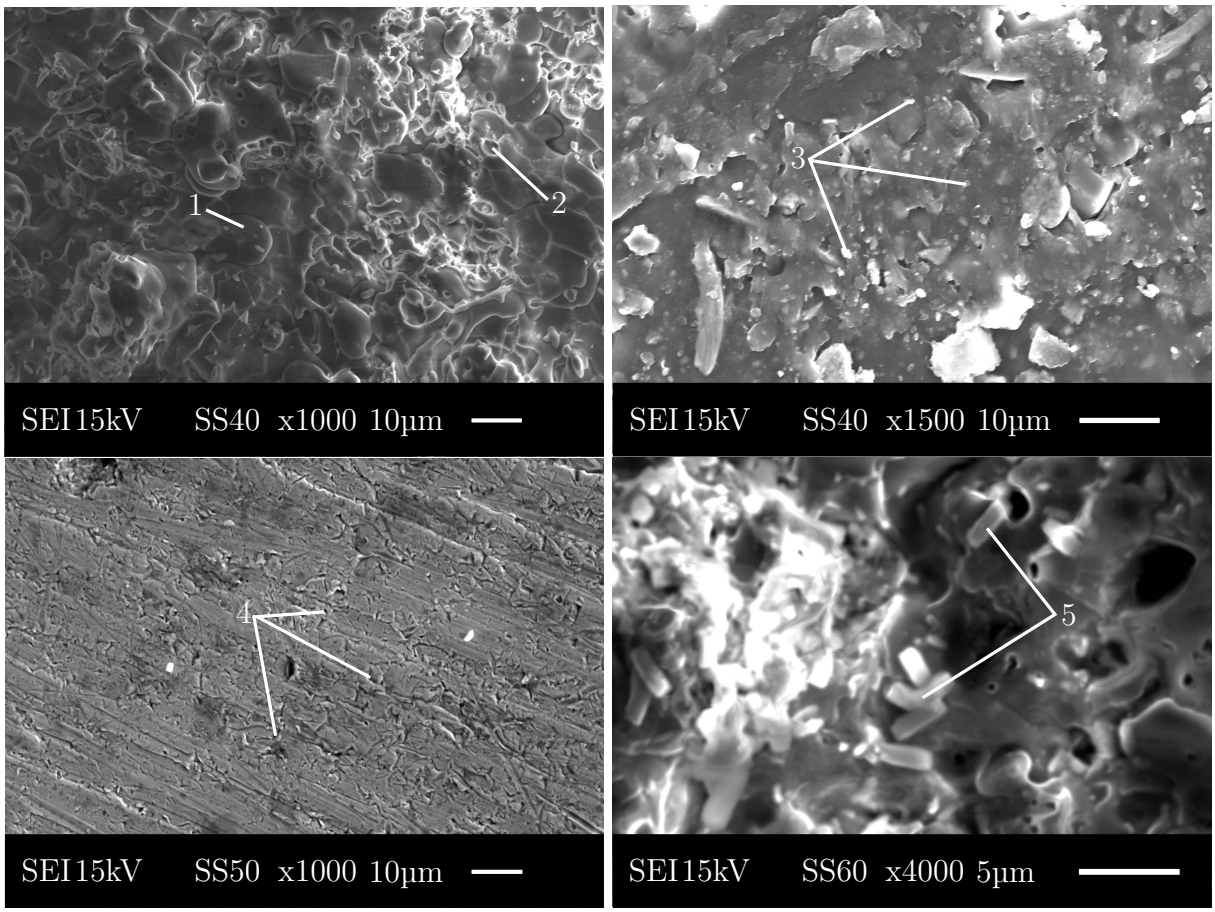

Bild 9.3: Aufnahmen mit einem Rasterelektronenmikroskop an Dickschichtheizelementen, links oben Oberfläche einer geschliffenen Al_2O_3-Oberfläche, rechts oben geschliffene Al_2O_3-Oberfläche nach 231 Spritzgießzyklen, links unten geschliffene Schutzmetallisierung, rechts unten $NiSO_4$-Kristalle in der Al_2O_3-Isolationsschicht (1: durch das Flammspritzen deformierter Partikel in der Al_2O_3-Isolationsschicht, 2: Poren, 3: Stahlpartikel, 4: Poren, 5: $NiSO_4$ - Kristalle)

Die Wärmeausdehnung der zyklischen Erwärmung des Dickschichtheizelementes führt zu einer Relativbewegung zwischen keramischer Isolationsschicht und metallischem Werkzeugeinsatz. Die dabei abgetragenen Stahlpartikel des Werkzeugeinsatzes sind zwischen den beiden Schichten und werden durch die zyklische Belastung in die poröse Isolationsschicht gedrückt und beeinträchtigen die elektrische Isolationswirkung, so dass das Heizelement durch einen Überschlag zerstört wird. Anhand einer EDX-Analyse konnten die Stahlpartikel (3) des Werkzeugeinsatzes sowohl auf, als auch in der Isolationsschicht nachgewiesen werden (Bild 9.4 oben).

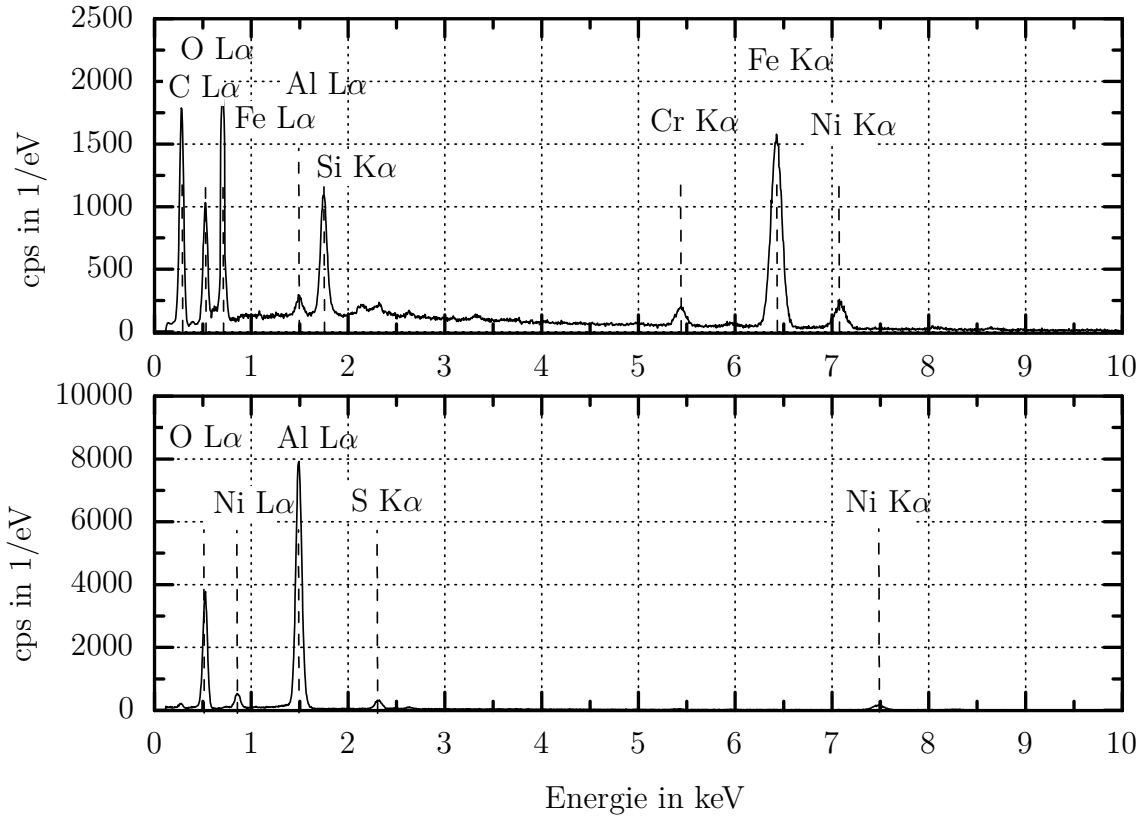

Bild 9.4: EDX-Analysen der in Bild 9.3 hervorgehobenen Bereiche (oberes Diagramm: Position 3, unteres Diagramm: Position 5)

Daher ist die Al_2O_3 Isolationsschicht, die einen beweglichen Kontakt mit einem Werkzeugeinsatz bildet, durch eine metallische Zusatzschicht zu schützen. Dadurch wird der abrasive Abtrag durch die harte Isolationsschicht verhindert und zudem die Überschleifbarkeit des Dickschichtheizelementes verbessert. Die Oberflächenstruktur einer überschliffenen, metallischen Schutzschicht ist in Bild 9.3 (links unten) dargestellt. Daran ist die offenporige Struktur (4) der gespritzten Schicht deutlich zu erkennen. Der direkte Einsatz als Werkzeugwand in einem Spritzgießwerkzeug ist möglich, jedoch können keine hochwertigen Oberflächen, wie die sogenannte „Klavier-Lack-Optik“, erreicht werden. Damit glatte Oberflächen entstehen, ist eine entsprechende galvanische Beschichtung der Dickschichtheizelemente erforderlich. Dazu müssen die Dickschichtheizelemente in ein Elektrolyt getaucht werden, welches die offenen Poren der hergestellten Schichten auffüllt.

Durch den galvanischen Abscheideprozess können verschiedene Metalle auf das Dickschichtheizelement aufgebracht werden. Bei der Auswahl eines geeigneten Metalls ist auf dessen Wärmeausdehnung zu achten. Wird zum Beispiel Chrom auf dem Heizelement abgeschieden, führt der geringere Wärmeausdehnungskoeffizient zu einem Ablösen des gesamten Heizelementes vom Substrat (Bild 9.5) und zur Bildung von Rissen, die als sogenannte „Hammerschlagoptik“ bekannt sind. Nickelschichten weisen keine Ablösung vom Stahlsubstrat auf, da der Wärmeausdehnungskoeffizient zum Stahlsubstrat nahezu identisch ist. Beim Abscheiden der galvanischen Schicht wird dieses Elektrolyt in den Heizelementschichten eingeschlossen und mindert den Isolationswiderstand, so dass keine ausreichende elektrische Isolationswirkung vorhanden ist (vgl. [Böh11]).

