

Technische Universität ILMENAU

**Fakultät Maschinenbau
Sektion Fertigungstechnik**

Dissertation

„Heat Molding“

**Eine Technologie zum ungerichteten Fassen optischer
Baelemente in Kunststofffassungen**

eingereicht von: Dipl.-Ing. J. Hofmann

eingereicht am: 16.09.2001

verteidigt am: 05.03.2002

Matrikel- Nr.: 24897

Erster Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. P. Wiesner
TU Ilmenau

Zweiter Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. G. Böswetter
FH Schmalkalden

Dritter Gutachter: Dr.-Ing. J. Müller
Carl Zeiss Jena GmbH

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, daß ich diese Arbeit selbst und ohne fremde Hilfe angefertigt habe und daß ich nur solche Hilfsmittel und Quellen benutzt habe, die in der Arbeit ausdrücklich angeführt sind.

Apolda, 05.06.01

Jens Hofmann

Kurzfassung

der Dissertation

„Heat Molding“

Eine Technologie zum ungerichteten Fassen optischer Bauelemente in Kunststofffassungen

Das 21. Jahrhundert gilt als das Jahrhundert des Photons. Um den Anforderungen an neue leistungsfähigere optische Systeme gerecht zu werden, spielen Technologien zur Herstellung optischer Baugruppen eine entscheidende Rolle. Die in dieser Dissertation diskutierte Montage-technologie „Heat Molding“ ist ein Beitrag zum Fassen optischer Bauelemente in Kunststofffassungen für Serienproduktion höherer Stückzahlen.

Für den Einsatz von Kunststoff als Fassungsmaterial werden die Voraussetzungen und Randbedingungen erläutert. Weiterhin erfolgt der statistische Nachweis der Prozesssicherheit und Prozessfähigkeit der Technologie. An einem realen Beispiel wird der wirtschaftliche Vorteil zum traditionellen Kleben erbracht.

Abstract

of the Dissertation Thesis

„Heat Molding“

A technology for the non-directional assemblage from optical components in plastic cylinders.

The 21st century is regarded as the century of the photon. To meet the demand for new stronger optical systems technologies for the production of optical units play a decisive role. The arrangement technology "Heat molding" discussed in this dissertation is a contribution to taking optical building sets in plastic barrels for the assembly line production of higher numbers.

The limiting conditions necessary for the use of plastic as a lens material basics are explained in this thesis. Further, more statistical proof of the process safety and the ability of the technology is furnished. At a real example the economical advantage over traditional adhesion is produced.

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

ABS.....	Acrylnitril-Butadien-Styrol
AQL.....	annehbare Qualitätslage
BT.....	Bauteil
CF.....	Kohlefaser (carbon fibre)
DMD.....	Digital Mirror Device
ET.....	Einzelteil
FDA.....	Food and Drug Administration
FEM.....	Finite Element Methode
GMP.....	Good Manufacturing Practice
HDT.....	Formbeständigkeitstemperatur
HF.....	Hochfrequenz
HK.....	Herstellkosten
IQ.....	Installation Qualification (Kalibrierung)
LA.....	Luftabstand
LCD.....	Liquid Crystal Device
LG.....	Losgröße / Lohngruppe
LQ.....	Lieferqualität
MFU.....	Maschinenfähigkeitsuntersuchung
MTF.....	Modulation Transfer Function (Modulationsübertragung)
OEG.....	obere Eingriffsgrenze
OQ.....	Operation Qualification (MFU)
OTG.....	obere Toleranzgrenze
PA.....	Polyamid
PC.....	Polycarbonat
PE.....	Polyethylen
PFU.....	Prozeßfähigkeitsuntersuchung
PMMA.....	Polymethylmethacrylat
POM.....	Acetalcopolymerisat
PP.....	Polypropylen
ppm.....	Prozent Pro Million
PQ.....	Performance Qualification (PFU)
PS.....	Polystyrol
PTFE.....	Polyetrafluorethylen (Teflon)
QL.....	Qualitätslage
QM.....	Qualitätsmanagement
RS.....	Ringschneide
SFG.....	Säulenführungsgestell
SPC.....	statistische Prozeßkontrolle
QRK.....	Qualitätsregelkarte
UEG.....	untere Eingriffsgrenze
US(B).....	Ultraschall(bördeln)
UTG.....	untere Toleranzgrenze
VSR.....	Vorschraubring
WZ.....	Werkzeug

VERZEICHNIS DER VERWENDETEN FORMELZEICHEN

Symbol	Physikalische Größe	Wert	Bemerkung	[Einheit]
α	Ausdehnungskoeffizient			[K ⁻¹]
α_L	Fasenwinkel Linse	45	$\alpha_L = \alpha_S$	[°]
α_S	Fasenwinkel Stempel	45	$\alpha_S = \alpha_L$	[°]
$\beta_{(n)}$	Sehntangentenwinkel (STW)		$b_{(n)} = \frac{1}{2} \arccos \left(1 - \frac{\varnothing L_{F(n)}^2}{2R_{U(n)}^2} \right)$	[°]
γ	Winkel Montageschräge (-hilfe)	15		[°]
χ	Änderungsfaktor		$c = \frac{\text{Dickenänderung}}{\text{Längenänderung}} \cong \frac{1}{4}$	[]
ε	Verformungsfähigkeit (Umformverhalten)			[]
δ	Festigkeit			[MPa]
φ	log. Formänderung (Umformgrad)			[]
λ	Wärmeleitfähigkeit			$\left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$
ϑ	Temperatur			[°C]
ϑ_U	Umformtemperaturkoeffizient		$J_B = 1 - a_{St200^\circ C} \cdot \Delta J$	[K]
ζ	Dichte			$\left[\frac{kg}{m^3} \right]$
μ	Reibungskoeffizient (Reibungszahl)			[]
$\varnothing A_{1(n)}$	Durchmesser 1 Aufnahme ¹			[mm]
$\varnothing A_{2(n)}$	Durchmesser 2 Aufnahme			[mm]
$\varnothing A_{F(n)}$	Durchmesser Freistich Aufnahme			[mm]
$\varnothing A_{L(n)}$	Durchmesser Luftloch Aufnahme	2		[mm]
$\varnothing A_{Z1(n)}$	Durchmesser 1 Zentrierung Aufnahme			[mm]
$\varnothing A_{Z2(n)}$	Durchmesser 2 Zentrierung Aufnahme			[mm]
$\varnothing F_{F(n)}$	Durchmesser Freistich Fassung		$\varnothing F_{F(n)} \geq F_{G(n)} + 5$	[mm]
$\varnothing F_{G(n)}$	Durchmesser Grat Fassung		$\varnothing F_{G(n)} = \varnothing L_{(n)} + 2b_G$ $\varnothing F_{G(n)} = \varnothing F_{L(n)} + 2b_G$ $\varnothing F_{G(n)} = \varnothing S_{\alpha(n)} - s_{l(n)}$	[mm] [mm] [mm]
$\varnothing F_{L(n)}$	Durchmesser Linsensitz Fassung (Linse n)			[mm]
$\varnothing F_{O(n)}$	Freier Durchmesser Fassung (Linse n)			[mm]
$\varnothing F_{Z(n)}$	Durchmesser Zentrierung der Fassung			[mm]
$\varnothing L_{(n)}$	Linsendurchmesser			[mm]
$\varnothing L_{F(n)}$	Durchmesser Linse am Ende der Fase		$\varnothing L_{F(n)} = \varnothing L_{(n)} - 2 \cos \alpha_{L(n)} l_F$ $\varnothing L_{F(n)} = \varnothing S_{\beta(n)}$	[mm] [mm]
$\varnothing S_{\alpha(n)}$	Durchmesser Winkel α Stempel		$\varnothing S_{\alpha(n)} = \varnothing L_{(n)} + 2(s_{l(n)} + b_G)$ $\varnothing S_{\alpha(n)} = \varnothing F_{G(n)} + 0,15$	[mm] [mm]
$\varnothing S_{\beta(n)}$	Durchmesser Winkel β Stempel		$\varnothing S_{\beta(n)} = \varnothing L_{F(n)}$	[mm]

¹ n kennzeichnet die Nummer der Linse im Objektiv, ausgangsseitig beginnend

Symbol	Physikalische Größe	Wert	Bemerkung	[Einheit]
$\varnothing S_{A(n)}$	Außendurchmesser Stempel		$\varnothing S_{A(n)} - \varnothing S_{\alpha(n)} \geq 4$	[mm]
			$\varnothing F_{F(n)} - \varnothing S_{A(n)} = 2s_{1(n)} \geq 1$	[mm]
$\varnothing S_{F(n)}$	Durchmesser Freistich Stempel			[mm]
$\varnothing W$	Durchmesser Wärmespeicher	50		[mm]
μ	Reibungskoeffizient			[]
A	Amplitude			[μ m]
A_0	Stempeloberfläche			[mm ²]
A_D	Durchtrittsfläche		$A_D = f(\varnothing L, b_G)$	[mm ²]
A_{eff}	effektive Stempeloberfläche			[mm ²]
A_{max}	maximale Amplitude			[μ m]
A_S	Stempelfläche (Querschnittsfläche)			[mm ²]
A_{soll}	einzustellender Amplitudenwert			[μ m]
b_G	Gratbreite	0,5		[mm]
c	spezifische Wärmekapazität			$\left[\frac{J}{kg \cdot K} \right]$
dr2	delay reset time			[s]
E	Elastizitätsmodul			[GPa]
F_N	Normalkraft			[N]
F_R	Reibungskraft			[N]
$h_{A1(n)}$	Höhe 1 Aufnahme (Gesamthöhe)			[mm]
$h_{AF(n)}$	Höhe Freistich Aufnahme			[mm]
$h_{AZ1(n)}$	Höhe 1 Zentrierung Aufnahme			[mm]
$h_{AZ2(n)}$	Höhe 2 Zentrierung Aufnahme			[mm]
H_G	Gesamthöhe Umformgrat	0,8	$H_G = h_{G1} + h_{G2}$	[mm]
H_{G1}	Höhe 1 Grat (Umformhöhe)	0,5		[mm]
H_{G2}	Höhe 2 Grat (Auslaufhöhe)	0,3		[mm]
$h_{F(n)}$	Höhe Fassung (Linse n)			[mm]
$h_{F1(n)}$	Höhe 1 Fassung (Gesamthöhe Fassung)			[mm]
$h_{F2(n)}$	Höhe 2 Fassung			[mm]
h_H	Höhe Heizung (Heizband)	25		[mm]
h_I	Höhe Isolation	15	Parallelität $\pm 0,005$	[mm]
h_K	Höhe Kühlkörper	30	Parallelität $\pm 0,005$	[mm]
h_M	Höhe Montageschräge (-hilfe)			[mm]
$h_{S1(n)}$	Höhe 1 Stempel			[mm]
h_{S2}	Höhe 2 Stempel	10		[mm]
h_{S3}	Höhe 3 Stempel	9		[mm]
$h_{SF(n)}$	Höhe Freistich im Stempel			[mm]
h_W	Höhe Adapter/Wärmespeicher	40		[mm]
h_{WA}	Gesamthöhe Werkzeugaufnahme	85	$h_{WA} = h_W + h_I + h_K$	[mm]
	Parallelität- und Lauftoleranz	0,01		[mm]
h_Z	Öffnungshöhe im Werkzeug		$h_Z \geq h_{WA} + h_F + h_{S1(n)} + h_{A1(n)}$	[mm]
K_P	Preßkraft Presse	1000	± 20	[N]
l_ϑ	Tiefe der eingeleiteten Temperatur			[mm]
$l_{F(n)}$	Fasenlänge	0,4	$\pm 0,1$	[mm]

Symbol	Physikalische Größe	Wert	Bemerkung	[Einheit]
$R_{A(n)}$	Krümmungsradius der Linse auf Aufлагeseite (Toleranz relative Flächenkipfung]		$R_{A(n)} \leq R_{U(n)}$	[mm]
R_a	Rauhtiefe			[μ m]
$R_{U(n)}$	Krümmungsradius der Linse auf Umformseite (Toleranz relative Flächenkipfung]		$R_{A(n)} \leq R_{U(n)}$	[mm]
R_z	Rautiefe			[μ m]
$s_{1(n)}$	Spaltmaß 1 Fassung < - > Stempel	0,15	$s_{1(n)} = \frac{\varnothing S_{a(n)} - \varnothing F_{G(n)}}{2}$	[mm]
$s_{2(n)}$	Spaltmaß 2 Fassung < - > Stempel	$\geq 0,5$	$s_{2(n)} = \frac{\varnothing F_{F(n)} - \varnothing S_{A(n)}}{2}$	[mm]
T_G	Glastemperatur			[°C]
T_O	Obere Toleranzgrenze		[spezifisch abhängig]	
T_U	Untere Toleranzgrenze		[spezifisch abhängig]	
$t_{p(n)}$	Prozeßzeit		Stellgröße $t_{p(n)} = d r_2 + t_v$	[s]
t_v	Haltezeit -> Drossel X		Stellgröße	[s]
t_r	Rüstzeit			[s]
t_e	Einzelteilzeit			[s]
ES	Sekantenmodul			[]
$\varepsilon_{zul.}$	zulässige Dehnung			[]
μ	Reibungszahl			[]
b/h	Seitenverhältnis am Querschnitt			[]
f	Hinterschnitt			[mm]
α_1	Fügewinkel			[°]
D	Linsendicke			[mm]
d	Linsendurchmesser			[mm]
r_o	Radius obere Fläche			[mm]
r_u	Radius untere Fläche			[mm]
e	Ringschneidenbreite			[mm]
β	Ringschneidenwinkel			[°]
Δl	Höhendifferenz zwischen Ringschneide und Ein- spannstelle			[mm]
γ	Sehnentangentenwinkel (STW)	< 45		[°]
l	Hakenlänge			[mm]
b	Hakenbreite			[mm]
h	Hakentiefe			[mm]
α_2	Demontagewinkel			[°]
η_F	Umsetzungsfaktor Fügewinkel			[]
η_H	Umsetzungsfaktor Haltewinkel			[]
Q	Auslenkkraft			[N]
F_F	Montagekraft			[N]
F_H	Demontagekraft			[N]

Vorwort

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit in der Carl Zeiss Jena GmbH in Jena.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Klaus Freiberg, dem Leiter der Komponentenmontage, der mich bei der Realisierung des Projektes stets unterstützte und mir auch über das Ziel dieser Arbeit hinaus nicht nur ständiger Motor und Rettungsanker, sondern auch Vorbild war.

laude adnin helvetius - Aktivität ist nun mal die Mutter des Erfolgs

Unmöglich wäre die Arbeit ohne das Kollektiv der Arbeitsvorbereitung der Komponentenmontage des Servicebereiches Produktion gewesen, welches durch die fachlich wie menschlich offenen Diskussionen die Türen für den Erfolg dieses Projektes geöffnet hat. Für ihre Nachsicht und unermüdlige Hilfe neben ihrem Tagesgeschäft möchte ich noch einmal der ganzen Truppe, insbesondere den Herren Manfred Kreßer und Uwe Poitz, danken. Dasselbe gilt natürlich für alle Diplomanden und Praktikanten, die nicht nur während der Arbeitszeit die Abteilung bereicherten und selbständig alle Mittel und Wege erschlossen, um das Unmögliche möglich zu machen.

Überhaupt möchte ich mich bei Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. P. Wiesner, dem Inhaber des Fachbereichs für Fertigungstechnik am Institut für Fertigung der Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Ilmenau bedanken, welcher dieses Projekt unterstützt und mich motiviert und betreut hat. Für seine initiiierende und finale Unterstützung danke ich ganz besonders dem Korreferenten Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. G. Böswetter, dem Inhaber des Fachbereichs Maschinenbau an der FH Schmalkalden.

Last but not least gilt mein ganz besonderer Dank meinem Vater, der mir sowohl fachlich als auch menschlich stets ein Vorbild war und ohne dessen Unterstützung das Projekt wohl kaum diesen Erfolg gehabt hätte.

Carpe diem – nutze den Tag

In der Zeit, in der ich weder der Industrie noch der Forschung zur Verfügung stand, gab mir meine Familie Rückendeckung und Nahrung in vielerlei Hinsicht. Danke für alles.

