

**320**

**Sabine G. Zitzlsberger**

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

Sabine G. Zitzlsberger

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

Herbert Utz Verlag · München 2016

Forschungsberichte IWB  
Band 320

Ebook (PDF)-Ausgabe:  
ISBN 978-3-8316-7226-4 Version: 1 vom 31.05.2016  
Copyright© Herbert Utz Verlag 2016

Alternative Ausgabe: Softcover  
ISBN 978-3-8316-4573-2  
Copyright© Herbert Utz Verlag 2016

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.

## Forschungsberichte IWB

Band 320

Zugl.: Diss., München, Techn. Univ., 2015

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

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf fotomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH · 2016

ISBN 978-3-8316-4573-2

Printed in Germany  
Herbert Utz Verlag GmbH, München  
089-277791-00 · [www.utzverlag.de](http://www.utzverlag.de)

# 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 Löbl, 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

$\Omega$	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
$B_i$	-	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 Spannr Rahmens
$b_i$	-	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
$k$	-	Versuchszahl
$l$	$mm$	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 auflösbare 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,

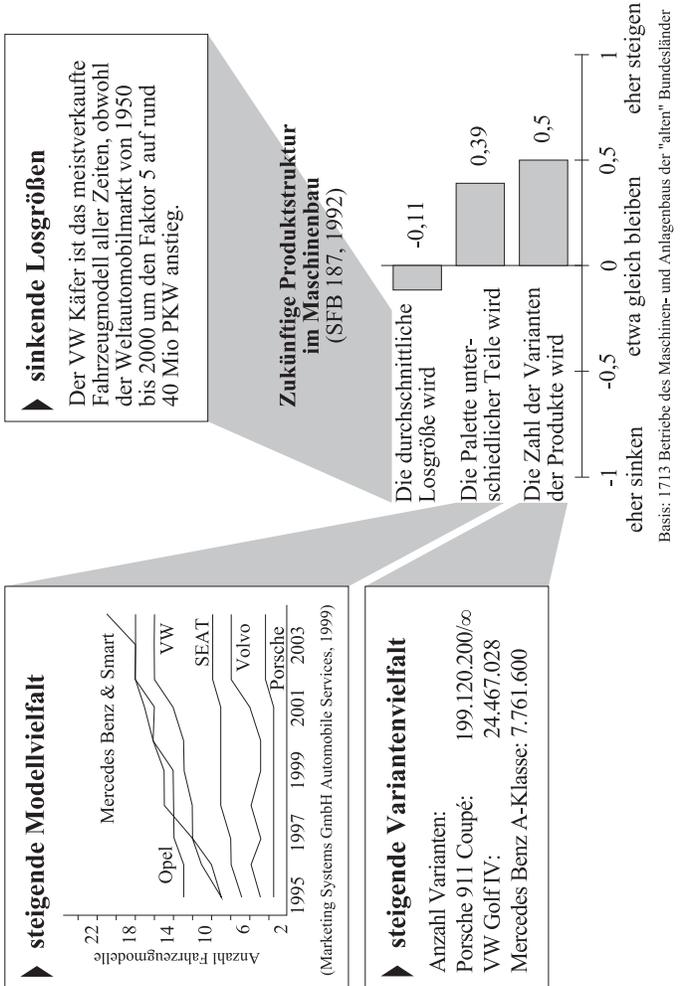


Abbildung 1.1: Wandel des Absatzmarktes nach GRÄSSLER (2004)

durch die ständige Weiterentwicklung des Verfahrens schließlich zur Herstellung von technischen Bauteilen geführt. Einen großen Teil des Anwendungsbereiches im Automobilsektor 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 bruchsichere Verglasung geschützt werden. Die hohe Schlagzähigkeit und Festigkeit der zwölf Millimeter dicken Polycarbonat-

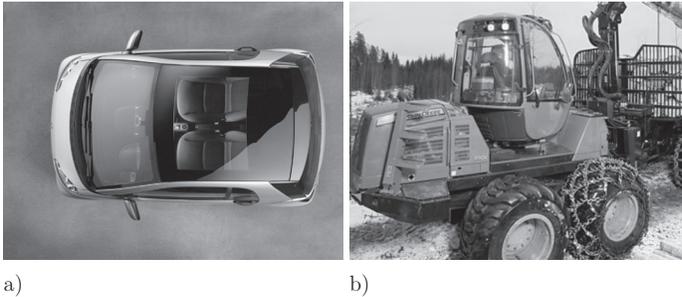


Abbildung 1.2: a) Substitution des Dachmoduls des Smart4Two durch PC (Quelle: Bayer MaterialScience) b) Verwendung von PC als Sicherheitsverglasung bei der neuen John Deere E-Serie (Quelle: materialsgate®)

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