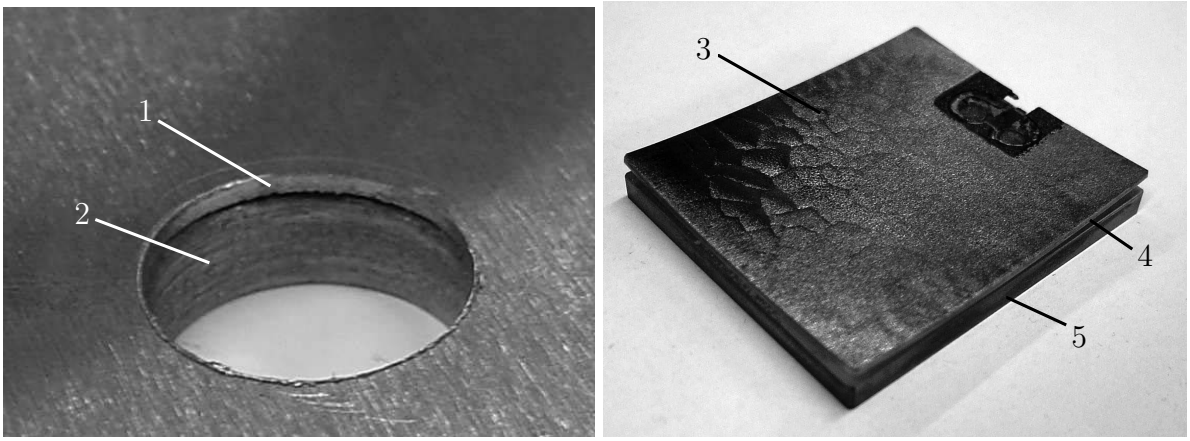

Bild 9.5: Schädigungen an Dickschichtheizelementen, links Ablösung des Schichtverbunds vom Substrat, rechts Ablösung und Spannungsrisse eines verchromten Heizelementes (1: Chromschicht, 2: Substrat, 3: Spannungsrisse, 4: Chromschicht, 5: Substrat)

Bei der Abscheidung einer galvanischen Nickelschicht entstehen Nickelsulfat-Salze, welche elektrisch leitfähig sind und einen Kurzschluss verursachen (Bild 9.3 rechts unten und Bild 9.4 unten). Daher sind die Poren vor dem Galvanisieren mit einem nicht leitfähigen, keramischen Füller zu versiegeln.

Für den Einbau eines Dickschichtheizelementes zur hochdynamischen, variothermen Temperierung sind deshalb folgende Richtlinien zu beachten:

- Die Abstützung der Schließkraft ist weitgehend über das umliegende Stammwerkzeug zu gewährleisten. Wird die Schließkraft punktuell über das Dickschichtheizelement abgestützt, kann dieses aufgrund zu hoher mechanischer Spannungen in der Isolationsschicht zerstört werden.
- Es ist eine Höhenabstimmung des Formeinsatzes für einen vorgegebene Temperatursprung (wie bei den keramischen Heizelementen) zu berücksichtigen. Bei der Erwärmung dehnt sich der variotherm temperierte Formeinsatz aus und die Schließkraft kann partiell auf das Dickschichtheizelement wirken. Das Dickschichtheizelement wird durch die entstehenden, hohen, lokalen mechanischen Spannungen beschädigt oder zerstört.

- Ein Versiegeln der Porositäten mit einem nicht leitfähigen keramischen Füller ist vorzunehmen, damit keine Kühl- oder Schmierstoffe durch eine mechanische Bearbeitung beziehungsweise ein Elektrolyt bei einem galvanischen Beschichtungsverfahren in die Isolation eindringen kann.
- Bei einer galvanischen Beschichtung des Heizelementes ist ein Material mit einem passenden Wärmeausdehnungskoeffizient, wie zum Beispiel Nickel, einzusetzen.
- Die elektrische Kontaktierung mit Federkontakten ist zwar möglich, dennoch werden mit einem geschweißten Kontakt geringere Übergangswiderstände erreicht.

Mit dem in Kapitel 8 beschriebenen Werkzeug wurde zum Beispiel unter Berücksichtigung der beschriebenen Randbedingungen ein Dauerlauf von 10 000 Zyklen bei einem variothermen Temperatursprung von 70 °C auf 120 °C, einem maximalen Werkzeuginnendruck (p_W) von 350 bar (Polypropylen) und einer Zykluszeit (t_Z) von 42,2 s erfolgreich durchgeführt.

9.3 Vergleich der entwickelten Heizelementarten

Mit den entwickelten Heizelementen ist bei einer entsprechenden konstruktiven, thermischen und elektrischen Auslegung eine schnelle Erwärmung der Werkzeugwand erreichbar. Heizelemente auf Basis elektrisch leitfähiger Keramiken (Si_3N_4/TiN) können konturnah im Spritzgießwerkzeug verbaut werden und erwärmen gezielt die notwendigen Bereiche im Werkzeug. Dadurch wird eine hohe Temperaturwechseldynamik durch eine sehr hohe Aufheizrate erzielt. Mit dieser Technologie können Werkzeugwandtemperaturen von 500 °C und mehr erreicht werden. Jedoch erfordert die Integration eines keramischen Heizelementes aufgrund der mechanischen Eigenschaften einen entsprechenden Werkzeugaufbau, bei welchem keine Biegungen auftreten (Bruchgefahr).
Die Dickschichtheizelemente können ebenfalls in einen Formeinsatz konturnah integriert werden. Mit diesen meist dünnen (< 1,0 mm) Heizelementen ist die Gestaltung einer einfach zu heizenden Kavitätsoberfläche durchführbar. Dadurch wird die zu temperierende thermische Masse verringert und die Aufheizdynamik gesteigert. Die maximal erreichbare Temperatur von 300 °C ist bei Dickschichtheizelementen geringer als bei keramischen Heizelementen.

Tabelle 9.1: Vergleich der entwickelten Heizelementarten [DBK+09a]

Keramisches Heizelement	**Dickschichtheizelement**
keramischer Heizleiter	metallischer Heizleiter
konturnahe Integration	konturfolgender Einbau
Temperaturbereich bis 500 °C	Temperaturbereich bis 300 °C
Spezifische Flächenleistungen bis 150 W/cm^2	Spezifische Flächenleistungen bis 90 W/cm^2
Heizelementgröße max. 120 cm^2	beheizbare Fläche bis 1 m^2

Je nach Anforderung kann aus wirtschaftlichen und technologischen Gründen zwischen den beiden Heizelementarten gewählt werden (Tabelle 9.1). Für höhere Werkzeugwandtemperaturen eignen sich keramische Heizelemente, während bei niedrigeren Werkzeugwandtemperaturen die Verwendung von Dickschichtheizelementen vorteilhaft ist. Ein weiterer Unterschied zwischen den beiden Heizelementarten besteht in der Größe der beheizbaren Flächen. Unter der Voraussetzung eines steifen Werkzeugaufbaus können nach dem heutigen Technologiestand keramische Heizelemente bis zu einer maximalen Größe von 120 cm^2 hergestellt werden. Diese Größe ist bedingt durch die Herstellung des plattenförmigen Halbzeugs. Ist die gewünschte, beheizte Fläche größer, müssen mehrere Heizelementsegmente verbaut werden.

Bei den Dickschichtheizelementen können Flächen mit einer Größe von bis zu 1 m^2 nur mit einer entsprechenden Anzahl einzelner Heizelemente erwärmt werden. Bei einer konstanten Spannungsquelle von 230 V liegt die Strombelastungsgrenze der Heizleiterbahn bei ca. 25 A. Deshalb kann ein einzelnes Dickschichtheizelement eine maximale Leistung von 5750 W abgeben, wodurch je nach gewünschter Flächenleistung die Größe der einzelnen Heizelemente definiert wird.

Darüber hinaus ist bei Dickschichtheizelementen aufgrund des Herstellungsverfahrens, Flamm- oder Plasmaspritzen, eine konturfolgende Beheizung von Freiformflächen besonders vorteilhaft. Dazu wird beispielsweise die zu erwärmende Freiformfläche beschichtet und der Heizleiter durch eine Laserbearbeitung strukturiert. Eine direkte Herstellung von komplexeren Freiformflächen ist mit einem keramischen Heizelement nicht möglich, da die ebenen, plattenförmigen Halbzeuge nachträglich einer beliebigen Freiformfläche nicht angepasst werden können.

10 Zusammenfassung und Ausblick

Bei der Verarbeitung von thermoplastischen Polymeren im Spritzgießprozess ist die richtige Wahl der Werkzeugwandtemperatur für die mechanischen und optischen Eigenschaften des herzustellenden Formteils entscheidend. Durch eine entsprechende Prozessgestaltung kann die Zykluszeit reduziert werden. Der Standardspritzgießprozess setzt überwiegend eine quasi-stationäre Werkzeugwandtemperatur voraus. Für spezielle Anwendungen, wie zum Beispiel die Abformung von nanostrukturierten Oberflächen, kann dieser Spritzgießprozess nicht zur Anwendung kommen.

Für derart anspruchsvolle Bauteile muss die Werkzeugwandtemperatur über die Dauer eines Spritzgießzyklus aktiv variiert werden. Diese Vorgehensweise wird als sogenannte variotherme Temperierung bezeichnet. In der Regel ist zu Beginn des variothermen Spritzgießprozesses, also vor dem Einspritzvorgang, die Werkzeugwandtemperatur deutlich erhöht. Nachdem die Kavität volumetrisch gefüllt ist, kann die Werkzeugwandtemperatur wieder auf ein unteres Temperaturniveau abgesenkt werden. Die hochdynamische variotherme Verarbeitung von vernetzenden Polymeren, wie diese beispielsweise bei der Herstellung von Faserverbundkonstruktionen eingesetzt werden, divergieren davon grundsätzlich. Über die Dauer der Formfüllung wird hier eine niedrige Werkzeugwandtemperatur angestrebt. Zur Beschleunigung der entscheidenden Vernetzungsreaktion wird nach der volumetrischen Formfüllung die Werkzeugwandtemperatur auf ein oberes Temperaturniveau angehoben.