Inhaltsverzeichnis

	EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG.....	II
	KURZFASSUNG	III
	ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	IV
	VERZEICHNIS DER VERWENDETEN FORMELZEICHEN	V
	VORWORT.....	VIII
	INHALTSVERZEICHNIS.....	IX
1	EINLEITUNG.....	1
2	STAND DER TECHNIK.....	3
2.1	VERGLEICHSBASIS GEKLEBTE ALUMINIUMFASSUNG	3
2.1.1	BEWERTUNGSHILFSMITTEL WERTZUWACHSKURVE	5
2.2	TANGIERENDE VERFAHREN „ULTRASCHALLBÖRDELN“ UND „CAULKING“	8
2.2.1	CAULKING (HEAT PRESSING)	8
2.2.2	ULTRASCHALLBÖRDELN (USB)	9
3	KUNSTSTOFF ALS FASSUNGSMATERIAL.....	14
3.1	ANFORDERUNGSPROFIL.....	14
3.1.1	MATERIALSPEZIFISCHE EIGENSCHAFTEN	15
3.1.2	ERZIELBARE MAßHALTIGKEIT BEIM SPRITZGIEßEN	16
3.2	KOSTENASPEKTE.....	23
3.3	PROBLEME, DIE SICH AUS DEN CHARAKTERISTISCHEN EIGENSCHAFTEN DES KUNSTSTOFFES ERGEBEN	24
3.4	FAZIT:.....	26
3.5	KONVENTIONELLE FASSUNGSMETHODEN BEIM EINSATZ VON KUNSTSTOFF	30
3.6	SCHNAPPVERBINDUNGEN (SNAP- IN) ALS FASSUNGSTECHNOLOGIE	30
3.6.1	ALLGEMEINES	30
3.6.2	BERECHNUNGSGRUNDLAGEN FÜR SCHNAPPVERBINDUNGEN ALS FASSUNGS- TECHNOLOGIE.....	33
4	DAS "HEAT MOLDING"	34
4.1	DEFINITION UND EINORDNUNG DER MONTAGETECHNOLOGIE.....	34
4.2	GEOMETRISCHE VORBETRACHTUNGEN	35
4.2.1	DER UMFORMGRAT.....	35
4.2.2	DER STEMPEL.....	37

4.2.3	DER UMFORMWINKEL α	39
4.2.4	DIE FASSUNG.....	40
4.2.5	DAS ZU FASSENDE OPTISCHE BAUELEMENT	42
4.3	THERMODYNAMISCHE VORBETRACHTUNGEN	44
4.3.1	TEMPERATURBEREICHE BEI AMORPHEN KUNSTSTOFFEN	44
4.3.1.1	TEMPERATURBEREICH 1 BIS 2 (-100 ° C BIS 130 ° C)	45
4.3.1.2	TEMPERATURBEREICH 2 BIS 3 (130 ° C BIS 150 ° C)	45
4.3.1.3	UMFORMTEMPERATURBEREICH 3 BIS 4 (150 BIS 230 ° C).....	46
4.3.1.4	URFORMTEMPERATURBEREICH AB 4 (ÜBER 230 ° C)	46
4.3.2	DIE IDEALE UMFORMTEMPERATUR	47
4.3.3	DER THERMODYNAMISCHE ABLAUF.....	47
4.3.3.1	DIE WÄRMEKAPAZITÄT DES WERKZEUGES	47
4.3.3.2	DER WÄRMETRANSPORT	48
4.4	DIE 5 PHASEN DES "HEAT MOLDING"	50
4.4.1	PHASE 1 - ERWÄRMEN.....	52
4.4.2	PHASE 2 - UMLEGEN	52
4.4.3	PHASE 3 - ANLEGEN	53
4.4.4	PHASE 4 – RELAXATION (FIXIEREN / ENTSPANNEN)	54
4.4.5	PHASE 5 - ABKÜHLEN	54
4.5	TRIBOLOGISCHE WECHSELWIRKUNGEN ZWISCHEN STEMPEL UND MFORMGRAT....	55
4.5.1	DAS STEMPELGRUNDMATERIAL.....	55
4.5.2	KONTAKTVORGÄNGE IN DER UMFORMZONE	57
4.5.3	CHEMISCHE BINDUNGEN	57
4.5.4	REIBUNG ZWISCHEN UMFORMGRAT UND STEMPEL	58
4.5.5	MIKROSKOPISCHE OBERFLÄCHENGESTALT	59
4.5.6	MATERIALAUSWAHL DER STEMPELBESCHICHTUNG:	60
4.5.7	VERSCHLEIß AM STEMPEL	63
4.5.8	FAZIT.....	65
5	FERTIGUNGSEINRICHTUNG MOLDINGANLAGE	66
5.1	DAS SÄULENFÜHRUNGSGESTELL.....	67
5.2	DIE THERMISCHE EINHEIT	68
5.3	DIE PRESSE.....	69
5.4	DIE WERKSTÜCKAUFNAHME.....	70
5.5	WERKZEUGWECHSEL / UMRÜSTEN	73

6	QUALITATIVE UND QUANTITATIVE EINSCHÄTZUNG DES PROZESSES	74
6.1	QUALITATIVE EINSCHÄTZUNG	74
6.1.1	PROZEFÄHIGKEIT/PROZEßSICHERHEIT/ REPRODUZIERBARKEIT	74
6.1.2	KENNZEICHEN VON PROZESSEN	75
6.1.3	STRUKTUR DER EINFLUßGRÖßEN (ISHIKAWA DIAGRAMM).....	77
6.1.4	BESCHREIBENDE EIGENSCHAFTEN DER GEFASSTEN BAUGRUPPE	79
6.1.5	UMSETZUNG.....	79
6.1.5.1	BEWERTUNG DER EINFLÜSSE.....	79
6.1.5.2	RISIKOBETRACHTUNGEN	82
6.1.5.3	UNTERSUCHUNG DER PROZEFÄHIGKEIT	82
6.1.5.4	KALIBRIERUNG.....	83
6.1.5.5	BESCHREIBUNG DER BEWERTUNGSKRITERIEN	83
6.1.5.6	HERSTELLUNG DES PRÜFLOSES	84
6.1.5.7	TESTPLAN ZUR PROZEFÄHIGKEITSUNTERSUCHUNG (PFU)	85
6.1.5.8	AUSWERTUNG DER TESTERGEBNISSE.....	86
6.1.5.9	„WORST CASE“ BETRACHTUNGEN	88
6.1.6	ABSICHERUNG DER PROZEFÄHIGKEIT	88
6.1.7	MÖGLICHKEIT ZUR AUTOMATISIERUNG	91
6.2	QUANTITATIVE EINSCHÄTZUNG DER TECHNOLOGIE	92
7	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....	96
7.1	HANDLUNGSBEDARF UND VERBESSERUNGSPOTENTIAL BEIM „HEAT MOLDING“ ...	96
7.2	ALLGEMEINE TRENDS IN DER FASSUNGSTECHNOLOGIE	97
	LITERATURVERZEICHNIS	100
ANHANG 1	VERZEICHNIS DER VERWENDETEN GLEICHUNGEN	A - 1
ANHANG 2	TABELLEN- UND BILDERVERZEICHNIS	A - 4

1 Einleitung

„Vor 100 Jahren erkannte Max-Planck die `Körnigkeit` der Strahlung, deren Quantennatur, und Albert Einstein erklärte 1905 den photoelektrischen Effekt mit Hilfe der Quantennatur des Lichtes – das Photon war `geboren`. Es blieb ein ´unerzogenes Kind` bis es gelang, im Gleichtakt schwingendes, d.h. kohärentes Licht zu erzeugen. Die Nutzung solcher `domestizierenden` Photonen hat die Informations- und Kommunikationstechnik revolutioniert. Der Transport, die Speicherung und die Darstellung der in unserer Informationsgesellschaft täglich anfallenden Datenmengen wäre ohne die Anwendung optischer Technologien² schon heute nicht mehr zu bewältigen. In Zukunft wird sich dieser Trend noch verstärken. Wer heute die Weichen für die optischen Technologien richtig stellt, wird an dem zu erwartenden großen Wachstum und damit an der Generierung neuer Arbeitsplätze teilhaben.“ /1/

Die gleichfalls härter werdende Marktsituation (Sättigung, Konkurrenzpräsenz, Produktlebenszyklen) stellt die Frage nach der Leistungsfähigkeit der existierenden Fertigung. Daraus resultieren neue Anforderungen an die Fertigungstechnologien.

Für Unternehmen, die sich auf dem Weltmarkt behaupten wollen, ist der Wandel von traditionellen Strukturen (Taylorismus) zum „fraktalen Unternehmen“ /3/ unumgänglich. Die mit der Fertigungssegmentierung einher gehende Reorganisation der Produktion fordert neue Technologien mit:

- Möglichkeiten zur gleichzeitigen Produktivitäts- und Flexibilitätssteigerung,
- der Entkopplung des Menschen vom Produktionsprozeß sowie
- einer geringen Bedeutung des Menschen von Erfahrungskurveneffekten. /3/

Bei den in dieser Arbeit betrachteten Technologien handelt es sich ausschließlich um ungerichtete Fassungstechnologien. Deren Aufgabe bei der Montage ist es, die Einzelkomponenten zu fügen, ohne einzelne Qualitätsmerkmale zu beeinflussen. /54/57/ Zur Bewertung werden hauptsächlich die Vergleiche der montierten Einzelkomponenten vor und nach der Fixierung herangezogen.

Traditionelle Fassungstechnologien wie Kleben oder Fassen mit Vorschraubring sind zur ungerichteten Montage von Objektiven speziell für die Großserienproduktion mit Stückzahlen über 50.000 Stück / Jahr ungeeignet.

² „Die optischen Technologien umfassen die Gesamtheit physikalischer, chemischer und biologischer Naturgesetze und Technologien zur Erzeugung, Verstärkung, Formung, Übertragung, Messung und Nutzbarmachung von Licht“ /2/

Sie wurden in Europa vorzugsweise unter den Gesichtspunkten der maximal erreichbaren Genauigkeit betrachtet und weiterentwickelt. /5/6/7/8/9/36/38/39/40/41/45/57/ Fragen zu Schwerpunktthemen der Serienproduktion, wie

- Prozeßsicherheit / Reproduzierbarkeit
- Kosten – Stückzahl Zusammenhänge,
- Anforderungen an Personalqualifikation,
- Automatisierfähigkeit oder
- Geschwindigkeit bei der Umsetzung für neue Produkte bleiben offen.

Diese Anforderungen konnten nur mit neuen Wegen in der Fassungstechnologie erreicht werden. Dabei gab es zwei Schwerpunktthemen:

- der Einsatz von urgeformten Fassungen und
- die Entwicklung einer neuen Fassungstechnologie.

Das Ziel der Arbeit ist die Entwicklung, Umsetzung und Integration einer Montagetechnologie zum Fassen optischer Bauelemente. Die Ausführungen orientieren sich an den Anforderungen eines Produktionsvolumens über 50.000 Stück / Jahr. Am Beispiel eines Objektivs zur Projektion digitaler Informationen wird die entwickelte Fassungstechnologie „Heat Molding“ erläutert.

Neben den Voraussetzungen für einen erfolgreichen Einsatz dieser Technologie in weiteren Produkten, wird die Maschinenfähigkeit der entwickelten Anlage und die Prozeßfähigkeit in der laufenden Produktion nachgewiesen. Außerdem erfolgt der wirtschaftliche Vergleich zum konventionell hergestellten Produkt.

2 Stand der Technik

Die Technologien Kleben und Fassen mittels Vorschraubring und mit Einschränkungen das Gratfassen dominieren in Europa die Herstellung optischer Baugruppen. Gleichzeitig überwiegen Aluminium und Messing als Material der größtenteils spanend hergestellten Fassungen /1/5/6/7/33/36/37/39/40/41/43/45/57/. Ihre entscheidenden Nachteile beim Einsatz in der Stückzahlproduktion sind sowohl im physikalischen Grundprinzip als auch in der Arbeitsorganisation begründet. Zusätzlich wird deren Automatisierung erschwert, da die Prozeßfähigkeit in der Qualifikation des Arbeitsvorbereiters bzw. Monteurs und nicht in der Technologie begründet ist.

Tabelle 2.1 zeigt für das ungerichtete Fassen von Linsen die wichtigsten Kenngrößen und realisierbaren Werte klassischer Technologien. Da die Verfahren Kleben sowie Fassen mittels Vorschraubring derzeit am weitesten verbreitet sind, beschränkt sich Tabelle 2.1 auf sie. Die Bewertung basiert auf einem Produktionsvolumen von 50.000 Objektiven pro Jahr.

2.1 Vergleichsbasis geklebte Aluminiumfassung

Eine neue Technologie läßt sich am einfachsten und unter Restriktionen am sichersten an einem realen Beispiel evaluieren. Dieses sollte unter Serienbedingungen mit beiden Technologien hergestellt und nach objektiven Kriterien bewertet werden. /46/

Als Vergleichsbasis für das „Heat Molding“ wurde die Aluminiumfassung für einen Datenprojektor ausgewählt.



Bild 2.1 Vergleichsbasis Aluminium Vorderfassung mit Linsen

Bewertungskriterien	Entscheidungsparameter	ungerichtetes einkleben in gedrehte eloxierte Aluminiumfassung mit UV-Klebstoff	Fassen mit Vorschraubring in gedrehte eloxierte Aluminiumfassung
Funktionale Kenngrößen und Leistungsgrenzen	Toleranzgerade IT [μm]	≤ 6	≤ 6
	Krümmungsmittelpunktsablage Δh	$\leq 5 \mu\text{m}$	$\leq 5 \mu\text{m}$ (stark radienabhängig) /5/
	relative Flächenkipfung ($\varnothing \geq 30 - 50 \text{ mm}$)	$\leq 10'$	$\leq 20'$ (trotz definiertem Anzugsmoment und ordnungsgemäßer Ringschneide)
	Passeänderung	$\leq \lambda/10$	$\leq \lambda/10$
	Füllfassungstauglich	ja / nein	ja
	realisierbare Durchmesserbereiche	1 – 200 mm	10 – 200 mm
	Toleranz Linsendicke	Ausgleich möglich	Ausgleich möglich
	Dichtungsfunktion	ja	nein
	Vibrationsfestigkeit	ja	nein
	Änderung der Spannungsdoppelbrechung	$\leq 0,5 \text{ nm}$	ja
	Ausdrückkräfte	$\approx 70 \text{ N}$	$\geq 150 \text{ N}$
	Temperatureinsatz	- 40 ...+ 70°C	- 40 ...+ 70°C
	Montageparameter	Rüstzeit t_r	20 min
Einzelteilzeit t_e		10 s	4 s
Losgrößen		begrenzt	unbegrenzt
Aufwand bei Typänderung		gering	entfällt bei Standardteilen
Kosten Anlage Hilfsmittel Werkzeuge Vorrichtung	HK Fassung		Mehrkosten durch Gewinde
	HK Zusatzteile	entfällt	je VSR ca. 1,- DM
	HK Hilfsstoffe	je nach Klebstoff	evtl. Sicherungslack
	Nebenkosten		
	WZ Standzeit	500 Stück	kein Verschleiß erkennbar
Personalaufwand	Qualifikation (LG)	05	05
Sonstiges	Recycling	Nein: Klebstoff!	Ja: sehr aufwendig
	Reparatur	Ja: sehr aufwendig	Ja
	zusätzlich notwendige Prozesse	Vorbereitung; Aushärten; Handling	nein (evtl. Sicherungslack)
	Platzbedarf (konstruktiv)	$\leq 1 \text{ mm auf } \varnothing$	$\geq 2 \text{ mm auf } \varnothing$
	Kunststofflinsen	ja	ja
	Probleme	Viskosität Klebstoff erschwert SPC Klebstoff bringt beim Aushärten immer Spannungen auf Linse	Verkippen der Linse ist abhängig vom Radius Lagesicherung des Vorschraubrings eventuell durch Klebepunkt erforderlich

Tabelle 2.1 Bewertungskriterien an den Beispielen Kleben und Fassen mit Vorschraubring /57/66/67/68/

Die zum Vergleich herangezogene Fassung wird aus einem Aluminium- Halbzeug gedreht. Nach dem Eloxieren erfolgt eine Schwärzung zur Streulichtminimierung.

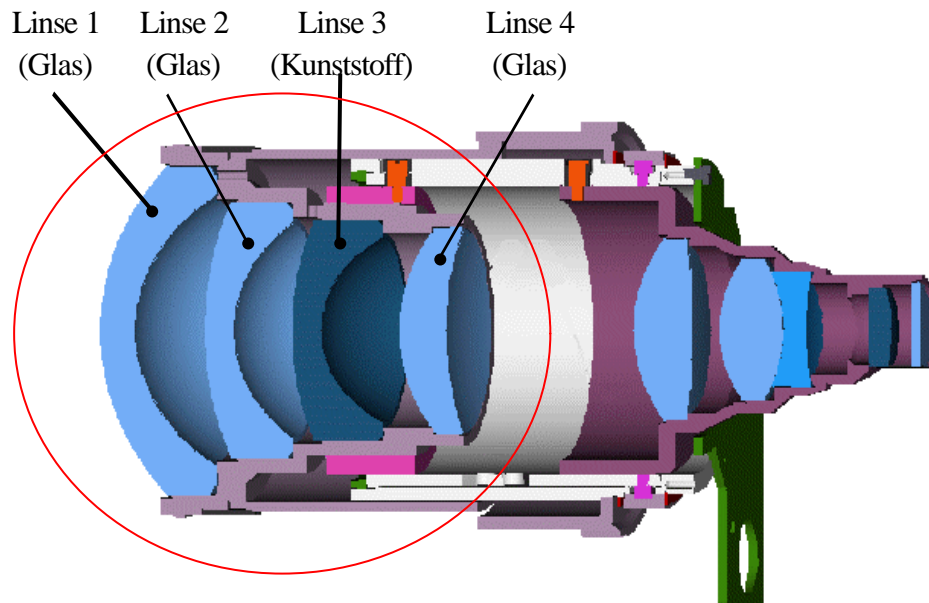


Bild 2.2 zur Bewertung herangezogenes Objektiv

Die optischen Eigenschaften werden von 4 konkav konvexen Linsen definiert (siehe Bild 3.9). Die Linse ① ist eine sphärische Glaslinse mit 43 mm Durchmesser. Linse ② ist eine sphärische Meniskuslinse aus Kunststoff, mit einem Durchmesser von 46,65 mm. Linsen ③ und ④ bestehen aus Glas und haben einen Durchmesser von 55 mm bzw. 71 mm. Die Anforderungen hinsichtlich der Zentrierung liegen bei 50 µm und für die relative Flächenkipfung sind 10' zu unterschreiten. /93/

Die Linsen werden in die Aluminiumfassung mit einem UV- sensibilisierten Klebstoff nacheinander eingeklebt und durch 90 minütige UV- Bestrahlung spannungsarm fixiert.

