

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Lehrstuhl für Betriebswissenschaften und Montagetechnik  
am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb)

**Flexibles Werkzeug zur Umformung von Polycarbonatplatten  
unter besonderer Beachtung der optischen Qualität**

**Sabine G. Zitzlsberger**

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen  
Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Drechsler

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dietmar Drummer,  
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
3. Prof. Christoph Maurer, Hochschule München

Die Dissertation wurde am 05.09.2014 bei der Technischen Universität München  
eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 16.04.2015 angenommen.



# Geleitwort der Herausgeber

Die Produktionstechnik ist für die Weiterentwicklung unserer Industriegesellschaft von zentraler Bedeutung, denn die Leistungsfähigkeit eines Industriebetriebes hängt entscheidend von den eingesetzten Produktionsmitteln, den angewandten Produktionsverfahren und der eingeführten Produktionsorganisation ab. Erst das optimale Zusammenspiel von Mensch, Organisation und Technik erlaubt es, alle Potentiale für den Unternehmenserfolg auszuschöpfen.

Um in dem Spannungsfeld Komplexität, Kosten, Zeit und Qualität bestehen zu können, müssen Produktionsstrukturen ständig neu überdacht und weiterentwickelt werden. Dabei ist es notwendig, die Komplexität von Produkten, Produktionsabläufen und -systemen einerseits zu verringern und andererseits besser zu beherrschen.

Ziel der Forschungsarbeiten des *iwb* ist die ständige Verbesserung von Produktentwicklungs- und Planungssystemen, von Herstellverfahren sowie von Produktionsanlagen. Betriebsorganisation, Produktions- und Arbeitsstrukturen sowie Systeme zur Auftragsabwicklung werden unter besonderer Berücksichtigung mitarbeiterorientierter Anforderungen entwickelt. Die dabei notwendige Steigerung des Automatisierungsgrades darf jedoch nicht zu einer Verfestigung arbeitsteiliger Strukturen führen. Fragen der optimalen Einbindung des Menschen in den Produktentstehungsprozess spielen deshalb eine sehr wichtige Rolle.

Die im Rahmen dieser Buchreihe erscheinenden Bände stammen thematisch aus den Forschungsbereichen des *iwb*. Diese reichen von der Entwicklung von Produktionssystemen über deren Planung bis hin zu den eingesetzten Technologien in den Bereichen Fertigung und Montage. Steuerung und Betrieb von Produktionssystemen, Qualitätssicherung, Verfügbarkeit und Autonomie sind Querschnittsthemen hierfür. In den *iwb* Forschungsberichten werden neue Ergebnisse und Erkenntnisse aus der praxisnahen Forschung des *iwb* veröffentlicht. Diese Buchreihe soll dazu beitragen, den Wissenstransfer zwischen dem Hochschulbereich und dem Anwender in der Praxis zu verbessern.

*Gunther Reinhart*

*Michael F. Zäh*





# Vorwort

Diese Arbeit entstand während meiner Anstellung als wissenschaftliche Mitarbeiterin an der Hochschule München. Die Durchführung der Promotion erfolgte in Kooperation mit dem Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb) der Technischen Universität München (TUM).

Mein besonderer Dank gilt daher sowohl Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart für die Übernahme der Betreuung dieser Doktorarbeit als auch Herrn Prof. Christoph Maurer für die Betreuung seitens der Hochschule München.

Des Weiteren möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Dietmar Drummer für die freundliche Übernahme des Korreferates und Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Drechsler für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes danken.

Bedanken möchte ich mich auch bei allen Mitarbeitern der Hochschule München, insbesondere Herrn Lößl, und den Studenten, insbesondere Herrn Eirainer, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Zudem geht mein Dank auch an alle, die mich während dieser Zeit außerhalb der Arbeit begleitet und unterstützt haben.

Nicht zuletzt gilt mein Dank meinen Eltern, ohne die mein akademischer Werdegang nicht möglich gewesen wäre. Insbesondere meiner Mutter möchte ich diese Arbeit widmen.

Haidlfing, im September 2015

*Sabine Zitzlsberger*



# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>I</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>V</b>
<b>Verzeichnis der Formelzeichen</b>	<b>IX</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Ausgangssituation . . . . .	1
1.2 Motivation und Zielsetzung . . . . .	6
1.3 Aufbau der Arbeit . . . . .	7
<b>2 Grundlagen</b>	<b>9</b>
2.1 Thermoformen . . . . .	9
2.1.1 Erwärmung des Halbzeugs . . . . .	9
2.1.2 Formgebung . . . . .	12
2.1.3 Kühlung des Formteils . . . . .	14
2.2 Polycarbonat . . . . .	14
2.2.1 Chemischer Aufbau und Eigenschaften . . . . .	14
2.2.2 Verformungs- und Bruchverhalten . . . . .	19
2.3 Qualitätsmanagement und -sicherung . . . . .	22
2.3.1 Definition . . . . .	22
2.3.2 Qualitätsmanagement . . . . .	24
2.3.3 Messtechnik und -fehler . . . . .	26
2.3.4 Statistische Prozesslenkung . . . . .	27
2.3.5 Versuchsplanung . . . . .	30
<b>3 Stand der Forschung und Technik</b>	<b>35</b>
3.1 Umformen von glasklaren Thermoplasten . . . . .	35
3.1.1 Kontaktierende Umformung . . . . .	35
3.1.2 Hinweise zur Formgebung von Polycarbonat . . . . .	36
3.2 Wiederverwendbarkeit durch Formflexibilität . . . . .	37
3.2.1 Formflexible Verfahren . . . . .	37
3.2.2 Formflexibles Verfahren zur Herstellung von Scheiben aus Polymethylmethacrylat . . . . .	48

3.3	Kenntlichmachung optischer Defekte in transparenten Scheiben . .	50
3.3.1	Transmission . . . . .	50
3.3.2	Verzerrungen . . . . .	52
3.4	Handlungsbedarf . . . . .	54
<b>4</b>	<b>Vorgehensweise zur Realisierung eines formflexiblen Werkzeugs</b>	<b>59</b>
4.1	Zieldefinition . . . . .	59
4.2	Methode zur Umsetzung . . . . .	59
<b>5</b>	<b>Realisierung des formflexiblen Werkzeugs</b>	<b>61</b>
5.1	Halbzeug . . . . .	61
5.2	Umformstrategie . . . . .	61
5.3	Umformanlage mit Interpolationsschicht . . . . .	62
5.4	Auswahl der Wirkprinzipien . . . . .	71
5.4.1	Temperierung . . . . .	72
5.4.2	Lastaufbringung . . . . .	78
5.4.3	Kühlung . . . . .	82
<b>6</b>	<b>Qualitätsprüfung der umgeformten Bauteile</b>	<b>85</b>
6.1	Prüfung der optischen Qualität . . . . .	85
6.1.1	Urformfehler . . . . .	85
6.1.2	Umformfehler . . . . .	87
6.1.3	Optische Qualitätskontrolle . . . . .	88
6.2	Bestimmung der Maßhaltigkeit . . . . .	102
<b>7</b>	<b>Versuchsdurchführung und Ergebnisse</b>	<b>105</b>
7.1	Kriechumformung . . . . .	105
7.1.1	Simulation . . . . .	105
7.1.2	Verifikation . . . . .	109
7.1.3	Resultierende Spannungen . . . . .	110
7.2	Verfahrensparameter . . . . .	111
7.2.1	Unterhalb der Glasübergangstemperatur . . . . .	111
7.2.2	Oberhalb der Glasübergangstemperatur . . . . .	114
7.2.3	Kühlung . . . . .	116
7.3	Versuchsergebnisse . . . . .	116
7.3.1	Maßhaltigkeit . . . . .	116
7.3.2	Transmission . . . . .	122

7.3.3	Verzerrungen . . . . .	126
<b>8</b>	<b>Diskussion</b>	<b>133</b>
8.1	Modellbildung . . . . .	133
8.1.1	Einhaltung der Maßhaltigkeit . . . . .	135
8.1.2	Einfluss auf die optische Qualität . . . . .	138
8.1.3	Gesamtbetrachtung . . . . .	142
8.2	Wirtschaftliche Bewertung des formflexiblen Verfahrens . . . . .	147
<b>9</b>	<b>Schlussbetrachtung</b>	<b>153</b>
9.1	Zusammenfassung . . . . .	153
9.2	Ausblick . . . . .	155
<b>10</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>157</b>
<b>11</b>	<b>Anhang</b>	<b>175</b>
11.1	Versuchsaufbau Hellfeld . . . . .	175
11.2	Entwicklungseinstellungen Lightroom . . . . .	176
11.3	Versuchspläne . . . . .	177
11.4	Regressionskoeffizienten . . . . .	181
11.5	Bewertungsformblätter . . . . .	183
11.6	Rangfolgematrizen . . . . .	186
11.7	Kalkulation Anlage . . . . .	188
<b>12</b>	<b>Studienarbeiten</b>	<b>189</b>



# Abkürzungsverzeichnis

%	Prozent
°	Grad
°C	Grad Celsius
°F	Grad Fahrenheit
3D	dreidimensional
ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol
AG	Aktiengesellschaft
AG	Automotive Glazing
Aniso	Anisotropie
Av.	Average
AV	Anwendungsvariante
al.	alii
bspw.	beispielsweise
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
CAD	Computer Aided Design
CFK	Carbonfaser-verstärkter Kunststoff
cm	Zentimeter
cm <sup>2</sup>	Quadratcentimeter
cm <sup>3</sup>	Kubikcentimeter
CNC	Computerized Numerical Control
const.	konstant
DF	Dunkelfeld
d.h.	das heißt
DoF	Schärfentiefe
E-Commerce	Electronic Commerce
E-Modul	Elastizitätsmodul
ECE	Economic Commission for Europe
engl.	englisch
et al.	und andere
EUTIST-IMV	European Take-up of Essential Information Society Technologies - Integrated Machine Vision
€	Euro

---

FEM	Finite-Elemente-Methode
FMEA	Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse
ffW	formflexibles Werkzeug
g	Gramm
G	Gesamt
gew. Punktw.	gewichteter Punktwert
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
h	Stunde
HF	Hellfeld
HIPS	High Impact Polystyrene
Hk	Herstellkosten
inkl.	inklusive
IR	Infrarot
J	Joule
K	Kelvin
K	Kosten
Kfz	Kraftfahrzeug
kg	Kilogramm
kJ	Kilojoule
kN	Kilonewton
LED	Light-emitting Diode
lp/mm	line pairs per millimeter
lp/ph	line pairs per picture height
LG	Losgröße
m	Meter
max.	maximal
mbar	Millibar
Mk	Mehrkosten
$\mu\text{m}$	Mikrometer
mm	Millimeter
$\text{mm}^2$	Quadratmillimeter
$\text{mm}^3$	Kubikmillimeter
MPa	Megapascal
N	Newton
Nm	Newtonmeter
nm	Nanometer
NPT	Near-Net-Shape Pin Tooling



Ω	Ohm
OTG	obere Toleranzgrenze
PC	Polycarbonat
PDCA	plan-do-check-act
PMMA	Polymethylmethacrylat
PS	Polystyrol
PT	Hellfeld mit Muster
PVC	Polyvinylchlorid
px	Pixel
Q	Qualität
RAW	Rohdatenformat
RK	Ranking
RTV	Room Temperature Vulcanizing
Rückf.	Rückfederung
s	Sekunde
S	Szenario
SPC	Statistical Process Control
temp.	Temperatur
TQM	Total-Quality-Management
USA	United States of America
UTG	untere Toleranzgrenze
UV	Ultraviolett
V	Volt
Verz. K	Verzerrungen bei der Kühlung
VIS	Visible
VW	Volkswagen
W	Watt
Z	Zeit



# Verzeichnis der Formelzeichen

## Große lateinische Buchstaben

Symbol	Einheit	Bedeutung
$A$	$mm$	Abstand Strahler-Strahler
$A_B$	$mm$	Blendenzahl
$A_f$	$px$	Fehlerfläche
$A_s$	$mm^2$	Querschnittsfläche
$A_t$	$px$	Scheibenfläche
$B$	$mm$	Abstand Kanal-Kanal
$Bi$	-	Biot-Zahl
$C$	$mm$	Abstand Kanal-Oberfläche
$C_p$	-	Prozessfähigkeitsindex
$C_{pK}$	-	Prozessfähigkeitsindex
$C_S$	$Nm$	Steifigkeit
$C_Z$	$mm$	Zerstreuungskreis
$D$	$mm$	Abstand Strahler-Matte
$D_f$	$mm$	Fernpunkt
$D_h$	$mm$	hyperfokale Entfernung
$D_n$	$mm$	Nahpunkt
$D_o$	$mm$	Objektabstand
$\Delta D$	$mm$	Schärfentiefe
$E_S$	$W/m^2$	Strahlungsintensität
$E$	$N/mm^2$	Kriechmodul/E-Modul
$E^*$	$N/mm^2$	effektiver E-Modul
$F$	-	Geometrieverhältnis
$F_A$	$N$	Axialkraft
$F_K$	-	Korrekturfaktor
$F_S$	$N$	Spannkraft
$H$	$mm$	Bildhöhe
$ISO$	-	Lichtempfindlichkeit des Bildsensors
$M_A$	$Nm$	Drehmoment
$P_i$	-	Parameter

<b>Symbol</b>	<b>Einheit</b>	<b>Bedeutung</b>
$Pr$	-	Prandtl-Zahl
$R$	-	Springback
$R^2$	-	Bestimmtheitsmaß
$Re$	-	Reynolds-Zahl
$R_{max}$	$mm$	max. Scheibenkrümmung
$R_{p0.2}$	$N/mm^2$	Streckgrenze
$S_1$	-	Faktor
$Sh_A$	-	Shore-A-Härtewert
$T$	$^{\circ}C$	Temperatur
$\Delta T$	$K$	Temperaturdifferenz
$T_1$	$^{\circ}C$	Anfangstemperatur
$T_2$	$^{\circ}C$	Temperatur am Ende der Heizzeit
$T_g$	$^{\circ}C$	Glasübergangstemperatur
$T_g$	$s$	Verzögerungszeit
$T_f$	$^{\circ}C$	Fluidtemperatur
$T_p$	$^{\circ}C$	Kanalwandtemperatur
$T_{K-I}$	$^{\circ}C$	Temperierung oberhalb $T_g$
$T_{K-II}$	$^{\circ}C$	Temperierung unterhalb $T_g$
$T_{out}$	$^{\circ}C$	ausströmende Fluidtemperatur
$T_p$	$^{\circ}C$	Kanalwandtemperatur
$T_S$	$^{\circ}C$	Schmelztemperatur
$T_u$	$s$	Totzeit
$T_w$	$^{\circ}C$	Oberflächentemperatur Silikon
$\dot{V}$	$m^3/s$	Volumenstrom
$W_p$	$mm$	Scheibenbreite

### Kleine lateinische Buchstaben

<b>Symbol</b>	<b>Einheit</b>	<b>Bedeutung</b>
$a$	%	Abweichung der Prognosewerte
$a_i$	-	Regressionskoeffizient
$b$	$mm$	Länge/Abstand
$\Delta b$	$mm$	Längenausdehnung
$b_1$	$mm$	Länge des Spannrahmens
$b_i$	-	Regressionskoeffizient
$c_{fluid}$	$m/s$	Fluidgeschwindigkeit
$c_i$	-	Regressionskoeffizient
$c_p$	$J/kgK$	spezifische Wärmespeicherkapazität
$d$	$mm$	Durchmesser
$d_{Kugel}$	$mm$	Eindrucktiefe
$e(P)$	-	Effekt des Parameters
$f$	-	Blendenzahl
$f_B$	$mm$	Brennweite
$f_D$	$mm$	Durchhang
$h$	$mm$	Höhe
$j$	%	Temperierfehler
$k$	-	Versuchsanzahl
$l$	$mm$	Kanallänge
$l_1$	$mm$	Länge des Halbzeugs
$\dot{m}$	$kg/s$	Massenstrom
$n$	-	Anzahl
$\Delta p_l$	$N/mm^2$	Druckverlust
$p$	$N/mm^2$	Druck/Flächenlast
$p$	-	Faktoren
$p_{tot}$	$N/mm^2$	Gesamtdruck
$r$	$mm$	Radius
$r_0$	$mm$	äußerer Kanalradius
$r_i$	$mm$	innerer Kanalradius
$r_x$	$mm$	Radius an der Stelle x
$\Delta s$	$mm$	Höhendifferenz
$t$	$s$	Zeit
$t_A$	$s$	Änderungszeit

---

<b>Symbol</b>	<b>Einheit</b>	<b>Bedeutung</b>
$t_{HZ}$	$s$	Herstellzeit
$t_H$	$s$	Haltezeit
$t_K$	$s$	Kühlzeit
$t_P$	$s$	Prozesszeit
$t_S$	$mm$	Scheibenstärke
$x_i$	-	Messwert/unabhängige Variable
$y_i$	-	Messwert/abhängige Variable
$\hat{y}_i$	-	Prognosewert
$\bar{y}$	-	Mittelwert der Messwerte
$w$	$mm$	Sensorbreite

### Griechische Buchstaben

Symbol	Einheit	Bedeutung
$\bar{\alpha}$	$W/m^2K$	Wärmeübertragungskoeffizient
$\alpha_v$	°	vertikales Sichtfeld
$\delta_{max}$	$mm$	größte Abweichung des Ist-Wertes vom Soll-Wert
$\delta_0$	$mm$	maximaler Höhenunterschied einer Krümmung
$\epsilon$	$mm/mm$	Dehnung
$\dot{\epsilon}$	$mm/s$	Kriechgeschwindigkeit
$\epsilon_A$	$lp/mm$	Auflösungsvermögen
$\epsilon_{cr}$	$mm/mm$	Kriechdehnung
$\gamma$	°	Einfallswinkel
$\eta_{fluid}$	$kg/ms$	dynamische Viskosität
$\Lambda_k$	$mm$	kleinstes auflösbares Detail
$\Lambda$	-	Reibungsverlust
$\lambda$	$nm$	Wellenlänge
$\lambda_A$	$K^{-1}$	thermische Ausdehnung
$\lambda_{fluid}$	$W/mK$	Wärmeleitfähigkeit des Fluids
$\lambda_{silicone}$	$W/mK$	Wärmeleitfähigkeit des Silikons
$\mu$	-	Mittelwert
$\mu$	-	Reibungskoeffizient
$\nu$	-	Poissonzahl
$\nu_{fluid}$	$m^2/s$	kinematische Viskosität
$\pi$	-	Kreiszahl
$\rho_{fluid}$	$kg/m^3$	Fluiddichte
$\sigma$	-	Standardabweichung
$\sigma$	$N/mm^2$	Spannung
$\sigma_B$	$W/m^2K^4$	Boltzmann-Konstante
$\xi$	-	Fehlererkennungstiefe
$\zeta_b$	-	Druckverlustbeiwert Krümmung
$\zeta_p$	-	Druckverlustbeiwert Rohr
$\zeta_{tot}$	-	Druckverlustbeiwert gesamt





# 1 Einleitung

## 1.1 Ausgangssituation

Bei Betrachtung des sich entwickelnden Konsumgütermarktes ist ein eindeutiger Trend zur individualisierten Massenfertigung (engl. mass customization) erkennbar. Die Losgrößen sinken ständig ab, während die Variantenvielfalt der einzelnen Bauteile immer mehr zunimmt (ABELE & REINHART 2011; KOC & THANGASWAMY 2011). Dieser Trend wird sowohl von Seiten der Anbieter als auch von Seiten der Verbraucher getrieben. Während Anbieter aufgrund der Marktsättigung im ständigen Konkurrenzkampf Nachfragepotential durch immer vielfältigere Produkte schaffen, steht auf der Nachfrageseite das Individuum, das sich von der Masse abheben will (REINHART & ZÄH 2003). Der Anbieter ist hier nicht nur dem Innovationsdruck, sondern in gleichem Maße vor allem dem Zeitdruck ausgesetzt, da es gilt, das Produkt dem Markt schnellstmöglich zugänglich zu machen (MILBERG 2003). Nach GRÄSSLER (2004) werden E-Commerce, flexible Unternehmensnetzwerke und kundenindividuelle Massenfertigung entscheidende Wettbewerbselemente unseres Jahrtausends sein. Abbildung 1.1 lässt die steigende Modell- und Variantenvielfalt bei sinkenden Losgrößen am Beispiel der Automobilindustrie erkennen. Dem Drang nach Individualität wird durch Nischenfahrzeuge, welche eine Stückzahl von weniger als 25.000 jährlich aufweisen, entsprochen. Die Industrie muss sich daher auch hinsichtlich der Fertigungsverfahren, der Produktionsanlagen und der verwendeten Werkzeuge stetig weiterentwickeln. Sie muss in der Lage sein, zeitnah und ohne großen zusätzlichen Kostenaufwand die geforderte Variantenanzahl herzustellen. Hierfür ist die Entwicklung von flexiblen Produktionssystemen notwendig, welche es erlauben, schnellstmöglich auf sich ändernde Kundenwünsche einzugehen (HAGEMANN 2008).

In DRUMMER & MÜLLER (2011) werden die Individualisierung sowie die ressourcenschonende und effiziente Produktion unter anderem als Megatrends angegeben, welche vor allem im Hinblick auf die künftige Entwicklung des Automobils und die damit notwendige Entwicklung der Kunststofftechnik Auswirkungen haben. Gerade durch den Leichtbau erfährt die Kunststofftechnik eine immer größere Bedeutung und einen sehr großen Anwendungsbereich in der Automobilindustrie. So hat das Thermoformen, welches eine kostengünstige Möglichkeit zur Formgebung von Bauteilen besonders im Bereich der Verpackungsindustrie darstellt,

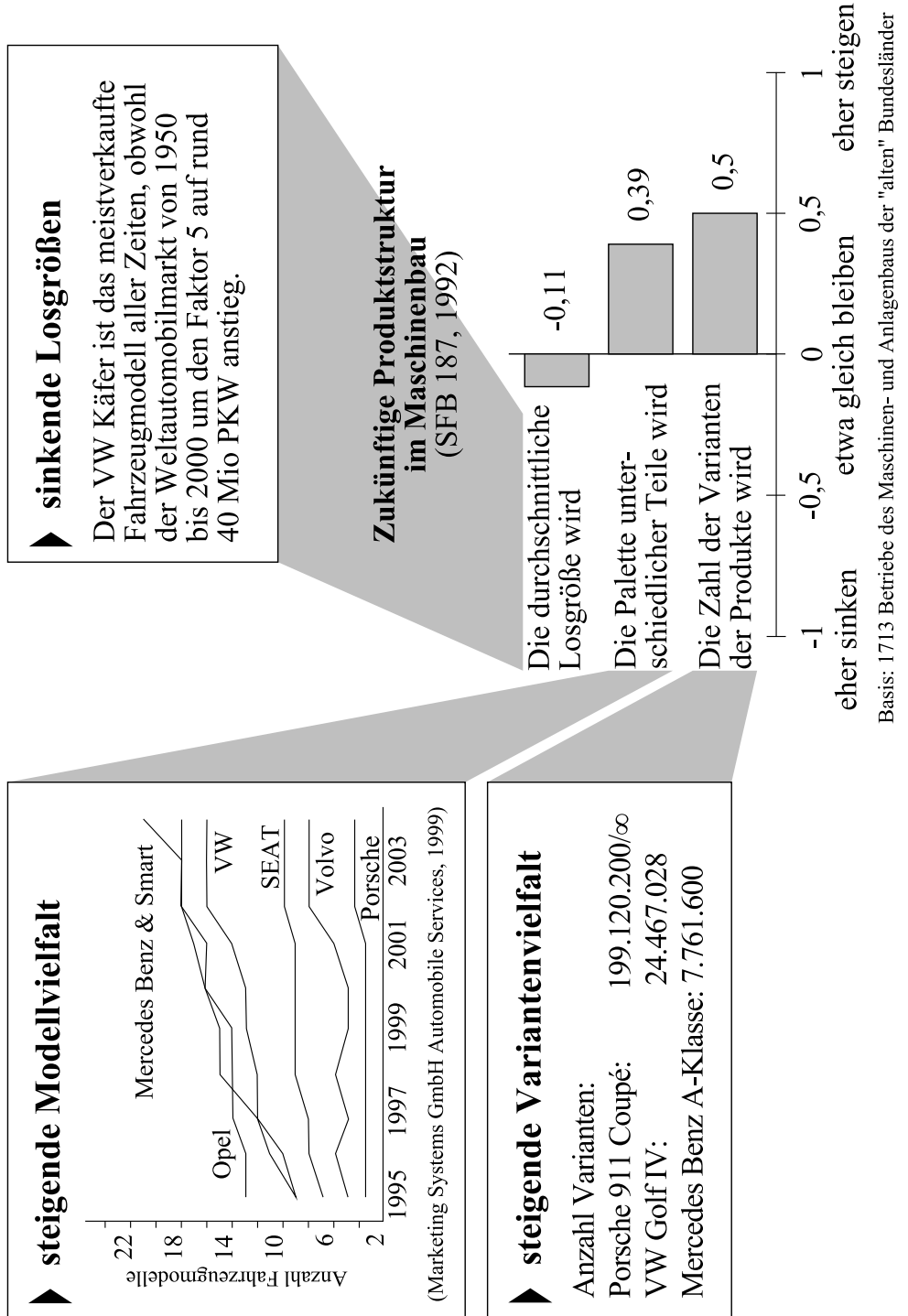


Abbildung 1.1: Wandel des Absatzmarktes nach GRÄSSLER (2004)

durch die ständige Weiterentwicklung des Verfahrens schließlich zur Herstellung von technischen Bauteilen geführt. Einen großen Teil des Anwendungsbereiches im Automobilssektor stellt das Fahrzeuginterieur dar. Hierbei werden Türinnenverkleidungen, Kofferraumauskleidungen oder Hutablagen im Thermoformverfahren gefertigt. Darüber hinaus wird im Exterieurbereich zumeist der Stoßfänger durch Warmumformung hergestellt (DÄNZER 2005). Daraus lässt sich erkennen, dass sich das Thermoformen vor allem im Bereich von großflächigen Bauteilen als wirtschaftliches Verfahren erweist. Im Zuge der Elektromobilität wird eine weitere Gewichtsreduzierung zur Reichweitenverlängerung gefordert. Die Gewichtsreduzierung wird durch Materialsubstitutionen erreicht. In diesem Zuge erfolgt beispielsweise die Substitution der Scheiben aus Glas durch transparenten Kunststoff. Bevorzugt wird dabei der amorphe Thermoplast Polycarbonat (PC) verwendet, welcher bereits Anwendung bei Scheinwerferverglasungen findet und gute mechanische Eigenschaften in einem weiten Temperaturbereich aufweist. Zielführend scheint dies vor allem durch die deutliche Zunahme der Gesamtscheibenfläche in den letzten Jahrzehnten. Während beim VW Käfer die Gesamtverglasungsfläche gerade einmal  $1,5 \text{ m}^2$  betrug, weist das aktuelle Beetle-Modell fast eine doppelt so große Verglasungsfläche auf (KLEMM 2004). Ein deutlicher Gewichtsvorteil lässt sich erreichen, da die Dichte des Kunststoffes in etwa halb so groß ist wie die von Glas. Ausschlaggebend für die mögliche Substitution des Werkstoffes ist die Gütekennzahl. Sie setzt die mechanischen Eigenschaften mit der Dichte ins Verhältnis (KLEIN 2011). Eine Möglichkeit zur Gewichtseinsparung ergibt sich demnach bei Bauteilen, welche hinsichtlich ihrer statischen Festigkeit auf Zug und Druck belastet werden. Hierbei weist die Gütekennzahl von PC im Vergleich zu Glas ein Verhältnis von 1:0,21 auf. Würde das gleiche Bauteil auf Biegung belastet werden, so würde das Verhältnis 0,67:1 betragen, womit eine Substitution nicht sinnvoll wäre.

Eine bereits realisierte Substitution stellt beispielsweise das Dachmodul des Smart4Two (siehe Abbildung 1.2 a)) aus PC dar (BOSS & KLOTZ 2010). Es wird aufgrund der großen Stückzahl im Spritzprägeverfahren, einer Weiterentwicklung des Spritzgießens zur Herstellung großflächiger Bauteile, gefertigt. Eine weitere Substitution des Werkstoffes Glas durch PC stellt die Verglasung der Forstmaschinenfrontscheibe der neuen E-Serie von John Deere dar (siehe Abbildung 1.2 b)). Hier steht vor allem der Aspekt der Sicherheit der Fahrzeuginsassen im Vordergrund. Der Fahrer soll durch eine bruch sichere Verglasung geschützt werden. Die hohe Schlagzähigkeit und Festigkeit der zwölf Millimeter dicken Polycarbonat-

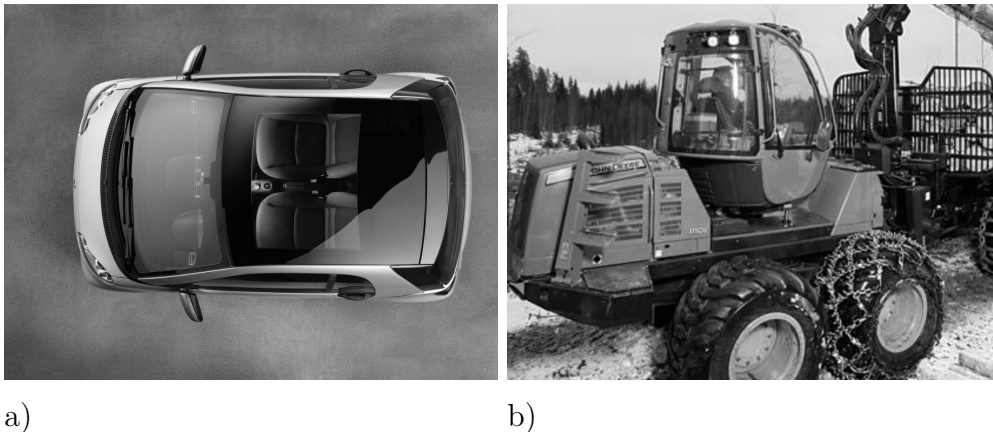
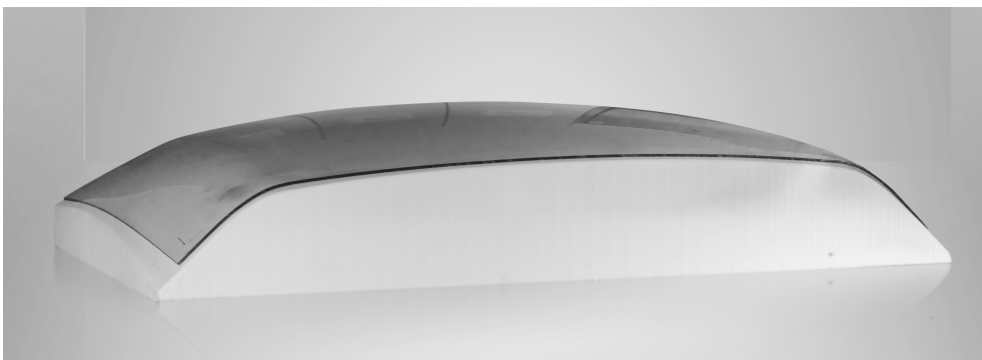


Abbildung 1.2: a) Substitution des Dachmoduls des Smart4Two durch PC (Quelle: Bayer MaterialScience) b) Verwendung von PC als Sicherheitsverglasung bei der neuen John Deere E-Serie (Quelle: materialsgate®)

Scheiben verhindert, dass herabfallende Gegenstände wie zum Beispiel Äste in die Kabine eindringen und den Fahrer verletzen (BAYER MATERIALSCIENCE AG 2009). Die geringe Stückzahl der benötigten Scheiben erlaubt keine wirtschaftliche Fertigung im Spritzgussverfahren. Die Werkzeugkosten würden deutlich zu hoch liegen. Die Fertigung erfolgt daher mittels Thermoformen, wodurch sich diese Kosten deutlich reduzieren lassen. Zusätzlich findet PC in der Architektur Verwendung. Die durch Kunststoffe gegebene Designfreiheit erlaubt die Herstellung von frei geformten Fassaden. Insbesondere beim Stadienbau werden hier große Flächen umgesetzt. Deren Realisierung erfordert ständig abgeänderte Formen. Im Gegensatz zu früher, nicht zuletzt durch das neu erschlossene Marktsegment „Automobilbau“ und „Architektur“, steht das Thermoformen, ein Verfahren für die kostengünstige Massenfertigung, nun ebenfalls der zunehmenden Individualisierung gegenüber. Die Beschränkung des Prozesses hinsichtlich der Individualisierung ergibt sich vor allem durch das notwendige Umformwerkzeug. Die Fertigung eines solchen Umformwerkzeugs erfolgt in einem aufwendigen Fräsprozess, welcher im Hinblick auf geringe Stückzahlen und vor allem bei Prototypen mit der Stückzahl 1 sowohl kosten- als auch zeitintensiv ist. Die Scheibe wird extern in einem Ofen erwärmt und im Überlegverfahren (engl. drape forming) umgeformt. Dabei wird das erwärmte Material auf die Form aufgelegt und teilweise zusätzlich mit einem weichen Stoff überspannt, bis die Scheibe abgekühlt ist. Bei großen Krümmungsradien passt sich die Scheibe der Kontur durch Eigengewicht an. Eine nach

dem konventionellen Verfahren hergestellte Scheibe aus Polymethylmethacrylat (PMMA) ist in Abbildung 1.3 dargestellt. Eine Wiederverwendung der Formen bei abgeänderter Kontur ist nur bedingt möglich. Um diesen kosten- und zeitintensiven Faktor einzudämmen, wurden bereits formflexible Werkzeugsysteme entwickelt und untersucht. Die verwendeten Ansätze generieren eine Freiformfläche zumeist durch ein Nadelkissen, das durch die Einstellung der Höhenwerte die entsprechende Geometrie abbildet. Zur Verwendung des Systems im Bereich des Thermoformens ist eine Zwischenschicht erforderlich, welche die Höhenwerte zwischen den einzelnen Nadeln interpoliert. Für die Herstellung von Front- und Seitenscheiben für den Prototypenbau im Automobilsektor, die aus PMMA hergestellt werden, wurde ein solches Verfahren entwickelt und als Prototyp umgesetzt (SCHUTZRECHT DE 198 10 478 B4 2004). Die zentrale Anforderung an das formflexible Werkzeug bei der Herstellung von Scheiben stellt aufgrund der Anlagengestalt ein minimaler Durchhang der Interpolationsschicht zwischen den Stempeln dar. Ein zu großer Durchhang bildet sich in der Scheibe ab und beeinträchtigt die Optik des Bauteils durch eine Wellenbildung der Scheibe. Dieser formflexible Ansatz zur Umformung von Kunststoffverschiebungen ist, bedingt durch die externe Erwärmung des Materials, nur für Thermoplaste mit einer hohen Wärmespeicherkapazität einsetzbar. Eine direkte Übertragung des Verfahrens auf die Umformung von PC, das eine deutlich niedrigere Wärmespeicherkapazität aufweist, ist daher nicht möglich. Da hohe Umformtemperaturen zu einer reduzierten optischen Qualität des Bauteils führen, kommt eine Temperaturerhöhung zum Ausgleich der geringeren Wärmespeicherkapazität nicht in Betracht. Dies hat zur Folge, dass auf der Grundlage der niedrigen Formtemperatur keine Verformung durch Eigengewicht erfolgen kann.



*Abbildung 1.3: Im Überlegverfahren umgeformte Scheibe aus PMMA auf einer Form aus PU-Schaum*

Daraus resultieren zum einen die Notwendigkeit einer integrierten Temperierung und zum anderen die Integration einer Lastaufbringung.

## 1.2 Motivation und Zielsetzung

Ausgehend von der zunehmenden Individualisierung des Konsumgütermarktes, der dadurch sinkenden Losgrößen und der steigenden Nachfrage nach Scheiben aus PC aus Gewichts- und Designgründen, ergibt sich die Notwendigkeit eines formflexiblen Werkzeugs zur wirtschaftlichen Umformung. Gerade vor dem Hintergrund der Scheibenverglasung im Automobilbau werden hierbei hohe optische Qualitätskriterien an Scheiben gestellt. Für die Auswahl der notwendigen Wirkprinzipien zur Temperierung und Lasteinleitung gilt es ausgehend von der Zielgröße „optische Qualität“ Möglichkeiten zu identifizieren und innerhalb eines formflexiblen Werkzeugs umzusetzen. Recherchen haben ergeben, dass für die benötigte Umformtemperatur nur Empfehlungen ausgesprochen werden. Die Umformung in kleinen und mittelständischen Betrieben erfolgt allgemein auf eigenem Erfahrungswissen. Generell gesehen lässt sich erkennen, dass das Thermoformen, im Gegensatz zu dem Prozess des Spritzgießens, erst in jüngster Zeit systematisch untersucht wird. Die Notwendigkeit hierzu ergibt sich aus einer erreichten Grenze, welche eine weitere empirische Prozessoptimierung nicht ermöglicht. Im Vordergrund stehen in durchgeführten Studien mechanische Eigenschaften (LIEBING 2008) oder die resultierende Wanddickenverteilung durch den Prozess zur Einsparung von Material (HOU et al. 2004; CHEN et al. 2008; AZDAST et al. 2013). Optische Qualitätsmerkmale werden zumeist nur subjektiv am Rande betrachtet. Der Fokus der Arbeit soll jedoch auf die Zielgröße „optische Qualität“ ausgerichtet sein und die notwendigen Komponenten zur Umformung sollen hierfür adaptiv ausgelegt werden. Es gilt, in erster Linie einen tolerierbaren und objektiv vergleichbaren Qualitätsstandard für optisch hochwertige Bauteile aus Kunststoff zu definieren, der so derzeit in der Thermoformindustrie nicht gegeben ist. Die Beurteilung erfolgt rein subjektiv auf der Grundlage einer geschulten Fachkraft. Durch den erarbeiteten Qualitätsstandard kann die Bewertung der Wirkprinzipien erfolgen und dem konventionellen Verfahren gegenübergestellt werden. Als finale Zielsetzung kann hierdurch in einem letzten Schritt die Optimumsfindung der Prozessparameter erfolgen sowie der Einfluss der variablen Prozessparameter beschrieben und durch entsprechende Modelle vorhergesagt werden.

## 1.3 Aufbau der Arbeit

Ausgehend von der zuvor beschriebenen Ausgangssituation und dadurch begründeten Motivation und Zielsetzung (Kapitel 1) gestaltet sich die weitere Struktur der Arbeit nach Abbildung 1.4. Hierbei werden zunächst die Grundlagen hinsichtlich

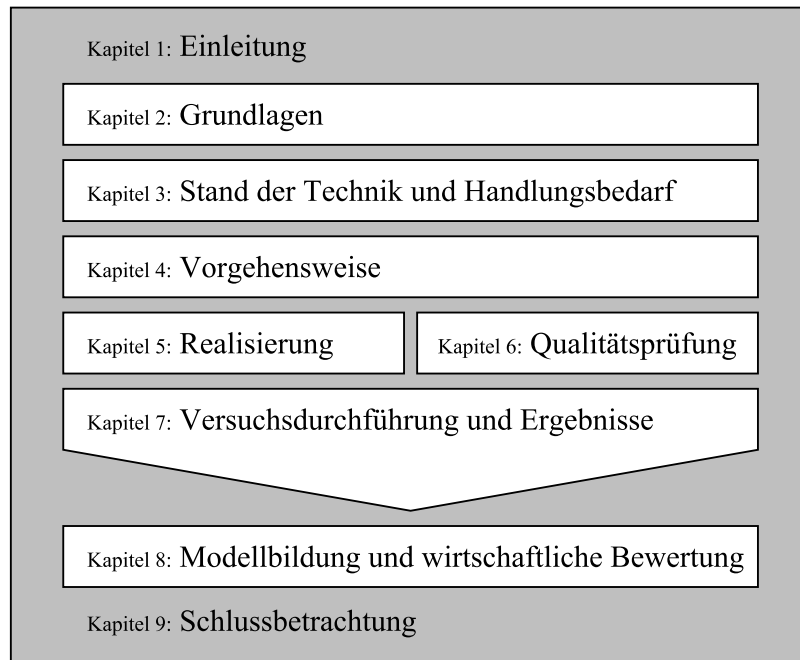


Abbildung 1.4: Struktur der Arbeit

des Fertigungsprozesses Thermoformen und des Werkstoffes Polycarbonat erläutert (Kapitel 2). Danach folgt die Betrachtung des Stands der Technik im Bereich des Thermoformens von glasklaren Thermoplasten und der formflexiblen Umformverfahren sowie von deren Anwendungsgebiet. Des Weiteren werden Möglichkeiten zur Bewertung der optischen Qualität von Verglasungsmaterialien betrachtet (Kapitel 3). In Kapitel 4 wird die Methodik zur Realisierung eines formflexiblen Werkzeugs im Hinblick auf eine hohe optische Qualität des Bauteils beschrieben, die in den nachfolgenden Kapiteln zur Anwendung kommt. In Kapitel 5 wird ein Überblick über das Ausgangsmaterial, die Umformstrategie sowie die Auslegung des verwendeten Versuchsaufbaus gegeben. Kapitel 6 beinhaltet die Auswahl und Umsetzung der notwendigen Qualitätsprüfung der Bauteile. Dabei wird der Aufbau eines Versuchstandes beschrieben, mit dem es möglich ist, Fehler in PC-Scheiben zu detektieren und mit Hilfe einer Software auszuwerten.

Anschließend werden die untersuchten Parameter, aufgeteilt in die Umformung unterhalb und oberhalb der Glasübergangstemperatur, ab welcher das Material zähelastisch und durch geringen Kraftaufwand formbar wird, hinsichtlich ihrer Auswirkung auf die Bewertungskriterien untersucht. Diese Kriterien lassen sich in Maßhaltigkeit, optische Qualität und Prozesszeit aufgliedern (Kapitel 7). Aus diesen Versuchsergebnissen werden Modelle entwickelt, um die Bauteilqualität vorab zu bestimmen. Die gewonnenen Erkenntnisse dienen zur Ableitung der Komponentenintegration. Zudem erfolgt eine wirtschaftliche Betrachtung des neu entwickelten Verfahrens (Kapitel 8). Den Abschluss der Arbeit bildet Kapitel 9 mit der Zusammenfassung der Ergebnisse und dem Ausblick auf weitere Arbeiten.



## 2 Grundlagen

### 2.1 Thermoformen

Thermoformen bezeichnet das Umformen von thermoplastischen Halbzeugen zu Formteilen unter erhöhter Temperatur (SCHWARZMANN 2008). Die Ursprünge des modernen Thermoformens begannen bereits kurz vor dem Zweiten Weltkrieg mit der Fertigung von Reliefrasterkarten und Flugzeugkanzeln (THRONE & BEINE 1999). Die stetige Weiterentwicklung der Thermoformmaschinen erlaubt jedoch erst in jüngster Zeit die Einstellung reproduzierbarer Prozessparameter. Das Thermoformen wurde bis dato daher rein empirisch und auf Erfahrungswerten beruhend gesteuert. Dies führt zu einer Prozessgrenze, die keine weitere Einsparung an Ressourcen und Prozesszeit gestattet (LIEBING 2008). Für den Thermoformprozess kommen nur Thermoplaste zur Anwendung, da ihre Kettenmoleküle nicht chemisch vernetzt sind und diese somit wieder erweicht werden können. Ein großer Vorteil des Thermoformens besteht in den niedrigen Werkzeug- und Maschinenkosten im Vergleich zu anderen Verfahren wie bspw. dem Spritzgießen. Nachteilig ist jedoch die Notwendigkeit von Halbzeug aus Platten- bzw. Folienmaterial, das im Urformverfahren aus Granulat hergestellt wird. Das Thermoformen findet sein größtes Einsatzgebiet im Bereich der Verpackungsindustrie. Jedoch wurden im Laufe der Jahre, nicht zuletzt durch die Weiterentwicklung der Maschinen, mehr und mehr Gebiete wie der Automobilbau erschlossen. Kennzeichnend für jeden Thermoformprozess sind folgende Verfahrensabläufe (ENGELMANN 2012):

- Das Halbzeug wird auf seine spezifische Umformtemperatur erwärmt.
- Mit Hilfe eines Werkzeugs wird die entsprechende Kontur erstellt.
- Das Formteil wird auf seine Einfriertemperatur abgekühlt.
- Das fertige Formteil wird entnommen bzw. entformt.

#### 2.1.1 Erwärmung des Halbzeugs

Zur Erwärmung des Halbzeugs beim Thermoformen werden drei Heizungsarten in der Praxis eingesetzt (SCHWARZMANN 2008):

- Kontaktheizungen
- Konvektionsofen
- Infrarotstrahler (IR-Strahler)

Kontaktheizungen übertragen die Wärme durch Wärmeleitung. Sie werden bspw. als vollflächige Kontaktheizplatten ausgeführt. Darüber hinaus finden Walzenheizungen als Vorheizung ihren Einsatz und verkürzen dadurch die Anfahrlänge (SCHWARZMANN 2008). Bei bestimmten Materialien erfolgt die Erwärmung des Plattenmaterials auch in einem externen Konvektionsofen. Diese Verfahrensvariante wird vorzugsweise bei der Umformung von PMMA angewandt. In den gängigen Thermoformanlagen werden heute jedoch überwiegend Infrarotstrahler eingesetzt. Diese weisen ein sehr schnelles Ansprechverhalten auf und führen somit zu einer verkürzten Taktzeit. Hierfür existieren drei unterschiedliche Strahlertypen, die sich in ihrer Oberflächentemperatur unterscheiden. Die Strahlungsintensität  $E_S$  hängt nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz von der Oberflächentemperatur  $T$  des Strahlers ab und geht mit der vierten Potenz ein (MAREK & NITSCHKE 2010):

$$E_S = \sigma_B \cdot T^4 \quad (2.1)$$

Hierbei ist die Boltzmann-Konstante  $\sigma_B$  mit  $5,6710^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$  gegeben.

Keramikstrahler erreichen eine maximale Temperatur von ca.  $700^\circ\text{C}$  und weisen die größte Trägheit auf. Aufgrund ihrer Oberflächentemperatur strahlen Keramikstrahler größtenteils langwellige Infrarotstrahlung ab. Quarzstrahler haben eine Oberflächentemperatur von ca.  $1200^\circ\text{C}$ . Das Strahlungsmaximum liegt somit im mittelwelligen Infrarot. Quarz-Halogen-Strahler erreichen eine Temperatur von ca.  $3000^\circ\text{C}$  und strahlen daher einen Großteil ihrer Energie im kurzwelligen Infrarotbereich ab. (THRONE & BEINE 1999)

Abbildung 2.1 zeigt die Leistungsabgabe von Keramikstrahlern im Vergleich zu Halogenstrahlern über den Wellenlängenbereich. Hieraus ist erkenntlich, dass sich das Maximum mit Zunahme der Oberflächentemperatur in den kurzwelligen IR-Bereich verschiebt. Die Effizienz dieser Strahler lässt sich zusätzlich durch Reflektoren steigern. Dabei sind vor allem der Winkel (GEHDE & FUHRICH 2011) und die Strukturierung des Reflektorblechs (GEISS AG 2004) wichtige

Parameter zur Steigerung der Energieausbeute und zu deren gleichmäßiger Verteilung. Viele Thermoplaste weisen im kurzwelligem IR-Bereich einen höheren Transmissionsgrad als im mittel- und langwelligem Bereich auf. Dadurch ergibt sich eine höhere Eindringtiefe in das Plattenmaterial und somit eine schnellere Erwärmung. Nach SCHWARZMANN (2008) wird diese höhere Eindringtiefe jedoch überbewertet und stellt in der Praxis keinen deutlichen Unterschied in Bezug auf die Aufheizdauer dar. SCHMIDT et al. (2003) betrachteten das Aufheizverhalten von PS-Platten (Polystyrol) mit einer Materialstärke von 1,63 mm und stellten fest, dass Halogenstrahler die beste Energieausbeute aufweisen.

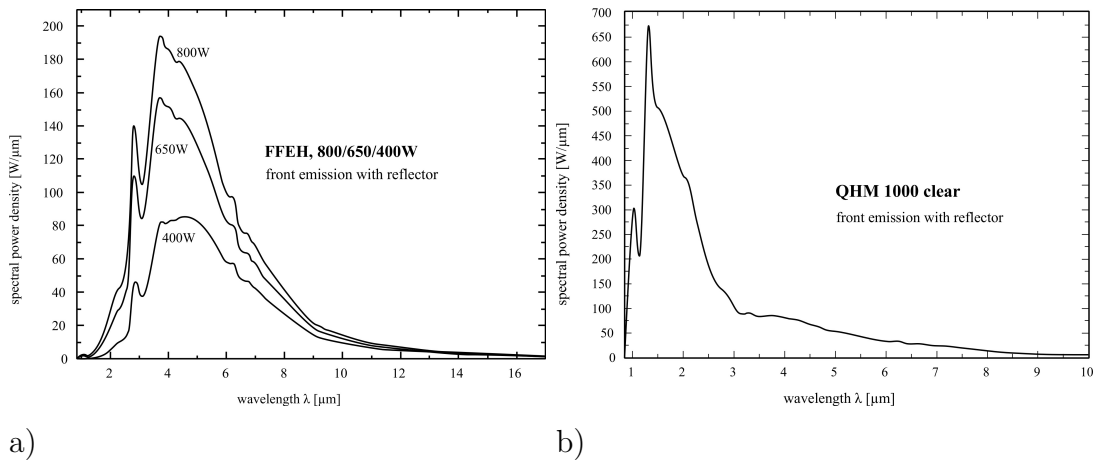


Abbildung 2.1: Leistungsabgabe von Strahlern a) Keramikstrahler b) Quarz-Halogen-Strahler (Quelle: friedr. freek GmbH)

Sobald das Halbzeug, das üblicherweise in einem Rahmen an den Rändern eingespannt ist, über seine Glasübergangstemperatur (siehe Kapitel 2.2.1) aufgeheizt ist, kommt es zum Durchhang des Materials. Dieser ist am größten in der Plattenmitte. Der Durchhang  $f_D$ , im Englischen als „sagging“ bezeichnet, kann anhand der geometrischen Abmaße des Halbzeugs  $l_1$ , des thermischen Längenausdehnungskoeffizienten  $\lambda_A$  und der Temperaturdifferenz berechnet werden. Die Längenausdehnung  $\Delta b$  ergibt sich wie folgt:

$$\Delta b = l_1 \cdot \lambda_A \cdot (T_2 - T_1) \quad (2.2)$$

Unter Verwendung der sich ergebenden Längenausdehnung und der Abmaße des Spannrahmens  $b_1$  kann der Durchhang nach SCHWARZMANN (2008) vereinfacht berechnet werden:

$$f_D = 0,62 \cdot \sqrt{b_1 \cdot \Delta b} \quad (2.3)$$

Es kommt zu einem unterschiedlichen Abstand zu den Heizstrahlern, woraus eine unterschiedliche Temperaturverteilung im Material resultiert. In der Industrie wird dem Durchhängen des Materials durch Strecken oder Gegenblasen entgegengewirkt. (SCHWARZMANN 2008)

THRONE (1996) gibt den Durchhang von amorphen Thermoplasten als weniger kritisch an als den von kristallinen. Die Anisotropie spielt bei Platten mit unterschiedlichen Verhältnissen von Länge zu Breite eine Rolle. Im Hinblick auf die Minimierung des Durchhangs sollte die Fertigungsrichtung der Platte, sprich die Richtung der verstreckten Molekülketten (siehe Kapitel 2.2.1), immer der längeren Plattenseite entsprechen.

### 2.1.2 Formgebung

Entscheidend für die Materialauswahl von Thermoformwerkzeugen sind grundsätzlich die Losgröße, die geometrische Gestaltung sowie die gewünschte Oberflächenqualität. Für die Bemusterung werden vor allem Modelle aus Holz oder Gips gefertigt. Bei geringen Stückzahlen und einer hohen geforderten Abbildungsgenauigkeit kommen hauptsächlich Harzwerkzeuge zum Einsatz, die jedoch eine schlechte Wärmeleitung aufweisen. Daher werden zur Verringerung der Taktzeit bei größeren Stückzahlen Werkzeuge aus Aluminium eingesetzt. Da die auftretenden Kräfte beim Thermoformen im Vergleich zum Spritzgießen eher gering sind, wird bei Form- und Stanzwerkzeugen Stahl nur an extrem beanspruchten Stellen wie bspw. im Schnittbereich eingesetzt. (THRONE & BEINE 1999)

Das Thermoformen lässt sich generell in zwei Verfahrenstechniken einteilen (SIMONA 2005):

- Positiv-Formung
- Negativ-Formung

Bei der Positiv-Formung kommt die Innenseite des geformten Teils mit dem Werkzeug in Kontakt (Abbildung 2.2), bei der Negativ-Formung die Außenseite (Abbildung 2.3). Das Vorstrecken, welches bei beiden Verfahrenstechniken zur Anwendung kommt, dient zur Erstellung von Formteilen mit gleichmäßiger Wanddickenverteilung. Hierbei existieren mehrere Vorstreckmöglichkeiten (SCHWARZMANN 2008):

- mechanisch mit Hilfe des Formwerkzeugs

- mechanisch mit Hilfsstempeln
- pneumatisch durch Saugen oder Blasen
- Kombination der oben genannten Verfahren.

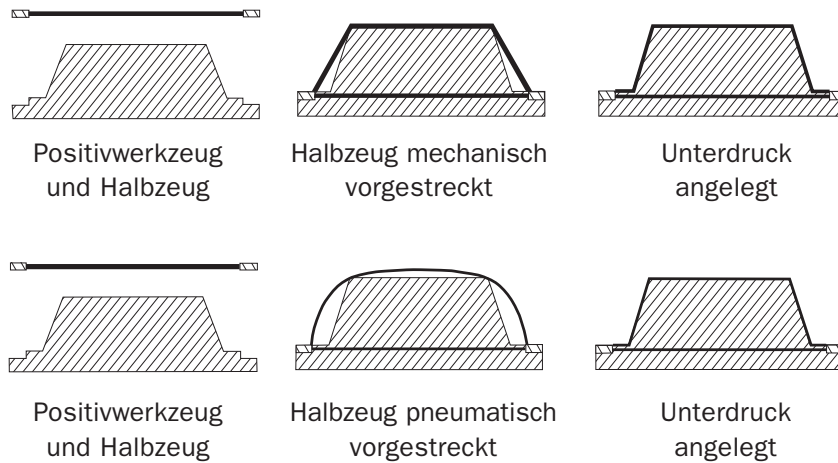


Abbildung 2.2: Schematische Darstellung des Positivformens (SIMONA 2005)

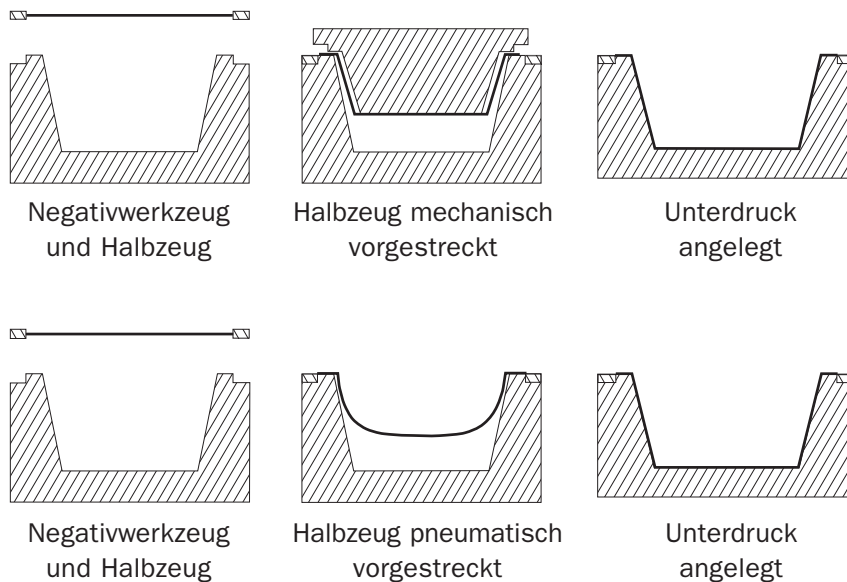


Abbildung 2.3: Schematische Darstellung des Negativformens (SIMONA 2005)

### 2.1.3 Kühlung des Formteils

Das Fertigteil kann auf mehrere Arten gekühlt werden. Eine reine Abkühlung durch Konvektion an der ruhenden Umgebungsluft würde die Prozesszeit zu sehr erhöhen und das Formwerkzeug im Laufe des Prozesses immer weiter aufheizen. Diese Variante wird daher nur bei geringen Stückzahlen eingesetzt. Bei einer größeren Stückzahl und einer notwendigen kurzen Taktzeit wird aktiv gekühlt. Auf der dem Werkzeug abgewandten Formteilseite wird daher mit Gebläse oder Sprühkühlung das Formteil auf Entnahmetemperatur gebracht. Das Werkzeug selbst wird permanent aktiv mittels Wasserkühlung auf einer bestimmten Solltemperatur gehalten. (THRONE 1996)

SCHUTZRECHT DE 37 26033 A1 (1987) beschreibt die Abkühlung von PC bei der Herstellung von Verbundglasscheiben als kritisch. Demnach muss in höheren Temperaturregionen langsamer abgekühlt werden als in tieferen Temperaturregionen. Hierfür werden definierte Abkühlzeiten und -raten vorgegeben. Es wird darauf verwiesen, dass bei ungleichmäßiger Abkühlung eine starke Oberflächenwellenbildung eintreten kann. Diese generellen Angaben stützen sich auf Beobachtungen beim Herstellungsprozess, nähere Informationen werden hierzu nicht gegeben.

## 2.2 Polycarbonat

### 2.2.1 Chemischer Aufbau und Eigenschaften

Basis für die Herstellung von PC ist Bisphenol-A. Durch Umesterung mit Diphenylcarbonat bei hohen Temperaturen erhält man PC. Die begrenzte Kristallinität führt zu einer hohen Zähigkeit. Die Steifigkeit der Moleküle liefert gute mechanische Eigenschaften. PC ist ein amorpher Thermoplast und weist daher regellos angeordnete Molekülketten auf. Amorphe Thermoplaste sind aufgrund ihrer fehlenden Fernordnung transparent im VIS-Bereich. PC gilt aufgrund seiner geringen Schwindung von 0,7% als sehr maßbeständig und verliert auch in einem weiten Temperaturbereich von  $-150\text{ °C}$  bis  $+135\text{ °C}$  nicht seine mechanischen Eigenschaften. Der Werkstoff zeichnet sich vor allem durch seine hohe Kerbschlagzähigkeit aus. Bei gekerbten Probekörpern und einer Probertemperatur von  $23\text{ °C}$  weist das Polycarbonat Makrolon AG2677 eine Charpy-Kerbschlagzähigkeit von  $70\text{ kJ/m}^2$  auf (BAYER MATERIALSCIENCE AG 2010B). Im Vergleich dazu erreicht das Polymethylmethacrylat Plexiglas® Resist 0F01/0R01, ein Material für die Auto-

mobilverglasung, einen Wert von  $40 \text{ kJ/m}^2$  (EVONIK RÖHM GMBH 2011). Die Brechzahl von PC liegt im Bereich von 1,584 bis 1,586 und seine Dichte beträgt  $1,2 \text{ g/cm}^3$ . Die Hauptanwendungsbereiche des Materials liegen in der Elektrotechnik, der Lichttechnik, bei Datenträgern und im bruchsicheren Verglasungsbereich. (CARLOWITZ 1990; BOTTENBRUCH 1992; ZAHRADNIK 1993)

PC weist im VIS-Spektrum bei nicht eingefärbtem Material mit einer Materialstärke von 5 mm einen Transmissionsgrad von ca. 90 % auf, was der Transparenz von konventionellen Glasscheiben entspricht (siehe Abbildung 2.4). Werden dem Gra-

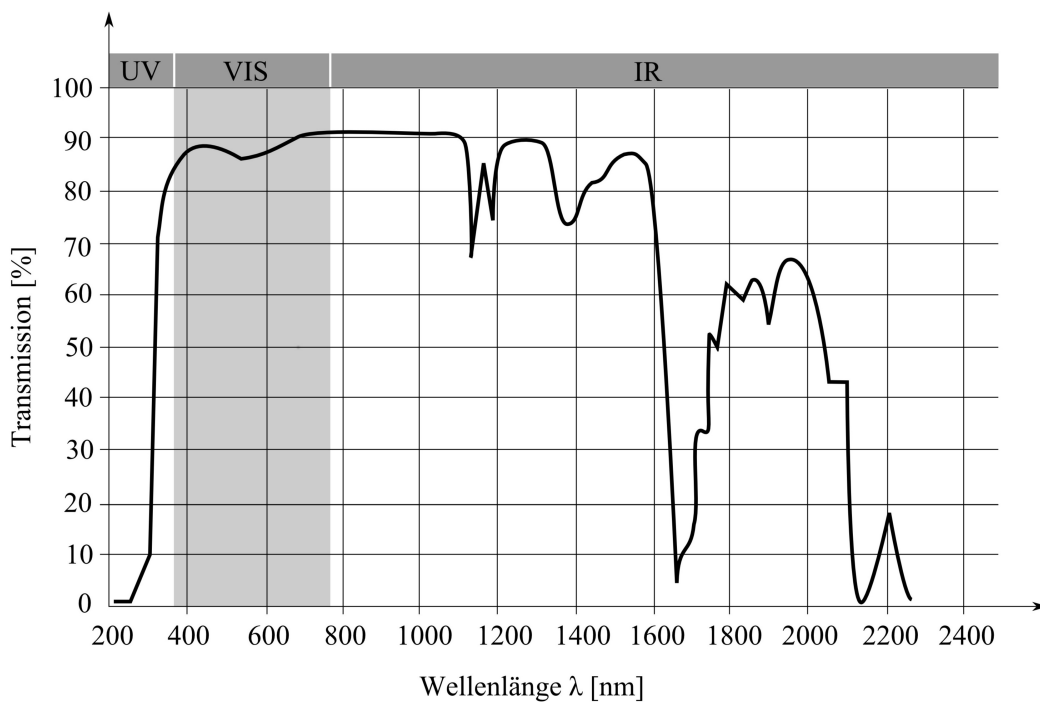


Abbildung 2.4: Transmissionsspektrum von PC (BAYER MATERIALSCIENCE AG 2001)

mulat UV-Absorber hinzugefügt, so ist PC im UV-Bereich undurchlässig. Im nahen IR-Bereich ist PC noch teildurchlässig. Im mittleren und fernen IR fällt die Transmission hingegen steil ab. (DOMININGHAUS 2005; BAYER MATERIALSCIENCE AG 2001)

Sowohl Glas als auch die Thermoplaste PMMA und PC sind amorphe Materialien und besitzen eine Glasübergangstemperatur. Bei dieser Temperatur erfolgt ein Übergang von dem gummielastischen, flexiblen Zustand in den hartelastischen,

spröden Zustand. Die Glasübergangstemperatur ist definiert als der Mittelpunkt des Temperaturintervalls, in dem die mikrobrownsche Bewegung, welche auf der Rotations- und Translationsmöglichkeit in den Bindungsachsen der im Molekül vorhandenen Atome beruht, bei der Abkühlung einfriert. Bei Überschreitung der Glasübergangstemperatur von ca. 20 bis 40 K weisen amorphe Thermoplaste eine ausreichend große Fließviskosität zur Verarbeitung auf. Die makrobrownsche Bewegung ermöglicht hier die freie Beweglichkeit ganzer Moleküle bzw. Molekülketten (HABENICHT 2002). Die unterschiedlichen Glasübergangstemperaturen sind von der Flexibilität der Hauptkette und der Funktion der Seitenketten (Abstandhalter, Widerhaken) abhängig. (DOMININGHAUS 2005)

Abbildung 2.5 zeigt den steilen Abfall des E-Moduls von PC, der die Glasübergangstemperatur kennzeichnet.