Derzeit werden unterschiedliche Systeme zur Durchführung des Temperaturwechsels im Formnest eingesetzt. Am Häufigsten wird die Temperierung mit einem Wasser-Wasser-System angewendet, bei dem abwechselnd drucküberlagertes, kaltes und warmes Wasser durch konturangepasste Temperierkanäle fließt. Darüber hinaus sind Temperiersysteme mit einer Induktionsspule, einem Wärmestrahler oder unter Verwendung von Wasserdampf zu finden. Zur Abkühlung nutzen die genannten Systeme ebenfalls wasserdurchflossene, konturangepasste Kühlkanäle. Die derzeit eingesetzten Systeme weisen jedoch eine geringere Temperarturwechseldynamik oder einen hohen Einsatz von Ressourcen und Energie auf.

Die Durchführung eines schnellen, variothermen Temperatursprungs wurde in dieser Arbeit mit einer neuen Technik auf Basis einer elektrischen Widerstandsheizung umgesetzt und umfassend untersucht. Geeignet für den Einsatz in einem Spritzgießwerkzeug sind unter bestimmten Voraussetzungen keramische Heizungen und Dickschichtheizelemente. Mit diesen beiden Heizelementarten kann eine hochdynamische Erwärmung der Werkzeug-

wand erreicht werden. Die Kombination mit konturangepassten Kühlkanälen gewährleistet eine schnelle Abkühlung der Werkzeugwand. Dabei konnte rechnerisch nachgewiesen werden, dass die Temperatur des Kühlmoduls für die entwickelten konstruktiven Varianten und den untersuchten variothermen Temperatursprung einen geringen Einfluss auf die Zykluszeit ausübt. Im Unterschied dazu wird die Zykluszeit durch die Höhe des angestrebten variothermen Temperatursprungs stark beeinflusst. Bei dickwandigen Bauteilen (d_B > 3 mm) kann mit einem variothermen Spritzgießprozess eine Reduzierung der Zykluszeit erreicht werden. Die Zykluszeit beträgt, beispielsweise für ein 4 mm dickes Bauteil aus Polycarbonat (Bayer Makrolon 8035) und einer isothermen Werkzeugwandtemperatur von 85 °C, 26,5 s. Diese Zykluszeit von 26,5 s wird bei einer variothermen Temperierung mit einem Temperatursprung von 70 °C auf 140 °C und einem oberflächennahen, elektrischen Widerstandsheizelement, auf keramischer Basis, ebenfalls erreicht. Ein weiteres Reduzieren der unteren Werkzeugwandtemperatur auf beispielsweise 30 °C, ergibt eine berechnete Zykluszeit von 22,5 s gegenüber dem betrachteten isothermen Spritzgießprozess.

Damit keramische Heizelemente auf Basis einer Si_3N_4/TiN-Mischung in einem Spritzgießwerkzeug eingesetzt werden können, muss das Spritzgießwerkzeug aufgrund der Sprödigkeit der Keramik eine hohe Biegesteifigkeit aufweisen. Darüber hinaus ist für die Tasche im Spritzgießwerkzeug, in die das keramische Heizelement eingelegt wird, ein Aufmaß von 15 µm bis 20 µm vorzusehen. Dadurch erfährt das Heizelement bei einer Werkzeugverformung eine geringere Belastung. Ferner ist eine Höhenabstimmung des gesamten Formeinsatzes, zum Ausgleich der Wärmeausdehnung auf den angestrebten Temperatursprung, vorzunehmen. Zur elektrischen Kontaktierung ist durch einen Aktivlot-Prozess eine Buchse aus Nickel oder ein Keramikplättchen, das einen Nickeldraht umfasst, auf dem Heizleiter aufzubringen. Mit Si_3N_4-Platten wird das Heizelement flächig gegenüber einem metallischen Werkzeug isoliert. Ein derartiger Schichtverbund kann, durch ein schichtweises Befüllen der Presse, direkt im heißisostatischen Herstellungsprozess gefertigt werden. Für die Herstellung der Heizleiterbahn sind zur Bearbeitung der Keramik das Drahtsägen oder das Wasserstrahlschneiden einzusetzen.

Bei den Dickschichtheizelementen, die durch ein thermisches Abscheideverfahren auf ein Stahlsubstrat direkt aufgetragen werden, ist ebenfalls eine Höhenabstimmung des variotherm temperierten Formeinsatzes auf den angestrebten Temperatursprung vorzunehmen. Die unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten des Dickschichtheizelementes und des Stahlsubstrates können Schichtablösungen und Wölbungen verursachen. Daher muss das Stahlsubstrat eine ausreichende Dicke und Steifigkeit haben. Dies erfolgt durch Auftragen des Dickschichtheizelementes direkt auf den Kühleinsatz, da dieser fest im Spritzgießwerkzeug verbaut ist und eine hohe Biegesteifigkeit hat. Zwecks einer anforderungsgerechten mechanischen Bearbeitung und zum Schutz des Heizelementes ist das Dickschichtheizelement, bestehend aus zwei Isolationsschichten und einer Heizleiterschicht, zusätzlich mit einer metallischen Schicht auszuführen. Für die elektrische Kontaktierung sind bei der Strukturierung der Heizleiterbahnen des Dickschichtheizelementes Kontaktflächen vorzusehen. Die elektrische Versorgung des Heizelementes erfolgt über diese Kontaktflächen

mittels Federkontaktstiften oder durch aufgeschweißte Drähte.

Mit beiden entwickelten Heizelementarten konnte nachgewiesen werden, dass ein hochdynamischer variothermer Temperaturwechsel bei planen Bauteilen unter realen Spritzgießbedingungen durchgeführt und geregelt werden kann. Darüber hinaus ist eine präzise Wiederholgenauigkeit der geregelten Temperatursprünge erzielt worden. Zudem wurde bei der Verwendung von mehreren Heizelementen, durch die systematische Anpassung der einzelnen Stellgrade, eine gleichmäßige Erwärmung der formgebenden Werkzeugwand umgesetzt. Durch das Heizleiterlayout kann gezielt die spezifische Heizleistung des Widerstandsheizelementes eingestellt werden. Im Randbereich eines Heizelementes kann beispielsweise eine höhere spezifische Heizleistung vorgesehen werden, damit der Wärmeabfluss in das umliegende Stammwerkzeug kompensiert und auf der formgebenden Werkzeugwand eine hohe Temperaturwechseldynamik und eine gleichmäßige Temperaturverteilung entsteht. Zugleich muss bei Verrippungen im Formteil die Kühlleistung erhöht werden, damit das untere Temperaturniveau schneller erreicht wird.

Die neuen keramischen Heizelemente können für höhere Temperaturen bis 500 °C eingesetzt werden. Eine konturangepasste Gestaltung derartiger Heizelemente ist nicht direkt umsetzbar. Mit Dickschichtheizelementen ist dagegen der Einsatz auch auf einer Freiformfläche durch die direkte Beschichtung erreichbar. Dazu ist die Haftung des Dickschichtheizelementes zum Stahlsubstrat, die mechanische Bearbeitbarkeit der Oberfläche und die Dauerbeständigkeit detailliert zu untersuchen. Im Gegensatz zu keramischen Heizelementen ist der Einsatzbereich der Dickschichtheizelemente aufgrund der unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten auf maximal 300 °C begrenzt.

Für die Ansteuerung der elektrischen Widerstandsheizelemente wurden beigestellte Temperaturregler eingesetzt, wobei die Kommunikation mit der Spritzgießmaschine über potentialfreie Ein- und Ausgänge erfolgte. Die Programmierung des Temperaturreglers und die Visualisierung des variothermen Spritzgießprozesses, ist über das Bedienfeld der Spritzgießmaschine umzusetzen. Dadurch wird erreicht, dass Kurvenverläufe, wie Temperatur, Sollwert und Stellgrad dargestellt werden und eine direkte Korrelation mit weiteren prozessspezifischen Größen, wie beispielsweise Schneckenweg oder Werkzeuginnendruck, stattfinden kann. Ferner wird die Bedienung vereinfacht und eine Dokumentation des hochdynamischen variothermen Produktionsprozesses durchgeführt.

Die gewonnenen Erkenntnisse, bestehend aus Berechnungen und Versuchen, leisten daher einen Beitrag zur Entwicklung eines hochdynamischen variothermen Temperiersystems für Spritzgießwerkzeuge. Mit den dafür eigens neu entwickelten Regel- und Heizelementen ist ein gezielter und reproduzierbarer hochdynamischer variothermer Temperaturwechsel gewährleistet.

11 Verzeichnisse

11.1 Literaturverzeichnis

[Ako07] Akopyan, Razmik: *Microwave molding of polymers*. 29. Mai 2007. – Schutzrecht US 7223087

[Avr39] Avrami, Melvin: Kinetics of phase change. I General Theory. In: *Journal of Chemical Physics* 7 (1939), S. 1103 bis 1112. – ISSN 1089–7690

[BBM+07] Bürkle, Erwin ; Burr, August ; Müller, Andreas ; Kübler, Michael: In drei Sekunden von 100 auf 140 °C. In: *Kunststoffe* 10 (2007), S. 210 bis 214. – ISSN 0023–5563

[Ber06] Bergmann, Wolfgang: *Werkstofftechnik 1 - Struktureller Aufbau von Werkstoffen, metallische Werkstoffe, Polymerwerkstoffe, nichtmetallische-anorganische Werkstoffe*. 6. Auflage. Hanser Verlag, 2006. – ISBN 978–3–446–41338–2

[Böh11] Böhme, Bryan: *Simulation und Auslegung eines hochdynamischen variothermen Temperiersystems für Spritzgießwerkzeuge*, Hochschule Heilbronn, Diplomarbeit, 2011

[BK06] Baehr, Hans D. ; Kabelac, Stephan: *Thermodynamik Grundlagen und technische Anwendungen*. 13. Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2006. – ISBN 978–3–540–32513–0

[BK09] Brexeler, Ingo ; Küls, Nico: Funktionale Oberflächen dynamisch temperiert. In: *wt Werkstofftechnik online* 11/12 (2009), S. 830 bis 836. – ISSN 1436–4980

[BMH02] Burr, August ; Müller, Andreas ; Hetschel, Martin: PROset - unterstützt AV und Einrichter. In: *Kunststoffberater* 12 (2002), S. 34 bis 35. – ISSN 0172–637

[BMH03] Burr, August ; Müller, Andreas ; Hetschel, Martin: Im Abformen kleinster Strukturen ganz groß. In: *Kunststoffberater* 10 (2003), S. 50 bis 52. – ISSN 0172–637