Für die gefügten Baugruppen sind die wichtigsten meßbaren Qualitätskriterien (/106/ ... /109/)

- die Fixierung unter Einsatz- und Transportbedingungen,
- der Luftabstand,
- die relative Flächenkipfung und die Feinpasse.

2.1.1 Bewertungshilfsmittel Wertzuwachskurve

Prozesse sind dadurch gekennzeichnet, daß mindestens eine, in der Regel aber mehrere Ursachen zusammenwirken, um ein Ergebnis zu erzeugen. Um Prozesse handhabbar zu machen, muß man sie in einzelne Prozessschritte zerlegen. Charakteristisch für jeden Prozessschritt ist, daß an seinem Beginn mehrere meßbare Eingaben stehen und an seinem Ende meßbare Ausgaben. Demzufolge kann auch eine Werterhöhung gemessen werden.

Ein effizientes Werkzeug zur Analyse ist die **Wertzuwachskurve**. Im Rahmen des operativen Controlling dient sie der Identifikation von Durchlaufzeit- und Bestandskostenpotentialen. Darüber hinaus gibt dieses Instrument wertvolle Aussagen über Rationalisierungserfolge hinsichtlich Produktivität und Kosten. Unter Anwendungsgesichtspunkten besteht ein weiterer wesentlicher Vorteil der Wertzuwachskurve darin, daß die notwendigen Daten (Kalkulationsstücklisten und Arbeitspläne) in der Regel in den Unternehmen schnell verfügbar sind. /3/

Auszugsweise sind in nachfolgender Tabelle 2.2 alle zur Erstellung der Wertzuwachskurve notwendigen Daten aufgelistet.

Bewertungskriterien	Entscheidungsparameter	Kleben in gedrehte eloxierte Aluminiumfassung mit UV-Klebstoff
Montageparameter	Rüstzeit t_r	20 [min]
	Verteilzeit t_v	45 [min]
	Einzelteilzeit t_e	30 [s]
	Losgröße	35 [Stück]
	Aufwand bei Typänderung	je Palette 6.950,- [DM]
Kosten	HK Fassung	32,95 [DM]
	HK Linse 4	27,41 [DM]
	HK Linse 3	11,09 [DM]
	HK Linse 2	30,67 [DM]
	HK Linse 1	51,67 [DM]
Personalaufwand	Stundenlohn	85 [DM / h]
	Qualifikation (LG) *	05 []

Tabelle 2.2 Bewertungskriterien an der „Aluminiumfassung geklebt“ /117/

Aufbereitet für die Darstellung im Wertzuwachskurve ergibt das folgende Werte (Tabelle 2.3).

	Nr.	Linse [DM]	Aluminium Fassung [DM]	Montage [DM]	Fixierzeit [h: min]	Brachzeit [h: min]	kum. Kosten [DM]	Nach [h: min]
1	4014	27,41	32,95				60,36	0:00
2				0,70	01:30	0:06	61,06	1:36
3	4013	11,09	0,00				72,15	1:36
4				0,70	01:30	0:06	72,85	3:12
5	4012	30,67	0,00				103,52	3:12
6				0,70	01:30	0:06	104,22	4:38
7	4011	51,67	0,00				155,89	4:38
8				0,70	01:30	0:06	156,59	6:14

Tabelle 2.3 Kosten der „Aluminiumfassung geklebt“ /117/

Daraus kann das Wertzuwachskurve erstellt werden (Bild 2.2).

Die drei Hauptziele, die eine Optimierung unter dem Gesichtspunkt Stückzahlbereich ≥ 50.000 Stück /Jahr implementieren, sind:

Einsparpotential 1 **HK Komponente** bezieht sich hier auf den Einsatz von Kunststoff als Fassungsmaterial. Auszunutzende Vorteile liegen in der Herstellung sowie im Materialpreis.

Einsparpotential 2 ist die Steigerung der **Produktivität** durch Reduzierung der Einzelbearbeitungszeit t_E . Diese wirkt sich nicht nur auf jede Fassung sondern auf jede gefasste Linse aus. Das heißt im angeführten Beispiel liegt die Einsparung mit Faktor 4 zur Fassungsstückzahl.

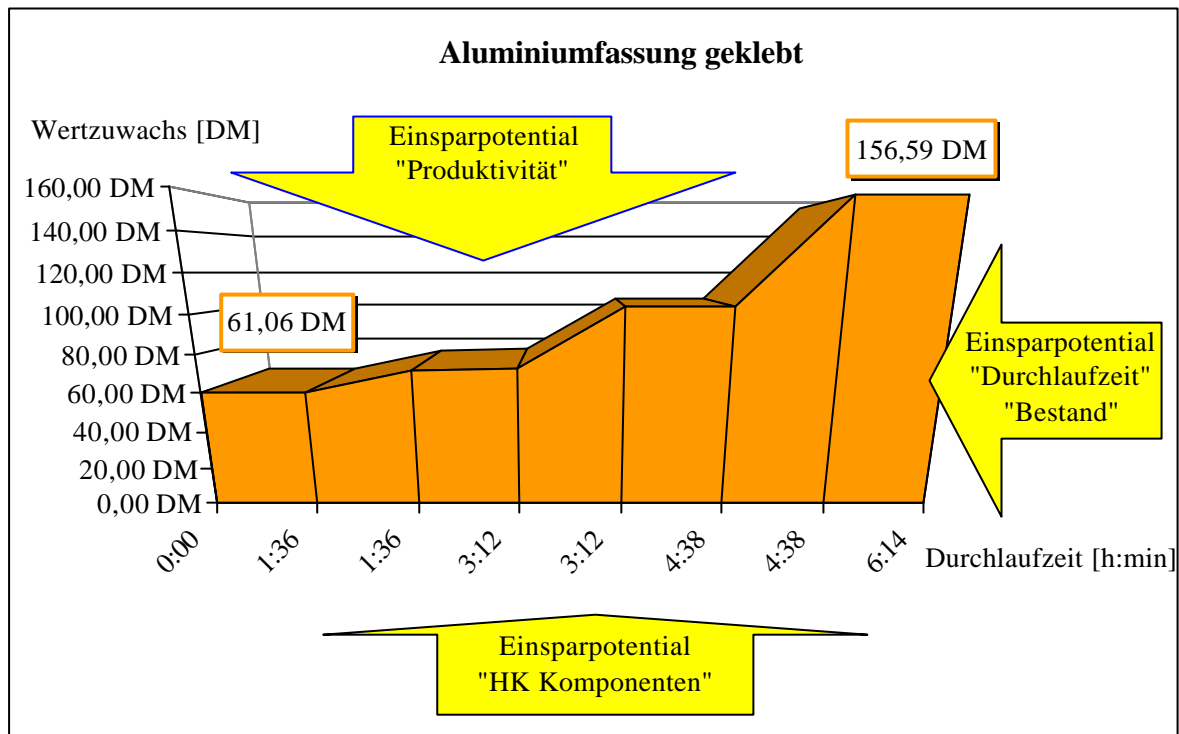


Bild 2.3 Wertzuwachskurve „Aluminiumfassung geklebt“ mit Einsparpotentialen

Einsparpotential 3 und hier Haupteinsparpotential ist die Senkung der **Durchlaufzeit** und der daraus resultierenden **Bestandkostensenkung**. Außerdem ergibt sich eine höhere Flexibilität sowie ein reduzierter Maschinenpark.

Diese Anforderungen und Ziele (50.000 Stück/a, $HK \leq 156,-$ DM /Stück, rel. Flächenkipung $\leq 10^\circ$, Durchmesserbereich 20 bis 100 mm) konnten nur mit neuen Wegen in der Fassungs-technologie erreicht werden. Dabei gab es zwei Schwerpunktthemen:

1. Suche eines geeigneten Kunststoffes als Fassungsmaterial
2. Entwicklung einer, dem neuen Kunststoff gerechten Fassungstechnologie.

2.2 Tangierende Verfahren „Ultraschallbördeln“ und „Caulking“

Neben dem "Heat Molding" existieren zwei ähnliche Verfahren zum Befestigen von optischen Bauelementen in Kunststofffassungen. /90/91/

Das „Ultraschallbördeln“ entstand 1998 parallel zum „Heat Molding“ im Technologiezentrum der Carl Zeiss Jena GmbH. Der entscheidende Unterschied ist in der Art der Energiezufuhr zu sehen, die bei diesem Verfahren durch Ultraschall erfolgt./121/

In Asien ist das Fassen von Optischen Bauelementen in Fassungen aus Kunststoff Stand der Technik. Das Mitte der 90er Jahre in Japan für die Massenproduktion entwickelte „Caulking“ (dt. Abdichten) oder auch „Heat Pressing“ (dt. Heißpressen) genannte Verfahren ist dem "Heat Molding" sehr ähnlich. Zur Sicherung der Marktposition ist dieser Technologievorsprung nicht Inhalt von Publikationen. Nachfolgend wird versucht, diese Technologie und ihre Charakteristika zu erläutern.

2.2.1 Caulking (Heat Pressing)

Grundlagen

Konstruktiv ist beim „Caulking“ prinzipiell kein Unterschied zum „Heat Molding“ ableitbar. Die in Mitbewerberprodukten gemessene variable Gratbreite im montierten, somit umgeformten Zustand ist aber nicht direkt auf den Ausgangszustand rückführbar./90/

Als Material wird vorwiegend Polycarbonat mit Glasfaserbeimischungen eingesetzt.

Der japanische Maschinenhersteller „KAZAMA“ hat für dieses Verfahren 3 Anlagen in seiner Produktpalette. Bild 2.3 zeigt den kleinsten Vertreter (THP-2(A)). Die Anlagen zeichnen sich durch die kompakten Abmessungen, eine hohe Entwicklungsstufe und ein sehr gutes Preis–Leistungsverhältnis aus.

Die zu befestigenden Geometrien sind abhängig von den technischen Parametern (Preßkraft, Temperatur, Zeit) der Maschine. Somit erfolgt die Auswahl der Anlage nach dem zu fassenden Linsendurchmesser.

Entscheidender Unterschied zum „Heat Molding“ ist eine zusätzliche Phase im Prozeß. Zwischen der Phase 3 und 4 (siehe Kapitel 4.4) wird eine Kühlphase eingeschoben. Ziel ist es, die Umformzone abzukühlen und damit die Phase 5 durch eingefrorene Restspannungen zu verkürzen. Außerdem reduziert sich die Klebneigung zwischen Werkzeug (Stempel) und Werkstück mit sinkender Temperatur.



Bild 2.4 KAZAMA Caulking Anlage THP 2A

Beim Verformen werden die amorphen Thermoplaste oberhalb der Erweichungstemperatur (Bereiche 3 und 4 siehe Kapitel 4.4) gut verformbar, sie sind aber noch gummielastisch. Daraus folgt, daß die unmittelbar nach dem Verformen zum Verhüten der Rückverformung unter der Verformungsspannung abgekühlten Werkstücke bei Überschreiten der Grenztemperatur (T_G) ihre Form unter der Wirkung der eingefrorenen Orientierungsspannungen verlieren.

2.2.2 Ultraschallbördeln (USB)

Im Gegensatz zum "Heat Molding" und „Caulking“ erfolgt der Energieeintrag zum Umformen nicht permanent via elektrischer Heizelemente, sondern zeitlich definiert durch Ultraschall (US).

Grundlagen

Das eigentliche Schwinggebilde des Ultraschallgerätes besteht aus einem Ultraschallwandler (Konverter), einem Amplitudentransformationsstück und einer Sonotrode (dem Werkzeug).

Der Konverter ändert mit Hilfe von Piezokeramikscheiben, an denen eine hochfrequente Wechselspannung anliegt, seine Länge in Abhängigkeit von Spannung und Frequenz. Wird diese Wechselspannung in den Bereich von 20 kHz gelegt, kann der Konverter die Eigenresonanz des Schwingungsgebildes als Impulsgeber erregen.

Das Amplitudentransformationsstück besteht aus einem Grundkörper aus Titan und einem Haltering, an dem das gesamte Schwingungsgebilde in der Vorschubeinheit der Ultraschallmaschine gelagert wird. Das Amplitudentransformationsstück transformiert die vom Konverter abgegebene Schwingungsamplitude auf die an der Sonotrode benötigte Größe.

Die Sonotrode überträgt die Schwingungsenergie und die Anpreßkraft auf das Werkstück. Auch wird die Amplitude auf die gewünschte Größe transformiert. /121/

Die für dem Umformprozeß benötigte Amplitudengröße kann wie folgt berechnet werden:

$$A = \frac{A_{\max} \cdot A_{\text{soll}} \cdot \dot{U}_{\text{Ampli}} \cdot \dot{U}_{\text{Sono.}}}{100\%} \quad (2.1)$$

A Amplitude

A_{\max} maximale Amplitude

A_{soll} einzustellender Amplitudenwert

Verfahrensablauf

Beim Ultraschallbördeln werden mechanische Schwingungen unter Druck auf die Kunststofffassung übertragen. Durch Molekular- und Grenzflächenreibung entsteht Wärme, die den Dämpfungskoeffizienten des Materials anwachsen läßt. Örtlich beginnt der Kunststoff zu erweichen. Diese Reaktion beschleunigt sich von selbst, da mit Zunahme des Dämpfungsfaktors ein steigender Anteil der Schwingungsenergie in Wärme umgesetzt wird.

Die geringe Wärmeleitfähigkeit der Kunststoffe sichert dann eine schnelle, örtlich begrenzte Erwärmung der Verbindungsstelle und somit kurze Prozeßzeiten. Der niedrige Wärmeeintrag führt zu einer im Vergleich raschen Abkühlung des Werkstücks (geringe Taktzeiten)./121/

Werkstoffliche Betrachtungen

Als Fassungsmaterial sind **amorphe Kunststoffe** wie PC, PS, ABS und PMMA geeignet. Sie haben einen günstigen Übertragungskoeffizienten für US-Energie (gute Weiterleitung der Energie) und keinen definierten Schmelzpunkt (plastischer Zustand vor flüssige Schmelze).

Teilkristalline Kunststoffe wie PA, PP und PE haben dagegen einen hohen akustischen Dämpfungsfaktor (starke Dämpfung der eingeleiteten Schwingung), einen definierten Schmelzpunkt und einen hohen spezifischen Wärmebedarf.

Zu beachten ist, daß bei teilkristallinen Thermoplasten eine Mindestlagerzeit von 24h nach dem Spritzen erforderlich ist (Nachschwinden ruft sonst Spannungen in den Teilen hervor). Weiterhin spielt bei Polyamiden der Feuchtigkeitsgehalt eine wesentliche Rolle (höhere Eigendämpfung).

Stempelmateriale

Als Sonotrodenmateriale kommen hauptsächlich Aluminium und Titan zum Einsatz. Aluminium hat nur eine geringe Standfestigkeit (ca. 200 Prozesse), ist jedoch im Vergleich zu Titan deutlich preiswerter in der Herstellung und kommt somit hauptsächlich bei Kleinserien und Prototypen zum Einsatz. Titan hingegen besitzt eine deutlich höhere Standzeit (ca. 20.000).
/121/

Einflußgrößen und Parameterwerte

Folgende Spezifika sind beim Ultraschallbördeln zu beachten:

- geringe Anpreßkraft
- hohe Amplitude
- kleine Berührungsfläche durch Sonotrodenstruktur

Es kann die Gefahr bestehen, daß bei großer Ankoppelfläche und hohem Druck der Grat bis zur Wurzel plastifiziert wird und einsackt.

Ausgezeichnet bewährt hat sich die hydraulische Dämpfung des Werkzeugs mit einem Mengenregler.