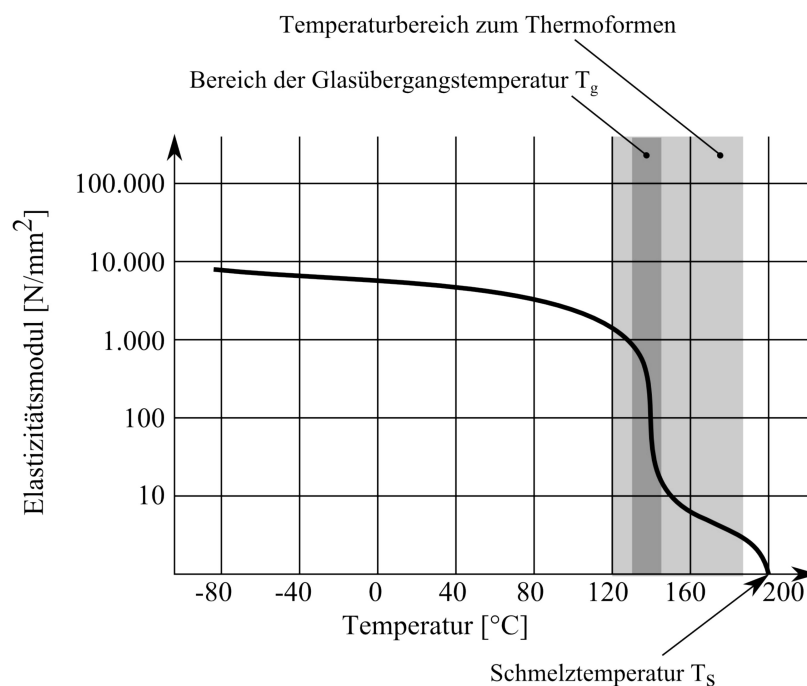


Abbildung 2.5: Temperaturabhängigkeit des E-Moduls von PC in Anlehnung an THRONE (1999)

Der Glasübergang ist nicht mit einer exakten Temperatur verknüpft. Er hängt von der verwendeten Messmethode ab und kann durch das thermische oder mechanische Verhalten der Probe bestimmt werden. Bei den thermisch-statischen



Messmethoden wird bspw. die Temperaturabhängigkeit des Ausdehnungskoeffizienten oder der Wärmekapazität verwendet. Bei den dynamisch-mechanischen Methoden wird der Glasübergang durch die Änderung der Moduln angezeigt. (GRELLMANN 2015)

Die temperaturabhängigen Veränderungen der Struktur und der Eigenschaften von Polymeren erfolgen nicht kontinuierlich, sondern in Bereichen (RÖSLER et al. 2012):

- Energieelastischer Zustand (hartelastischer Bereich):  
Im energieelastischen Bereich sind die Molekularbewegungen eingeschränkt, die Makromoleküle sind nicht frei gegeneinander verschiebbar. Kunststoffe sind in diesem Zustand hart und spröde. In teilkristallinen Thermoplasten sind die amorphen Bereiche besonders ungeordnet. Hierdurch wird eine gewisse Beweglichkeit und damit Zähigkeit erreicht. Durch die kristallinen Gebiete wird eine hohe Festigkeit erreicht.
- Erweichungszustand (Einfrierbereich oder Glasübergangsbereich):  
Der Erweichungsbereich ist der Übergang vom energie- in den entropieelastischen Zustand. Durch Wärmebewegung werden die zwischenmolekularen Kräfte in den amorphen Bereichen überwunden. Eine Glastemperatur gibt es nur für amorphe Phasen. Bei teilkristallinen Thermoplasten existiert oberhalb des Glasübergangs ein Nebeneinander eines energieelastischen und eines entropieelastischen Zustandes.
- Entropieelastischer Zustand (auch gummi- oder weichelastischer Bereich):  
Entropieelastizität bezeichnet das Bestreben der Makromoleküle nach einer Verformung in den entropisch günstigsten Zustand (Knäuelzustand) zurückzukehren. Voraussetzung für ein entropieelastisches Verhalten ist die weitmaschige Vernetzung der Makromoleküle. Unter Zug weichen die Segmente dem äußeren Zwang aus, indem sie sich strecken. Hierbei nimmt die Entropie ab. Mit Nachlassen der äußeren Kraft streben die Kettenteile wieder den Zustand größtmöglicher Unordnung an. Bei Thermoplasten ist der entropieelastischen Verformung ein Fließen überlagert, das durch Abgleiten der Molekülketten wegen fehlender Vernetzung hervorgerufen wird. Eine vollständige Rückstellung der Dehnung bei Thermoplasten ist demnach nicht möglich.

- Schmelz-, Fließbereich:  
Oberhalb des entropie- oder gummielastischen Bereiches beginnt bei Thermoplasten der Übergang in den „plastischen“ Zustand der Schmelze (= Fließbereich). Bei teilkristallinen Thermoplasten ist dieser Bereich durch die Kristallitschmelztemperatur gekennzeichnet. Die Makromoleküle sind nach Überschreiten der Schmelztemperatur schließlich völlig frei verschiebbar. Die kristallinen Phasen besitzen einen engen Übergang zwischen Kristallitschmelztemperatur und Schmelzbereich.

Bei Kunststoffen versteht man unter Schwindung die Verkleinerung des Volumens eines Formteils bei gleichbleibender Gestalt. Die Gesamtschwindung setzt sich aus Verarbeitungsschwindung und Nachschwindung zusammen. Die Verarbeitungsschwindung beschreibt die Maßänderung des heißen Kunststoffteils beim Abkühlen. Die Nachschwindung beschreibt die Maßänderung des erkalteten Kunststoffteils nach einer definierten Lagerzeit. Amorphe Kunststoffe weisen eine vernachlässigbare Nachschwindung auf. Die Gestaltänderung eines Bauteils, welche als Verzug bezeichnet wird, ist primär auf Schwindungsunterschiede zurückzuführen. Diese Schwindungsunterschiede können bspw. durch unterschiedliche Wandstärken verursacht werden. Im Gegensatz zur Schwindung bleibt beim Schrumpfungsprozess das Volumen erhalten. Der Schrumpf eines Kunststoffbauteils ist die Maßänderung eines definierten Probestückes nach Warmlagerung oberhalb der Glas- bzw. Kristallitschmelztemperatur. Die Maßänderung entsteht durch den „Memory-Effekt“ durch das Zurückknäueln der orientierten Molekülketten in ihren Ausgangszustand. (DOMININGHAUS 2005)

Die Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität von PC sind temperaturabhängig. Beide weisen ab der Glasübergangstemperatur eine größere Tangentensteigung auf. Die Wärmespeicherkapazität von PC liegt bei 1,17 kJ/kgK und damit deutlich niedriger als die Wärmespeicherkapazität von PMMA, welche mit 1,47 kJ/kgK angegeben wird. (CARLOWITZ 1990)

Des Weiteren ist das Material hygroskopisch und nimmt somit Feuchtigkeit auf. Bei Erwärmung des Materials auf Umformtemperatur kommt es zu Blasen im Material. Daher ist eine Vortrocknung vor der Umformung notwendig. Die Trockenzeiten hängen von der Plattendicke ab und sind in Tabelle 2.1 angegeben (BAYER MATERIALSCIENCE GMBH 2005).

PC eignet sich aufgrund seines Herstellungsverfahrens nicht für Gießprozesse wie bspw. PMMA. Während PMMA durch Kettenwachstumspolymerisation gewonnen

Plattendicke (mm)	Trockenzeit @ 125 °C (h)
1	1,5
2	4
3	7
4	12
5	18
6	22
8	30

*Tabelle 2.1: Trockenzeiten von PC in Abhängigkeit von der Materialstärke (BAYER MATERIALSCIENCE GMBH 2005)*

wird, erfolgt die Polymerisation von PC durch Polykondensation. Die Folge hiervon ist eine hohe Viskosität bereits bei niedrigen Polymerisationsgraden. Das Erreichen hoher Polymerisationsgrade erfordert eine maschinelle Durchmischung und eignet sich daher nicht für Gießprozesse (DOMININGHAUS 2005). Das Plattenmaterial wird deshalb im Extrusionsprozess hergestellt. Bei diesem Produktionsprozess werden die Molekülketten durch die Breitschlitzdüse, welche die Plattenstärke bestimmt, in Abzugsrichtung gedehnt und somit orientiert. Dies führt zu einem anisotropen Materialverhalten, da die Ausrichtung der Molekülketten eine Vorzugsrichtung aufweisen. Durch Erwärmung des Materials oberhalb der Glasübergangstemperatur kann diese Richtungsabhängigkeit rückgängig gemacht werden. (BOTTENBRUCH 1992)

### **2.2.2 Verformungs- und Bruchverhalten**

Reale Werkstoffe zeigen stets ein elastisches, plastisches und viskoses Materialverhalten. In Abhängigkeit von der Temperatur und Belastungsart dominiert eine dieser Eigenschaften. Kunststoffe zeigen neben dem spontan reversiblen, elastischen Deformationsverhalten zusätzlich ein stark ausgeprägtes geschwindigkeits- und zeitabhängiges (viskoses) Verhalten. Dieses Verhalten wird als Viskoelastizität bezeichnet (EYERER et al. 2008; EHRENSTEIN 2011). Die Gesamtverformung setzt sich bei der mechanischen Beanspruchung von Kunststoffen aus folgenden vier Komponenten zusammen (GRELLMANN 2015):

- elastische Verformung
- linear-viskoelastische Verformung
- nichtlinear-viskoelastische Verformung
- plastische Verformung

Die linear-viskoelastische Verformung ist reversibel, jedoch zeit- und temperaturabhängig. Bei zusätzlicher Abhängigkeit von der Höhe der mechanischen Belastung liegt nichtlinear-viskoelastische Verformung vor, welche durch die Auflösung molekularer Haftungspunkte irreversibel ist.

Kriechen (auch Retardation) bezeichnet bei Werkstoffen die zeit- und temperaturabhängige, plastische Verformung unter konstanter Last und ist somit eine viskose Reaktion. Hingegen tritt bei konstant anliegender Dehnung als Folge die Relaxation ein. (WIESER 1998). Thermoplastische Werkstoffe zeigen eine starke Abhängigkeit von der Dehnung und der Dehngeschwindigkeit, der Temperatur und der Art des Belastungszustandes bei Betrachtung ihres Spannungs- und Dehnungsverhaltens. Das Feder-Dämpfer-Modell beschreibt den Einfluss der oben genannten Parameter auf den E-Modul und die Querkontraktionszahl, wobei die Feder den elastischen und der Dämpfer den viskosen Anteil darstellt. In der Literatur finden sich drei Modelle (siehe Abbildung 2.6), die das Materialverhal-

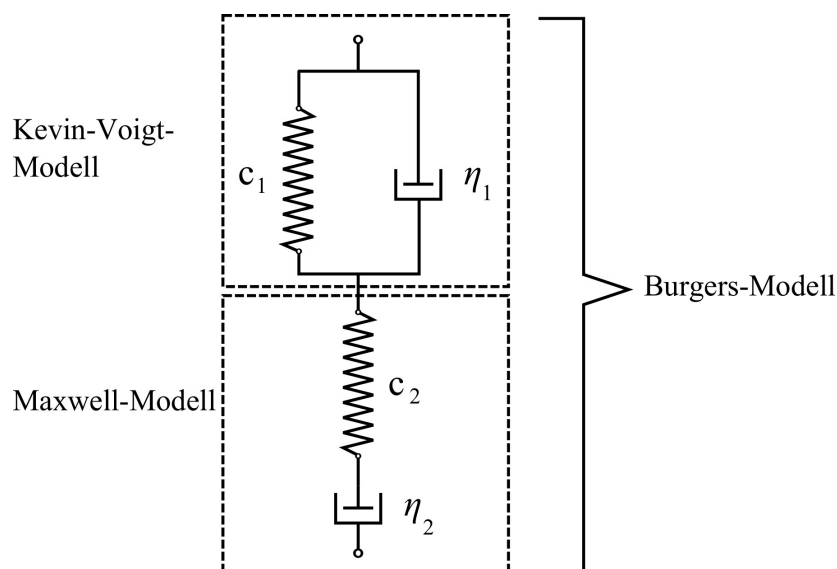


Abbildung 2.6: Darstellung des Burgers-Modells, beruhend auf der Reihenschaltung des Kevin-Voigt- und des Maxwell-Modells

ten von Kunststoffen beschreiben. Beim Maxwell-Modell werden das Feder- und das Dämpferelement in Reihe geschaltet. Dadurch wird eine spontane, elastische Verformung bei Be- und Entlastung und infolge des Dämpfers eine bleibende Verformung abgebildet. Beim Kevin-Voigt-Modell sind Feder- und Dämpferelement hingegen parallel geschaltet. Die Dehnung stellt sich somit zeitverzögert ein, ist jedoch bei Entlastung voll reversibel. Das Burgers-Modell verwendet die beiden genannten Modelle und schaltet diese wiederum in Reihe. (EYERER et al. 2008) Das Phänomen des Kriechens wird allgemein in drei Bereiche eingeteilt. Zum Zeitpunkt  $t = 0$  liegt nur eine elastische Dehnung  $\epsilon_0$  vor. Im Bereich I wird das sogenannte primäre Kriechen dargestellt. Hier nimmt die Dehngeschwindigkeit  $d\epsilon/dt$  mit zunehmender Zeit ab. Hingegen herrscht im Bereich II, in dem das sekundäre Kriechen stattfindet, eine konstante Dehngeschwindigkeit. Betrachtet man den Kurvenverlauf im Bereich III, so stellt man fest, dass beim tertiären Kriechen die Dehngeschwindigkeit sehr stark ansteigt, bis es schließlich zum Bruch kommt (siehe Abbildung 2.7). (RÖSLER et al. 2012)

Zur mathematischen Beschreibung der Kriechkurven werden Kriechgesetze aufgestellt, welche nach dem Gültigkeitsbereich ausgewählt werden.

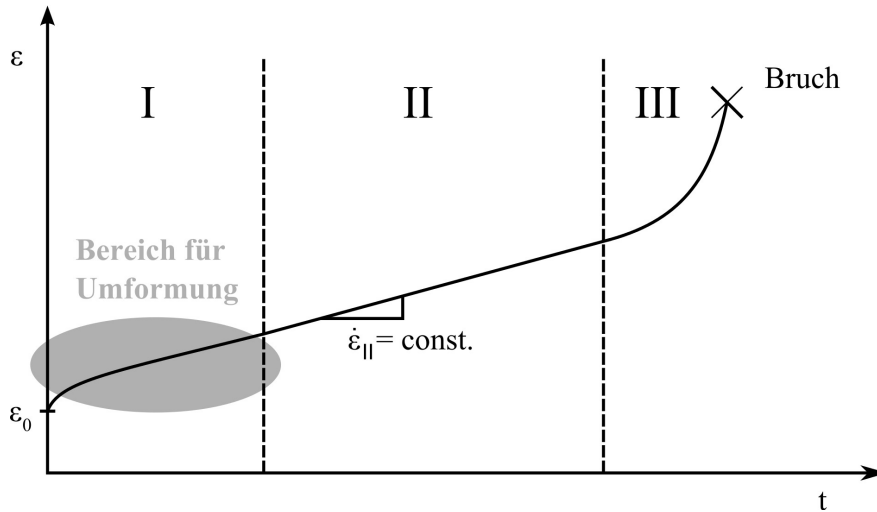


Abbildung 2.7: Kriechkurve, unterteilt in drei Bereiche (RÖSLER et al. 2012)

Das Festigkeits- und Steifigkeitsverhalten von Kunststoffen ist allgemein nicht durch Einpunktangaben beschreibbar. Die Kennwerte werden durch mess- und prüftechnische sowie durch die Herstellung bedingte Faktoren beeinflusst. Sie sind abhängig vom Zustand und den Eigenschaften der Formmasse. Hierzu gehören der chemische Aufbau, die Viskosität, das Molekulargewicht und dessen Verteilung

sowie Füllstoffe. Zusätzlich spielt das Verfahren zur Herstellung eine entscheidende Rolle. Dieses bestimmt den inneren Zustand, wie die Morphologie, Eigenspannungen und Orientierungen sowie Kristallinitätsgrad bei entsprechenden Kunststoffarten. Des Weiteren werden die Kennwerte durch die Prüfkörpergeometrie, die Beanspruchungsart, Temperatur, Geschwindigkeit und Umgebungsbedingungen beeinflusst. (GRELLMANN 2015)

PC gehört zu den duktilen Polymeren und bildet bei der Verformung von ungekerbten Proben Scherbänder sowie zahlreiche Crazes (engl.: Haarrisse) aus. PC zeigt eine starke Temperaturabhängigkeit in Bezug auf das dominierende Auftreten von Scherbändern und Crazes. In MICHLER (2001) wurden hierzu Polycarbonate mit unterschiedlicher Glasübergangstemperatur ( $T_g = 148, 180, 200\text{ °C}$ ) und unterschiedlichem Molekulargewicht ( $M_w = 28000, 34000, 35000\text{ g/mol}$ ) untersucht. Bei einer Verformung nahe der Raumtemperatur bzw.  $\Delta T = T_g - T > 40 - 80\text{ K}$  bildeten sich bevorzugt Scherbänder aus. Dies resultiert aus der hohen Verschlaufungsdichte der Molekülketten. Bei  $60 - 80\text{ °C}$  unterhalb der Glasübergangstemperatur zeigte sich ein Übergang zur Bildung von fibrillierten Crazes, die sich bei Temperaturen von  $\Delta T < 40\text{ K}$  zu Crazes mit gröberen Fibrillen entwickelten, welche durch die thermisch induzierte Entschlaufung entstehen. (MICHLER & BALTA-CALLEJA 2012; MICHLER 2001)

Darüber hinaus wird in MICHLER & BALTA-CALLEJA (2012) die notwendige Spannung zur Erzeugung von Scherbändern und Crazes in den oben benannten Proben in Abhängigkeit von der Temperatur angegeben. Die notwendige Spannung betrug bei einer Temperaturdifferenz von  $45\text{ K}$   $48\text{ MPa}$ , während sie bei einer Temperaturdifferenz von  $16\text{ K}$  nur noch  $5\text{ MPa}$  aufwies. Somit sinkt die notwendige Spannung zur Erzeugung von Scherbändern und Crazes mit sinkender Temperaturdifferenz. In CLAY (2000) wird zudem der Faktor Zeit als wichtige Initiierungsgröße genannt. Hier wird die Craze-Bildung auch als eine viskoelastische Reaktion bezeichnet, die ein zeitabhängiges Verhalten aufweist.

## 2.3 Qualitätsmanagement und -sicherung

### 2.3.1 Definition

Der Begriff Qualität stammt aus dem Lateinischen (qualitas) und bedeutet „Beschaffenheit, Merkmal, Eigenschaft, Zustand“. In der Literatur finden sich unterschiedliche Definitionen für Qualität. Weit verbreitet ist es, Qualität als den

Grad der Übereinstimmung zwischen gewünschten Anforderungen (Soll) an ein Produkt und der vorliegenden Beschaffenheit (Ist) anzusehen, wobei eine hohe Übereinstimmung eine gute Qualität bedeutet, eine geringe Übereinstimmung dagegen eine schlechte (SCHMITT 2015).

Der frühere Standard zum Qualitätsmanagement, die DIN EN ISO 8402, verstand unter Qualität „die Gesamtheit von Merkmalen einer Einheit bezüglich ihrer Eignung, festgelegte und vorausgesetzte Erfordernisse zu erfüllen“. Somit mussten alle Merkmale den Anforderungen entsprechen. Die neue Qualitätsnorm DIN EN ISO 9000 definiert Qualität als „Vermögen einer Gesamtheit inhärenter (lat. inwohnend) Merkmale eines Produkts, eines Systems oder Prozesses zur Erfüllung von Forderungen von Kunden und anderen interessierten Parteien“. Dabei müssen weiterhin alle Einzelmerkmale die Anforderungen erfüllen. Zusätzlich werden hier die Forderungen von Kunden und interessierten Parteien mit aufgenommen.

Den Versuch einer Klassifizierung von Qualität machte GARVIN (1984):

- Transzendenter Ansatz: Qualität wird synonym für Hochwertigkeit verstanden; ist nicht messbar, sondern lediglich durch Erfahrung fassbar (subjektiver Begriff).
- Produktbezogener Ansatz: Qualität wird als messbare Größe interpretiert. Sie wird zum objektiven Merkmal, wobei subjektive Kriterien ausgeschaltet werden.
- Anwenderbezogener Ansatz: Qualität ergibt sich ausschließlich aus der Sicht des Anwenders.
- Prozessbezogener Ansatz: Qualität wird gleichgesetzt mit der Einhaltung von Prozessspezifikationen.
- Wertbezogener Ansatz: Qualität entspricht einem günstigen Preis-Leistungs-Verhältnis.

Anhand von dieser Einteilung zeigt sich, dass Qualität zum einen subjektiv bewertet werden kann und somit nicht messbar ist. Zum anderen kann Qualität auch als objektive Messgröße interpretiert werden. Die subjektive Qualitätsbeurteilung ist für die betriebliche Praxis ungeeignet, da sie von einer bestimmten Person abhängt, deren Expertenwissen und deren „geistige Konditionierung“ (Ermüdungszustand in Folge eines gleichförmigen Prozesses) ausschlaggebend für die Beurteilung ist.

Dennoch ergibt sich auch bei der objektiven Qualitätsbeurteilung die Problematik des Referenzwertes, auf dessen Grundlage die Einhaltung der Qualitätsspezifikationen beurteilt werden muss, die dann wiederum ausschlaggebend dafür ist, ob ein Produkt als gut oder schlecht bewertet wird. Sobald jedoch dieser Referenzwert identifiziert ist, ergibt sich ein allzeit verfügbares und zuverlässiges System zur Qualitätskontrolle. (FLEMMING 2006)

### 2.3.2 Qualitätsmanagement

Das Qualitätsmanagement enthält vier zentrale Aufgabengebiete: die Planung, die Steuerung, die Sicherung und die Verbesserung der Qualität. Ein gut strukturiertes Qualitätsmanagementsystem bietet die Vorteile einer kontinuierlichen Qualitätsverbesserung, der Optimierung von Abläufen im Unternehmen, einer Transparenz in der Organisation, einer Aufrechterhaltung des Know-hows und der Verantwortlichkeitszuweisung. Grundlage für das Qualitätsmanagement-System ist der PDCA-Zyklus. Dieser gliedert sich in folgende vier Schritte:

- plan = Planen
- do = Durchführen
- check = Prüfen
- act = Verbessern

Im Rahmen der Qualitätsplanung wird der aktuelle Zustand im Hinblick auf die Maßnahmen zur Qualitätssicherung und -steigerung eines Unternehmens festgestellt, um anschließend Konzepte mit den notwendigen Ressourcen festzulegen. Die Ziele der Qualitätsplanung sind hierbei, die Erwartung des Kunden zu erfüllen, robuste Prozesse und fehlerfreie Produkte zu gewährleisten und sich vom Wettbewerb abzuheben. Zur Zielerreichung gibt es verschiedene Werkzeuge und Methoden, die eingesetzt werden. Eine Methode hierfür ist bspw. die Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA). Eine sorgfältige Planung ist besonders im Entwicklungsstadium von Bedeutung, da bereits hier der Ursprung von 70 bis 80 Prozent der Fehler und Kosten liegt. Während der Qualitätssteuerung werden die Konzepte, die im Rahmen der Qualitätsplanung ausgearbeitet wurden, überprüft und in die Praxis umgesetzt, um die Arbeits- oder Produktionsabläufe zu optimieren.



Die gemachten Erfahrungen lassen sich bei der nächsten Qualitätsplanung berücksichtigen, wodurch ein geschlossener Kreislauf entsteht. Die Qualitätslenkung hat die Einhaltung der Spezifikationen und Standards sowie die Beherrschung der Prozessqualität zum Ziel. Grundlegend für die Qualitätssicherung, welche die Qualitätsplanung und -lenkung unterstützt und ergänzt, ist die Dokumentation des Qualitätsmanagements, in welchem die Verantwortlichkeiten, Kompetenzen und Abläufe dargestellt sind. (BRÜCKNER 2009)

Die Qualitätsverbesserung erfolgt durch regelmäßige Überprüfungen und dadurch abgeleitete Maßnahmen. Eine wirksame Methode ist hierfür die Durchführung von internen Audits. Ein Audit ist eine systematische, unabhängige und stichprobenhafte Untersuchung zur Feststellung der Erfüllung und Umsetzung von Forderungen sowie der Eignung von qualitätsbezogenen Tätigkeiten und deren Ergebnissen (BENES & GROH 2014).

Die Zertifizierung ist in der Automobilindustrie für viele Unternehmen meist Voraussetzung. Damit wird die Ausgabe eines Zertifikats durch eine externe unabhängige Stelle, das die Übereinstimmung mit dem gegebenen Standard nachweist, bezeichnet. Es wird überprüft, ob die Produkte und Dienstleistungen den Anforderungen der ISO 9001 entsprechen. Bei der Zertifizierung handelt es sich um ein prozessorientiertes Audit. Die Auswirkung des einzelnen Prozesses auf das Produkt ist hierbei von Bedeutung. In der Auditvorbereitung müssen potentielle Risiken innerhalb eines Prozesses ermittelt werden. Diese werden im Audit bewertet, um ihre Absicherung zu gewährleisten. Die Grundlage hierfür bildet der „VDA-Turtle“. Dieses Modell ist in Abbildung 2.8 dargestellt. Der Prozess wird dabei durch den In- und Output des Prozesses charakterisiert. Ergänzt werden

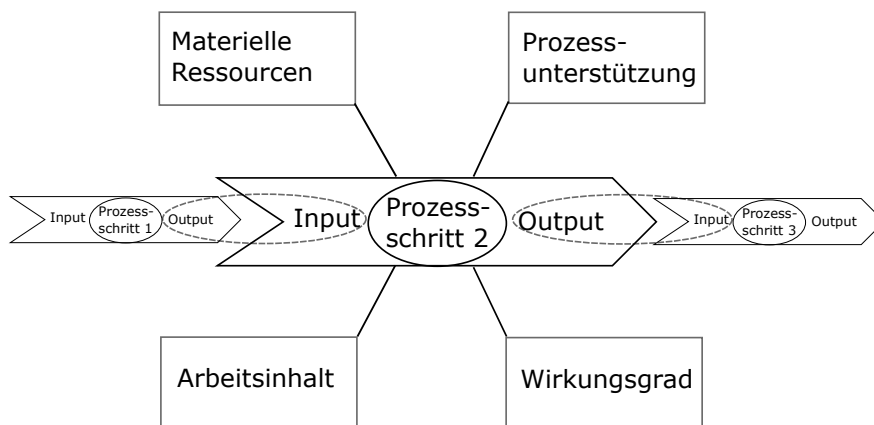


Abbildung 2.8: Turtle-Modell (Quelle: VDA-Band 6 Teil 3)

diese Punkte durch die Ermittlung des Arbeitsinhaltes, der Prozessunterstützung, der materiellen Ressourcen und des Wirkungsgrads. (BRÜCKNER 2009)

Das umfassende Qualitätsmanagement, welches sich auf alle Bereiche einer Organisation erstreckt, wird als Total-Quality-Management (TQM) bezeichnet. Es ist kein eigenständiges Tool des Managements, sondern ein Konzept, welches Qualität als dauerhaftes Systemziel einführt. Für den Erfolg des Systems ist die Unterstützung aller Mitarbeiter notwendig, um den Anforderungen der internen und externen Kunden gerecht zu werden. (SCHMITT 2015)

### 2.3.3 Messtechnik und -fehler

Der Begriff Messen wird in der DIN 1319 mit den Worten „Ausführung von geplanten Tätigkeiten zum quantitativen Vergleich der Messgröße mit einer Einheit“ beschrieben. Messen ist der experimentelle Vorgang zum quantitativen Vergleich zwischen einer Messgröße und einer Bezugsgröße mit Hilfe einer Messeinrichtung. Das ermittelte Resultat der Messung wird Messwert genannt. Der Messwert wird in Form eines Produktes aus einem Zahlenwert und einer Einheit dargestellt. Dem Zahlenwert entnimmt man den Betrag und der Einheit die Art der Messgröße. Die physikalische Größe, welche gemessen werden soll, die Messgröße, ist eine Eigenschaft des Messobjektes.

Bei der Messung von Qualitätskriterien können systematische und zufällige Fehler auftreten. Die systematischen Fehler treten bei unveränderten Messbedingungen stets mit dem gleichen Wert auf und sind objektiv bedingt durch die Unvollkommenheit der Messgeräte und Messmethoden. Sie sind durch genauere Messgeräte und Messverfahren zu ermitteln und können mit deren Hilfe korrigiert werden. Die zufälligen Fehler werden durch nicht voraussehbare und nicht beeinflussbare Veränderungen der Messbedingungen (bspw. Temperaturschwankungen und Erschütterungen) oder durch die Fähigkeiten des Beobachters und den daraus resultierenden subjektiven Fehler (bspw. durch falsches Ablesen) hervorgerufen. Bei wiederholten Messungen mit ein und derselben Messanordnung streuen die Messwerte bedingt durch zufällige Fehler um einen Mittelwert und lassen sich mittels mathematisch-statistischer Verfahren ermitteln. (PARTHIER 2004)

### 2.3.4 Statistische Prozesslenkung

Die statistische Prozesslenkung (Statistical Process Control (SPC)) dient der Erfassung und Bewertung des Streuverhaltens von Prozessen. Damit liefert sie einen maßgeblichen Beitrag zur Begrenzung von Ausschuss und Nacharbeit. Unter Ausschuss versteht man Produkte oder Zwischenprodukte, die nicht weiterverwendet werden können, da sie nicht den geforderten Spezifikationen entsprechen. Als Nacharbeit werden alle Tätigkeiten nach oder während eines Produktionsprozesses verstanden, die zur Beseitigung von Mängeln an einem Produkt aufgewendet werden. Es handelt sich um ungeplante Korrekturmaßnahmen. Kann man eine Abweichung von den Soll-Maßen aufgrund von zeitlichen oder finanziellen Gründen nicht mehr korrigieren, so kommt es zu Ausschuss. Ist eine Korrektur möglich und wirtschaftlich sinnvoll, so entsteht Nacharbeit. Jeder Mitarbeiter im Produktionsprozess unterliegt der Verantwortung, die Weiterverarbeitung fehlerhafter Produkte zu vermeiden. Weitere Arbeitsschritte am fehlerhaften Produkt würden unnötige Kosten verursachen. (PFEIFER & SCHMITT 2014)

Jeder Prozess unterliegt einer Streuung, welche auf zufälligen oder systematischen Einflüssen beruht. Bei einem zufälligen Einfluss erfolgt zumeist eine gleichmäßige Streuung zu beiden Seiten. Bei einem systematischen Einfluss lässt sich bspw. aufgrund von technischen Defekten eine einseitige Verlagerung verzeichnen. Diese Einflüsse können unabhängig vom notwendigen Aufwand immer beseitigt werden, wonach wiederum ein Prozess mit einer zufälligen Streuung vorliegt. Die gaußsche Normalverteilung ist die wichtigste Verteilungsform von Messwerten. Sie hat die Form einer symmetrischen Glockenkurve. Der Mittelwert  $\mu$  ergibt sich aus der Summe aller Einzelmesswerte geteilt durch die gesamte Anzahl der Messwerte  $n$ . Die Standardabweichung  $\sigma$  lässt sich nach folgender Formel berechnen:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \mu)^2}{n}} \quad (2.4)$$

Für die gaußsche Normalverteilung gilt wie in Abbildung 2.9 dargestellt ist:

- Der Anteil der Messwerte, die innerhalb der Standardabweichung  $\sigma$  liegen ( $\pm 1\sigma$ ), beträgt 68,26 %.
- Der Anteil der Messwerte, die innerhalb der dreifachen Standardabweichung ( $\pm 3\sigma$ ) liegen, beträgt 99,73 %.

Das bedeutet, dass nur 0,27 % aller Messwerte außerhalb der dreifachen Standardabweichung liegen. Daher wird an Prozesse die Anforderung gestellt, dass der

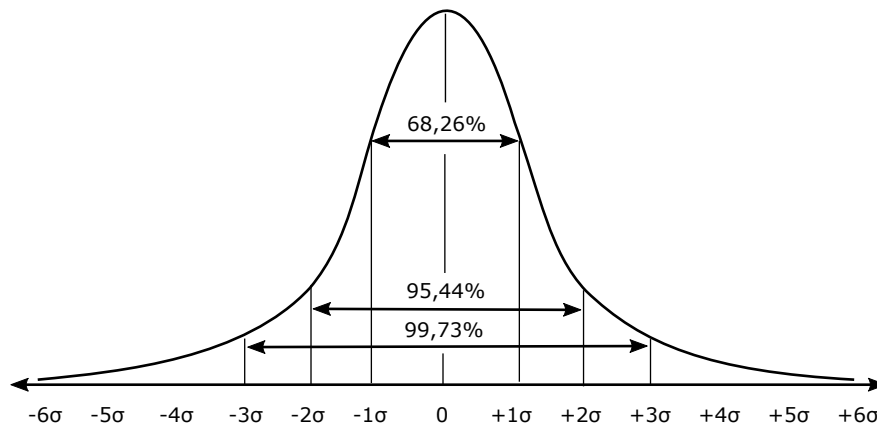


Abbildung 2.9: Gaußsche Normalverteilung

Bereich von  $\pm 3\sigma$  innerhalb der Toleranzen liegen muss. So ist gewährleistet, dass höchstens 0,27 % der vom Prozess produzierten Teile die Toleranzen überschreiten. (FAES 2009)

Um zu überwachen, ob ein Prozess fähig ist, werden zwei Werte betrachtet: der  $C_p$ - und der  $C_{pK}$ -Wert. Die  $C_p$ -Werte dienen der Überprüfung, ob die Streuung eines Prozesses klein genug ist. Der  $C_p$ -Wert ist der Quotient aus der Spanne zwischen der unteren (UTG) und der oberen Toleranzgrenze (OTG) und der sechsfachen Standardabweichung. Ist dieser Quotient größer als  $4/3$ , so spricht man von Prozessfähigkeit, weil die Streuung des Prozesses innerhalb der Toleranzen liegt. Liegt der Quotient zwischen  $4/3$  und 1 kann es zu Verletzungen der Toleranzen kommen. Der Prozess ist bedingt fähig. Ist der Quotient kleiner als 1, werden die Toleranzen verletzt und der Prozess ist nicht fähig. Die  $C_{pK}$ -Werte dienen der Überprüfung, ob die Lage des Prozesses kombiniert mit seiner Streuung dazu führen kann, dass er die Toleranzgrenzen verletzt. Das Kriterium hierfür ist der Quotient aus dem Abstand zwischen dem Mittelwert der Verteilung und der näheren Toleranzgrenze und der dreifachen Standardabweichung. Ist dieser Quotient größer als  $4/3$ , so ist der Prozess fähig. Es kommt nicht zu einer Verletzung der Toleranzen. Analog zum  $C_p$ -Wert gelten Werte kleiner  $4/3$  als bedingt bzw. nicht fähig. Um das Verhalten von Prozessen über längere Zeiträume zu verfolgen, werden Prozessregelkarten (auch Qualitätsregelkarten genannt) eingesetzt. Das sind Datenblätter, auf denen in zeitlichen Intervallen Messwerte aus Stichprobenuntersuchungen protokolliert und deren Verteilungsparameter in zeitliche Verläufe übertragen werden. Prozessregelkarten erlauben so eine statistische Betrachtung des Prozessverhaltens, indem sie prüfen, wie sich die Lage und die Streuung der

untersuchten Stichproben verhalten. Durch ihre Anwendung wird es möglich, auf eine aufwendige 100-%-Prüfung zu verzichten und stattdessen Stichproben zu entnehmen und diese zu untersuchen. (HERING 1999)

Es gibt eine Reihe unterschiedlicher Prozessregelkarten. Unterschieden wird nach Prozessregelkarten für attributive oder variable Daten. Bei den Prozessregelkarten für attributive Daten werden die Fehler oder fehlerhaften Einheiten gezählt. Bei den Prozessregelkarten für variable Daten werden messbare Daten erfasst und ausgewertet. Für die Auswahl der geeigneten Prozessregelkarte ist des Weiteren der Umfang der Stichproben ausschlaggebend. Für ihre Erstellung ist zunächst ein Prozessvorlauf notwendig, aus dem eine Aussage über die Mittelwerte und Spannweiten/Standardabweichungen getroffen werden kann. Zur besseren Übersicht wird der Mittelwert in der Lagespur und die Standardabweichung in der Streuungsspur der Prozessregelkarte aufgetragen. Für beide Werte müssen die oberen und unteren Eingriffsgrenzen anhand von einschlägigen Tabellen bestimmt werden. Bei Überschreiten dieser Eingriffsgrenzen muss korrigierend in den Prozess eingegriffen werden. Ein Prozess wird als beherrscht bezeichnet, wenn die Eingriffsgrenzen nicht über- bzw. unterschritten werden und keine auffälligen Muster auftreten. Um Muster identifizieren zu können, wird der Bereich zwischen den beiden Eingriffsgrenzen in sechs Abschnitte (A-, B- und C-Zone) unterteilt. Die folgenden sieben Muster zeigen nicht beherrschte Prozesse (LINSS 2013; HERING 1999):

- Ausreißer: Ein oder mehrere Punkte liegen außerhalb der Eingriffsgrenzen.
- Run/Lauf: Mindestens sieben aufeinander folgende Punkte liegen auf der gleichen Seite der Mittellinie.
- Mindestens vier von fünf aufeinander folgenden Punkten liegen auf einer Seite der Mittellinie in der Zone B.
- Middle Third: Mindestens zwei von drei aufeinander folgenden Punkten liegen in der Zone A derselben Seite.
- Trend: Sieben aufeinander folgende Punkte fallen bzw. steigen.
- Schwingung: Zwischen 14 aufeinander folgenden Punkten findet abwechselnd Steigen und Fallen statt.
- Perioden: Die Aufzeichnung zeigt ein wiederkehrendes Muster.

### 2.3.5 Versuchsplanung

Mit Hilfe der Versuchsplanung sollen Zusammenhänge einer Funktion oder eines Prozesses identifiziert werden. Ziel ist es, mögliche Einflussgrößen oder auch Störgrößen ausfindig zu machen und deren Einfluss auf die Zielgröße zu beschreiben. Die Wirklichkeit soll hierbei durch ein vereinfachtes Modell für einen Beobachtungsbereich abgebildet werden. Diese vereinfachten Modelle können jedoch zumeist den Verlauf nicht vollständig wiedergeben und sind daher nur für den untersuchten Bereich gültig. Ein Extrapolieren ist hierbei nicht zulässig und würde falsche Ergebnisse liefern. Der vollfaktorielle Versuchsplan beschreibt hierbei die Methode „einen Faktor nach dem anderen“ (ceteris paribus) zu ändern. Hieraus ergibt sich für die benötigte Versuchsanzahl  $n$  bei zwei Parameterwerten pro Faktor in Abhängigkeit der Faktoren  $p$ :

$$n = 2^p \tag{2.5}$$

Somit werden bei einem vollfaktoriellen Versuchsplan bei 4 Parametern 16 Versuche benötigt. Mit Hilfe des vollfaktoriellen Versuchsplans erhält man die höchste Auflösung und alle Wechselwirkungen lassen sich bestimmen. Da die höchste Wechselwirkung in den meisten Fällen eine untergeordnete Rolle spielt, kann man anstelle dieser Aussage einen weiteren Faktor setzen und man erhält einen teilfaktoriellen Versuchsplan. Diese Versuchspläne lassen keine Bestimmung der Dreifachwechselwirkungen mehr zu, die Zweifachwechselwirkungen sind vermengt. Die Abbildung 2.10 zeigt die Auflösungen für voll- und teilfaktorielle Pläne. Erst

$n \setminus p$	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
4	$2^2$ vollst.	$2^{3-1}$ III									
8		$2^3$ vollst.	$2^{4-1}$ IV	$2^{5-2}$ III	$2^{6-3}$ III	$2^{7-4}$ III					
16			$2^4$ vollst.	$2^{5-1}$ V	$2^{6-2}$ IV	$2^{7-3}$ IV	$2^{8-4}$ IV	$2^{9-5}$ III	$2^{10-6}$ III	$2^{11-7}$ III	$2^{12-8}$ III
32				$2^5$ vollst.	$2^{6-1}$ VI	$2^{7-2}$ IV	$2^{8-3}$ IV	$2^{9-4}$ IV	$2^{10-5}$ IV	$2^{11-6}$ IV	$2^{12-7}$ IV
64					$2^6$ vollst.	$2^{7-1}$ VII	$2^{8-2}$ V	$2^{9-3}$ IV	$2^{10-4}$ IV	$2^{11-5}$ IV	$2^{12-6}$ IV
128						$2^7$ vollst.	$2^{8-1}$ VIII	$2^{9-2}$ VI	$2^{10-3}$ V	$2^{11-4}$ V	$2^{12-5}$ IV

- Vollständige Pläne -> alle Wechselwirkungen
- V+ Fraktionelle Pläne -> alle 2fach Wechselwirkungen bestimmbar, Auflösung  $\geq$  V
- IV Fraktionelle Pläne -> 2fach Wechselw. vermengt, Haupteff. vermengt mit 3fach WW
- III Fraktionelle Pläne -> 2fach Wechselw. vermengt, Haupteff. vermengt mit 2fach WW !

Abbildung 2.10: Auflösungsstufen der Versuchsplanung (Quelle: minitab)

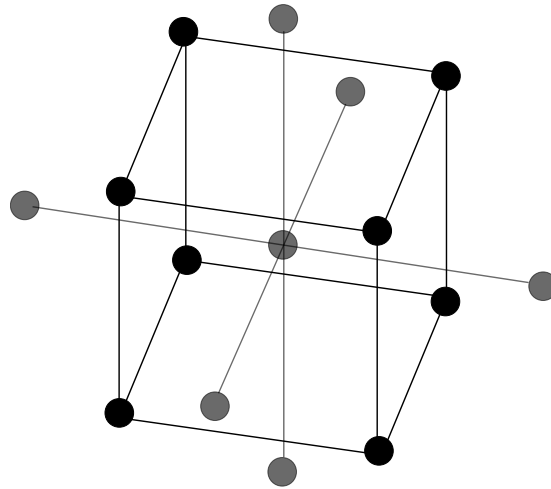


Abbildung 2.11: *Central-Composite-Design*. Aufbauend auf einen zweistufigen Versuchsplan (Würfel) bieten zusätzliche Versuche (Stern) die Möglichkeit nichtlineare Zusammenhänge zu untersuchen. (SIEBERTZ et al. 2010)

ab einer Auflösung von mindestens  $V$  sind die Zweifachwechselwirkungen nicht mehr vermengt. Ab fünf Faktoren sind mit einer Versuchszahl von 16 anstelle von 32 somit alle Wechselwirkungen auswertbar. Bei sechs Faktoren sind alle Wechselwirkungen mit Hilfe von 32 anstelle von 64 Versuchen bestimmbar. (SIEBERTZ et al. 2010)

Weitere Versuchspläne sind die Taguchi- und Plackett-Burmann-Pläne, diese eignen sich jedoch primär zum Darstellen der wichtigsten Einflüsse („Screening“). Die Wechselwirkungen sind bei diesen Plänen nur eingeschränkt auswertbar. Um ein quadratisches oder kubisches Modell zu beschreiben, benötigt man einen zentral zusammengesetzten Versuchsplan (Central composite design). Hierbei wird dem voll- oder teilfaktoriellen Versuchsplan ein mittiger Stern angefügt. Dabei gibt es wiederum zwei Varianten. Beim Central-Composite-Design ragt der Stern über den Versuchswürfel hinaus (siehe Abbildung 2.11), was unter Umständen beim Einstellen der Faktoren zu Problemen führen kann. Um diese Schwierigkeiten zu vermeiden, kann auf das Face-Centered-Central-Composite-Design zurückgegriffen werden. Hier liegen die Punkte des Sterns in der Fläche des Versuchswürfels. Der D-optimale Versuchsplan hat das Ziel, mit wenig Aufwand die Effekte und Wechselwirkungen abzubilden. Zur Erstellung dieses Versuchsplans ist ein Rechenalgorithmus notwendig, da der Versuchsplan iterativ aufgebaut wird.

D-optimale Versuchspläne bieten den geringsten Versuchsaufwand bei linearen Zusammenhängen ab sechs Faktoren, bei quadratischen bereits ab drei Faktoren. (ERIKSSON et al. 2008)

In der vorliegenden Arbeit wurde aufgrund der Möglichkeit der Vorabauswertung der Linearität ein teilfaktorieller Versuchsplan mit anschließender Zentralpunktüberprüfung und Face-Centered-Composite-Design gewählt.

Bei der Auswertung von Versuchsplänen werden für jeden Faktor und jede Wechselwirkung die Mittelwerte aller Minimal- und aller Maximaleinstellungen berechnet. Die Differenz der errechneten Mittelwerte ergibt den Effekt des entsprechenden Faktors bzw. der entsprechenden Wechselwirkung. Dies ist in Abbildung 2.12 dargestellt. Bei der grafischen Darstellung aller Punkte des entsprechenden Faktors

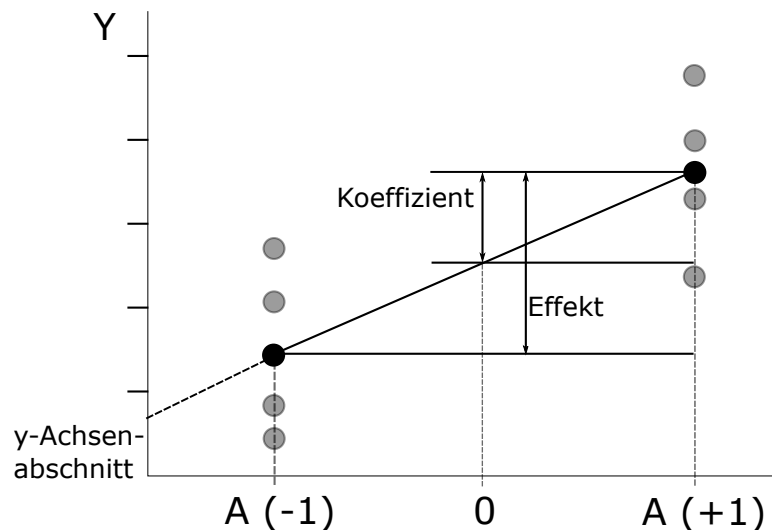


Abbildung 2.12: Bestimmung des Effektes beispielhaft für Faktor A (Quelle: Institut für Technologie und Arbeit)

bei ihrer Maximal- oder Minimaleinstellung ergibt sich daher eine für den Betrachter scheinbare Streuung. Dies ist jedoch dadurch begründet, dass jeder Punkt eine Variation der restlichen Faktoren aufweist und somit einen eigenen Messpunkt darstellt. Für die Effektbestimmung ist nicht die Varianz der Punkte innerhalb des Maximal- oder Minimalwertes ausschlaggebend, sondern die Differenz der Mittelwerte und damit die Zielwertverschiebung aufgrund der Änderung des entsprechenden Faktors bzw. der Wechselwirkung. Die Höhe dieses Wertes gibt den Einfluss des Parameters an. Je höher der Absolutwert, desto größer ist der Effekt bzw. die Wechselwirkung. Für die Modellbildung aus den gewonnenen Daten,



welche in Kapitel 8.1 näher beschrieben wird, sind hierbei der Achsenabschnitt sowie der Koeffizient, welcher die Differenz zwischen mittlerer und maximaler Einstellung bildet, von Bedeutung. (SIEBERTZ et al. 2010)



## 3 Stand der Forschung und Technik

### 3.1 Umformen von glasklaren Thermoplasten

Für die unterschiedlichen Anwendungen des Thermoformens existieren verschiedene Maschinenanlagen, welche der Notwendigkeit des jeweiligen Anwendungsgebietes entsprechen. Im Bereich der Herstellung von glasklaren Thermoplasten kommen die nachfolgend genannten Verfahren zur Anwendung.

#### 3.1.1 Kontaktierende Umformung

Während die berührungslose Formgebung mittels Freiformblasen die Herstellung optisch hochwertiger Bauteile auf symmetrische Konturen beschränkt, kommt bei der Herstellung von Freiformflächen aus transparenten Thermoplasten ebenso die Formgebung in Kontakt mit einem Werkzeug zur Anwendung. Hier werden beispielsweise für geringe Stückzahlen aus Polyurethan-Schaum Positivformen der späteren Kontur abgefräst. Diese Formen werden anschließend mit einem weichen Stoff kaschiert, um bei Kontakt mit dieser die PMMA- oder PC-Platte nicht zu beschädigen. Grundsätzlich können auch Aluminiumformen zur Umformung dienen. Bedingung an glasklare Oberflächen ist dabei eine polierte Fläche. Es muss jedoch darauf geachtet werden, dass eingeschlossene Luft entweichen kann, da diese sonst durch eine Aufrauung des Materials entweichen und somit optische Fehlstellen verursachen würde. In der Regel wird dies durch eine definierte Aufrauung der Form oder Entlüftungsbohrungen erreicht. (SCHWARZMANN 1997)

Zur Vermeidung von Abdrücken werden ebenso Hilfsstoffe wie Fett eingesetzt, das bei hohen Temperaturen eine niedrige Viskosität aufweist und dadurch bei der kontaktierenden Umformung die notwendige Zwischenschicht bildet. Nachteilig ist hier insbesondere die Notwendigkeit des anschließenden Reinigungsprozesses zum Entfernen der Fettschicht. (BUTZKO 2013)

In SCHWARZMANN (1997) wird empfohlen, bei kontaktierender Umformung die Kontaktseite stets kälter zu halten. Darüber hinaus sollte mit niedrigerer Umformtemperatur als bei konventionellen Thermoformprozessen gefahren werden. Die Formel zur Bestimmung der Umformtemperatur lautet hierfür:

$$\text{Umformtemp.} = \frac{\text{Max. Dauergebrauchstemp.} + \text{Umformtemp. Vakuum}}{2} \quad (3.1)$$

Dabei entspricht Max. Dauergebrauchstemp. der maximalen Temperatur, bei welcher der Kunststoff in heißer Luft nach 20000 Stunden Lagerung nicht mehr als 50 % seiner Ausgangseigenschaften verliert (DIN EN 60216-1 VDE 0304-21:2002-09). Umformtemp. Vakuum ist die Temperatur, bei welcher üblicherweise in Thermoformanlagen mittels Vakuum umgeformt wird, um eine genügend hohe Ausformschärfe zu erreichen.

In SCHWARZMANN (2008) wird zudem als weitere Verfahrensvariante zur Herstellung von glasklaren Produkten angeraten, die äußere Randschicht abkühlen zu lassen, um Abdrücke im Formteil zu vermeiden. Das SCHUTZRECHT DE 10 2007 029 637 B4 (2009) sieht zur Vermeidung von Abdrücken im Formteil eine Zwischenschicht aus einer Weichstoffmatte vor, um Bearbeitungsspuren des Umformwerkzeugs zu unterdrücken. In ENGELMANN (2012) wird angegeben, dass für die Herstellung sogenannter „Class-A“-Oberflächen, die eine hohe optische Qualität aufweisen müssen, eine Kombination aus staubfreien Räumen, einer speziellen Werkzeugoberfläche und der Druckregeleinheit notwendig ist; diese Punkte werden jedoch nicht detailliert spezifiziert. Zudem ist die verwendete Halbzeugqualität von entscheidender Bedeutung und kann zu großen Abweichungen in der Wellenbildung des Endprodukts führen.

#### **3.1.2 Hinweise zur Formgebung von Polycarbonat**

Einen guten Überblick über die Möglichkeiten und Grenzen zur Formgebung von Polycarbonat liefert GRIMES (2002). Als optimale Umformtemperatur mit hoher Ausformschärfe bei der Vakuumformung wird 212,8 °C (415 °F) genannt. Ebenso wird hier die Möglichkeit der Umformung im Temperaturbereich zwischen 176,7 °C (350 °F) und 187,8 °C (370 °F) zur Herstellung von einfachen Geometrien optischer Bauteile angegeben. Zur Temperierung wird ein Umluftofen vorgeschlagen, da dadurch ein enger Temperaturbereich eingehalten werden kann, der für die optische Qualität entscheidend ist. Des Weiteren wird die Möglichkeit der Kaltumformung unterhalb der Glasübergangstemperatur beschrieben. Für die Kaltumformung wird eine obere Grenze des Radius von 100 x Wandstärke genannt, da bei kleineren Radien die Eigenspannungen zu Rissen, sogenannten Spannungsrissen (engl.: *Crazes*), führen würden. Des Weiteren werden in BAYER MATERIALSCIENCE GMBH (2005) zur Erreichung einer optimalen Oberflächenqualität seidenmatte Werkzeugoberflächen, die auf 120 - 130 °C temperiert sind, empfohlen. Sich

deckende Informationen finden sich ebenso im Technischen Berater der Firma *General Electric* (GE 2002), dem Hersteller von Lexan<sup>®</sup>.

## 3.2 Wiederverwendbarkeit durch Formflexibilität

Der Begriff der Formflexibilität beschreibt die Eigenschaft eines an die jeweilige Situation anpassbaren und somit verformbaren Objekts, das eine änderbare äußere oder innere Gestalt aufweist (HAGEMANN 2008). Durch seine veränderbare Gestalt bietet ein formflexibles Werkzeug die Möglichkeit eines wiederholten Einsatzes. Gerade im Bereich von geringen Stückzahlen lassen sich durch eine abänderbare Kontur eines einzigen Werkzeugs sowohl Kosten als auch Zeit einsparen.

### 3.2.1 Formflexible Verfahren

Bei Betrachtung bereits vorhandener Ansätze zur Schaffung eines formflexiblen Werkzeugs existieren zum einen endkonturnahe Verfahren. Das “Near-Net-Shape Pin Tooling“ (NPT) (SURFACE GENERATION LTD. 2007) bildet durch Stifte, die in axialer Lage verschoben werden können, eine konturnahe Oberfläche des Bauteils ab. Das System eignet sich bspw. zum Herstellen von Kunststoffbauteilen mittels Harzgießen. Nach erfolgter Einstellung der Stifte kann die Form befüllt werden. Nachdem die Formmasse ausgehärtet ist, muss eine Nachbearbeitung zur Erzeugung der Endkontur erfolgen. Der Hersteller sieht als zweite Verfahrensvariante zusätzlich die direkte Bearbeitung der einzelnen Stempel zur Erzeugung der Endkontur vor. Hierbei sind je nach Anwendungsszenario Stifte aus unterschiedlichen Materialien erhältlich. Durch die Bearbeitung der Stempel kann das Werkzeug auch für einen Umformprozess zur Anwendung kommen. Dies bedeutet jedoch einen zusätzlichen Bearbeitungsschritt, der im Vergleich zum konventionellen Formenbau nur einen reduzierten Zeit- und Kostenfaktor aufweist. Ähnlich diesem genannten Verfahren erfolgt beispielsweise auch das Herstellen einer Sandgussform nach WESTKAEMPER et al. (2000).

Ein weiteres Werkzeug zur flexiblen Abformung von Bauteilen wurde von *2Phase Technologies* entwickelt. Das sogenannte Reconfigurable Tooling System stellt ein Abformwerkzeug eines bereits vorhandenen Bauteils dar. Es besteht aus einer Membran, die mit einem nicht näher spezifizierten anorganischen Binder und Keramikpartikeln gefüllt ist. Beim Abformprozess wird die Membran evakuiert und die Flüssigkeit wird abgesaugt. Die verbleibenden Partikel und der restliche

Binder bilden bei erhöhter Temperatur eine feste Form, die zur Herstellung eines identischen Bauteils genutzt werden kann. Dieser Vorgang kann durch die Befüllung mit der genannten Flüssigkeit rückgängig gemacht werden. Die Verwendung dieses Systems kann ausschließlich bei bereits vorhandenen Bauteilen benutzt werden und wird bspw. von der amerikanischen Luftwaffe für die Abformung von Flügelspitzen zur schnellen Reparatur von Tragflächen in Krisengebieten genutzt. (WOHLERS 2007)

Für Umformverfahren können endkonturnahe Verfahren nicht angewendet werden, da eine Nachbearbeitung bei dünnwandigen großflächigen Bauteilen nicht möglich ist. Beim NPT-Werkzeug wird die Bearbeitung der einzelnen Stifte zur Generierung einer Umformform vorgeschlagen. Weitere Ansätze zur Herstellung eines formflexiblen Umformwerkzeugs, die anschließend detaillierter erläutert werden sollen, bestehen übergeordnet betrachtet vorwiegend aus höhenverstellbaren Stempeln, ähnlich dem NPT-Werkzeug, die jedoch durch eine zusätzliche Interpolationsschicht erweitert sind, womit das Eindringen der Stiftmatrix ins Material bei der Umformung unterbunden wird.

Die durchgeführten Arbeiten fokussieren sich im Wesentlichen auf zwei Teilbereiche. Zum einen werden Möglichkeiten zur Positionierung und Klemmung der einzelnen Nadeln bzw. des gesamten Nadelpakets untersucht, die eine kostengünstige, schnelle und reproduzierbare Einstellung des Werkzeugs mit hoher Genauigkeit erlauben. Als zweiter Teilbereich kann der Einsatzbereich des Werkzeugsystems betrachtet werden. In diesem Zuge ergeben sich bei den jeweiligen Materialklassen unterschiedliche Anforderungen an das Werkzeugsystem. Dabei stehen die erreichbaren Qualitätskriterien des Bauteils mittels eines formflexiblen Werkzeugsystems im Vordergrund. Nachfolgend sollen durchgeführte Arbeiten insbesondere im Hinblick auf den zweiten Teilbereich der vorliegenden Untersuchung betrachtet werden, da sich hieraus die Notwendigkeit des Handlungsbedarfs ableiten lässt. Den größten Anteil der vorhandenen Arbeiten stellt der Bereich der Blechumformung dar. Hierbei lieferte NAKAJIMA (1969) den ersten Ansatz zur Abbildung der Formflexibilität durch ein Stempelfeld aus dicht gepackten Drähten, die in ihrem Durchmesser dem entsprechenden Fertigungsverfahren angepasst werden. Seine Arbeit beschreibt sowohl die Einstellung der Drähte mittels zweier unterschiedlicher Methoden als auch den möglichen breiten Anwendungsbereich des Werkzeugs und die durchgeführten Untersuchungen zur Umsetzung der einzelnen Bereiche. Neben der Metallumformung wird hier auch das Vakuumformen von Kunststoffen als Anwendungsgebiet benannt. Durch das Vakuumformen auf der Drähtematrix

selbst konnte keine ebene Oberfläche erzielt werden. Das Stempelprofil und die damit verbundenen Stufen bildeten sich in dem Formteil ab. Um dies zu verhindern, wurden die Einfallstellen zwischen den Stempeln mit Knetmasse ausgeglichen. Durch das Anlegen eines geringen Drucks von  $10 \text{ N/cm}^2$  ( $\approx 980 \text{ mbar}$ ) konnte auch bei wiederholter Umformung keine deutliche Verformung der Knetmasse festgestellt werden. Diese frühe Arbeit zeigt bereits den möglichen Einsatzbereich des formflexiblen Werkzeugs im Bereich der Thermoformung. Die Interpolation der Drähte durch Knetmasse verursacht ähnlich wie beim NPT-Werkzeug einen zusätzlichen Prozessschritt, der wiederum einen zeitlichen Aufwand mit sich bringt. Des Weiteren werden keine Angaben zum umgeformten Werkstoff gegeben. Die Qualitätsbeurteilung erfolgt subjektiv und bezieht sich ausschließlich auf die Maßhaltigkeit.

Das SCHUTZRECHT US 4212188 (1980) sieht ebenfalls eine solche Stiftematrix zur Metallumformung vor. Hierbei kann jeder Stempel individuell angesteuert und dadurch eine parallele Einstellung aller Stempel vorgenommen werden. Die Anlage sieht zusätzlich ein gespiegeltes Stempelfeld zur Erzeugung einer Negativkontur vor. Hierdurch kann die notwendige Kraft zur Blechumformung aufgebracht werden. Eine Interpolationsschicht wird in der genannten Patentschrift nicht benannt.

Vom Lehrstuhl für umformende Fertigungsverfahren der *Universität Dortmund* wurde ebenso ein auf diesem Konzept beruhendes Werkzeug für das Tiefziehen von Blechen entwickelt (KLEINER & SMATLOCH 1991; FINCKENSTEIN & KLEINER 1991). Das erarbeitete Werkzeugsystem wurde in SCHUTZRECHT DE 100 43 209 A1 (2002) erneut aufgegriffen und zusätzlich um eine Druckeinheit erweitert. Dabei wird eine elastische Membran mit einem Druckfluid geweitet und zur Konturanpassung des Werkstücks genutzt. Ferner wird zum Ausgleich der wirkenden Kräfte stempelseitig ebenso ein Druck mittels Fluid aufgebaut, um ein Verschieben der Stempel bei steigender Umformkraft zu verhindern.

Die Arbeiten von WALCZYK & HARDT (1998) und WALCZYK et al. (1998) beschäftigten sich mit der systematischen Auslegung der einzelnen Komponenten zur Erzeugung eines formflexiblen Werkzeugsystems für die Metallumformung. Es werden konkret Vorteile und Notwendigkeiten angegeben. Die Auslegung der Aktuatorenmatrix erfolgte spezifisch für die bei der Blechumformung auftretenden Kräfte und die daraus resultierenden notwendigen Klemmkraft der Stempel. Hier wird die Verwendung einer dicht gepackten Stiftematrix aufgrund der mechanischen Belastung als notwendig genannt. Zusätzlich werden im Speziellen die Positionierung der einzelnen Stempel mittels Hydraulik sowie der verwendete

Klemmmechanismus beschrieben.

Die Untersuchungen von HAAS et al. (2002) und SCHWARZ et al. (2002) konzentrierten sich auf ein Werkzeugsystem zur Blechumformung und die resultierenden Einfallstellen durch den gegebenen Anlagenaufbau. Die Stifte sind direkt nebeneinander positioniert. Zur Vermeidung der sichtbaren Eindrücke im umgeformten Blech wurden Interpolationsschichten unterschiedlicher Stärke und Härte untersucht. Die Eindringtiefe wurde zum einen durch eine 3D-Messmaschine mit einer Auflösung von 1/1000 mm und zum anderen durch die Schatten-Moiré-Technik ermittelt und die Ergebnisse wurden einander gegenübergestellt. Der Schattenwurf eines unter einem definierten Einfallswinkel beleuchteten Gitters bildet bei Einfallstellen ein schwarz-weißes Ringmuster aus. Die Anzahl der Ringe je Einfallstelle liefert dabei einen Höhenwert. Die Moiré-Technik erlaubt eine sehr viel schnellere Vermessung als mit Hilfe der 3D-Messmaschine. Mit Hilfe der Schatten-Moiré-Technik konnten auch sehr kleine Eindrücke von 0,048 mm (3D-Messmaschine) bzw. 0,066 mm (Moiré-Technik) erkennbar gemacht werden. Zur Vermeidung von Eindrücken ist zum einen die Stärke der Interpolationsschicht entscheidend. Mit Zunahme der Stärke wurde eine Abnahme der Eindringtiefe festgestellt. Eine Erhöhung der Stärke von 12,70 mm auf 25,40 mm ergab bei Vermessung mit der Moiré-Technik eine Eindringtiefe von 0,000 mm und somit konnten keine Einfallstellen detektiert werden. Die Vermessung mittels 3D-Messmaschine lieferte hierbei einen Wert von 0,025 mm. Zum anderen ist die Härte der Schicht ausschlaggebend. Je härter die Schicht, desto dicker ist die Interpolationsschicht zu wählen.

In der Arbeit von BAI et al. (2006) wird ein formflexibles Formwerkzeug zur Streckformung von Metalllegierungen, ebenfalls auf einer Stiftmatrix aufbauend, vorgestellt. Die Anlage weist ein Arbeitsvolumen von  $450 \times 600 \times 280 \text{ mm}^3$  auf, das durch 300 Stempel mit einem Durchmesser von je 30 mm abgebildet wird. Die Stempel sind direkt nebeneinander angeordnet. Die Einstellzeit der Stempel beträgt 15 Minuten. Die Arbeit untersucht die Einflüsse der Interpolationsschicht sowie die Rückstelleffekte des Metalls im Hinblick auf die Endkontur. Durch die Kompression der Interpolationsschicht ist eine Nachführung der Stempel notwendig, um Toleranzen einhalten zu können. Durch diese Nachführung können Formteilgenauigkeiten von 0,5 mm erreicht werden.

LIU et al. (2008) und LI et al. (2007) fokussierten in ihrer Arbeit die Metallumformung mittels zweier unterschiedlicher Umformstrategien. Zum einen wurde das „multi-point die forming“ angewandt. Es werden Ober- und Unterseite der Stiftmatrix als feste Form verwendet und finden als Presse Anwendung. Bei der



zweiten Verfahrensvariante wird ausgehend von einer ebenen Anordnung der Stifte während des Umformvorgangs die Endkontur eingestellt. Dies wird als „multi-point press forming“ bezeichnet. Der schematische Ablauf der Verfahrensvarianten ist in Abbildung 3.1 dargestellt.

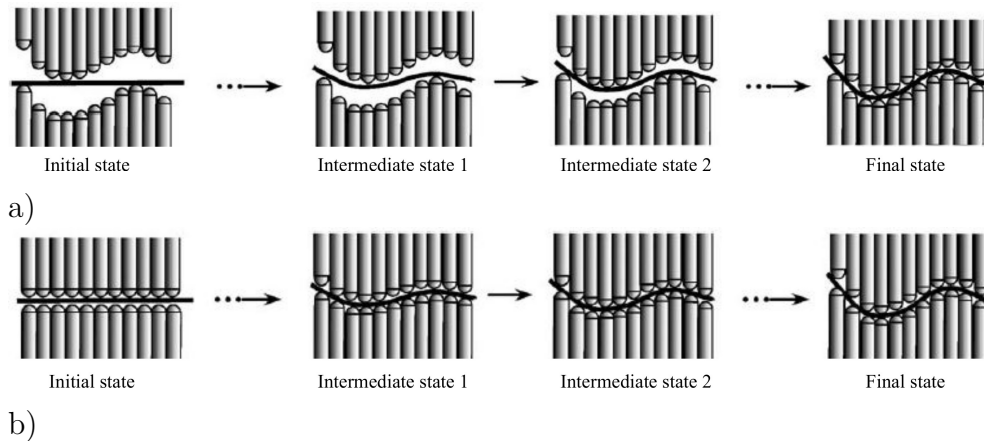


Abbildung 3.1: Schematischer Ablauf des a) „Multi-point die forming“ und b) „Multi-point press forming“ nach LI et al. (2007)

Die Arbeit wurde an der *Jilin-Universität* durchgeführt, an der im „Dieless Forming Technology Development Centre“ auch das Projekt „Dataform“ in Zusammenarbeit mit der *Cardiff-Universität* bearbeitet wurde (SU 2009; PHAM et al. 2011). Das Projekt fokussierte sich auf die Entwicklung eines flexiblen Formwerkzeugs für Flugzeug-Paneele bzw. im Allgemeinen mit der automatisierten formflexiblen Blechumformung. Das Werkzeugsystem ist in Abbildung 3.2 a) dargestellt. Aus dieser Zusammenarbeit entstand auch eine Untersuchung zum Thermoformen mit Hilfe eines formflexiblen Werkzeugs (SU et al. 2012). Hierbei wurde die Umformung von PC und PVC (Polyvinylchlorid) mittels FEM simuliert, um einen Eindruck von der resultierenden Wandstärkenverteilung zu erlangen. Umgeformt wurden jedoch nur Paneele aus PVC mit einer Materialstärke von 4 mm (siehe Abbildung 3.2 b)). Um Einfallstellen zwischen den Stempeln zu vermeiden, wurde eine Zwischenschicht aus Polyurethan mit einer Stärke von 6 mm verwendet. Die Erwärmung des Materials erfolgte in einem Umluftofen. Detaillierte Ergebnisse hinsichtlich der Bauteilqualität werden jedoch nicht angegeben.