[Boe07] Boeswirth, Leopold: *Technische Strömungslehre*. 1. Auflage. Vieweg+Teubner, 2007. – ISBN 978–3–8348–0272–9

[Bru35] Bruggeman, D. A. G.: Berechnung verschiedener physikalischer Konstanten von heterogenen Substanzen. I. Dielektrizitätskonstanten und Leitfähigkeiten der Mischkörper aus isotropen Substanzen. In: *Annalen der Physik* 416 (1935), S. 665 bis 679. – ISSN 0003–3804

[BS06] Baehr, Hans D. ; Stephan, Karl: *Wärme- und Stoffübertragung.* 5. Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2006. – ISBN 978–3–540–32334–1

[BSK+05] Burmeister, Frank ; Schäfer, Ellen ; Kleer, Günther ; Döll, Walter ; Bläsi, Benedikt ; Gombert, Andreas: Investigation of structured TiAlN- and TiO_2-coatings with moth-eye-like surface morphologies. In: *Surface and Coatings Technology* 200 (2005), S. 1088 bis 1092. – ISSN 0257–8972

[Bur94] Burr, August: Rechnergestützte Zyklus- und Masseverweilzeitberechnung beim Spritzgießen thermoplastischer Polymere. In: *VDI* 10 (1994). – ISSN 0172–637

[BW05] Böckh, Peter von ; Wetzel, Thomas: *Wärmeübertragung - Grundlagen und Praxis.* 2. Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2005. – ISBN 978–3–540–31432–5

[CH06] Chang, Pei-Chi ; Hwang, Sheng-Jye: Experimental Investigation of Infrared Rapid Surface Heating for Injection Molding. In: *Journal of Applied Polymer Science* 102 (2006), S. 3704 bis 3713. – ISSN 1097–4628

[CJC06] Chen, Shia-Chung ; Jong, Wen-Ren ; Chang, Jen-An: Dynamic Mold Surface Temperature Control Using Induction Heating and Its Effects on the Surface Appearance of Weld Line. In: *Journal of Applied Polymer Science* 101 (2006), S. 1174 bis 1180. – ISSN 1097–4628

[Dan04] Daniels, Udo: Einstellbare Funktionen. Breites Eigenschaftsspektrum sichert Chemisch-Nickel zahlreiche Anwendungen bei der Werkzeugbeschichtung. In: *Maschinenmarkt* 20 (2004), S. 26 bis 27. – ISSN 0341–5775

[DBK+08a] Deckert, Matthias ; Burr, August ; Kübler, Michael ; Kuhn, Sascha ; Bleesen, Christoph: Heiß-Kalter Wechsel. Konturfolgende Temperiersysteme für das hochdynamische variotherme Spritzgießen. In: *Kunststoffberater* 09 (2008), S. 43 bis 45. – ISSN 0172–637

[DBK+08b] Deckert, Matthias ; Burr, August ; Kübler, Michael ; Kuhn, Sascha ; Bleesen, Christoph: Variotherm-Technologie: Neue hochdynamische Heiz-Kühl-Werkzeugmodule revolutionieren die Spritzgießtechnik. In: *K-Zeitung* 39 (2008), S. 21 bis 22. – ISSN 1436–6401

[DBK+09a] Deckert, Matthias ; Burr, August ; Kübler, Michael ; Kuhn, Sascha ; Bleesen, Christoph: Konzepte und Anwendungen der hochdynamischen variothermen Spritzgießtechnologie. In: *Technomer 2009* (2009). ISBN 978–3–86829–170–4

[DBK+09b] Deckert, Matthias ; Burr, August ; Kübler, Michael ; Kuhn, Sascha

; Bleesen, Christoph ; Burmeister, Frank ; Hagen, Jan: Herstellung mechanisch beständiger mikro- und nanostrukturierter Kunststoffbauteile - Nanoskin: Beständige Nanostrukturen im Visier. In: *Kunststoffberater* 54 (2009), S. 33 bis 36. – ISSN 0172–6374

[DBK+09c] Deckert, Matthias ; Burr, August ; Kübler, Michael ; Kuhn, Sascha ; Bleesen, Christoph ; Burmeister, Frank ; Hagen, Jan H.: Projekt Nanoskin erarbeitet Prozesse für nano- und mikrostrukturierte Kunststoffoberflächen: Kratzfest und entspiegelt. In: *K-Zeitung* 40 (2009), S. 35 bis 36. – ISSN 1436–6401

[DBK+10] Deckert, Matthias ; Burr, August ; Kübler, Michael ; Kuhn, Sascha ; Bleesen, Christoph: Study on the replication quality of micro-structures in the injection molding process with dynamical tool tempering systems. In: *Microsystem Technologies* 16 (2010), S. 1787 bis 1801. – ISSN 1432–1858

[DBK+11a] Deckert, Matthias ; Burr, August ; Kübler, Michael ; Kuhn, Sascha ; Bleesen, Christoph: The reflectivity, wettability and scratch durability of microsurface features molded in the injection molding process using a dynamic tool tempering system. In: *Journal of Micromechanics and Microengineering* 21 (2011), S. 1 bis 17. – ISSN 1361–6439

[DBK+11b] Deckert, Matthias ; Burr, August ; Kübler, Michael ; Kuhn, Sascha ; Bleesen, Christoph: Scratch tests on micro-structured polymer surfaces produced by injection molding and reaction processes. In: *Journal of Micromechanics and Microengineering* 21 (2011), S. 1 bis 15. – ISSN 1361–6439

[Die81] Dietz, Wolfgang: Sphärolithwachstum in Polymeren. In: *Colloid and Polymer Science* 259 (1981), S. 413 bis 429. – ISSN 1435–1536

[DKB11] Deckert, Matthias ; Kroll, Lothar ; Burr, August: Einsatz von Dickschichtheizelementen für die hochdynamische variotherme Temperierung von Spritzgießwerkzeugen. In: *Technomer 2011* (2011). ISBN 978–3–86829–170–4

[EFH93] Elsner, Norbert ; Fischer, Siegfried ; Huhn, Jörg: *Grundlagen der Technischen Thermodynamik Band 2 Wärmeübertragung*. 8. Auflage. Wiley-VCH, 1993. – ISBN 3–527–40013–3

[Ehr07] Ehrenstein, Gottfried W.: *Mit Kunststoffen konstruieren*. 3. Auflage. Hanser Verlag, 2007. – ISBN 978–3–446–41322–1

[Eic05] Eichlseder, Martin: *Formwerkzeuge und Verfahren zum Herstellen von Kunststoffartikeln*. 24. März 2005. – Schutzrecht EP 1506080

[Eic10] Eichlseder, Martin: *Verfahren und Vorrichtung zur variothermen Temperierung von Spritzgießwerkzeugen*. 4. März 2010. – Schutzrecht DE 102008045006 A1

[ERB+11] Eichlseder, Martin ; Rendtel, Andreas ; Brexeler, Ingo ; Peters, Guido ; Schwarz, Harry ; Kübler, Michael ; Deckert, Matthias ; Burr, August ; Burmeister, Frank ; Fromm, Alexander ; Hagen, Jan: *Spritz-*

gießprozesse zur kostengünstigen Erzeugung funktionaler Komponenten hoher Formtreue durch neue Werkzeugbeheizungen, SkForm. Fraunhofer Verlag, 2011

[FZR99] Flemming, Manfred ; Ziegmann, Gerhard ; Roth, Siegfried: *Faserverbundbauweisen - Fertigungsverfahren mit duroplastischer Matrix*. 1. Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1999. – ISBN 3–540–61659–4

[Geb07] Gebhardt, Andreas: *Generative Fertigungsverfahren: Rapid prototyping - Rapid tooling - Rapid Manufacturing*. Carl Hanser Verlag, 2007. – ISBN 978–3–446–22666–1

[Gel06] Geller, Wolfgang: *Thermodynamik für Maschinenbauer - Grundlagen für die Praxis*. 4. Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2006. – ISBN 3–540–32319–8

[GGH+09] Guilong, Wang ; Guoqun, Zhao ; Huiping, Li ; Yanjin, Guan: Research on a new variotherm injection molding technology and its application on the molding of a large LCD-Panel. In: *Polymer-Plastics Technology and Engineering* 48 (2009), S. 671 bis 681. – ISSN 0360–2559

[Gie08] Giessauf, Josef: Variotherme Temperierung - Methoden und Einsatzmöglichkeiten. In: *Spritzgießen 2008 Innovation und Produktivität*, VDI-Gesellschaft Kunststofftechnik, 2008. – ISBN 978–3–18–234288–5, S. 75 bis 86

[GM08] Gruber, Karlheinz ; May, Andy: Heiss macht schön. In: *Plastverarbeiter* (2008), S. 36 bis 38. – ISSN 0032–1338

[Gär05] Gärtner, Ralf: *Analyse der Prozesskette zur Herstellung mikrostrukturierter Bauteile durch Spritzgießen*. Verlag Mainz, 2005. – ISBN 978–3861305040. – Dissertation Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen

[Gri09] Gries, Helmut: Klare Optik durch exakte Temperierung. In: *K-Zeitung* 8 (2009). – ISSN 1436–6401

[GVK97] Goetzberger, Adolf ; Voss, Bernhard ; Knobloch, Joachim: *Sonnenenergie, Photovoltaik*. 2. Auflage. Teubner Verlag, 1997. – ISBN 978–3519132141

[Hen80] Hendry, James W.: *Method and apparatus for injection molding foamed resin products having a smooth finish on their surface*. 6. Mai 1980. – Schutzrecht US4201742

[Het05] Hetschel, Martin ; Wagner, Manfred H. (Hrsg.): *Abformung von Nanostrukturen im Spritzgießverfahren zur Erzeugung von Antireflexoberflächen*. Universitätsbibliothek im Volkswagenhaus, 2005. – ISBN 3–798320–03–9. – Dissertation Technische Universität Berlin

[Hin08] Hinzpeter, U.: Induktives Erwärmen von Spritzgießwerkzeugen. In: *Kunststoffe* 98 (2008), S. 21 bis 23. – ISSN 0023–5563

[HM09] Herwig, Heinz ; Moschallski, Andreas: *Wärmeübertragung - Physikali-*

sche Grundlagen. 5. Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2009. – ISBN 978–3–8348–9966–8