Ratsam ist außerdem eine elektronische Tiefenabschaltung (nach dem eigentlichen Fügevorgang hält die Tiefenabschaltung die Sonotrode solange unter Druck, bis die Umformzone vollständig abgekühlt ist)./121/

Maschinendaten:	HF-Ausgangsleistung:	2000	[W]
	Frequenz:	20	[kHz]
	Amplitude (SPS-Steuerung):	70 - 100	[µm]
	Betriebsarten:	Zeit:	0.01 - 9.99 [s]
		Tiefe:	0.10 - 25.00 ± 0.01 [mm]
	Haltezeit:	0.1 - 9.9	[s]
	Schweiß- u. Triggerkraft:	3100	[N]
	Sonotrodenhub:	100	[mm]

Untersuchungsergebnisse

Von mir durchgeführte Versuche in der Carl Zeiss Jena GmbH führten zu folgenden Zwischenergebnissen.

Linsen mit Durchmessern bis 45 mm konnten zufriedenstellend gefasst werden. Die äußere Form des umgelegten Grates ist qualitätsgerecht.

Um größere Durchmesser zu fassen, muß eine Anpassung der Gratbreite (b_G) vorgenommen werden. Ob es sich dabei um Auswirkungen des unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten

der Fügeelemente oder Resultate der geringen Anpreßkraft des anfänglich mit angeschmolzenen Grates handelt, ist in späteren Versuchen noch nachzuweisen.

Der Arbeitsablauf gestaltet sich beim Ultraschallbördeln folgendermaßen.

Schritt	Tätigkeit	Zeit [s]
1	Aufnahme Linse und Fassung	3
2	Linse in Fassung einsetzen (Schiebehülse)	10
3	Objektiv in US-Maschine einsetzen	2
4	Bördeln	7
5	Objektiv abnehmen	2
6	Visuelle Kontrolle	4
7	Objektiv ablegen	3
Σ		31

Tabelle 2.4 Arbeitsfolgen beim Ultraschallbördeln /121/

Vorteile - Nachteile des Ultraschallbördelns

Nachteile:

- Ende des Fügevorgangs ist nur durch Hilfsparameter steuerbar
- teure Werkzeuge (Berechnung und Herstellung der Sonotrode)
- hohe Geräuschentwicklung
- bei Kontakt Linse – Sonotrode: Zerstörung der Linse
- Beim Bördeln des Kunststoffes entsteht ein Austrieb des Werkstoffes, der durch die Ultraschallbewegung der Sonotrode vom Grat abgesprengt wird. Dieser Austrieb verunreinigt die Linse. Durch eine geeignet angeordnete Luftdüse kann dieser Austrieb von der Linsenoberfläche fern gehalten werden.

Vorteile:

- sehr schnelle Fertigung
- geringer Fertigungsaufwand
- einfache Handhabung
- Grundanlage ist universell einsetzbar (z. B.: Verschweißen, Einbetten von Metallteilen, ...)
- keine heißen Werkzeuge (reduzierte Unfallgefahr) → geringe Rüstzeiten
- Anlage bietet vollständige Prozeßkontrolle

Die genannten Nachteile der Verfahren „Caulking“ und „Ultraschallbördeln“ sollten bei dem in dieser Arbeit entwickelten Verfahren „Heat Molding“ vermieden werden.

Variante	„Caulking“	„Ultraschallbördeln“	„Heat Molding“
Entwickler [Fa.]	Kazama Engineering Co. Ltd. Japan	Carl Zeiss Jena GmbH	Carl Zeiss Jena GmbH
Fassungsmaterial	PC mit Glasfaseranteil	PC mit Kohlefaserteil	PC mit Kohlefaserteil
Linienmaterial	nur Glas	Glas und Kunststoff (bevorzugt)	Glas und Kunststoff
Durchmesserbereich	bis 35 / 50 / 70 mm (Werksangabe)	10 – 45 mm (erprobt) 5 . 150 mm (bei Gratangepassung)	10 – 80 mm (erprobt) 5 . 150 mm (theoretisch)
Stempel	poliert und verchromt	Sonotrode	glaspergestrahlt und verchromt
Energieträger	elektrische Wärme	Ultraschall (mech. Schwingungen)	elektrische Wärme
einstellbare Prozesszeiten	0 – 10 s	0 - 10 s	0,1 s – 60 s
Preßkraftbereich	gering (nur pneumatisch)	gering	hoch (Hydraulik + Pneumatik)
Stempelstandzeit	≥ 10.000 Stück	≤ 2.000 Stück	≥ 10.000 Stück
Rüstzeit	15 min	8 min	20 min
Prozesszeit (Ø 25 mm)	9,3 s	2 s	7,8 s
Mitarbeiterqualifikation	LG 4	LG 4	LG 4
Anschaffungskosten	14.000,- DM	110.00,- DM	150.000,- DM
Kosten neuer WZ-Satz	500,- DM je Stempel	3.500,- DM	500,- DM je Stempel
Medienversorgung	220 V; gereinigte Druckluft	380 V	220 V; gereinigte Druckluft
Varianten	3 Typen	je nach Anbieter	Sondermaschine
Besonderheiten	mech. Niederhalter zusätzliche Kühlluft nach Phase 4	Serier- Anlage Fa. Herrmann Beachte Lärmschutz!	Sonderanfertigung Fa. SiTec Vakuum Niederhalter

Tabelle 2.5 Vergleich der Technologien „Ultraschallbördeln“, „Caulking“ und „Heat Molding“

3 Kunststoff als Fassungsmaterial

Konventionelle Fassungsverfahren sind für Metallfassungen entwickelt und ausgelegt. Entwicklungsschwerpunkte lagen in der Genauigkeit oder Qualifikation der Mitarbeiter.

Die Fassungen aus Metall werden vorwiegend spanend aus Halbzeugen hergestellt. Die Herstellkosten verhalten sich proportional zu der zu erzielenden Genauigkeit./53/90/91/92/

Um einen wesentlichen Beitrag zur Kostensenkung in Kombination mit hohen Stückzahlen zu erzielen, bleibt nur die Herstellung der Fassungsteile durch Ur- oder Umformen. Damit eröffnet sich gleichzeitig die Möglichkeit, alternative Materialien einzusetzen, die in den Punkten

- Preis,
- Gewicht,
- Pilzbildung (Deuteromycota bzw. Fungusbildung),
- Festigkeit und
- Steifigkeit

im Vergleich zu Messing oder Aluminium entscheidende Vorteile haben. Mit dem Einsatz von Kunststoffen und deren Kombinationsvielfalt aus Matrix- und Zusatzwerkstoffen kann man dem „idealen Werkstoff“ sehr nahe kommen. Aber nur mit Hilfe eines detaillierten und sehr exakten Anforderungsprofils kann aus der Vielzahl der Möglichkeiten die richtige Kombination ausgewählt werden.

3.1 Anforderungsprofil

Erfahrungen im Technologiezentrum der Carl Zeiss Jena GmbH bei der Untersuchung von Fassungsmaterialien ergaben, daß ein höherer Elastizitätsmodul entsprechend größere Wärmespannungen zur Folge hat./92/

Der Längenausdehnungskoeffizient von Aluminium ($2,3 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$) liegt nur etwa 5 % unter dem von Messing ($2,42 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$). Die Elastizitätsmodule beider Werkstoffe unterscheiden sich dagegen deutlicher. Aluminium hat einen 27 % kleineren Elastizitätsmodul. Die Verringerung der Spannungen bei der Aluminiumfassung kann somit dem kleineren Elastizitätsmodul von Aluminium zugeordnet werden.

Bei der Einschätzung der positiven und negativen Einflüsse von Längenausdehnungskoeffizient und Elastizitätsmodul bei der Werkstoffauswahl hilft die Multiplikation beider Variablen. Die resultierende Vergleichszahl korreliert gut mit den zu erwartenden Wärmespannungen, d.h. je kleiner der berechnete Vergleichswert ist, desto besser geeignet ist der Werkstoff.

/92/

Für Messing ergibt sich ein Wert von $\mathbf{a} \cdot E = 2.353 \text{ [MPa/K]}$ und für Aluminium $\mathbf{a} \cdot E = 1.612 \text{ [MPa/K]}$. Daraus folgt die Forderung an den Fassungswerkstoff:

$$\mathbf{a} \cdot E \leq 1.6 \text{ [MPa/K]} \quad (3.1) /92/$$

Die Verringerung der Steifigkeit und damit die Verringerung der Wärmespannungen kann, neben der Werkstoffauswahl, auch durch geometrische Veränderungen herbeigeführt werden. Die Ergebnisse früherer Untersuchungen ergaben, daß durch Verringerung der Wandstärke des Außendurchmessers auch die Wärmespannungen reduziert werden. /24/25/43/92/

Grundprinzip: je kleiner die Steifigkeit der Einfassung, um so geringer die Temperaturspannungen.

Das für die Anforderungen erstellte Profil trennt sich in die zwei Schwerpunkte: „material-spezifische Eigenschaften“ und „erzielbare Genauigkeiten beim Spritzgießen“.

3.1.1 Materialspezifische Eigenschaften

- amorpher Kunststoff
- Längenausdehnungskoeffizient ähnlich dem von Glas ($\alpha_{20} = 4,8 \dots 9,8 \cdot 10^{-6} \text{ [W/m}\cdot\text{K]}$)
- hohe Steifigkeit, d.h. E- Modul $\geq 15 \text{ GPa}$ im Temperaturbereich von -20 bis $+70^\circ\text{C}$
- Produkt aus E- Modul und Längenausdehnungskoeffizient $\leq 1,6 \text{ MPa/K}$
- bei gleicher Festigkeit maximal gleiche Dichte wie Aluminium ($2,7 \text{ g/cm}^3$)
- Langzeitstabilität größer 5 Jahre
- HDT Wärmeformbeständigkeit nach ISO 75 $\geq 100^\circ\text{C}$
- reflexionsmindernd
- gute Oberflächenqualität $R_z \leq 1,25 \text{ }\mu\text{m}$
- klimafest (Wasseraufnahme) $\leq 2 \text{ }^0/_{00}$
- sterilisierbar (autoklavierbar)
- chemisch resistent
- Brandschutzklasse V0
- recyclebar
- antistatisch
- gute Benetzbarkeit (hydrophiles Verhalten)
- Kosten so niedrig wie möglich ($\leq 50 \text{ DM/kg}$) /18/22/26/27/28/29/

Nach diesen Gesichtspunkten des Schwerpunktes materialspezifische Eigenschaften wurde Polycarbonat mit 30 % Kohlefaseranteil ausgewählt. Entscheidend für die Eigenschaften ist die Geometrie der Kohlefaser. Die hier zum Einsatz kommenden Fasern sind 4 bis 5 mm lang

und haben einen Durchmesser von 32 μm . Sie bewirken eine Steigerung der Festigkeit und eine Senkung des Wärmeausdehnungskoeffizienten (siehe Tabelle 3.1). Durch Reduzierung des Schwundes beeinflussen sie die Maßhaltigkeit positiv, was wiederum die Senkung der Formtoleranz unterstützt. Glasfasern, die vergleichbaren Einfluß auf Schwindung und Festigkeit haben, reduzieren im Gegensatz zur Kohlefaser nicht das Reflexionsvermögen.

Tabelle 3.1 zeigt die exakten Werte des Materials. Zur Verdeutlichung sind alle Parameter für Polycarbonat sowohl mit als auch ohne Kohlefaseranteil aufgeführt.

Eigenschaften	PC	PC 30% CF	Einheit	Prüfnorm
Dichte	1,20	1,33	g/cm^3	ISO 1183
Wasseraufnahme 23°/ 24h	0,36	< 0,2	%	ISO 62
Brandverhalten	94V-2	94V-0	Klasse	UL 94 (3,0)
Mechanisch:				
Zugfestigkeit σ_{zM}	61	170	MPa	ISO 527
e- Modul E_t	23	18	GPa	ISO 527
e- Modul E_{3B}	21	16,5	GPa	DIN 53457
Biegefestigkeit σ_{bM}	137	240	MPa	DIN 53452
Thermisch:				
Vicaterweichungstemperatur	144	160	$^{\circ}\text{C}$	DIN ISO 306
Formbeständigkeitstemp. HDT	130	145	$^{\circ}\text{C}$	DIN 53461
max. Dauergebrauchstemperatur	130	130	$^{\circ}\text{C}$	UL 746 B
Glastemperatur	145	145	$^{\circ}\text{C}$	DIN 53736
Längenausdehnungskoeffizient α	$7 \cdot 10^{-5}$	$1,4 \cdot 10^{-5}$	K^{-1}	DIN 53752
Wärmeleitfähigkeit	0,4	0,7	$\text{W/m}^{\circ}\text{K}$	DIN 52612
Elektrisch:				
Isolationswiderstand	$< 10^3$	$< 10^3$	Ω	IEC 0167

Tabelle 3.1 Eigenschaften von Polycarbonat mit und ohne Kohlefaserverstärkung /26/

Das Produkt aus Längenausdehnungskoeffizient und e- Modul beträgt 0,252 MPa/K und bietet somit ideale Voraussetzungen für geringe Wärmespannungen.

3.1.2 Erzielbare Maßhaltigkeit beim Spritzgießen

Der zweite Aspekt beinhaltet die erzielbare Maßhaltigkeit der gespritzten Bauteile. Besonders die für den Sitz der optischen Bauelemente entscheidenden Geometrien waren Ziel der Untersuchung. Als Toleranzwerte der optischen Rechnung ergaben sich folgende Richtgrößen

- Rundheit Linsensitz \leq 25 μm
- Ebenheit Linsenauflage \leq 25 μm
- Planlauf \leq 25 μm (zur Basis Linsensitz)
- Durchmesser \leq 0,3...0,5 %³ auf Durchmesserwert
- Parallelität \leq 30 μm

Bei der Toleranzdefinition sind die spezifischen Unterschiede zur spanenden Herstellung besonders zu berücksichtigen. Der Durchmesser wird nicht nach Passung toleriert. Die Toleranz ist prozentual abhängig von seinem Durchmesser. Außerdem sinkt die reproduzierbare Genauigkeit mit der Entfernung zum Anguß. Bei der konstruktiven Umsetzung ist der Anguß im Bereich der höchsten Anforderungen vorzusehen! /86/87/88/89/

Zur Untersuchung wurde eine Fassung aus der laufenden Serienproduktion komplett kunststoffgerecht umkonstruiert und ein Spritzgußwerkzeug hergestellt.

Ziel waren fundierte Erkenntnisse hinsichtlich Maßhaltigkeit und Reproduzierbarkeit der Spritzgußteile aus 30% Kohlefaser verstärktem Polycarbonat.

Die ersten Abspritzversuche ergaben die in Tabelle 3.2 aufgeführten Meßergebnisse. Um auch statistisch sicher verwertbare Meßergebnisse zu erhalten, wurden anschließend von 500 gespritzten und anschließend 2h bei 120° im Luftumwälzofen getemperten Fassungen 100 Stück zufällig ausgesucht, fortlaufend beziffert und vermessen.

geometrische Größe	Ø 46,48	Rundlauf	Zylinderform	h 11,7	Planlauf	Ø 54,8
Toleranz	+ 0,050	+ 0,010	+ 0,010	+ 0,020	+ 0,010	+ 0,050
Teil 1	46,580	0,014	0,055	11,700	0,025	54,860
Teil 2	46,600	0,022	0,014	11,710	0,007	54,790
Teil 3	46,600	0,028	0,029	11,710	0,032	54,800
Teil 4	46,590	0,028	0,013	11,720	0,007	54,780
Teil 5	46,610	0,024	0,016	11,720	0,009	54,770
Mittelwert \bar{m}	46,593	0,023	0,025	11,712	0,016	54,800
Standardabweichung δ	0,010	0,006	0,018	0,008	0,012	0,035
Maximum	46,610	0,028	0,013	11,720	0,032	54,860
Minimum	46,580	0,014	0,055	11,700	0,007	54,770
Spannweite R	0,030	0,014	0,042	0,020	0,025	0,090

Tabelle 3.2 Meßergebnisse der ersten Abspritzung

³ je nach Entfernung vom Anguß

In Bild 3.1 sind die Problemstellen der gespritzten Kunststofffassung gekennzeichnet.

Deutlich hat sich die Vermutung (/89/) bestätigt, daß mit zunehmendem Abstand vom Anguß die erzielte Maßhaltigkeit abnimmt.