Des Weiteren bietet die Firma *Opti Mal Forming Solutions* ein solches flexibles Werkzeug für die Blechumformung kommerziell an (BOERS 2009). Hierbei sind verschiebbare Stifte in einem verspannbaren Rahmen angeordnet. Die Werkzeug-

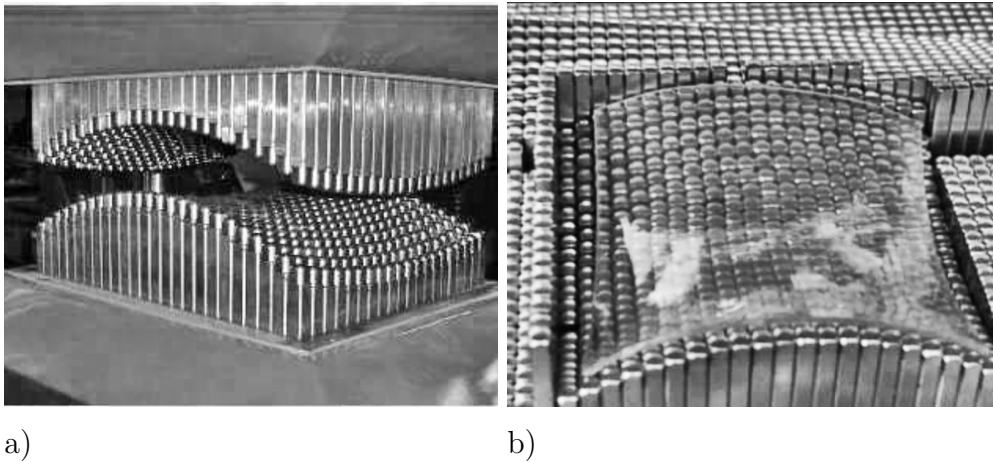


Abbildung 3.2: a) Werkzeugsystem aus dem Projekt „Dataform“ (SU 2009)  
 b) Thermogeformte Scheibe aus PVC nach SU et al. (2012)

oberseite besteht aus einem Gummikissen. Das Blech wird mit hydraulischer Kraft gegen die eingestellte Form gepresst.

Ein durch Stifte segmentierter Anlagenaufbau wurde ebenfalls in den USA zum Patent angemeldet. Hier wird als Zwischenmaterial eine RTV-Gummimischung benannt, jedoch nicht näher spezifiziert. Als Anwendung hierfür wird die Herstellung von Composite-Materialien genannt. Die Form besteht aus einzelnen Modulen. Dadurch lässt sich die Fläche beliebig erweitern. Ebenso können die Module von der zentralen Steuereinheit entfernt werden, um zu einem Autoklaven transportiert zu werden. (SCHUTZRECHT US 5851563 1998)

Ebenfalls auf einer Stiftematrix beruht das von HAGEMANN (2008) entwickelte formflexible Werkzeug für das Spritzgießen. Aufgrund des Anwendungsbereichs im Spritzgießen und der resultierenden hohen Drücke müssen die Nadeln direkt nebeneinander angeordnet werden. Der entwickelte Klemmmechanismus erlaubt die Positionierung jeder einzelnen Nadel, ohne eine Verschiebung der Nachbarnadel aufgrund der Reibung zu bewirken. Durch zwei Blenden, die auf je einer Achse angeordnet sind, werden die Nadeln geklemmt. Jede Blende besitzt einen Spalt von der Größe einer Nadelreihe, um so genau eine Nadelreihe nicht zu klemmen. Bei der Anwendung zweier Blenden ergibt sich somit genau eine nicht gespannte Nadel, die einstellbar ist. Der Problematik der abgebildeten Nadelrasterung bei Freiformflächen auf dem fertigen Bauteil wurde durch einen zusätzlichen Nachbearbeitungsprozess durch Schleifen entgegengewirkt. Zudem wurden Zwischenschalen angewendet, die durch Stereolithographie oder auch Metall verarbeitende additive

Fertigungsverfahren hergestellt wurden.

PEDERSEN & LENAU (2010) untersuchten die Möglichkeit zur Herstellung von frei geformten Betonelementen auf einem auf dem Stempelprinzip beruhenden formflexiblen Werkzeug und bewerteten dieses hinsichtlich der Bauteilgüte. Es wird angegeben, dass Einfallstellen zwischen den Stempeln mittels einer Interpolationsschicht aus einem offenporigen Schaumstoff mit einer Stärke von 60 mm auf 0,3 mm verringert werden konnten. Die sichtbaren Einfallstellen sind in Abbildung 3.3 dargestellt. Hierbei wird auch ersichtlich, dass sich Einfallstellen bei einer positiven Krümmung (B) stärker abbilden als bei einer negativen Krümmung (A).

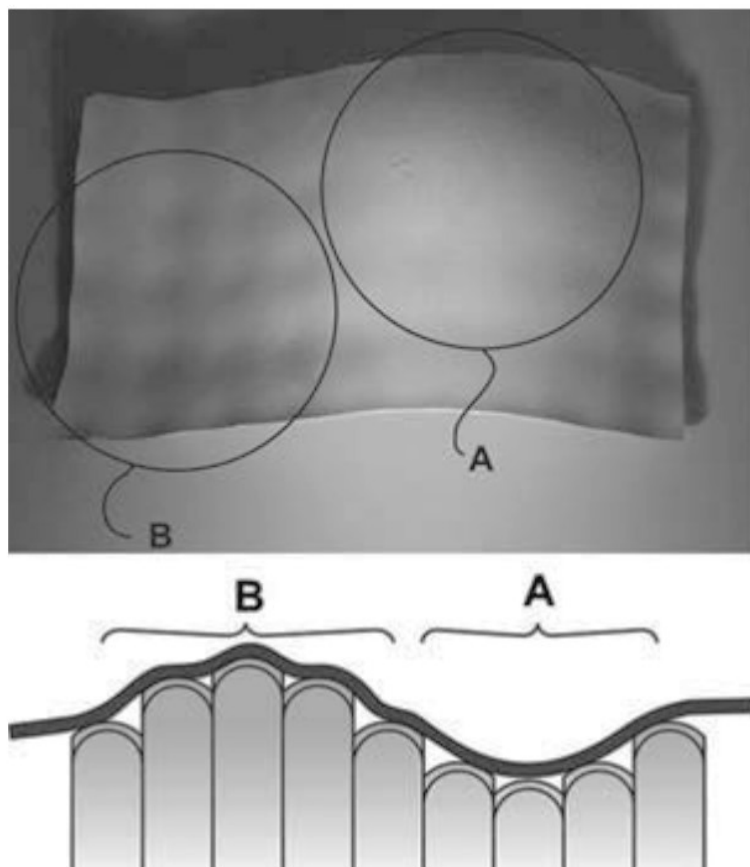
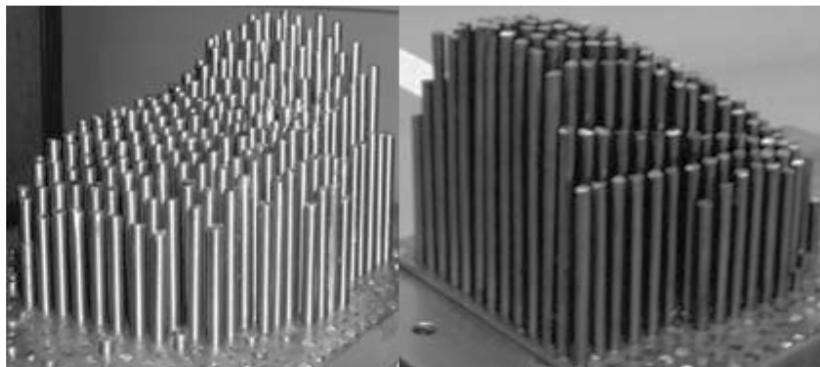


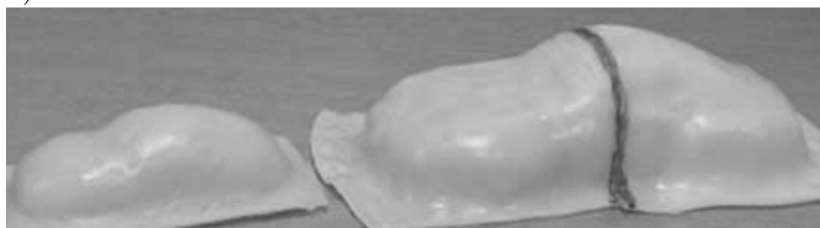
Abbildung 3.3: Einfallstellen aufgrund der Anlagengestalt (PEDERSEN & LENAU 2010)

KLEESPIES & CRAWFORD (1998) untersuchten im Speziellen die Stiftematrix und die resultierende Wellenbildung bei der Umformung von Styrolplatten mittels Tiefziehen durch Vakuum. Dabei wurde der resultierende Durchhang mittels Simulation in Abhängigkeit von dem E-Modul, der Druckbeaufschlagung sowie

den geometrischen Daten der Stempelabstände untersucht. Die Verifikation der Messergebnisse ergab eine gute Übereinstimmung, die jedoch tendenziell ein besseres experimentelles Ergebnis aufwies. Dies wird vermutlich zum einen durch die Abweichung des E-Moduls der Interpolationsschicht bewirkt, zum anderen von der Nichtbeachtung der Styrolplattensteifigkeit bei der Umformung. Des Weiteren wird in dieser Arbeit angegeben, dass die Oberflächenbeschaffenheit des Bauteils stets einen Kompromiss zwischen der Wellenbildung des Formteils und der Bauteilkrümmung darstellt, die sich aus der Umformkraft durch das Vakuum und damit auch der Beaufschlagung der Fläche zwischen den Stützpunkten ergibt. In der Arbeit von OWODUNNI et al. (2004) wurde die Machbarkeit zur Herstellung von Bauteilen aus CFK, Blech und dem Thermoplast „Polymorph“ mittels eines formflexiblen Werkzeugsystems aufgezeigt. In Abbildung 3.4 b) ist das gefertigte Bauteil aus Polymorph dargestellt. Die Herstellung von größeren Bauteilen kann durch die zweimalige Einstellung des formflexiblen Werkzeugs erreicht werden (siehe Abbildung 3.4 a)).



a)



b)

*Abbildung 3.4: a) Vorder- und Rückseite des abgebildeten Automodells zur Hochskalierung eines Bauteils mit Hilfe eines einzelnen Werkzeugsystems und b) das hergestellte Bauteil aus Polymorph (OWODUNNI et al. 2004)*

Ein weiteres Patent zur Herstellung von Schiffssegeln aus einer Thermoplastfolie beruht auf einem Lattengerüst, das als Gitter angeordnet ist, womit die Freiform nicht durch eine Stiftematrix dargestellt wird. Dieses Gerüst ist in einer elastische Masse eingebettet, die nicht näher spezifiziert wird (SCHUTZRECHT DE 602 12 674 T2 2007).

In WANG (2009) wurde ein solches Werkzeugsystem, wiederum bestehend aus einer Stiftematrix, in einer Tiefziehmaschine eingesetzt. Umgeformt wurden PC, PMMA, ABS (Acrylnitril-Butadien-Styrol) und HIPS (High Impact Polystyrene). Die entstehenden Einfallstellen zwischen den Stempeln wurden hier mittels Füllmaterial beseitigt (siehe Abbildung 3.5) oder es wurde die endkonturnahe

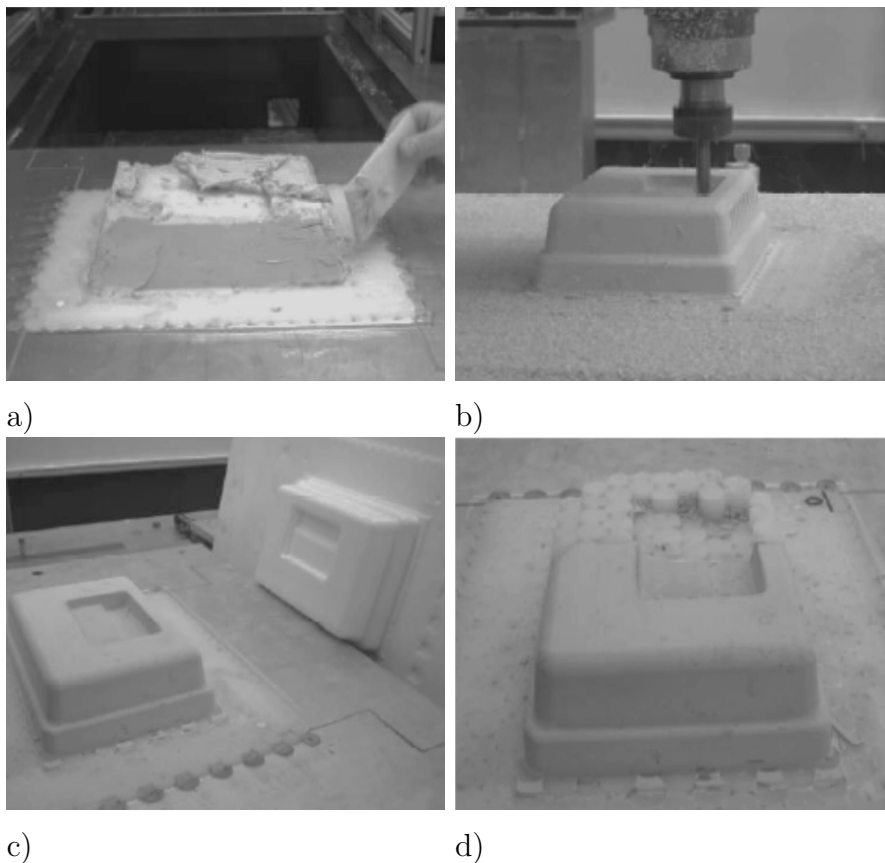


Abbildung 3.5: a) Aufbringen von Füllmaterial b) Bearbeitung des Füllmaterials  
c) Abgeformtes Bauteil d) Beseitigung des Füllers (WANG 2009)

Einstellung durch Fräsen nachbearbeitet. Als Qualitätskriterium für das formflexible Werkzeugsystem und die erreichbare Qualität diente die Vermessung der Rauheit des Bauteils. Diese wurde jedoch nicht für die mittels Füller ausgeglichene

Oberfläche vermessen. Ebenso wenig wurde eine Toleranzgrenze bestimmt. Derzeit beschäftigt sich das *Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik* innerhalb der Projektgruppe für ressourceneffiziente mechatronische Verarbeitungsmaschinen im Hinblick auf das in Kapitel 1.1 benannte Verfahren zur Erzeugung von Scheiben aus PMMA mit der kostengünstigen Anlagenherstellung. Ziel des Forschungsprojekts „Wiederverwendbares Werkzeug (3D-Former)“ ist die Herstellung von kleineren Krümmungsradien. Hierfür ist eine deutlich größere Anzahl an Aktuatoren notwendig. Die Ansteuerung jedes Aktuators für sich führt zu nicht vertretbaren Investitionskosten der Anlage. Aus diesem Grund ergibt sich die Notwendigkeit einer zentralen Steuer- und Regeleinheit, um die Kosten der Anlage von der Stempelanzahl zu entkoppeln. Hierfür wird ein kostengünstiger Klemmmechanismus für die einzelnen Stempel vorgeschlagen, der auf der Grundlage von Reibmechanismen und einer magnetischen Lösung basiert. Umformversuche mit PMMA in einer Tiefziehmaschine zeigten wiederum die bereits zuvor aufgeführte Problematik der Wellenbildung bei Vakuumbeaufschlagung. Die Eindruckstellen lassen sich als dunkle Bereiche in Abbildung 3.6 erkennen. Zudem sind als zentrale helle Punkte innerhalb der dunklen kreisförmigen Ausbildung die Abluftbohrungen für das Vakuum erkennbar. (SIMON et al. 2013)

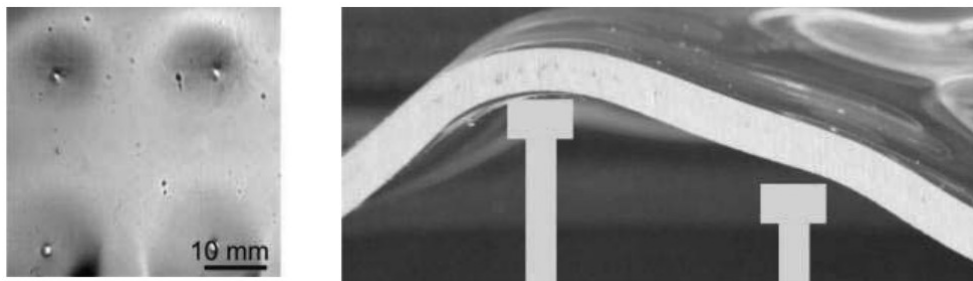


Abbildung 3.6: Einfallstellen einer PMMA-Scheibe aufgrund der Beaufschlagung mit Vakuum nach SIMON et al. (2013)

Die Arbeit von CAO et al. (2013) beschäftigt sich im Speziellen mit der Umformung von Polycarbonat mit einem formflexiblen Werkzeug. Die Formgebung erfolgte wiederum mit Vakuum. Untersuchungskriterium der Arbeit stellte die Wellenbildung des Formteils dar. Es wurde zwischen zwei Modi unterschieden (siehe Abbildung 3.7). „Mode 1“ stellt den Abdruck durch die Stempel auf der Scheibe dar. „Mode 2“ bezeichnet den Durchhang zwischen den Stempeln. Der Abdruck der Stempel auf der Scheibe führt zur Reduzierung der Wanddicke. Die Abweichung der Materialstärke nach der Umformung sowie die entstehenden



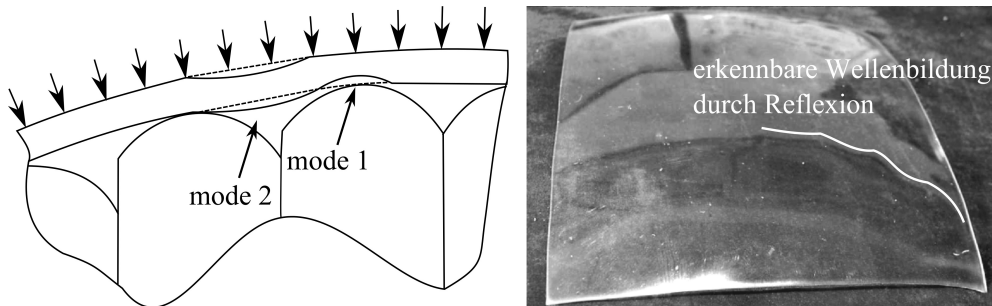


Abbildung 3.7: Wellenbildung aufgrund der Anlagengestalt und hergestelltes Bauteil nach CAO et al. (2013)

Einfallstellen nach „Mode 2“ stellen die Qualitätskriterien der verformten Scheibe dar und wurden in Abhängigkeit von der Formgebungstemperatur und dem Umformdruck untersucht. Die Untersuchungen wurden für eine Formtemperatur von 150 °C, 160 °C und 170 °C bei einem Druck zwischen 0,01 MPa und 0,1 MPa durchgeführt. Hieraus ergab sich, dass in Abhängigkeit von der Temperatur ein Mindestdruck aufgebracht werden muss, um die Scheibe umzuformen. Die besten Umformergebnisse für beide Qualitätskriterien konnten bei einer Temperatur von 160 °C und einem Druck von 0,03 MPa erreicht werden. Die Einfallstellen nach „Mode 2“ waren hierbei größer als 0,2 mm. Die hergestellte Scheibe wies nach Angabe der Autoren keine sichtbaren Einfallstellen auf. Diese Angabe stützt sich auf eine rein subjektive Betrachtung. Des Weiteren wurde innerhalb der Arbeit nur eine Scheibengeometrie untersucht. Die umgeformte PC-Scheibe ist ebenso in Abbildung 3.7 dargestellt. Die erkennbare Wellenbildung durch Reflexion auf dem Bauteil wurde hierbei im Vergleich zum Original ergänzt. Durch die Reflexion auf dem dargestellten Bauteil lässt sich erkennen, dass die Scheibe im Gegensatz zu der Aussage der Autoren eine Wellenbildung aufweist.

Die zuvor beschriebenen Arbeiten sind nochmals in Tabelle 3.1 zusammengefasst und dabei in ihre jeweiligen Anwendungsbereiche unterteilt. Es lassen sich vorwiegend zwei Hauptanwendungsbereiche identifizieren. Diese sind zum einen das Gebiet der Metallumformung und zum anderen das Gebiet des Thermoformens. Die übrigen Arbeiten sind unter dem Punkt „Sonstige Anwendungen“ zusammengefasst.

Formflexible Werkzeuge	
Metallumformung	NAKAJIMA 1969 SCHUTZRECHT US 4212188 1980 KLEINER & SMARTLOCH 1991 FINCKENSTEIN & KLEINER 1991 WALCZYK & HARDT 1998 WALCZYK ET AL. 1998 SCHUTZRECHT DE 100 43 209 A1 2002 HAAS ET AL. 2002 SCHWARZ ET AL. 2002 OWODUNNI ET AL. 2004 BAI ET AL. 2006 LIU ET AL. 2008 LI ET AL. 2007 SU 2009 BOERS 2009 PHAM ET AL. 2011
Thermoformen	NAKAJIMA 1969 KLEESPIES & CRAWFORD 1998 SCHUTZRECHT EP 1 249 328 B1 2002 SCHUTZRECHT DE 198 10 478 B4 2004 SCHUTZRECHT DE 602 12 674 T2 2007 OWODUNNI ET AL. 2004 WANG 2009 SU ET AL. 2012 CAO ET AL. 2013 SIMON ET AL. 2013
Sonstige Anw.	SCHUTZRECHT US 5851563 1998 WESTKAEMPER ET AL. 2000 WOHLERS 2007 SURFACE GENERATION LTD. 2007 HAGEMANN 2008 PEDERSEN & LENAU 2010

Tabelle 3.1: Durchgeführte Arbeiten im Bereich der formflexiblen Werkzeugsysteme

### 3.2.2 Formflexibles Verfahren zur Herstellung von Scheiben aus Polymethylmethacrylat

Vom *Institut für Technologietransfer* der Hochschule München wurde für die *BMW AG* eine formflexible Anlage zur Herstellung von 3D-verformten Scheiben aus PMMA, die bereits in Kapitel 1.1 aufgegriffen wurde, entwickelt. Das Prinzip wurde in SCHUTZRECHT DE 198 10 478 B4 (2004), die Herstellung der Interpolationsschicht in SCHUTZRECHT EP 1 249 328 B1 (2002) geschützt. Das Verfahren beruht, wie oben bereits bei anderen Ausführungen erwähnt, auf Stempeln, die in der Höhe variiert werden können. Die Höheneinstellung der Stempel wird direkt aus CAD-Daten abgeleitet. Auf diese Stempel wird eine elastische Matte aufgelegt, welche die Stützpunkte interpoliert. Diese Matte muss eine ausreichend hohe Steifigkeit besitzen, um zwischen den Stempeln keinen Durchhang aufzuweisen. Die daraus resultierende Wellenbildung im Formteil stellt bei der Herstellung von Scheiben für die Automobilbranche ein Ausschusskriterium dar. Die Optimumsfindung hinsichtlich der optisch wahrnehmbaren Wellenbildung wurde dahingehend empirisch ermittelt. Die Abmaße des entwickelten Prototyps der Anlage betra-



gen 1260 mm x 2400 mm, auf deren Fläche 98 Aktuatoren angeordnet sind. Der kleinstmögliche Radius beträgt ca. 1000 mm. Die absolute Verfahrengenauigkeit der Aktuatoren liegt bei  $\pm 19 \mu\text{m}$ . Als Auflagefläche für die Silikonkautschukmatte dienen achteckige Teller aus PMMA. Diese sind zwischen ihren Ecken eingeschnitten, um die Verformung der Interpolationsschicht ausreichend mitzumachen, aber dennoch eine ausreichend hohe Steifigkeit zu gewährleisten, um dem Durchhang der Interpolationsschicht entgegenzuwirken (siehe Abbildung 3.8). Zur Herstellung einer gebogenen PMMA-Scheibe werden die Aktuatoren mittels CAD-Daten in die richtige Position verfahren. Parallel wird die PMMA-Scheibe in einem Umluftofen auf ihre Verformungstemperatur von etwa  $130^\circ\text{C}$  erwärmt. Anschließend wird die zäh-elastische und damit verformbare PMMA-Scheibe auf die Silikonkautschukmatte aufgelegt. Durch die hohe Wärmespeicherkapazität von PMMA ergibt sich keine signifikante Abkühlung während des Transports zur Anlage. Das Material ist dadurch weiter formbar. Zur Verformung ist keine zusätzliche Last notwendig, da die Anpassung der Scheibe ausschließlich durch Eigengewicht erfolgt. Da die Silikonkautschukmatte eine für Silikone hohe Wärmeleitfähigkeit von  $1,2 \text{ W/mK}$  aufweist, ergibt sich eine geringe Abkühlzeit von ca. zehn Minuten.



*Abbildung 3.8: Formflexible Anlage zur Umformung von PMMA*

## 3.3 Kenntlichmachung optischer Defekte in transparenten Scheiben

Bei Betrachtung des aktuellen Stands der Technik in der verarbeitenden Industrie von führenden Thermoformern, die Helikopterkanzeln, Helmvisiere oder Ähnliches produzieren, steht zumeist am Ende der Fertigungskette eine geschulte Fachkraft, welche die optische Qualität beurteilt. Diese subjektive Beurteilung führt gerade bei großen Stückzahlen zur Ermüdung der Fachkraft und zu einer stark schwankenden akzeptierten Qualität. Daher ist bei der Serienproduktion eine zuverlässige, objektive Kontrolle notwendig. Ansätze hierzu wurden in erster Linie für die glasverarbeitende Industrie im Bereich der Kfz-Scheibenherstellung verfolgt. Die angewandten Verfahren werden in diesem Kapitel beschrieben.

### 3.3.1 Transmission

Die Transmission beschreibt in der Optik die Durchlässigkeit eines Stoffes für einen einfallenden Lichtstrom. Der Transmissionsgrad wird definiert als das Verhältnis des austretenden und des einfallenden Strahlungsflusses und nimmt Werte zwischen 0 und 1 an (LITFIN 2005). Fehler in Verschiebungen führen zu einer Änderung des Transmissionsgrades und beeinträchtigen die Sicherheit beim Führen eines Fahrzeugs oder dem Bedienen von Maschinen.

Die Firma *Isra Vision AG* verwendet zum Erkennen von typischen Glasfehlern, wie bspw. Blasen und Steinchen, ein Prinzip, das auf dem Moiré-Effekt basiert. Der Moiré-Effekt ergibt sich bei der Überlagerung zweier Raster, bspw. zweier Streifenmuster, die bei gleichem Streifenabstand um einen Winkel verdreht sind oder bei gleichem Streifenabstand bzw. bei nicht gleichem Streifenabstand einen seitlichen Versatz aufweisen. Dadurch treten sogenannte Moiré-Streifen auf, die den bekannten Interferenzstreifen ähneln. Dieser Effekt wird in der Messtechnik zur Beurteilung von optischen Defekten in Scheiben eingesetzt. Die Scheibe wird zwischen den beiden Mustern platziert. Fehler in der Scheibe führen zu einer Änderung des Moiré-Musters und können dadurch aufgedeckt werden. Dieses Verfahren lässt die Erfassung einer großen Fläche zu und kann ebenso Rückschlüsse auf die Fehlerart liefern. Mit Hilfe dieser Messmethode können ebenso Verzerrungen (siehe Kapitel 3.3.2) nach dem Biegeprozess erfasst werden (PINGEL 1997; REDNER & BHAT 1999). Die Firma verwendet diesen Effekt bei ihrem Messsystem, dem sogenannten „Screenscan Final“ im „Distortion Modul“ (SCHUTZRECHT DE 10

2005 050 882 A1 2007). Das Messsystem „Screenscan Final“ ist in Abbildung 3.9 dargestellt. Es besteht zusätzlich aus einem „Absorption Modul“ und einem

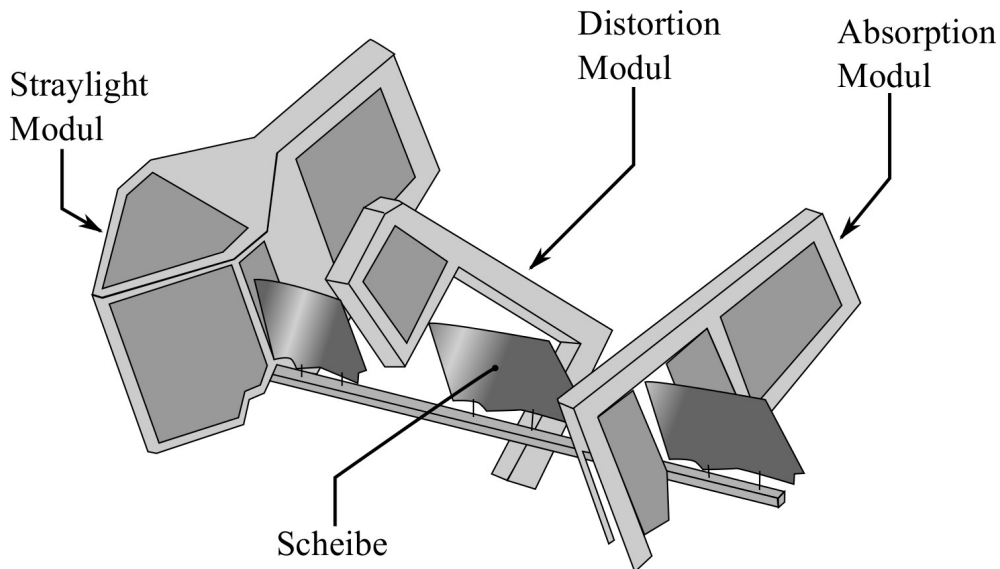


Abbildung 3.9: Module zur optischen Qualitätskontrolle des „Screenscan Final“ der Firma Isra Vision AG (KLEINEBECKER 2006)

„Straylight Modul“. Ersteres erfasst Fehler, die das Licht absorbieren (bspw. Kantenfehler, Punktfehler), Zweiteres Fehler, die das Licht streuen (bspw. Kratzer, Ausmuschelungen) (KLEINEBECKER 2006).

Das „Safeglass-Verfahren“, ein durch den EUTIST-IMV gefördertes Projekt, arbeitet mit Hilfe zweier Beleuchtungstechniken. Das Hellfeld wird zur Detektion von dunkel erscheinenden Fehlern, bspw. Zinnfehlern, verwendet. Das Dunkelfeld wird genutzt, um lichtstreuende Fehler wie Kratzer zu detektieren. Ferner können Verzerrungen mit Hilfe der dritten Einheit durch ein Zebromuster (siehe Kapitel 3.3.2) erkannt werden (siehe Abbildung 3.10). (SIMOMAA 2003)

In BENNINGHOFF et al. (1999) wird das Messprinzip von „Lasorline 2F1“ erläutert. Das System misst die Lichtablenkung und -absorption. Die Beleuchtung erfolgt mittels LEDs, die phasenversetzt geschaltet werden. Deformierende Glasdefekte lassen die von der Kamera aufgezeichnete Lichtintensität einer Phase deutlich von der Intensität der zweiten Phase abweichen. Durch dieses Beleuchtungssystem ist es ferner möglich, aufbauend auf der Möglichkeit der Messung in zwei Richtungen lichtablenkende Defekte zu detektieren.

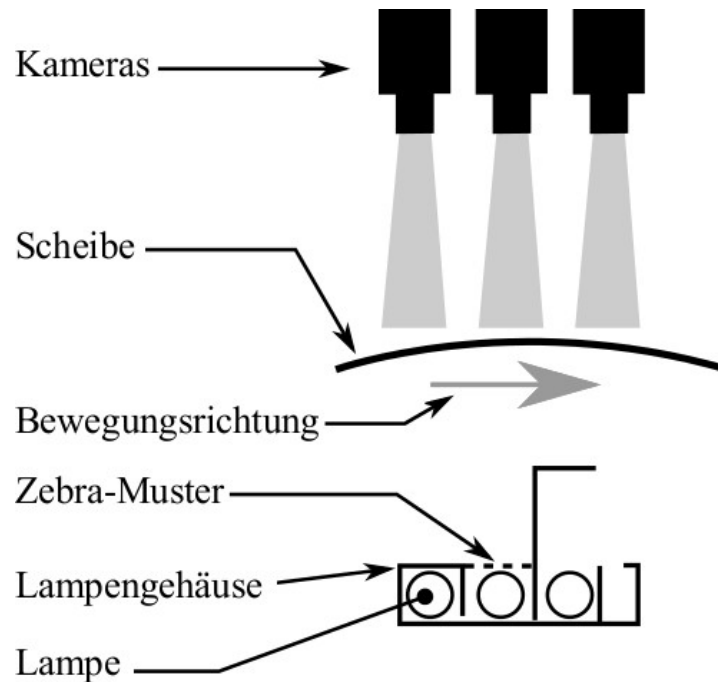
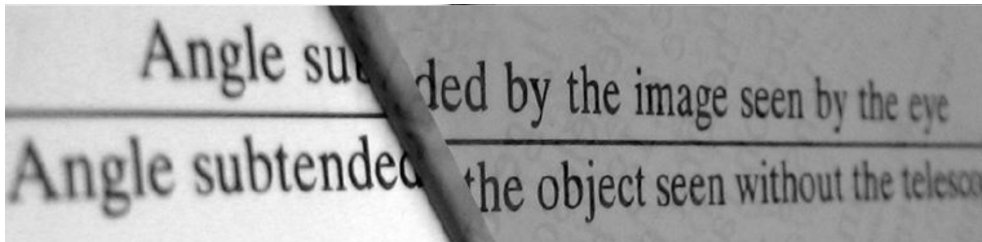


Abbildung 3.10: Schematischer Aufbau des Safeglass-Verfahrens (SIMOMAA 2003)

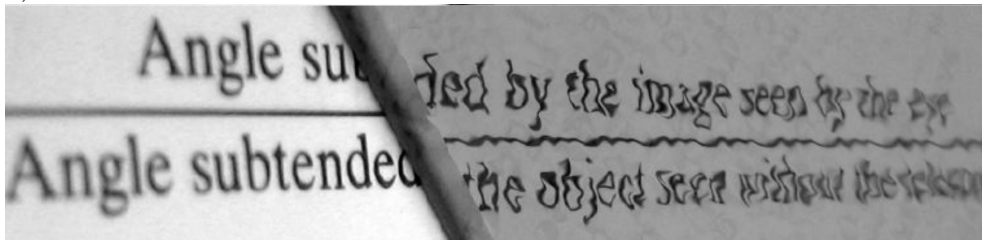
#### 3.3.2 Verzerrungen

Generell werden Verzerrungen durch eine Varianz des eintreffenden Lichtwinkels  $> 0^\circ$  auf ein Material unterschiedlicher optischer Dichte oder durch die unterschiedliche Wegstrecke innerhalb des Materials bestimmt. Im Hinblick auf Verglasungsmaterialien gilt, dass zum einen der Radius, zum anderen ein Dickenunterschied der Scheibe aufgrund nicht möglicher absoluter Planparallelität Verzerrungen hervorruft (TEICHER 2003). Abbildung 3.11 a) zeigt, wie ein Versatz durch die Dicke des Materials hervorgerufen wird. Abbildung 3.11 b) zeigt die resultierende Verzerrung aufgrund einer nicht ebenen Oberfläche. Es kann konstatiert werden, dass die resultierende Verzerrung durch eine unebene Oberfläche einen deutlich störenderen Einfluss aufweist als der Versatz durch den Dickenunterschied.

Resultierende Verzerrungen werden in der Einheit Dioptrien (dpt) angegeben. Die Einheit Dioptrien stellt den Kehrwert der Einheit Meter dar und gibt die Brechkraft eines optischen Systems an (DIN 52305). Zur Detektion von resultierenden Verzerrungen werden prinzipiell immer die Abweichungen von einem bekannten Muster, das sich aus der Durchsicht durch das Verglasungsmaterial ergibt, un-



a)



b)

Abbildung 3.11: a) Homogene Versetzung der Abbildung, hervorgerufen durch die Glasdicke b) Verzerrungen aufgrund von nicht planparallelen Oberflächen (LINDAHL & STODELL 2007)

tersucht. Die Auswertung erfolgt auch hier zumeist noch durch eine geschulte Fachkraft (SIMOMAA 2003). Das am häufigsten verwendete Muster, ob in- oder offline, stellen die Zebrastreifen, ein schwarz-weiß alternierendes Streifenmuster, dar. Diese kommen beispielsweise auch in der Arbeit von ROSENBAUM (2003) zur Anwendung. Die Firma *Alliance Optics* automatisierte hierbei die Auswertung der Verzerrungen. Das sogenannte ONDULO-Verfahren kann zum einen zur Ermittlung der Verzerrungen in Transmission dienen, zum anderen zur Ermittlung der Maßhaltigkeit in Reflexion. Die Prüfung einer Scheibe in Transmission mit Hilfe des Musters ist in Abbildung 3.12 dargestellt.

In LINDAHL & STODELL (2007) kommt zur gleichzeitigen Auswertung der Abweichung in vertikale und horizontale Richtung ein Schachbrettmuster zur Anwendung, welches an das von der *Toyota Motor Corporation* verwendete Gitter angelehnt ist (MAKIGUSHI et al. 1994). In der ECE-Regelung R 43 für Sicherheitsscheiben (ECE R 43) wird zur Messung der Verzerrung ein Kreismuster herangezogen. Die akzeptable Abweichung richtet sich nach dem entsprechenden Scheibenbereich (Zone A = Hauptsichtbereich, Zone B = Randbereich). Die Verzerrung eines Kreises vom Durchmesser 8 mm darf in Zone A nicht mehr als  $\pm 2$  mm und in Zone B nicht mehr als  $\pm 6$  mm betragen. Nach DIN 52305 wird im Gegensatz



*Abbildung 3.12: Bestimmung der resultierenden Verzerrung in Automobilscheiben mit Hilfe des Zebrausters (ROSENBAUM 2003)*

zur ECE-Regelung R 43 der in der physikalischen Optik eingeführte Brechwert gemessen. Die Messung der Verzerrung erfolgt ebenfalls nach dem Projektionsverfahren (Projektion eines Rasters). Das „Shadow-Graph-Verfahren“ nutzt den entstehenden Schattenwurf durch die Oberflächenwellen bei Schrägstellung der Scheibe als Analysemethode (WOODWARD & MASON 2003). Eine vollautomatisierte Qualitätsprüfung, die den Effekt des Schattenwurfs durch Oberflächenwellen nutzt, wird in BONGARDT & BENNINGHOFF (1997) genannt. Hier wird sowohl der Schattenwurf in Reflexion als auch in Transmission analysiert. Das Verfahren ist unter dem Namen „Ombroligne“ oder „LasorLine OM“ bekannt.

### **3.4 Handlungsbedarf**

Formflexible Werkzeuge stellen eine kostengünstige Lösung im Hinblick auf Materialressourcen und Fertigungszeiten dar. Die Fertigung von Prototypen bis hin zu Kleinserien in Zeiten der individualisierten Produktion rückt immer mehr in den Mittelpunkt, vor allem bei kleinen und mittelständischen Betrieben. Forschungsaktivitäten im Bereich der formflexiblen Werkzeuge werden für unterschiedliche Materialklassen durchgeführt. Das Hauptaugenmerk liegt auf dem Einstellmecha-

nismus der Stiftematrix und der Umformung von Blechbauteilen. Ebenso wurde die Anwendung des Verfahrens im Bereich des Thermoformens bereits in mehreren Arbeiten untersucht und für bestimmte Bauteilgruppen als zielführend aufgezeigt. In Anbetracht der aufgeführten Zielsetzung in Kapitel 1.2 und des dargelegten Stands der Technik lassen sich zu den jeweiligen Unterpunkten „Verfahrensparameter“, „Formflexibles Werkzeugsystem“ und „Qualitätsprüfung“ nachfolgend aufgeführte Defizite erkennen.

Im Bereich der konventionellen Formgebung von Polycarbonat erweist sich das Freiformblasen als eine Verfahrensvariante, die auf eine starre Form verzichtet, jedoch nur innerhalb eines konstant abbildbaren Radius variabel ist. Freiformflächen mit mehr als einem Radius bzw. Wendepunkt können dadurch nicht gefertigt werden. Für die Formgebung mit einer starren Form werden die Verfahrensparameter, insbesondere die Temperatur als oberstes Kriterium, identifiziert. Definierte Werte werden nicht angegeben. Die Empfehlungen beruhen auf empirischen Erkenntnissen. Daher lassen sich als primärer Handlungsbedarf die Erfassung der relevanten Verfahrensparameter sowie deren Untersuchung im Hinblick auf die optimalen Einstellparameter identifizieren.

Des Weiteren kann konstatiert werden, dass die Forschungsaktivitäten im Bereich des formflexiblen Werkzeugbaus in einer sehr breiten Materialklasse vertreten sind. Als favorisiertes Verfahren zur Abbildung einer Freiformfläche kann das System aus Nadeln bzw. Stempeln erkannt werden, das in Abhängigkeit vom Material mit oder ohne Zwischenschicht zur Anwendung kommt. Im Bereich des Thermoformens ist stets eine Interpolationsschicht vorzusehen, um das Eindringen der Nadeln zu verhindern bzw. zu minimieren. Die genannten Arbeiten beruhen auf der Entwicklung eines formflexiblen Werkzeugsystems, das in konventionellen Thermoformanlagen zur Anwendung kommt. Wie in KLEESPIES & CRAWFORD (1998) angegeben wird, kommt es daher stets zu einem Kompromiss zwischen der abzubildenden Kontur und der Wellenbildung aufgrund des notwendigen Drucks. Dadurch ergibt sich eine beschränkte Einsatzmöglichkeit des Endprodukts. In KLEESPIES & CRAWFORD (1998) wird hierzu angegeben, dass das formflexible Werkzeug zur Herstellung von Verpackungen genutzt werden kann, da die Oberflächengüte und Wellenbildung keine übergeordnete Rolle spielen. In SU et al. (2012) wird der Einsatz des Werkzeugsystems zur Herstellung von Freiformpanelen für die Architektur angegeben. Des Weiteren wurden Ansätze verfolgt, welche auf Füllmaterial zurückgreifen (NAKAJIMA 1969; WANG 2009). Diese führen zwar zu deutlich besseren Bauteilqualitäten, beschränken jedoch den zeitlichen Vorteil der Formfle-



xibilität. Die Ausgangsbasis stellt in allen Arbeiten stets das gegebene System dar, das die Umformung mittels Überdruck oder Vakuum erzeugt und somit nicht die optimale Krafteinwirkung für die nicht starre Form darstellt. Entsprechend ergeben sich zusätzliche Maßnahmen bzw. ein eingeschränkter Anwendungsbereich der Bauteile. Die vorhandenen Arbeiten verfolgen keine Identifizierung der notwendigen Zielgrößen und keine entsprechende Anpassung der Anlagengestaltung als Ganzes. Ziel der Arbeit ist es, die Formflexibilität als Ausgangssituation zu betrachten und die benötigten Komponenten zur Wärmeerzeugung und Lasteinbringung adaptiv entsprechend der Zieldefinition „optisch hochwertige Bauteile“ zu generieren.

Als letzter Punkt ist die qualitative Bewertung des Werkzeugsystems zu sehen. Sie erfolgt in den genannten Arbeiten zumeist über die Erfassung der Maßhaltigkeit. Zusätzlich wird in der Arbeit von WANG (2009) die Rauigkeit des Materials untersucht, um einen weiteren Anhaltswert für die Qualität zu liefern. In CAO et al. (2013) werden die Wellenbildung sowie die Wanddickenverteilung des Bauteils zur Bewertung herangezogen, wodurch die optimalen Prozessparameter gefunden werden konnten. Die qualitative Beurteilung der Optik in Transmission und damit die Klassifizierung als Verglasungsmaterial erfolgt in den genannten Arbeiten ausschließlich subjektiv und reicht damit nicht aus, den Einfluss des formflexiblen Systems konkret abzuleiten. Hierfür lassen sich zwei Gründe identifizieren. Zum einen hat die Aufarbeitung des Standes der Technik ergeben, dass optische Prüfeinrichtungen vorwiegend für die Herstellung von Windschutzscheiben aus Glas entwickelt wurden und eingesetzt werden. Eine direkte Übertragung des Messverfahrens ist aufgrund der auftretenden Fehlerarten im Kunststoffformteil nicht möglich und muss adaptiert werden. Als zweiter Grund lässt sich die durch die subjektive Betrachtung nicht feststellbare Toleranzgrenze angeben. Durch die subjektive Beurteilung der optischen Qualität lässt sich keine verwertbare Aussage dazu treffen, inwieweit die Bauteilqualität für welchen Anwendungsbereich akzeptabel ist.

Anhand der aufgezeigten Defizite ergibt sich daher die erforderliche Vorgehensweise, um ein formflexibles Werkzeugsystem für die Umformung von Polycarbonat zu entwickeln. Die genannten Punkte sind in Tabelle 3.2 aufgelistet, wodurch der daraus abgeleitete Handlungsbedarf identifiziert wird. Zunächst müssen typische Fehlerarten beim Thermoformen identifiziert werden, um im Anschluss daran bereits verwendete Prüfverfahren für Kunststoffverschiebungen zu adaptieren. Im folgenden Schritt sollen Konzepte entwickelt werden, die, ausgehend von der Form-



Defizite	Konkretisierung	Handlungsbedarf
<b>Verfahrensparameter</b>	durch Empirie gewonnene Parameter als Know-how der Firmen nicht frei zugänglich Mangel an Prüfmetho- den zur konkreten Identifizie- rung der Fehlergröße	Identifizierung und Unter- suchung der Verfahrenspara- meter
<b>Anlagenorientierung</b>	Entwicklungsmittelpunkt für das formflexible Werkzeug stellt die Thermoformanlage dar Ergebnisoptimierung ist durch Anlage begrenzt	Zielgrößen defi- nieren Anlagen- auslegung
<b>Qualitätskontrolle</b>	Anwendungsbereich nur bei Glasscheiben Übertragung auf Kunst- stoffverglasungen nicht vorhanden Mangel an objektiver To- leranzgrenze	Übertragung der Prüfmetho- den auf Kunststoff- verscheibungen

Tabelle 3.2: Aufgezeigte Defizite zur Ableitung des Handlungsbedarfs

flexibilität der Anlage, eine Erwärmung und Umformung des Materials erlauben. Die Auswahl der Konzepte muss speziell im Hinblick auf die Zielgröße „optisch hochwertig“ erfolgen. Hinsichtlich der Konzepte müssen zur Optimumsfindung im letzten Schritt Untersuchungen zu den Verfahrensparametern angestellt werden, um dem Endanwender ein ganzheitliches Konzept an die Hand zu geben.



## 4 Vorgehensweise zur Realisierung eines formflexiblen Werkzeugs

### 4.1 Zieldefinition

Um eine Akzeptanz als Formwerkzeug in der Industrie zu erreichen, muss ein formflexibles Werkzeug vor allem in der Lage sein, bei gleichzeitiger Verkürzung der Prozesszeit eine Qualität zu erreichen, die durch den aktuellen Formenbau gegeben ist. Meistens steht der Gesichtspunkt der Qualität über dem zeitlichen Faktor und stellt in vielen Produktparten ein wichtiges Kaufkriterium dar. Als Zieldefinition muss daher die Herstellung eines qualitativ gleichwertigen Bauteils entsprechend den aktuellen Formgebungsvarianten gelten. Hierbei werden zwei unterschiedliche Qualitätsklassen als Referenzbauteile ausgewählt. Zum einen findet ein Vergleich mit Verschleißungen, die keine einwandfreie optische Qualität erfordern, statt. Dieser Qualitätsklasse sind beispielsweise Maschinenverkleidungen zuzuordnen. Die zweite Qualitätsklasse entspricht der optisch hochwertigen Verschleißung von bspw. Nutzfahrzeugen oder generell Verschleißungen, die primär zur Durchsicht genutzt werden und somit auch im Sinne der Sicherheit frei von optischen Störquellen sein müssen.

### 4.2 Methode zur Umsetzung

Für die Umsetzung eines formflexiblen Werkzeugs zur Herstellung optisch hochwertiger Bauteile wurde die in Abbildung 4.1 dargestellte Methode angewendet. Die aufgezeigte Methode ist in zwei Säulen untergliedert. Dabei steht auf der linken Seite die Realisierung des formflexiblen Werkzeugs und auf der rechten Seite die Versuchsdurchführung. Die Grundlage zur Realisierung eines formflexiblen Werkzeugs stellt die Auswahl der Umformstrategie dar. Zur Umsetzung des formflexiblen Werkzeugs, das aus einer Stempelmatrix sowie der Interpolationsschicht besteht, muss zunächst vorhandenes Wissen gesammelt und untersucht werden. Durch die Analyse des Ist-Zustands und das Festlegen von Randbedingungen können im nächsten Schritt Defizite bereits vorhandener Anlagen aufgedeckt werden. Im Anschluss daran gilt es, ein Vorgehen zur Auslegung eines formfle-

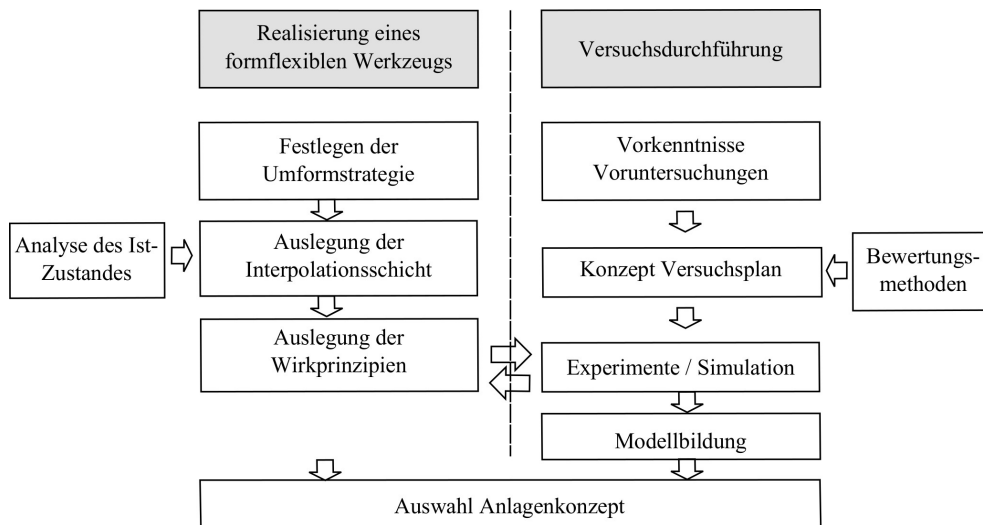


Abbildung 4.1: Methode zur Realisierung eines formflexiblen Werkzeugs zur Herstellung optisch hochwertiger Bauteile

xiblen Werkzeugs unter der Varianz geometrischer Randdaten zu erstellen. Durch das Festlegen der Qualitätsanforderungen bzw. der Zieldefinition des fertigen Bauteils können anschließend durch bekannte Verfahren des methodischen Entwickelns geeignete Wirkprinzipien ausgewählt und umgesetzt werden. Parallel dazu gliedert sich der Strang der Versuchsdurchführung folgendermaßen: Beruhend auf Voruntersuchungen und eingeholten Vorkenntnissen werden Parameter für die Versuchsdurchführung ausgewählt und ein Konzept zur Versuchsplanung wird aufgesetzt. Kenntnisse über die Beeinflussung der optischen Qualität durch Prozessparameter sind nicht gegeben und bedingen daher die gezielte Untersuchung variierender Parameter und ihrer Wechselwirkungen untereinander. Zur Analyse der Zielparameter müssen hierbei zusätzlich die Bewertungsmethoden zur Erfassung der Qualitätsanforderungen festgelegt bzw. entwickelt werden. Nach Realisierung des formflexiblen Werkzeugs und der notwendigen Wirkprinzipien können die Experimente entsprechend des Versuchskonzepts durchgeführt werden. Aus den Ergebnissen der Experimente kann ein Modell zur Vorhersage der Bauteilqualität abgeleitet werden. Die Ergebnisse der Versuche sowie die Vorhersagewahrscheinlichkeit durch das Modell bestimmen im letzten Schritt die Bewertung und Auswahl des Anlagenkonzepts.

# 5 Realisierung des formflexiblen Werkzeugs

In diesem Kapitel wird zunächst auf das verwendete Material zur Umformung eingegangen. Daraufhin werden die Umformstrategien erläutert, welche die Auslegung der Versuchsanlage bestimmen.

## 5.1 Halbzeug

Die verwendeten Polycarbonatplatten wurden von der *Bayer MaterialScience AG* zur Verfügung gestellt. Sie wurden im Extrusionsprozess aus dem Granulat Makrolon AG 2677 (Datenblatt: BAYER MATERIALSCIENCE AG (2010B)) hergestellt. Hierbei handelt es sich um ein UV-stabilisiertes Material, das speziell für den Automobilsektor (AG = Automotive Glazing) entwickelt wurde und somit im Vergleich zu anderen Makrolontypen die höchste angebotene optische Güte aufweist. Üblicherweise werden im Automobilsektor Platten von 5 mm Stärke eingesetzt. Diese stellen 80 - 90 % der hergestellten Scheiben dar. Um den Einsatzbereich des formflexiblen Werkzeugs zu erweitern, wurden zudem Platten mit einer Stärke von 10 mm untersucht.

## 5.2 Umformstrategie

Bei Betrachtung der Literatur lässt sich erkennen, dass für die Umformung von Polycarbonat zwei unterschiedliche Verfahrensvarianten zur Anwendung kommen. Zum einen findet die Umformung oberhalb der Glasübergangstemperatur statt, zum anderen unterhalb der Glasübergangstemperatur. Untersuchungen von namhaften Thermoformern in der Industrie haben gezeigt, dass beide Verfahrensvarianten auch in der Praxis umgesetzt werden. Beide Varianten weisen sowohl Vorteile als auch Nachteile auf, die sich wie folgt zusammenfassen lassen. Die Umformung unterhalb der Glasübergangstemperatur lässt durch den niedrigen Temperaturbereich Scheiben von hoher optischer Qualität erwarten. Die Nachteile bilden die notwendige hohe Umformkraft aufgrund des hohen E-Moduls sowie eine lange Prozesszeit. Die Umformung oberhalb der Glasübergangstemperatur

bietet vor allem den Vorteil einer kurzen Taktzeit und damit einer energieeffizienten Fertigung. Nachteilig wirken sich in Anbetracht der optischen Qualität des Materials die höheren Umformtemperaturen aus. Ausgehend von der Zielgröße „optische Qualität“, ist es konsequent, die Umformung unterhalb der Glasübergangstemperatur als geeignetes Verfahren zu betrachten und das Werkzeugsystem hierfür auszulegen. Da jedoch der zeitliche Faktor bei der Umformung oberhalb der Glasübergangstemperatur weit unterhalb der Kriechumformung liegt und das formflexible Werkzeug zum einen Kosten, zum anderen aber auch Zeit sparen soll, wird diese Verfahrensvariante ebenfalls verfolgt. Somit ergeben sich zwei Anlagenaufbauten, die für Versuchsreihen umgesetzt werden.

### **5.3 Umformanlage mit Interpolationsschicht**

Die Analyse des Standes der Technik hat gezeigt, dass das Prinzip aus höhenverstellbaren Stempeln bzw. Nadeln zur Erzeugung eines formflexiblen Umformwerkzeugs das favorisierte Verfahren darstellt. Hierbei kommen nach WALCZYK & HARDT (1998) zwei Ansätze zum Einsatz. Zum einen werden Anlagen verwendet, die aus einzeln angeordneten Stiften bestehen, und zum anderen solche aus direkt nebeneinander angeordneten Stiften. Für den durchgeführten Anlagenaufbau wurde eine einzeln angeordnete Stiftematrix gewählt. Dies ergibt sich zum einen aus den abformbaren Radien, die bei Verschiebungen zu 80 % einen Radius von 1000 mm oder größer aufweisen. Daher ist trotz eines vorhandenen Stempelabstandes eine ausreichend hohe Auflösungsgenauigkeit gegeben. Zum anderen handelt es sich bei Verschiebungen zumeist um Abmessungen im Bereich von 2000 mm x 3000 mm und damit um großflächige Bauteile. Durch die Positionierung der Stempel direkt nebeneinander würden sich daher in Abhängigkeit vom Positioniermechanismus eine hohe Einstellzeit sowie ein unnötiger Materialaufwand durch nicht benötigte Stempel für die geforderte Abbildungsgenauigkeit ergeben. In WALCZYK & HARDT (1998) wird zudem angegeben, dass bei der Blechumformung aufgrund der auftretenden Kräfte eine große Stempelanzahl zur Kraftverteilung vorteilhaft ist. Da im Bereich des Thermoformens die auftretenden Kräfte als weit geringer einzuordnen sind, ergibt sich in weiterer Konsequenz kein Vorteil für eine dicht angeordnete Stempelmatrix. Betrachtet man die Referenzanlage zur Umformung von Scheiben aus PMMA, so wurden bei den einzelnen Unterstützungspunkten Teller aus PMMA vorgesehen. Grund hierfür ist der große Stempelabstand und

die damit einhergehende notwendige Unterstützung der Matte zur Verringerung des Durchhangs der Interpolationsschicht. Auf der Grundlage der jeweils einzeln angetriebenen Aktuatoren und der dadurch hohen Kosten konnte kein geringerer Stempelabstand gewählt werden. Für die aufgebaute Anlage, die für die Umformversuche zunächst manuell betätigt werden soll, wird von der Entwicklung eines kostengünstigen Klemmmechanismus im Projekt „3D-Former“ (siehe Kapitel 3.2.1) ausgegangen, der es erlaubt, den Stempelabstand zu reduzieren, ohne eine Verteuerung der Anlage zu verursachen. Zur Abbildung einer genauen Kontur können zwei Möglichkeiten der Auflagefläche verfolgt werden. Zum einen können, wie bei SCHUTZRECHT DE 198 10 478 B4 (2004) verwendet, Kugelgelenke zur Konturabbildung eingesetzt werden. Der Vorteil hierbei ist, dass der Kontaktpunkt stets den Höhenwert darstellt. Nachteilig ist jedoch, dass sich dadurch eine gerade Auflagefläche ergibt, welche die Interpolation der Freiformfläche stört und dazu führt, dass keine korrekte Kontur abgebildet wird. Werden keine Kugelgelenke vorgesehen, so bildet sich der Berührungspunkt in Abhängigkeit vom Radius versetzt aus. Diese Versetzung muss durch eine Korrektur der Höhenwerte ausgeglichen werden. Die Auflagefläche kann jedoch hemisphärisch mit einem bestimmten Radius gewählt werden, wodurch eine exakte Abbildung der Kontur erzeugt wird. Der Stempel muss dabei mindestens einen Radius aufweisen, der dem kleinsten abzubildenden Radius entspricht oder kleiner als dieser ist. Angesichts der exakteren Abbildungsgenauigkeit und der einfacheren Umsetzbarkeit soll für die aufgebaute Anlage daher nur die Auflage auf einem hemisphärischen Stempelende umgesetzt werden.

Als letztes zentrales Element ist die Auslegung der Interpolationsschicht vorzunehmen. In bestehenden Arbeiten zum Thermoformen mittels eines formflexiblen Werkzeugs wird angegeben, dass die Verwendung einer Interpolationsschicht erforderlich ist, um Einfallstellen zu vermeiden. Die notwendige Dicke wird experimentell oder mit Hilfe der FEM bestimmt, und es wird eine Empfehlung angegeben, um bei der Lasteinleitung mit Vakuum einen möglichst geringen Durchhang zu erzielen. Hierbei konnten diese Einfallstellen zwar stets deutlich reduziert werden, es kam jedoch weiterhin zu einer Detektion der Wellenbildung durch das menschliche Auge. Daher sollen in dieser Arbeit zunächst die Interpolationsschicht und die daraus resultierenden Geometriedaten der Anlage systematisch im Hinblick auf einen Durchhang, der eine hohe optische Güte erwarten lässt, ausgelegt werden. Im Anschluss daran gilt es, Lastaufbringungs-möglichkeiten zu evaluieren, die eine Wellenbildung im Material unterbinden.

Als Wert für den Durchhang und die damit notwendige optische Güte kann die vorhandene Referenzanlage für die Fertigung von Scheiben aus PMMA herangezogen werden. Diese wurde vom Fachpersonal durch subjektive Beurteilung der Wellenbildung bereits als hinreichend identifiziert. Ausgehend von dieser Anlage soll eine Auslegungsstrategie bei gleichzeitiger Optimierung vorhandener Defizite aufgezeigt werden. Das Erfassen des Ist-Zustandes sowie das Ableiten des Anlagenaufbaus sind in Abbildung 5.1 dargestellt. Als Defizit lässt sich an erster Stelle die Fertigung der Interpolationsschicht erkennen. Das verwendete Material ist bei der Firma *Wacker-Chemie GmbH* unter dem Handelsnamen *Elastosil<sup>®</sup> RT 675* erhältlich. Es handelt sich um einen additionsvernetzenden Silikonkautschuk mit einer Shore-Härte A 80 und einer Wärmeleitfähigkeit von  $1,2 \text{ W/mK}$ . Um homogene Materialeigenschaften und eine ebene Oberfläche zu erreichen, ist auf die Unterdrückung von Blasen durch eingerührte Luft bei der Vermischung zu achten. Dies ist in Anbetracht der relativ kurzen Topfzeit von 150 Minuten nur durch das Anlegen eines Unterdrucks von 20 - 10 mbar zu erreichen. Das Anlegen des Vakuums erfordert einen aufwendigen Formenbau, der für die wirkenden Kräfte ausgelegt werden muss. Da die Kraft mit der Fläche proportional steigt, steigen gleichermaßen die Kosten für den Formenbau in Abhängigkeit von der Fläche. Aus diesem Grund wurde ein Silikon ausgewählt, das eine ausreichend geringe Viskosität zur Selbstentlüftung aufweist. Dadurch entfällt eine Zwangsentlüftung des Materials und es kommt zu einer Entkopplung der Kosten von der Anlagengröße aufgrund des nicht benötigten Vakuums. Das gewählte Material *Elastosil<sup>®</sup> RT 607* ist ebenfalls ein additionsvernetzender Silikonkautschuk. Im Gegensatz zu kondensationsvernetzenden Silikonkautschuken werden bei der Vernetzung keine Spaltprodukte freigesetzt, sie vulkanisieren von daher nahezu schwindungsfrei. Die Wärmeleitfähigkeit des Produkts liegt für Silikone immer noch sehr hoch bei  $0,5 \text{ W/mK}$ . Zur Auslegung der geometrischen Randdaten sind zunächst die Materialdaten der Interpolationsschicht zu ermitteln. Nach KUNZ & STUDER (2006) kann der E-Modul für Silikonkautschuk über die Shore-A-Härtewerte, die üblicherweise für Silikone angegeben ist, nach folgender Gleichung berechnet werden:

$$E = \frac{1 - \nu^2}{2 \cdot R \cdot C_3} \cdot \frac{C_1 + C_2 \cdot Sh_A}{100 - Sh_A} \cdot (2,6 - 0,02 \cdot Sh_A) \quad (5.1)$$

mit  $C_1 = 0,549 \text{ N}$ ,  $C_2 = 0,07516 \text{ N}$ ,  $C_3 = 0,025 \text{ mm}$  und  $R = 0,395 \text{ mm}$ .