[HW03] Hollstein, Thomas ; Westerheide, Ralf: Zur Korrosion von Hochleistungskeramiken in wässerigen Lösungen. In: *Handbuch der technischen Keramik* (2003), S. 1 bis 27. – ISSN 0937–2830

[JM04] Johannaber, Friedrich ; Michaeli, Walter: *Handbuch Spritzgießen*. 2. Auflage. Hanser, 2004. – ISBN 3–446–22966–3

[Küb10] Kübler, Michael ; Wagner, Manfred H. (Hrsg.): *Verfahrensentwicklung zur Herstellung gebrauchsbeständiger kleinststrukturierter Kunststoffbauteile*. Universitätsbibliothek im Volkswagenhaus, 2010. – ISBN 978–3–7983–2270–7. – Dissertation Technische Universität Berlin

[KC09] Kroll, Lothar ; Cherif, Chokri: Modulare Leichtbautragwerke aus textilverstärkten Kunststoffkomponenten. In: *Technomer 2009 - Faserverbundkunststoffe* (2009). ISBN 978–3–86829–170–4

[KKC01] Kim, Dong-Hak ; Kang, Myung-Ho ; Chun, Y. H.: Development of a new injection molding technology Momentary mold surface heating process. In: *Journal of Plastics Engineers* 5 (2001), S. 229 bis 232. – ISSN 1530–8014

[KLK+06] Kimerling, Thomas E. ; Liu, Weidan ; Kim, Byung H. ; Yao, Donggang: Rapid hot embossing of polymer microfeatures. In: *Microsystem Technology* 12 (2006), S. 730 bis 735. – ISSN 1432–1858

[Koc02] Koch, M.: Konzepte für die Werkzeugtemperierung. In: *Kunststoffe* 11 (2002), S. 28 bis 36. – ISSN 0023–5563

[Koe04] Koehldorfer, Werner: *Finite-Element-Simulation mit Catia V5*. 1. Auflage. Hanser, 2004. – ISBN 3–446–22872–1

[Kol04] Kollenberg, Wolfgang: *Technische Keramik: Grundlagen, Werkstoffe und Verfahrenstechnik*. 7. Auflage. Vulkan Verlag, 2004. – ISBN 3802729277

[Kre99] Krellmann, Matthias: *Chemische Gasphasenabscheidung oxidischer Schichten*. VDI Verlag, 1999. – ISBN 3–18–356605–2. – Dissertation Technische Universität Dresden

[KSW09] Kroll, Lothar ; Schneebauer, Martin ; Würtele, Martin: Effiziente Prozesse für funktionsintegrative Strukturbauteile in der Karosserie. In: *Technomer 2009 - Automobilzulieferer Kunststofftechnik* (2009). ISBN 978–3–86829–170–4

[KT10] Kroll, Lothar ; Tröltzsch, Jürgen: Investigation of polymer melt impregnated fibre tapes in injection moulding process. In: *Integrated Systems, Design and Technology* (2010), S. 67 bis 78. ISBN 978–3–642–17383–7

[KTH09] Kroll, Lothar ; Tröltzsch, Jürgen ; Helbig, Frank: Spritzgießprozess für textilfaserverstärkte Kunststoffbauteile. In: *Verbundwerkstoffe: 17. Symposium Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde* (2009), S. 407 bis 412. ISBN 978–3–527–32615–0

[Kwa98] Kwang, Byon S.: *Apparatus for heating a mold for an injection molding system.* 21. Januar 1998. – Schutzrecht US 5762972

[LPB+07] Lang, Susanne ; Philipsborn, Anne C. ; Bernard, Andre ; Bonhoeffer, Friedrich ; Bastmeyer, Martin: Growth cone response to ephrin gradients produced by microfluidic networks. In: *Analytical and Bioanalytical Chemistry* 390 (2007), S. 809 bis 816. – ISSN 1618–2650

[Lug02] Lugscheider, Erich: *Handbuch der thermischen Spritzgießtechnik Technologien, Werkstoffe, Fertigung.* 1. Auflage. Verlag für Schweißen und verwandte Verfahren DVS-Verlag, 2002. – ISBN 3–87155–186–4

[LW07] Lutz, Holger ; Wendt, Wolfgang: *Taschenbuch der Regelungstechnik: Mit Matlab und Simulink.* 7. Auflage. Wissenschaftlicher Verlag Harri Deutscher, 2007. – ISBN 978–3–8171–1807–6

[LZG+09] Li, Xiping ; Zhao, Guoqun ; Guan, Yanjin ; Li, Huiping: Research on thermal stress, deformation, and fatigue liftime of the rapid heating cycle injection mold. In: *International Journal of Advanced Manufactierung Technology* 45 (2009), S. 261 bis 275. – ISSN 1433–3015

[Mar89] Marsal, Dietrich: *Finite Differenzen und Elemente. Numerische Lösung von Variationsproblemen und partiellen Differentialgleichungen.* 1. Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1989. – ISBN 978–3–540–50192–3

[Men01] Menke, Tammo J.: *Maßschneidern der Eigenschaften von Polypropen Mischungen und Olefincopolymeren*, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Diss., 2001

[Men10] Mensch, Sebastian: *Entwicklung eines hochdynamisch variotherm temperierten Spritzgießwerkzeugs*, Hochschule Heilbronn, Diplomarbeit, 2010

[MF10] Müller, Dieter ; Fortwingel, Konrad: Optimierte Kühlung von Spritzgussformen durch Vakuumlöten. In: *Thüringer Kunststofftag 2010* (2010), S. 1 bis 7

[MHM+02] Menges, Georg ; Haberstroh, Edmund ; Michaeli, Walter ; Schmachtenberg, Ernst: *Werkstoffkunde Kunststoffe.* 5. Auflage. Carl Hanser Verlag, 2002. – ISBN 3–446–21257–4

[MKS10] Michaeli, Walter ; Klaiber, Fritz ; Schöngart, Maximilian: Variotherme Temperierung mit Laserstrahlung. In: *Kunststoffe* 8 (2010), S. 66 bis 70. – ISSN 0023–5563

[Mül01] Müller, Andreas: *Versuchsaufbau zur Herstellung entspiegelten Gläsern aus PMMA und PC im Spritzgießsonderverfahren*, Hochschule Heilbronn, Diplomarbeit, 2001

[Mül06] Müller, Andreas: *Werkzeug- und Prozesstechnik zur Abformung von Nanostrukturen auf Kunststoffsubstraten im Spritzgießwerkzeug.* Isle Verlag, 2006. – ISBN 978–3–938843–20–8. – Dissertation Technische Universität Ilmenau

[MMM07] Menges, Georg ; Michaeli, Walter ; Mohren, Paul: *Spritzgießwerkzeuge - Auslegung, Bau, Anwendung*. 6. Auflage. Hanser, 2007. – ISBN 978–3–446–40601–8

[Mon01] Moneke, Martin: *Die Kristallisation von verstärkten Thermoplasten während der schnellen Abkühlung und unter Druck*, Technische Universität Darmstadt, Diss., 2001. http://elib.tu-darmstadt.de/diss/000155

[MR03] Matthes, Klaus-Jürgen ; Riedel, Frank: *Fügetechnik: Überblick, Löten, Kleben, Fügen durch Umformen*. 1. Auflage. Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2003. – ISBN 3–446–22133–6

[MRR10] Miller, Erik ; Rotea, Mario ; Rothstein, Jonathan P.: Microfluidic device incorporating closed loop feedback control for uniform and tunable production of micro-droplets. In: *Lab on a chip* 10 (2010), S. 1293 bis 1301. – ISSN 1473–0197

[NC04] Naranjo-Carvajal, Alberto: *Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit unter Verarbeitungsbedingungen*. Verlag Mainz, 2004. – ISBN 978–3861304937. – Dissertation Rheinisch-Westfaelische Technische Hochschule Aachen

[NCB81] Naranjo-Carvajal, Alberto ; Burr, August ; Käufer, Helmut (Hrsg.): *Abkühlberschreibung bei Thermoplasten im Spritzgießwerkzeug durch Kombinierung experimenteller und rechnerischen Methoden in Fortan IV*. 1. Auflage. Universitätsbibliothek im Volkswagenhaus Schriftreihe Kunststoff-Forschung (Nr. 8) der Technischen Universität Berlin, 1981. – ISBN 3–79830–771–7

[Pau93] Paul, Reinhold: *Elektrotechnik 1 - Felder und einfache Stromkreise*. 3. Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1993. – ISBN 3–540–55753–9

[Pus03] Puschmann, Frank: *Experimentelle Untersuchung der Spraykühlung zur Qualitätsverbesserung durch definierte Einstellung des Wärmeübergangs*, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Diss., 2003. http://deposit.d-nb.de/cgi-bin/dokserv?idn=968872875

[Rei87] Reiners, Ulrich: *Wärmeübertragung durch Spritzwasserkühlung heißer Oberflächen im Bereich der stabilen Filmverdampfung*. Fotodruck J. Mainz GmbH, 1987. – Dissertation Technische Universität Clausthal

[RHB06] Rösler, Joachim ; Harders, Harald ; Bäker, Martin: *Mechanisches Verhalten der Werkstoffe*. 2. Auflage. B. G. Teubner Verlag, 2006. – ISBN 978–3–8351–0008–4

[RL08] Russegger, Elias ; Lehnert, Rainer: *Verfahren zur Anbringung einer elektrischen Anschlussleitung an einem Oberflächenelement und Heizelement insbesondere für eine Kunststoffsprüheinrichtung*. 4. Dezember 2008. – Schutzrecht DE 602004010720 T2

[Rus03] Russegger, Elias: *Verfahren zum Herstellen einer elektrisch leitenden Wi-*

derstandsschicht sowie Heiz- und/oder Kühlvorrichtung. 17. Juli 2003. – Schutzrecht DE 10162276 A1

[Sch01] Schaumburg, Carsten: *Mikrospritzgießen mit induktiver Werkzeugtemperierung.* Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik, 2001. – ISBN 3–922381–17–0. – Dissertation Universität Stuttgart

[Sch04] Schilm, Jochen: *Korrosion von gasdruckgesinterten Si3N4-Keramiken in Säuren*, Technischen Universität Bergakademie Freiberg, Diss., 2004. http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:swb:105-1291642