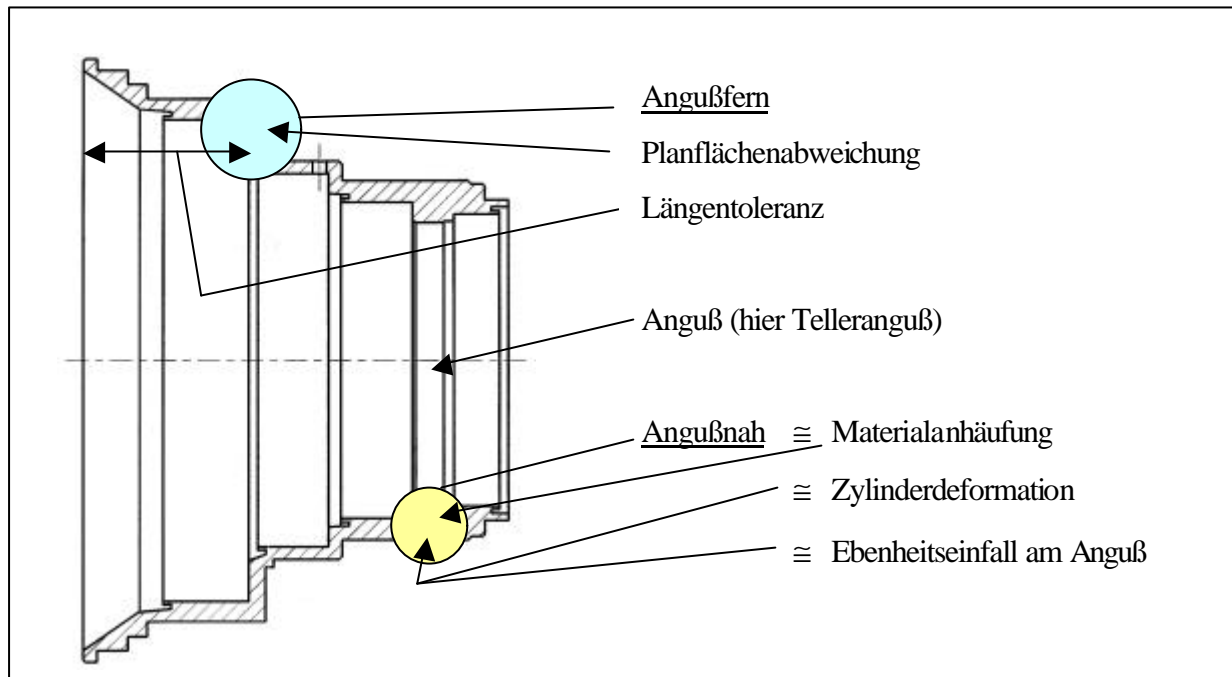


Bild 3.1 Charakteristische Meßpunkte am Untersuchungsobjekt

Zur Absicherung des Einsatzes der Kunststofffassungen für die Produktion wurde die Spritzgußform mit Übermaß konstruiert. Die mechanische Nachbearbeitung soll die hohen qualitativen Anforderungen für das Serienprodukt sicher stellen.

Das erste untersuchte Maß ist das Längenmaß 24,3 mm (siehe Bild 3.2). Das Maß 24,3 mm definiert den Abstand der Auflageflächen der Linsen ② und ③ und ist somit direkt für den späteren Luftabstand verantwortlich. Es besitzt entscheidenden Einfluß auf die Abbildungsqualität des montierten Objektivs.

Bild 3.2 zeigt die Meßwerte, sortiert nach Größe. Der für das herangezogene Beispiel vom optischen Design geforderten Toleranzbereich ist zum besseren Verständnis mit eingetragen. Charakteristisch für ein formgebunden hergestelltes Bauteil ist die sehr enge Streuung. Filtert man die „Ausreißer“ heraus, beträgt die reproduzierbare Maßhaltigkeit 5 µm.

Bei dem in Bild 3.2 dargestellten Längenmaß handelt es sich um einen beherrschten und fähigen Prozeß.

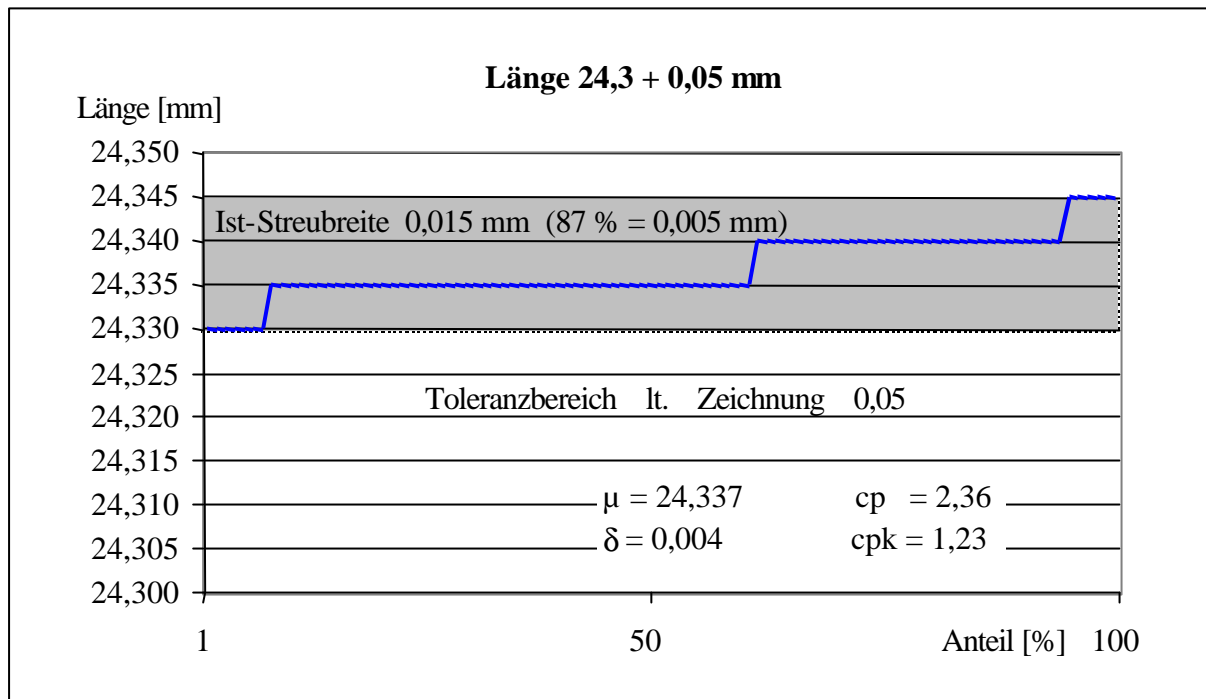


Bild 3.2 Meßergebnisse Längenmaß 24,3 mm der gespritzten Kunststofffassung

Gleichzeitig kommt eine typische Erscheinung deutlich zum Vorschein. Die exakte Positionierung des Mittelwertes auf das geforderte Nennmaß ist weitaus schwieriger und nur mit gezielter Herangehensweise möglich. Gleichzeitig muß auch mit in die Überlegungen aufgenommen werden, ob es sinnvoller ist, den Linsendurchmesser anzupassen.

Auf Grund unterschiedlichen Schwundes (Ursache ist unter anderem die Anisotropie der Verstärkungsfasern aus Kohlenstoff) kann zur Zeit mittels rechnerischer Näherungsverfahren kein exaktes Maß zur Herstellung der Negativform berechnet werden. Das bedeutet, daß für die erste Abmusterung ein nacharbeitbares Übermaß vorgesehen wird und dann eine oder mehrere Korrekturen des Werkzeuges erfolgen. Ein Herantasten an das Zielmaß ist in jedem Fall erforderlich. Das birgt wiederum die Gefahr der Beeinflussung der übrigen Maße (speziell Konzentrizität) in sich. Hieraus kristallisiert sich auch ein weiterer Nachteil. Zwischen „design freeze“ und in Toleranz befindlichem Spritzgußteil liegen viele Iterationsschritte, die bei der Planung sowohl als Zeit- als auch Kostenfaktor mit berücksichtigt werden müssen.

Etwas günstiger verhält es sich bei den Zylinderflächen zur Aufnahme der optischen Bauelemente. Hier ist die Anpassung des Linsenaußendurchmessers an den Linsensitz in der Kunststofffassung an der Linse zu realisieren. Die Reproduzierbarkeit des Durchmessermaßes liegt bei einem Viertel des geforderten Wertes. (siehe Bild 3.3) Bei dem in Bild 3.3 dargestellten Meßergebnissen handelt es sich ebenfalls um einen beherrschten und fähigen Prozeß.

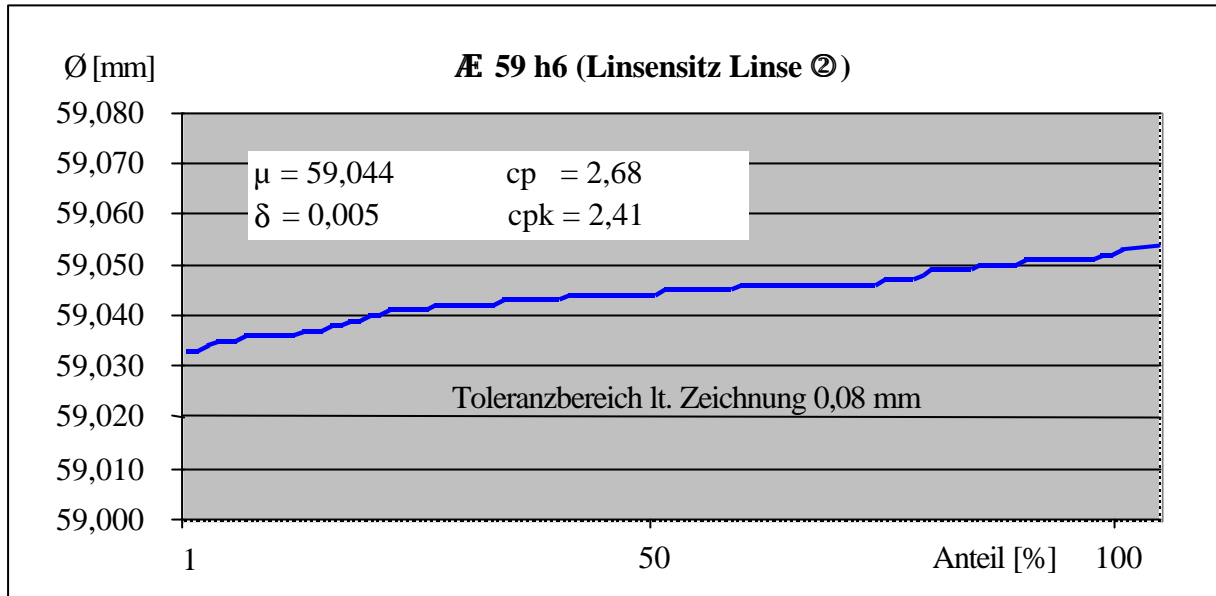


Bild 3.3 Meßergebnisse am Durchmesser 59 h6

Mit Vergrößerung des Nenndurchmessers der Linse um den Differenzbetrag von 0,05 mm erfüllt dieser Linsensitz voll die Forderungen. Betrachtet man aber die Rundheit (Abweichung von der Kreisform) in Bild 3.4, sind die erreichten Ergebnisse mit 14 % innerhalb der Toleranz nicht akzeptabel.

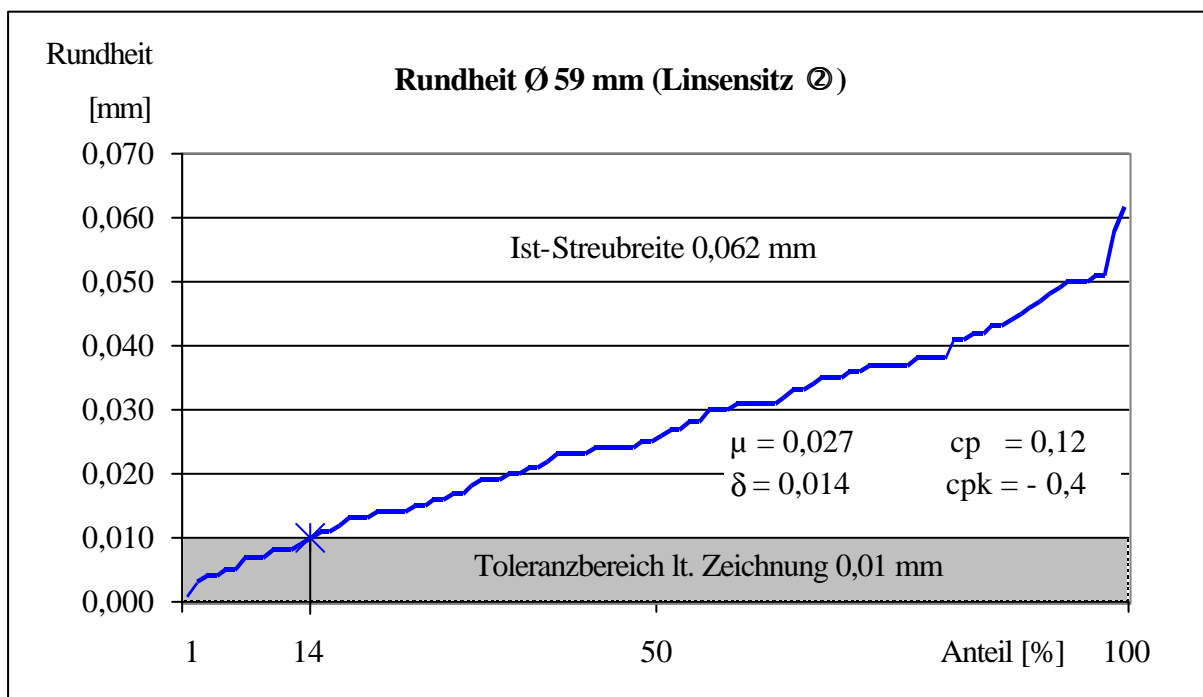


Bild 3.4 Ergebnisse der Messungen zur Rundheit am Durchmesser 59 mm

Bei der in Bild 3.4 dargestellten Rundheitsabweichung vom Linsensitz ② handelt es sich weder um einen beherrschten noch um einen fähigen Prozeß.

In Kombination mit den Meßergebnissen im Kreisdiagramm (Bild 3.5) sind folgende Rückschlüsse zu ziehen.

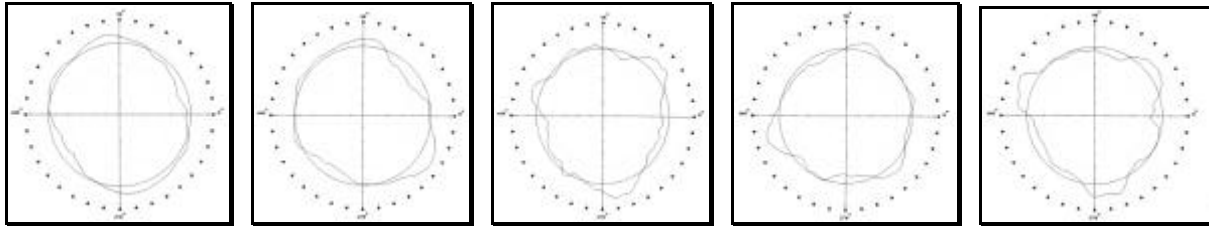


Bild 3.5 Kreisdiagramme zur Rundheitsmessung am Linsensitz ©

Die starke Schwankung der Meßergebnisse kann zum Teil auf Fehler der Spritzgußform zurückgeführt werden. Charakteristisch ist das Gleichdick. Rundlaufmessungen der Spritzgußform ergaben eine minimale Abweichung ($2\ \mu\text{m}$). Das ist kennzeichnend für einen Fehler der Temperaturverteilung der Spritzgußform. Das Werkzeug muß in seiner Temperaturverteilung optimiert werden. Die hohe Reproduzierbarkeit läßt gleichzeitig den Rückschluß zu, daß Abweichungen von der Kreisform im Bereich $30\ \mu\text{m}$ realisierbar sind. Ein anderer Weg zur Senkung der Kreisformabweichung ist der Einsatz von Stegen. Diese drei (120°) oder sechs (60°) axial angeordneten und über den Umfang verteilten Stege bieten zwei Vorteile. Erstens sind diese wesentlich einfacher nachzuarbeiten und zweitens hat eine Änderung dieser $0,1\ \text{mm}$ hohen Stege geringere Auswirkungen auf das Gesamtverhalten des Spritzgußwerkzeugs.

Bild 3.6 bestätigt die Messungen und Aussagen. Hier ist gleichfalls die hohe Abbildungstreue, gepaart mit dem reproduzierbaren Formfehler der gespritzten Bauteile zu erkennen.

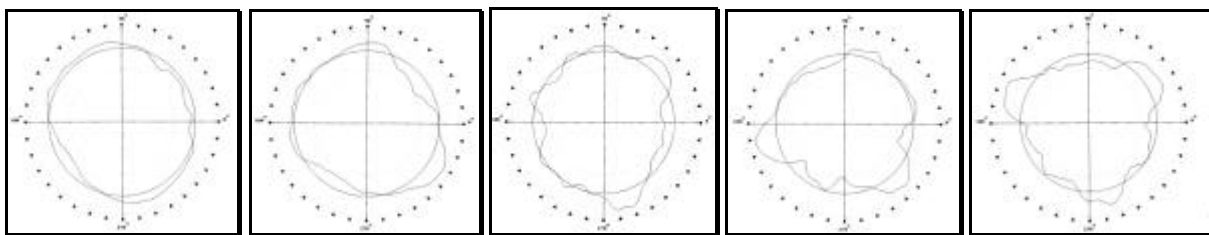


Bild 3.6 Zylinderformabweichung am Durchmesser 59 (Linse) ©

Bild 3.7 zeigt die Messungen der Zylinderformabweichung am Durchmesser $40,8^{-0,05}\ \text{mm}$. Im Gegensatz zu den Bildern 3.5 und 3.6 sind keine Korrelationen zueinander zu erkennen.