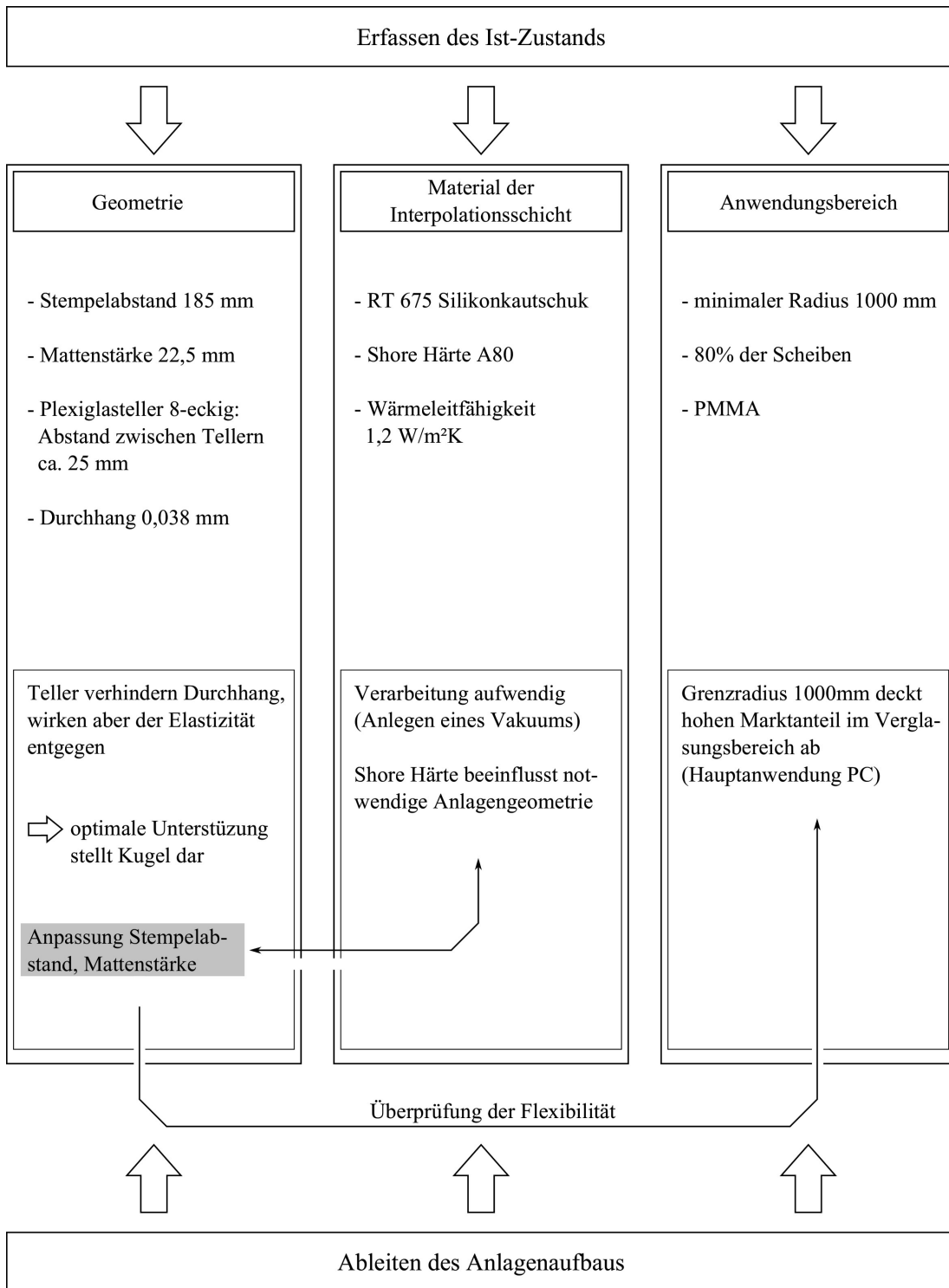


Abbildung 5.1: Identifizierung vorhandener Defizite

Das verwendete Silikon weist eine Shore-Härte von A 55 auf. Der daraus berechnete E-Modul ergibt sich zu  $5,93 \text{ N/mm}^2$ . Für die Shore-Härte des Referenzmaterials mit A 80 ergibt sich ein E-Modul von  $12,62 \text{ N/mm}^2$ . Da die Silikonmatte die Abformfläche des Thermoplasts bildet, ist bei der Herstellung auf ein Abformmaterial mit höchster Ebenheit zu achten. Diese Ebenheit ist beispielsweise bei gegossenem PMMA oder handelsüblichem Floatglas gegeben. Bei der Herstellung des Formenbehälters wurde für die Versuchsmatte mit den Abmaßen  $325 \text{ mm} \times 325 \text{ mm}$  als Material PMMA gewählt, da aufgrund der geringen Silikonmasse keine hohen Druckkräfte auf den Behälterdeckel bei Befüllung in Hochkantlage wirken, welche die Fertigungsgenauigkeit beeinträchtigen würden. Die Zerspanbarkeit von PMMA ist als weiterer Vorteil gegenüber Glas zu nennen.

Bei der Auslegung der Interpolationsschicht stehen vor allem die beiden konkurrierenden Bedingungen einer genügend hohen Steifigkeit und einer größtmöglichen Elastizität einander gegenüber. Mit zunehmender Dicke der Interpolationsschicht vergrößert sich der notwendige Stempelabstand zwischen den Interpolationsschichten, da die Steifigkeit genügend groß ist, um ein Durchhängen zwischen den Stempeln zu verhindern. Der Durchhang zwischen den Stempeln wurde bei der Anfertigung des Prototyps, der in Kapitel 3.2.2 genannt wurde, als maßgebliches Kriterium zur Herstellung von optisch hochwertigen Scheiben identifiziert. Ein zu großer Durchhang der Interpolationsschicht führt zu einer Welligkeit im Thermoplast und stört somit den optischen Eindruck. Der vorhandene Durchhang bei dem in der Vergangenheit erstellten Prototyp wurde nach subjektivem Ermessen von Experten als ausreichend gering identifiziert. Dieser Prototyp soll als Referenzanlage dienen. Somit kann ausgehend von der vorhandenen Anlage ein maximaler Durchhang zwischen den Stempeln definiert werden. Anhand der Anlagengeometrie wurde mittels FEM der maximale Durchhang in der Mattenmitte berechnet. Hieraus ergibt sich ein Wert von  $0,038 \text{ mm}$ . Die Ergebnisse des Durchhangs in der Plattenmitte sind in Abbildung 5.2 aufgetragen. Für die Berechnung wurde der Stempelabstand der Referenzanlage, der  $185 \text{ mm}$  beträgt, herangezogen. Die Mattendicke beträgt  $22,5 \text{ mm}$  und soll zunächst als Ausgangswert zur iterativen Lösungsfindung dienen. Die Verwendung von Tellern aus PMMA ergab sich beim Bau der Referenzanlage aus der Notwendigkeit der einzelnen mechatronisch angetriebenen Unterstützungspunkte und der damit begrenzten Anzahl der Unterstützungspunkte aufgrund der Anlagenkosten. Ausgehend von den aktuellen Forschungsaktivitäten am Fraunhofer-Institut für mechatronische Verarbeitungsmaschinen, die eine zentrale Steuereinheit vorsieht und somit zu einer Entkopplung

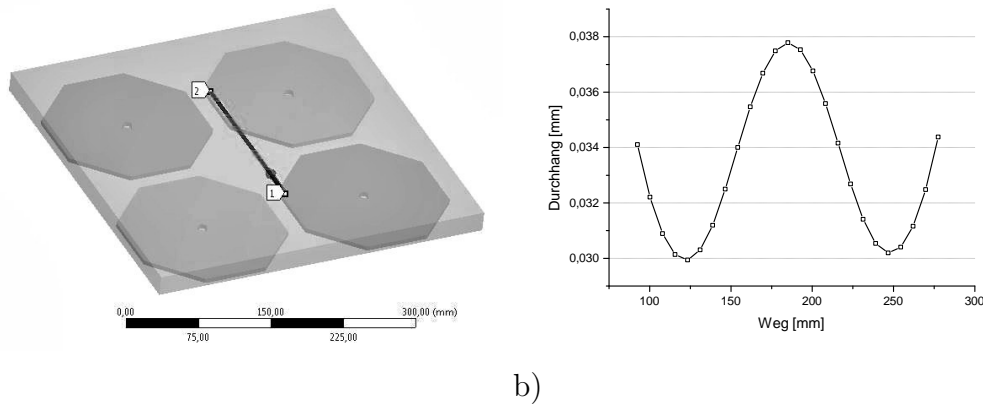


Abbildung 5.2: a) Lagerung auf achteckigen Tellern aus Plexiglas und Pfad zur Ermittlung des maximalen Durchhangs b) Maximaler Durchhang zwischen den Interpolationspunkten

der Anlagenkosten von der Stempelanzahl führt, sollen die Unterstützungspunkte ausschließlich durch eine Kugelgeometrie abgebildet werden. Die Kugelgeometrie erlaubt der Interpolationsschicht einen maximalen Freiheitsgrad. Ausgehend von den vorhandenen Werten soll nun der neue Stempelabstand ohne Lagerung auf Unterstützungstellern ermittelt werden. In GROTE & FELDHUSEN (2012) wird für eine gleichmäßig belastete, unendlich ausgedehnte Platte auf Einzelstützen die maximale Durchbiegung in der Plattenmitte folgendermaßen berechnet:

$$f_D = 0,092 \cdot \frac{p \cdot b^4}{E \cdot h^3} \cdot 12(1 - \nu^2) \quad (5.2)$$

Da die Interpolationsschicht auf den Unterstützungspunkten lose gelagert ist und somit ein abweichender Durchhang zu erwarten ist, wurde mittels FEM zusätzlich eine Parameterstudie durchgeführt, die ergab, dass ein zusätzlicher Korrekturfaktor  $F_K = 1,2$  notwendig ist. Dieser wird mit Gleichung 5.2 multipliziert. Zur experimentellen Verifikation wurde eine Interpolationsschicht abgegossen. Die Vermessung der Interpolationsschicht ergab eine Ebenheit von  $\pm 0,1$  mm. Um die Verifizierung durchführen zu können, wurde daher der doppelte Stempelabstand gewählt, um einen messbaren Durchhang zu erzielen. Der Durchhang müsste nach GROTE & FELDHUSEN (2012) bei einem Stempelabstand  $b = 185$  mm  $0,49$  mm  $\pm 0,1$  mm betragen. Die Vermessung des Durchhangs ergab einen Wert von  $0,38$  mm und zeigt, dass die Berechnung mittels FEM den Durchhang überschätzt. Für

die Auslegung des Durchhangs wurde aufgrund der vorangegangenen Ermittlung des Durchhangs der Referenzanlage ebenso der mittels FEM ermittelte Wert herangezogen. Für einen gegebenen Durchhang von maximal 0,038 mm ergibt sich demzufolge für eine Interpolationsschicht der Stärke 22,5 mm ein maximaler Stempelabstand von  $b = 106,5$  mm.

Als letzter Punkt muss im Anschluss daran die Formflexibilität der Interpolationsschicht geprüft werden. Dabei muss zunächst der kleinste abbildbare Radius definiert werden. Für den Anwendungsbereich des formflexiblen Werkzeugs wurde ein Grenzradius von ca. 1000 mm gewählt. Dies entspricht dem Grenzradius der Referenzanlage. Hiermit können auf dieser ca. 80 % der Automobilverschiebungen gefertigt werden; sie deckt somit einen sehr hohen Anteil ab. Der Radius der Scheibe ergibt sich aus der maximalen Höhendifferenz der eingestellten Stempel  $\Delta s$  und der Anzahl aller Stempel  $n$  in Multiplikation mit dem Stempelabstand  $b$  nach folgender Gleichung:

$$r = \frac{4 \cdot \Delta s^2 + (n \cdot b)^2}{8 \cdot \Delta s} \quad (5.3)$$

Hierbei wurde für den Wert von  $\Delta s$  nur eine Iteration für ganze Zahlen durchgeführt und der Wert für den Radius auf  $r \leq 1000$  mm überprüft. Bei der Überprüfung der Formflexibilität muss nur der Randbereich der Interpolationsschicht berücksichtigt werden. Hierbei stellt der äußerste Stempel stets den größten Wegunterschied zum höchstgelegenen Stempel bei geringstem verbleibendem Eigengewicht der Matte dar. Daher wurde mittels FEM ein Modell aufgebaut, das einen zentralen Unterstützungspunkt sowie vier symmetrische Stempel im Abstand von  $b$  abbildet. Der Überhang der Matte wurde ausgehend vom letzten Stempel auf 70 mm festgelegt. Der Zentralstempel wurde bei einer Wegänderung von 0 mm belassen, während die nächsten vier Stempel um den entsprechenden Höhenwert abgesenkt wurden. Die Höhendifferenz in Abhängigkeit vom Stempelabstand kann nach folgender Formel bestimmt werden:

$$\Delta s = r - \sqrt{r^2 - b^2} \quad (5.4)$$

Im Anschluss daran wird die Absenkung der Matte an der Stelle  $2 \times b$  analysiert und mit dem Sollwert verglichen. Ist dieser nicht erreicht, wird im nächsten Iterationsschritt die Mattenstärke reduziert und ausgehend davon werden der neue Stempelabstand und die neuen Höhenwerte bestimmt. Diese Iteration wird so lange durchgeführt, bis die Soll-Absenkung der Ist-Absenkung entspricht. Für die

vorgegebenen Parameter ergibt sich hieraus eine Mattenstärke von 17 mm, ein Stempelabstand von 92,5 mm und ein minimaler Radius von 959 mm durch eine erreichbare Absenkung von 18 mm. Der Ablauf zur Auslegung der Interpolationsschicht ist in Abbildung 5.3 dargestellt.

Da der Fokus der Arbeit auf der Umsetzung eines Thermoformprozesses mittels eines formflexiblen Werkzeugs liegt, soll die automatisierte Klemmung, die bereits in mehreren Arbeiten (siehe Kapitel 3.2.1) zentrales Thema war, zunächst durch eine manuelle Klemmung ersetzt werden. Aufgrund der manuellen Einstellzeit und des erhöhten Aufwands soll ein Scheibenausschnitt durch eine Stempelmatrix von 3 x 3 Stempeln repräsentativ dargestellt werden. Die manuelle Höheneinstellung erfolgt durch ein Feingewinde, das durch eine Kontermutter geklemmt wird. Die Stempel lassen sich dadurch mit einer Absolutgenauigkeit von  $\pm 0,01$  mm einstellen. Um eine kurze Einstellzeit zu bewerkstelligen, kann auf der Anlage zunächst eine Grobeinstellung vorgenommen werden. Durch eine konusförmige Verschraubung wird eine Stange über ein geschlitztes Gewinde im Gegenrohr geklemmt. Durch den Umformprozess unterhalb der Glasübergangstemperatur, der in Kapitel 7.2.1 detailliert beschrieben wird, ergeben sich maximal auftretende Axialbelastungen von 1127 N pro Stempel. Die notwendige Spannkraft  $F_S$  ergibt sich aus der Axialbelastung  $F_A$  und dem Reibungskoeffizienten der Materialpaarung. Für die Paarung Stahl-Stahl kann ein Reibungskoeffizient  $\mu = 0,15$  (GROTE & FELDHUSEN 2012) angenommen werden:

$$F_S = \frac{F_A}{\mu} = 7513N \quad (5.5)$$

Mit der benötigten Klemmkraft lässt sich das notwendige Drehmoment  $M_A$  näherungsweise nach folgender Formel bestimmen:

$$M_A = 0,17 \cdot F_S \cdot d = 28Nm \quad (5.6)$$

mit  $d = 22$  mm.

Die Auflagefläche für die Interpolationsschicht wird durch Kugelköpfe mit einem Durchmesser von 7 mm realisiert, da diese mit einem zusätzlichen Gewindestift kommerziell erhältlich sind. Die Höheneinstellung der Stempel erfolgt auf einer 3D-Messmaschine der Firma *Stiefelmayer* mit einer Absolutgenauigkeit von  $\pm 0,01$  mm und einer präziseren Wiederholgenauigkeit als die des darstellbaren Messbereichs. Zum Anfahren des Messpunktes ist aufgrund der Kugelgeometrie ein Messhut erforderlich, der radial über eine Passung an dem Stempel anliegt und an der

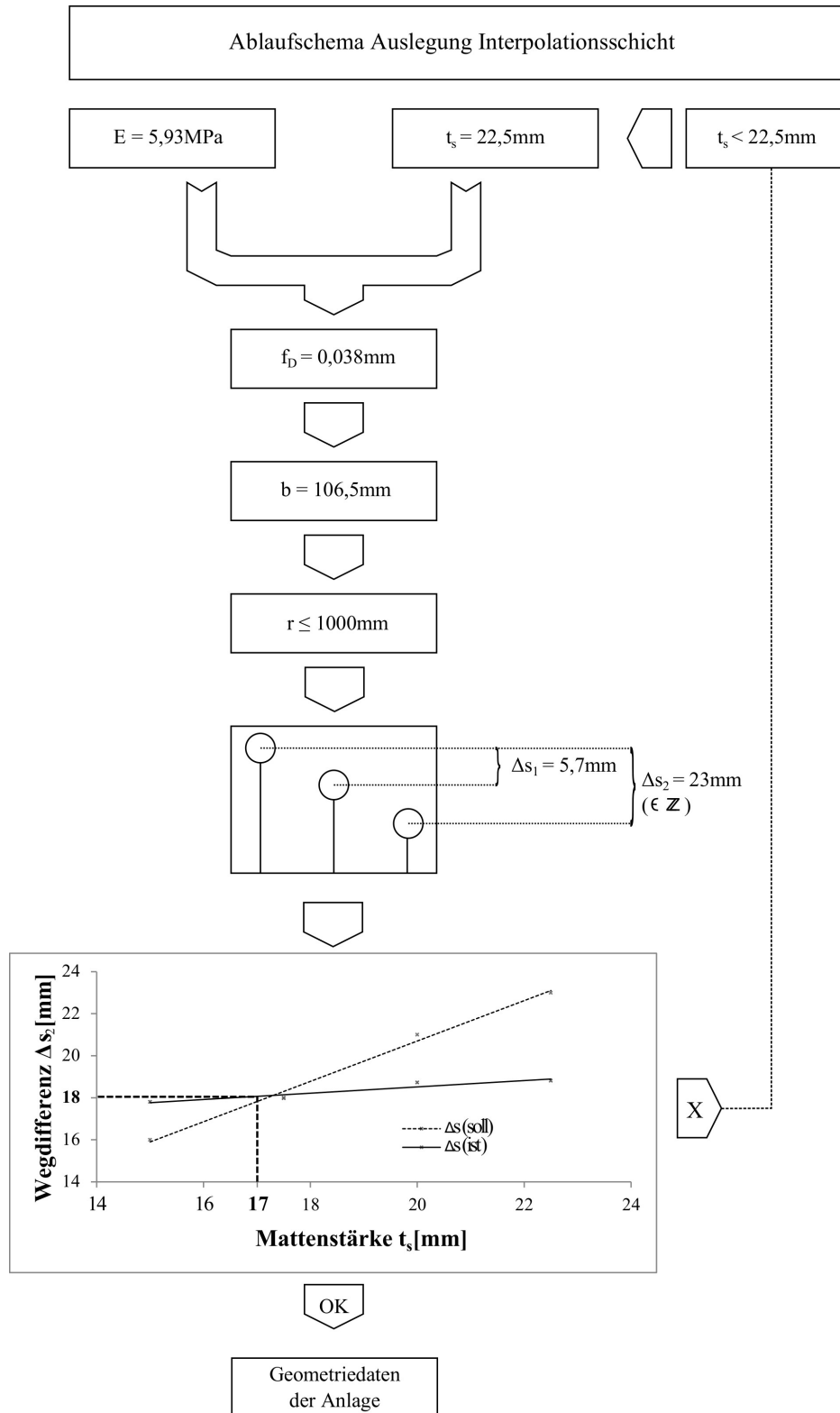


Abbildung 5.3: Ablaufschema zur Auslegung einer Interpolationsschicht für ein formflexibles Werkzeugsystem

Oberseite der Bohrung an der Kugel anliegt. Der Messhut hat eine zylindrische Gestalt mit einer minimalen ebenen Fläche an der Kopfseite zum Anfahren des Tasters der 3D-Messmaschine. Die Versuchsanlage ist schematisch in Abbildung 5.4 dargestellt.

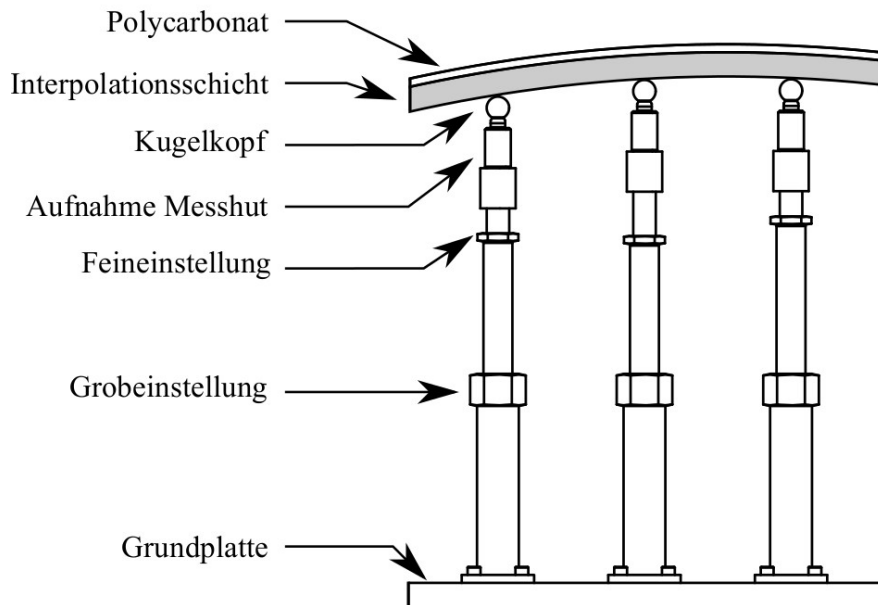


Abbildung 5.4: Schematische Darstellung der Stempelmatrix

### 5.4 Auswahl der Wirkprinzipien

Zur Auswahl der Wirkprinzipien können etablierte Verfahren der methodischen Konzeption nach PAHL et al. (2007) zum Einsatz kommen. Zunächst werden unterschiedliche Lösungsvarianten zusammengetragen. Diese werden im Anschluss daran durch K.o.-Kriterien eingegrenzt. K.o.-Kriterien stellen eine Mindestbedingung dar, deren Erfüllung zwingend notwendig ist. Zur Bewertung der verbleibenden Lösungsvarianten werden Untersuchungskriterien aufgestellt, die bspw. in Vorversuchen untersucht werden müssen. Zur Bewertung der Varianten kann sowohl die Nutzwertanalyse als auch die Bewertung nach der Richtlinie VDI 2225 dienen. Dabei sieht die Nutzwertanalyse eine zusätzliche Gewichtung der einzelnen Bewertungskriterien vor und soll im Folgenden zur Anwendung kommen, da optischen Qualitätskriterien Vorrang gegenüber wirtschaftlichen Kriterien gegeben werden soll.

### 5.4.1 Temperierung

#### Unterhalb der Glasübergangstemperatur

Unterhalb der Glasübergangstemperatur bilden folgende Prozessschritte den Fertigungsprozess ab:

- Erwärmung des Halbzeugs auf Solltemperatur
- Aufbringen der benötigten Umformkraft
- Haltezeit der Temperatur und der Umformkraft
- Kühlung des Formteils

Hieraus folgt, dass die Erwärmung des Bauteils während des Formgebungsprozesses gehalten werden muss. Daher ergibt sich keine Möglichkeit einer Erwärmung mittels IR, da die Oberflächentemperatur maßgeblich vom Abstand der Strahler abhängt. Eine Nachführung der Strahler entsprechend der Freiform ist aus Kostengründen nicht umsetzbar. Des Weiteren ergibt sich eine Auflösungsgrenze durch auf dem Markt verfügbare Strahlergrößen. Dies führt zu einer Möglichkeit einer Erwärmung innerhalb eines Ofens mittels Konvektion. Diese Verfahrensvariante wirft wiederum die Problematik eines Anlagentransports in einen Ofen bzw. der Temperaturbeständigkeit der Anlagenkomponenten und der Klemmmechanik auf. Zum anderen ist als letzter Punkt eine Erwärmung mittels Wärmeleitung durch die direkte Beheizung der Form möglich. Hier wird die Wärme in der Interpolationsschicht erzeugt. Dies kann durch die Integration von Kanälen, die von einem temperierten Fluid durchströmt werden, oder durch einen Widerstandsdraht erfolgen. Da die Temperaturübertragung mittels Fluid eine zusätzliche Trägheit mit sich bringt, ergibt sich folglich die Integration eines Heizdrahtes innerhalb der Interpolationsschicht als Lösungsvariante. Die Auswahl der Wirkprinzipien ist in Abbildung 5.5 aufgezeigt. Verwendet wurde der Widerstandsdraht Block RD 100/0,3. Dieser weist einen Widerstand von  $6,930 \Omega/\text{m}$  auf. Laut Herstellerempfehlung der Firma *Friedr. Freck GmbH* darf die Heizleistung bei Silikon  $0,8 \text{ W}/\text{cm}^2$  nicht überschreiten. Der Abstand zwischen den Drähten beträgt 6 mm. Hieraus ergibt sich eine Gesamtlänge mit Anschlussleitungen von ca. 15 m. Der daraus resultierende Gesamtwiderstand beträgt somit  $103,95 \Omega$ . Bei einer Anschlussleistung von 230 V steht dadurch eine Maximalleistung von 508,90 W zur Verfügung. Die daraus resultierende Heizleistung bei einer beheizten



Fläche von 27,75 cm x 27,75 cm ergibt sich zu  $0,66 \text{ W/cm}^2$  und liegt somit unterhalb des geforderten Wertes. Die Interpolationsschicht weist eine Homogenität der Temperaturverteilung an der Oberfläche von  $\Delta 4 \text{ K}$  auf. Dies wurde mit der *ThermaCAM<sup>TM</sup> S60* der Firma *Flir Systems* gemessen. Des Weiteren wurde der Temperaturabfall von der Mitte zur Randzone zwischen zwei Interpolationsschichten mit Hilfe eines PT-100-Foliensensors (FP x685, Firma *Ahlborn*) gemessen. Hieraus ergab sich eine Temperaturdifferenz von 0,5 K für eine Zieltemperatur von  $120^\circ\text{C}$  und eine Temperaturdifferenz von 3,3 K für eine Zieltemperatur von  $143^\circ\text{C}$ .

### **Oberhalb der Glasübergangstemperatur**

Oberhalb der Glasübergangstemperatur gliedert sich der Verfahrensablauf wie folgt:

- Erwärmung des Halbzeugs auf Solltemperatur
- Umformung des Materials
- Kühlung des Formteils

Identifizieren lassen sich bei der Erwärmung des Halbzeugs folgende ausschlaggebende Punkte: Das Plattenmaterial wird vor der Umformphase erwärmt und ist somit von der Umformung entkoppelt. Des Weiteren wird eine ebene Platte aufgeheizt, d.h., es handelt sich um eine konstante Eingangsgeometrie. Durch diese Kenngrößen können nun mögliche Erwärmungsstrategien abgeleitet und deren Vor- und Nachteile evaluiert werden. Abbildung 5.5 zeigt die Auswahl zur Festlegung der Temperierung auf. Daraus lässt sich erkennen, dass sich für die Umformung oberhalb der Glasübergangstemperatur eine mögliche Erwärmung auf IR-Strahlung oder Konvektion eingrenzen lässt. Zur weiteren Auswahl dienen die Untersuchungskriterien Taktzeit und Homogenität. Hierbei wird von der Industrie ein Toleranzbereich der Umformtemperatur von  $\pm 3 \text{ K}$  angegeben. Auf der Grundlage des vorgegebenen Toleranzbereichs, die durch die Erwärmung mittels Konvektion durch einen Ofen bei einer Aufheizzeit von 24 Minuten gegeben ist, sollen die IR-Systeme einander gegenübergestellt werden. Es sollen Keramikstrahler, die im langwelligen IR-Bereich abstrahlen, und Halogenstrahler, die im kurzwelligen IR-Bereich abstrahlen und aufgrund der transmissiven Eigenschaften des PC tiefer eindringen können, betrachtet werden. Für die Bewertung der Regelbarkeit

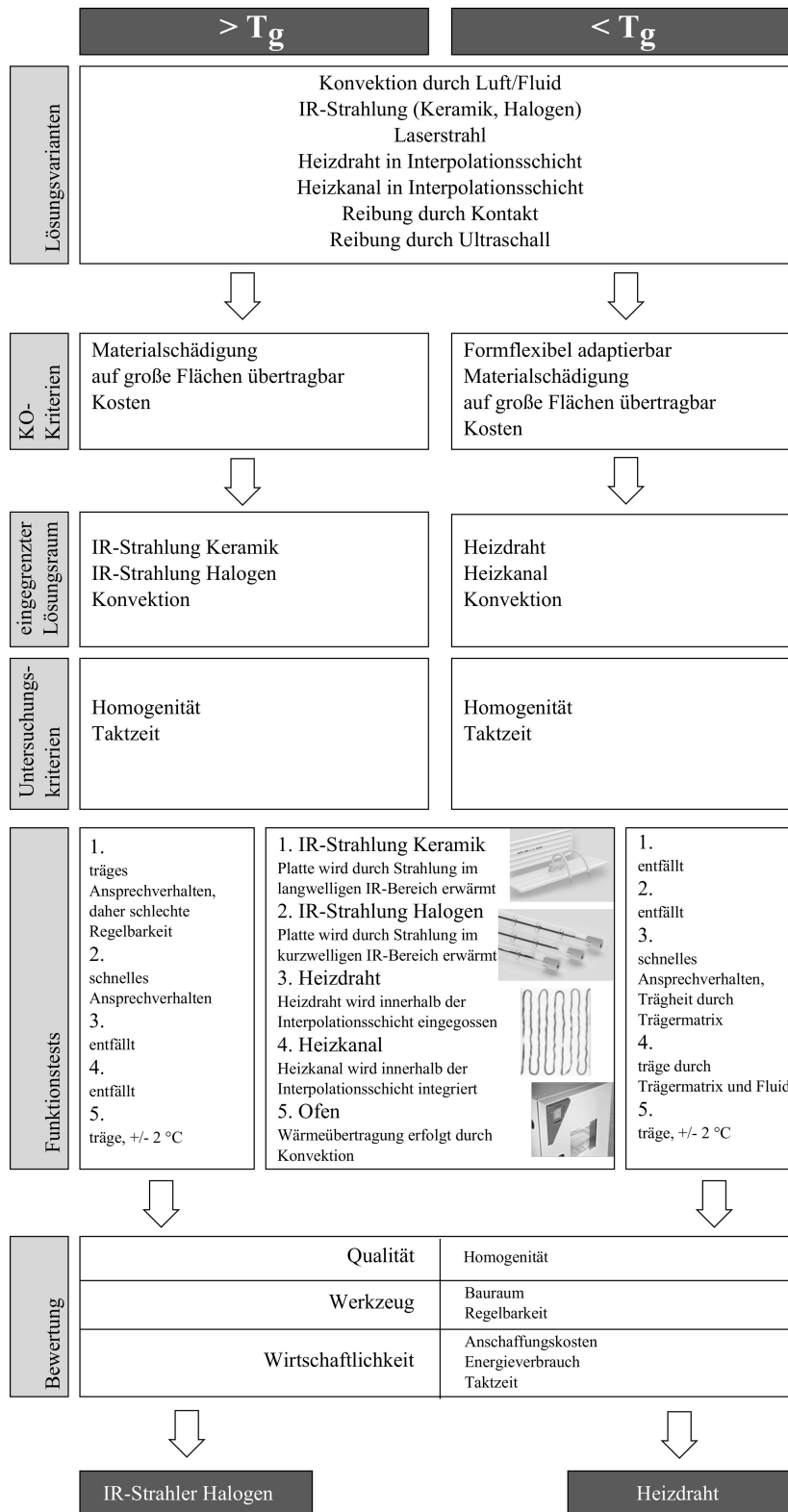


Abbildung 5.5: Auswahl der Wirkprinzipien zur Erwärmung des Materials

eines Systems dient der Quotient aus Verzögerungszeit und Totzeit. Als Grenzwert gilt ein Wert von 3 (ZACHER & REUTER 2011). Werte, die geringer sind, stellen schlecht regelbare Systeme dar. Das entsprechende Ansprechverhalten des Systems im Hinblick auf die Regelbarkeit ist in Abbildung 5.6 aufgezeigt. Zur Untersuchung

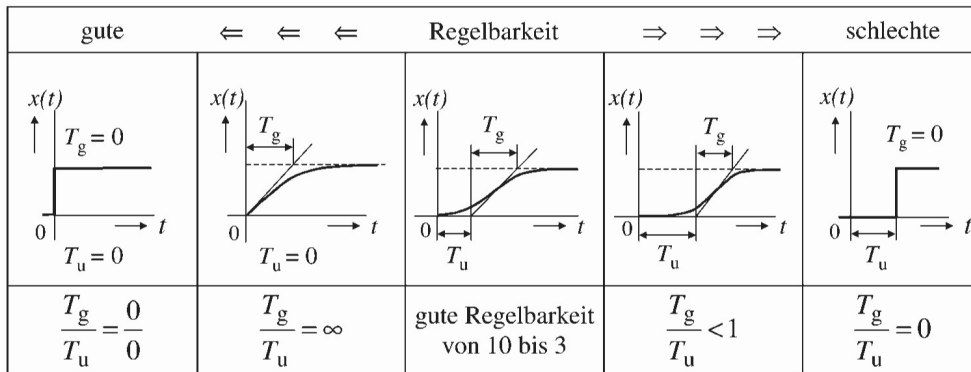


Abbildung 5.6: Regelbarkeit der Strecke (ZACHER & REUTER 2011)

des Aufheizverhaltens wurde zunächst ein Strahlerfeld aus neun Hohlkeramikstrahlern des Typs SFEH der Firma *Ceramicx* verwendet. Diese Keramikstrahler weisen bei einer Anschlussspannung von 230 V eine Leistung von 500 W auf. Die Regelbarkeit der einzelnen Strahler wurde aus den Sprungantworten selbiger bestimmt. Die Temperaturmessung erfolgte hierfür berührungslos auf der Oberseite der Polycarbonatscheibe mittels der Thermografiekamera *ThermaCAM<sup>TM</sup> S60* der Firma *Flir Systems*. Diese kann durch das ThermoVision Toolkit innerhalb der Labview-Umgebung integriert und somit zur Aufzeichnung und Regelung der Temperatur genutzt werden. Der benötigte Emissionsgrad von PC beträgt 0,91. Über die Thermografiekamera wird je Strahler ein Messpunkt abgegriffen, was bei der späteren Regelung zum Ausgleich von eventuellen Leistungsschwankungen der Strahler führt. Durch die Erwärmung des Polycarbonats werden eingefrorene Eigenspannungen frei und führen zu einem Hochwölben in der Plattenmitte. Da dies zu einem unterschiedlichen Abstand zu den Strahlern sowie zur ungewollten Verschiebung der festgelegten Messpunkte führen würde, wird die Scheibe mittels Vakuum auf der Interpolationsschicht fixiert. Das Verhältnis der Verzögerungszeit zur Totzeit bewegte sich in einem Bereich von 2 bis 3,6 für die neun vorhandenen Strahler. Die Werte sind in Tabelle 5.1 für die einzelnen Messpunkte aufgetragen. Dies bedeutet, dass es sich tendenziell um ein schlecht regelbares Systems handelt und somit keine große Verstärkung des Reglers gewählt werden kann. Folglich ergibt sich zur Einhaltung der Regelgrenzen eine sehr lange Aufheizzeit.

Messpunkt	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$T_S/T_t$	3,62	2,20	3,57	3,33	2,06	2,54	3,77	2,18	3,55

Tabelle 5.1: Regelbarkeit der einzelnen Messpunkte

Bei der Verwendung eines Zweipunktreglers benötigte das untersuchte System bei einem Abstand der Strahler zur Scheibe von 165 mm zum Aufheizen auf eine Solltemperatur von 410 K eine Zeit von 1,46 h. Die daraus resultierende Temperaturdifferenz auf der Scheibenoberseite betrug 16 K. Zur Steigerung der Homogenität kann zum einen das Strahlerfeld erweitert werden, da infolge der Überlagerung der bestrahlten Flächen der Zentralpunkt stets deutlich wärmer ist. Aufgrund des damit steigenden Aufwandes durch die Ansteuerung von 16 zusätzlichen Strahlern wurde zur Steigerung der Homogenität das Anbringen eines Reflektors aus Edelstahl gewählt. Dieser Reflektor wirft an den Randbereichen die abgestrahlte Strahlung zurück und ersetzt somit die 16 zusätzlichen Strahler. Als Resultat kann eine deutliche Prozesszeitreduzierung von 40 Minuten sowie eine deutlich homogenere Temperaturverteilung von  $\Delta T = 5$  K genannt werden. Eine weitere Verringerung des Abstandes zwischen Strahlern und Halbzeug, die theoretisch zu einer Prozesszeitverkürzung führt, ist nach Abbildung 5.7 praktisch

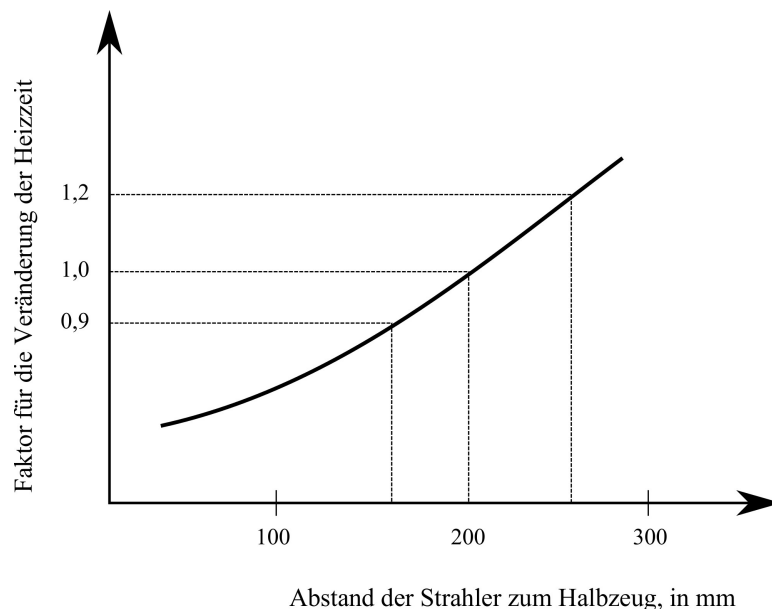


Abbildung 5.7: Veränderung der Heizzeit als Funktion des Strahlerabstandes zum Halbzeug (SCHWARZMANN 2008)

nicht sinnvoll und würde aufgrund der Überlagerung der Strahler die Homogenität negativ beeinflussen.

Daher wurde in einem weiteren Schritt die Erwärmung mittels Halogenstrahler vom Typ QHS der Firma *Ceramicx* mit zusätzlichem Reflektor vom Typ QTSR untersucht. Diese Strahler weisen bei einer Anschlussspannung von 240 V eine Leistung von 700 W auf. Durch das schnelle Ansprechverhalten mit einer Totzeit gegen null beträgt die Temperaturdifferenz bei einer angestrebten Solltemperatur bereits  $\pm 1^\circ\text{C}$ . Daher kann auf eine PID-Regelung vollkommen verzichtet werden. Der Abstand zwischen Strahler und PC-Scheibe wurde nach OPTRON GMBH (2011) (siehe Abbildung 5.8) folgendermaßen bestimmt:

$$D \approx 1,8 \cdot A = 1,8 \cdot 60 \text{ mm} = 108 \text{ mm} \quad (5.7)$$

Mit diesen Strahlern konnte eine Homogenität der Heizfläche von  $\Delta T = 6 \text{ K}$  bei

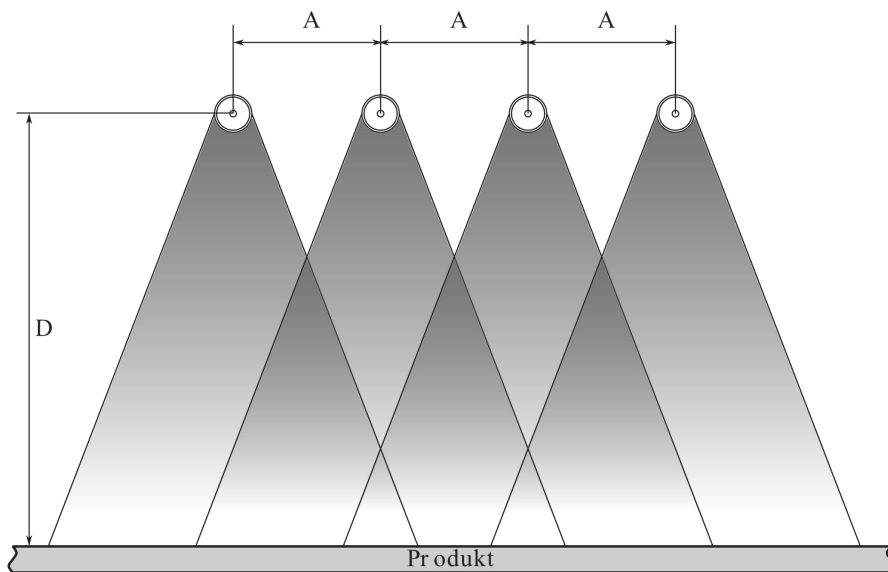


Abbildung 5.8: Praxiswert zur Bestimmung des Abstandes von IR-Strahlern zum Produkt ( $D$ ) bei gegebenem Abstand der Strahler zueinander ( $A$ ) (OPTRON GMBH 2011)

parallelem Abstand der Scheibe zu den Strahlern erreicht werden. Die Aufheizzeit auf eine Solltemperatur von 410 K beträgt 90 Sekunden.

Zusammenfassend ergibt sich daher für die Erwärmung des Halbzeugs bei Einhaltung der Toleranzgrenzen hinsichtlich der Homogenität der Temperaturverteilung eine deutliche Prozesszeitreduzierung durch die Verwendung von Halogenstrahlern. Sie stellen daher die favorisierte Erwärmungsmethode dar.

### 5.4.2 Lastaufbringung

In Kapitel 3.2 erfolgte die Lasteinleitung der aufgeführten Arbeiten im Bereich des Thermoformens stets mit Hilfe von Vakuum oder Druckluft. Die daraus resultierenden Probleme ergaben sich durch die Formflexibilität der Anlage. Selbst bei einer dicht gepackten Stempelmatrix konnte in keiner der Arbeiten eine Oberfläche ohne erkennbare Wellenbildung erreicht werden. Da die formflexible Anlage in der vorliegenden Untersuchung im Speziellen auf die Zielgröße „optische Qualität“ ausgelegt werden soll, bietet sich daher keine Umformung mittels Vakuum oberhalb der Glasübergangstemperatur an. Die Wellenbildung des Formteils wird als Ausschlusskriterium bei der Auswahl der Wirkprinzipien definiert. Die Erfolgsaussichten können aufgrund der Literaturrecherche zur Herstellung optisch hochwertiger Formteile als gering bewertet werden. Abbildung 5.9 zeigt eine Membran, die mittels Vakuum auf eine dicht gepackte Stempelmatrix gesaugt wird. Eine derartige Wellenbildung würde sich auch im Thermoplast abbilden. Als weiterer Punkt bei der Umformung mittels Vakuum ist die Problematik der Wanddickenverteilung zu nennen, die sich in Richtung Scheibenmitte verringert und somit zu einer optischen Verzerrung bei der Durchsicht führen würde.

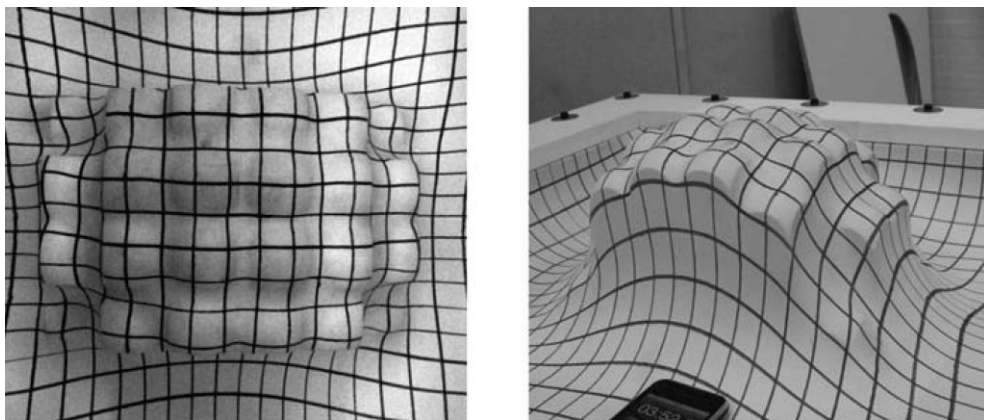


Abbildung 5.9: Einfallstellen bei Anlegen des Vakuums (PEDERSEN & LENAU 2010)

Die Anwendung von Vakuum kann daher bei einem formflexiblen Werkzeug nur zwischen Halbzeug und Interpolationsschicht erfolgen. Die Anbindung des Vakuums erfolgte durch aufvulkanisierte Anschlussstücke an der Unterseite der Interpolationsschicht. Die Vakuumschlüsse wurden in den vier äußersten Ecken der Interpolationsschicht angebracht. Diese Verfahrensvariante ist an folgende Bedingungen geknüpft: Die Steifigkeit des Halbzeugs muss unterhalb derjenigen der Interpolationsschicht liegen. Die Steifigkeit errechnet sich wie folgt:

$$C_S = E * h^3 \quad (5.8)$$

Der E-Modul und die Höhe der Interpolationsschicht sind durch  $5,93 \text{ N/mm}^2$  und  $17 \text{ mm}$  gegeben. Die maximale Plattenstärke beträgt  $10 \text{ mm}$ . Der E-Modul fällt infolge erhöhter Temperatur stark ab. Vorversuche hierzu ergaben, dass diese Methode nicht zielführend ist, da sich bei der Umformung der Scheibe das Vakuum aufgrund der zunehmenden Erweichung des Materials löst.

Ziel der Lasteinleitung ist es, eine der individuellen Kontur angepasste Lastverteilung zu erreichen. Eine gleichmäßige konstante Flächenlast würde an den Wendepunkten der Kontur eine Überbelastung hervorrufen. Die Flächenpressung an dieser Stelle lässt daher Abdrücke auf dem Formteil erwarten und muss vermieden werden. Darüber hinaus ergibt sich generell die Problematik einer flächendeckenden Lastaufbringung, beispielsweise durch ein Spanntuch. Aufgrund der auf der Oberseite wirkenden IR-Strahler führt die Lastaufbringung stets zu Abdrücken. Die Abdrücke lassen das Stempelmuster des formflexiblen Werkzeugs erkennen (siehe Abbildung 5.10).

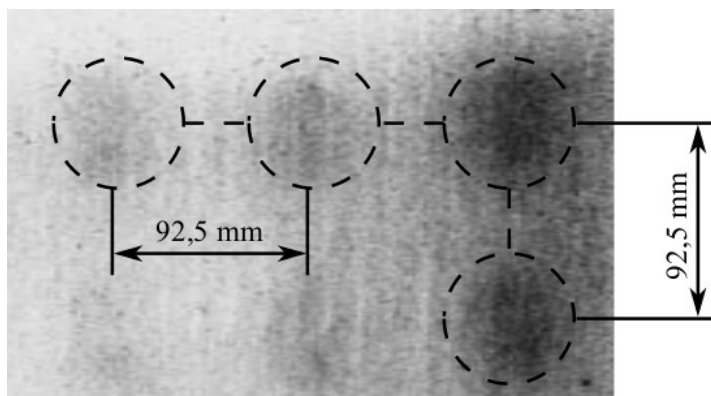


Abbildung 5.10: Abdruck auf der umgeformten PC-Scheibe bei flächiger Lastaufbringung

Als aussichtsreichste Lösung (siehe Abbildung 5.11) stellte sich die Verwendung

## 5.4 Auswahl der Wirkprinzipien

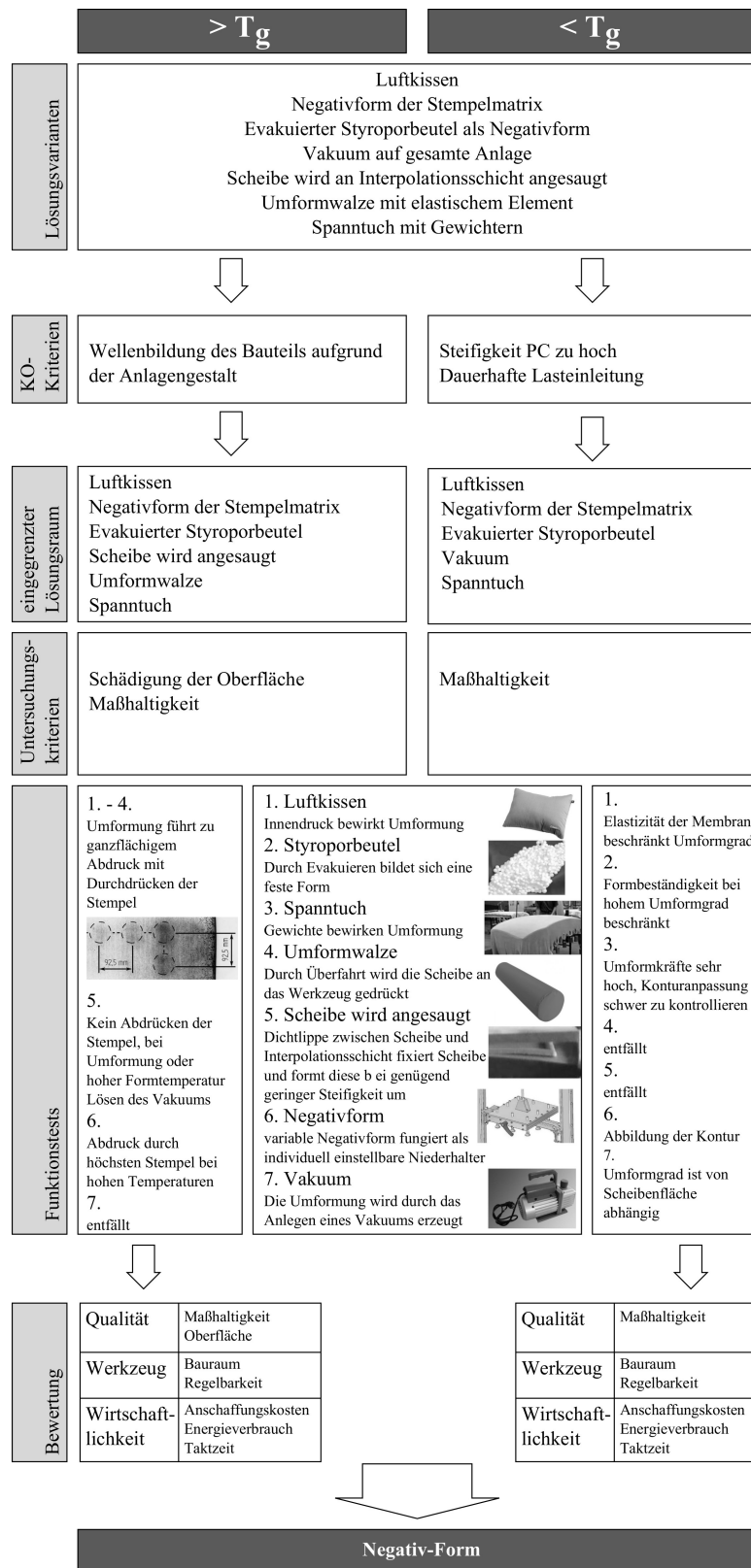


Abbildung 5.11: Wirkprinzipienauswahl zur Lastaufbringung



von Niederhaltern heraus, welche ebenso in konventionellen Thermoformmaschinen eingesetzt werden. Hierbei ist vor allem in Anbetracht der Formflexibilität eine individuelle Höheneinstellung der Stempel vorzusehen.

Betrachtet man die Auswahl der Lösungsansätze zur Umformung unterhalb der Glasübergangstemperatur, ergibt sich als aussichtsreichste Lösung eine Negativ-Form des formflexiblen Werkzeugs, die der Spiegelung des Positiv-Werkzeugs entspricht (Abbildung 5.11).

Aus ökonomischer Sicht erweist es sich als sinnvoll, die bereits vorhandene Positiv-Kontur zu nutzen und als Basis für die benötigten Höhenwerte für eine schnelle Einstellung zu verwenden. Um hieraus einen zeitlichen Vorteil zu erreichen, muss die Klemmung aller Stempel zentral erfolgen. Die Klemmung der Stempel wird bei der verwendeten Negativ-Form durch die Verschiebung der mittleren Platte erreicht, also über Haftreibung. Die Kontaktpunkte wurden mit Gelenkfüßen versehen, um Toleranzen auszugleichen und stets einen Berührungspunkt mit der Positiv-Form sicherzustellen. Der Aufbau ist in Abbildung 5.12 dargestellt.

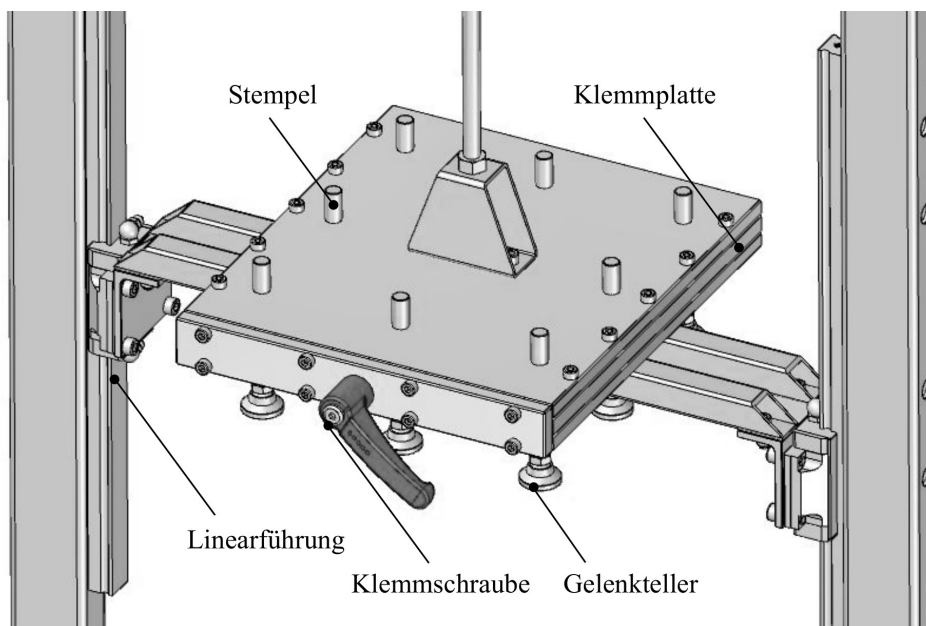


Abbildung 5.12: Zentrale Klemmung der einzelnen Stifte durch Verschiebung der mittleren Platte

Bei der Umformung einer 10 mm dicken Scheibe treten maximale Axialkräfte an den Stempeln der Negativ-Form von 518 N auf. Die notwendige Klemmkraft ergibt sich wiederum nach dem Haftreibungsgesetz, muss jedoch mit der Anzahl

der Stempel multipliziert werden. Der Reibungskoeffizient zwischen Stahl und Aluminium beträgt 0,19. Für eine zentrale Klemmung von neun Stempeln ergibt sich daher eine notwendige Klemmkraft von:

$$F_S = \frac{F_A \cdot x}{\mu} = 25 \text{ kN} \quad (5.9)$$

Die notwendige Schraubengröße ergibt sich durch die Streckgrenze des Materials. Für die Festigkeitsklasse 8.8 ergibt sich  $R_{p0.2} = 640 \text{ N/mm}^2$ .

$$A_s = \frac{F_S}{0,8 \cdot R_{p0.2}} = 48,83 \text{ mm}^2 \quad (5.10)$$

Diese Querschnittsfläche erfordert die Verwendung einer M10-Schraube. Das notwendige Drehmoment beträgt 42,5 Nm.

### 5.4.3 Kühlung

Die Integration von Kühlkanälen innerhalb einer elastischen Interpolationsschicht wurde in ZITZLSBERGER et al. (2012B) beschrieben. Hierzu sind zunächst die geometrischen Randdaten der Kühlkanäle unter besonderer Beachtung des elastischen Materials zu bestimmen. Aufgrund des niedrigen E-Moduls ist der innere Druck des Kühlmediums begrenzt. Ein zu großer Innendruck führt zur Aufweitung des Materials und damit einhergehend zu nicht zufriedenstellenden Abformresultaten. Das Ablaufschema zur Ermittlung der Geometriedaten ist in Abbildung 5.13 dargestellt. Für eine Temperaturerhöhung des ein- und ausströmenden Kühlwassers um 2 K konnte unter einer Schaltungskombination von serieller und paralleler Schaltung eine Aufweitung von 0,04 mm erreicht werden. Der Kühlkanaldurchmesser beträgt 5 mm mit einem Abstand von 17 mm zueinander und einem Abstand zur Oberfläche von 11 mm. Die Kühlkanäle wurden durch das Eingießen extrudierter Kanäle aus Paraffinwachs innerhalb der Interpolationsschicht erzeugt. Diese können nach der Vulkanisation des Silikonkautschuks durch Erwärmung auf 120 °C einfach entfernt werden.

Ferner wurde aufgezeigt, dass die Abkühlung im Hinblick auf auftretende Eigenspannungen unkritisch für die abbildbaren Geometrien durch das formflexible Werkzeug ist. Als Grenze für auftretende Eigenspannungen gilt hierbei die Aufbringung eines Primers für die Antikratzbeschichtung des Bauteils, der Spannungsrisse bei zu hohen Eigenspannungen auslöst.

Im Bezug auf die Prozesszeit kann durch eine Kühlung des Bauteils mit einer Temperatur von 20 °C eine Reduzierung der Kühlzeit um 560 s für Scheiben

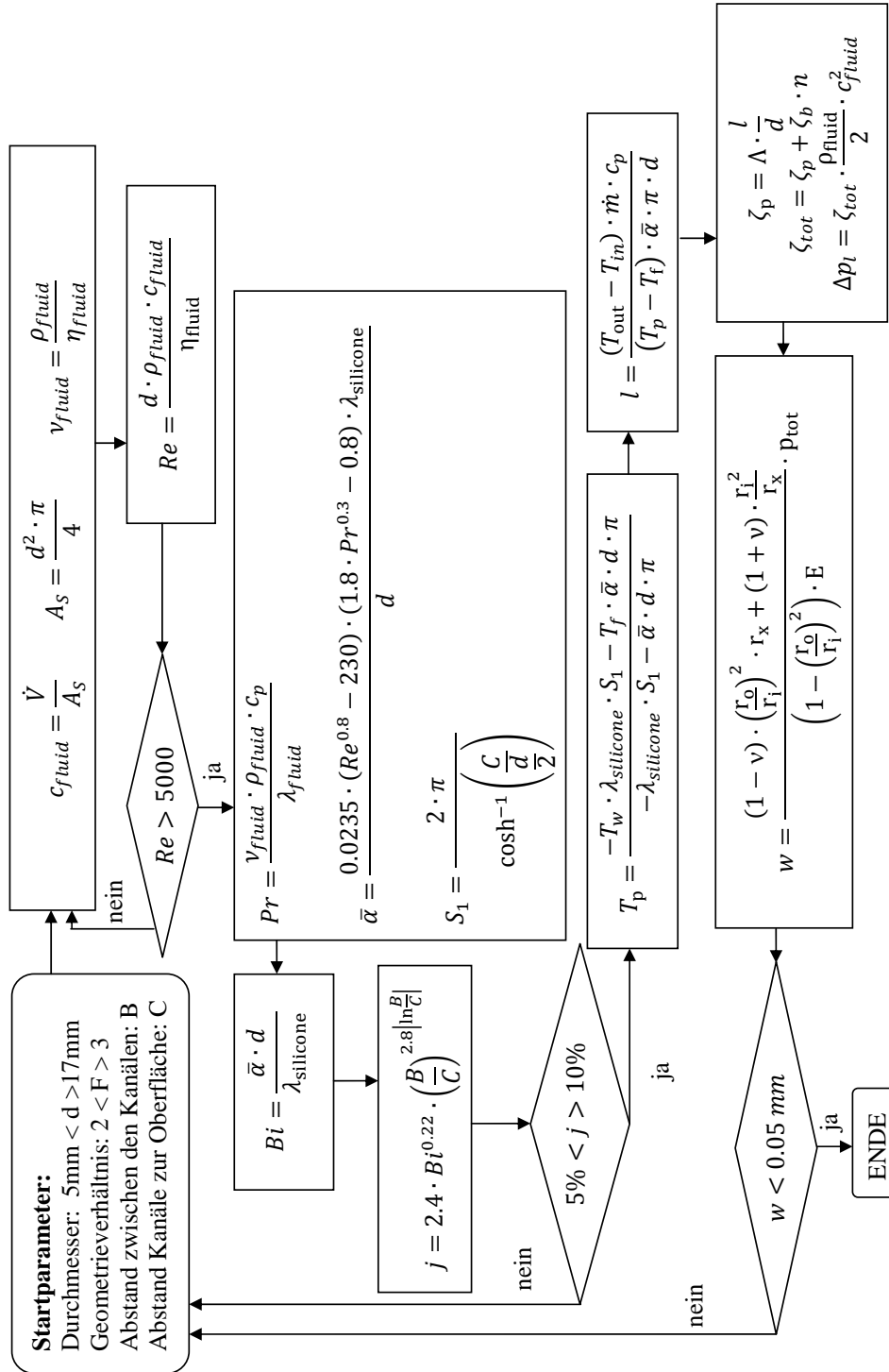


Abbildung 5.13: Ablaufdiagramm zur Bestimmung der geometrischen Parameter der Kühlkanäle innerhalb einer elastischen Zwischenschicht (THRONE & BEINE 1999; MENNIG 2008)

der Stärke 5 mm erreicht werden. Für Scheiben der Stärke 10 mm beträgt die Reduzierung 960 s. Die Abkühlkurven sind in Abbildung 5.14 aufgetragen. Der Einfluss der Kühlwassertemperatur auf die resultierende optische Qualität des Bauteils wird in Kapitel 7.3.3 zusätzlich betrachtet.

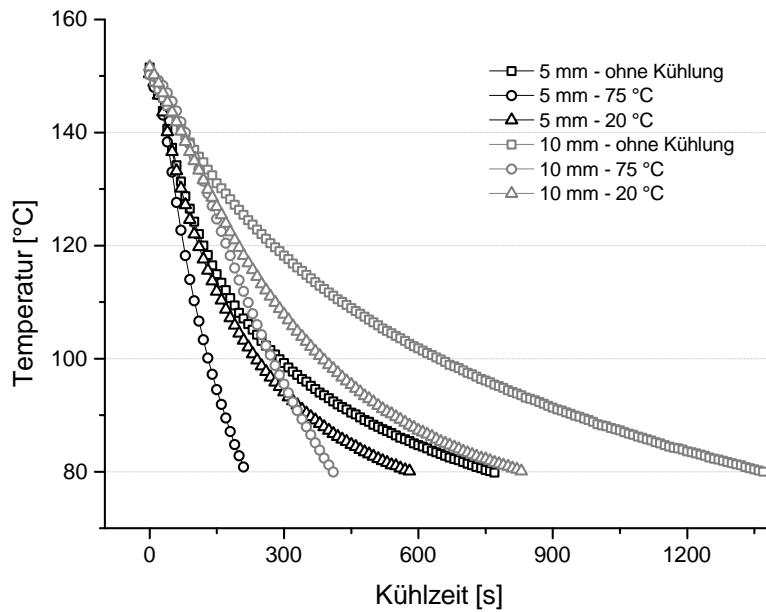


Abbildung 5.14: Vergleich der Prozesszeiten zur Kühlung des Formteils

## 6 Qualitätsprüfung der umgeformten Bauteile

Dieses Kapitel beschreibt die Entwicklung und den Aufbau des Versuchsstandes für die optische Qualitätsprüfung zur objektiven Bewertung der umgeformten Polycarbonatscheiben. Zudem wird auf die Methode zur Vermessung der Maßhaltigkeit eingegangen.

### 6.1 Prüfung der optischen Qualität

Im folgenden Abschnitt werden der Prüfstand zur optischen Qualitätsprüfung sowie die Auswertung mit Hilfe von Bildverarbeitungsverfahren beschrieben. Zunächst müssen jedoch die zu detektierenden Fehler, die bereits durch das Urformverfahren auftreten können, analysiert werden. In einem zweiten Schritt müssen auftretende Fehler durch das Umformverfahren ermittelt werden. Basierend auf den bekannten Fehlern können dann die Beleuchtungsmethoden zur Kenntlichmachung der Fehlerarten untersucht werden. Die Ermittlung von Auswertalgorithmen führt im nächsten Schritt zur objektiven Beurteilung der Bauteile. Zur anschließenden Festlegung von Qualitätsklassen müssen anhand von Referenzscheiben die erprobten Beleuchtungsmethoden untersucht und ausgewählt werden, um im Anschluss daran eine Toleranzgrenze festzulegen. Der Ablauf der Vorgehensweise ist in Abbildung 6.1 dargestellt.

#### 6.1.1 Urformfehler

Für den Thermoformprozess ist Plattenmaterial notwendig. Dieses Halbzeug wird im Extrusionsprozess hergestellt. Durch den Fertigungsprozess kann das Material bereits Fehler aufweisen, die die optische Qualität beeinträchtigen. Die Fehler, die im Material bereits vorhanden sind, müssen daher sichtbar gemacht werden oder bewusst unkenntlich bleiben, um von Fehlern, die durch den Umformprozess hervorgerufen werden, unterschieden werden zu können. Typische Fehler, die durch den Urformprozess verursacht werden, konnten anhand einer Wareneingangsprüfung und in Experteninterviews mit dem Materialproduzent festgestellt werden.