[Sch08] Schüsser, Jürgen: Zünden in Rekordzeit - Innovativer keramischer Glühzünder für Pelletsheizungen. In: *Werkstoffe in der Fertgung* 6 (2008). – ISSN 0939–2629

[SES+11] Schubert, Andreas ; Edelmann, Jan ; Sylla, David ; Hackert-Oschätzchen, Matthias: Structuring of Tribological Active Surfaces for Reduction of Frictional Losses. In: *Proceedings of the 11th international conference of the european society for precision engineering and nanotechnology* (2011). ISBN 978–0–9553082–9–1

[SPM08] Sundberg, Mats ; Pettersson, Hans ; Magnusson, Anders: *Verfahren zur Herstellung eines Heizelementes vom Molybdänsilizid-Typ und Heizelement.* 24. Dezember 2008. – Schutzrecht DE 60318563 T2

[SS07] Salmang, Hermann ; Scholze, Horst: *Keramik.* 7. Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2007. – ISBN 978–3–540–63273–3

[SSH+10] Schröbel, Sven ; Schmidt, Arne ; Hörl, Thomas ; Eichlseder, Martin: Kratzfest in einem Schritt. In: *Kunststoffe* 1 (2010), S. 52 bis 55. – ISSN 0023–5563

[SSK02] Saito, Takushi ; Satoh, Isao ; Kurosaki, Yasuo: A new concept of active temperature control for an injection molding process using infrared radiation heating. In: *Polymer Engineering and Science* 42 (2002), S. 2418 bis 2429. – ISSN 1548–2634

[Ste03] Stelson, Kim A.: Calculating cooling times for polymer injection moulding. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 217 (2003), S. 709 bis 713. – ISSN 2041–2983

[Ste06] Stemke, Lothar: *Geschlossenes Kühlsystem für Werkzeuge von Kunststoffverarbeitungsmaschinen.* 16. November 2006. – Schutzrecht DE 102005058963 A1

[Sto02] Stolz, Stefan: *Siebdruck von elektrisch leitfä higen Keramiken zur Entwicklung heizbarer keramischer Mikrokomponenten*, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Diss., 2002. http://www.freidok.uni-freiburg.de/volltexte/843/

[Tew97] Tewald, Andreas: *Entwicklung und Untersuchung eines schnellen Verfahrens zur variothermen Werkzeugtemperierung mittels induktiver Erwärmung.*

Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik, 1997. – ISBN 3–922381–13–8. – Dissertation Universität Stuttgart

[Tün03] Tünnermann, Andreas: Der Natur auf der Spur - Die Ermittlung optischer Mikro- und Nanostrukturen eröffne völlig neue technologische Perspektiven. In: *Schott-Information* 105 (2003), S. 11 bis 12. – ISSN '0170–5733

[Tru08] Truckenbrodt, Erich A.: *Fluidmechanik Band 1: Grundlagen und elementare Strömungsvorgänge dichtebeständiger Fluide*. 4. Auflage. Springer, 2008. – ISBN 978–3–540–79017–4

[Unb07] Unbehauen, Heinz: *Regelungstechnik I Klassische Verfahren zur Analyse und Synthese linearer kontinuierlicher Regelsysteme, Fuzzy-Regelsysteme*. 14. Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2007. – ISBN 978–3–8348–9196–9

[Vis07] Viscorova, Renata: *Untersuchung des Wärmeübergangs bei der Spritzwasserkühlung unter Berücksichtigung des Einflusses der Verzunderung*, Technische Universität Clausthal, Diss., 2007. http://www.gbv.de/dms/clausthal/E_DISS/2007/db108527.pdf

[VM99] Vauck, Wilhelm R. A. ; Müller, Hermann A.: *Grundoperationen chemischer Verfahrenstechnik*. 11. Auflage. Wiley-VCH Verlag, 1999. – ISBN 3527309640

[WMC+03] Whiteside, B. R. ; Martyn, M. T. ; Coates, P. ; Allan, P. ; Hornsby, P. ; Greenway, G.: Micromoulding process and characteristics and product properties. In: *Plastics, Rubber and Composites* 32 (2003), S. 231 bis 239. – ISSN 1465–8011

[WZG10] Wang, Guilong ; Zhao, Guoqun ; Guan, Yanjin: Research on Optimum Heating System Design for Rapid Thermal Response Mold with Electric Heating Based on Response Surface Methodology and Particle Swarm Optimization. In: *Journal of Applied Polymer Science* 119 (2010), S. 902 bis 921. – ISSN 1097–4628

[WZL+09] Wang, Guilong ; Zhao, Guoqun ; Li, Huiping ; Guan, Yanjin: Research on a new variotherm injection molding technology and its application on the molding of a large LCD panel. In: *Polymer-Plastics Technology and Engineering* 48 (2009), S. 671 bis 681. – ISSN 1525–6111

[XK99] Xu, Haoyu ; Kazmer, David: A stiffness criterion for cooling time estimation. In: *International Polymer Processing* 13 (1999), S. 249 bis 255. – ISSN 0930–777X

[XS09] Xu, Ronald X. ; Sachs, Emanuel: Rapid Thermal Cycling with Low Thermal Inertia Tools. In: *Polymer Engineering and Science* 49 (2009), S. 305 bis 316. – ISSN 1548–2634

[Xu99] Xu, Xiaorong: *Conformal cooling and rapid thermal cycling in injection molding with 3D printed tools*, Massachusetts Institute of Technology, Diss.,

1999. http://hdl.handle.net/1721.1/9344

[XZ08] Xie, Lei ; Ziegmann, Gerhard: A visual mold with variotherm system for weld line study in micro injection molding. In: *Microsystem Technologies* 14 (2008), S. 809 bis 814. – ISSN 1432–1858

[YCK08] Yao, Donggang ; Chen, Shia-Chung ; Kim, Byung H.: Rapid Thermal Cycling of Injection Molds An Overview on Technical Approaches and Applications. In: *Advances in Polymer Technology* 27 (2008), S. 233 bis 255. – ISSN 1098–2329

[YK02] Yao, Donggang ; Kim, Byung: Development of rapid heating and cooling systems for injection molding applications. In: *Polymer Engineering and Science* 42 (2002), S. 2471 bis 2481. – ISSN 1548–2634

[YS92] Yu, Chi J. ; Sunderland, J.E.: Determination of Ejection Temperature and Cooling Time in Injection Molding. In: *Polymer Engineering and Science* 32 (1992), S. 191 bis 197. – ISSN 1548–2634

[YYH07] Yu, Ming-Ching ; Young, Wen-Bin ; Hsu, Pe-Ming: Micro-injection molding with the infrared assisted mold heating system. In: *Materials Science and Engineering* 460 und 461 (2007), S. 288 bis 295. – ISSN 0921–5093

11.2 Abbildungsverzeichnis

Bild 3.1: Ablauf des variothermen Spritzgießprozess (1: Start Heizen, 2: Obere Werkzeugwandtemperatur erreicht, 3: Freigabe Einspritzen, 4: Start Einspritzen, 5: Start Kühlen, 6: Untere Werkzeugwandtemperatur erreicht) . 8

Bild 3.2: Ablauf der variothermen Verfahrenstechnik für vernetzende Polymere (1: Start Einspritzen, 2: Start Heizen, 3: Obere Werkzeugwandtemperatur erreicht, 4: Start Kühlen, 5: Untere Werkzeugwandtemperatur erreicht, 6: Auswerfen) 9

Bild 3.3: Schematischer Aufbau eines variothermen Temperiersystems mit Wasser (1: Schematischer Temperierkanal, 2: Rücklauf Kaltwasserventil, 3: Bypass-Ventil, 4: Spritzgießwerkzeug, 5: Ventilblock, 6: Heißwasserbehälter, 7: Temperaturwechselsystem, 8: Pumpe für den Heißwasserkreis, 9: Pumpe für den Kaltwasserkreis, 10: Kaltwasserbehälter) 10

Bild 3.4: Dampfdruckkurve von Wasser 12

Bild 3.5: Absorptionsgrad verschiedener Materialien 13

Bild 3.6: Induktionsspule mit Formeinsatz (1: Induktionsspule, 2: Formeinsatz) . . 14

Bild 3.7: Vergleich variothermer Temperiersysteme an einer Werkzeugoberfläche von 40 mm × 46 mm für einen Temperatursprung von 65 °C auf 125 °C . . 15

Bild 4.1: AFM-Aufnahmen verschiedener Kleinststrukturen (links oben: Formeinsatz mit stochastischer TiAlN-Struktur, links unten: Abformteil der stochastischen TiAlN-Struktur, mitte oben: Formeinsatz mit stochastischer TiOx-Struktur, mitte unten: Abformteil der stochastischen TiOx-Struktur, rechts oben: abgeformte DVD-Struktur, rechts unten: abgeformte CD-Strukturen) (vgl. [DBK+09c]) 18

Bild 4.2: Ra-Werte abgeformter Nanostrukturen in Polycarbonat (Bayer Makrolon DP-1265) bei einer Massetemperatur von 310 °C 19

Bild 4.3: Darstellung von Eigenspannungen mit einer Polarisationsoptik bei einer isothermen Werkzeugwandtemperatur (links) von 70 °C und einer variothermen Werkzeugwandtemperatur (rechts) beim Einspritzen von 150 °C und 70 °C beim Entformen für ein Polycarbonat (Bayer Makrolon DP1-1265) 20

Bild 4.4: POM (DuPont Delrin 500 NC 010) Gefüge im Formteilrand, links isotherme Werkzeugwandtemperatur von 80 °C, rechts variotherme Temperierung von 140 °C beim Einspritzen und 80 °C bei der Entformung (1 Einbettmasse, 2 Randschicht, 3 Formteilkern, 4 Einbettmasse, 5 Formteilkern) 21

Bild 5.1: Abhängigkeit des spezifischen elektrischen Widerstandes vom TiN-Anteil . 26

Bild 5.2: Einfluss der Ätzzeit auf die Isolationsdicke und die Oberflächenhärte bei einer Temperatur von 90 °C und einer 1n - H_2SO_4 27

Bild 5.3: Aufbau keramischer Heizelemente mit Heizleiter, links Aufbau mit keramischen Isolationsplatten, rechts Schichtverbund (1: Isolationsplatte, 2: Si_3N_4/TiN-Mischkeramik, 3: Wasserstrahl- oder Sägeschlitz, 4: Umkehrpunkt für den elektrischen Strom, 5: gesinterte Isolation, 6: Heizleiter) 29