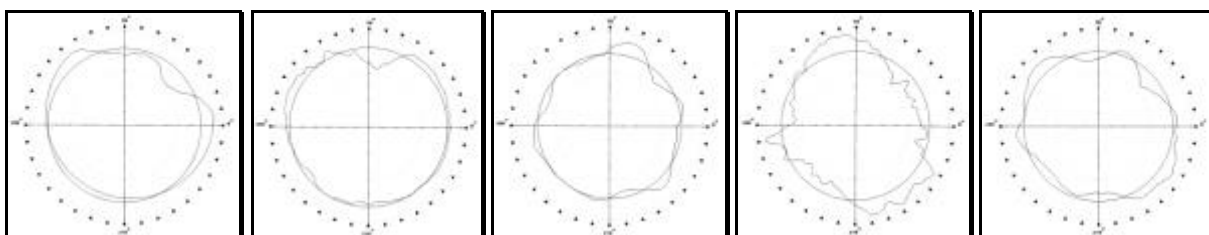


Bild 3.7 Messungen der Zylinderformabweichung am Durchmesser $40,8^{-0,05}\ \text{mm}$

Hier liegt auch die Ursache für die Gestaltung des Linsensitzes bei gespritzten Kunststofffassungen. Die sehr hohe Streuung und nicht systematisch zuordenbare Ergebnisse haben ihre Ursache in der Überlagerung mehrerer Einflußgrößen. Diese sind die Kreisformabweichung, die Ebenheit und der große Querschnitt. Die Summe aller Faktoren zusammen bewirkt die schlechte Reproduzierbarkeit und damit eine hohe Ausfallrate.

Das bedeutet, die große Streuung ist zufällig und nur sehr schwer auf das geforderte Niveau zu bringen, welches an eine Ringschneide gestellt wird.

Zwei Lösungsansätze stehen zur Auswahl.

- a) Konstruktive Änderung: die Ringschneide wird durch eine Planauflage ersetzt (Bild 3.8)
- b) Mechanische Änderung: die Ringschneide wird z.B. durch Drehen nachgearbeitet

Variante a ist zu favorisieren, da konstruktiv jede Fläche nur eine Funktion übernimmt und somit wesentlich besser beherrschbar wird. Die Auflagefläche definiert nur die relative Flächenkippung der optischen Bauelemente. Der zylindrische Linsensitz (mit oder ohne Stege) definiert mit seiner Konzentrität zu den weiteren zylindrischen Funktionsflächen die Verschiebung der einzelnen optischen Achsen zueinander.

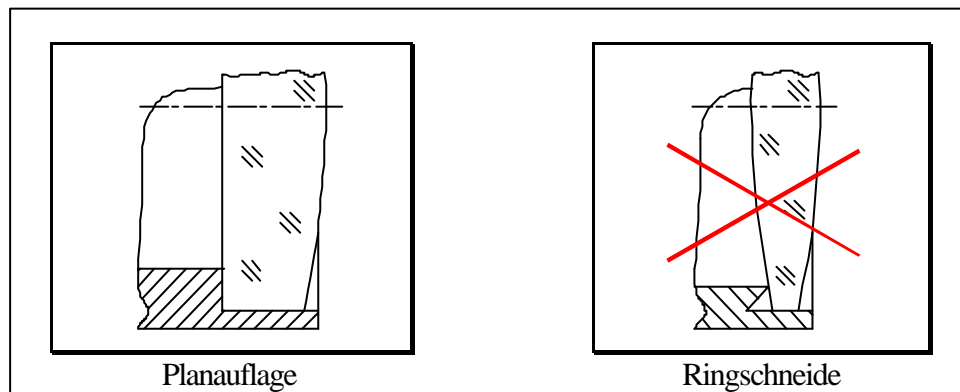


Bild 3.8 Lagedefinition der Linsen durch Planauflage und Ringschneide

Variante b hat zwei entscheidende Nachteile. Zum einen sind damit höhere Stückkosten verbunden (bei 50.000 Stück/a); zum anderen bringt eine Nachbearbeitung die Zerstörung der Gußhaut mit sich, was sich wiederum negativ auf das Langzeitverhalten der Fassung auswirkt.

3.2 Kostenaspekte

Bei der Herstellung formgebundener Einzelteile steht zu Beginn ein sehr hoher Fixkostenanteil für das Werkzeug zu Buche. Im Vergleich zur spanend hergestellten Aluminiumfassung amortisieren sich die niedrigeren Einzelteilkosten. Der Vergleich zur geplanten Stückzahl ist zwingend erforderlich. (Bild 3.9)

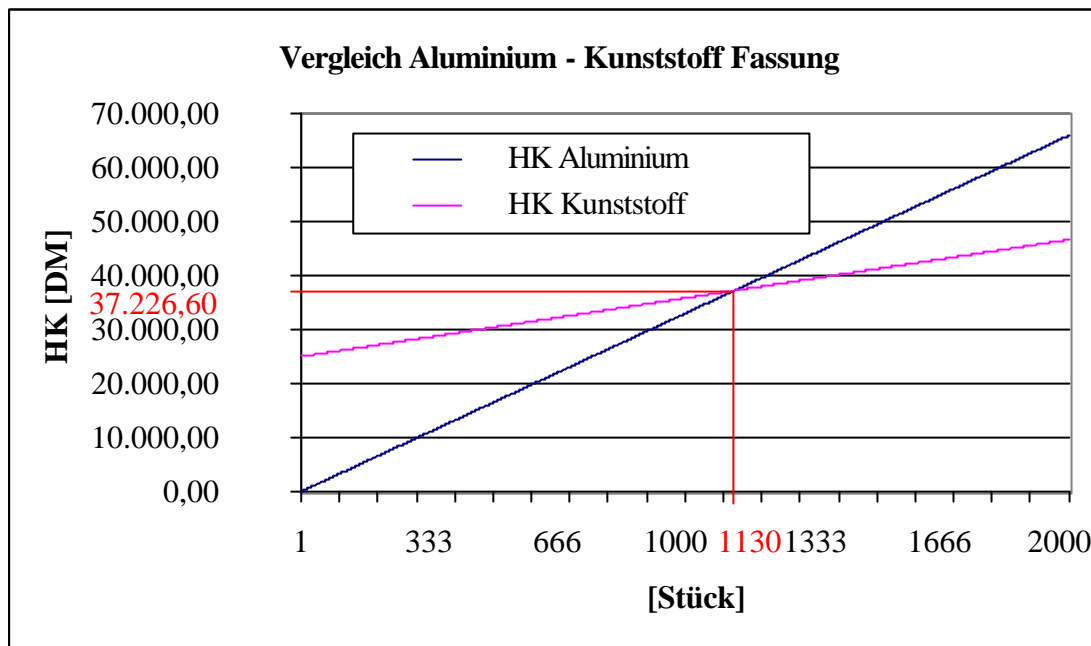


Bild 3.9 Kostenvergleich zwischen der Aluminium- und Kunststofffassung

Im Beispiel liegt der „Break Even“ mit 1130 Stück deutlich unter der minimal geplanten Stückzahl von 20.000. Die Lebensdauer des Spritzgußwerkzeugs wird auf über 50.000 Stück geschätzt. Aus diesen Werten errechnet sich eine Einsparung an Herstellkosten der Fassung von ca. 67%. Weiteres Einsparpotential liegt im Wegfall der Nacharbeit. Sie ist aus Gründen der Absicherung für die laufende Produktion noch mit einbezogen.

Das zum Einsatz kommende Polycarbonat mit 30 % Kohlefaserverstärkung ist das Ergebnis der Zusammenarbeit zwischen dem Compoundhersteller⁴, dem Spritzgießer und dem Endverbraucher. Die Compoundkosten unterschreiten die Forderungen mit 27,- DM/kg um fast die Hälfte.

⁴ Bezeichnung für den Hersteller des Spritzgußgranulates aus dem Matrixwerkstoff (hier Polycarbonat) und den Füllstoffen (hier 30 % Kohlefasern)

3.3 Probleme, die sich aus den charakteristischen Eigenschaften des Kunststoffs ergeben

1. Wärmeausdehnung

Die FEM Berechnungen (Bild 3.10 und Bild 3.11) zeigen das Verhalten der Fassung in den Grenzwerten des Einsatztemperaturbereiches.

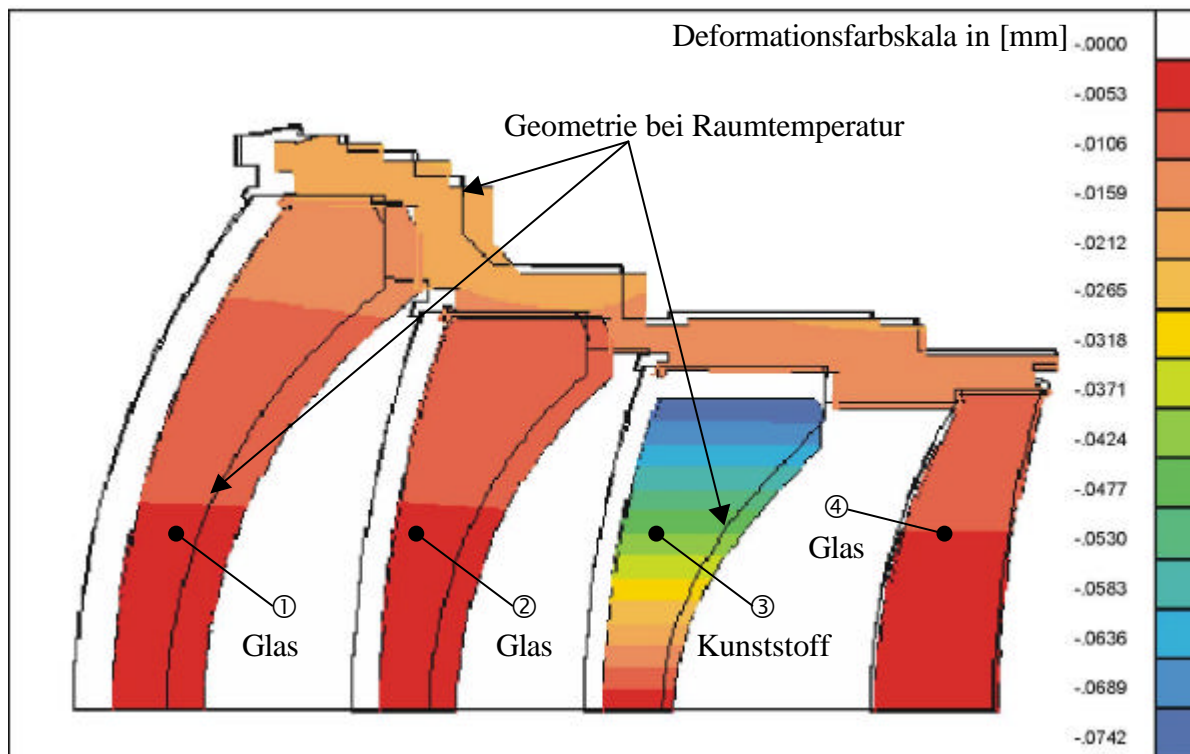


Bild 3.10 Radiale Deformation der Vorderfassung bei -40 °C

Ganz deutlich sind die Auswirkungen der unterschiedlichen Linsenmaterialien zu erkennen. Die Ursache sind die differierenden Ausdehnungskoeffizienten (Kunststofflinse ③ Zeonex 480 R: $\lambda = 6 \cdot 10^{-6}\text{ K}^{-1}$ und Glaslinsen ①, ② und ④ Sk2: $\lambda = 6 \cdot 10^{-5}\text{ K}^{-1}$). Die Kunststofflinse ③ fällt theoretisch bei dieser Temperatur aus der Fassung. Praktische Versuche haben dies aber nicht bestätigt. In diesem Temperaturbereich ist die Veränderung des Brechungsindex von Zeonex 480 R (Linse ③) deutlich kritischer. Beim optischen Design muß dieses Verhalten mit berücksichtigt werden. Auf ausführlichere Erläuterungen wird verzichtet, da dies nicht Inhalt der Arbeit sondern Gegenstand spezifischer Untersuchungen ist. /24/34/37/

Ähnlich gelagert sind die Veränderungen bei $+70\text{ °C}$ (siehe Bild 3.11). Durch Energieeintrag (z.B. Licht bei Datenprojektoren) kann dieser Wert als Betriebstemperatur angesehen werden. Hier kommt es neben der Veränderung des Brechungsindex von Zeonex 480 R (Linse ③) zu Verspannungen in der Kunststofflinse. Beides macht sich in der Abbildungsqualität durch einen „wandernden Fokus“ bemerkbar.

Diese FEM- Berechnungen zeigen, daß bei der Entwicklung eines Objektivs, unabhängig vom verwendeten Fassungsmaterial, alle beteiligten Materialien hinsichtlich ihrer Veränderung in den Einsatztemperaturbereichen überprüft werden müssen.

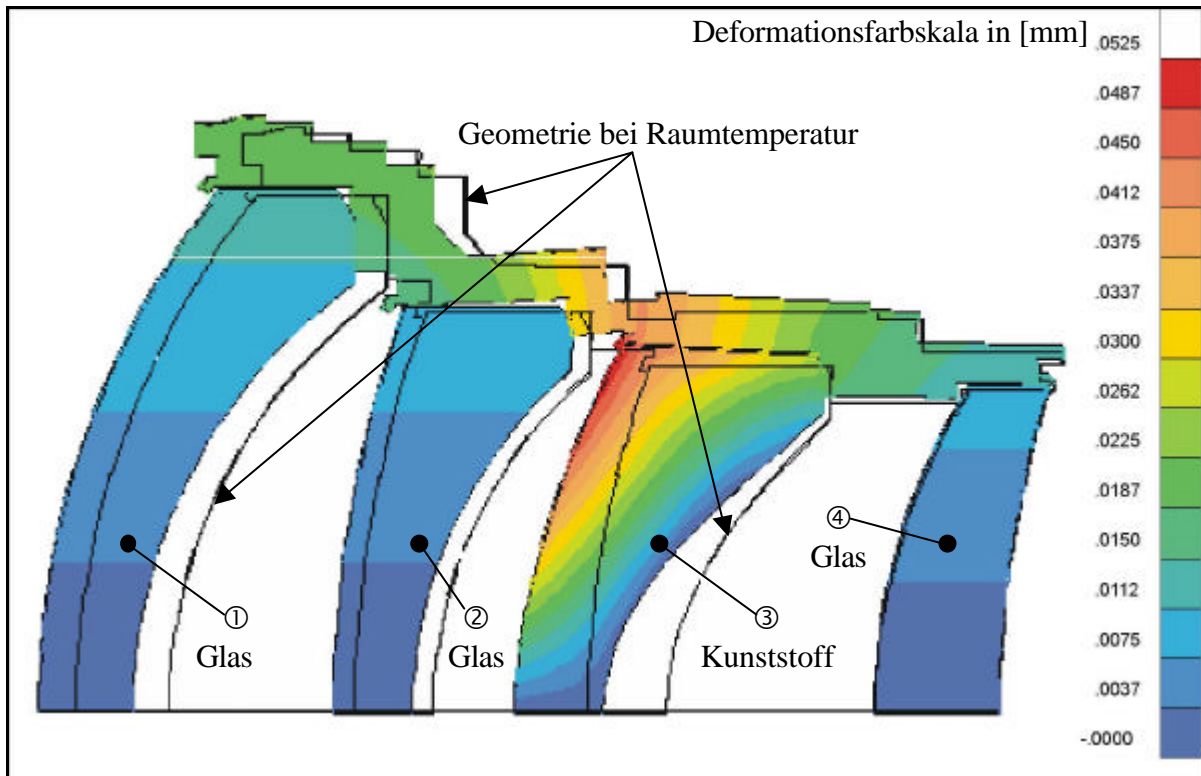


Bild 3.11 Radiale Deformation der Vorderfassung bei + 70 °C

2. Ein weiteres thermisches Problem liegt in der **Wärmeleitung** λ begründet. Der Vergleich der Wärmeleitung zwischen Aluminium und kohlefaserverstärktem Polycarbonat zeigt das ca. 500-fache Wärmeleitvermögen von Aluminium. (Tabelle 3.3)

	Aluminium	Polycarbonat mit 30% Kohlefaser
Wärmeleitung $\lambda \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$	204	0,37

Tabelle 3.3 Wärmeleitkoeffizienten von Aluminium und PC 30% CF

Deshalb muß folgendes beachtet werden. Bei starkem Energieeintrag (wie z.B. bei einem Projektionsobjektiv) kann die durch Absorption entstehende Wärme nicht abgeführt werden. Das führt zu einer sehr schnellen Aufheizung der optischen Baugruppe. Bild 3.12 zeigt die Auswirkungen der unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten zwischen Aluminium und Polycarbonat. Die blaue Kurve charakterisiert den Temperaturanstieg der Polycarbonatfassung. Deutlich ist der wesentlich höhere Temperaturgradient sowie die fast doppelt so hohe Endtemperatur. Diese negative Erscheinung verstärkt sich mit zunehmender Energiedichte.