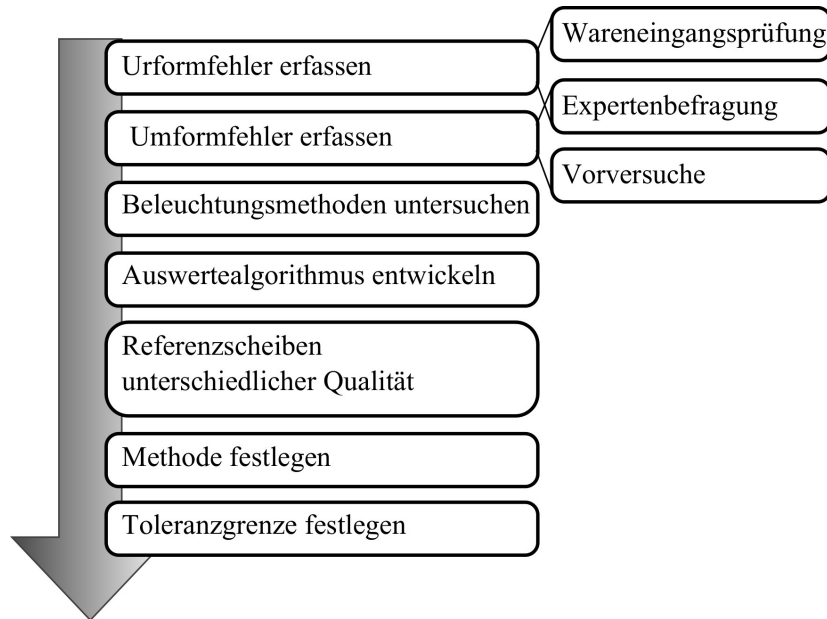


Abbildung 6.1: Ablauf zur Entwicklung einer objektiven optischen Qualitätsprüfung

Die Urformfehler werden nachfolgend aufgelistet. Abbildung 6.2 zeigt zudem die erstellten Aufnahmen der Fehlerarten.

- Stippen: Bei Maschinenstillstand aufgrund von Materialwechsel oder geringer Nachfrage muss eine Reinigung der Plastifiziereinheit durchgeführt werden. Verbleibendes Restmaterial überhitzt beim Wiederaanlaufen und wird von der neuen Granulatmasse mitgenommen. Die Folge daraus sind Stippen oder auch Braunschlieren (KURR 2010).
- Fisheyes: Die Entstehung von Fisheyes ist bislang noch nicht geklärt. Ihr optisches Erscheinungsbild entspricht einem Kugeleindruck auf der Oberfläche der Platte. Es wird daher darauf geschlossen, dass Fisheyes durch Ablagerungen auf der Abziehwalze verursacht werden (FINN & HISSMANN 2007).
- Extrusionsblasen: siehe Umformfehler.

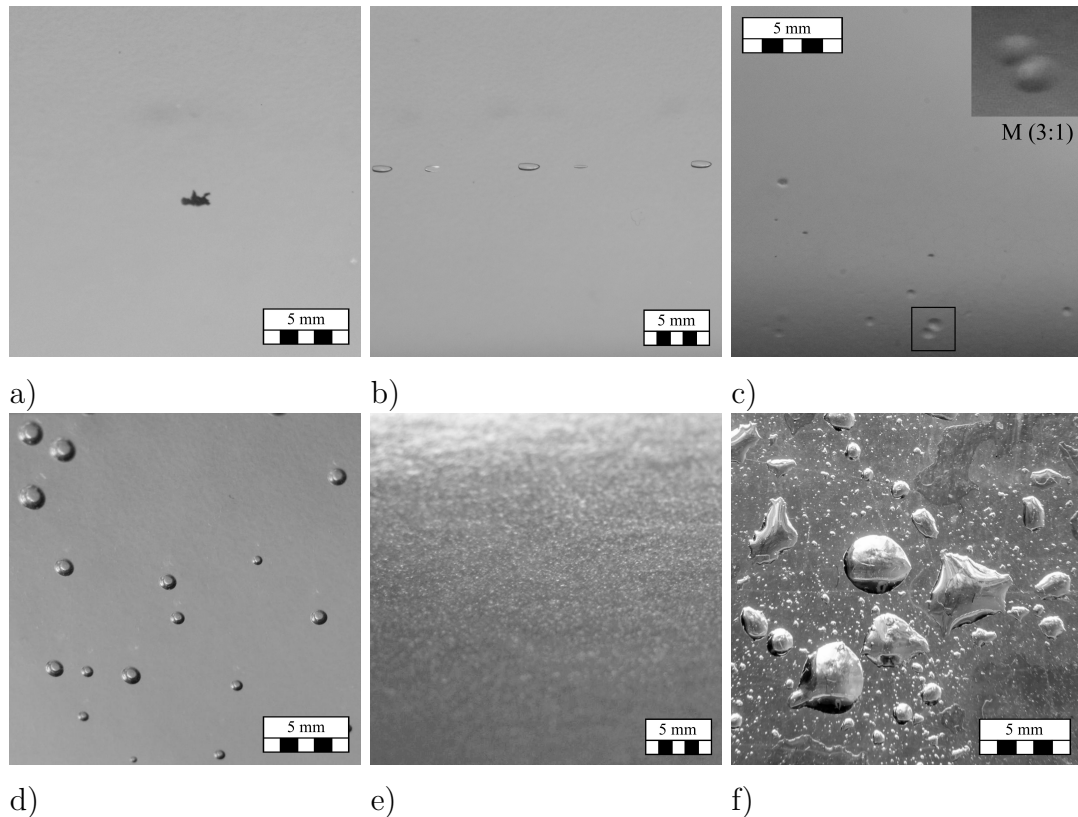


Abbildung 6.2: Urformfehler: a) Stippe b) Extrusionsblasen c) Fisheye; Umformfehler: d) Blasen e) Abdruck f) Lufteinschluss

### 6.1.2 Umformfehler

Mögliche auftretende Umformfehler wurden anhand von Vorversuchen bzw. in Experteninterviews abgeklärt. Diese Fehler sind nachfolgend aufgelistet und wiederum in Abbildung 6.2 dargestellt:

- Blasen: Polycarbonat ist hygroskopisch und nimmt somit Feuchtigkeit aus der Umgebung auf. Die eingelagerte Feuchtigkeit verdampft bei erhöhten Temperaturen und bildet Blasen im Extrusionsmaterial. Ursache hierfür ist eine ungenügende Vortrocknung des Materials. Die notwendigen Trocknungszeiten werden seitens des Herstellers in Abhängigkeit von der Plattendicke angegeben. So ist beispielsweise bei einer Plattendicke von 5 mm eine Trocknungszeit von 12 h bei 120 °C notwendig. Danach sollte das Material innerhalb von 10 h weiterverarbeitet werden. Blasen können ebenso als Urformfehler vorhanden sein, sollte das Granulat eine zu hohe Restfeuchtigkeit aufweisen. Die Verstreckung der Blase und die daraus resultierende

Ellipsenbildung hängt von der Abzugsgeschwindigkeit ab.

- Abdrücke/Eindrücke: Abdrücke auf der Oberfläche ergeben sich durch Kontakt mit dem Werkzeug bei Temperaturen, bei denen das Material erweicht und formbar ist. Ein Fremdpartikel, der sich auf der Werkzeugoberfläche befindet, wird in das Material eingedrückt.
- Lufteinschluss: Durch eingeschlossene Luft zwischen dem Formwerkzeug aus Silikon und der Polycarbonatscheibe können Schlieren entstehen, die dem Aussehen von Blasen an der Oberfläche entsprechen. Dem Auftreten von Schlieren kann durch eine sandgestrahlte Oberfläche entgegengewirkt werden, da dadurch die Luft entweichen kann.

Zusätzlich muss noch mit dem Entstehen von Kratzern bzw. Mikrokratzern auf der Scheibe gerechnet werden. Diese werden durch einen unsachgemäßen Umgang mit dem Material aufgrund von dessen unzureichender Härte verursacht, stellen jedoch keine Umformfehler dar.

### 6.1.3 Optische Qualitätskontrolle

#### Transmission

Zur Detektion der auftretenden Fehlerarten wurden drei unterschiedliche Konzepte zur Sichtbarmachung untersucht. Der Versuchsaufbau zur Untersuchung mittels Dunkelfeld (DF) ist in Abbildung 6.3, der zur Untersuchung mittels Hellfeld (HF) bzw. Hellfeld mit Muster (PT) in Kapitel 11.1 im Anhang dargestellt. Der Lichttunnel verhindert hierbei, dass Umgebungslicht die Messung beeinflusst. Zusätzlich sind die Innenwände schwarz matt lackiert, wobei sich auf der linken hinteren Seite die PC-Scheibe befindet, auf der rechten vorderen Seite die Kamera. Bei der Untersuchung der Scheibe im DF wird diese durch zwei punktförmige Lichtquellen von hinten beleuchtet, wodurch Fehler als helle Bereiche auf einem schwarzen Hintergrund erscheinen. Die Scheinwerfer befinden sich außerhalb des Sichtbereichs der Kamera. Sie sollten in möglichst großer Distanz bei flachem Einfallswinkel zur Scheibe aufgestellt werden, um eine homogene Ausleuchtung der Scheibe zu erreichen. Die Homogenität wurde mittels Referenzscheibe, die definierte homogen platzierte Fehler aufweist, kontrolliert (siehe Abbildung 6.4). Die Fehlergröße der definierten Fehler wurde unter dem Mikroskop vermessen. Der kleinste Eindruck besaß hierbei einen Durchmesser von 0,24 mm und kann



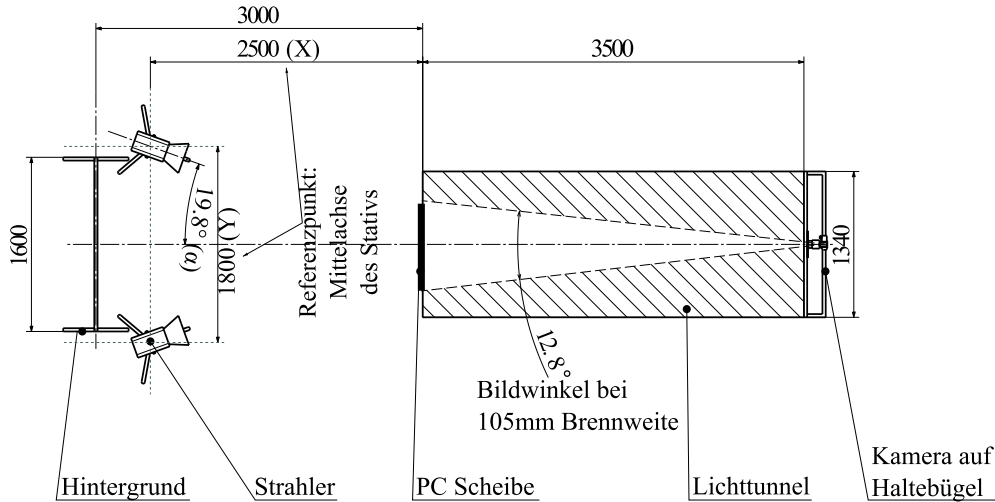


Abbildung 6.3: Dunkelfeld, Draufsicht

mit dem bloßen Auge nicht von einem Staubpartikel unterschieden werden. Für alle Dunkelfeldaufnahmen beträgt die Belichtungszeit  $\frac{1}{2}$  s,  $f11$  und ISO 100. Die Brennweite beträgt für alle Versuchsreihen 105 mm. Bei der Untersuchung der Scheibe im HF wird diese vor einer gleichmäßig ausgeleuchteten opaken Platte (Transmissionsgrad 65 %) platziert. Fehler erscheinen im HF schwarz. Für alle Hellfeldaufnahmen beträgt die Belichtungszeit  $\frac{1}{160}$  s,  $f11$  und ISO 100. Das PT stellt eine Abwandlung des Hellfeldes dar. Die gleichmäßig ausgeleuchtete Platte trägt ein schwarz-weißes Muster, wodurch Fehler als graue Fläche hervortreten. In Vorabuntersuchungen wurden verschiedene Muster, die in Abbildung 6.5 dargestellt sind, verwendet. Es stellte sich heraus, dass ein vollkreisförmiges Muster, bei dem sich die Kreise berühren (Muster A), die besten Resultate liefert. Für die Aufnahmen wurde eine Spiegelreflexkamera (Nikon D7000) mit einem

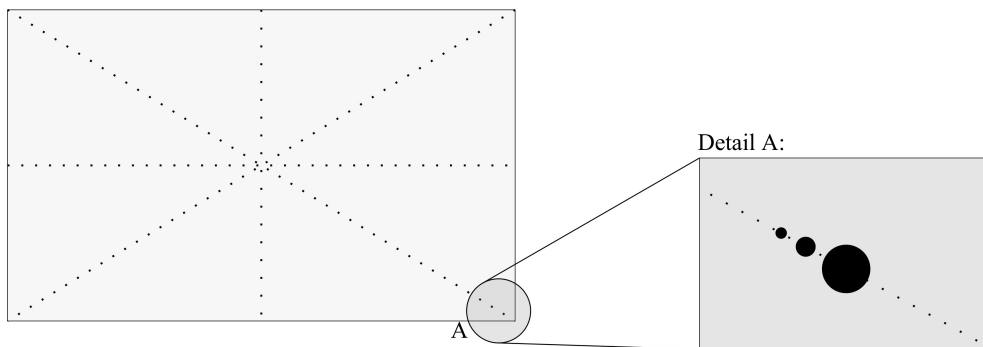


Abbildung 6.4: Definierte Fehleranordnung auf der Referenzscheibe

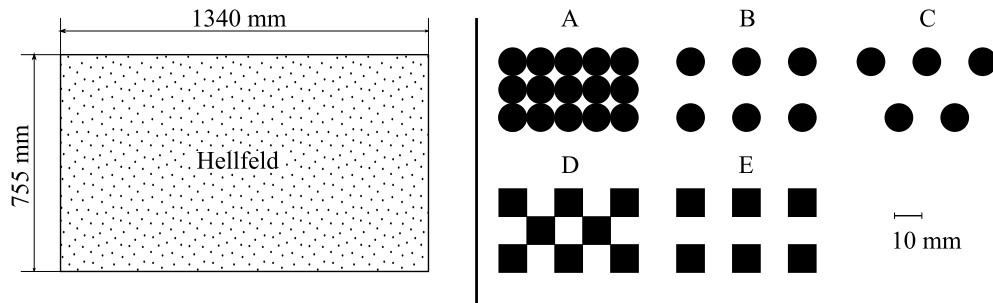


Abbildung 6.5: Musterarten und -größen

Objektiv Sigma 70-300 mm APO DG Makro verwendet. Die erhaltenen RAW-Dateien, welche die Rohdaten des Kamerasensors enthalten, wurden anschließend in Adobe Photoshop Lightroom 4 entwickelt und im Anschluss daran in Adobe Photoshop CS 6 verarbeitet und ausgewertet. Die Entwicklungseinstellungen finden sich im Anhang in Kapitel 11.2.

Abhängig von den Parametern Brennweite, Blende und Objektstand erscheinen Gegenstände in einem bestimmten Bereich als annehmbar scharf. Dieser Bereich wird als „Schärfentiefe“ (engl. „depth of field (DoF)“) bezeichnet. Auch eine perfekte Linse fokussiert nicht auf einen Punkt, sondern auf einen Kreisbereich. Dieser Kreisbereich erscheint dem Betrachter als „scharf“. Der Zerstreuungskreis ergibt sich aus dem Auflösungsvermögen des menschlichen Auges und des Betrachtungsabstandes. Er wird von der Firma *Nikon* mit 0,020 mm angegeben.

Der obere und untere Grenzwert der akzeptablen Schärfe kann nach RAY (2002) folgendermaßen berechnet werden:

$$D_n = \frac{D_o f_B^2}{f_B^2 - A_B C_Z D_o} = \mathbf{3\ 272\ mm} \quad (6.1)$$

$$D_f = \frac{D_o f_B^2}{f_B^2 + A_B C_Z D_o} = \mathbf{3\ 763\ mm} \quad (6.2)$$

Die Schärfentiefe ergibt sich aus der Differenz des oberen und unteren Grenzwertes:

$$\Delta D = D_f - D_n = \mathbf{491\ mm} \quad (6.3)$$

Der Versuchsstand kann Scheiben bis zu einer Breite von  $W_p = 800\ mm$  aufnehmen.

Die maximale Krümmung einer Scheibe, die noch scharf abgebildet werden kann, ergibt sich somit zu:

$$R_{max} = \frac{4\Delta D^2 + W_p^2}{8\Delta D} = \mathbf{408 \text{ mm}} \quad (6.4)$$

Das Auflösungsvermögen eines optischen Systems wird in  $lp/mm$  (line pairs per millimeter) oder  $lp/ph$  (line pairs per picture height) angegeben. Es wurde für die verwendete Kombination aus Nikon D7000 und der Linse Sigma 70-300 mm APO DG Makro untersucht. Dazu wurde ein 3 x 3 Siemens Star Test Chart aufgenommen und mit Hilfe einer Software ausgewertet. Für eine Brennweite von 105 mm und die Blende  $f11$  ist das niedrigste Auflösungsvermögen 1161  $lp/ph$  oder, bezogen auf die Bildhöhe, 0.45  $lp/mm$ . Dies sind 71 % der theoretisch maximalen Auflösung.

Das vertikale Sichtfeld hängt von der gegebenen Brennweite ab (RAY 2002):

$$\alpha_v = 2 \cdot \arctan \frac{w}{2f_B} = \mathbf{8.5^\circ} \quad (6.5)$$

Mit dem vertikalen Bildwinkel kann die resultierende Bildhöhe berechnet werden:

$$H = \tan \alpha_v \cdot D_o = \mathbf{523 \text{ mm}} \quad (6.6)$$

Da die gemessene Auflösung immer ein Linienpaar beschreibt, muss mit dem Faktor  $1/2$  multipliziert werden. Das kleinste auflösbare Detail ergibt sich somit als:

$$\Lambda_k = \frac{H}{2\epsilon_A} = \mathbf{0,23 \text{ mm}} \quad (6.7)$$

Diese Größe entspricht den gegebenen Anforderungen aufgrund der Unterscheidungsgrenze zwischen Fehler und Staubpartikel. Die gegebenen und ermittelten Werte des optischen Prüfstandes sind in Tabelle 6.1 zusammengefasst.

Die zuvor genannten auftretenden Fehlerarten wurden mit allen Beleuchtungsmethoden im Hinblick auf ihre Erkennungsmöglichkeit untersucht. Die Ergebnisse

Variable	Wert	Variable	Wert
$C_Z$	0,020 mm	$D_h$	50 114 mm
$A_B$	11	$D_f$	3 771 mm
$w$	15,6 mm	$D_n$	3 278 mm
$h$	23,6 mm	$\Delta D$	491 mm
$D_o$	3 500 mm	$R_{max}$	409 mm
$f_B$	105 mm	$\epsilon_A$	1 161 $lp/mm$
$\alpha_v$	8,5 deg	$\Lambda_k$	0,23 mm
$H$	523 mm		

Tabelle 6.1: Ermittelte Werte des optischen Prüfstandes

sind in Tabelle 6.2 dargestellt. Demnach sind Blasen, welche durch den Ur- oder Umformprozess verursacht werden mit jeder Beleuchtungsart detektierbar. Diese Fehlerart nur bei ungenügender Vortrocknung auf. Eine Detektion der Blasen ist daher in den nachfolgenden Versuchsreihen hinsichtlich der Verfahrensparameter unnötig, da diese vermieden werden können. Für die automatisierte industrielle Qualitätskontrolle ist dies jedoch von Interesse, da hierdurch eine fehlerhafte Trocknung sofort erkannt werden kann. Fisheyes können mit keiner Beleuchtungsart dargestellt werden. Dies ist für die weiterführende Untersuchung zudem nicht notwendig, da es sich um einen Urformfehler handelt. Stippen lassen sich nur im HF und PT detektieren. Die wichtigste Fehlergröße bei der Umformung stellen die Abdrücke dar. Sie können durch keine Vorbehandlung vermieden werden. Ihr Erscheinungsbild ist beim konventionellen Formgebungsverfahren flächig, während es beim formflexiblen Verfahren in kreisförmigen Mustern auftritt. Zur Bewertung

Fehlerart	DF	LF	PT
Blasen	☑	☑	☑
Stippen	☒	☑	☐
Mikrokratzer	☑	☒	☒
Fisheyes	☒	☒	☒
Abdrücke	☑	☒	☑

☑= darstellbar ☒= nicht darstellbar ☐= teilweise darstellbar

Tabelle 6.2: Fehlererkennungsmöglichkeit durch die unterschiedlichen Beleuchtungsarten

der Beleuchtungsmethoden im Hinblick auf die Fehlerart „Abdrücke“ wurde eine thermogeformte Scheibe ausgewertet, welche die typischen punktuellen Abdrücke aufgrund des Verfahrens aufweist. Hierbei ist zunächst nur der Unterschied zwischen den ausgewählten Beleuchtungsmethoden von Interesse wodurch eine Musterscheibe für die Untersuchung ausreichend ist. Die Fehlerfläche wurde hierbei auf die gesamte Scheibenfläche bezogen.

$$\xi = 100 \cdot \frac{A_f}{A_t} \quad (6.8)$$

Kennzeichnend für das DF ist die Sichtbarkeit von Mikrokratzen, die wegen der Scheinwerferanordnung kreisförmig erscheinen. Da ihre Ausrichtung eher vertikal ist, werden sie durch die in Schritt 4a und 4b genannten Filter beseitigt. Für die Auswertung wurde folgender Algorithmus ermittelt:

**Schritt 1:** Ausrichten und Zuschneiden des Bildes

**Schritt 2:** Einstellungsebene hinzufügen mit Tonwertkorrektur und schwarzen und weißen Punkt bestimmen zur Kontrastverstärkung

**Schritt 3:** Auf eine Ebene reduzieren

**Schritt 4a:** Anwendung des Filters `Matter machen` mit Radius: 70 Pixel, Schwellwert: 100

**Schritt 4b:** Anwendung des Filters `Bewegungsunschärfe` mit Winkel: 0°, Bereich: 10 Pixel

**Schritt 5:** Einstellungsebene hinzufügen mit Tonwertkorrektur und wiederum schwarzen und weißen Punkt bestimmen

**Schritt 6:** Auf eine Ebene reduzieren

**Schritt 7:** Einstellungsebene `Schwellwert` hinzufügen mit Schwellwert: 128 zur Umwandlung in ein Binärbild

**Schritt 8:** Auswahl des ganzen Bildes und Messung aufzeichnen, anschließend Auswahl aufheben

**Schritt 9:** Auf eine Ebene reduzieren

**Schritt 10:** Auswahl der weißen Bereiche mit Farbbereich auswählen mit Unschärfe: 0

**Schritt 11:** Messung aufzeichnen

Unter Verwendung der Formel (6.8) ergibt sich die Fehlererkennungstiefe mit Schritt 4a zu:

$$\xi = 100 \cdot \frac{302\,847px}{3\,758\,496px} = 8,06 \%$$

Das Ergebnis ist in Abbildung 6.6 a) dargestellt.

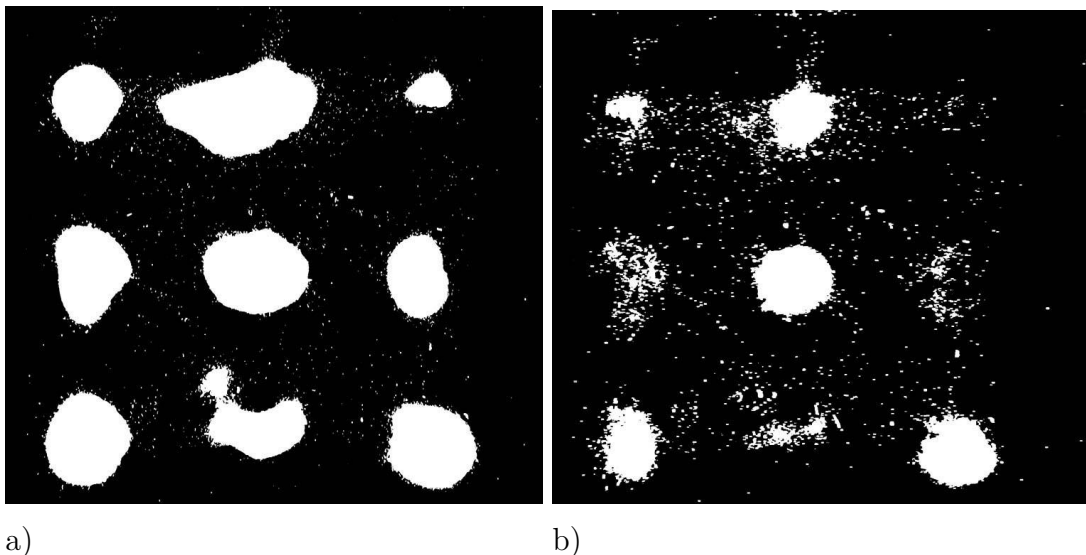


Abbildung 6.6: Ergebnisse des Dunkelfeldes mit Filter a) *Matter machen* und b) *Bewegungsunschärfe*

In Abbildung 6.6 b) ist das Ergebnis unter Verwendung des Filters *Bewegungsunschärfe* zu sehen. Die Fehlererkennungstiefe beträgt hierbei:

$$\xi = 100 \cdot \frac{253\,564px}{3\,758\,496px} = 6,75 \%$$

Im HF können Kratzer und punktuelle Eindrücke abgebildet werden. Abdrücke auf der Oberfläche lassen sich nicht darstellen. Der Vorteil des Hellfeldes liegt darin, dass Mikrokratzer nicht erscheinen und daher die nachträgliche Bearbeitung mittels

Bildverarbeitungssoftware erleichtert wird. Für die Auswertung des Hellfeldes, das keine exakt homogene Ausleuchtung aufweist, müssen zwei Bilder aufgenommen werden. Das zweite Bild ohne Scheibe dient hierbei als Referenzwert.

**Schritt 1:** Einlesen des Bildes mit Scheibe und des Referenzbildes als Ebenen und Anordnen der Scheibenebene über der Hintergrundebene

**Schritt 2:** Ausrichten und Zuschneiden des Bildes mit Freistellen und Ausrichten

**Schritt 3:** Füllmethode der Scheibenebene auf Differenz setzen

**Schritt 4:** Neue Ebene erstellen und Füllmethode auf Weiches Licht setzen

**Schritt 5:** Anwenden des Filters Selektiver Scharfzeichner mit Scharfzeichnen: Stärke: 500%, Radius: 5,0 px, Verringern: Gaußscher Weichzeichner, Genauer | Tiefen: Verblässen um: 100%, Tonbreite: 0%, Radius: 1 px | Lichter: Standardeinstellungen

**Schritt 6:** Einstellungsebene Schwellwert hinzufügen mit Schwellwert: 100

**Schritt 7:** Auf eine Ebene reduzieren

**Schritt 8:** Auswahl des ganzen Bildes und Messung aufzeichnen, anschließend Auswahl aufheben

**Schritt 9:** Auswahl der weißen Bereiche Farbbereich, Unschärfe: 0

**Schritt 10:** Messung aufzeichnen

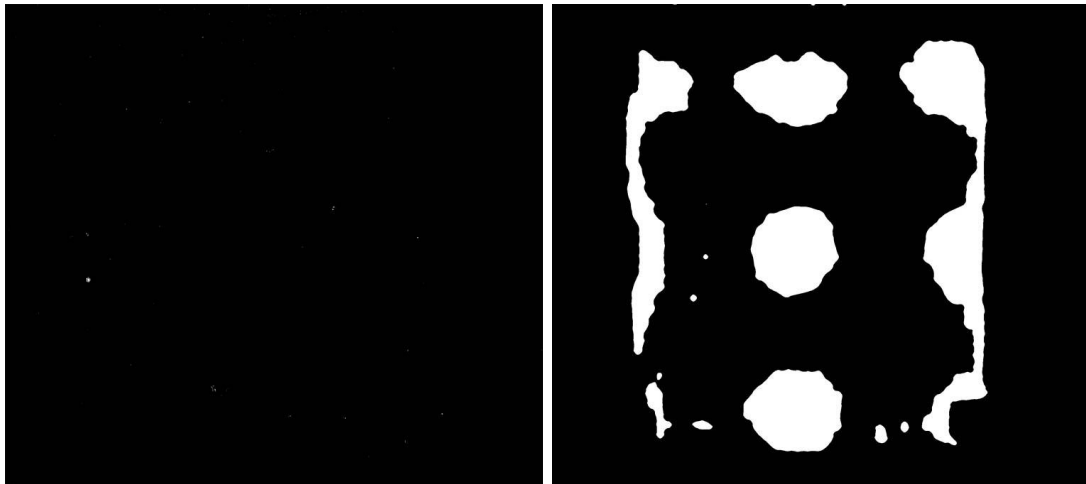
Die Fehlererkennungstiefe beim HF beträgt damit:

$$\xi = 100 \cdot \frac{974px}{3\,944\,232px} = 0,02 \%$$

Abbildung 6.7 a) zeigt hierbei das erhaltene Resultat.

Das PT ist in der Lage, Abdrücke zu detektieren. Hierbei mischt sich der schwarz-weiße Hintergrund auf der unebenen Scheibenoberfläche zu Grautönen, die als Fehlerfläche ausgewertet werden können.

**Schritt 1:** Bild auf Scheibenfläche zuschneiden mit Freistellungswerkzeug



a)

b)

Abbildung 6.7: Ergebnisse des a) Hellfeldes und b) des Hellfeldes mit Muster

**Schritt 2:** Schwarz- und Weißwerte anpassen mit Tiefen/Lichter: Tiefen: Stärke: 100%, Tonbreite: 50%, Radius: 150 px | Lichter: Stärke: 100%, Tonbreite: 80%, Radius: 30 px | Korrekturen: Farbkorrektur: +20, Mittelton-Kontrast: 0, Schwarz beschneiden: 0,01%, Lichter beschneiden: 0,01%

**Schritt 3:** Schwarze Flächen auswählen mit Farbbereich, Toleranz: 70

**Schritt 4:** Auswahl erweitern um 9 px

**Schritt 5:** Neue Ebene durch Kopie erstellen

**Schritt 6:** Auswahl mit weißer Farbe füllen, anschließend Auswahl aufheben

**Schritt 7:** Filter anwenden Gaußscher Weichzeichner, Radius: 8 px

**Schritt 8:** Einstellungsebene erstellen Schwellenwert, Schwellenwert: 215

**Schritt 9:** Alle Ebenen reduzieren, danach invertieren

**Schritt 10:** Filter anwenden Helligkeit interpolieren, Radius: 12 px

**Schritt 11:** Einstellungsebene erstellen Schwellenwert, Schwellenwert Level: 128

**Schritt 12:** Alle Ebenen reduzieren



**Schritt 13:** Komplettes Bild auswählen und Messungen aufzeichnen, anschließend Auswahl aufheben

**Schritt 14:** Weiße Bereiche auswählen mit Farbbereich, Toleranz: 0

**Schritt 15:** Messungen aufzeichnen ausführen

Die Fehlererkennungstiefe bei der Anwendung des PT beträgt:

$$\xi = 100 \cdot \frac{684\,245px}{4\,765\,488px} = \mathbf{14,36\ \%}$$

Das Ergebnis ist in Abbildung 6.7 b) dargestellt.

Die unterschiedlichen Fehlererkennungstiefen der einzelnen Beleuchtungsarten ergeben sich aus der Art des Lichtes, welches gerichtet (DF) oder diffus (HF/PT) ist. Der Kontrastunterschied des DF im Gegensatz zum HF bei der Lichtbrechung an Fehlstellen ist deutlich stärker und gibt somit eine höhere erkennbare Fehlerfläche wieder. Das PT nutzt ein kontraststarkes Muster zur Fehlererkennung. Hierbei wird bei der Auswertung nicht der reine hell-dunkel-Vergleich zur Identifizierung der Fehler verwendet, sondern der Schwarz-Weiß-Übergang, die Graustufen. Dadurch ergibt sich auch eine deutlich höhere Fehlererkennungstiefe als beim HF.

Bei der Bewertung durch eine geschulte Fachkraft werden drei Kategorien vergeben:

- „optisch hochwertig“: Durchsicht wird in keinem Betrachtungswinkel gestört und keine Abdrücke auf der Scheibe sind sichtbar.
- „niedrige optische Qualität“: Durchsicht wird in keinem Betrachtungswinkel gestört, Abdrücke auf der Scheibe sind jedoch sichtbar.
- Ausschuss: Abdrücke auf der Scheibe stören die Durchsicht.

Um die Bewertung der geschulten Fachkraft durch die Beleuchtungstechnik wiedergeben und diese messtechnisch erfassen zu können, wurden zwei Referenzscheiben, die auf einer festen Form hergestellt wurden, herangezogen. Scheibe B stellt hierbei die optisch niedrige Qualität dar und wird für Anwendungen im Maschinenverkleidungsbereich eingesetzt. Die Oberfläche zeigt einen leichten ganzflächigen Abdruck, der mit dem menschlichen Auge wahrgenommen werden kann. Scheibe A stellt demgegenüber eine optisch hochwertige Scheibe dar, die zur Verschiebung von Forstmaschinen verwendet wird. Hierbei waren mit dem menschlichen Auge keine

	Scheibe A	Scheibe B
Dunkelfeld	94,70 %	95,44 %
Hellfeld mit Muster	95,18 %	50,36 %

*Tabelle 6.3: Fehlererkennungstiefe der unterschiedlichen Verfahren, durchgeführt an Referenzbauteilen*

Fehler detektierbar. Beide Scheiben liefern bei der Untersuchung im Dunkelfeld ähnliche Ergebnisse, die sich im Bereich von 95 % Transmission bewegen (siehe Tabelle 6.3). Die Fehlerfläche von ca. 5 % ist durch das menschliche Auge nicht detektierbar. Sie rührt von Abdrücken, welche unterhalb der Erfassungsgrenze des menschlichen Auges liegen, und umgebungsbedingten Staubpartikeln her. Betrachtet man die Untersuchung mittels Hellfeld mit zusätzlichem Muster, so bewegt sich der Wert der Scheibe mit der geringeren optischen Qualität bei gerade einmal 50 % Transmission. Ausgehend von diesen Untersuchungen kann somit folgende Aussage getroffen werden: Die erste Untersuchung der Scheibenqualität erfolgt mit Hilfe des Dunkelfeldes. Hierbei ist im vorliegenden Fall eine Transmission von 95 % gefordert. Scheiben mit niedrigerer Transmission bedeuten Ausschuss. Für die automatisierte Qualitätsprüfung müssen diese Werte erneut überprüft werden, um die Grenzen des Prozesses und der Umgebungseinflüsse festzulegen. Hierfür bedarf es einer größeren Menge an Scheiben, um das System zu schulen und die Untergrenze festzulegen, bei welcher Fehler als Umgebungsrauschen gewertet werden. Diese Festlegung ist wichtig, um detektieren zu können, ob sich auf der Scheibe bspw. ein einziger Fehler befindet, der 4 % zur Fehlerfläche beiträgt, und somit nur 1 % dem tatsächlichen „Rauschen“ zu schulden ist. Der aktuelle Auswertungsalgorithmus ist nicht in der Lage, eine Aussage über die Verteilung und die Anzahl der Einzelfehler zu liefern. Eine automatisierte Qualitätsprüfung müsste daher zusätzlich eine Kennzahl einführen, welche das Verhältnis hinsichtlich Fehlerfläche zu Anzahl der Einzelfehler wertet. Im Anschluss daran kann die Untersuchung mittels Muster im Hellfeld erfolgen. Hierbei stellt ein hoher Transmissionswert in Richtung 100 % eine Scheibe von höchster optischer Güte dar. Der Schwellwert der Transmission wird für den vorliegenden Fall ebenfalls auf 95 % festgelegt. Scheiben mit niedrigerer Transmission bedeuten jedoch keinen Ausschuss und stellen mögliche Verglasungsbauteile für andere Bereiche dar. Hier gilt wiederum, dass kein allgemein gültiger Grenzwert festgelegt werden kann. Die Anforderun-

gen der Kunden an Scheiben in den unterschiedlichen Industriezweigen sind zu individuell. Das System muss für das jeweilige Produkt stets mit Musterplatten angelernt werden. In der vorliegenden Arbeit dient das Verfahren der Bewertung der Prozessvarianten und des Einflusses der Verfahrensparameter. Dies wird in Kapitel 7.3.2 untersucht. Der parallele Vergleich „geschultes Auge“ und Software diente zur Absicherung der Qualitätskontrolle. Bei allen umgeformten Scheiben war die Aussage durch das „geschulte Auge“ über „gut“ und „schlecht“ der Scheibenqualität deckend mit den prozentualen Grenzen des Dunkel- und Hellfeldes mit Muster. Die Vorgehensweise zur Entwicklung der optischen Qualitätskontrolle ist noch einmal in nachfolgender Grafik (Abbildung 6.8) zusammengefasst.

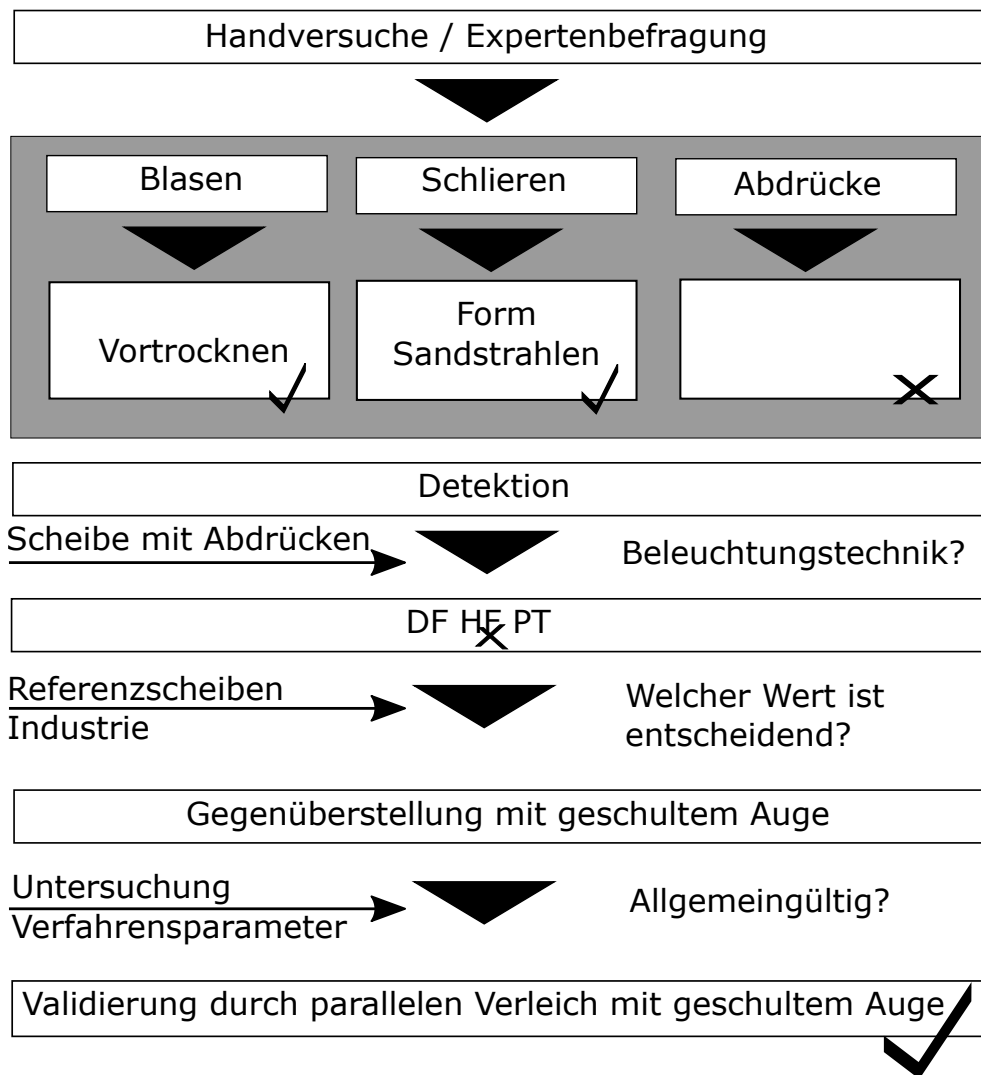


Abbildung 6.8: Entwicklung der optischen Qualitätsprüfung

Durch die Vortrocknung wurden bei allen Prozessen Blasen vermieden. Die Abdrücke, welche zu Ausschuss führten, traten stets als kreisförmiges Muster auf. Die theoretische Annahme, dass ein einzelner Fehler bereits 5% der Fehlertoleranzgrenze verursacht, trat in der Versuchsreihe nicht auf. Im Hinblick auf eine automatisierte Qualitätskontrolle würde hier die Gefahr bestehen, dass bspw. durch unzureichende Vortrocknung eine Scheibe mit einem einzelnen Fehler, der bis zu 5% der Scheibenfläche betragen kann, dennoch als i.O. bewertet und ausgeliefert wird.

### **Verzerrungen**

Zur Detektion der resultierenden Verzerrungen bei Durchsicht durch die Scheibe wird diese vor einem Streifenmuster in einen Rahmen gespannt. Der Abstand der Streifen beträgt hierbei in Anlehnung an WOODWARD & MASON (2003) jeweils 12 mm. Die Streifen sind in einem Winkel von  $45^\circ$  angeordnet, um eine maximale Verzerrung hervorzurufen. Die Scheibe wird bei einer Verdrehung um  $72^\circ$  um ihre vertikale Achse betrachtet. Hierdurch wird eine genügend große Verzerrung im Ausgangsmaterial erreicht, um eine Bildung des Referenzwertes vor und nach der Umformung zu erlauben. Eine größere Winkeleinstellung würde zur Reflexion des Musters auf der Scheibe führen. Die Belichtungszeit beträgt  $1/80$  s. Das RAW-Format wurde wiederum mit *Adobe Photoshop Lightroom 4* entwickelt. Die Entwicklungseinstellungen finden sich in Tabelle 11.2 in der Spalte Verzerrung im Anhang. Zur Bestimmung der resultierenden Verzerrungen durch den Umformprozess wird zusätzlich ein Referenzbild des Ausgangsmaterials benötigt, da die Qualität stark chargenabhängig ist. Die Auswertung liefert demzufolge einen durch die Verzerrung verursachten Differenzwert. Er wird als weiße Fläche dargestellt (siehe Abbildung 6.9) und als prozentualer Wert im Verhältnis zur Gesamtscheibenfläche angegeben.

Ein Wert von 0 würde demzufolge eine unverzerrte Scheibe darstellen, 1 bildet den Maximalwert. Nachfolgend soll zusätzlich der Einfluss durch die Scheibenkrümmung auf die Verzerrungen (siehe Abbildung 6.10) in Abhängigkeit von der Auflösung des Messverfahrens aufgezeigt werden. Der maximale Radius beträgt 960 mm. Demzufolge ergibt sich durch das Anlegen einer Tangente aufgrund der Einstellung ein um  $\gamma = \pm 11,01^\circ$  verschobener Einfallswinkel zusätzlich zu den  $72^\circ$ . Dieser verschobene Einfallswinkel bewirkt bei einer Scheibendicke von 5 mm und mit der gegebenen Brechzahl von PC mit 1,58 eine zusätzliche Ver-

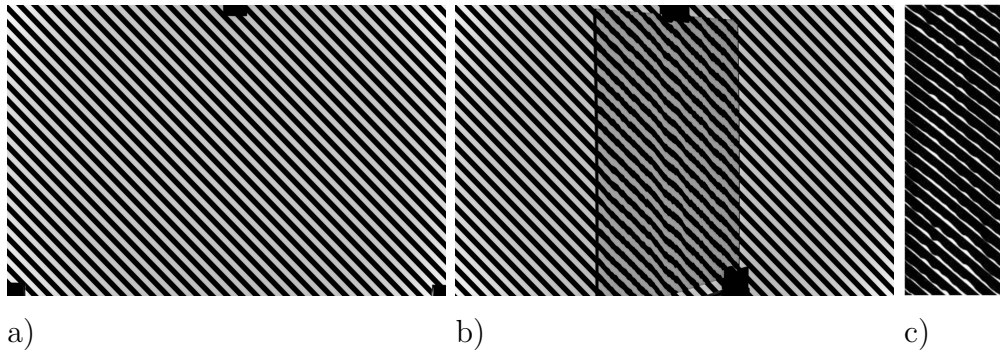


Abbildung 6.9: Detektion von Oberflächenwellen: a) unverzerrtes Muster b) Verzerrung durch Scheibe c) resultierendes Ergebnis nach Bildverarbeitung

schiebung um  $\pm 0,36$  mm. Das kleinste auflösbare Detail der Kamera beträgt 0,23 mm. Dementsprechend sind die durch den Radius auftretenden Verzerrungen mit Hilfe des Prüfstandes detektierbar. Eine Scheibendicke von 10 mm würde hierbei einen zusätzlichen maximalen Versatz um  $\pm 0,71$  mm hervorrufen und ebenfalls durch den optischen Prüfstand detektierbar sein. Folglich ist eine Abhängigkeit der Verzerrungen von den geometrischen Parametern zu erwarten. Der Einfluss der geometrischen Parameter wird in Kapitel 7.3.3 den Prozessparametern gegenübergestellt.

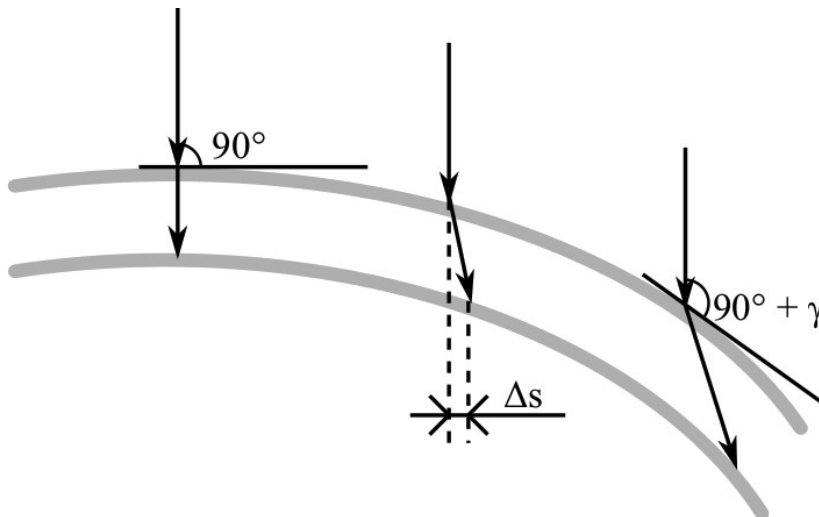


Abbildung 6.10: Strahlengang aufgrund einer gegebenen Krümmung

Die erhaltenen Bilder werden anschließend mit *Adobe Photoshop CS 6* nach folgendem Algorithmus ausgewertet:

**Schritt 1:** Referenzbild und Scheibenbild als Ebenen in Photoshop laden und umbenennen in **Hintergrund** und **Scheibe**; Scheibenebene über der Hintergrundebene anordnen

**Schritt 2:** Bild freistellen mit **Perspektivisches Freistellungswerkzeug**

**Schritt 3:** Ebenenmodus für Scheibenebene auf **Ausschluss** stellen

**Schritt 4:** Neue Einstellungsebene **Schwellenwert** mit **Schwellenwert: 80**

**Schritt 5:** Auf eine Ebene reduzieren

**Schritt 6:** Auswahl des ganzen Bildes

**Schritt 7:** Messung aufzeichnen, anschließend Auswahl aufheben

**Schritt 8:** Farbbereichsauswahl auf **weiße** Bereiche stellen, **Toleranz: 0**

**Schritt 9:** Messung aufzeichnen

## 6.2 Bestimmung der Maßhaltigkeit

Die Vermessung von dünnwandigen, nicht genügend steifen Bauteilen muss berührungslos erfolgen, um eine Verformung zu vermeiden. Die optische Messtechnik bietet zudem eine schnelle und flächenhafte Erfassung der Messdaten. Hierbei stehen vier Prinzipien zur Verfügung:

- Triangulation
- Interferometrie auf rauen Oberflächen
- klassische Interferometrie auf blanken Oberflächen
- Deflektometrie

Die Interferometrie wird zur hochpräzisen Messung von Bauteilen kleiner Abmessung verwendet. Hierbei können Genauigkeiten im Nanometerbereich erreicht werden. Die nach Absprache mit Experten geforderte Genauigkeit der Bauteile beträgt  $\pm 0,1$  mm. Daher wird dieses Verfahren für den geforderten Einsatzbereich als ungeeignet betrachtet. Bei der Vermessung von Verglasungen im Automobilbau wird die Deflektometrie verwendet. Das Verfahren ermöglicht es, spiegelnde

Oberflächen zu vermessen. Hierbei wird ein Streifenmuster mit sinusförmigem Intensitätsverlauf erzeugt und das verzerrte Spiegelbild von einer Kamera aufgenommen (THIELBEER 2010). Das Triangulationsmessverfahren beobachtet zumeist mit zwei Kameras ein Streifenmuster oder auch einen Laserstrahl, mit dem das Messobjekt beleuchtet wird. Die Kameraachsen bilden dabei den Triangulationswinkel und erlauben es, durch die bekannte Geometrie die Position der Punkte zu bestimmen. Das Verfahren erreicht Genauigkeiten zwischen 20 und 150  $\mu\text{m}$  und ist damit ausreichend genau (BERGGOLD & HÄUSLER 2010). Hierbei ist besonders bei transparenten Materialien eine Vorbehandlung mit Kreidespray notwendig, um die Oberfläche erfassen zu können. Dies ist bei Inline-Messungen nicht möglich, bietet sich jedoch aufgrund der Offline-Messung bei der Untersuchung der Maßhaltigkeit und der Verfügbarkeit des vorhandenen 3D-Scanners (*Creaform*, UNIScan) an. Die durch den Scanner erhaltene Punktwolke kann mit der geforderten Soll-Kontur verglichen werden. Die Analyse erfolgte mit der Software *CATIA V5 R20* mit dem Werkzeug *Abweichungsanalyse*. Als Ergebnis wird der Differenzwert der Höhenwerte zueinander ausgegeben.





# 7 Versuchsdurchführung und Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die bereits genannten Umformstrategien mit Hilfe der Bewertungsverfahren in Experimenten untersucht bzw. mittels der FEM simuliert.

## 7.1 Kriechumformung

Der Prozess der Kriechumformung, im Englischen als creep forming bezeichnet, ist durch eine Einspannung des Materials mittels Formwerkzeug bei erhöhter Temperatur für einen definierten Zeitraum gekennzeichnet (Ho et al. 2004). Entgegen der Bezeichnung wird eine Formanpassung durch die Relaxation der Spannungen erreicht und nicht durch das Kriechen des Werkstoffs, der Retardation.

### 7.1.1 Simulation

Die Kriechumformung ist an die Faktoren Spannung, Kriechgeschwindigkeit des Werkstoffs und Zeit gekoppelt. Im Hinblick auf Letzteres sind Versuchsreihen zur Untersuchung der Kriechumformung sehr zeitaufwendig. Eine Durchführung mittels FEM-Software erweist sich daher als geeignetes Mittel zur systematischen Untersuchung der Maßhaltigkeit. Darüber hinaus bietet sie die Möglichkeit, tieferes Prozesswissen zu erlangen. Die Untersuchung des Kriechverhaltens wurde in (ZITZLSBERGER et al. 2012A) durchgeführt. Aufgrund des Prozesses, der durch den Abbau der Spannungen über die Zeit zu einer Verformung führt, ergibt sich bei jeder Umformung eine Rückfederung des Bauteils. Um eine vollständige Einhaltung der Maßhaltigkeit zu erreichen, wäre eine unendlich lange Prozesszeit erforderlich, da die Kriechgeschwindigkeit des Werkstoffs mit sinkender Spannung stetig abnimmt. Für die Untersuchungen besteht daher folgender Klärungsbedarf:

- Identifizierung der Verfahrensparameter
- Bestimmung einer sinnvollen Prozesszeit
- Ermittlung der Rückfederung in Abhängigkeit von den Parametern

Hierbei steht bei der Identifizierung an erster Stelle die verwendete Formgebungstemperatur. Diese wird anhand vorliegender Materialdaten in der frei zugänglichen Kunststoffdatenbank *Campus* ermittelt. Betrachtet wird hierbei die Dehnung in Abhängigkeit von der Temperatur (siehe Abbildung 7.1). Die Daten wurden für eine Spannung von 10 MPa und 1 h aufgezeichnet. Hieraus lässt sich erkennen, dass zwischen einer Temperatur von 90 °C und 120 °C eine überproportionale Zunahme der Dehnung erfolgt. Hieraus ergibt sich eine Auswahl der Umformtemperatur in diesem Bereich, um eine möglichst geringe Prozesszeit zu erhalten. Ausgehend hiervon wurde 120 °C als unterste Umformtemperatur und 143 °C als oberste Umformtemperatur, begrenzt durch die Glasübergangstemperatur bei 144 °C, gewählt. Für den Formgebungsprozess müssen des Weiteren noch die

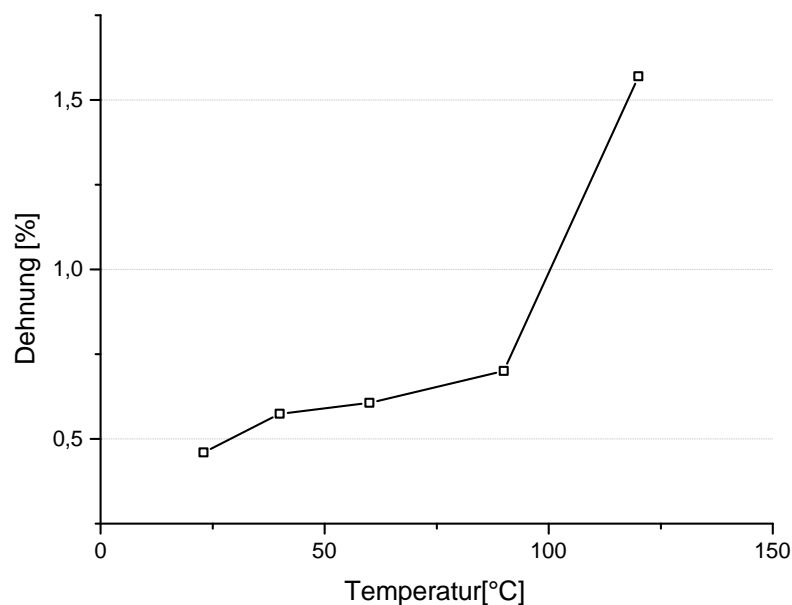


Abbildung 7.1: Zunahme der Dehnung über die Temperatur bei konstanter Spannung von 10 MPa und 1 h

geometrischen Randdaten definiert werden. Hierbei ist der kleinste Radius bereits durch die Auslegung der Anlage mit 959,69 mm definiert. Zudem soll der Einfluss unterschiedlicher Verhältnisse der Radien zueinander betrachtet werden. Hierbei gilt es, sowohl 2D-Formteile als auch 3D-Formteile, im ersten Fall ein Verhältnis von 1:0, im letzteren ein Verhältnis von 1:x, wobei  $x > 0$  ist, zu untersuchen.

Den Maximalwert bildet das Verhältnis 1:1. In Kapitel 5.1 wurde bereits der weitere Parameter Materialstärke identifiziert. Durch das zur Verfügung stehende Material sollen Platten der Stärke 5 und 10 mm untersucht werden. Als letzter Verfahrensparameter ergibt sich die Anisotropie des Materials. Aufgrund des Herstellungsprozesses durch Extrusion erfährt das Material eine Verstreckung in Abzugsrichtung. Die daraus resultierenden Materialeigenschaften sind anisotrop. Dieser Faktor soll zum einen bei der Umformung als Parameter beachtet werden, muss jedoch bereits bei der Bestimmung der Materialdaten für die Simulation berücksichtigt werden. Für die Ermittlung der Materialdaten wurden Kriechversuche bei 120 °C, 132 °C und 143 °C bei den Laststufen 5 MPa, 15 MPa und 25 MPa durchgeführt. Die Zugproben hierzu wurden aus extrudiertem Plattenmaterial gewonnen. Je Temperatur- und Laststufe wurde sowohl eine Untersuchung in Extrusions- sowie quer zur Extrusionsrichtung vorgenommen. Aus den gewonnenen Kriechkurven lässt sich nun zum einen der E-Modul in Abhängigkeit von der Richtung bestimmen. Zum anderen kann durch die erhaltenen Kriechdaten eine Kurvenanpassung in *Ansys Classic* vorgenommen werden. Hier stehen 13 Modelle zur Kurvenanpassung zur Verfügung, welche die unterschiedlichen Kriechbereiche (primäres Kriechen bzw. Bereich I, sekundäres Kriechen bzw. Bereich II) abbilden. Für die Abbildung des Umformprozesses kommen daher nur Gleichungen in Frage, die das primäre Kriechen abbilden. Des Weiteren wurden nur Funktionen beachtet, die als Eingabewert die Kriechdehnung erwarten und nicht die aus der Kriechdehnung errechnete und damit ungenauere Kriechgeschwindigkeit. Hieraus ergaben sich zwei verbleibende Gleichungen: „Modified Time Hardening“ und „Generalized Time Hardening“. Hierbei stellt erstere die Gleichung mit der geringeren Anzahl an Unbekannten dar und soll für die Kurvenanpassung angewendet werden. Die Gleichung hat die Form:

$$\epsilon_{cr} = C_1 \sigma^{C_2} t^{C_3+1} e^{-\frac{C_4}{T}} / (C_3 + 1) \quad (7.1)$$

Um eine genauere Abbildung des Kriechverhaltens zu erreichen, soll für jede Temperatur individuell eine Anpassung erfolgen. Die Koeffizienten hierzu sind in Tabelle 7.1 aufgelistet.

Für den Modellaufbau wurde das Werkzeugsystem durch Halbkugeln abgebildet und mit einem Standardnetz versehen. Hierbei werden sowohl die Positiv-Form als auch die Negativ-Form abgebildet (siehe Abbildung 7.2). Während die Positiv-Form die feste Lagerung darstellt, ist die Negativ-Form bzw. jeder Stempel der Negativ-Form individuell in seiner Höhe verschiebbar, um die Scheibe entspre-

Temperatur [°C]	$C_1$	$C_2$	$C_3$
120	6,9121 E-07	1,5581	-0,18239
132	2,4151 E-07	2,8781	-0,03622
143	1,0964 E-06	2,0682	0,87867

Tabelle 7.1: Koeffizienten der Kriechgleichung je Temperatur

chend der Kontur anzupassen. Die Polycarbonatscheibe wird mittels Quadern vernetzt, wobei die Scheibe wiederum in vier Knotenschichten unterteilt wird. Dies ist aufgrund der Elementverhältnisse zwischen der Platte und den Halbkugeln notwendig, um bei der Verschiebung der Halbkugeln zur Umformung der Scheibe ausreichend Knotenpunkte zur Überprüfung der Durchdringung zur Verfügung zu haben. Für den Reibkoeffizienten zwischen den Stempeln und der Scheibe wurde ein Wert von 0,4 vorgesehen. Zur Ermittlung einer optimalen Prozesszeit wurde

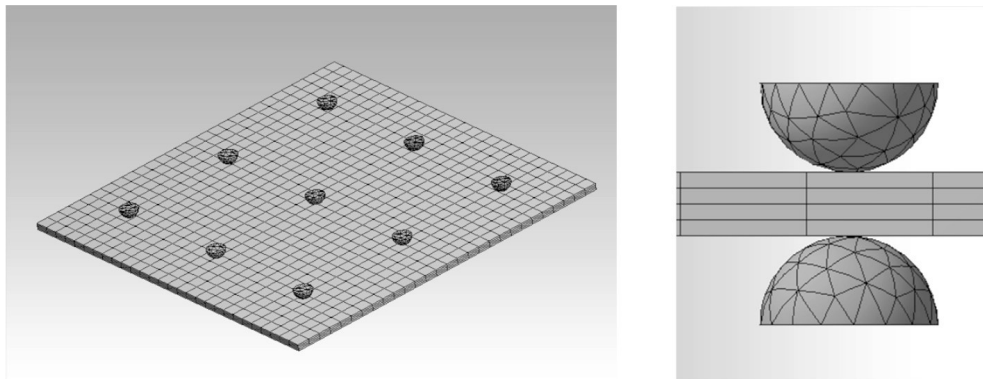


Abbildung 7.2: FE-Modell zur Simulation der Kriechumformung von Polycarbonat

zunächst eine Scheibe der Stärke 5 mm mit einem Radius von 959,96 mm bei 120 °C mit unterschiedlichen Radienverhältnissen umgeformt. Betrachtet wurde hierbei der Spannungsabbau über die Zeit. Dies ist in Abbildung 7.3 dargestellt. Hieraus lässt sich erkennen, dass der größte Teil der Umformung unabhängig von der Maximalspannung bereits innerhalb der ersten 1000 s abläuft. Bei einer Prozesszeit von 3000 s nähern sich alle Spannungen einem Plateau an. Ab dieser Prozesszeit übersteigt die zu erreichende Umformung maßgeblich die dafür benötigte Prozesszeit. Eine Prozesszeit von 3000 s stellt daher eine sinnvolle Umformzeit dar und kann auch im Sinne der Prototypen- und Kleinserienfertigung als vertretbare Prozesszeit gewertet werden.

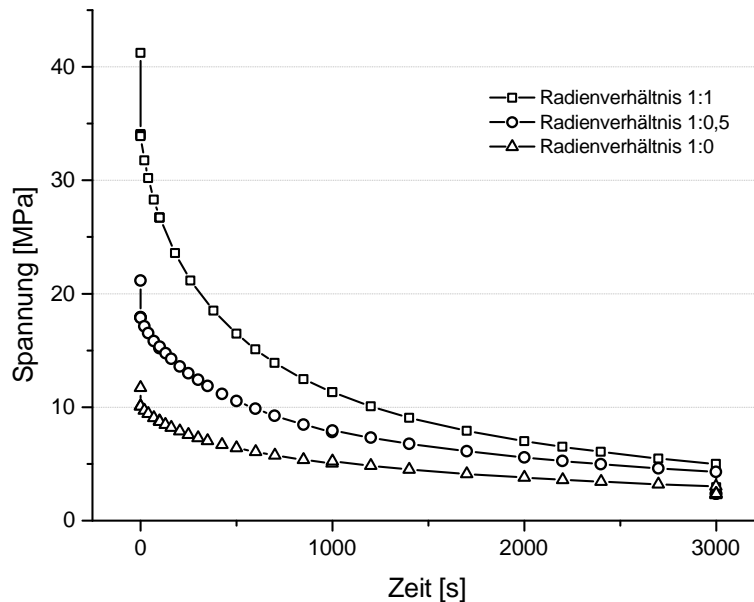


Abbildung 7.3: Spannungsabbau über die Prozesszeit

### 7.1.2 Verifikation

Zur Verifikation des Simulationsmodells wurden je Temperatur drei Scheiben mit dem Radius 959,69 mm und dem Verhältnis 1:1 umgeformt. Die Rückfederung wurde mittels 3D-Scanner gemessen und die maximale Abweichung von den simulierten Werten ermittelt. Im Mittel erreichte der Wert für die Temperatur von 143 °C eine prozentuale Abweichung von 5,5 % und für eine Temperatur von 132 °C eine Abweichung von 2,5 %. Die Abweichung für eine Formtemperatur von 120 °C wies einen deutlich höheren Wert von 20 % auf. Zum einen kann hierbei beobachtet werden, dass die Abweichung von 143 °C auf 132 °C abnimmt. Dies lässt sich auf den nicht vorhandenen automatisierten Prozess zurückführen, welcher zu unterschiedlichen Positionen der Scheibe beim Einlegen führt und damit die Ausrichtung der Extrusionsrichtung nicht identisch ist. Bei der deutlich höheren Abweichung bei 120 °C wird angenommen, dass die nicht innerhalb des Berechnungsmodells integrierte Interpolationsschicht aufgrund der Kompression des höchstgelegenen Stempels innerhalb der Scheibe eine niedrigere Spannung erfährt, was zu einem höheren Maß an Rückfederung führt. Der Schubmodul des Scheibenmaterials fällt bereits ab 130 °C stetig ab, wodurch die Kompression

aufgrund des geringeren Kraftbedarfs zur Umformung einen weniger signifikanten Einfluss hat. Zur Überprüfung dieses Sachverhalts wurde eine Korrektur der Stempelhöhe vorgenommen. Mittels FEM wurde die Umformkraft an den einzelnen Stempeln berechnet. Mit der daraus ermittelten Kraft lässt sich nach der Hertzschen Kontakttheorie mit nachfolgender Gleichung die Eindringtiefe in die Matte für eine Kugelgeometrie errechnen (POPOV 2009).

$$F_A = \frac{4}{3} \cdot E^* r^{\frac{1}{2}} \cdot d_{Kugel}^{\frac{3}{2}} \quad (7.2)$$

$$\text{mit } \frac{1}{E^*} = \frac{1-\nu_{Interpolation}^2}{E_{Interpolation}} + \frac{1-\nu_{Stempel}^2}{E_{Stempel}}.$$

Die Stempel wurden daraufhin um den Wert nachkorrigiert. Es wurden drei Scheiben mit nachkorrigiertem Wert umgeformt. Die umgeformten Scheiben wiesen hierbei im Mittel eine Abweichung um  $1,3 \pm 1,2\%$  im Vergleich zum simulierten Wert auf. Das Modell kann somit zur Vorhersage der Maßhaltigkeit unter der Voraussetzung der Höhenkorrektur der Stempel verwendet werden.