Bild 5.4: Elektrische Kontaktierung von Keramikheizelementen, links senkrechte Kontaktierung, rechts waagrechte Kontaktierung (1: Metallbuchse, 2: Si_3N_4/TiN-Mischkeramik, 3: Nickeldraht, 4: Keramikplättchen, 5: Si_3N_4/TiN-Mischkeramik) 31

Bild 5.5: Prinzip des Flammspritzens von Pulver (1: Zuführung Brenngas, 2: Zuführung Schichtmaterial, 3: Düsenkopf, 4: Gasflamme, 5: Abgeschiedene Schicht, 6: Heizelementsubstrat, 7: Sprühstrahl, 8: Zuführung Sauerstoff) 33

Bild 5.6: Aufbau eines Dickschichtheizelementes (1: Elektrische Kontaktfläche, 2: Obere Al_2O_3-Isolation, 3: Strukturierter NiCr-Heizleiter, 4: Untere Al_2O_3-Isolation, 5: Stahlsubstrat) 33

Bild 5.7: Elektrische Kontaktierung von Dickschichtheizelementen links lösbare Verbindung durch Federkontakte, rechts feste Verbindung durch aufgeschweißte Leitungen (1: Kontaktblock, 2: Isolationshülse, 3: Federkontaktstift, 4: Heizleiter, 5: Isolationsschicht, 6: Elektrische Zuleitung, 7: Zugentlastung, 8: Substrat) 35

Bild 5.8: Aufbau einer Kältemaschine (1: Wärmetauscher, 2: Kompressor, 3: Kälteeinheit, 4: Drosselventil, 5: Spritzgießwerkzeug, 6: Verdampfer) 38
Bild 5.9: Verfahrensprinzip der Spritzwasserkühlung (links) und der Sprühnebelkühlung (rechts) 39
Bild 5.10: Verdampfungszeit eines Wassertropfens in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur einer Heizplatte und der Wassermenge 40

Bild 6.1: Diskretisierung der eindimensionalen instationären Wärmeleitungsgleichung (vgl. [Küb10]) 45
Bild 6.2: Temperaturverlauf in den einzelnen Schichten bei einer spezifischen Heizleistung ($\dot{q}_\mathrm{H}$) von 50 W/cm^2, einer Heizzeit (t_H) von 10 s und einer Dicke des Einsatzes von 3 mm (Schichtaufbau von links nach rechts: Einsatz, obere Isolationsschicht, Heizleiter, untere Isolationsschicht, Kühleinsatz) . 47
Bild 6.3: Einfluss des Heizelementabstands zur Werkzeugwand auf deren Temperatur (ϑ_W) bei einer spezifischen Heizleistung ($\dot{q}_\mathrm{H}$) von 50 W/cm^2 und einer Heizzeit (t_H) von 10 s für ein Keramikheizelement, aufgebaut aus einzelnen Platten 48
Bild 6.4: Einfluss der spezifischen Heizleistung ($\dot{q}_\mathrm{H}$) auf die Werkzeugwandtemperatur (ϑ_W) bei einer Dicke des Einsatzes von 2 mm und einer Heizzeit (t_H) von 10 s für ein Keramikheizelement, aufgebaut aus einzelnen Platten 48
Bild 6.5: Temperaturverlauf in den einzelnen Schichten bei einer spezifischen Heizleistung ($\dot{q}_\mathrm{H}$) von 50 W/cm^2, einer Heizzeit (t_H) von 10 s und einer Dicke des Einsatzes von 3 mm (Schichtaufbau von links nach rechts: Einsatz, obere Isolationsschicht, Heizleiter, untere Isolationsschicht, Kühleinsatz) . 49
Bild 6.6: Temperaturverlauf in den einzelnen Schichten für ein Dickschichtheizelement bei einer spezifischen Heizleistung ($\dot{q}_\mathrm{H}$) von 50 W/cm^2 und einer Heizzeit (t_H) von 10 s (Schichtaufbau von links nach rechts: Einsatz, Schutzmetallisierung, obere Isolationsschicht, Heizleiter, untere Isolationsschicht, Kühleinsatz) 50
Bild 6.7: Einfluss der Dicke des Werkzeugeinsatzes auf die Werkzeugwandtemperatur (ϑ_W) bei einer spezifischen Heizleistung ($\dot{q}_\mathrm{H}$) von 50 W/cm^2 und einer Heizzeit (t_H) von 10 s mit einem Dickschichtheizelement 51
Bild 6.8: Einfluss der spezifischen Heizleistung ($\dot{q}_\mathrm{H}$) auf die Oberflächentemperatur (ϑ_W) bei einem Abstand zur Werkzeugwand von 3 mm und einer Heizzeit (t_H) von 10 s mit einem Dickschichtheizelement 52
Bild 6.9: Aufbau des Spritzgießwerkzeugs zur Bestimmung von Abkühlkurven im Spritzgießprozess (1: Isolationsplatte DS, 2: Düsenseitige Aufspannplatte, 3: Schieber, 4: Indirekter Temperatursensor der Messkavität, 5: Messkavität, 6: Eingespanntes, verlorenes Thermoelement, 7: Produktionskavität, 8: Formeinsatz AS, 9: Formplatte AS, 10: Auswerferpaket, 11: Isolationsplatten AS) 54

Bild 6.10: Gemessene Temperaturleitfähigkeit (a_{Sp}) für ein Polycarbonat (Bayer Makrolon 8035) 55
Bild 6.11: Gemessene Temperaturleitfähigkeiten (a_{Sp}) für ein Polypropylen (BASF Novolen 1100L), bei schneller Abkühlung (amorph) und unter Erwärmung (teilkristallin) 56
Bild 6.12: Berechneter und gemessener Temperaturverlauf bei einem 2,4 mm dicken Formteil und einer Werkzeugwandtemperatur von 0 °C für ein PP (BASF Novolen 1100L) 58
Bild 6.13: Iterativ ermittelte, temperaturabhängige Kristallisationsrate (Ψ) für ein Polypropylen (BASF Novolen 1100L) 59
Bild 6.14: Iterative ermittelte, kristallisationsabhängige Kristallisationsrate (Φ) für ein Polypropylen (BASF Novolen 1100L) 59
Bild 6.15: Verifikation des aufgestellten Modells für ein 5 mm dickes Formteil aus Polypropylen (BASF Novolen 1100L) bei einer Werkzeugwandtemperatur (ϑ_{W}) von 30 °C und einer Massetemperatur von 245 °C 60
Bild 6.16: Verifikation des aufgestellten Modells für ein 2,4 mm dickes Formteil aus Polypropylen (BASF Novolen 1100L) bei einem variothermen Temperatursprung 100 °C auf 25 °C 61
Bild 6.17: Einfluss der Temperatur des Kühlmoduls (ϑ_{K}) und der Bauteildicke (d_{B}) auf die Zykluszeit (t_{Z}) bei einem Temperatursprung von 50 °C auf 120 °C unter Verwendung eines keramischen Heizelementes für das Polypropylen (BASF Novolen 1100L) mit einer Massetemperatur (ϑ_{M}) von 245 °C . . . 63
Bild 6.18: Einfluss der Temperatur des Kühlmoduls (ϑ_{K}) und der Bauteildicke (d_{B}) auf die Zykluszeit (t_{Z}) bei einem Temperatursprung von 70 °C auf 140 °C unter Verwendung eines keramischen Heizelementes für das Polycarbonat (Bayer Makrolon 8035) mit einer Massetemperatur (ϑ_{M}) von 300 °C . . . 64
Bild 6.19: Einfluss der Temperatur des Kühlmoduls (ϑ_{K}) und der Bauteildicke (d_{B}) auf die Zykluszeit (t_{Z}) bei einem Temperatursprung von 50 °C auf 120 °C mit einem Dickschichtheizelement auf der Werkzeugwand für das Polypropylen (BASF Novolen 1100L) mit einer Massetemperatur (ϑ_{M}) von 245 °C 64
Bild 6.20: Einfluss der unteren Werkzeugwandtemperatur (ϑ_{U}) und der Bauteildicke (d_{B}) auf die Zykluszeit (t_{Z}) bei einer Temperatur des Kühlmoduls von 20 °C unter Verwendung eines keramischen Heizelementes für das Polypropylen (BASF Novolen 1100L) mit einer Massetemperatur (ϑ_{M}) von 245 °C 66
Bild 6.21: Einfluss der unteren Werkzeugwandtemperatur (ϑ_{U}) und der Bauteildicke (d_{B}) auf die Zykluszeit (t_{Z}) bei einer Temperatur des Kühlmoduls von 20 °C unter Verwendung eines keramischen Heizelementes für das Polycarbonat (Bayer Makrolon 8035) mit einer Massetemperatur (ϑ_{M}) von 300 °C 67

Bild 6.22: Einfluss der unteren Werkzeugwandtemperatur (ϑ_U) und der Bauteildicke (d_B) auf die Zykluszeit (t_Z) bei einer Temperatur des Kühlmoduls von 20 °C unter Verwendung eines Dickschichtheizelementes auf der Werkzeugwand und dem Polypropylen (BASF Novolen 1100L) mit einer Massetemperatur (ϑ_M) von 245 °C 67

Bild 7.1: Allgemeiner Aufbau des Spritzgießwerkzeugs für die Versuche mit einem Keramikheizelement (1: Aufspannplatte AS, 2: Formplatte AS, 3: Formplatte DS, 4: Aufspannplatte DS, 5: Düsenseitiger Werkzeugeinsatz, 6: Auswerferseitiger Werkzeugeinsatz, 7: Kaltkanalangussverteiler) 70

Bild 7.2: Schematischer Aufbau des Formeinsatzes für die Versuche mit einem Keramikheizelement (1: Konturplatte, 2: Wasserbasiertes Kühlmodul, 3: Position Mantelthermoelement, 4: Untere Si_3N_4-Isolationsplatte, 5: Si_3N_4/TiN-Heizelement, 6: Obere Si_3N_4-Isolationsplatte, 7: Befestigungsbrille) 71

Bild 7.3: Geometrie des Stromleiters und Abmessung des Heizelements (links), Heizleiterverlauf des Keramikheizelements (rechts) 71