Da die allgemeinen Entwicklungstrends „Kleiner“ und „Leistungsfähiger“ heißen, muß diese typische Eigenschaft besondere Berücksichtigung finden.

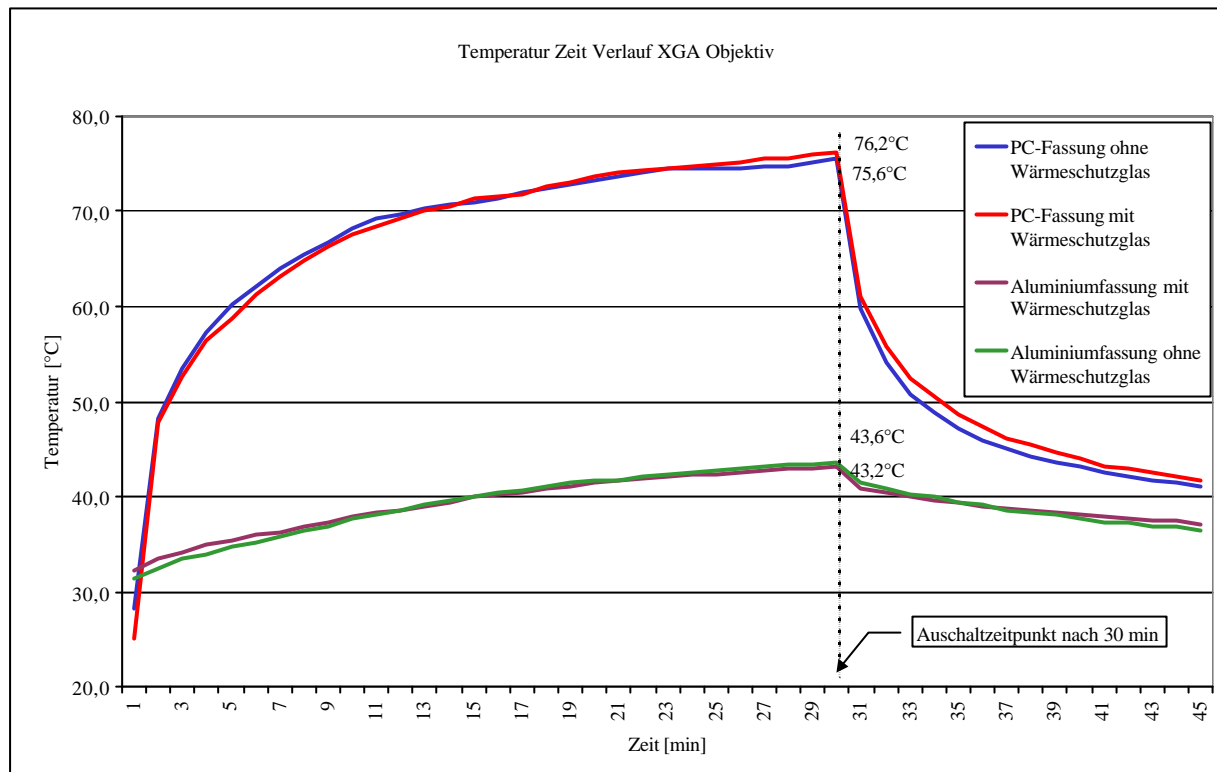


Bild 3.12 Vergleich Temperatur- Zeitverlauf bei einer Aluminium und einer Kunststofffassung

Ebenso problematisch gestaltet sich diese Eigenschaft bei beschichteten Kunststofflinsen. Diese dehnen sich je nach ihrem Wärmeausdehnungskoeffizient aus. Das kann zur Rißbildung in der Vergütungsschicht führen, und damit die Zerstörung der Abbildungsqualität nach sich ziehen. Außerdem beeinträchtigt die veränderte Temperatur den Brechungsindex der Kunststofflinse, was ebenfalls einen „wandernden Fokus“ zur Folge hat.

3.4 Fazit:

Die Untersuchungen zeigen, daß bei Polycarbonat mit 30% Kohlefaserverstärkung unter Beachtung der für Kunststoff typischen Randbedingungen eine Fassung mit den in Kapitel 3.1 genannten Anforderungen herstellbar ist. Die Kosten für eine Kunststofffassung liegen im beschriebenen Beispiel trotz Nacharbeit bei 67 % der entsprechenden Aluminium Fassung.

Werkstoff

Der entwickelte Kunststoff ist mit Berücksichtigung der ihm eigenen Charakteristik sehr gut als Fassungswerkstoff geeignet. Weitere Optimierungen sind möglich, bedürfen jedoch der engen Zusammenarbeit zwischen Hersteller (Compound und Spritzgußmaschinen), Verarbeiter und Anwender.

Die wichtigsten Vor- und Nachteile von Polycarbonat mit 30 % Kohlefaseranteil sind in Tabelle 3.4 zusammengestellt.

Vorteile	Nachteile
Farbe: schwarz (-> keine nachhaltige Maßänderung durch Farbauftrag)	hohe Werkzeugkosten – „Break Even Point“ muß individuell berechnet werden
Leicht flexibel	Kleben ist aufwendiger in der Vorbereitung
chemische Resistenz	konstruktives Umdenken notwendig
recyclebar	keine Ringschneiden herstellbar
niedrige Stückkosten	nicht für Prototypen geeignet – Unsicherheit zwischen Prototyp und Serie
keine Nacharbeit (abhängig von Genauigkeitsklasse)	lange Optimierungsphase der Werkzeuge, d.h. sehr frühes „design freeze“
energiesparende Herstellung	Wärmeleitung sehr schlecht – bei hohem Energieeintrag starke Aufheizung
montagefreundlich durch Vielfachfunktion	
Korrosionsbeständigkeit ohne Veredlung	
ohne Veredlung reflexionsschwach	
niedriges Gewicht	
modifizierbar auf spezifische Anforderungen	
Temperaturbereich –100 bis +135 °C	

Tabelle 3.4 Vor- und Nachteile von Kunststoff als Fassungsmaterial

Prozeßfähigkeit des Verbundes

Die Absicherung der Prozeßfähigkeit beginnt beim "Heat Molding", einer ungerichteten Fassungstechnologie, bei den Einzelkomponenten. Problematisch sind die Lieferbedingungen, welche die Reproduzierbarkeit der Spritzgußparameter des Verbundes (Compound) von Charge zu Charge gewährleisten. Die Qualitätslagen der Fassungsteile sind nur zu halten, wenn von den bisher üblichen Kriterien (z.B. Schmelzpunkt [Vicattemperatur]) abgegangen wird. Nur neue und alte Kriterien mit stark eingeschränkten Toleranzen können die hohen Anforderungen gewährleisten. Trotzdem reichen diese Maßnahmen noch nicht aus, eine Chargenoptimierung an den Spritzgußmaschinen zu umgehen. Für jede Charge muß ein Prüfprotokoll erstellt und eine Probe als Muster im Archiv der Lieferfirma verwaltet werden. Das Prüfprotokoll muß die in Tabelle 3.5 genannten Prüfkriterien enthalten /92/

Nr.	Prüfkriterium	Einheit	Ergebnis (x-quer)	Zeit [s]	Grenzwerte	
					Max.	Min.
5	Schmelz- Volumen-Index ISO 1133 (300°C/1,2 kg) Vortrocknung 120°C/3h	$\left[\frac{ml}{10ml} \right]$			6,00	16,00
10	Dichte (mit He-Pycometer gemessen)	$\left[\frac{g}{cm^3} \right]$			1,31	1,35
50	Zugfestigkeit DIN EN ISO 527	[MPa]			85,00	125,00
60	Dehnung bei F- max. DIN EN ISO 527	[%]			1,00	3,00
70	E- Modul Zug DIN EN ISO 527	[GPa]			8,00	12,00
80	elektrischer Widerstand DIN IEC 167	[log Ω]			1,00	5,50
90	HDT-A DIN EN ISO 75 1-3	[°C]			130,00	145,00
130	Muster verwalten MPTS ISO 3167 A	[Stück]			0,00	10,00
135	Rückstellmuster Granulat	[ml]			50,00	100,00
140	Probekörper Herstellung MPTS ISO 3167 A	[Stück]			30,00	30,00

Tabelle 3.5 Compound Prüfkriterien

Spritzgußwerkzeug

Eine hohe Reproduzierbarkeit der gespritzten Fassungsteile sowie die Maßhaltigkeit des Spritzgußwerkzeuges wurden durch die Messungen der Fassungsteile bestätigt. Die starken Schwankungen der Flächenmaße (insbesondere Rund- und Planlauf) sind auf die ungleichmäßige Temperaturverteilung im Werkzeug zurückzuführen. Die Optimierung der thermischen Homogenität des Werkzeuges ist ein entscheidender Ansatz für weitere Verbesserungen. Diese Korrektur kann nur mit Hilfe PC- gestützter Simulation des Füllvorganges erfolgen, ohne eine Kostenexplosion auszulösen.

Konstruktion

Ein weiterer Ansatz zur Steigerung der Maßhaltigkeit ist die spritzgußgerechte Konstruktion. Werden die für die Funktion wichtigen Maße nicht durch große Flächen (z.B. die Zylinderfläche als Linsenanlagefläche) bestimmt, sondern durch Stege, sind die notwendigen Toleranzen einstellbar.

Bei der konstruktiven Umsetzung des optischen Designs müssen folgende Konstruktionsrichtlinien berücksichtigt werden:

- Linsensitz auf einer Planfläche (bzw. Planstegen) anstelle Ringschneide
- die Auflagefläche ist die Fläche mit den höheren Toleranzanforderungen
- enge Toleranzen in Angußnähe platzieren
- Nacharbeit ist auszuschließen (Kosten; Zerstörung der Gußhaut)

Optisches Design

Der Einsatz von Kunststofflinsen muß hinsichtlich Temperaturgradient (wegen Rißbildung in der Beschichtung) und Betriebstemperatur (wegen verändertem Brechungsindex) gesondert überprüft werden.

Schwerpunkte für zukünftige Untersuchungen sind:

Wichtigster Ansatzpunkt für die Senkung der vorhandenen Schwankungen (Streuung) ist der Einsatz kürzerer Kohlefasern (d.h. Faserlänge ≤ 1 mm), die eine niedrigere Differenz hinsichtlich der Schrumpfung in Längs- und Querrichtung (Anisotropie) aufweisen. Weiterhin sind die Ursachen für Spannungen im Spritzgußteil zu untersuchen und daraus Konstruktionsrichtlinien zur Reduzierung der Spannungen abzuleiten.

- Wo liegen technische und wirtschaftliche Grenzen der Genauigkeit?
- Steigerung der Prozeßsicherheit bzw. Senkung der Ausschussquote;
- Wichtung aller Prozesseinflussfaktoren;
- Optimierung der Prozeßparameter;
- Anisotropie der Schwindung (Folge der Orientierungserscheinung) ist die hauptsächliche Ursache für Verzug, d.h. geeignete Füllstoffe einsetzen;
- Untersuchungen zur Optimierung der Mehrpunktauflage hinsichtlich Anzahl und Geometrie;
- Einsatzpotential von elektrischen bzw. Hybrid- Spritzgußmaschinen;
- Steigerung der Reproduzierbarkeit durch Senkung der Entformungskräfte mittels Oberflächenbeschichtung und -gestaltung.

3.5 Konventionelle Fassungsmethoden beim Einsatz von Kunststoff

Kleben

Kleben als Montagetechnologie ist u.a. wegen der guten Benetzbarkeit (hydrophiles Verhalten) unter Auswahl geeigneter Klebstoffe realisierbar. Bei einem Produktionsvolumen über 50.000 Stück/a treten hier jedoch die gleichen Probleme auf, wie sie beim Einsatz von Metallfassungen in Kapitel 2 beschrieben wurden.

Die Beimengung von Teflon (PTFE) zur Verbesserung der Gleiteigenschaften ist gekoppelt mit einer Verschlechterung der hydrophilen Eigenschaften des Polycarbonates und muß bei Bedarf mit in Betracht gezogen werden.

Fassen mit Vorschraubring (VSR)

Diese Fassungstechnologie ist analog dem Kleben ebenfalls mit den vorhandenen Erfahrungen seitens Metallfassungen umsetzbar. Zu berücksichtigen ist nur, daß die Herstellung einer Spritzgußform mit Gewinde, aufgrund zusätzlicher Elemente, sehr aufwendig und somit teuer ist. Der anschließenden spanenden Herstellung des Gewindes steht der hohe Werkzeugverschleiß, bedingt durch den 30 % -igen Kohlefaseranteil, entgegen.

3.6 Schnappverbindungen (Snap- In) als Fassungstechnologie

Eine sehr weit verbreitete (z.B.: im Automobilbau) und ideal für den Werkstoff Kunststoff und dessen Herstellverfahren Spritzgießen entwickelte Montagetechnologie ist das „Snap- In“ (dt. einschnappen).

Snap- In- Verbindungen sind formschlüssige Verbindungen von zwei oder mehreren Bauelementen. Grundlage der Fixierung rotationssymmetrischer optischer Bauelemente sind die an der Fassung radial symmetrisch angeordneten Schnapphaken, die sich beim Montieren kurzzeitig elastisch verformen (siehe /47/48/49/50/51/52/)

3.6.1 Allgemeines

Schnappverbindungen aus Kunststoff stellen eine durchaus sinnvolle Alternative zum Kleben oder dem „Heat Molding“ dar.

Bei diesem Verfahren wird die zu fassende Linse mittels mehrerer Schnapphaken (Vorzugsvariante drei je um 120° versetzt) in der Fassung verankert.

Entscheidender Vorteil ist die einfache Montage ohne Hilfsstoffe und Werkzeuge. Je nach Anwendungsfall können die Haken so dimensioniert werden, daß eine zerstörungsfreie Demontage möglich ist.

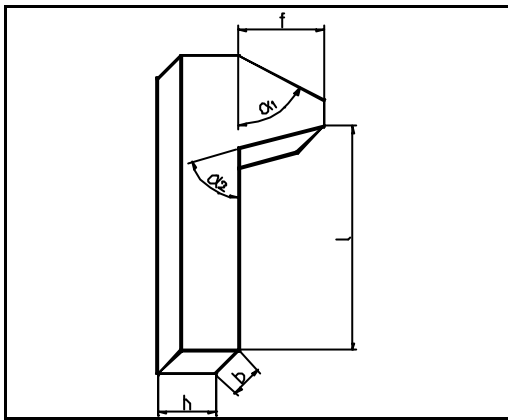


Bild 3.13 Snap-Haken

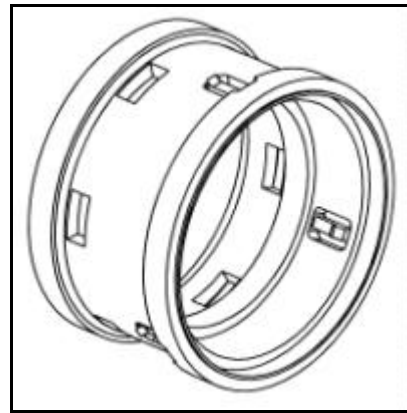


Bild 3.14 Fassung Snap-Haken

Ist der Haltewinkel α_2 kleiner als 45° , dann bleibt die Verbindung lösbar. Ist der Haltewinkel zwischen 45° und 90° , dann ist die Linse nahezu unlösbar mit der Fassung verbunden. Die Ausdrückkraft, die zum Lösen einer derart dimensionierten Verbindung erforderlich ist, kann die Ausdrückkräfte, die beim Kleben oder Gratfassen erreichbar sind, bei weitem übersteigen. Wesentlichen Einfluß auf die Haltekraft haben auch die Dimensionierung des Hakenquerschnitts und der Hakenlänge, sowie die Auswahl des Kunststoffes und die damit verbundenen Materialkenngrößen zulässige Dehnung ($\epsilon_{zul.}$) und Reibungszahl (μ).

Ein Schnapphaken wird vereinfacht als einseitig eingespannter Biegebalken idealisiert und nach der elementaren Biegetheorie für einachsige Biegung berechnet./31/ Beim Fügevorgang muß der Schnapphaken um den Betrag der Hinterschneidung f ausgelenkt werden.

$$f = \frac{2}{3} \cdot \frac{e \cdot l^2}{h} \quad (3.2)$$

Ergänzt durch die zulässige Randfaserdehnung $\epsilon_{zul.}$ als Dimensionierungskennwert läßt sich die Berechnungsgleichung für den zulässigen Hinterschnitt H_{zul} eines Schnapphakens ableiten.

$$H_{zul} = \frac{3}{2} * \frac{l^2}{h} * \frac{e_{zul.}}{100} \quad (3.3)$$

Als Auslenkkraft (Q) wird die Kraft bezeichnet, die am freien Ende des Balkens angreift.