### 7.1.3 Resultierende Spannungen

Zusätzlich wurden anhand des oben genannten Modells die entstehenden Maximalspannungen, die zu einem Versagen des Bauteils aufgrund von Spannungsrissen führen können, bei der elastischen Umformung zum Zeitpunkt  $t = 0$  s betrachtet. Hierbei wurde für eine Temperatur von  $120^\circ\text{C}$  und eine Scheibenstärke von 5 mm eine Maximalspannung von 41,08 MPa, für eine Scheibenstärke von 10 mm eine Maximalspannung von 47,97 MPa errechnet. Die Spannungen wurden mittels der von-Mises-Vergleichsspannung ermittelt und sollen hierbei lediglich als Vergleichswerte dienen. Keine Scheibe wies hier bei der durchgeführten Versuchsreihe zur Kriechumformung (siehe Kapitel 7.2.1) Spannungsrisse nach der Umformung auf, obwohl die notwendigen Spannungswerte nach MICHLER & BALTÁ-CALLEJA (2012) hierfür erreicht worden wären. Dies bestätigt, dass der Faktor Zeit eine wichtige Initialisierungsgröße darstellt, und bedeutet, dass auf der Grundlage des rapiden Spannungsabbaus eine größere Maximalspannung angewandt werden kann. Als oberer Grenzwert dient hierbei in erster Linie die Bruchspannung von Makrolon<sup>®</sup> AG 2677, die von *Bayer MaterialScience* mit 70 MPa angegeben wird (BAYER MATERIALSCIENCE AG 2008).

## 7.2 Verfahrensparameter

### 7.2.1 Unterhalb der Glasübergangstemperatur

Die Temperierung erfolgte mit den in Kapitel 5.4.1 genannten Heizmatten. Hierbei werden zur gleichmäßigen Erwärmung zwei Heizmatten verwendet, zwischen denen die Polycarbonatplatte eingelegt wird. Zur Lastaufbringung wird die in Kapitel 5.4.2 genannte Negativkontur verwendet. Die Anlage ist in Abbildung 7.4 dargestellt. Das Thermoelement zur Temperaturregelung befindet sich hierbei

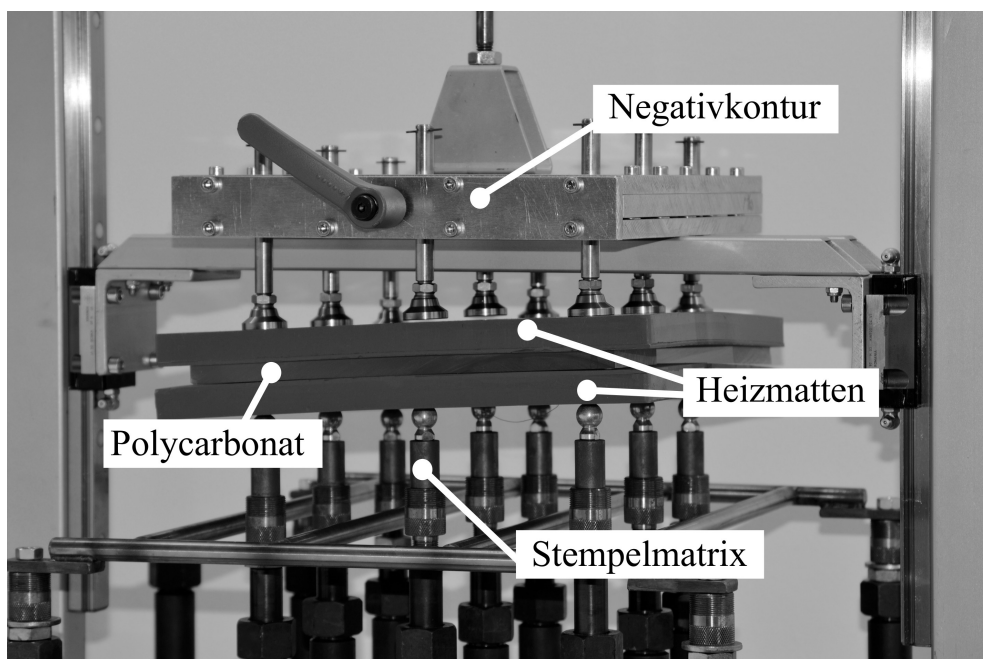


Abbildung 7.4: Kriechumformung mittels eines formflexiblen Werkzeugs

auf Heizdrahtebene und nicht auf Ebene der Polycarbonatscheibe. Die Messung der Temperatur zwischen den beiden Heizmatten zeigte eine Abweichung zum Wert des Thermoelements auf Heizdrahtebene. Die beiderseitige Erwärmung der Polycarbonatscheibe führt zu einer erhöhten Temperatur in der Mitte zweier übereinander platzierten Heizmatten aufgrund der Trägheit des Interpolationsmaterials im Hinblick auf Wärmeleitfähigkeit und Wärmespeicherkapazität. Zur Bestimmung eines Korrekturfaktors für den resultierenden Temperaturwert in der Mitte der beiden Matten wurden daher sechs Versuchsreihen bei unterschiedlichen Temperaturen durchgeführt. Die Versuchsanordnung ist schematisch in Abbildung 7.5 dargestellt. Hieraus konnte durch die Abweichung von Soll- zu

Ist-Wert ein Faktor von 1,14 ermittelt werden. Demnach muss zur Erreichung einer Temperatur von 120 °C ein Wert von 105 °C eingegeben werden.

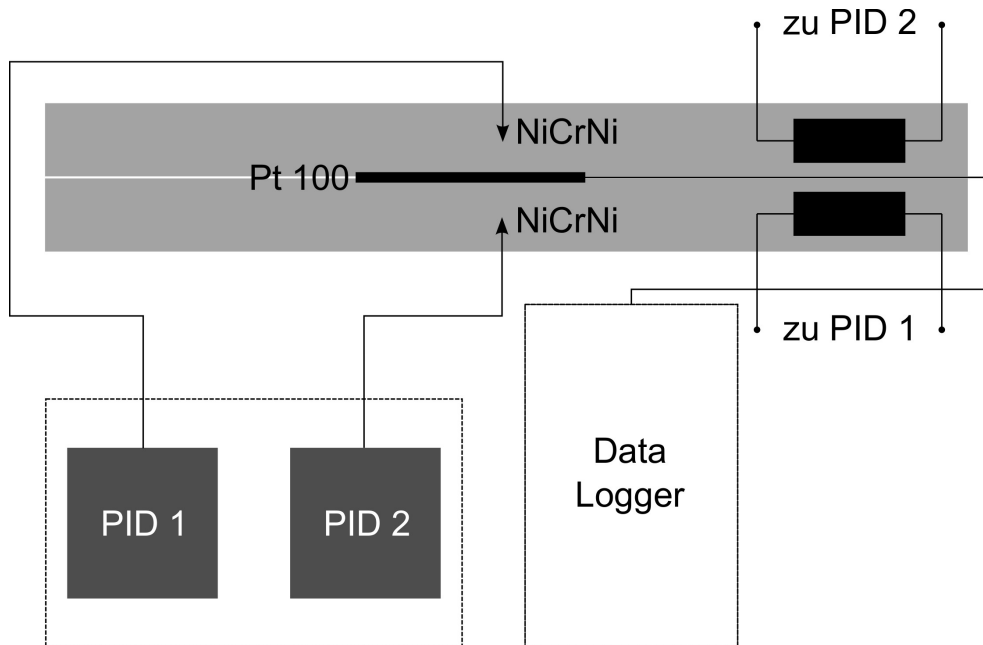


Abbildung 7.5: Ermittlung des Korrekturfaktors

Die untersuchten Parameter, die durch Literaturrecherche und Experteninterviews identifiziert werden konnten, sind in Tabelle 7.2 aufgelistet. Hierbei werden

Parameter	Formelzeichen	Werte			Einheit
		+	0	-	
Umformtemperatur	T	120	132	143	°C
Radius	r	960	1433	1906	mm
Verhältnis Radius	ratio	1:1	1:0,5	1:0	-
Plattenstärke	$t_s$	5		10	mm
Anisotropie	Aniso	Parallel		90°	-

Tabelle 7.2: Parameter optische Qualität

sowohl Prozessparameter als auch geometrisch variierende Randgrößen untersucht. Die Umformtemperatur stellt hierbei gemäß den Literaturangaben den wesentlichen Einflussfaktor dar. Die Versuchsreihe wurde nach dem Face-Centered-Central-Composite-Design durchgeführt. Alle Versuchspläne sind dem Kapitel



11.3 im Anhang zu entnehmen. Mit Hilfe dieses Versuchsplans können bei einem reduzierten Versuchsaufwand dennoch alle Haupteffekte und Wechselwirkungen voneinander getrennt werden. Die Haupteffekte sind mit Vierfachwechselwirkungen, die Zweifachwechselwirkungen mit Dreifachwechselwirkungen überlagert. Diese Wechselwirkungen höheren Grades sind daher nicht auswertbar. Dominante Wechselwirkungen höheren Grades kommen in der Praxis jedoch kaum vor und sollen im Hinblick auf den überproportional steigenden Versuchsaufwand unberücksichtigt bleiben. Bei dieser Versuchsdurchführung wird jeder Faktor acht Mal auf + und acht Mal auf - getestet. Daher ergibt sich eine sehr stabile Effektberechnung, durch die auf eine Versuchswiederholung verzichtet werden kann. Der Effekt beschreibt die Wirkung des Faktors auf das untersuchte System. Er stellt ein Maß der Veränderung des Qualitätsmerkmals beim Wechsel der Faktoreneinstellung von - nach + dar und wird folgendermaßen berechnet:

$$e(P) = \frac{1}{0,5 \cdot k} \sum_{i=1}^k \text{vorz}P_i \cdot y_i \quad (7.3)$$

Hierbei stellt  $e(P)$  den Effekt des Parameters,  $k$  die Versuchsanzahl,  $\text{vorz}$  die Einstellung des Faktors auf + oder - und  $y$  das Qualitätsmerkmal dar. Des Weiteren erlaubt diese Versuchsdurchführung durch die Ermittlung des Zentralpunkts, d.h., indem alle Parameter auf ihren Mittelwert eingestellt werden, die Überprüfung der Effekte auf Linearität. Wird eine Abweichung des Zentralpunkts festgestellt, kann anschließend der Versuchsplan erweitert werden, womit sich ohne zusätzlichen Aufwand die nichtlinearen Abhängigkeiten der Parameter prüfen lassen. Dies ist von Bedeutung, da von einer nichtlinearen Abhängigkeit der Parameter ausgegangen wird. Hierbei kommt im besten Fall das Central-Composite-Design zur Anwendung. Dazu werden bei der Erweiterung des Versuchsplans zur Ermittlung der nichtlinearen Abhängigkeiten Punkte auf die Einstellung ++ und -- durchgeführt. Dies bedeutet, dass es möglich sein muss, außerhalb des zuvor untersuchten Versuchsraums die Parameter entsprechend einzustellen. Im vorliegenden Fall ist dies vor allem aufgrund der Temperatur nicht möglich, da die Glasübergangstemperatur eine Begrenzung darstellt und es nicht sinnvoll ist, diesen Prozessraum zu unter- oder zu überschreiten. Daher wurde auf das Face-Centered-Central-Composite-Design zurückgegriffen und anstelle der Einstellung ++ die Einstellung +- verwendet. Diese Versuchsdurchführung hat den Nachteil, dass die quadratischen Effekte untereinander schlecht trennbar sind. (SIEBERTZ et al. 2010)

### 7.2.2 Oberhalb der Glasübergangstemperatur

Die Beheizung des Materials oberhalb der Glasübergangstemperatur erfolgt mittels des in Kapitel 5.4.1 beschriebenen Strahlerfelds. Zur Vermeidung eines ungleichmäßigen Abstandes zu den Strahlern, der, durch den Durchhang hervorgerufen, die Homogenität der Temperaturverteilung negativ beeinflussen würde, wird das Halbzeug direkt auf die Interpolationsschicht gelegt, die sich wiederum auf einem Gitter befindet und somit einen parallelen Abstand zu den Strahlern ermöglicht (siehe Abbildung 7.6). Die frei werdenden Eigenspannungen während des

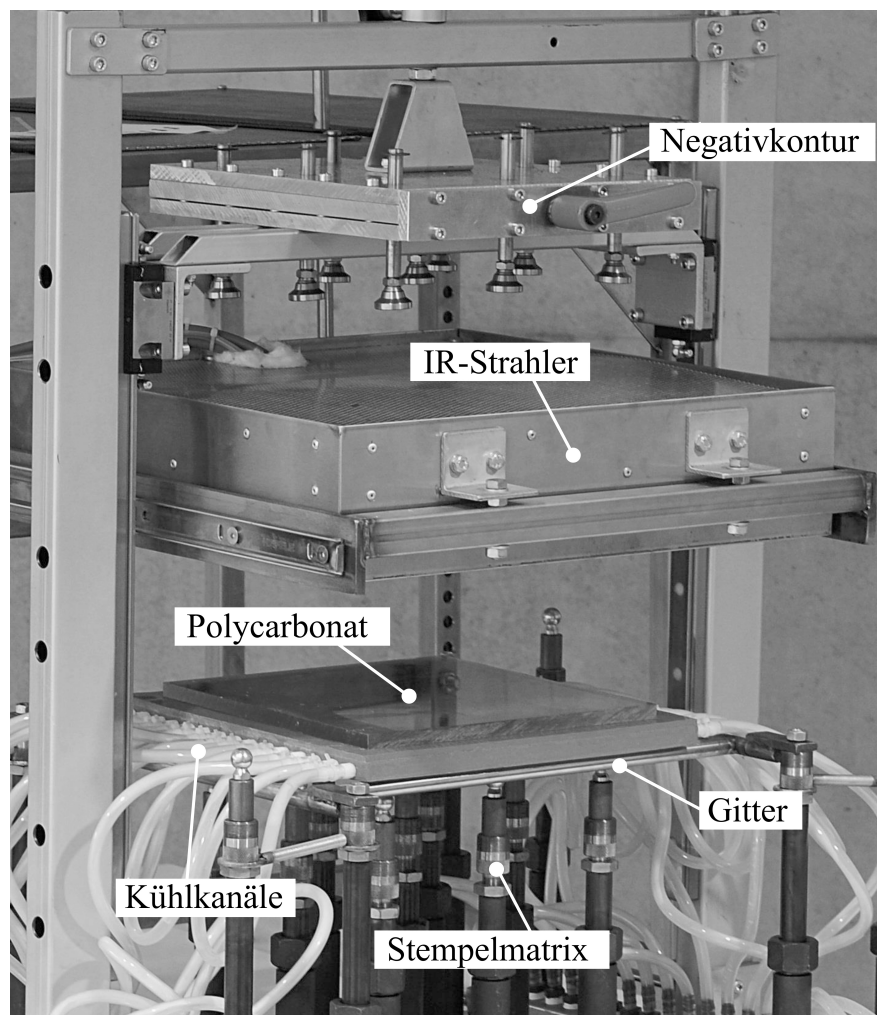


Abbildung 7.6: Heizstellung der Anlage

Heizprozesses über die Glasübergangstemperatur führen zu einer Hochwölbung des Materials in der Plattenmitte. Dadurch verringert sich der Abstand zu den

Strahlern, was eine ungleichmäßige Temperaturverteilung zur Folge hat. Zur Vermeidung der Hochwölbung wird die Scheibe auf der Interpolationsschicht mittels Vakuum fixiert. Als Dichtung dient eine Schnur aus Silikonkautschuk mit einer Shore-Härte von A 23 (M 4400, Firma *Wacker-Chemie GmbH*). Das Vakuum wird in den vier Eckpunkten der Interpolationsschicht angelegt. Nach Erreichen der Solltemperatur wird diese entsprechend dem Versuchsplan eine definierte Zeit lang gehalten (Haltezeit), d.h., die Strahler sind eingeschaltet, und/oder es wird eine Kühlzeit veranschlagt, d.h., die Strahler sind ausgeschaltet, die Scheibe wird jedoch noch nicht verformt. Die maximale Haltezeit beträgt hierbei 180 s und gewährleistet eine homogene Durchwärmung einer Scheibe der Stärke 10 mm. Dadurch ergibt sich kein Temperaturgefälle von Scheibenober- zu Scheibenunterseite. Die Kühlzeit der Scheibe beträgt maximal 90 s. Durch diese Kühlzeit fällt bei einer Erwärmung der Scheibe auf 180 °C die Temperatur der Oberseite der Scheibe auf die Glasübergangstemperatur zurück. Im Anschluss daran wird die Scheibe mittels Negativkontur bei gleichzeitiger Absenkung des Trägerrgitters umgeformt. Hierbei werden bei der Negativkontur jedoch nur die am Scheibenrand befindlichen Stempel verwendet, entsprechend der Anwendung von konventionellen Niederhaltern in Thermoformmaschinen. Die verwendeten Parameter sind in Tabelle 7.3 angegeben. Diese Parameter werden zur Untersuchung der optischen Qualität sowie der Maßhaltigkeit verwendet.

Parameter	Formelzeichen	Werte			Einheit
		+	0	-	
Temperatur $PC_{oben}$	T	144	162	180	°C
Haltezeit Temperatur	$t_H$	180	90	0	s
Kühlzeit vor Umformung	$t_K$	90	45	0	s
Radius	r	960	1433	1906	mm
Verhältnis Radius	ratio	1:1	1:0,5	1:0	-
Plattenstärke	$t_S$	5		10	mm

Tabelle 7.3: Parameter Maßhaltigkeit und optische Qualität

### 7.2.3 Kühlung

Zur Untersuchung der Oberflächenwellenbildung, die nach SCHUTZRECHT DE 37 26033 A1 (1987) maßgeblich von der Kühlrate abhängt, wurden die in Tabelle 7.4 angegebenen Versuchsparameter verwendet. Das Formteil wurde dabei

Parameter	Formelzeichen	Werte			Einheit
		+	0	-	
Haltezeit bei $T_g$	$t_H$	900	450	0	s
Werkzeugtemperatur bis $T_g$	$T_{K-I}$	70	45	20	°C
Werkzeugtemperatur $T_g - 80$ °C	$T_{K-II}$	70	45	20	°C
Radius	r	1906	1433	960	mm
Verhältnis Radius	ratio	1:1	1:0,5	1:0	-
Anisotropie	Aniso	90°		Parallel	-

Tabelle 7.4: Parameter zur Untersuchung des Einflusses der Kühlung auf die Oberflächenwellenbildung

stets mit IR-Strahlern bis zu einer Temperatur von 173 °C, die anschließend für eine Zeit von 210 s gehalten wurde, aufgeheizt. Diese Einstellparameter wurden in Vorversuchen als Obergrenze zur Auswertung der Oberflächenwellenbildung ohne das Auftreten sekundärer optisch störender Effekte ermittelt. Im Anschluss daran wurde das Formteil umgeformt und mit den entsprechenden Randbedingungen abgekühlt. Dabei wurden zwei unterschiedliche Kühlraten, die durch die Glasübergangstemperatur separiert werden, sowie eine zusätzliche Haltezeit bei  $T_g$  betrachtet.

## 7.3 Versuchsergebnisse

### 7.3.1 Maßhaltigkeit

Für die Maßhaltigkeit wird die Rückfederung (engl. springback) angegeben. Diese errechnet sich in Anlehnung an HO et al. (2004) wie folgt:

$$R = \delta_{max}/\delta_0 \quad (7.4)$$

Hierbei ist  $\delta_0$  der maximale Höhenunterschied der Soll-Kontur und  $\delta_{max}$  die größte Abweichung des Ist-Wertes vom Soll-Wert (siehe Abbildung 7.7). Ein Wert von 1

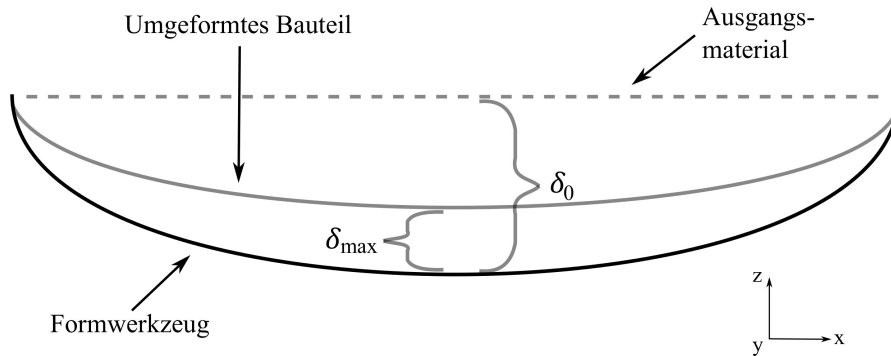


Abbildung 7.7: Rückfederung des Bauteils (HO et al. 2004)

bedeutet daher eine komplette Rückfederung des Bauteils, der Wert 0 hingegen keine Rückfederung und damit eine vollständige Konturanpassung.

### Unterhalb der Glasübergangstemperatur

Der Versuchsplan wurde mittels FEM-Simulation in einer Parameterstudie untersucht. Hieraus ließen sich die auftretenden Haupteffekte und deren Wechselwirkungen berechnen. Diese sind Tabelle 7.5 bzw. 7.6 zu entnehmen.

T (A)	r (B)	ratio (C)	$t_S$ (D)	Aniso (E)
-0,48	-0,13	-0,09	0,02	-0,06

Tabelle 7.5: Haupteffekte zur Rückfederung bei der Kriechumformung

AB	AC	AD	AE	BC	BD	BE	CD	CE	DE
-0,01	0,05	0,04	0,04	-0,04	-0,07	-0,05	0,01	0,01	-0,03

Tabelle 7.6: Wechselwirkungen zur Rückfederung bei der Kriechumformung

Durch die Höhe der Effekte (siehe Kapitel 2.3.5) lässt sich erkennen, dass die Temperatur den größten Einfluss auf die Rückfederung ausübt. Diese nimmt mit steigender Temperatur ab (siehe Abbildung 7.8). Weiterhin sind die geometrischen Parameter als Einflussfaktoren zu erkennen. Hier wirkt sich vor allem der Radius auf die Rückfederung aus. Je kleiner der Radius, desto geringer ist die

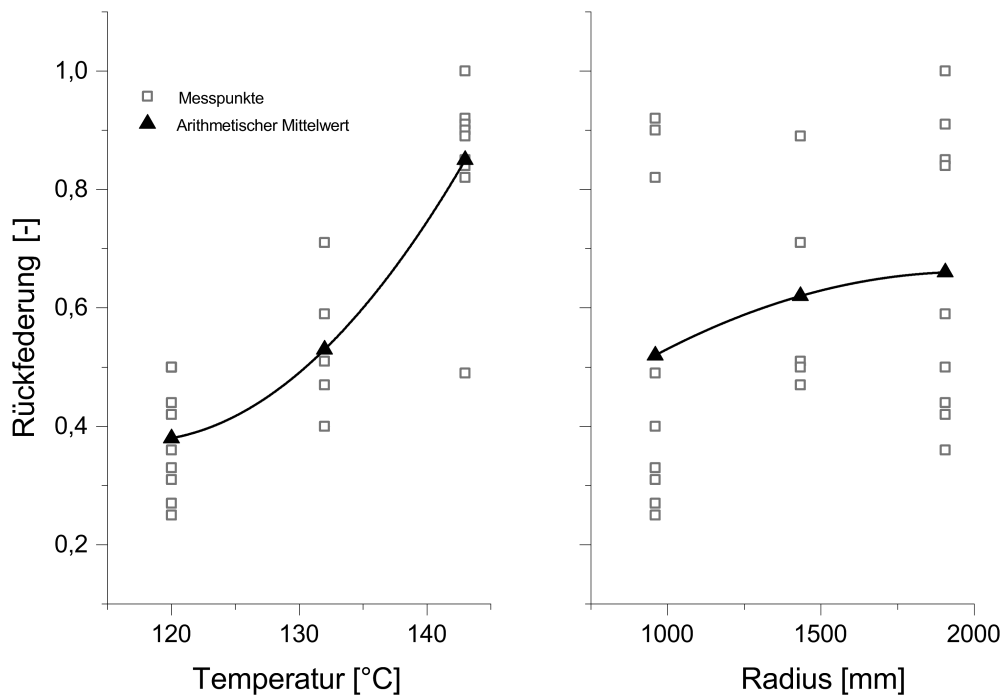


Abbildung 7.8: Rückfederung des Bauteils bei der Kriechumformung in Abhängigkeit von der Temperatur und dem Radius

Rückfederung des Bauteils. Dies ist ebenfalls in Abbildung 7.8 dargestellt. Zudem lässt sich noch ein Einfluss des Verhältnisses der Radien erkennen. Die 2D-Kontur bewirkt hier eine größere Abweichung von der Soll-Kontur als eine 3D-verformte Scheibe. Alle auftretenden Effekte lassen sich durch die entstehenden Spannungen im Bauteil erklären. Mit zunehmender Temperatur fällt der E-Modul ab, womit die Platte eine geringere Steifigkeit aufweist. Die Abnahme der Steifigkeit bewirkt innerhalb des Bauteils bei gleichbleibender Umformung geringere Spannungen. Die resultierenden Spannungen stellen jedoch die treibende Kraft bei der Kriechumformung dar, während eine erhöhte Temperatur nur die Geschwindigkeit des Abbaus der Spannungen beeinflusst. Daraus ergibt sich, dass bei gleichen Umformgraden

die Rückfederung im Bauteil bei niedrigeren Temperaturen geringer ist. Gleiches lässt sich für die geometrischen Randdaten erklären. Kleinere Radien und um zwei Achsen gekrümmte Bauteile führen zu größeren Spannungen innerhalb des Bauteils und weisen daher als Resultat niedrigere Rückstellraten auf. Die Anisotropie sowie die Materialstärke zeigen einen schwachen Einfluss. Ebenso können die Wechselwirkungen gegenüber den Haupteffekten als sehr gering eingestuft werden.

### Oberhalb der Glasübergangstemperatur

Die Rückfederung der Bauteile wurde mit Hilfe des in Abschnitt 6.2 genannten 3D-Scanners ermittelt. Die Effekte sind in Tabelle 7.7 und 7.8 dargestellt.

T (A)	r (B)	ratio (C)	$t_K$ (D)	$t_S$ (E)	$t_H$ (F)
-0,09	-0,10	-0,12	-0,03	0,07	-0,08

Tabelle 7.7: Haupteffekte zur Rückfederung bei der Umformung oberhalb der Glasübergangstemperatur

AB	AC	AD	AE	AF	BC	BD	BE
0,10	0,09	0,05	-0,12	0,03	0,05	0,09	-0,03
BF	CD	CE	CF	DE	DF	EF	
0,01	0,10	-0,08	0,09	-0,02	0,02	-0,07	

Tabelle 7.8: Wechselwirkungen zur Rückfederung bei der Umformung oberhalb der Glasübergangstemperatur

Oberhalb der Glasübergangstemperatur weist die Temperatur einen deutlich schwächeren Einfluss auf als unterhalb (siehe Abbildung 7.9). Die Rückfederung des Bauteils nimmt jedoch mit steigender Temperatur zu. Dies kann auf die einseitige Erwärmung des Materials zurückgeführt werden. Mit steigender Umformtemperatur auf der Oberseite nähert sich die Temperatur der Plattenunterseite der Glasübergangstemperatur. Bei der Kühlung des Bauteil kommt es in Folge von Temperaturunterschieden und der unterschiedlichen Zunahme des spezifischen

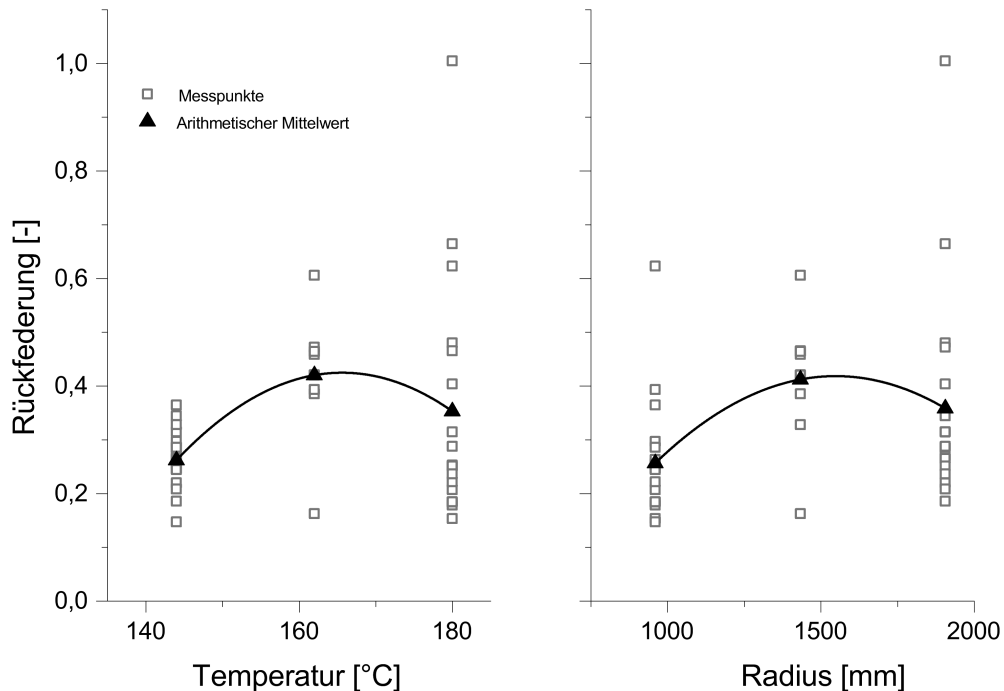


Abbildung 7.9: Rückfederung des Bauteils bei der Umformung oberhalb der Glasübergangstemperatur in Abhängigkeit von der Umformtemperatur und dem Radius

Volumens oberhalb und unterhalb der Glasübergangstemperatur zu Schwindungs-differenzen, welche zu Verzug führen. Die Rückfederung in Abhängigkeit von der Temperatur zeigt ein nicht lineares Verhalten. Es bildet sich ein Maximum bei dem eingestellten Mittelwert von 162 °C aus. Die Rückfederung nimmt oberhalb dieser Temperatur wieder leicht, jedoch nicht signifikant ab. Dies lässt sich durch das Erreichen der Glasübergangstemperatur auf der Plattenunterseite erklären. Die vorhandene Temperaturdifferenz von Plattenoberseite zu Plattenunterseite verursacht bei der Kühlung weiterhin Schwindungsunterschiede. Die Abnahme des spezifischen Volumens erfolgt jedoch gleichermaßen, da beiden Plattenseiten eine Temperatur oberhalb der Glasübergangstemperatur aufweisen.

Die geometrischen Parameter Radius und Radienverhältnis wirken sich in ähnlichem Maße wie unterhalb der Glasübergangstemperatur aus. Bei kleineren Radien ergibt sich ein höheres Maß der Konturanpassung, bei 2D-verformten Scheiben ein geringeres Maß als bei 3D-verformten Scheiben. Dies ist in Abbildung 7.9



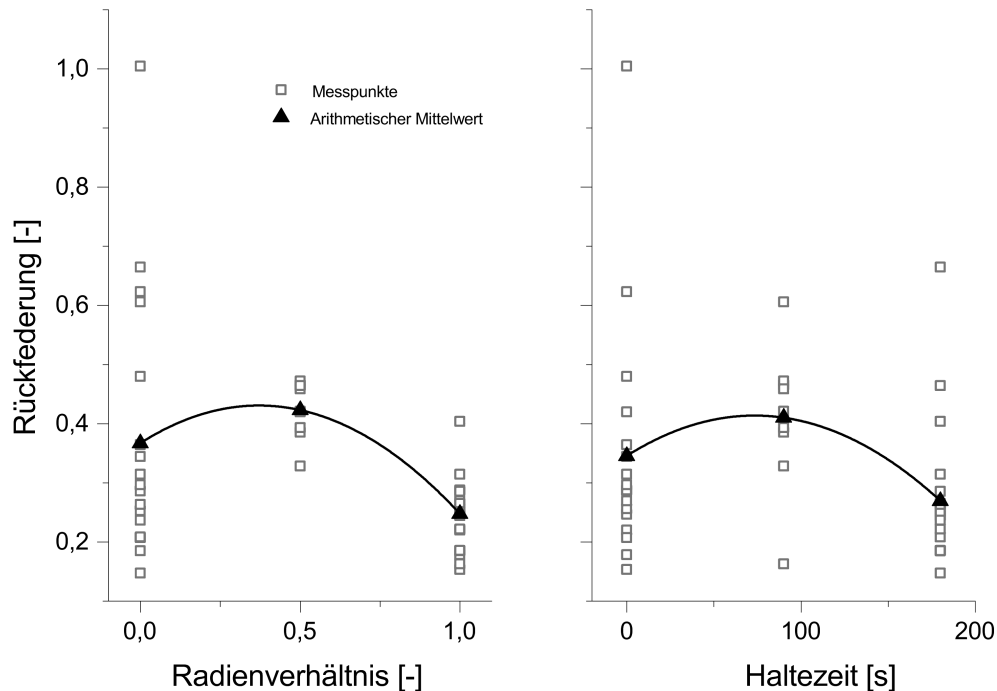


Abbildung 7.10: Rückfederung des Bauteils bei der Umformung oberhalb der Glasübergangstemperatur in Abhängigkeit vom Radienverhältnis und der Haltezeit

und 7.10 dargestellt. Eine Erklärung hierfür lässt sich ähnlich wie unterhalb der Glasübergangstemperatur geben. Die höheren Zugkräfte im Material infolge der kleineren Radien und der 3D-Formgebung führen zu einer geringeren Rückfederung des Bauteils. Es ist jedoch im Gegensatz zur Umformung unterhalb der Glasübergangstemperatur zu beachten, dass das Verhalten ebenso wie bei der Temperatur ein Maximum bei der Einstellung des Mittelwerts aufweist. Ein leichter Abfall bzw. das Ausbilden eines Plateaus ist bei Erreichen des mittleren Einstellwertes ( $r = 1433 \text{ mm}$ ) gegeben. Dieser Wert kann somit als Grenzwert angesehen werden, ab dem die Rückfederung stetig zunimmt. Ähnlich gilt entsprechend beim Radienverhältnis eine annähernd gleiche Rückfederung zwischen einem Radienverhältnis von 0 und 0,5. Bei größeren Radienverhältnissen nimmt diese hingegen stetig ab. Während die Kühlzeit der erwärmten Platte nahezu keinen Einfluss auf die Rückfederung ausübt, muss jedoch eine zusätzliche Haltezeit der Solltemperatur bei der Einhaltung der Soll-Kontur beachtet werden. Somit führt eine zusätzliche

Haltezeit zu einer geringeren Rückfederung, sobald eine Grenzhaltezeit von 90 s erreicht ist (siehe Abbildung 7.10). Dies ergibt sich aus der gleichmäßigeren Temperaturverteilung innerhalb der Platte. Somit weist die Platte eine einheitliche Temperatur oberhalb der Glasübergangstemperatur auf und somit können Schwindungsunterschiede nicht zu Verzug führen.

Als stärkste Wechselwirkung tritt die Interaktion zwischen der Temperatur und der Plattenstärke hervor. Dies lässt sich wiederum durch die einseitige Erwärmung des Materials erklären. Hierbei hängt die erreichbare Temperatur auf der Scheibenunterseite maßgeblich von der Materialstärke ab. Je größer die Wandstärke, desto größer ist das entstehende Temperaturgefälle und desto später wird auf der Scheibenunterseite die Glasübergangstemperatur erreicht.

### 7.3.2 Transmission

Für die optische Qualität wird zum einen der Wert für die Transmission des Formteils angegeben. Ein Wert von 100 bedeutet hierbei, dass die Scheibe zu 100% transmissiv im Sinne der optischen Qualitätsprüfung ist und somit die höchste erreichbare optische Güte aufweist.

#### Unterhalb der Glasübergangstemperatur

Bei der Kriechumformung lassen sich als Haupteffekte für die optische Qualität hinsichtlich der Transmission die Faktoren Temperatur und Plattenstärke erkennen (Tabelle 7.9).

	T (A)	r (B)	ratio (C)	$t_S$ (D)	Aniso (E)
PT	0,20	-0,04	0,02	0,08	0,04
DF	0,05	-0,02	0,00	0,03	-0,04

*Tabelle 7.9: Haupteffekte zur Transmission bei der Kriechumformung*

Der Parameter Temperatur weist hierbei wiederum den größten Einfluss auf. Dieser ist sowohl bei der Untersuchung im Dunkelfeld als auch bei der Untersuchung im Hellfeld mit Muster gegeben. Die Temperatur wurde bereits in der genannten Literatur als grundlegender Verfahrensparameter identifiziert. Hierbei zeichnet sich ihr Effekt jedoch im Hellfeld mit Muster deutlich stärker ab. Dies bestätigt, dass unterhalb der Glasübergangstemperatur stets Formteile ohne Ausschuss im

	AB	AC	AD	AE	BC	BD	BE	CD	CE	DE
PT	0,03	-0,03	0,04	0,04	-0,04	0,04	0,03	-0,03	-0,03	0,03
DF	0,02	0,00	0,03	0,03	-0,03	0,00	0,00	-0,02	-0,02	0,03

Tabelle 7.10: Wechselwirkungen zur Transmission bei der Kriechumformung

Hinblick auf die durch die Umformung beeinflusste optische Qualität herstellbar sind. Die Einstufung der Qualitätsklasse wird jedoch von den Prozessparametern gesteuert. Bis zu einer Temperatur von 131,5 °C lässt sich die höchste optische Qualität von 100 % erreichen, bei einer Temperatur von 143 °C beträgt sie bei der Betrachtung mittels Hellfeld mit Muster nur noch 81 % des Transmissionsgrades (siehe Abbildung 7.11).

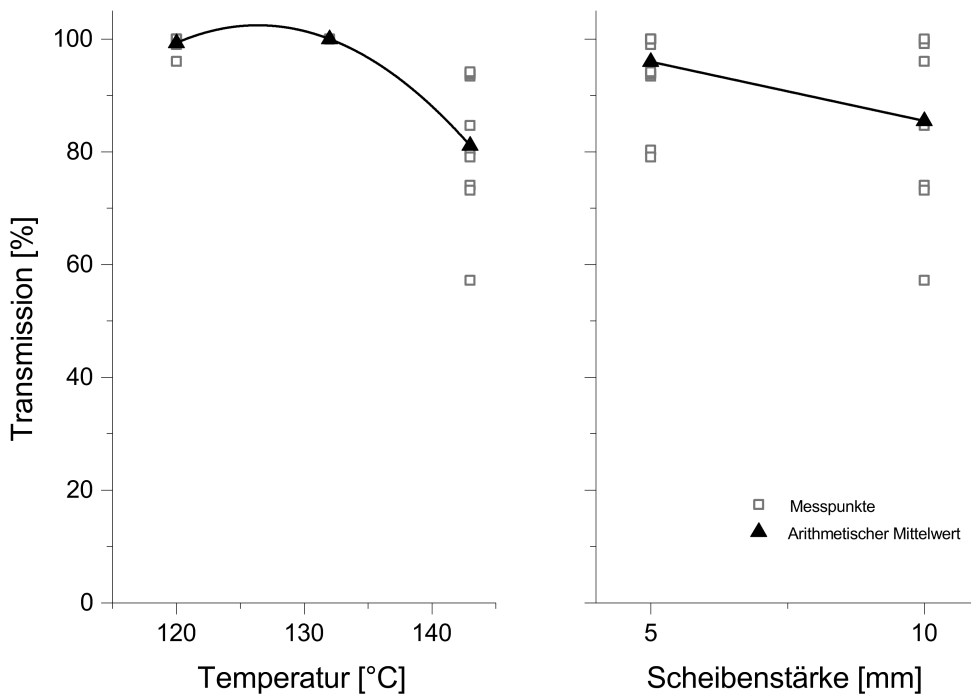


Abbildung 7.11: Transmission des Bauteils bei der Kriechumformung in Abhängigkeit von der Temperatur und der Scheibenstärke

Das sich abzeichnende Plateau bis zu einer Grenztemperatur von 131,5 °C und der anschließende starke Abfall der Transmission lässt sich mit dem Schubmodul

in Verbindung setzen. Dieser fällt ebenfalls in einem Temperaturbereich zwischen 130 °C und 144 °C stetig ab. Der Abfall des Schubmoduls und der Transmission sind in Abbildung 7.12 einander gegenübergestellt.

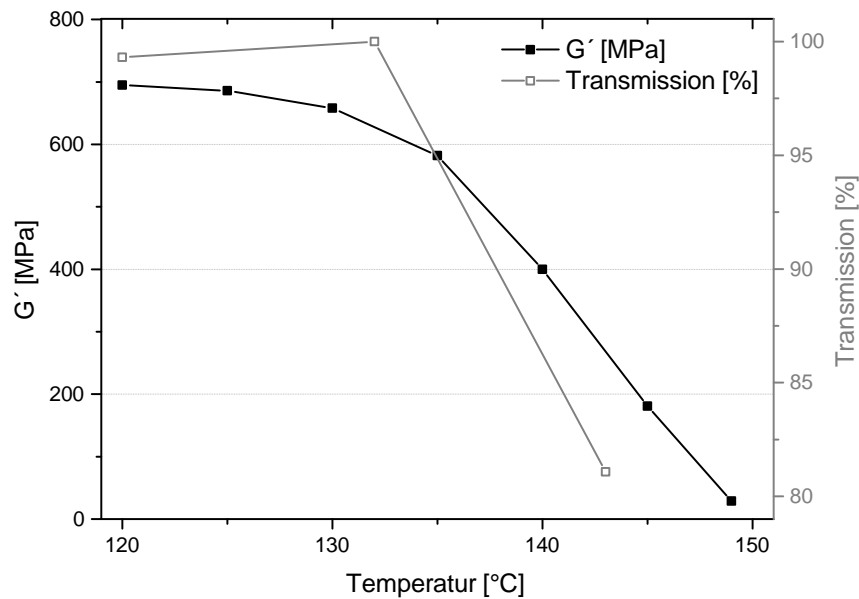


Abbildung 7.12: Abfall des Schubmoduls (Quelle: CAMPUS®) und der Transmission mit steigender Temperatur

Der Einfluss der Scheibenstärke zeichnet sich vor allem bei der Qualitätsprüfung mittels Hellfeld mit Muster ab und ist somit bei der Umformung optisch hochwertiger Bauteile von Bedeutung. Der Effekt begründet sich durch die höhere erforderliche Kraft bei der Umformung. Durch die höhere Kraftkomponente bei dickeren Scheiben ergibt sich eine größere Eindringtiefe der Stiftematrix mit einer größeren resultierenden Kontaktfläche. Daraus folgt wiederum eine größere Fehlerfläche. Alle weiteren Haupteffekte und die Wechselwirkungen lassen sich als sehr gering einstufen (siehe Tabelle 7.10).

### Oberhalb der Glasübergangstemperatur

Oberhalb der Glasübergangstemperatur tritt neben den Parametern Temperatur und Scheibenstärke zusätzlich die Haltezeit der Temperatur als Parameter hervor (siehe Tabelle 7.11).

	T (A)	r (B)	ratio (C)	$t_K$ (D)	$t_S$ (E)	$t_H$ (F)
PT	0,31	-0,02	0,03	0,01	-0,14	-0,15
DF	0,12	-0,01	0,02	0,01	-0,12	-0,08

Tabelle 7.11: Haupteffekte zur Transmission bei der Umformung oberhalb der Glasübergangstemperatur

	AB	AC	AD	AE	AF	BC	BD	BE
PT	0,02	-0,04	-0,04	0,12	0,12	-0,04	-0,04	0,02
DF	0,01	-0,01	-0,02	0,10	0,10	-0,02	-0,01	0,00
	BF	CD	CE	CF	DE	DF	EF	
PT	0,02	0,02	-0,01	0,01	0,04	0,00	0,14	
DF	0,00	0,01	0,01	-0,01	0,00	0,00	0,12	

Tabelle 7.12: Wechselwirkungen zur Transmission bei der Umformung oberhalb der Glasübergangstemperatur

Hierbei zeigt die Scheibenstärke die gleiche Dominanz im Dunkelfeld wie im Hellfeld mit Muster. Im Vergleich zur Umformung unterhalb der Glasübergangstemperatur wirkt sich jedoch die Zunahme der Scheibenstärke positiv auf die Transmission aus. Die Scheibe der Materialstärke von 10 mm weist eine höhere Transmission auf als eine dünnere Scheibe. Begründet werden kann dies durch die Eindringtiefe der IR-Strahler. Eine dünnere Scheibe weist auf der Scheibenunterseite, die der Kontaktseite entspricht, eine höhere Temperatur auf als eine dickere Scheibe. Die höhere Temperatur der Kontaktseite führt zu einer geringeren Transmission der dünneren Scheibe aufgrund von Abdrücken. Die Temperatur sowie die Haltezeit wirken sich im Dunkelfeld geringer aus als im Hellfeld mit Muster. Dies bedeutet, dass die beiden Faktoren Haltezeit und Temperatur entscheidend für die Herstellung optisch hochwertiger Bauteile sind. Abbildung 7.13 zeigt die Abnahme der Transmission mit steigender Temperatur. Die Abnahme der Transmission kann annähernd als linear angenommen werden. Ein ähnliches Verhalten, wenn auch mit geringerem Gradienten, zeigt die Haltezeit. Je länger die Haltezeit ist, desto niedriger ist die optisch erreichbare Qualität der Scheibe (siehe Abbildung 7.13). Die Abnahme kann ebenfalls als nahezu linear angenommen werden. Die Kühlzeit

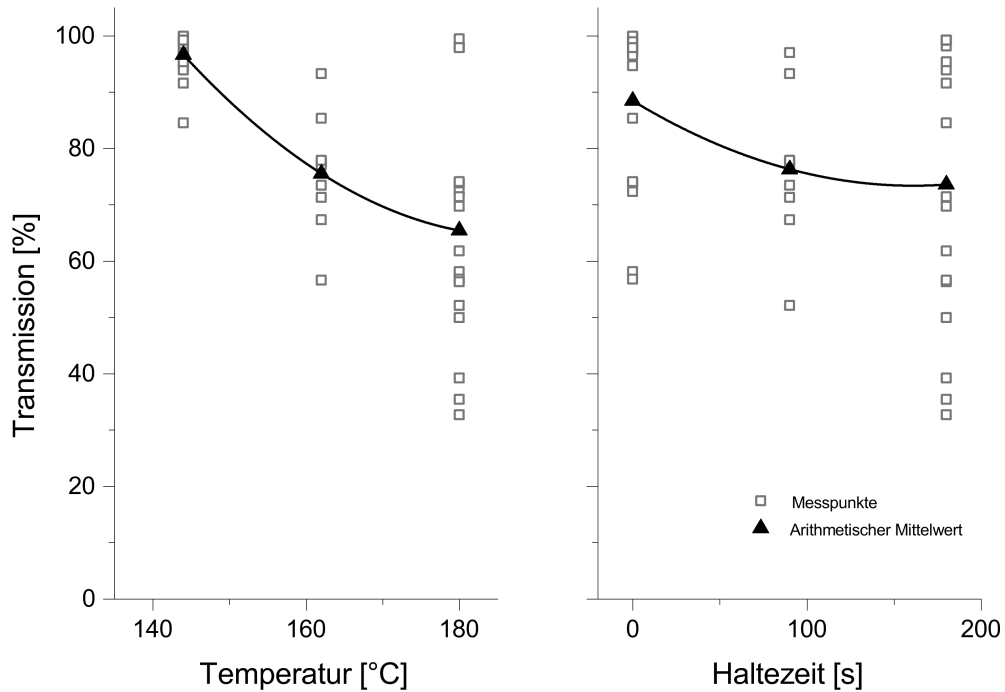


Abbildung 7.13: Transmission des Bauteils bei der Umformung oberhalb der Glasübergangstemperatur in Abhängigkeit von der Temperatur und der Haltezeit

sowie die geometrischen Randbedingungen sind als Haupteffekte weniger stark ausgeprägt. Bei den Wechselwirkungen treten die dominanten Haupteffekte Temperatur, Scheibenstärke und Haltezeit miteinander in Interaktion (Tabelle 7.12). Alle drei benannten Wechselwirkungen zeigen einen annähernd gleich großen Effekt, der in der gleichen Größenordnung der Haupteffekte liegt. Dadurch ist eine starke gegenseitige Beeinflussung der benannten Faktoren untereinander gegeben. Dieser Effekt zeigt sich sowohl im Hellfeld mit Muster als auch im Dunkelfeld mit gleicher Tendenz und vergleichbarer Größe.

### 7.3.3 Verzerrungen

Eine weitere Kenngröße der optischen Qualität stellt der Wert der Verzerrung dar. Diese wird unter einem Winkel von  $72^\circ$  betrachtet. Angegeben wird hierbei der prozentuale Differenzwert durch den Umformprozess.

**Unterhalb der Glasübergangstemperatur**

Betrachtet man die resultierenden Verzerrungen bei der Umformung unterhalb der Glasübergangstemperatur, so tritt als Haupteffekt in erster Linie wiederum die Temperatur hervor (siehe Tabelle 7.13). Die Verzerrungen nehmen mit stei-

T (A)	r (B)	ratio (C)	$t_S$ (D)	Aniso (E)
-0,14	0,06	-0,13	0,07	0,11

*Tabelle 7.13: Haupteffekte der resultierenden Verzerrungen bei der Kriechumformung*

AB	AC	AD	AE	BC	BD	BE	CD	CE	DE
-0,03	0,08	-0,07	-0,07	0,07	0,05	-0,08	0,03	0,03	0,04

*Tabelle 7.14: Wechselwirkungen der resultierenden Verzerrungen bei der Kriechumformung*

gender Umformtemperatur zu, wobei hier eine lineare Korrelation beobachtet werden kann. Die Zunahme bei einer Umformtemperatur von 120 °C auf 143 °C beträgt hierbei ca. 11 %. Dies ist in Abbildung 7.14 dargestellt. Darüber hinaus zeigt das Radienverhältnis einen signifikanten Einfluss. So weisen 2D-verformte Scheiben eine höhere Verzerrung auf als 3D-verformte Scheiben. Eine maximale Verzerrung stellt sich bei einem Radienverhältnis von 0,5 ein (siehe Abbildung 7.14), was auf die unsymmetrische Geometrie sowie die Umformung in beide Krümmungsrichtungen zurückzuführen ist. Des Weiteren hat der Faktor Anisotropie einen starken Einfluss auf die Verzerrungen. Wird zur Umformung die Extrusionsrichtung in Richtung des kleinsten Radius eingelegt, so lässt sich eine Zunahme der Verzerrungen verzeichnen. Durch die Extrusionsrichtung werden in einer Achse unterschiedliche Dickengrade erreicht, welche zu Verzerrungen führen. Bei einer weiteren Verstreckung entlang dieser Achse, die durch Umformung erreicht wird, verstärken sich diese Verzerrungen, da die dünneren Stellen innerhalb der Platte durch den Verstreckvorgang weiter ausgedünnt werden. Dies bedeutet, dass zur Vermeidung von zusätzlichen Verzerrungen die Extrusionsrichtung stets in Richtung des größten Radius ausgerichtet werden sollte. Die

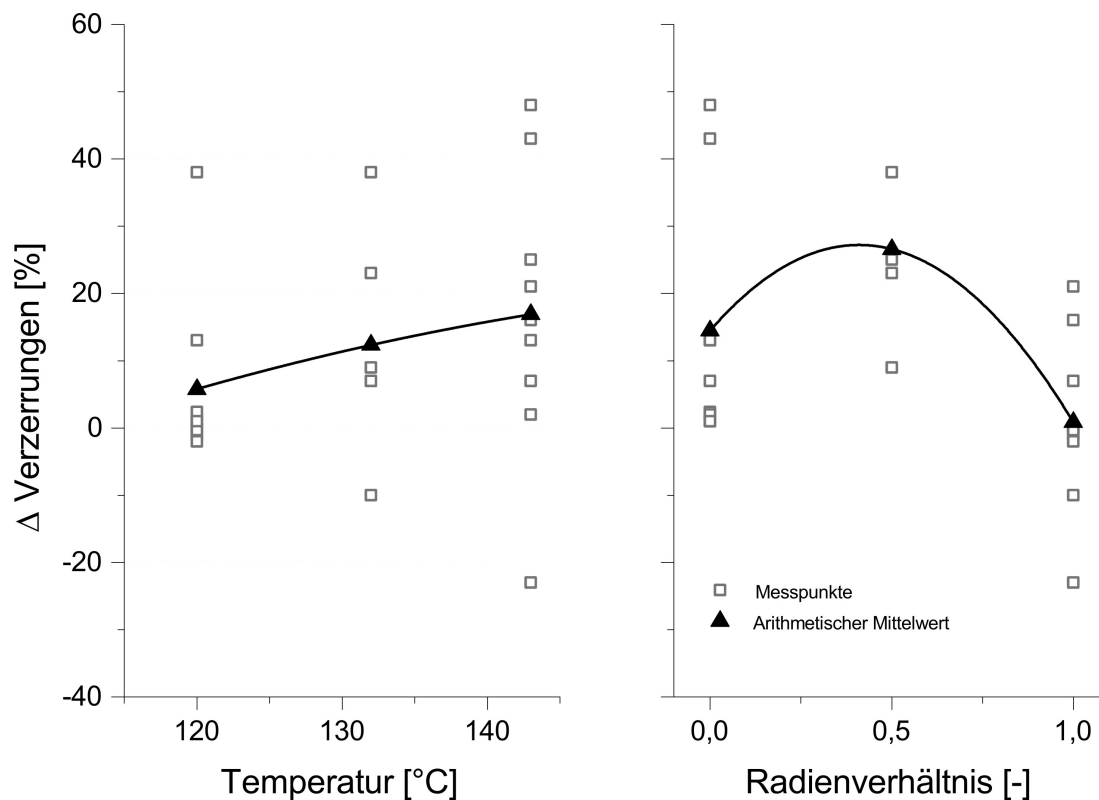


Abbildung 7.14: Verzerrung des Bauteils bei der Umformung unterhalb der Glasübergangstemperatur in Abhängigkeit von der Temperatur und dem Radienverhältnis

Faktoren Radius und Scheibenstärke wirken in annähernd gleichem Maße und haben einen deutlich geringeren Einfluss auf die Verzerrungen, obwohl sie wie in Kapitel 6.1.3 beschrieben einen nachweislichen Einfluss ausüben. Dieser ist jedoch, wie gezeigt wurde, weniger signifikant als derjenige der zuvor genannten Faktoren. Betrachtet man die Wechselwirkungen (Tabelle 7.14), so sind diese bei allen Faktoren ähnlich groß. Besondere Beachtung muss jedoch der Wechselwirkung Radius-Anisotropie geschenkt werden. Die Zunahme der Verzerrungen durch die Anisotropie hängt maßgeblich von der geometrischen Größe des Radius und der dadurch resultierenden Verstreckung ab.

### Oberhalb der Glasübergangstemperatur

Oberhalb der Glasübergangstemperatur lässt sich erkennen, dass eine zusätzliche Haltezeit vor der Umformung neben der Oberflächentemperatur den größ-



ten Einfluss aufweist (siehe Tabelle 7.15). Die Verzerrungen nehmen mit der

T (A)	r (B)	ratio (C)	$t_K$ (D)	$t_S$ (E)	$t_H$ (F)
-0,13	-0,06	-0,06	0,06	0,06	0,08

Tabelle 7.15: Haupteffekte der resultierenden Verzerrungen bei der Umformung oberhalb der Glasübergangstemperatur

AB	AC	AD	AE	AF	BC	BD	BE
-0,07	0,00	0,13	0,13	0,02	0,11	-0,03	0,07
BF	CD	CE	CF	DE	DF	EF	
0,05	-0,06	-0,03	-0,01	-0,05	0,00	-0,06	

Tabelle 7.16: Wechselwirkungen zu den resultierenden Verzerrungen bei der Umformung oberhalb der Glasübergangstemperatur

Oberflächentemperatur zu, bilden jedoch ihr Maximum bei 162°C aus (siehe Abbildung 7.15). Dies kann ähnlich wie bei der Rückfederung oberhalb der Glasübergangstemperatur durch das Temperaturgefälle in der Scheibe aufgrund der einseitigen Erwärmung erklärt werden. Hierbei befindet sich bis zur Erreichung des Maximums die Temperatur auf der Plattenoberseite oberhalb der Glasübergangstemperatur und auf der Plattenunterseite unterhalb der Glasübergangstemperatur. Erst bei Überschreiten der Glasübergangstemperatur innerhalb der ganzen Platte ist es möglich, dass sich die Verzerrungen durch Fließen des Materials wieder abbauen. Die Haltezeit bewirkt, ähnlich wie die Oberflächentemperatur, ein Maximum bei einer Haltezeit von 90s. Eine Haltezeit von 0s weist die geringsten Verzerrungen auf (siehe Abbildung 7.15). Begründen lässt sich dieser Effekt ähnlich wie bei der Oberflächentemperatur durch das entstehende Gefälle innerhalb der Platte. Nach einer Heizzeit von 90s können durch Erreichen einer homogenen Temperaturverteilung entstehende Verzerrungen wieder abgebaut werden.

Die restlichen Faktoren wirken in gleichem Maße. Wiederum zeigen die nachweislichen Faktoren Scheibenstärke und Radius keinen dominanten Einfluss. Betrachtet man die Wechselwirkungen, so tritt besonders die Temperatur in Interaktion mit der Kühlzeit und der Scheibenstärke hervor (siehe Tabelle 7.16). Durch den Vorzeichenwechsel lässt sich erkennen, dass die Wechselwirkung abschwächend wirkt.

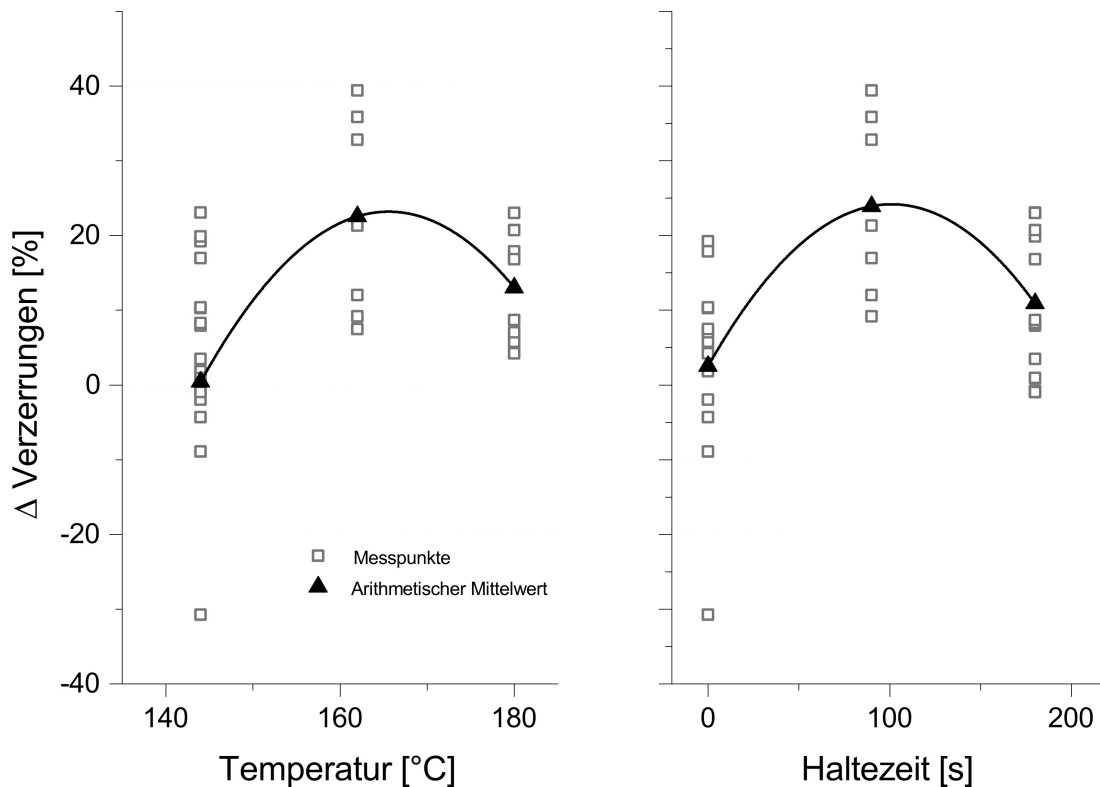


Abbildung 7.15: Verzerrung des Bauteils bei der Umformung oberhalb der Glasübergangstemperatur in Abhängigkeit von der Temperatur und der Haltezeit

Das lässt sich bei einer zusätzlichen Kühlzeit durch den Abfall der Umformtemperatur erklären. Diese liegt bei einer Kühlzeit von 90 s und einer Formtemperatur von 180 °C wieder nahe der Glasübergangstemperatur. Somit kann durch einen weiteren Temperaturabfall durch eine Kühlzeit keine weitere Reduzierung der Verzerrungen erreicht werden. Die Glasübergangstemperatur ist bereits unterschritten und das Material eingefroren. Bei der Scheibenstärke lässt sich ebenfalls ein abschwächender Effekt erkennen, wenn sie von 10 auf 5 mm verringert wird. Dies kann durch die Eindringtiefe der Infrarotstrahlung begründet werden. Eine geringere Scheibenstärke weist ein sehr viel geringeres Temperaturgefälle auf und führt infolge der homogeneren Temperaturverteilung innerhalb der Scheibe zu einer reduzierten Varianz der Verzerrungen. Eine weitere starke Wechselwirkung lässt sich beim Radius und beim Radienverhältnis erkennen. Die Effekte zeigen wiederum einen Vorzeichenwechsel. Somit wird die Abnahme der Verzerrungen durch ein Radienverhältnis von 1:1 stark abgeschwächt.

### Kühlung

Betrachtet man die entstehenden Verzerrungen bei der Kühlung einer verformten Scheibe, so ergibt sich neben dem Einfluss der geometrischen Parameter Radius und Radienverhältnis ein Einfluss der Kühlwassertemperatur bei der Abkühlung unterhalb der Glasübergangstemperatur (siehe Tabelle 7.17). Dieser Einfluss ist

$t_H$ (A)	$T_{K-I}$ (B)	$T_{K-II}$ (C)	r (D)	Aniso (E)	ratio (F)
-0,03	0,02	0,04	-0,04	-0,02	-0,06

Tabelle 7.17: Haupteffekte in Zusammenhang mit den Verzerrungen bei der Abkühlung

AB	AC	AD	AE	AF	BC	BD	BE
-0,04	-0,03	-0,03	-0,03	0,01	0,03	0,06	0,00
BF	CD	CE	CF	DE	DF	EF	
0,03	-0,01	-0,01	0,04	-0,01	-0,10	0,01	

Tabelle 7.18: Wechselwirkungen in Zusammenhang mit den Verzerrungen bei der Abkühlung

dominanter als der Einfluss der Kühlwassertemperatur oberhalb der Glasübergangstemperatur. Mit Zunahme der Kühlwassertemperatur nehmen ebenso die Verzerrungen zu. Eine schnelle Abkühlung verursacht geringere Verzerrungen im Bauteil. Bei Betrachtung der Nichtlinearitäten kann festgestellt werden, dass die optimale Abkühlrate durch eine Kühlwassertemperatur von  $45^\circ\text{C}$  erreicht wird (siehe Abbildung 7.16). Hierbei lässt sich sogar eine Abnahme der Verzerrungen erreichen. Der Einfluss der Parameter Radius und Radienverhältnis zeichnet sich analog zu den Untersuchungen zur Verzerrung bei der Umformung oberhalb der Glasübergangstemperatur ab. Mit Verringerung des Radius und der Zunahme des Radienverhältnisses nehmen die Verzerrungen ab. Betrachtet man das nichtlineare Verhalten des Radienverhältnisses, so lässt sich ein Minimum der Verzerrungen bei einem Verhältnis von 0,5 finden, das bei der Umformung oberhalb der Glasübergangstemperatur hingegen das Maximum der Verzerrungen darstellt. Somit kann konstatiert werden, dass sich durch die Temperierung der Interpolationsschicht

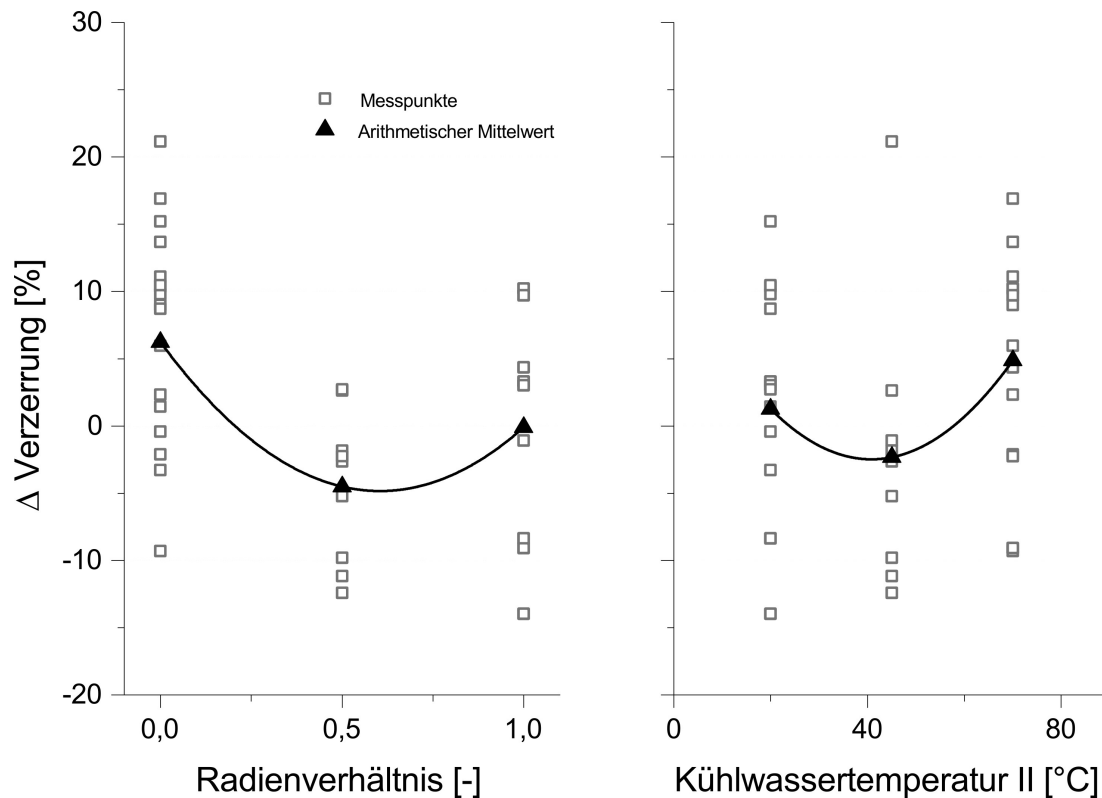


Abbildung 7.16: Verzerrungen des Bauteils bei der Kühlung in Abhängigkeit vom Radienverhältnis und der Kühlwassertemperatur

eine Reduzierung der Verzerrungen erreichen lässt. Diese können bei 2D-Bauteilen um 4 % und bei symmetrischen 3D-Bauteilen um 3 % gesenkt werden. Am stärksten lässt sich eine Abnahme bei unsymmetrischen 3D-Bauteilen erkennen. Hier nehmen die Verzerrungen sogar mit 19 % ab.