Bild 7.4: Temperaturverteilung des eingesetzten Keramikheizelementes nach einer Heizzeit von 10 s an Luft, bei einer elektrischen Leistung von 500 W bei 23 °C 72

Bild 7.5: Schematischer Aufbau des Versuchsstandes zur Untersuchung des keramischen Heizelementes (1: Spannungsversorgung, 2: Transformator, 3: SPS, 4: Halbleiterrelais, 5: Keramisches Heizelement, 6: Mantelthermoelement, 7: Kühlkanalstruktur, 8: Maschinenkälte, 9: Durchflussmesser, 10: Magnetventil, 11: Druck und Temperaturmessung Vorlauf, 12: Druck und Temperaturmessung Rücklauf, 13: Elektrische Schaltung, 14: Wasserkreislauf) 73

Bild 7.6: Gemessener und berechneter Temperaturverlauf an der Werkzeugwand und am Mantelthermoelement bei dauerhafter und geschalteter Wasserkühlung 75

Bild 7.7: Gemessener zeitlicher Temperaturverlauf im Vor- und Rücklauf bei dauerhafter und geschalteter Wasserkühlung 75

Bild 7.8: Temperaturverlauf an der Werkzeugwand im Vergleich zur Einstellung der Temperatur am Mantelthermoelement ($\dot{q}_H = 50$ W/cm^2, $K_p = 2{,}2$ 1/K, $T_N = 2{,}7$ s, $T_V = 0{,}6$ s) 76

Bild 7.9: Temperaturverteilung auf der Werkzeugwand des eingebauten Keramikheizelementes für die Regelung auf einen oberen Sollwert von 140 °C . . . 77

Bild 8.1: Schnittzeichnung des Spritzgießwerkzeugs für die Versuche mit einem Dickschichtheizelement in der Seitenansicht (1: Elektrische Verbindung AS, 2: Auswerferpaket, 3: Kavitätenring, 4: Formplatte AS, 5: Heizelementsubstrat AS, 6: Zentralauswerfer, 7: Drucksensor, 8: Konturnahe Kühlkanäle AS, 9: Elektrische Verbindung DS, 10: Formplatte DS, 11: Distanzleisten, 12: Formeinsatz DS, 13: Konturnahe Kühlkanäle DS, 14: Heizelementsubstrat DS, 15: Angussbuchse, 16: Heißkanal) 80
Bild 8.2: Düsenseitiger Formeinsatz mit einem Dickschichtheizelement 6 mm hinter der Werkzeugwand (1: Äußere Position für ein Mantelthermoelement, 2: Innere Position für ein Mantelthermoelement, 3: Elektrische Kontaktierung, 4: Temperierkanalabdeckung, 5: Schutzmetallisierung, 6: Erste Isolationsschicht, 7: Heizleiter, 8: Zweite Isolationsschicht, 9: 6 mm dickes Heizelementsubstrat) 81
Bild 8.3: Formeinsatz mit Dickschichtheizelement auf der Werkzeugwand (1: Äußere Position für ein Mantelthermoelement, 2: Innere Position für ein Mantelthermoelement, 3: Konturangepasste Kühlkanäle, 4: Heizelementsubstrat, 5: Erste Isolationsschicht, 6: Heizleiter, 7: Zweite Isolationsschicht, 8: Schutzmetallisierung) 82
Bild 8.4: Geometrie des Stromleiters und Abmessung des Heizelements (links), Heizleiterverlauf des Dickschichtheizelements ohne zweite Isolationsschicht (rechts) (1: äußere Heizzone, 2: innere Heizzone, 3: Umkehrpunkte, 4: elektrische Kontaktfläche) 82
Bild 8.5: Messung der Temperaturabhängigkeit des Heizelementwiderstandes (R) und der Heizleistung (P) der beiden Heizzonen des Dickschichtheizelementes 83
Bild 8.6: Schematischer Aufbau der Versuchsanlage zur Ansteuerung des variothermen Temperiersystems (1: Reglereinheit, 2: PID Regler, 3: Halbleiter-Relais, 4: Spritzgießwerkzeug, 5: Dickschichtheizelement, 6: Thermoelement, 7: Kühlkreislauf, 8: Schaltbares Wasserventil, 9: Temperiergerät, 10: Spritzgießmaschine) 85
Bild 8.7: Gemessener und berechneter Temperaturverlauf an der Werkzeugwand und am inneren, düsenseitigen Thermoelement 86
Bild 8.8: Temperaturverteilung auf dem düsenseitigen Formeinsatz (Formteildurchmesser entspricht dem weißen Kreis, der Temperaturverlauf der beiden weißen Linien ist in Bild 8.9 dargestellt) 87
Bild 8.9: Temperaturverteilung auf der düsenseitigen Werkzeugwand in zwei unterschiedlichen Richtungen (horizontal gepunktete und vertikal gestrichelte weiße Linie aus Bild 8.8) 88
Bild 8.10: Temperaturwechseldynamik und Stellgrade der inneren, düsenseitigen Temperierzone 89
Bild 8.11: Temperaturwechseldynamik und Stellgrade der äußeren, düsenseitigen Temperierzone 89

Bild 8.12: Abstimmung des inneren auf den äußeren düsenseitigen Temperaturverlaufs auf eine einheitliche Aufheiz- und Abkühlphase 90
Bild 8.13: Vergleich des Temperaturverlaufs am inneren, düsenseitigen Heizelement nach mehreren Zyklen 91
Bild 8.14: Gemessener Temperaturverlauf an der Werkzeugwand mit einer Wärmebildkamera bei unterschiedlichen Abständen des inneren, düsenseitigen Mantelthermoelement 92
Bild 8.15: Wärmebild der Werkzeugwand nach einer Heizzeit von 10 s und einer spezifischen Heizleistung von 50 W/cm^2 für ein Dickschichtheizelement direkt als Werkzeugwand 93

Bild 9.1: Aufnahmen mit einem Rasterelektronenmikroskop eines gebrochenen Keramikheizelements, links Bruchfläche, rechts Vergrößerung der weiß umrahmten Fläche (1: Isolation, 2: Heizschicht, 3: Isolation, 4: Poren) 96
Bild 9.2: Kontaktierung eines keramischen Heizelementes, links intakter, gelöteter Kontakt, rechts Kontakt durch einen Kurzschluss zerstört (1: Nickeldraht, 2: Heizleiter, 3: Keramikplättchen, 4: Lötstelle, 5: Heizleiter, 6: Bereich des Kurzschlusses) 96
Bild 9.3: Aufnahmen mit einem Rasterelektronenmikroskop an Dickschichtheizelementen, links oben Oberfläche einer geschliffenen Al_2O_3-Oberfläche, rechts oben geschliffene Al_2O_3-Oberfläche nach 231 Spritzgießzyklen, links unten geschliffene Schutzmetallisierung, rechts unten $NiSO_4$-Kristalle in der Al_2O_3-Isolationsschicht (1: durch das Flammspritzen deformierter Partikel in der Al_2O_3-Isolationsschicht, 2: Poren, 3: Stahlpartikel, 4: Poren, 5: $NiSO_4$ - Kristalle) 98
Bild 9.4: EDX-Analysen der in Bild 9.3 hervorgehobenen Bereiche (oberes Diagramm: Position 3, unteres Diagramm: Position 5) 99
Bild 9.5: Schädigungen an Dickschichtheizelementen, links Ablösung des Schichtverbunds vom Substrat, rechts Ablösung und Spannungsrisse eines verchromten Heizelementes (1: Chromschicht, 2: Substrat, 3: Spannungsrisse, 4: Chromschicht, 5: Substrat) 100

11.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 5.1: Kennwerte der verwendeten Siliziumnitrid-Keramik 25
Tabelle 5.2: Kennwerte für einsetzbare Werkzeugstähle 31

Tabelle 6.1: Randbedingungen für die in Bild 6.2 bis Bild 6.4 dargestellten Ergebnisse 47
Tabelle 6.2: Randbedingungen für die in Bild 6.6 bis Bild 6.8 dargestellten Ergebnisse 51
Tabelle 6.3: Stoffdaten für zwei ausgewählte, thermoplastische Polymere (Polypropylen (BASF Novolen 1100L) und Polycarbonat (Bayer Makrolon 8035)) 62

Tabelle 6.4: Berechnete, isotherme Zykluszeiten für ein Polycarbonat (Bayer Makrolon 8035) und Polypropylen (BASF Novolen 1100L) jeweils bei zwei unterschiedlichen Werkzeugwandtemperaturen 65

Tabelle 8.1: Reglereinstellung für die in Bild 8.10 und Bild 8.11 dargestellten Temperatursprünge von 70 °C auf 120 °C (Ermittelt durch die reglerspezifische Selbstoptimierung) 90

Tabelle 9.1: Vergleich der entwickelten Heizelementarten [DBK$^+$09a] 101

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name	Matthias H. Deckert
Familienstand	verheiratet, eine Tochter
Geboren	15.03.1982 in Heilbronn

Schulbildung

1988 - 1992	Grundschule in Oedheim
1992 - 1998	Otto-Klenert-Realschule in Bad Friedrichshall
Sept. 2001 - Juli 2002	Berufskolleg an der Christian-Schmidt-Schule in Neckarsulm

Zivildienst

Okt. 2002 - Juli 2003	Bildungs- und Begegnungststätte Schloss Ebersberg bei Auenwald

Studium

Sept. 2003 - März 2007	Studiengang Mechatronik und Mikrosystemtechnik an der Hochschule Heilbronn
Sept. 2005 - März 2006	Praktisches Studiensemester bei der Firma Robert Bosch Automotive Products (Suzhou) Co. Ltd. in China
März 2007	Abschluss des Studiums mit Diplom an der Hochschule Heilbronn (Abschluss Dipl.-Ing. (FH))

Werdegang

Sept. 1998 - Juli 2001	Ausbildung zum Mikrotechnologe Fachrichtung Halbleitertechnik bei der Firma Facility Service GmbH
Juli 2001 - Sept. 2001	Entwicklung von Weltraumsolarzellen bei der Firma RWE Space Solar Power GmbH
Juli 2002 - Sept. 2002	Entwicklung von Terrestrik-Solarzellen bei der Firma RWE Schott Solar GmbH
seit April 2007	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Polymer-Institut Kunststofftechnik der Hochschule Heilbronn

Heilbronn, Sept. 2011
Matthias H. Deckert