Betrachtet man die Wechselwirkungen bei der Bildung von Verzerrungen bei der Kühlung, so ergibt sich ein zusätzlicher Effekt durch die Interaktion der Abkühlrate oberhalb der Glasübergangstemperatur in Kombination mit dem Radius (siehe Tabelle 7.18). Bei steigender Kühlwassertemperatur führt die Zunahme des Radius zu einer Zunahme der Verzerrungen.

## 8 Diskussion

### 8.1 Modellbildung

Zur Vorhersage der Bauteileigenschaften im Hinblick auf Rückfederung und optische Qualität soll ein Zusammenhang zwischen den Einstellgrößen des Prozesses und den Zielgrößen gefunden werden. Aufgrund des Fehlens physikalischer Modelle, welche die optischen Eigenschaften in Transmission und bei den resultierenden Verzerrungen in Abhängigkeit von bekannten Größen definieren würden, wurde als erster Ansatz auf die Regressionsanalyse zur Modellbildung zurückgegriffen. Hierbei stellt die lineare Regression einen einfachen Zusammenhang der Form

$$y = a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 \quad (8.1)$$

dar.

Das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  gibt hierbei die Güte des Modells an. Es ist definiert als:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (8.2)$$

Hierbei stellt  $y_i$  den gemessenen Wert,  $\hat{y}_i$  den prognostizierten Wert und  $\bar{y}$  den Mittelwert der abhängigen Variablen dar. Das Bestimmtheitsmaß kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen. Ein Bestimmtheitsmaß von 0,84 gibt an, dass 84 % der gemessenen Werte durch das Modell erklärt werden können. Demzufolge können 16 % der Werte nicht durch das Modell beschrieben werden. Eine Abweichung des im Idealfall vorliegenden Bestimmtheitsmaßes von 1 ergibt sich aus Messunsicherheiten und dem Einfluss nicht betrachteter Größen. Im Allgemeinen haben Berechnungsgleichungen, welche durch die statistische Modellbildung ermittelt wurden, nur für den ermittelten Wertebereich der Parameter Gültigkeit und müssen für Größen außerhalb des Wertebereichs überprüft bzw. erweitert werden. Als weiteres Maß wird die Bewertungskennzahl  $a$  nach OHLENDORF (2004) angegeben. Diese Kennzahl gibt in Prozent an, inwieweit der Wert über- oder unterschätzt wird. Die Gleichung hierzu lautet:

$$a = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}}}{\bar{y}} \cdot 100\% \quad (8.3)$$

Die lineare Regression wurde mit der Software *Origin*<sup>®</sup> 8.6 durchgeführt. Dazu wird die Methode der kleinsten Quadrate verwendet, wobei die summierten Quadrate der Residuen, welche die Differenz zwischen empirischem und geschätztem Wert darstellen, minimiert werden. Die Regression lieferte für die unterschiedlichen Zielgrößen die in Tabelle 8.1 aufgezeigten Bestimmtheitsmaße.

	Zielgröße	$R^2$
$< T_g$	Rückfederung	0,85
	Dunkelfeld	0,40
	Hellfeld mit Muster	0,69
	Verzerrung	0,39
$> T_g$	Rückfederung	0,41
	Dunkelfeld	0,40
	Hellfeld mit Muster	0,76
	Verzerrung	0,44
	Verzerrung <sub>Kühlung</sub>	0,22

Tabelle 8.1: Bestimmtheitsmaß der unterschiedlichen Zielgrößen bei der linearen Regressionsanalyse

Hieraus ist zu erkennen, dass lediglich die Rückfederung unterhalb der Glasübergangstemperatur eine starke lineare Korrelation zeigt. Eine mittelstarke lineare Korrelation weist zudem die Transmission im Hellfeld mit Muster oberhalb der Glasübergangstemperatur auf. Das Bestimmtheitsmaß erreicht hier noch 0,76. Alle weiteren Zielgrößen zeigen eine schwache lineare Korrelation. Zur Beschreibung des nichtlinearen Zusammenhangs und zur zusätzlichen Betrachtung der Wechselwirkungen unterhalb der einzelnen Parameter dient die multiple nichtlineare Regression. Die Gleichung zeigt hierbei folgende Form:

$$y = a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_1^2 + a_3 \cdot x_2 + a_4 \cdot x_2^2 + a_5 \cdot x_1 \cdot x_2 \quad (8.4)$$

Im Falle der Regressionsgleichungen unterhalb der Glasübergangstemperatur ergibt sich mit den Verfahrensparametern eine Gleichung der Form:

$$\begin{aligned}
\text{Kennwert} = & b_0 + b_1 \cdot T + b_2 \cdot T^2 + b_3 \cdot r + b_4 \cdot r^2 + b_5 \cdot \text{ratio} + b_6 \cdot \text{ratio}^2 \\
& + b_7 \cdot t_S + b_8 \cdot \text{Aniso} + b_9 \cdot T \cdot r + b_{10} \cdot T \cdot \text{ratio} + b_{11} \cdot T \cdot t_S \\
& + b_{12} \cdot T \cdot \text{Aniso} + b_{13} \cdot r \cdot \text{ratio} + b_{14} \cdot r \cdot t_S + b_{15} \cdot r \cdot \text{Aniso} \\
& + b_{16} \cdot \text{ratio} \cdot t_S + b_{17} \cdot \text{ratio} \cdot \text{Aniso} + b_{18} \cdot t_S \cdot \text{Aniso}
\end{aligned} \tag{8.5}$$

Im Falle der Regressionsgleichungen oberhalb der Glasübergangstemperatur ergibt sich mit den Verfahrensparametern eine Gleichung der Form:

$$\begin{aligned}
\text{Kennwert} = & c_0 + c_1 \cdot T + c_2 \cdot T^2 + c_3 \cdot r + c_4 \cdot r^2 + c_5 \cdot \text{ratio} + c_6 \cdot \text{ratio}^2 \\
& + c_7 \cdot t_K + c_8 \cdot t_K^2 + c_9 \cdot t_S + c_{10} \cdot t_H + c_{11} \cdot t_H^2 + c_{12} \cdot T \cdot r \\
& + c_{13} \cdot T \cdot \text{ratio} + c_{14} \cdot T \cdot t_K + c_{15} \cdot T \cdot t_S + c_{16} \cdot T \cdot t_H \\
& + c_{17} \cdot r \cdot \text{ratio} + c_{18} \cdot r \cdot t_K + c_{19} \cdot r \cdot t_S + c_{20} \cdot r \cdot t_H \\
& + c_{21} \cdot \text{ratio} \cdot t_K + c_{22} \cdot \text{ratio} \cdot t_S + c_{23} \cdot \text{ratio} \cdot t_H \\
& + c_{24} \cdot t_K \cdot t_S + c_{25} \cdot t_K \cdot t_H + c_{26} \cdot t_S \cdot t_H
\end{aligned} \tag{8.6}$$

Im Falle der Regressionsgleichungen für die entstehenden Verzerrungen bei der Kühlung des Bauteils ergibt sich eine Gleichung der Form:

$$\begin{aligned}
\text{Kennwert} = & c_0 + c_1 \cdot t_H + c_2 \cdot t_H^2 + c_3 \cdot t_{K-I} + c_4 \cdot T_{K-I}^2 + c_5 \cdot T_{K-II} \\
& + c_6 \cdot T_{K-II}^2 + c_7 \cdot r + c_8 \cdot r^2 + c_9 \cdot \text{Aniso} + c_{10} \cdot \text{ratio} \\
& + c_{11} \cdot \text{ratio}^2 + c_{12} \cdot t_H \cdot T_{K-I} + c_{13} \cdot t_H \cdot T_{K-II} + c_{14} \cdot t_H \cdot r \\
& + c_{15} \cdot t_H \cdot \text{Aniso} + c_{16} \cdot t_H \cdot \text{ratio} + c_{17} \cdot T_{K-I} \cdot T_{K-II} \\
& + c_{18} \cdot T_{K-I} \cdot r + c_{19} \cdot T_{K-I} \cdot \text{Aniso} + c_{20} \cdot T_{K-I} \cdot \text{ratio} \\
& + c_{21} \cdot T_{K-II} \cdot r + c_{22} \cdot T_{K-II} \cdot \text{Aniso} + c_{23} \cdot T_{K-II} \cdot \text{ratio} \\
& + c_{24} \cdot r \cdot \text{Aniso} + c_{25} \cdot r \cdot \text{ratio} + c_{26} \cdot \text{Aniso} \cdot \text{ratio}
\end{aligned} \tag{8.7}$$

### 8.1.1 Einhaltung der Maßhaltigkeit

Ausgehend von den erhaltenen Haupteffekten und Wechselwirkungen wurden zunächst die entscheidenden Faktoren zur Regressionsanalyse herangezogen. Im Falle der Umformung unterhalb der Glasübergangstemperatur kristallisiert sich an erster Stelle der Parameter Temperatur heraus, gefolgt von dem Parameter Radius und dem Radiusverhältnis. Die Wechselwirkungen zwischen diesen Parametern zeigen so gut wie keinen Einfluss auf die Rückfederung des Bauteils. Alle drei Parameter weisen einen quadratischen Effekt auf. Die lineare Regressionsanalyse lieferte ausgehend von den genannten Faktoren ein Bestimmtheitsmaß von 0,83,

was bereits in einem akzeptablen Bereich zur Vorhersage der Rückfederung liegt. Führt man in einem weiteren Schritt eine multiple nichtlineare Regression unter Betrachtung der Faktoren Temperatur, Radius und Radienverhältnis durch, so erreicht man bereits ein Bestimmtheitsmaß von 0,87. Unter Beachtung aller Faktoren und deren Wechselwirkungen erreicht man schließlich ein Bestimmtheitsmaß von 0,97 und damit ausgehend von den Verfahrensparametern eine sehr gute Vorhersage der Rückfederung. Die Abbildung 8.1 zeigt die mittels FEM erhaltenen Werte gegenüber der Prognose durch das Modell in Anbetracht aller Verfahrensparameter.

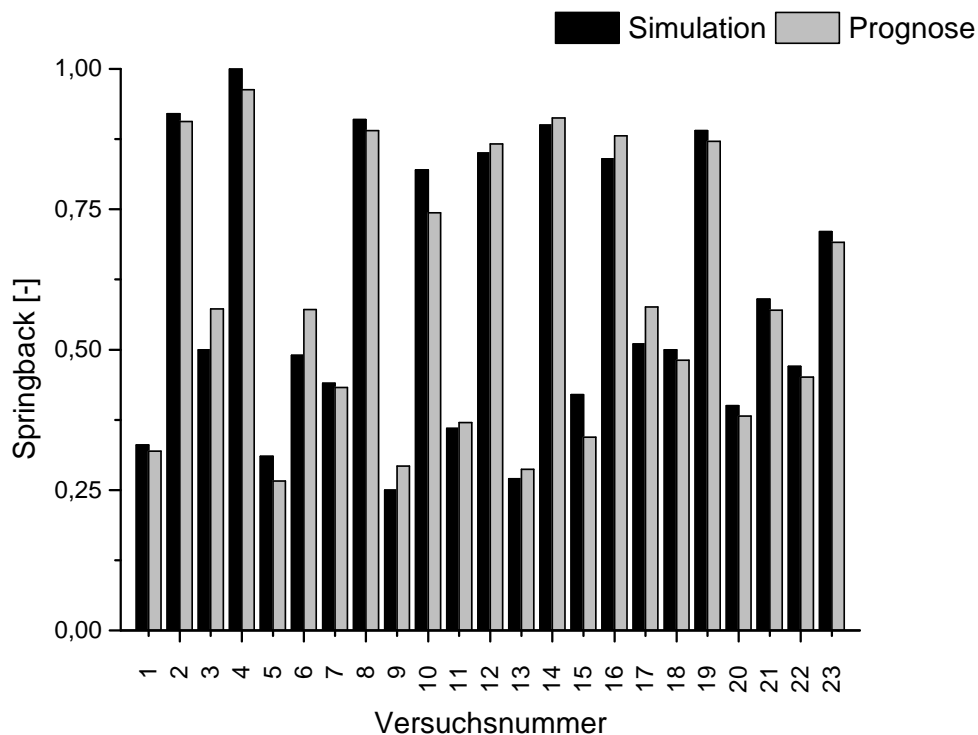


Abbildung 8.1: Simulation und Prognose der Rückfederung bei der Kriechumformung

Die Kennzahl  $a$  weist eine prozentuale Abweichung von 7% zu den Messwerten auf. Diese kann aufgrund der Flexibilität des Materials noch als akzeptable Abweichung angesehen werden. Die Koeffizienten der Regressionsgleichung unter Beachtung aller Faktoren finden sich im Anhang.

Bei der Umformung oberhalb der Glasübergangstemperatur lassen sich neben den Haupteffekten Temperatur, Radius, Radienverhältnis, Haltezeit und Schei-



benstärke zusätzlich Wechselwirkungen erkennen. Hierbei tritt ebenso der als Haupteffekt nicht wirkende Faktor Kühlzeit in Interaktion mit dem Radius und dem Radienverhältnis verstärkt hervor. Eine lineare Regressionsanalyse mit den benannten Faktoren würde ein Bestimmtheitsmaß von 0,39 erreichen, wohingegen eine multiple nichtlineare Regression bereits einen Wert von 0,76 erreicht. Bei Beachtung aller Faktoren lässt sich das Bestimmtheitsmaß weiter auf 0,83 steigern. Die resultierenden Koeffizienten sind in der Tabelle im Anhang aufgelistet. Abbildung 8.2 stellt die aus der Messung ermittelten Werte der Prognose durch das Modell gegenüber. Betrachtet man als weiteres Bewertungskriterium den

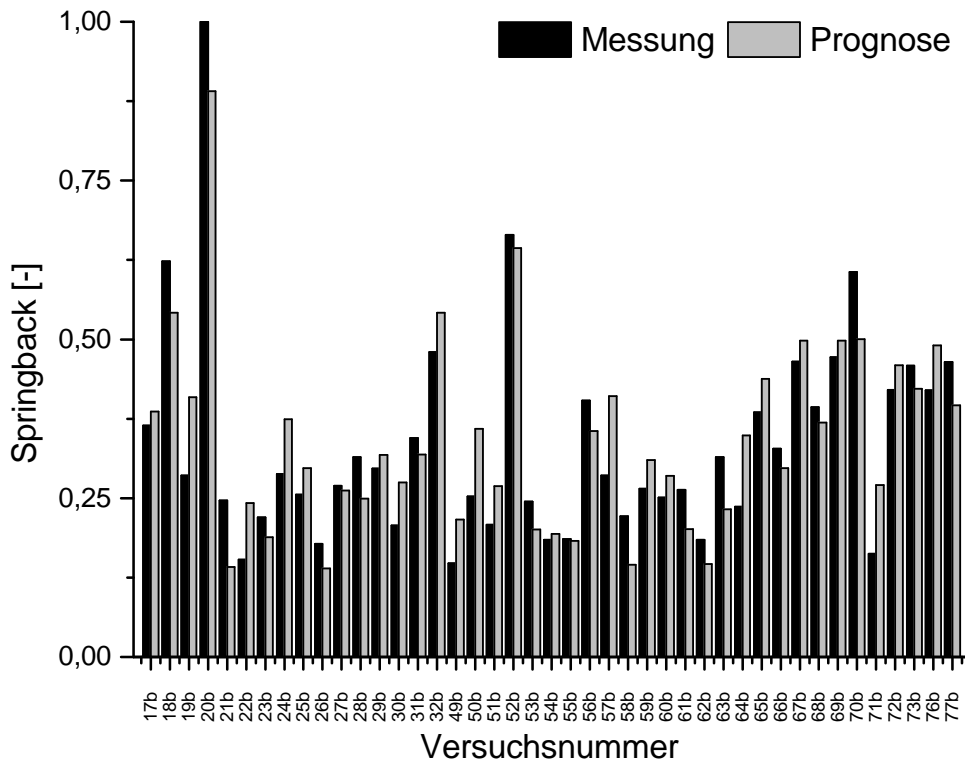


Abbildung 8.2: Messung und Prognose der Rückfederung bei der Umformung oberhalb der Glasübergangstemperatur

Faktor  $a$ , so liegt dieser bei 20%. Dies entspricht beinahe der 3-fachen Abweichung der Vorhersage gegenüber der Rückfederung unterhalb der Glasübergangstemperatur. Eine Vorhersage durch das Modell ist daher nur mit entsprechenden Toleranzklassen geeignet ( $\pm 7,2$  mm).

## 8.1.2 Einfluss auf die optische Qualität

### Transmission

Unterhalb der Glasübergangstemperatur wurden als dominierende Faktoren die Temperatur und die Scheibenstärke identifiziert. Unter Betrachtung der quadratischen Abhängigkeit des Faktors Temperatur konnte jedoch nur ein Bestimmtheitsmaß von 0,62 erreicht werden. Bei Durchführung einer multiplen Regression mit allen Faktoren ergibt sich ein Bestimmtheitsmaß von 0,95. Dies ermöglicht eine sehr gute Vorhersage der optischen Qualität hinsichtlich der Transmission des Bauteils mittels Hellfeld mit Muster. Abbildung 8.3 zeigt die Gegenüberstellung

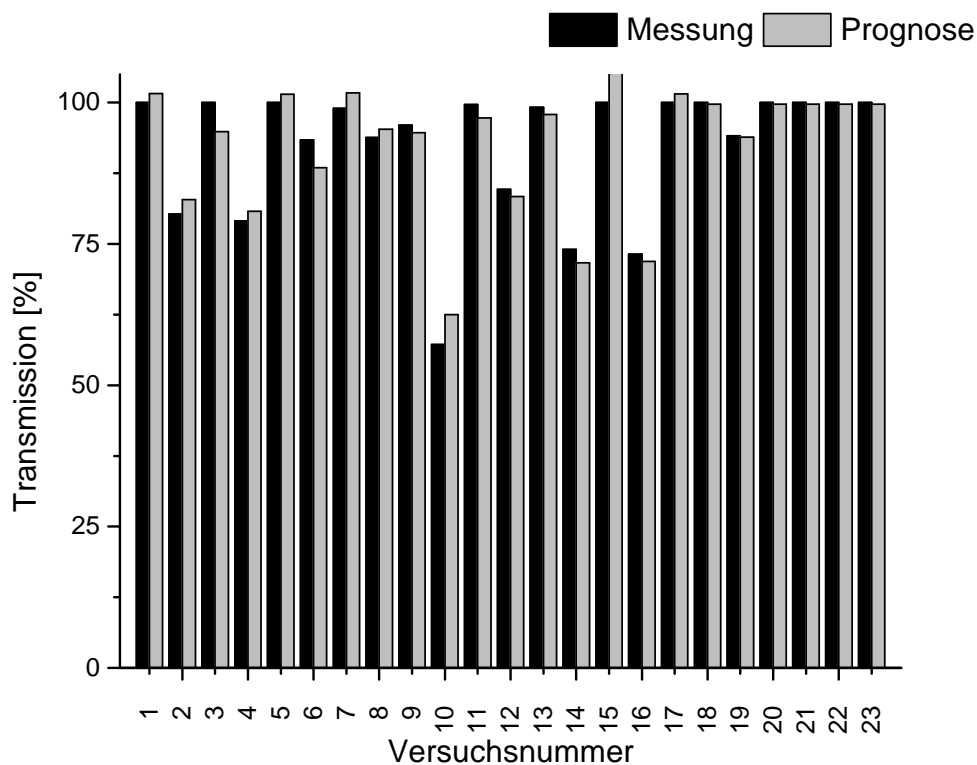


Abbildung 8.3: Messung und Prognose der Transmission im Hellfeld mit Muster bei der Umformung unterhalb der Glasübergangstemperatur

der durch die Messung ermittelten Werte mit den durch die Prognose vorhergesagten Werte. Der Faktor  $a$  liegt hier bei 3%, was einen äußerst zufriedenstellenden Wert darstellt. Das Bestimmtheitsmaß des Dunkelfeldes liegt mit 0,84 in einem deutlich niedrigeren Bereich. Betrachtet man jedoch die prozentuale Abweichung der Werte für das Dunkelfeld, so ergibt diese 2% und befindet sich daher in

einem niedrigeren Bereich als das Hellfeld mit Muster. Somit lässt sich trotz eines Bestimmtheitsmaßes von 0,84 eine sehr gute Vorhersage der Transmission erreichen.

Oberhalb der Glasübergangstemperatur kann neben den Faktoren Temperatur und Scheibenstärke, ebenso wie bei der Umformung unterhalb der Glasübergangstemperatur, zusätzlich der Faktor Haltezeit als Haupteffekt identifiziert werden. Signifikante Wechselwirkungen treten nur unter den benannten Haupteffekten auf. Mit Hilfe der multiplen Regression kann ein Bestimmtheitsmaß von 0,85 erreicht und somit eine gute Vorhersage der optischen Qualität mittels Hellfeld mit Muster getroffen werden. Das Bestimmtheitsmaß kann unter Beachtung aller Koeffizienten durch die nichtlineare multiple Regression weiter auf 0,94 gesteigert werden. Abbildung 8.4 stellt die prognostizierten Werte und die der Messreihe

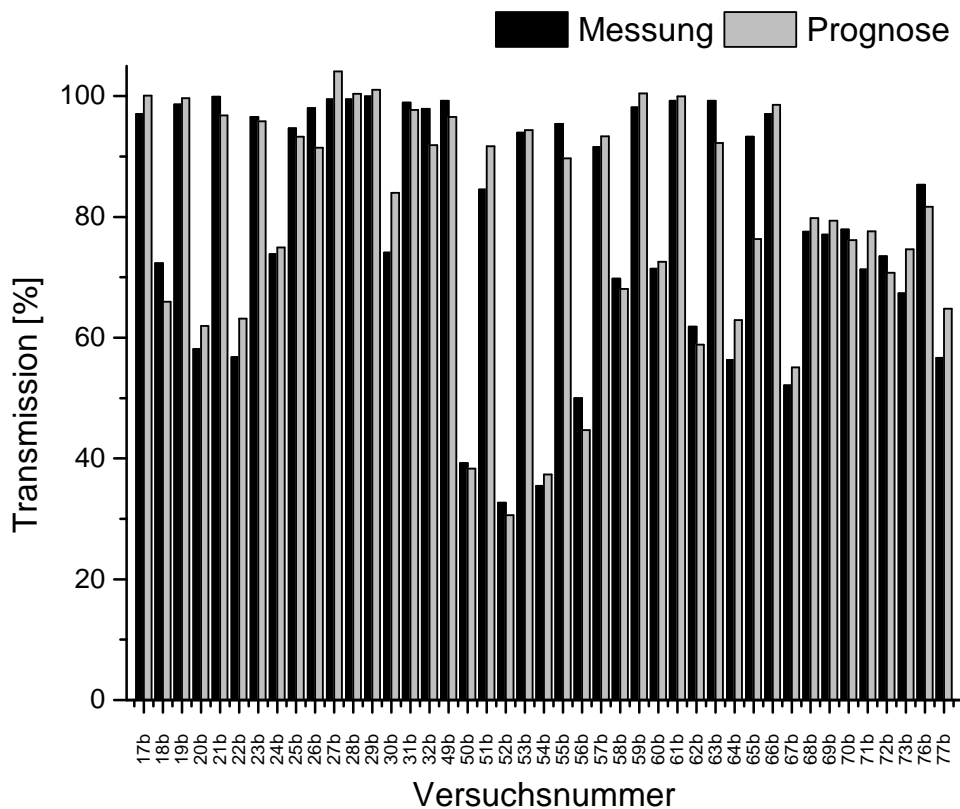


Abbildung 8.4: Messung und Prognose der Transmission im Hellfeld mit Muster bei Umformung oberhalb der Glasübergangstemperatur

einander gegenüber. Die Abweichung  $a$  beträgt hierbei 6% und liegt noch in einem annehmbaren Bereich. Somit kann eine ausreichend genaue Vorhersage der Trans-

mission des Bauteils im Hellfeld mit Muster getroffen werden. Bei der Vorhersage des Bauteils in Transmission mittels Dunkelfeld lässt sich nur ein Bestimmtheitsmaß von 0,78 erreichen. Die Abweichung liegt wiederum bei 6 %. Angesichts des niedrigen Bestimmtheitsmaßes erlaubt das Modell keine ausreichend große Vorhersagegenauigkeit, kann jedoch zur Abschätzung der Transmission verwendet werden.

### Verzerrungen

Die Umformung von Scheiben unterhalb der Glasübergangstemperatur lässt für die resultierenden Verzerrungen an erster Stelle den Faktor Radienverhältnis als die entscheidende Größe erkennen. Des Weiteren weisen die Faktoren Temperatur und Anisotropie nahezu einen gleich großen Effekt auf. Den geringsten Einfluss zeigt hierbei der Radius. Unter Beachtung aller Faktoren lässt sich mit Hilfe der multiplen nichtlinearen Regression ein Bestimmtheitsmaß von  $R^2=0,84$  erreichen (siehe Abbildung 8.5), womit es zur Vorhersage der resultierenden Verzerrungen

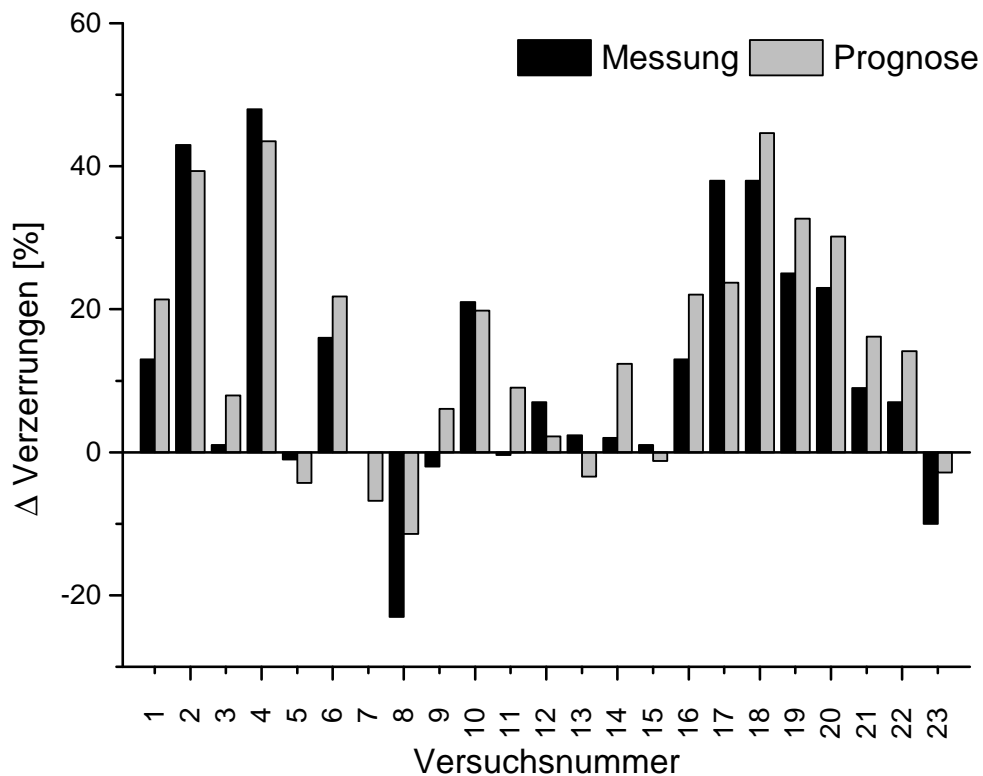


Abbildung 8.5: Messung und Prognose der Verzerrungen bei der Kriechumformung

geeignet wäre. Betrachtet man jedoch den Faktor  $a$ , so liegt dieser bei 64% und damit außerhalb des akzeptablen Bereichs. Das Modell kann bestenfalls eine Tendenz der resultierenden Verzerrungen wiedergeben.

Betrachtet man die resultierenden Verzerrungen bei Bauteilen, die oberhalb der Glasübergangstemperatur umgeformt wurden, so lassen sich die geometrischen Daten Radius und Radienverhältnis sowie die Kühlzeit vor der Umformung als Einflussgrößen erkennen. Bei den Wechselwirkungen treten zusätzlich die Faktoren Temperatur, Haltezeit und Scheibenstärke hervor. Als Ergebnis der multiplen Regression mit allen Einflussfaktoren und den ermittelten Koeffizienten aus der Tabelle im Anhang lässt sich ein Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 0,81$  erreichen (siehe Abbildung 8.6). Dieser Wert liegt noch in einem zufriedenstellenden Bereich

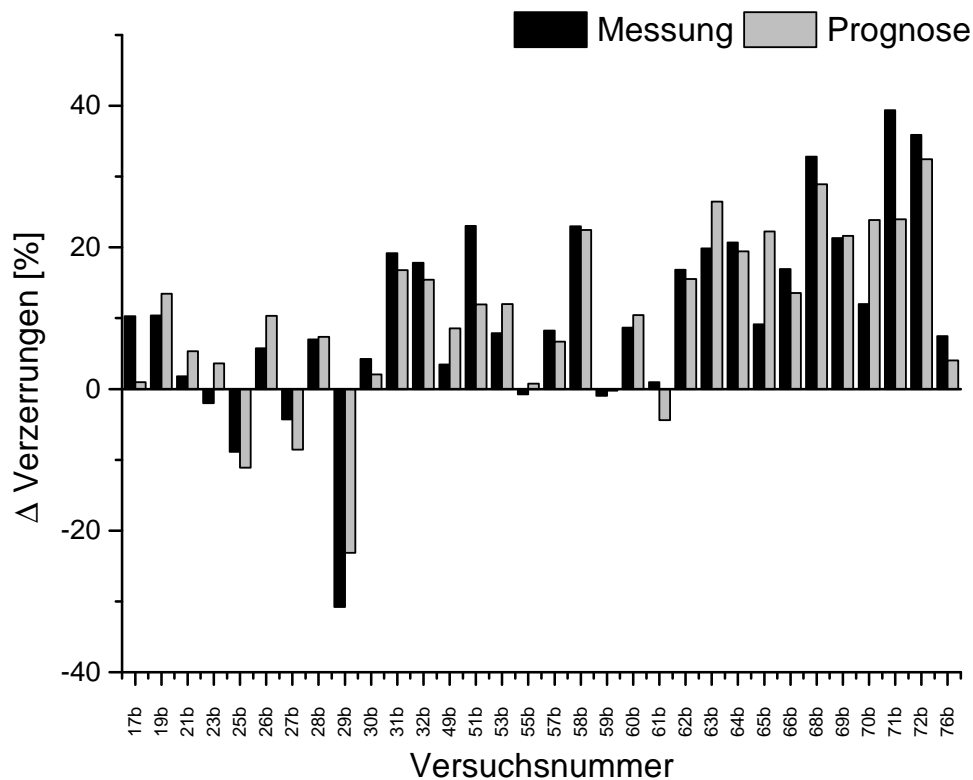


Abbildung 8.6: Messung und Prognose der resultierenden Verzerrungen bei der Umformung oberhalb der Glasübergangstemperatur

zur Vorhersage der Bauteilqualität. Betrachtet man nun wiederum den Faktor  $a$ , so liegt dieser mit 56% in einem sehr hohen Bereich und erlaubt bestenfalls die Aussage hinsichtlich einer Tendenz der resultierenden Verzerrungen.

Zur Abschätzung des Einflusses der Kühlung des Bauteils auf die resultierenden

Verzerrungen wurde eine gesonderte Untersuchung angestellt. Hier wurden die Parameter Radius und Radienverhältnis sowie die Abkühlgeschwindigkeit unterhalb der Glasübergangstemperatur als Faktoren identifiziert. Bei den Wechselwirkungen treten zusätzlich die Parameter Haltezeit und die Abkühlgeschwindigkeit bis zur Glasübergangstemperatur hervor. Die Regressionsanalyse konnte ein Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 0,63$  liefern. Dieser Wert liegt wiederum nicht in einem genügend großen Bereich zur Vorhersage. Des Weiteren liegt der Wert für  $a$  bei 164 %, was die resultierenden Verzerrungen weit unterschätzt bzw. überschätzt. Abbildung 8.7 verdeutlicht dies.

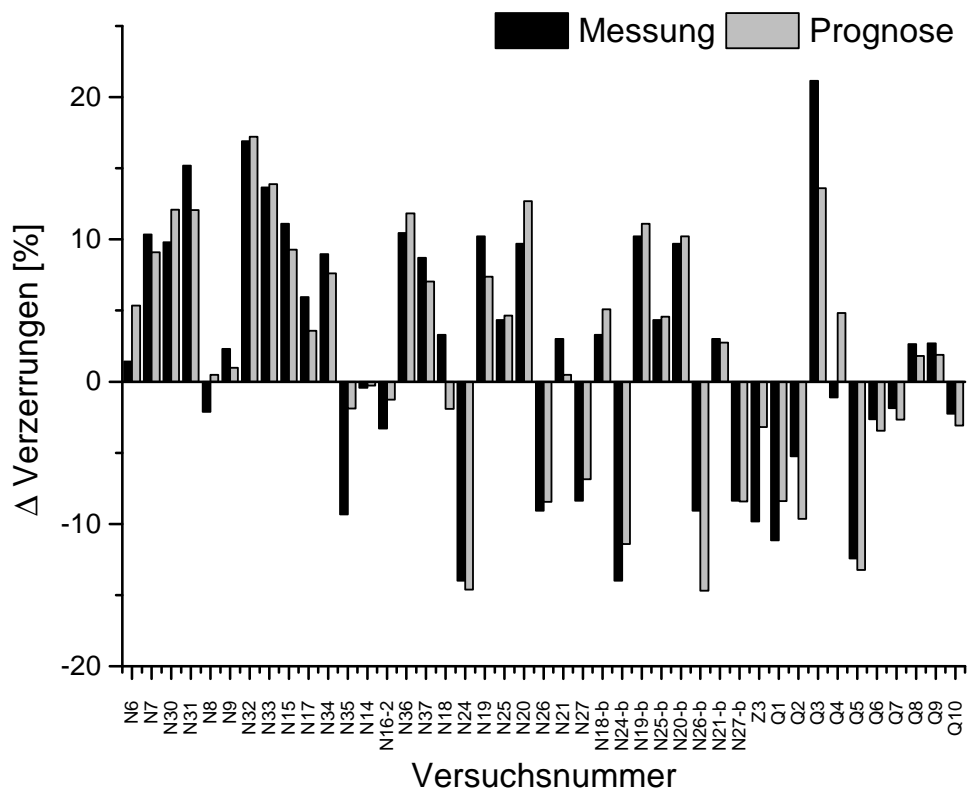


Abbildung 8.7: Messung und Prognose der resultierenden Verzerrungen bei der Kühlung des Bauteils

### 8.1.3 Gesamtbetrachtung

Die Zusammenstellung der erhaltenen Bestimmtheitsmaße sowie der Kennzahl  $a$  mit Hilfe der multiplen nichtlinearen Regression ist in Tabelle 8.2 zu finden.

Demnach weisen die Modelle für die Kriechumformung höhere Bestimmtheitsmaße und eine niedrigere Kennzahl  $a$  auf. Bei der Rückfederung unterhalb der Glasübergangstemperatur können 97 % der Messwerte durch das Modell erklärt werden. Die 3 % der Messwerte die sich nicht durch das Modell beschreiben lassen werden mit 7 % des Wertes unter- oder überschätzt. Das Modell besagt demnach, dass optisch hochwertige Scheibe durch Umformung unterhalb der Glasübergangstemperatur erreicht werden, wenn bei der Auswahl der Parameter eine Unterschreitung der Toleranzgrenze, welche für den jeweiligen Industriezweig und Anwendungsfall definiert werden muss, von 2 % im Dunkelfeld und 3 % im Hellfeld mit Muster erreicht wird. Im Hinblick auf die Verzerrungen lassen sich hier keine anwendbaren Modelle bilden. Die Werte können nicht durch das Modell erklärt werden.

	Zielgröße	$R^2$	$a$
$<T_g$	Rückfederung	0,97	7 %
	Dunkelfeld	0,84	2 %
	Hellfeld mit Muster	0,95	3 %
	Verzerrung	0,84	64 %
$>T_g$	Rückfederung	0,83	20 %
	Dunkelfeld	0,78	6 %
	Hellfeld mit Muster	0,94	6 %
	Verzerrung	0,81	56 %
	Verzerrung <sub>Kühlung</sub>	0,63	164 %

Tabelle 8.2: Bestimmtheitsmaß und Kennzahl  $a$  der unterschiedlichen Zielgrößen bei der multiplen nichtlinearen Regressionsanalyse

Generell betrachtet lassen sich die gewählten und untersuchten Verfahrensparameter in zwei Kategorien separieren. Die erste Klasse beinhaltet geometrische Randdaten, die sich auf der Grundlage des formflexiblen Werkzeugs ändern können und somit stets variabel bleiben. Diese Größen stellen die Scheibenstärke mit der Extrusionsrichtung, der Radius und das Radienverhältnis dar; sie können somit als Geometrieparameter bezeichnet werden. Die zweite Klasse betrachtet Einstellwerte der Anlage, was vor allem die Temperatur sowie die Halte- und Kühlzeit betrifft. Sie können als Anlagenparameter bezeichnet werden. Anhand der durchgeführten Untersuchungen kann bei übergeordneter Betrachtung aller Zielgrößen ein Optimum für die Anlagenparameter definiert werden. Als Optimum

stellte sich eine niedrige Umformtemperatur sowohl unterhalb als auch oberhalb der Glasübergangstemperatur heraus. Dadurch lassen sich eine hohe Transmission, eine geringe Rückfederung sowie ein geringer Differenzwert der Verzerrungen erreichen. Hier ergibt sich als allgemeine Einstellempfehlung der konstante Einstellwert der Temperatur bei 120 °C unterhalb der Glasübergangstemperatur sowie 144 °C oberhalb der Glasübergangstemperatur. Bei gegebener Umformtemperatur wurde ein Mittelwert der Messwerte gebildet. Die gegenübergestellten Werte sind in Tabelle 8.3 zusammengefasst.

	@ 120 °C	@ 144 °C	@ 144 °C; $t_k, t_H = 0$ s
<b>DF</b>	96,90 %	96,65 %	95,81 %
<b>PT</b>	99,31 %	96,65 %	98,24 %
<b>Verz.</b>	+ 2 %	+ 4 %	- 7 %
<b>Verz. Abw.</b>	4 %	12 %	15 %
<b>R<sup>2</sup></b>	0,97	0,83	0,83
<b>a</b>	7 %	20 %	20 %
<b>t<sub>P</sub></b>	3 h	1,17 h	1,17 h

*Tabelle 8.3: Gegenüberstellung beider Verfahren bei festem Einstellparameter Umformtemperatur*

Hierbei konnte für die Umformung oberhalb  $T_g$  eine mittlere Transmission im DF von 96,65 % erreicht werden. Die mittlere Transmission im PT beträgt ebenfalls 96,65 %. Im Gegensatz hierzu liefert die Umformung unterhalb der Glasübergangstemperatur eine mittlere Transmission im DF von 96,90 % und im PT ein mittlere Transmission von 99,31 %. Die Zunahme der Verzerrungen beträgt unterhalb der Glasübergangstemperatur 2 %. Im Vergleich hierzu steigt der Wert oberhalb der Glasübergangstemperatur um den Faktor 2 auf 4 %. Zur Betrachtung der Rückfederung sollen nicht die mittleren Werte einander gegenübergestellt werden, da eine Konturnachführung vorab zur Einhaltung der Maßhaltigkeit aufgrund der Formflexibilität möglich und somit eine annähernd 100 %ige Maßhaltigkeit erreichbar ist. Zur Konturnachführung ist jedoch die Notwendigkeit einer hohen Vorhersagewahrscheinlichkeit der Rückfederung des Bauteils notwendig. Daher werden die Bestimmtheitsmaße der Modelle einander gegenübergestellt. Bei der Umformung oberhalb der Glasübergangstemperatur beträgt es 0,83, während die Rückfederung bei der Formgebung unterhalb der Glasübergangstemperatur mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,97 vorhergesagt werden kann.



Bei weiterer Betrachtung der Anlagenparameter zeigt sich, dass oberhalb der Glasübergangstemperatur eine Haltezeit der Temperatur die Transmission sinken und die Verzerrungen steigen lässt. Die Einhaltung der Maßhaltigkeit wird hierdurch jedoch begünstigt. Gleiches ergibt sich für eine zusätzliche Kühlzeit. Dabei steigen ebenfalls die Verzerrungen und die Maßhaltigkeit mit der Dauer der Kühlzeit. Die Transmission bleibt jedoch bei einer zusätzlichen Kühlzeit nahezu gleich. Demgegenüber lässt sich erkennen, dass die Formgebung unterhalb der Glasübergangstemperatur im Hinblick auf das optische Qualitätsmerkmal Transmission und die Maßhaltigkeitsvorhersage die besseren Zielwerte erreicht. Betrachtet man jedoch die Prozesszeit, so nimmt die Umformung unterhalb der Glasübergangstemperatur 3 Stunden in Anspruch, während die Umformung oberhalb der Glasübergangstemperatur nur 1,17 Stunden beträgt. Damit ist der 2,5-fache Zeitfaktor erforderlich, um eine optisch höherwertige Scheibe im Hinblick auf die Transmission herzustellen. Betrachtet man die resultierenden Verzerrungen durch den Umformprozess, so zeigt sich, dass diese oberhalb der Glasübergangstemperatur durch den Umformprozess bei einer festen Kühl- und Haltezeit von 0 s im Mittel - 7 % betragen, während sie bei einer ausschließlich festen Umformtemperatur von 144 °C im Mittel + 4 % betragen. Insbesondere bei der Betrachtung der Verzerrungen soll zusätzlich die Standardabweichung aufgeführt werden. Diese liegt bei der Umformung unterhalb der Glasübergangstemperatur bei 4 %, während sie oberhalb der Glasübergangstemperatur 15 % beträgt und somit einen wesentlich größeren Streubereich aufweist.

Des Weiteren lässt sich erkennen, dass die Umformung unterhalb der Glasübergangstemperatur aufgrund der geringeren erforderlichen Kraft und der dadurch höheren erreichbaren optischen Qualität eher für die Umformung von dünnwandigen Bauteilen geeignet ist. Eine 5 mm starke Scheibe weist im Mittel eine optische Qualität im Hellfeld mit Muster von 93,19 %, im Dunkelfeld von 98,28 % auf. Im Gegensatz dazu zeigen 10 mm starke Scheiben im Mittel eine Transmission von 85,48 % für das Hellfeld mit Muster und von 95,17 % für das Dunkelfeld. Das Verfahren oberhalb der Glasübergangstemperatur eignet sich vor allem für dickwandige Bauteile, hier im Speziellen 10 mm, da die Halogenstrahler das Material im Gegensatz zu dünnwandigeren Bauteilen, hier im Speziellen 5 mm, nicht vollständig durchdringen können und somit die Kontaktseite kälter gehalten wird. Die mittlere Transmission für Bauteile der Materialstärke von 5 mm beträgt im Hellfeld mit Muster 76,97 % und im Dunkelfeld 85,23 %. Hingegen kann für Bauteile der Stärke 10 mm eine mittlere Transmission von 88,12 % im Hellfeld mit Muster

und im Dunkelfeld von 96,74 % erreicht werden. Die Werte sind in Tabelle 8.4 dargestellt.

	Transmission $<T_g$		Transmission $>T_g$	
	5 mm	10 mm	5 mm	10 mm
<b>DF</b>	98,28 %	95,17 %	85,23 %	96,74 %
<b>PT</b>	93,19 %	85,48, %	76,97 %	88,12 %

*Tabelle 8.4: Mittlere Transmissionswerte unter Beachtung der Scheibenstärke*

Die aufgezeigten Ergebnisse wurden durch die Formgebung eines Scheibenausschnittes mit der in Kapitel 5.3 beschriebenen Umformanlage realisiert. Die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf größere Scheibenflächen ist durch die symmetrischen Bedingungen gegeben. Mit Hilfe der Versuchsanlage wurden die Randbereiche im Hinblick auf Temperierung sowie die Maximalspannungen, welche auch bei größeren Scheibenabmessungen in gleichem Maße gegeben sind, untersucht. Durch die Vergrößerung der Versuchsanlage treten keine zusätzlichen Effekte auf. Eine Übertragbarkeit ist somit gewährleistet. Im Hinblick auf die Übertragbarkeit der Ergebnisse zu dem verwendeten Werkzeug auf konventionelle Formen ist eine Abweichung im Hinblick auf die Transmission unterhalb der Glasübergangstemperatur zu erwarten, da die Abdrücke ganzflächig auftreten. Die Tendenz bleibt jedoch erhalten. Oberhalb der Glasübergangstemperatur kann eine Übertragung der Ergebnisse als Ganzes erfolgen, da aufgrund der Erweichung des Materials die Kontaktfläche der Interpolationsschicht signifikant für die Transmission ist.

Die gewonnen Erkenntnisse insbesondere im Hinblick auf die Kriechumformung sind, wie bereits in Kapitel 2.2.2 beschrieben, von herstellungsbedingten Faktoren abhängig. So mindert bspw. ein höheres Molekulargewicht die Kriechneigung, während Eigenspannungen das Festigkeitsverhalten des Materials zumeist stark reduzieren und somit zu einer höheren Kriechneigung führen kann. Ebenso beeinflussen wiederum unterschiedliche Materialstärken den Eigenspannungshaushalt des Halbzeugs. Dies führt dazu, dass im Falle einer geringeren Kriechneigung die Rückfederung steigt, im Falle einer höheren Kriechneigung die Rückfederung sinkt.

## 8.2 Wirtschaftliche Bewertung des formflexiblen Verfahrens

Bei der Bewertung der Wirtschaftlichkeit wird der konventionelle Formgebungsprozess, welcher bei kleinen und mittelständischen Unternehmen derzeit zur Anwendung kommt, dem in dieser Arbeit entwickelten Verfahren gegenübergestellt.

Zur Betrachtung der Wirtschaftlichkeit dient die von Zangenmeister eingeführte Nutzwertanalyse (ZANGENMEISTER 2000). Hierfür wurden vier unterschiedliche Szenarien (S) betrachtet, die wiederum in Abhängigkeit von der Losgröße in vier Anwendungsvarianten (AV) unterteilt sind. Die vier Szenarien beinhalten das formflexible Werkzeugsystem (ffW) für die Umformung unterhalb der Glasübergangstemperatur (S1) sowie oberhalb der Glasübergangstemperatur (S2). S3 und S4 betrachten den konventionellen Werkzeugbau, wobei in S3 die Umformung bei 144 °C mittels eines Positiv-Negativ-Werkzeugs aus Aluminium im Ofen erfolgt. Das Szenario S4 betrachtet die Umformung außerhalb des Ofens auf einem Holzwerkzeug bei einer Umformtemperatur von 175 °C. Betrachtet werden Losgrößen (LG) bis zu einer maximalen Stückzahl von 1000, die folgendermaßen gestaffelt sind: 1, 10, 100, 1000 (siehe Tabelle 8.5).

	AV1-LG 1	AV2-LG 10	AV3-LG 100	AV4-LG 1000
<b>S1</b>	formflexibles Werkzeug, Formgebung unterhalb Tg			
<b>S2</b>	formflexibles Werkzeug, Formgebung oberhalb Tg			
<b>S3</b>	konventionelles Aluminiumwerkzeug			
<b>S4</b>	konventionelles Holzwerkzeug			

Tabelle 8.5: Gewählte Szenarien zur Betrachtung der Wirtschaftlichkeit des formflexiblen Werkzeugs

Alle Szenarien werden getrennt hinsichtlich „Kosten“, „Zeit“ und „Qualität“ bewertet. Nach BULLINGER et al. (2003) ist eine gleichzeitige Optimierung dieser drei Kriterien nicht möglich, da es sich um gegenläufige Zielgrößen handelt. Bei Maximierung des Erfüllungsgrades einer Zielgröße verschlechtert sich automatisch der Erfüllungsgrad einer anderen Zielgröße. Hier wurden die von HAGEMANN (2008) in der Kategorie „Kosten“ verwendeten Unterkategorien „Herstellkosten“ und „Mehrkosten bei Änderungen“ gewählt, die sich ebenfalls auf den betrachteten

Thermoformprozess übertragen lassen. Bei der Kategorie „Zeit“ werden ebenso die Unterkategorien „Herstellzeit“, „Prozesszeit“ und „Zeitaufwand bei Änderungen“ übernommen. Lediglich die Unterkategorie „Nachbearbeitungszeit“ kommt beim Thermoformen nicht zum Tragen bzw. ergibt sich gleichermaßen für den formflexiblen Ansatz wie für den konventionellen Werkzeugbau. In der Kategorie „Qualität“ finden sich die Unterkategorien „Transmission DF“, „Transmission PT“, „Verzerrungen“ und „Maßhaltigkeit“. Die Maßhaltigkeit wird hier wiederum durch die Rückfederung des Bauteils angegeben. Hierbei wurde ein Referenzbauteil, das nach den beiden konventionellen Verfahren gefertigt wurde, der Qualitätsprüfung unterzogen. Dazu wurde eine Scheibe der Stärke von 10 mm mit einem Radius von 3546 mm und einem Radienverhältnis von 1:0 hergestellt. Gleichermaßen wurden unter Verwendung der gegebenen Geometrie entsprechende Scheiben auf dem formflexiblen Werkzeug unter Verwendung der optimalen Prozessparameter hergestellt. Die Präferenzmatrix zur objektiven Bewertung findet sich in Abbildung 8.8. Mit Hilfe dieser Präferenzmatrix kann eine objektive Gewichtung der

**Bewertungsklasse "Kosten"**

	a   b			
Herstellkosten	a	a	1	Präferenzen
Mehrkosten	b	0	0	Schlüssel
	0	0		Gewichtung
				Summe:
				3

**Bewertungsklasse "Zeit"**

	a   b   c				
Werkzeugherstellzeit	a	a	a	2	Präferenzen
Zeitaufwand bei Änderungen	b	0	c	0	Schlüssel
Prozesszykluszeit	c	0	0	1	Gewichtung
	0	0	0		Summe:
					7

**Bewertungsklasse "Qualität"**

	a   b   c   d					
Transmission DF	a	a	a	a	3	Präferenzen
Transmission PT	b	0	b	b	2	Schlüssel
Verzerrungen	c	0	0	c	1	Gewichtung
Maßhaltigkeit	d	0	0	0	0	Summe:
	0	0	0	0		13

Abbildung 8.8: Präferenzmatrizen der drei Bewertungsklassen

Unterkategorien erfolgen. Näheres hierzu kann HAGEMANN (2008) entnommen werden.

Der Punktwert (0-1), der sich aus dem höchsten und niedrigsten Wert für die Klasse ergibt, wird mit der Gewichtung multipliziert und führt somit zu einem gewichteten Punktwert. Hierfür ist beispielhaft der qualitative Vergleich der Scheiben in Tabelle 8.6 dargestellt. Alle weiteren Bewertungsformblätter sind Kapitel 11.5 im Anhang zu entnehmen.

<i>Bewertungsklasse „Qualität“</i>						
	<b>Kenn- größe</b>	<b>Wert</b>	<b>Punktwert</b>	<b>Gewichtung</b>	<b>gew. Punktw.</b>	<b>Summe</b>
<b>S1</b>	DF	99,9581	0,8948	0,4615	0,4130	<b>0,8855</b>
	PT	99,9996	1,0000	0,3077	0,3077	
	Verz.	36,0264	1,0000	0,1538	0,1538	
	Rückf.	0,44	0,1429	0,0769	0,0110	
<b>S2</b>	DF	99,9675	1,0000	0,4615	0,4615	<b>0,8427</b>
	PT	99,9738	0,9943	0,3077	0,3060	
	Verz.	42,5676	0,2322	0,1538	0,0357	
	Rückf.	0,31	0,5143	0,0769	0,0395	
<b>S3</b>	DF	99,9148	0,4078	0,4615	0,1882	<b>0,6029</b>
	PT	99,9698	0,9934	0,3077	0,3057	
	Verz.	42,7663	0,2089	0,1538	0,0321	
	Rückf.	0,14	1,0000	0,0769	0,0769	
<b>S4</b>	DF	99,8784	0,0000	0,4615	0,0000	<b>0,0000</b>
	PT	95,4500	0,0000	0,3077	0,0000	
	Verz.	44,5461	0,0000	0,1538	0,0000	
	Rückf.	0,49	0,0000	0,0769	0,0000	

*Tabelle 8.6: Bewertungsformblatt für die Bewertungsklasse „Qualität“*

Es ist zu erkennen, dass die Umformung auf dem formflexiblen Werkzeug sowohl unterhalb als auch oberhalb der Glasübergangstemperatur das konventionelle Verfahren im Hinblick auf die Qualität insgesamt übertrifft. Betrachtet man hierbei die Untersuchung mittels DF so liegen die Werte der untersuchten Scheiben in einem Bereich von mehr als 99% Transmission. Die Betrachtung des PT liefert hierbei für das formflexible Verfahren sowie die auf einem Aluminiumwerkzeug umgeformte Scheibe ebenfalls Werte von über 99% Transmission. Lediglich die

Scheibe, welche auf einer Holzform bei 176 C° umgeformt wurde, weist schlechtere Werte auf. Dies ist bedingt durch die höhere Temperatur bei der Formgebung. Bei der Gegenüberstellung der Verzerrungen des Absolutwertes ergibt sich eine niedrigere Verzerrung für die Umformung unterhalb der Glasübergangstemperatur. Dies ist zum einen durch die große Streubreite bei der Umformung oberhalb der Glasübergangstemperatur im Hinblick auf die Verzerrungen, zum anderen durch die Chargenabhängigkeit begründet. Im Mittel können die Verzerrungen im Ausgangsmaterial zwischen 20 % und 40 % variieren, was eine Vorauswahl des Halbzeuges bei optisch hochwertigen Verglasungsmaterialien erfordert.

Ausgehend von unterschiedlichen Analysegruppen, die sich durch die Losgrößen voneinander abgrenzen, können nun Rangfolgen in Anbetracht unterschiedlicher Kriterien erstellt werden. Die Tabellen zur Rangfolge der einzelnen Bewertungsklassen sowie zu deren Gesamtrangfolge finden sich in Kapitel 11.6 im Anhang. Mit Hilfe der ausgewerteten Rangfolgen lässt sich nun eine Anwendungsmatrix erstellen, die dem Hersteller eine Entscheidungshilfe zur Auswahl des wirtschaftlichsten Verfahrens (siehe Tabelle 8.7) an die Hand gibt. Hieraus ist deutlich zu

		K x K	Z x Z	Q x Q	K x Z	K x Q	Z x Q	G
		<b>Bewertungsklasse</b>						
1	<b>Stückzahl</b>	S2	S2	S1	S2	S1/S2	S1/S2	S2
10		S2	S2	S1	S2	S1/S2	S1/S2	S2
100		S4	S2	S1	S2/S4	S1/S2	S1/S2/S3/S4	S2
1000		S4	S2	S1	S2/S4	S1/S2	S1/S2/S3/S4	S2

Tabelle 8.7: Anwendungsmatrix als Entscheidungshilfe

erkennen, dass bei den Kosten ein formflexibles Werkzeug bis zu einer Stückzahl von 100 Stück einen wirtschaftlichen Vorteil bringt. In Abbildung 8.9 ist der Schnittpunkt hinsichtlich der Werkzeugkosten aufgetragen.

Für das formflexible Werkzeug wurde der Maschinenstundensatz ohne Personalkosten zugrunde gelegt. Die Kosten beinhalten die Anschaffungs- und Wartungskosten über 5 Jahre bei 70 % Auslastung der Anlage. Die Auflistung der Kosten befindet sich im Anhang. Der Schnittpunkt ergibt sich demnach je nach Verfahrensvariante zwischen 50 und 60 Stück. Bei größeren Stückzahlen ist dem konventionellen Formenbau der Vorzug zu geben. Betrachtet man jedoch das formflexible Werkzeug unter den beiden Kriterien Kosten und Zeit, so bildet sich ein wirtschaftlicher Vorteil sogar bis zu Stückzahlen von 1000 heraus.

Zusätzlich zu den aufgezeigten Überlegungen soll die Amortisation der Anlage abgeschätzt werden. Hierzu wird von Anlagenkosten von 371.500 € ausgegangen. Diese sind in Bezug auf die Stromkosten für eine 70%ige Auslastung ausgelegt, die durch die Heizmatten und die Einstellung des formflexiblen Werkzeugs anfallen. Bei der Fertigung unterhalb der Glasübergangstemperatur kann maximal eine Fertigung von zwei Stück pro Tag erfolgen. Betrachtet man eine Amortisationszeit von 5 Jahren bzw. von 2,5 Jahren bei einem 2-Schicht-Betrieb, müssten im Jahr 8 bzw. 16 Varianten umgeformt werden, um die Investitionskosten zu decken. Eine Betrachtung der Zeitersparnis entfällt jedoch. Eine Amortisation der Anlage würde demzufolge innerhalb eines Jahres ab 40 Varianten gegeben sein.

Betrachtet man die Möglichkeit einer parallelen Fertigung beim konventionellen Formenbau durch die Verwendung zweier gleicher Formen, die bei der Verwendung des formflexiblen Werkzeugs nicht gegeben ist, so steigen beispielsweise die Werkzeugkosten bei sinkender Prozesszeit. Betrachtet man die Fertigung auf einer Holzform, die eine Herstellzeit von 35 Stunden bei einer Prozesszeit von 3,08 Stunden erfordert, so würde ein zeitlicher Gewinn nur durch die parallele Fertigung von 46 Bauteilen erreicht werden. Die daraus resultierenden Kosten führen zu einer Verschiebung des Schnittpunktes der Kosten, und das formflexible Werkzeug würde sich bis zu einer Stückzahl von 100 Stück als rentabel erweisen.

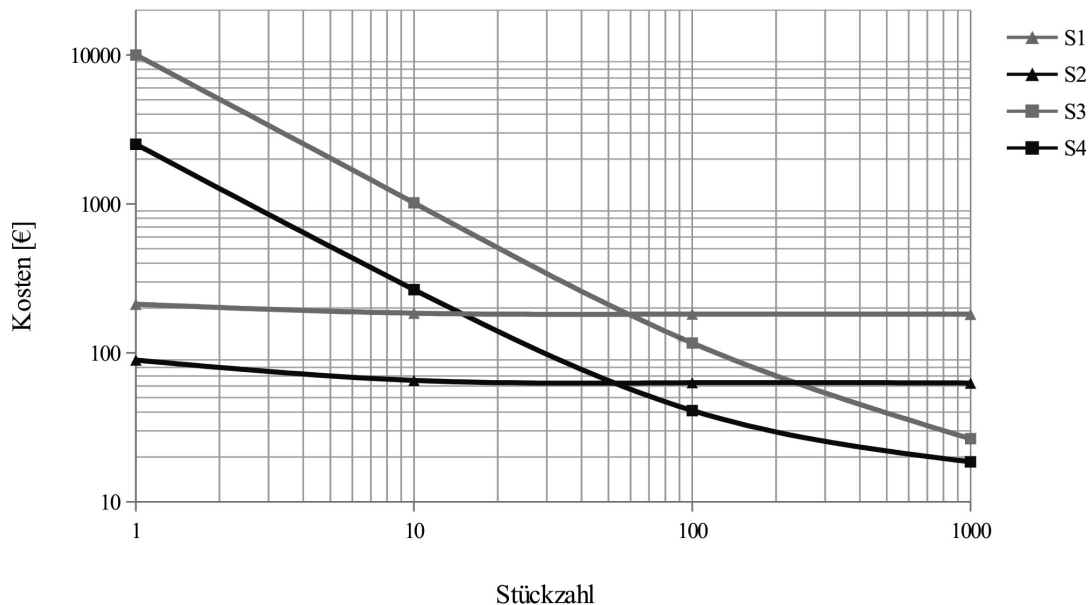


Abbildung 8.9: Schnittpunkte der gewählten Szenarien





## 9 Schlussbetrachtung

### 9.1 Zusammenfassung

Polycarbonat ist aufgrund seines Leichtbaupotentials bereits auf dem Vormarsch als Verglasungsmaterial für Kfz-Scheiben (MANFRÉ et al. 2007). Dabei werden zurzeit bereits die hinteren Seitenscheiben in der Serie aus Polycarbonat gefertigt. Langfristig gesehen wird sich wohl der Einsatz von Polycarbonat auch als Verglasungsmaterial für die vorderen Seitenscheiben durchsetzen. Ein Grundkriterium hierfür stellt unter anderem die Weiterentwicklung von Beschichtungen zur Erhöhung der Kratzfestigkeit für das Material dar. Des Weiteren ist die UV-Beständigkeit im Vergleich zu Glas als kritisch zu bewerten. Dennoch wird das Schiebedach des Smart4Two bereits aus diesem Material gefertigt (KLEMM 2004). Eine weitere Anwendung betrifft derzeit ebenso Forstfahrzeuge, bei denen die Sicherheit im Vordergrund steht, die nur durch ein nicht splitterndes Bruchbild der Scheibe zu gewährleisten ist. Somit ist eine Anwendung von Polycarbonat in allen Fahrzeugverglasungen, bei denen die Sicherheit oberste Priorität hat, sinnvoll. Eine weitere Einsatzmöglichkeit von Polycarbonat stellt die Architektur und hier insbesondere der Stadienbau dar. Ebenso wird der Werkstoff im Bereich der abbildenden Optik eingesetzt. Hierbei besteht jedoch trotz Material- und Prozessverbesserung derzeit nur im Bereich niedriger und mittlerer Qualitätsanforderungen bei mittleren und hohen Stückzahlen ein Substitutionspotential gegenüber Glaskomponenten (MICHAELI et al. 2007).

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein formflexibles Werkzeug für die Umformung von Polycarbonatscheiben entwickelt. Die Entwicklung richtete sich vor dem Hintergrund des Einsatzbereichs im Automobilbau auf das Qualitätskriterium „optisch hochwertig“ aus. Entsprechend galt es, unter Beachtung der formflexiblen Stempelmatrix adaptiv Heizungs- und Lasteinleitungsmethoden auszuwählen und umzusetzen. Dazu erfolgte die Untersuchung zweier Ansätze zur Umformung von PC. Zum einen wurden Scheiben unterhalb der Glasübergangstemperatur durch Kriechumformung hergestellt, zum anderen wurden Scheiben oberhalb der Glasübergangstemperatur in Anlehnung an das konventionelle Thermoformen gefertigt.

Zur Prüfung der optischen Qualität wurde ein Verfahren zur Kenntlichmachung optischer Störstellen in thermogeformten Polycarbonatscheiben entwickelt. Hierbei

konnte mit Hilfe von Referenzscheiben eine Toleranzklasse für optisch hochwertige Bauteile festgelegt werden. Durch das entwickelte Verfahren ließ sich der Einfluss der Prozessparameter auf die optische Qualität des Bauteils untersuchen. Die Umformtemperatur erwies sich bei Betrachtung aller Qualitätskriterien (Maßhaltigkeit, Transmission, Verzerrungen) als gewichtigster Parameter. Der optimale Einstellbereich der Temperatur liegt sowohl oberhalb als auch unterhalb der Glasübergangstemperatur stets bei einer niedrigen Umformtemperatur. Des Weiteren konnte der Einfluss der variierenden Parameter (Scheibenstärke, Radius und Radienverhältnis) aufgezeigt werden. Hierdurch lässt sich eine Vorhersage der Bauteilqualität treffen.

Unterhalb der Glasübergangstemperatur konnten Scheiben mit der höchsten optischen Güte im Hinblick auf die Transmission hergestellt werden. Zudem gelang mittels eines entwickelten Modells eine Bestimmung der Rückfederung innerhalb eines akzeptablen Toleranzbereichs wodurch ein zeitintensiver Rechenaufwand vermieden werden kann. Bei der Rückfederung unterhalb der Glasübergangstemperatur können 97 % der Messwerte durch das Modell erklärt werden. Die 3 % der Messwerte die sich nicht durch das Modell beschreiben lassen werden mit 7 % des Wertes unter- oder überschätzt. Oberhalb der Glasübergangstemperatur ließen sich ebenfalls Scheiben mit einem ausreichenden Qualitätsstandard herstellen. Die Transmissionswerte lagen im Mittel geringfügig unter den Scheiben, die unterhalb der Glasübergangstemperatur umgeformt wurden. Die Verzerrungen lagen im Mittel deutlich niedriger, wiesen jedoch eine weitaus höhere Streubreite auf. Oberhalb der Glasübergangstemperatur konnte für die Vorhersage der Rückfederung zudem nur ein Bestimmtheitsmaß von 0,83 erreicht werden, wobei die Werte, welche nicht durch das Modell erklärt werden können, mit 20 % über- bzw. unterschätzt werden. Unter der alleinigen Betrachtung der Scheibenstärke kann hingegen konstatiert werden, dass sich bei Scheiben der Stärke 10 mm durch die Umformung oberhalb der Glasübergangstemperatur im Mittel eine höhere optische Qualität in Transmission erreichen lässt. Dadurch stellt die Umformung oberhalb der Glasübergangstemperatur das favorisierte Verfahren bei dickwandigen Bauteilen dar. Die Prozesszeit verringert sich um den Faktor 2,5 im Vergleich zur Kriechumformung. Des Weiteren erwies sich die Temperierung bei der Abkühlung als zielführend zur Reduzierung von Verzerrungen, insbesondere im Hinblick auf asymmetrische 3D-Krümmungen.

Das in der vorliegenden Arbeit erarbeitete formflexible Verfahren zur Umformung von Polycarbonatscheiben ermöglicht eine schnelle und kostengünstige Herstellung

durch die freie Variation der Form. Das wiederverwendbare Werkzeug ist vor allem für die Herstellung von Prototypen geeignet. Zudem kann es auch, wie in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung aufgezeigt wurde, für den Einsatz von Kleinserien bis zu etwa 50 Stück verwendet werden. Dies entspricht der aktuellen Marktsituation, die einen eindeutigen Trend in Richtung individualisierte Produkte aufzeigt und somit zu stetig sinkenden Losgrößen führt.

### 9.2 Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde die Möglichkeit einer kostengünstigen Fertigung von Prototypen bis hin zu Kleinserien mit Hilfe eines formflexiblen Werkzeugs nachgewiesen. Untersuchungen zeigten die umsetzbare Fertigung von optisch hochwertigen Formteilen, welche die Fertigung nach dem konventionellen Verfahren sogar übertrafen. Das Verfahren kann durch Hochskalierung der Umformfläche als industrietauglich betrachtet werden. Die optische Qualitätskontrolle ist für eine Automatisierung, wie bereits in Kapitel 6.1.3 beschrieben, im Hinblick auf die Differenzierung von Einzelfehlern mit einem hohen Anteil an der Gesamtfehlerfläche zu erweitern. Die entwickelten Modelle beziehen sich auf Radien im Bereich zwischen 1906 mm und 960 mm. Um den flexiblen Einsatz des Werkzeugs zu erweitern, muss die Übertragbarkeit auf kleinere Radien überprüft und entsprechend angepasst werden. Die Formgebung von kleineren Radien erfordert eine erneute Betrachtung des Spannungshaushaltes im Formteil und eine daraus eventuell resultierende mehrstufige Prozessgestaltung. Würden im ersten Lastschritt die maximal zulässigen Spannungen im Bauteil überschritten werden und zu einem Versagen führen, so müsste der Prozess in mehrere Teilschritte aufgliedert werden. Die daraus resultierende zusätzliche Prozesszeit muss wiederum bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des Systems beachtet werden. Die derzeit manuelle Korrektur der Eindringtiefe im Hinblick auf die Höhenkorrektur sollte in einen durchgängigen Arbeitsablauf integriert werden. Die Automatisierung des Arbeitsablaufes würde zusätzlich eine Korrekturrechnung zur Beachtung der Rückfederung vorsehen. Der grundlegende zu automatisierende Arbeitsablauf ist in Abbildung 9.1 dargestellt. Diese Weiterentwicklung und Umsetzung stellt einen Gegenstand zukünftiger Arbeiten dar.

Wie bereits in Kapitel 7.1.2 dargelegt, ist die Lage der Extrusionsrichtung für die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse ein entscheidendes Kriterium. Das automa-

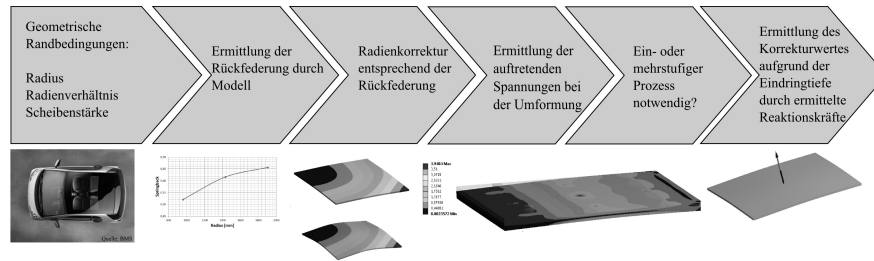


Abbildung 9.1: Ablaufschema zur Prozessautomatisierung bei der Kriechumformung

tisierte Einlegen der Platten ist somit für die Prozesssicherheit von Bedeutung. Alternativ wäre ein Tempern der Platten zum Abbau der vorhandenen Orientierungen möglich. Dies würde jedoch zu hohe Energiekosten verursachen und wäre somit nicht wirtschaftlich. Die vorliegende Arbeit untersucht dabei nicht die Lebensdauer der Interpolationsschicht. Diese hängt unter anderem von der Herstellung und den damit eingebrachten Luftblasen, der umgeformten Plattenstärke, den Scheibengeometrien und der Auslastung der Anlage ab. Dieser Aspekt bildet einen weiteren Punkt, der in die Wirtschaftlichkeitsbewertung aufgenommen werden muss.

Im Allgemeinen bietet sich das Verfahren der Kriechumformung für alle amorphen und teilkristallinen Kunststoffe an. Notwendig ist für die Umsetzung die Kenntnis des mechanischen Verhaltens des jeweiligen Kunststoffs. In den meisten Fällen wird jedoch die Qualität der Oberfläche nicht von entscheidender Bedeutung sein, so dass das Verfahren unterhalb der Glasübergangstemperatur zu zeitintensiv ist. Für das Verfahren wäre auch die Umformung von Aluminiumblechen in Anlehnung an HO et al. (2004) denkbar, denn die notwendige Temperatur liegt bei  $150^{\circ}\text{C}$ . Da jedoch die notwendigen Umformkräfte um den Faktor zehn höher sind, ist hier bereits bei der Anlagenauslegung und der Stempelklemmung mit höheren Klemmkraften zu rechnen. Daher ist abschließend zu sagen, dass eine standardisierte formflexible Anlage niemals alle Einsatzbereiche abdecken kann. Die Entwicklung der Anlage muss für den jeweiligen Einsatzzweck stets individuell und vom Produktspektrum des Anwenders aus betrachtet entwickelt werden.

## 10 Literaturverzeichnis

ABELE & REINHART 2011

Abele, E.; Reinhart, G.: Zukunft der Produktion. 1. Aufl.. München: Carl Hanser 2011. ISBN: 978-3446425958.

AZDAST et al. 2013

Azdast, T.; Doniavi, A.; Ahmadi, S. R.; Amiri, E.: Numerical and experimental analysis of wall thickness variation of a hemispherical PMMA sheet in thermoforming process. International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2013) 64, S. 113–122.

BAI et al. 2006

Bai, X.; Zeng, Y.; Wu, W.; Li, Z.; Zou, F.: Research on the process of stretch forming with reconfigurable tooling. International Technology and Innovation Conference 2006. Hangzhou, 6. und 7. November 2006. <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4752183> - 19.06.2013

BAYER MATERIALSCIENCE AG 2001

Bayer MaterialScience AG(Hrsg.): Ati 8043d Makrolon®/Apec® - Transparenz und Farbe. Leverkusen: Oktober 2001. <http://www.plastics.bayer.de> - 15.11.2010.

BAYER MATERIALSCIENCE AG 2009

Bayer MaterialScience AG (Hrsg.): Hohe Fahrsicherheit durch extreme Bruchfestigkeit gepaart mit 3D-Formgebung <http://www.materialsgate.de/de/mnews/4432/Hohe+Fahrsicherheit+durch+extreme+Bruchfestigkeit+gepaart+mit+3D-Formgebung.html> - 19.06.2013.

BAYER MATERIALSCIENCE AG 2008

Bayer MaterialScience AG (Hrsg.): Makrolon® AG 2677 [http://plastics.bayer.com/plastics/emea/de/produkt/makrolon/datenblaet%ter/docId-3642384/PCS-8062\\_de\\_Makrolon\\_AG2677.pdf](http://plastics.bayer.com/plastics/emea/de/produkt/makrolon/datenblaet%ter/docId-3642384/PCS-8062_de_Makrolon_AG2677.pdf) - 25.07.2013.

BAYER MATERIALSCIENCE AG 2010A

Bayer MaterialScience AG (Hrsg.): Geschäftsbericht Bayer 2010. Leverkusen: 2010. <http://www.geschaeftsbericht2010.bayer.de/de/bayer-geschaeftsberivht-2%010.pdf> - 26.06.2013.

**BAYER MATERIALSCIENCE AG 2010B**

Bayer MaterialScience AG (Hrsg.): Makrolon AG2677 - Datenblatt 2010. Leverkusen: 2010. [http://plastics.bayer.com/plastics/emea/en/product/makrolon/product\\_da%25%20tasheets/Makrolon\\_AG2677\\_ISO/docId-79192/Makrolon\\_AG2677\\_ISO.pdf](http://plastics.bayer.com/plastics/emea/en/product/makrolon/product_da%25%20tasheets/Makrolon_AG2677_ISO/docId-79192/Makrolon_AG2677_ISO.pdf) - 19.06.2013.

**BAYER MATERIALSCIENCE GMBH 2005**

Bayer MaterialScience GmbH (Hrsg.): Technischer Berater, Makrolon® - Massivplatten aus Polycarbonat. Leverkusen: 2005. [http://www.sheet.bayerpolymers.com/index.php/fuseaction/download/lrn\\_file/MF0138\\_d\\_090708.pdf](http://www.sheet.bayerpolymers.com/index.php/fuseaction/download/lrn_file/MF0138_d_090708.pdf) - 20.06.2013.

**BENES & GROH 2014**

Benes, G. M. E.; Groh, P. E.: Grundlagen des Qualitätsmanagement. 3. Aufl. München: Carl Hanser 2014. ISBN: 978-3-446-44223-8.

**BENNINGHOFF et al. 1999**

Benninghoff, H.; Prott, V.; Droste, J.; Paneff, E.: New system to detect distortion & deformation in float glass. In: Vitkala, J. (Hrsg.): Glass Processing Days: Conference Proceedings. Tampere, 13.–16. Juni 1999. Tampere: Tamglass 1999, S. 134–137. ISBN: 952-91-0885-0. <http://www.glassfiles.com/articles/new-system-detect-distortion-deformation-float-glass> - 20.06.2013.

**BERGGOLD & HÄUSLER 2010**

Berggold, W.; Häusler, G.: Optische 3D-Sensoren. Optik & Photonik (2010) 3, S. 28–32.

**BOERS 2009**

Boers, S.: Fleximold 2009. [http://w3.bwk.tue.nl/fileadmin/bwk/ade/workshops/optimal\\_forming.pdf](http://w3.bwk.tue.nl/fileadmin/bwk/ade/workshops/optimal_forming.pdf) -20.06.2013.

**BONGARDT & BENNINGHOFF 1997**

Bongardt, W.; Benninghoff, H.: Measurement of optical quality of automotive glass and detection of optical defects by „ombroligne“. In: Vitkala, J. (Hrsg.): Glass Processing Days: Conference Proceedings. Tampere, 13.–15. September 1997. Tampere: Tamglass 1997, S. 378–384. ISBN: 952-90-8959-7. <http://www.glassfiles.com/articles/measurement-optical-quality-automotive-glass-and-detection-optical-defects-ombroligne> - 20.06.2013.

**BOSS & KLOTZ 2010**

Boss, M.; Klotz, B.: Komplexer 2K-Prozess gibt Auto was aufs Dach. *Kunststoffe* (2010) 3, S. 96–99.

**BOTTENBRUCH 1992**

Bottenbruch, L. (Hrsg.): *Technische Thermoplaste: Polycarbonate, Polyacetale, Polyester, Celluloseester*. München, Wien: Hanser 1992. ISBN: 3-446-16368-9. (Kunststoff Handbuch 3).

**BULLINGER et al. 2003**

Bullinger, H.-J.; Warnecke, H. J.; Westkämper, E.: *Neue Organisationsformen im Unternehmen - Ein Handbuch für das moderne Management*. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York: Springer 2003. ISBN: 978-3-540-67610-2.

**BRÜCKNER 2009**

Brückner, C.: *Qualitätsmanagement für die Automobilindustrie*. Düsseldorf: Symposion Publishing 2009. ISBN: 978-3-939707-20-2.

**BUTZKO 2013**

Butzko, R. L.: *Plastic Sheet Forming*. 4. Aufl. New York: Literary Licensing 2013. ISBN: 978-1-258-56151-2.

**CAO et al. 2013**

Cao, J.; Fu, W.; Li, M.: Research on the dimpling in multi-point thermoforming of polycarbonate sheet. *Advanced Materials Research* 738 (2013), S. 34–37.

**CARLOWITZ 1990**

Carlowitz, B. (Hrsg.): *Die Kunststoffe - Chemie, Physik, Technologie*. München, Wien: Hanser 1990. ISBN: 3-446-14416-1. (Kunststoff Handbuch 1).

**CHEN et al. 2008**

Chen, S.-C.; Huang, S.-T.; Lin, M.-C.; Chien, R.-D.: Study on the thermoforming of PC films used for in-mold decoration. *International Communications in Heat and Mass Transfer* (2008) 35, S. 967–973.

**CLAY 2000**

Clay, S. B.: *Characterization of crazing properties of polycarbonate*. Diss. Virginia Polytechnic Institute and State University (2000).

DÄNZER 2005

Dänzer, H. R. (Hrsg.): Thermoformen [http://www.horst-daenzer.de/Vortrag\\_Thermoformen.pdf](http://www.horst-daenzer.de/Vortrag_Thermoformen.pdf) - 17.06.2014.

DIN EN ISO 8402

DIN EN ISO 8402:1995-08: Qualitätsmanagement Begriffe. Berlin: Beuth 1995.

DIN EN ISO 9000

DIN EN ISO 9000:2005-12: Qualitätsmanagementsysteme - Grundlagen und Begriffe. Berlin: Beuth 2005.

DIN EN 60216-1 VDE 0304-21:2002-09

DIN EN 60216-1 VDE 0304-21:2002-09: Elektroisolierstoffe - Eigenschaften hinsichtlich des thermischen Langzeitverhaltens. Berlin: VDE 2014.

DIN 1319

DIN 1319-1:1995-01: Grundlagen der Meßtechnik - Teil 1: Grundbegriffe. Berlin: Beuth 1995.

DIN 52305

DIN 52305: Bestimmung des Ablenk winkels und des Brechwertes von Sicherheitsscheiben für Fahrzeugverglasung. Berlin: Beuth 1995.

DOMININGHAUS 2005

Domininghaus, H.: Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften. 6. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York: Springer 2005. ISBN: 3-540-21410-0.

DRUMMER & MÜLLER 2011

Drummer, D.; Müller, T.: Das Automobil von morgen - Kunststoff-Lösungen und technische Trends. Kunststoffe im Automobil 2011. Mannheim, 6. und 7. April 2011. (CD-ROM)

ECE R 43

ECE R 43: Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Sicherheitsverglasungswerkstoffe und ihres Einbaus in Fahrzeuge. Genf: Amtsblatt der Europäischen Union 2010.



EHRENSTEIN 2011

Ehrenstein, G. W.: Polymer Werkstoffe. 3. Aufl. München: Hanser 2011. ISBN: 978-3-446-42283-4.

ENGELMANN 2012

Engelmann, S.: Advanced Thermoforming. Hoboken: Wiley 2012. ISBN: 978-0-470-49920-7.

ERIKSSON et al. 2008

Eriksson, L.; Johansson, E.; Kettaneh-Wold, N.; Wikström, C.; Wold, S.: Design of Experiments. Umeå: Umetrics 2008. ISBN: 978-91-973730-4-3.

EVONIK RÖHM GMBH 2011

Evonik Röhm GmbH (Hrsg.): Produktbeschreibung Plexiglas. Darmstadt: August 2011. <http://www.plexiglas.de/sites/dc/Downloadcenter/Evonik/Product/PLEXIGLAS-Sheet/Massivplatten/222-7a-PLEXIGLAS-Resist-Automobilverscheibung-de.pdf> - 20.06.2013.

EYERER et al. 2008

Eyerer, P.; Hirth, T.; Elsner, P. (Hrsg.): Polymer Engineering. Berlin, Heidelberg: Springer 2008. ISBN: 978-3-540-72402-5.

FAES 2009

Faes, G.: SPC Statistische Prozesskontrolle. Norderstedt: Books on Demand GmbH 2009. ISBN: 9783837051568.

FINCKENSTEIN & KLEINER 1991

Finckenstein, E. V.; Kleiner, M.: Flexible Numerically & Controlled Tool System for Hydro-Mechanical Deep Drawing. Annals of the CIRP 40 (1991) 1, S. 311–314.

FINN & HISSMANN 2007

Finn, G.; Hissmann, O.: Uncompromising Eyes. Kunststoffe International (2007) 5, S. 46–49.

FLEMMING 2006

Flemming, S.: Anwendung von intelligenten Technologien in der online-Qualitätskontrolle von Druckprodukten. Diss. Technische Universität Dresden (2006).

**GARVIN 1984**

Garvin, D. A.: What Does „Product Quality“ Really Mean?. Sloan Management Review (1984), S. 25–45.

**GE 2002**

GE (Hrsg.): Lexan<sup>®</sup> Platten<sup>®</sup> - Prozeßhandbuch. Pittsfield: September 2002.

**GEHDE & FUHRICH 2011**

Gehde, M.; Fuhrich, R.: Strahlungserwärmung beim Kunststoffschweißen mit Infrarotstrahlung. Bericht zum laufenden Forschungsvorhaben, TU Chemnitz (2011).

**GEISS AG 2004**

Geiss AG (Hrsg.): Integration of Philips Speedium lamps. Mannheim: Oktober 2004.

**GRELLMANN 2015**

Grellmann, W.; Seidler, S.: Kunststoffprüfung. 3. Aufl. München: Carl Hanser 2015. ISBN: 978-3-446-44350-1.

**GRIMES 2002**

Grimes, E.: Guide to forming polycarbonate sheet. IAPD Magazine (2002).

**GRÄSSLER 2004**

Gräßler, I.: Kundenindividuelle Massenproduktion. 1. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York: Springer 2004. ISBN: 3-540-20554-3.

**GROTE & FELDHUSEN 2012**

Grote, K.-H.; Feldhusen, J. (Hrsg.): DUBBEL Taschenbuch für den Maschinenbau. Berlin, Heidelberg, New York: Springer 2012. ISBN: 978-3642173059.

**HAAS et al. 2002**

Haas, E.; Schwarz, R.; Papazian, J. M.: Design and Test of a Reconfigurable Forming Die. Journal of Manufacturing Processes 4 (2002) 1, S. 77–85.

**HABENICHT 2002**

Habenicht, G.: Kleben: Grundlagen, Technologien, Anwendung. Berlin, Heidelberg, New York: Springer 2002. ISBN: 978-3-662-08086-3.

HAGEMANN 2008

Hagemann, F.: Ein formflexibles Werkzeug für das Rapid Tooling beim Spritzgießen. Diss. TU München (2008).

HERING et al. 1999

Hering, E.; Blank, H.-P.; Triemel, J. (Hrsg.): Qualitätsmanagement für Ingenieure. Berlin, Heidelberg: Springer 1999. ISBN: 978-3-662-09618-5.

HO et al. 2004

Ho, K.C.; Lin, J.; Dean, T.A.: Modelling of springback in creep forming thick aluminum sheets. *International Journal of Plasticity* (2004) 20, S. 733–751.

HOLMAN 1989

Holman, M.C.: Autoclave age forming large aluminum aircraft panels. *Journal of Mechanical Working Technology* (1989) 20, S. 477–488.

HOU et al. 2004

Hou, Z. X.; Wu, J.; Wang, Z. R.: A study of the bulge-forming of polycarbonate (PC) sheet. *Journal of Materials Processing Technology* (2004) 151, S. 312–315.

KLEESPIES & CRAWFORD 1998

Kleespies, H. S., III; Crawford, R. H.: Vacuum Forming of Compound Curved Surfaces with a Variable Geometry Mold. *Journal of Manufacturing Systems* 17 (1998) 5, S. 325–337.

KLEIN 2011

Klein, B.: *Leichtbau-Konstruktion*. 9. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner 2011. ISBN: 978-3-8348-1604-7.

KLEINEBECKER 2006

Kleinebecker, M.: Quality inspection for automotive glass, an innovation for each production step. *Glass Processing Days China 2006*. Beijing, 25. – 28. April 2006. <http://www.glassfiles.com/articles/quality-inspection-automotive-glass-innovation-each-production-step> - 23.06.2013.

KLEINER & SMATLOCH 1991

Kleiner, M.; Smatloch, C.: Flexible Werkzeuge zum Tiefziehen mit verstellbaren Stempeln. *Bänder, Bleche, Rohre* 32 (1991) 12, S. 33–37.

**KLEMM 2004**

Klemm, H.: Polycarbonat gewinnt. *Maschinen Markt* (2004) 18, S. 18–21.

**KOC & THANGASWAMY 2011**

Koc, B.; Thangaswamy, S.: Design and analysis of a reconfigurable discrete pin tooling system for molding of three-dimensional free-form objects. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* (2011) 27, S. 335–348.

**KUNZ & STUDER 2006**

Kunz, J.; Studer, M.: Druck-Elastizitätsmodul über Shore-A-Härte ermitteln. *Kunststoffe* (2006) 6, S. 92–94.

**KURR 2010**

Kurr, F.: *Praxishandbuch der Qualitäts- und Schadensanalyse für Kunststoffe*. 1. Aufl.. München: Carl Hanser 2010. ISBN: 978-3446425187.

**LARSSON 1994**

Larsson, S.: Volvo corporate standard, STD 1007,115. Vehicle glass. Technischer Bericht, Volvo (1994).

**LI et al. 2007**

Li, M.-Z.; Cai, Z.-Y.; Liu, C.-G.: Flexible manufacturing of sheet metal parts based on digitized-die. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 23 (2007), S. 107–115.

**LIEBING 2008**

Liebing, D.: Einfluss der Verarbeitungsparameter beim Thermoformen auf Mikrostruktur und mechanische Eigenschaften von Polyethylenterephthalat. Diss. Universität Stuttgart (2008).

**LINDAHL & STODELL 2007**

Lindahl, D.; Stodell, H.: A human factors analysis of optical distortion in automotive glazing. Masterarbeit. Linköpings Univesitet (2007).

**LINSS 2013**

Linß, G.: *Statistiktraining im Qualitätsmanagement*. 2. Aufl. München: Carl Hanser 2013. ISBN: 978-3-446-43572-8.

LITFIN 2005

Litfin, G.: Technische Optik in der Praxis. 3. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York: Springer 2005. ISBN: 3-540-21884-X.

LIU et al. 2008

Liu, C.; Li, M.; Fu, W.: Principles and apparatus of multi-point forming for sheet metal. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 35 (2008), S. 1227–1233.

MAKIGUSHI et al. 1994

Makigushi, M.; Shida, T.; Sugiura, S.; Kimura, K.; Fujiwara, E.; Yamada, Y.: A human factors analysis of optical distortion for automotive windshields. SAE International 940390 (1994).

MANFRÉ et al. 2007

Manfré, G.; Bosco, E.A.; Rubert, L.: PC glazing is getting a hot glass alternative development among car makers. Glass Processing Days 2007. Tampere, 15. – 18. Juni 2007. <http://www.glassfiles.com/articles/pc-glazing-getting-%E2%80%9Chot%E2%80%9D-glass-alternative-development-among-car-makers> - 29.11.2013.

MAREK & NITSCHKE 2010

Marek, R.; Nitsche, K.: Praxis der Wärmeübertragung. 2. Aufl. München: Hanser 2010. ISBN: 978-3-446-40778-7.

MENNIG 2008

Mennig, G.: Werkzeugbau für die Kunststoffverarbeitung. 5. Aufl. München: Hanser 2008. ISBN: 978-3446425101.

MICHAELI 1999

Michaeli, W.: Einführung in die Kunststoffverarbeitung. München, Wien: Hanser 1999. ISBN: 978-3-446-40580-6.

MICHAELI et al. 2007

Michaeli, W.; Heßner, S.; Klaiber, F.: Prozesskette zur optimierten Herstellung von optischen Bauteilen aus Kunststoffen im Spritzgieß- und -prägeverfahren. Zeitschrift Kunststofftechnik 3 (2007) 5, S. 1–21.

**MICHLER 2001**

Michler, G. H.: Crazing in Amorphous Polymers - Formation of Fibrillated Crazes Near the Glass Transition Temperature. In: Grellmann, W. et al. (Hrsg.): Deformation and Fracture Behaviour of Polymers. Berlin, Heidelberg, New York: Springer 2001, S. 201–207. ISBN: 3-540-41247-6.

**MICHLER & BALTÁ-CALLEJA 2012**

Michler, G. H.; Baltá-Calleja, F.: Nano- and Micromechanics of Polymers. München, Cincinnati: Hanser 2012. ISBN: 978-3-44642767-9.

**MILBERG 2003**

Milberg, J.: Grenzen überwinden - Wachstum durch Innovation. In: Zäh, M. et al. (Hrsg.): Münchener Kolloquium 2003: Grenzen überwinden - Wachstum der neuen Art. München: Utz 2003. ISBN: 978-3-8316-0222-3.

**NAKAJIMA 1969**

Nakajima, N.: A newly developed technique to fabricate complicated dies and electrodes with wires. Journal Japan Society of Mechanical Engineering 12 (1969) 54, S. 1546–1554.

**OHLENDORF 2004**

Ohlendorf, F.: Vorhersage der mechanischen Folieneigenschaften bei der Schlauchfolienextrusion. Diss. RWTH Aachen (2004).

**OPITZ & KLEINEBERG 2011**

Opitz, M.; Kleineberg, M.: Abschlussworkshop Cfk-Rumpf NG. DLR (2011).

**OPTRON GMBH 2011**

Optron GmbH (Hrsg.): IR-Module, Typ IRD / IRX - Übersicht. Garbsen: Januar 2011.

**OWODUNNI et al. 2004**

Owodunni, O. O.; Diaz-Rozo, J.; Hinduja, S.: Development and Evaluation of a Low-cost Computer Controlled Reconfigurable Rapid Tool. CAD'04. Pattaya, 24. – 28. Mai 2004.

**PEDERSEN & LENAU 2010**

Pedersen, T. H.; Lenau, T. A.: Variable Geometry Casting of Concrete Elements Using Pin-Type Tooling. Journal of Manufacturing Science and Engineering 132 (2010) 6, S. 061015.

PFEIFER & SCHMITT 2014

Pfeifer, T.; Schmitt, R.: Masing Handbuch Qualitätsmanagement. 6. Aufl. München, Wien: Carl Hanser 2014. ISBN: 978-3-446-43431-8.

PHAL et al. 2007

Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H.; Pahl-Beitz: Konstruktionslehre. 7. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer 2007. ISBN: 3-5403-4060-2.

PARTHIER 2004

Parthier, R.: Messtechnik. 2. Aufl. Wiesbaden: Springer 2004. ISBN: 978-3-528-13941-4.

PHAM et al. 2011

Pham, D. T.; Su, S. Z.; Li, M.: An integrated manufacturing system with reconfigurable multi-point forming technology for fabrication of complex cladding and facades. *Advanced Materials Research* (2011) 243-249, S. 3507–3512.

PINGEL 1997

Pingel, U.: New moiré-fringe-method to inspect transmitted distortion and point-defects in sheet-glass. In: Vitkala, J. (Hrsg.): *Glass Processing Days: Conference Proceedings*. Tampere, 13.–15. September 1997. Tampere: Tamglass 1997, S. 120–124. ISBN: 952-90-8959-7. <http://www.glassfiles.com/articles/new-moir%C3%A9-fringe-method-inspect-transmitted-distortion-and-point-defects-sheet-glass> - 22.06.2013.

POPOV 2009

Popov, V. L.: *Kontaktmechanik und Reibung*. Berlin, Heidelberg: Springer 2009. ISBN: 978-3540888369.

RAOA & DHANDEB 2002

Raoa, P. V. M.; Dhandeb, S. G.: A flexible surface tooling for sheet-forming processes: conceptual studies and numerical simulation. *Journal of Materials Processing Technology* (2002) 124, S. 133–143.

RAY 2002

Ray, S. F.: *Applied Photographic Optics*. 3. Aufl. London: Focal Press 2002. ISBN: 978-0240515403.

**REDNER & BHAT 1999**

Redner, A. S.; Bhat, G. K.: Moiré distortiometry for the quantitative evaluation of optical quality of glass. In: Vitkala, J. (Hrsg.): Glass Processing Days: Conference Proceedings. Tampere, 13.–16. Juni 1999. Tampere: Tamglass 1999, S. 166–168. ISBN: 952-91-0885-0. <http://www.glassfiles.com/articles/moir%C3%A9-distortiometry-quantitative-evaluation-optical-quality-glass> - 22.06.2013.

**REINHART & ZÄH 2003**

Reinhart, G.; Zäh, M. F. (Hrsg.): Marktchance Individualisierung. Berlin, Heidelberg: Springer 2003. ISBN: 3-540-00594-3.

**RÖSLER et al. 2012**

Rösler, J.; Harders, H.; Bäker, M.: Mechanisches Verhalten der Werkstoffe. 4. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg 2012. ISBN: 978-3-8348-181.

**ROSENBAUM 2003**

Rosenbaum, M.: A new tool for in-line inspection of automobile glass surface aspect and transmission properties. In: Vitkala, J. (Hrsg.): Glass Processing Days: Conference Proceedings. 15.–18. Juni 2003. Tampere: Tamglass 2003, S. 573–577. ISBN: 952-91-5910-2. <http://glassfiles.cc.tut.fi/articles/new-tool-line-inspection-automobile-glass-surface-aspect-and-transmission-properties> -23.06.2013.

**SCHMIDT et al. 2003**

Schmidt, F. M.; Le Maout, Y.; Monteix, S.: Modelling of infrared heating of thermoplastic sheet used in thermoforming process. Materials Processing Technology (2003) 143-144, S. 225–231.

**SCHMITT 2015**

Schmitt, R.: Basiswissen Qualitätsmanagement. Düsseldorf: Symposion Publishing GmbH 2015. ISBN: 978-3-86329-675-9.

**SCHUTZRECHT DE 100 33 408 A1 2002**

Schutzrecht DE 100 33 408 A1 Offenlegungsschrift (17.01.2002). Lichtenfels, A.. Pr.: 100 33 408.3. Schalung für beliebig geformte Elemente.



SCHUTZRECHT DE 100 43 209 A1 2002

Schutzrecht DE 100 43 209 A1 Offenlegungsschrift (04.04.2002). Esc GmbH & Co. KG. Pr.: 100 43 209.3. Flexibles Werkzeug zur Umformung eines Werkstücks.

SCHUTZRECHT DE 10 2005 050 882 A1 2007

Schutzrecht DE 10 2005 050 882 A1 Offenlegungsschrift (26.04.2007). ISRA Vision Systems AG. Pr.: 10 2005 050 882.0. System und Verfahren zur optischen Inspektion von Glasscheiben.

SCHUTZRECHT DE 10 2007 029 637 B4 2009

Schutzrecht DE 10 2007 029 637 B4 Patentschrift (09.07.2009). Innovationen GbR. Pr.:10 2007 029 637.3. Verfahren zum Thermoformen eines Kunststoffkörpers.

SCHUTZRECHT DE 198 10 478 B4 2004

Schutzrecht DE 198 10 478 B4 Patentschrift (07.10.2004). Bayerische Motoren Werke AG. Pr.: 198 10 478.2. Verfahren zur Herstellung von dreidimensional verformten Bauteilen.

SCHUTZRECHT DE 37 26033 A1 1987

Schutzrecht DE 37 26033 A1 Offenlegungsschrift (18.02.1988). Glaverbel. Pr.: 09.08.86 GB 19464/86. Verfahren und Vorrichtung zum Biegen thermoplastischer Scheiben und zur Herstellung laminiertes lichtdurchlassender Tafeln.

SCHUTZRECHT DE 602 12 674 T2 2007

Schutzrecht DE 602 12 674 T2 Patent (28.06.2007). Sail Innovation. Pr.: 0112056 18.09.2001. Vorrichtung und Verfahren zum Herstellen von Platten mit einer dreidimensionalen Krümmung aus Flächenmaterial, zum Beispiel zum Wärmeformen von Segeln aus einem Thermoplastmaterial.

SCHUTZRECHT EP 1 249 328 B1 2002

Schutzrecht EP 1 249 328 B1 Patentschrift (02.03.2002). Bayerische Motoren Werke Aktiengesellschaft. Pr.: DE 10118281 12.04.2001. Anordnung mit verformbarer Matte zur Herstellung von dreidimensionalen Bauteilen und Verfahren zu ihrer Herstellung.

**SCHUTZRECHT US 4212188 1980**

Schutzrecht US 4212188 Patent (15.07.1980). The Boeing Company. Pr.: 18.01.1979 4422. Apparatus for forming sheet metal.

**SCHUTZRECHT US 5851563 1998**

Schutzrecht US 5851563 Patent (22.12.1998). Mc Donnell Douglas Corporation. Pr.: 28.03.1997 829503. Reconfigure modular tooling.

**SCHWARZ et al. 2002**

Schwarz, R. C.; Nardiello, J.; Papazian, J. M.: Supression on Dimpling in Sheet Metal Parts Formed on Discrete Tooling. In: Gdoutos, E. E. (Hrsg.): Recent Advances in Experimental Mechanics. Netherlands: Kluwer Academic Publishers 2002.

**SCHWARZMANN 1997**

Schwarzmann, P.: Thermoformen in der Praxis. München: Carl Hanser 1997. ISBN: 3-446-19153-4.

**SCHWARZMANN 2008**

Schwarzmann, P.: Thermoformen in der Praxis. 2. Aufl. München: Carl Hanser 2008. ISBN: 978-3-446-40794-7.

**SIEBERTZ et al. 2010**

Siebertz, K.; van Bebber, D.; Hochkirchen, T.: Statistische Versuchsplanung. Berlin, Heidelberg, New York: Springer 2010. ISBN: 345667574.

**SIMOMAA 2003**

Simomaa, K.: Safeglass. Eutist-INV Abschlussbericht, CCD Photonics Ltd (2003).

**SIMON et al. 2013**

Simon, D.; Zitzlsberger, S.; Wagner, J.; Kern, L.; Maurer, C.; Reinhart, G.: Forming Plastic Shields on a Reconfigurable Tooling System. CARV 2013. Munich, 6. – 9. Oktober 2013.

**SIMONA 2005**

Simona AG (Hrsg.): Verarbeitungshinweis - Thermoformen, Vakuumformen, Tiefziehen, Warmformen, Biegen [http://simona-de.com/static/sites/default/de/assets/Informationsmaterial/deutsch/Verarbeitung/PI\\_Vakuum\\_d.pdf](http://simona-de.com/static/sites/default/de/assets/Informationsmaterial/deutsch/Verarbeitung/PI_Vakuum_d.pdf) - 02.10.2013.

SU 2009

Su, S.: DELIVERABLE 6.7-3. Jahresbericht zum laufenden Forschungsvorhaben DATAFORM, Cardiff University (2009).

SU et al. 2012

Su, S. Z.; Li, M. Z.; Liu, C. G.; Ji, C. Q.; Setchi, R.; Larkiola, J.; Patelev, I.; Stead, I.; Lopez, R.: Flexible Tooling System Using Reconfigurable Multi-Point Thermoforming Technology for Manufacturing Freeform Panels. Key Engineering Materials (2012) 504-506, S. 839–844.

SURFACE GENERATION LTD. 2007

Surface Generation Ltd. (Hrsg.): Reconfigurable Pin Tooling - Reducing Time & Cost to Market for Large & Low Volume Components. Leicestershire: 2007.

TEICHER 2003

Teicher, G.: Glas im Automobil II. Renningen: Expert-Verlag GmbH 2003. ISBN: 978-3-8169-2215-5.

THIELBEER 2010

Thielbeer, B.: Glänzende Ansichten - Reflexionsmesstechnik im Fahrzeugbau. In: Luhmann, T. und Müller, C. (Hrsg.): Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik - Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2010. Berlin, Offenbach: Wichmann 2010, S. 302–308. ISBN: 978-3-87907-494-5.

THRONE 1996

Throne, J. L.: Technology of Thermoforming. München, Wien, New York: Carl Hanser 1996. ISBN: 3-446-17812-0.

THRONE 1999

Throne, J. L.: Understanding Thermoforming. München, Wien, New York: Carl Hanser 1999. ISBN: 978-3446211537.

THRONE & BEINE 1999

Throne, J. L.; Beine, J.: Thermoformen: Werkstoffe - Verfahren - Anwendung. München: Carl Hanser 1999. ISBN: 978-3446210202.

VDI 2225

VDI 2225: Konstruktionsmethodik Technisch-wirtschaftliches Konstruieren Technisch wirtschaftliche Bewertung. Berlin: Beuth 1998.

**WALCZYK & HARDT 1998**

Walczyk, D. F.; Hardt, D. E.: Design and analysis of reconfigurable discrete dies for sheet metal forming. *Journal of Manufacturing Systems* 17 (1998) 6, S. 436–454.

**WALCZYK et al. 1998**

Walczyk, D. F.; Lakshmikanthan, J.; Kirk, D. R.: Development of a Reconfigurable Tool for Forming Aircraft Body Panels. *Journal of Manufacturing Systems* 17 (1998) 4, S. 287–296.

**WANG 2009**

Wang, Z.: Rapid Manufacturing of Vacuum Forming Components Utilising Reconfigurable Screw-Pin Tooling. Diss. The University of Nottingham (2009).

**WESTKAEMPER et al. 2000**

Westkaemper, E.; Schraft, R.; Schaaf, W. H.: ROBOTYPING - Neue Rapid-Prototyping Verfahren mit Industrierobotern. *wt Werkstatttechnik online* 90 (2000), S. 217–219.

**WIESER 1998**

Wieser, J.: Zum Deformationsverhalten thermoplastischer Kunststoffe unter ein- und mehrachsiger Beanspruchung. Diss. Deutsches Kunststoffinstitut, Darmstadt (1998).

**WOHLERS 2007**

Wohlers, T.: Wohlers Report 2007. Fort Collins, Colorado 80525 USA: Wohlers Associates 2007. ISBN: 0-9754429-3-7.

**WOODWARD & MASON 2003**

Woodward, A. C.; Mason, C.: Optical characteristics of laminated sideglazings. In: Vitkala, J. (Hrsg.): *Glass Processing Days: Conference Proceedings*. 15.–18. Juni 2003. Tampere: Tamglass 2003, S. 510–512. ISBN: 952-91-5910-2. <http://glassfiles.cc.tut.fi/articles/optical-characteristics-laminated-sideglazings> - 23.06.2013.

**ZACHER & REUTER 2011**

Zacher, S.; Reuter, M.: *Regelungstechnik für Ingenieure*. 13. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag 2011. ISBN: 978-3-8348-0900-1.

ZAHRADNIK 1993

Zahradnik, F.: Hochtemperatur-Thermoplaste. Berlin: Springer 1993. ISBN: 978-3-540-62105-8.

ZANGENMEISTER 2000

Zangenmeister, C.: Erweiterte Wirtschaftlichkeitsanalyse (EWA): Grundlagen, Leitfaden und PC-gestützte Arbeitshilfen für ein 3-Stufen-Verfahren zur Arbeitssystembewertung. Bremerhaven: Verlag für neue Wissenschaft 2000. ISBN: 9783897015098.

ZITZLSBERGER et al. 2012A

Zitzlsberger, S.; Maurer, C.; Reinhart, G.: Creep forming of polycarbonate: Experimentation and modelling. PPS-28. Pattaya, 11. – 15. Dezember 2012.

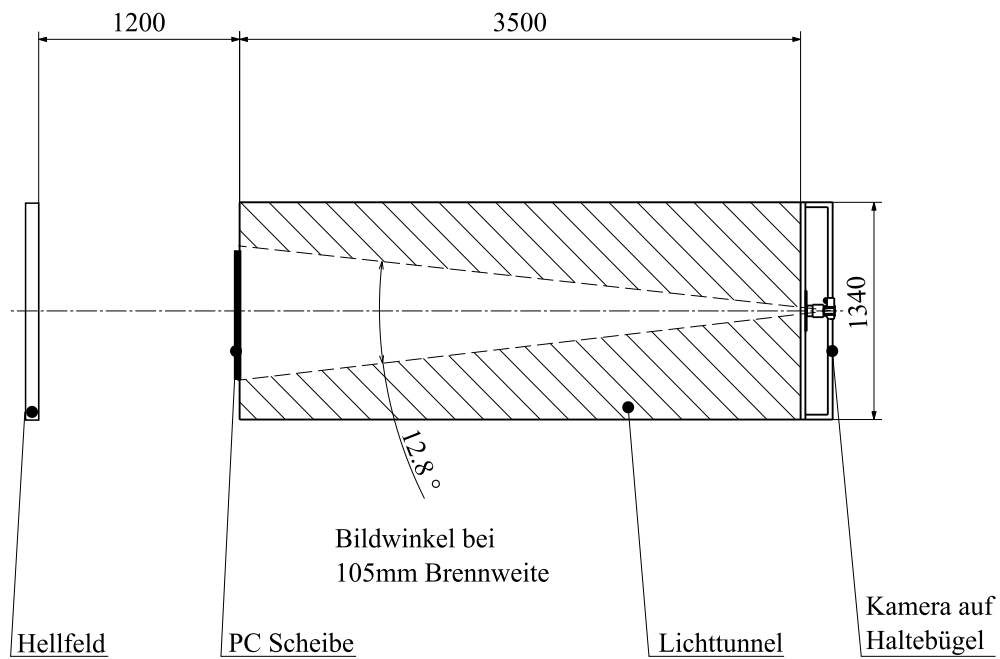
ZITZLSBERGER et al. 2012B

Zitzlsberger, S.; Schormair, B.; Maurer, C.; Reinhart, G.: Study on cooling of sheet material from polycarbonate formed by a reconfigurable tooling system. Antec Mumbai 2012. Mumbai, 6. und 7. Dezember 2012. <http://www.4spe.org/sites/default/files/conferences/2012/ANTEC-Mumbai/papers/1469848.pdf> - 23.06.2013.



# 11 Anhang

## 11.1 Versuchsaufbau Hellfeld



## 11.2 Entwicklungseinstellungen Lightroom

Modul	Parameter	DF	HF	PT	Verz.
Grundeinstellungen	Behandlung		Schwarzweiß		
	Temp.	3050	6400	6400	3200
	Tönung	-	+30	+11	+4
	Belichtung	0,00	0,00	0,00	0,00
	Kontrast	00	0	00	0
	Lichter	+100	+59	+100	+100
	Tiefen	0	-18	0	0
	Weiß	+63	+46	-80	+100
	Schwarz	+61	-100	-50	-100
	Klarheit	+11	+100	-71	0
Details	Betrag	52	150	50	25
	Radius	1,7	3,0	3,0	1,0
	Details	6	0	0	25
	Maskieren	0	77	0	0
	Luminanz	100	100	0	0
	Details	0	100	0	50
	Kontrast	50	50	0	0
	Farbe	50	100	25	25
	Details	50	0	50	50



### 11.3 Versuchspläne

Nr.	Temp. [°C]	Radius [mm]	Verhältnis	t [mm]	Anisotropie
1	120	960	1:0	5	1
2	143	960	1:0	5	-1
3	120	1906	1:0	5	-1
4	143	1906	1:0	5	1
5	120	960	1:1	5	-1
6	143	960	1:1	5	1
7	120	1906	1:1	5	1
8	143	1906	1:1	5	-1
9	120	960	1:1	10	-1
10	143	960	1:1	10	1
11	120	1906	1:1	10	1
12	143	1906	1:1	10	-1
13	120	960	1:0	10	1
14	143	960	1:0	10	-1
15	120	1906	1:0	10	-1
16	143	1906	1:0	10	1
17	132	1433	1:0,5	5	1
18	120	1433	1:0,5	5	1
19	143	1433	1:0,5	5	1
20	132	960	1:0,5	5	1
21	132	1906	1:0,5	5	1
22	132	1433	1:0	5	1
23	132	1433	1:1	5	1

Nr.	Temp. [°C]	Radius [mm]	Verhältnis	Kühlzeit [s]	t [mm]	Haltezeit [s]
17b	144	960	1:0	0	5	0
18b	180	960	1:0	90	5	0
19b	144	1906	1:0	90	5	0
20b	180	1906	1:0	0	5	0

### 11.3 Versuchspläne

21b	144	960	1:1	90	5	0
22b	180	960	1:1	0	5	0
23b	144	1906	1:1	0	5	0
24b	180	1906	1:1	90	5	0
25b	144	960	1:1	90	10	0
26b	180	960	1:1	0	10	0
27b	144	1906	1:1	0	10	0
28b	180	1906	1:1	90	10	0
29b	144	960	1:0	0	10	0
30b	180	960	1:0	90	10	0
31b	144	1906	1:0	90	10	0
32b	180	1906	1:0	0	10	0
49b	144	960	1:0	0	5	180
50b	200	960	1:0	90	5	180
51b	144	1906	1:0	90	5	180
52b	200	1906	1:0	0	5	180
53b	144	960	1:1	90	5	180
54b	200	960	1:1	0	5	180
55b	144	1906	1:1	0	5	180
56b	200	1906	1:1	90	5	180
57b	144	960	1:1	90	10	180
58b	200	960	1:1	0	10	180
59b	144	1906	1:1	0	10	180
60b	200	1906	1:1	90	10	180
61b	144	960	1:0	0	10	180
62b	200	960	1:0	90	10	180
63b	144	1906	1:0	90	10	180
64b	180	1906	1:0	0	10	180
65b	162	1433	1:0,5	45	5	90
66b	144	1433	1:0,5	45	5	90
67b	180	1433	1:0,5	45	5	90
68b	162	960	1:0,5	45	5	90
69b	162	1906	1:0,5	45	5	90

11 Anhang

70b	162	1433	1:0	45	5	90
71b	162	1433	1:1	45	5	90
72b	162	1433	1:0,5	0	5	90
73b	162	1433	1:0,5	90	5	90
76b	162	1433	1:0,5	45	5	0
77b	162	1433	1:0,5	45	5	180

Nr.	Haltezeit [s]	Abkühl- temp. I [°C]	Abkühl- temp. II [°C]	Radius [mm]	Aniso- tropie	Ver- hältnis
N6	0	20	20	960	1	1:0
N7	0	20	20	960	-1	1:0
N30	0	20	20	1906	1	1:0
N31	0	20	20	1906	-1	1:0
N8	0	70	70	960	1	1:0
N9	0	70	70	960	-1	1:0
N32	0	70	70	1906	1	1:0
N33	0	70	70	1906	-1	1:0
N15	900	20	70	960	1	1:0
N17	900	20	70	960	-1	1:0
N34	900	20	70	1906	1	1:0
N35	900	20	70	1906	-1	1:0
N14	900	70	20	960	1	1:0
N16-2	900	70	20	960	-1	1:0
N36	900	70	20	1906	1	1:0
N37	900	70	20	1906	-1	1:0
N18/-b	0	20	20	960	1/-1	1:1
N24/-b	0	20	20	1906	1/-1	1:1
N19/-b	0	70	70	960	1/-1	1:1
N25/-b	0	70	70	1906	1/-1	1:1
N20/-b	900	20	70	960	1/-1	1:1
N26/-b	900	20	70	1906	1/-1	1:1
N21/-b	900	70	20	960	1/-1	1:1
N27/-b	900	70	20	1906	1/-1	1:1

---

Z3	450	45	45	960	1	1:0,5
Q1	450	45	45	1906	1	1:0,5
Q2	450	45	45	1433	1	1:0
Q3	450	45	45	1433	1	1:1
Q4	450	45	45	1433	1	1:0,5
Q5	0	45	45	1433	1	1:0,5
Q6	900	45	45	1433	1	1:0,5
Q7	450	20	45	1433	1	1:0,5
Q8	450	70	45	1433	1	1:0,5
Q9	450	45	20	1433	1	1:0,5
Q10	450	45	70	1433	1	1:0,5

## 11.4 Regressionskoeffizienten

	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$
Rückf.	17,77293	-0,24853	$8,23 \cdot 10^{-4}$	$-2,98 \cdot 10^{-3}$	$-4,46 \cdot 10^{-7}$
DF	-65,0288	2,04874	$-5,72 \cdot 10^{-3}$	0,00933	$-6,87 \cdot 10^{-7}$
PT	-575,16125	10,09666	$-3,70 \cdot 10^{-2}$	0,05185	$-8,17 \cdot 10^{-6}$
Verz.	18,59121	-0,28692	$1,11 \cdot 10^{-3}$	$-7,82 \cdot 10^{-4}$	$-2,62 \cdot 10^{-8}$
	$b_5$	$b_6$	$b_7$	$b_8$	$b_9$
Rückf.	0,67942	-0,01913	-0,07945	$3,06 \cdot 10^{-2}$	$3,51 \cdot 10^{-5}$
DF	8,1545	0,10522	9,39188	-5,76	$-9,37 \cdot 10^{-5}$
PT	-56,84041	-7,3087	12,09328	-36,3	$-3,76 \cdot 10^{-4}$
Verz.	2,54724	-0,72348	0,00979	1,83	$7,77 \cdot 10^{-6}$
	$b_{10}$	$b_{11}$	$b_{12}$	$b_{13}$	$b_{14}$
Rückf.	$-6,99 \cdot 10^{-3}$	$8,04 \cdot 10^{-4}$	$-1,96 \cdot 10^{-3}$	$-2,64 \cdot 10^{-6}$	$-3,01 \cdot 10^{-5}$
DF	-0,144	$-7,56 \cdot 10^{-2}$	$9,71 \cdot 10^{-2}$	$1,09 \cdot 10^{-2}$	$1,76 \cdot 10^{-4}$
PT	0,348	-0,116	0,316	$2,37 \cdot 10^{-2}$	$1,74 \cdot 10^{-3}$
Verz.	$-9,69 \cdot 10^{-3}$	$-6,31 \cdot 10^{-4}$	$-1,34 \cdot 10^{-2}$	$-7,90 \cdot 10^{-4}$	$2,23 \cdot 10^{-5}$
	$b_{15}$	$b_{16}$	$b_{17}$	$b_{18}$	
Rückf.	$-2,81 \cdot 10^{-5}$	0,0225	0,39349	0,0054	
DF	$-1,74 \cdot 10^{-3}$	-0,6445	-2,56557	-0,67034	
PT	$6,66 \cdot 10^{-4}$	-1,7885	-6,8867	-0,59002	
Verz.	$-3,30 \cdot 10^{-5}$	0,06012	0,11735	-0,00511	

	$c_0$	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$
Rückf.	$1,21 \cdot 10^{-4}$	0,02005	$-1,24 \cdot 10^{-4}$	-0,0028	$-1,83 \cdot 10^{-8}$
DF	$9,43 \cdot 10^{-3}$	1,46614	$-8,87 \cdot 10^{-3}$	0,0362	$-3,52 \cdot 10^{-5}$
PT	$5,42 \cdot 10^{-3}$	0,60365	$1,49 \cdot 10^{-3}$	0,20567	$1,45 \cdot 10^{-5}$
Verz.	$-4,83 \cdot 10^{-5}$	$-7,22 \cdot 10^{-3}$	$7,67 \cdot 10^{-5}$	$2,26 \cdot 10^{-4}$	$1,36 \cdot 10^{-7}$
Verz. K	-0,15182	0,03351	$-9,17 \cdot 10^{-4}$	$-8,79 \cdot 10^{-3}$	$4,42 \cdot 10^{-5}$
	$c_5$	$c_6$	$c_7$	$c_8$	$c_9$
Rückf.	$-1,87 \cdot 10^{-5}$	-0,20973	-0,00255	$1,55 \cdot 10^{-6}$	0,17973
DF	$-1,58 \cdot 10^{-3}$	2,17473	-0,17317	$8,12 \cdot 10^{-4}$	-12,25537
PT	$-2,48 \cdot 10^{-3}$	2,09881	-0,07908	$-1,81 \cdot 10^{-3}$	-20,29209
Verz.	$1,73 \cdot 10^{-5}$	$6,79 \cdot 10^{-2}$	$1,09 \cdot 10^{-3}$	$3,51 \cdot 10^{-5}$	-0,00208
Verz. K	-0,00969	$4,15 \cdot 10^{-5}$	$7,56 \cdot 10^{-4}$	$-2,61 \cdot 10^{-7}$	-0,04461

	$c_{10}$	$c_{11}$	$c_{12}$	$c_{13}$	$c_{14}$
Rückf.	$5,93 \cdot 10^{-5}$	$6,75 \cdot 10^{-7}$	$2,05 \cdot 10^{-5}$	0,00211	$5,17 \cdot 10^{-5}$
DF	0,417	$-6,41 \cdot 10^{-5}$	$4,41 \cdot 10^{-4}$	0,07482	$1,27 \cdot 10^{-3}$
PT	0,587	$-3,82 \cdot 10^{-4}$	$-1,66 \cdot 10^{-3}$	-0,34723	$-2,02 \cdot 10^{-3}$
Verz.	$5,61 \cdot 10^{-3}$	$-2,26 \cdot 10^{-5}$	$-4,65 \cdot 10^{-6}$	$1,13 \cdot 10^{-3}$	$-4,13 \cdot 10^{-5}$
Verz. K	-0,41123	0,49575	$-2,82 \cdot 10^{-4}$	$7,69 \cdot 10^{-5}$	$-4,59 \cdot 10^{-6}$
	$c_{15}$	$c_{16}$	$c_{17}$	$c_{18}$	$c_{19}$
Rückf.	-0,00127	$-9,23 \cdot 10^{-6}$	$-2,79 \cdot 10^{-4}$	$-2,95 \cdot 10^{-6}$	$-1,10 \cdot 10^{-5}$
DF	0,09045	$-3,12 \cdot 10^{-3}$	$-9,99 \cdot 10^{-4}$	$-8,24 \cdot 10^{-6}$	$-4,22 \cdot 10^{-4}$
PT	0,13591	$-3,67 \cdot 10^{-3}$	$1,50 \cdot 10^{-2}$	$2,49 \cdot 10^{-4}$	$9,47 \cdot 10^{-4}$
Verz.	$-5,43 \cdot 10^{-4}$	$-8,42 \cdot 10^{-6}$	$-1,42 \cdot 10^{-4}$	$3,19 \cdot 10^{-7}$	$3,35 \cdot 10^{-5}$
Verz. K	0,00182	0,00151	$8,27 \cdot 10^{-5}$	$2,51 \cdot 10^{-6}$	$-7,15 \cdot 10^{-5}$
	$c_{20}$	$c_{21}$	$c_{22}$	$c_{23}$	$c_{24}$
Rückf.	$-1,01 \cdot 10^{-7}$	-0,00548	0,03882	0,00101	$6,75 \cdot 10^{-5}$
DF	$-2,05 \cdot 10^{-6}$	-0,15224	-0,47294	-0,00563	$-1,77 \cdot 10^{-3}$
PT	$-2,40 \cdot 10^{-5}$	0,67957	0,57607	0,00817	$-1,63 \cdot 10^{-2}$
Verz.	$-5,44 \cdot 10^{-7}$	$-1,83 \cdot 10^{-5}$	-0,00788	$-6,43 \cdot 10^{-5}$	$2,57 \cdot 10^{-4}$
Verz. K	0,00115	$-4,01 \cdot 10^{-7}$	$3,99312 \cdot 10^{-4}$	0,00168	$2,01 \cdot 10^{-5}$
	$c_{25}$	$c_{26}$			
Rückf.	$2,92 \cdot 10^{-6}$	$5,99 \cdot 10^{-5}$			
DF	$2,30 \cdot 10^{-5}$	$9,12 \cdot 10^{-3}$			
PT	$-2,13 \cdot 10^{-5}$	$2,73 \cdot 10^{-3}$			
Verz.	$1,26 \cdot 10^{-7}$	$1,24 \cdot 10^{-4}$			
Verz. K	$-2,06 \cdot 10^{-4}$	-0,01622			

## 11.5 Bewertungsformblätter

<i>Bewertungsklasse „Kosten“, Szenarium 1</i>						
	<b>Kenn- größe</b>	<b>Wert [Euro]</b>	<b>Punktwert</b>	<b>Gewichtung</b>	<b>gew. Punktw.</b>	<b>Summe</b>
<b>A1</b>	Hk	212,28	0,9806	0,6667	0,6538	<b>0,9862</b>
	Mk	30,33	0,9972	0,3333	0,3324	
<b>A2</b>	Hk	184,98	0,9834	0,6667	0,6556	<b>0,9880</b>
	Mk	30,33	0,9972	0,3333	0,3324	
<b>A3</b>	Hk	182,25	0,9836	0,6667	0,6558	<b>0,9882</b>
	Mk	30,33	0,9972	0,3333	0,3324	
<b>A4</b>	Hk	181,98	0,9837	0,6667	0,6558	<b>0,9882</b>
	Mk	30,33	0,9972	0,3333	0,3324	

<i>Bewertungsklasse „Kosten“, Szenarium 2</i>						
	<b>Kenn- größe</b>	<b>Wert [Euro]</b>	<b>Punktwert</b>	<b>Gewichtung</b>	<b>gew. Punktw.</b>	<b>Summe</b>
<b>A1</b>	Hk	89,56	0,9929	0,6667	0,6619	<b>0,9945</b>
	Mk	26,82	0,9976	0,3333	0,3325	
<b>A2</b>	Hk	65,43	0,9953	0,6667	0,6635	<b>0,9961</b>
	Mk	26,82	0,9976	0,3333	0,3325	
<b>A3</b>	Hk	63,02	0,9956	0,6667	0,6637	<b>0,9962</b>
	Mk	26,82	0,9976	0,3333	0,3325	
<b>A4</b>	Hk	62,77	0,9956	0,6667	0,6637	<b>0,9962</b>
	Mk	26,82	0,9976	0,3333	0,3325	

<i>Bewertungsklasse „Kosten“, Szenarium 3</i>						
	<b>Kenn- größe</b>	<b>Wert [Euro]</b>	<b>Punktwert</b>	<b>Gewichtung</b>	<b>gew. Punktw.</b>	<b>Summe</b>
<b>A1</b>	Hk	10016,55	0,0000	0,6667	0,0000	<b>0,0000</b>
	Mk	10000,00	0,0000	0,3333	0,0000	
<b>A2</b>	Hk	1016,55	0,9002	0,6667	0,6031	<b>0,9002</b>
	Mk	1000,00	0,9002	0,3333	0,2971	
<b>A3</b>	Hk	116,55	0,9902	0,6667	0,6634	<b>0,9902</b>
	Mk	100,00	0,9902	0,3333	0,3268	
<b>A4</b>	Hk	26,55	0,9992	0,6667	0,6695	<b>0,9992</b>
	Mk	10,00	0,9992	0,3333	0,3298	

<i>Bewertungsklasse „Kosten“, Szenarium 4</i>						
	<b>Kenn- größe</b>	<b>Wert [Euro]</b>	<b>Punktwert</b>	<b>Gewichtung</b>	<b>gew. Punktw.</b>	<b>Summe</b>
<b>A1</b>	Hk	2516,08	0,7502	0,6667	0,5026	<b>0,7502</b>
	Mk	2500,00	0,7502	0,3333	0,2476	
<b>A2</b>	Hk	266,08	0,9752	0,6667	0,6534	<b>0,9752</b>
	Mk	250,00	0,9752	0,3333	0,3218	
<b>A3</b>	Hk	41,08	0,9977	0,6667	0,6685	<b>0,9977</b>
	Mk	25,00	0,9977	0,3333	0,3293	
<b>A4</b>	Hk	18,58	1,0000	0,6667	0,6700	<b>1,0000</b>
	Mk	2,50	1,0000	0,3333	0,3300	



<i>Bewertungsklasse „Zeit“</i>						
	<b>Kenn- größe</b>	<b>Wert [h]</b>	<b>Punktwert</b>	<b>Gewichtung</b>	<b>gew. Punktw.</b>	<b>Summe</b>
<b>S1</b>	$t_{HZ}$	0,5	1,0000	0,5714	0,5714	<b>0,7386</b>
	$t_A$	0,5	1,0000	0,1429	0,1429	
	$t_P$	3	0,0850	0,2857	0,0243	
<b>S2</b>	$t_{HZ}$	0,5	1,0000	0,5714	0,5714	<b>1,0000</b>
	$t_A$	0,5	1,0000	0,1429	0,1429	
	$t_P$	1,17	1,0000	0,2857	0,2857	
<b>S3</b>	$t_{HZ}$	280	0,0000	0,5714	0,0000	<b>0,0000</b>
	$t_A$	280	0,0000	0,1429	0,0000	
	$t_P$	3,17	0,0000	0,2857	0,0000	
<b>S4</b>	$t_{HZ}$	35	0,8766	0,5714	0,5009	<b>0,6390</b>
	$t_A$	35	0,8766	0,1429	0,1253	
	$t_P$	3,08	0,0450	0,2857	0,0129	

## 11.6 Rangfolgematrizen

<i>1 Stück</i>										
S	K	Z	Q	RK K	RK Z	RK Q	RK ZxK	RK ZxQ	RK KxQ	Av. RK
1	0,9862	0,7360	0,7300	2	2	1	2	1	1	2
2	0,9945	1,0000	0,8427	1	1	2	1	1	1	1
3	0,0000	0,0000	0,6029	4	4	3	4	2	2	4
4	0,7502	0,6390	0,0000	3	3	4	3	2	2	3

<i>10 Stück</i>										
S	K	Z	Q	RK K	RK Z	RK Q	RK ZxK	RK ZxQ	RK KxQ	Av. RK
1	0,9880	0,7360	0,7300	2	2	1	2	1	1	2
2	0,9961	1,0000	0,8427	1	1	2	1	1	1	1
3	0,9002	0,0000	0,6029	4	4	3	4	2	2	4
4	0,9752	0,6390	0,0000	3	3	4	3	2	2	3

<i>100 Stück</i>										
S	K	Z	Q	RK K	RK Z	RK Q	RK ZxK	RK ZxQ	RK KxQ	Av. RK
1	0,9881	0,7360	0,7300	4	2	1	2	1	1	2
2	0,9962	1,0000	0,8427	3	1	2	1	1	1	1
3	0,9902	0,0000	0,6029	2	4	3	2	2	1	4
4	0,9977	0,6390	0,0000	1	3	4	1	2	1	3

11 Anhang

---

<i>1000 Stück</i>										
<b>S</b>	<b>K</b>	<b>Z</b>	<b>Q</b>	<b>RK K</b>	<b>RK Z</b>	<b>RK Q</b>	<b>RK ZxK</b>	<b>RK ZxQ</b>	<b>RK KxQ</b>	<b>Av. RK</b>
1	0,9882	0,7360	0,7300	4	2	1	2	1	1	2
2	0,9962	1,0000	0,8427	3	1	2	1	1	1	1
3	0,9992	0,0000	0,6029	2	4	3	2	2	1	4
4	1,0000	0,6390	0,0000	1	3	4	1	2	1	3

## 11.7 Kalkulation Anlage

Beschreibung	Betrag
- Passivaktuatoren	711 x 38 € ≈ 27.000 €
- Aktuatoren zur Ansteuerung	16 x 1.500 € = 24.000 €
- Rahmen	14.000 €
- Verfahrenmotoren für Aktuatoren	4 x 2.500 € = 10.000 €
- PC	3.000 €
- Software Ansteuerung	5 Jahre x 1.000 € = 5.000 €
<b>Stempelfeld (2 x 2 m<sup>2</sup>) gesamt</b>	83.000 € x 2,5 = 207.500 €
+ Stromkosten Anlage	7.000 €
+ Interpolationsschicht inkl. Heizdraht	13.000 €
+ Stromkosten Heizmatten	74.000 €
+ Negativkontur	50.000 €
+ Wartungskosten	20.000 €
<b>Gesamt</b>	<b>371.500 €</b>

## 12 Studienarbeiten

Im Rahmen dieser Promotion sind die folgenden studentischen Arbeiten unter wissenschaftlicher Anleitung der Autorin entstanden:

- Deichselsberger, Nadine: Untersuchung des Kriechverhaltens von Polycarbonat zur Simulation der 3D-Umformung von Polycarbonatscheiben (Diplomarbeit, Hochschule München)
- Fischer, Ulrich: Entwicklung eines standardisierten Verfahrens zur Kenntlichmachung optischer Fehler in thermogeformten Polycarbonatscheiben (Diplomarbeit, Hochschule München)
- Langner, Christian Daniel: Konzeption und Aufbau der Anbindung einer Matte an eine bestehende Umformanlage (Bachelorarbeit, Hochschule München)
- Schormair, Bernhard: Untersuchung der Einflussfaktoren auf die Eigenspannungen von 3D-verformten Polycarbonatscheiben (Diplomarbeit, Hochschule München)
- Wagner, Jonathan: Konstruktion und Aufbau einer Rapid-Prototyping-Anlage zur Herstellung von gebogenen Polycarbonat-Scheiben (Diplomarbeit, Hochschule München)
- Zekoll, Jakob: Entwurf einer berührungslosen Temperaturregelung für einen Thermoformprozess (Diplomarbeit, Hochschule München)
- Zhang, Xiaoyan: Untersuchung der Oberflächenwellenbildung und der entstehenden Verzerrung bei der Kühlung von 3D-verformten Polycarbonatscheiben (Diplomarbeit, Hochschule München)