Diese läßt sich durch den aus der Biegetheorie stammenden Zusammenhang

$$d = \frac{M_B}{W} \quad (3.4)$$

errechnen. Das Widerstandsmoment des Querschnitts (W) ermittelt sich bei einem rechteckigen Querschnitt und Krafteinleitung in Richtung h durch Gleichung (3.5). /31/

$$W = \frac{b \cdot h^2}{6} \quad (3.5)$$

Ersetzt man σ durch $E_S \cdot \epsilon_{zul}$ und M_B durch $Q \cdot l$ dann ergibt sich, nach Q umgestellt:

$$Q = \frac{b \cdot h^2}{6} \cdot \frac{E_S \cdot \epsilon_{zul}}{l} \quad (3.6)$$

Die Auslenkkraft (Q) wird anschließend in die Montage- bzw. Demontagerkraft mittels eines Umsetzungsfaktors η umgerechnet. In diesen Umsetzungsfaktor gehen die Reibungszahl μ (Glas gegen PC $\mu = 0,20 / 31$) und der Füge- (α_F) bzw. Haltewinkel (α_H) ein.

$$\mathbf{h}_{F/H} = \frac{\mathbf{m} + \tan \alpha_{F/H}}{1 - \mathbf{m} \tan \alpha_{F/H}} \quad (3.7)$$

Je größer der Winkel bzw. die Reibungszahl ist, desto größer wird der Umsetzungsfaktor und damit auch die aufzubringende Kraft. Die Fügekraft F_F und die Haltekraft F_H können mit folgender Gleichung berechnet werden:

$$F_F = Q \cdot \mathbf{h}_F \quad (3.8)$$

$$F_H = Q \cdot \mathbf{h}_H \quad (3.9)$$

Durch Iteration der Variablen lassen sich die gewünschten Werte für die Montagekraft und für die Demontagerkraft ermitteln.

Zur richtigen Dimensionierung gehört die Auswahl eines geeigneten Kunststoffes. Seine zulässige Dehnung sollte über 2% liegen (optimal 4-6%). Je größer die Dehnung ist, desto weiter kann der Haken ausgelenkt werden, wodurch ein größerer Hinterschnitt gewährleistet wird, was wiederum zu einer Steigerung der Lagefestigkeit der Linse in der Fassung führt. Dies steht jedoch in direktem Widerspruch zu den Anforderungen an den Werkstoff für die Maßhaltigkeit beim Spritzgießen.

Das in dieser Arbeit diskutierte Polycarbonat mit 30% Kohlefaseranteil ist für die Herstellung von Schnappverbindungen wegen seiner niedrigen Dehnbarkeit ($\epsilon_{zul} < 2\%$) ungeeignet.

Es muß also ein Kunststoff gefunden werden, der die Kriterien Maßhaltigkeit nach dem Spritzgießen und ausreichende Dehnbarkeit optimal erfüllt.

Ein weiterer zu berücksichtigender Aspekt ist das Entformen von Schnappverbindungen aus dem Spritzgußwerkzeug. Die Hinterschneidung, auf der die Wirkungsweise der Schnappverbindung beruht, muß beim Spritzgießen aus dem Werkzeug entformt werden. Dabei stellt sich die Frage, ob die Teile direkt entformt werden können oder ob die Notwendigkeit besteht, die Hinterschneidung in Schieber, Backen oder zusammenfallende Kerne einzuformen. Eine generelle Antwort ist hierzu nicht möglich, spielt aber eine entscheidende Rolle für die Kosten des Spritzgußwerkzeuges.

3.6.2 Berechnungsgrundlagen für Schnappverbindungen als Fassungstechnologie

Zur Unterstützung einer schnellen und einfachen Berechnung wurde für den Konstrukteur der beschriebene Algorithmus als Excel- Marko geschrieben /114/. Nach Eingabe der konstruktiven Randbedingungen in Form der in Tabelle 3.6 angeführten gegebenen Größen erhält der Konstrukteur die Abmaße der Snap- In- Haken (Tabelle 3.7).

Sekantenmodul [%]	E_S	Linsendicke [mm]	D
zul. Dehnung [%]	$\epsilon_{zul.}$	Linsendurchmesser [mm]	d
Reibungszahl []	μ	Radius obere Fläche [mm]	r_o
Seitenverhältnis am Querschnitt []	b/h	Radius untere Fläche [mm]	r_u
Hinterschnitt [mm]	f	Ringschneidenbreite [mm]	e
Fügewinkel [°]	α_1	Ringschneidenwinkel [°]	β
		Höhendiff. zw. Ringschneide u. Einspannstelle [mm]	Δl

Tabelle 3.6 Gegebene Größen zur Berechnung von Snap- In Haken /114/

Gesuchte Größen sind dabei:

Sehnentangentenwinkel [°]	γ	Umsetzungsfaktor Fügewinkel [°]	η_1
Erfüllung der Bedingung $\gamma < 45^\circ$		Umsetzungsfaktor Haltewinkel ($90^\circ - \gamma$)	η_2
Hakenlänge [mm]	l	Auslenkkraft [N]	Q
Hakenbreite [mm]	b	Montagekraft [N]	F_1
Hakentiefe [mm]	h	Demontagekraft [N]	F_2
Demontagewinkel [°]	α_2		

Tabelle 3.7 Gesuchte Größen zur Berechnung von Snap- In Haken /114/

Die konträren Materialanforderungen, insbesondere das Verhältnis der Dehnung ϵ zur reproduzierbaren Maßtoleranz, schließen diese montagefreundliche Technologie beim derzeitigen Stand der Spritzgußtechnik aus. Ein Lösungsansatz ist, unterschiedliche Materialpaarungen in einer Form abzuspritzen, um somit partiell die gewünschten Eigenschaften zu erlangen.

Zur kalkulatorischen Orientierung ist wichtig, daß für jeden Schieber im Spritzgußwerkzeug ca. 10.000 DM erforderlich ist. Die so entstehenden Mehrkosten müssen mit der Einsparung beim Montieren verglichen werden.

4 Das "Heat Molding"

Mitte der 70er Jahre gab es eine Technologie zur Herstellung von Refraktionslinsen in einem Polymethylmethacrylat (PMMA) Kunststoffgehäuse. Zum Befestigen der Linsen wurde ein 0,8 mm breiter und 0,5 mm hoher Grat mit einem auf 170° C erwärmten Stempel umgelegt.



Bild 4.1 Refraktionslinse

Diese empirisch erarbeitete Technologie besaß Werkstattcharakter. Sie war eingeschränkt nur für bestimmte Linsen einsetzbar. /105/ Es fehlten die theoretischen Grundlagen. Basierend auf der Grundidee, dem Befestigen der Linse durch Umlegen eines Grates, sollten diese Mängel im Rahmen der vorliegenden Arbeit beseitigt werden. Das Ziel war eine umfassend anwendbare Technologie zum Gratfassen in Kunststofffassungen. Dafür sollten die theoretischen Grundlagen und praktischen Ausrüstungen geschaffen werden.

4.1 Definition und Einordnung der Montagetechnologie

Zur Zuordnung wurde die entwickelte Montagetechnologie in nachfolgender Definition zusammengefaßt.

„Das "Heat Molding" ist eine Technologie zum Fassen rotationssymmetrischer optischer Bauelemente unter Zufuhr von Wärme. Durch plastisches Umformen eines zylindrischen Umformgrates am Ende einer Fassung aus amorphem Kunststoff entsteht eine unlösbare kraft- und formschlüssige Verbindung.“

Damit ordnet sich das „Heat Molding“ als Fügen durch Umformen wie folgt in die Fertigungstechnik (Bild 4.2) ein.

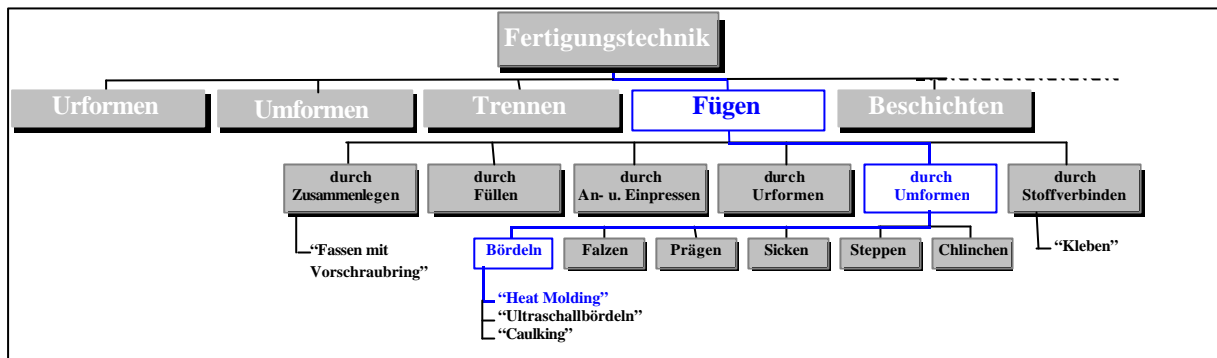


Bild 4.2 Einordnung des „Heat Molding“ in die Fertigungstechnik (DIN 8593) /100/

4.2 Geometrische Vorbetrachtungen

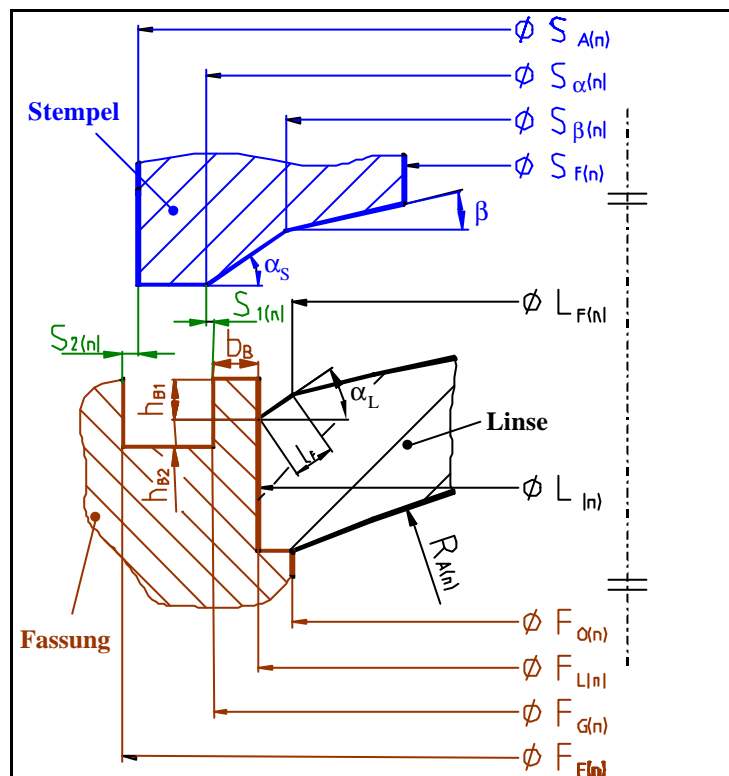


Bild 4.3 Geometrie zwischen Stempel, Linse und Fassung

4.2.1 Der Umformgrat

Der Umformgrat ist das befestigende Element zwischen Fassung und Linse (Bild 4.3). Durch seine Geometrie erwärmt der Stempel (siehe Kapitel 4.2.2) den Grat und die Relativbewegung und formt ihn um. D.h. dieser legt sich auf die Fasenfläche der Linse und erzeugt die kraft- und formschlüssige Verbindung zwischen Fassung und Linse. Der Umformgrat wird auf Druck und Biegung beansprucht. Die Lage des montierten optischen Bauelementes muß

durch den Umformgrat so gesichert sein, daß ein Verschieben oder Verkippen nicht mehr möglich ist.

Voraussetzung für eine qualitativ einwandfreie Verbindung ist die richtige Position zwischen Linsenoberkante und Umformgrat, im Bild 4.4 durch die rote Linie gekennzeichnet.

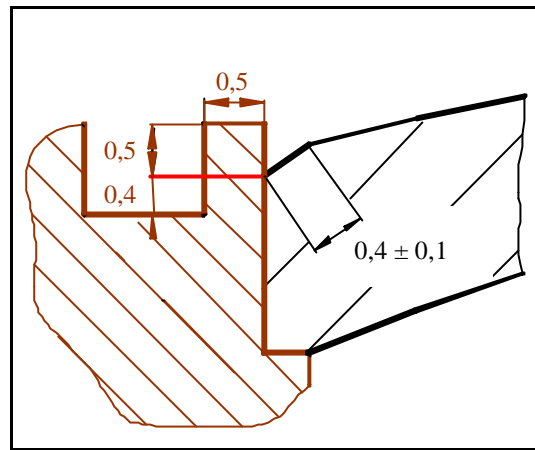


Bild 4.4 Die „ideale“ Linsenlage

Liegt die Linse zu hoch, steht zu wenig Grat zum Umformen und damit zum sicheren Fixieren der Linse zur Verfügung. Ist die Position der Linse zu niedrig, wirkt die Umformkraft des Stempels nicht auf den Grat. Die gesamte Kraft wird von der Fassung aufgenommen und führt zu deren elastischen Verformung. Die Linse kann nicht sicher fixiert werden.

Eine qualitative Anforderung an die Verbindung ist, daß die erforderlichen Ausdrückkräfte mindestens das sechsfache des Eigengewichtes übersteigen müssen /35/42/43/. Daraus resultiert die Dimensionierung des Umformgrates.

Versuche mit unterschiedlichen Umformgratbreiten (Δb_U) an einem Linsendurchmesser von 50 mm (125 g) haben gezeigt, daß schon eine Ausgangsbreite $b_B = 0,2$ mm ausreichen würde, um diese Anforderung zu erfüllen (siehe Bild 4.5).

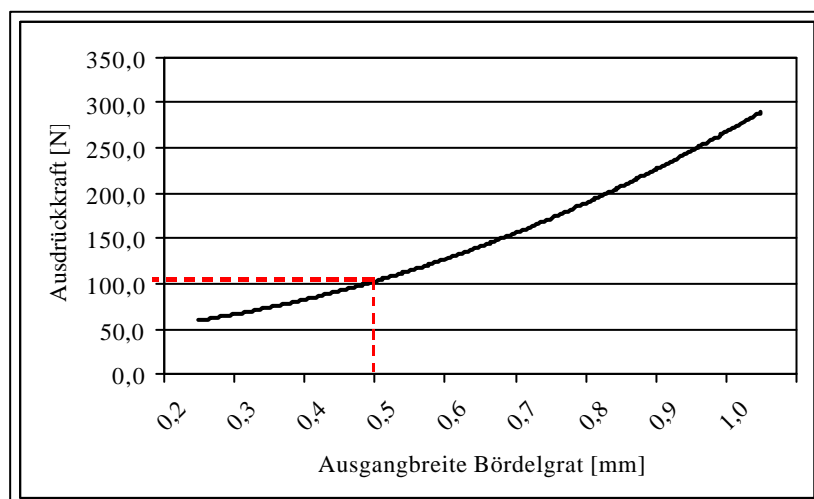


Bild 4.5 Zusammenhang zwischen Gratgeometrie und Ausdrückkraft

Einen nicht minder entscheidenden Einfluß auf die Umformgratgeometrie hat das Herstellverfahren. Das Formfüllungsvermögen bei dem hier zum Einsatz kommenden, mit 30% Kohlefaser verstärktem Polycarbonat, fordert eine Mindestbreite von 0,5 mm. Diese Wandstärke garantiert eine sichere Formfüllung und ist damit die Basis für einen reproduzierbaren Fügeprozeß.

Außerdem werden durch diese Überdimensionierung technologisch bedingte Toleranzen der Linsen mit abgefangen.

Daraus resultieren folgende Konstruktionsrichtlinien für den Umformgrat:

$$b_B = 0,5 \text{ mm} \pm 0,05 \text{ mm}$$

$$h_B = 0,9 \text{ mm} \pm 0,05 \text{ mm} \quad \text{unterteilt in} \quad h_{B1} = 0,5 \text{ mm} \text{ Umformhöhe}$$

und

$$h_{B2} = 0,4 \text{ mm} \text{ Auslaufhöhe}$$

4.2.2 Der Stempel

Der Stempel ist das Hauptwerkzeug für das „Heat Molding“. Er überträgt die wichtigsten Prozeßparameter bei diesem Verfahren, die Preßkraft ($F_P = 1000 \text{ N}$) und die Betriebstemperatur ($\vartheta_B \approx 194^\circ\text{C}$). Die Stempelgeometrie bestimmt die Form des umzulegenden Umformgrates und hat somit entscheidenden Einfluß auf die Qualität der Verbindung.

Wie in Kapitel 4.2.1 angesprochen, ist die Geometrie des Stempels ausschlaggebend für den energetisch effektiven und sicheren Ablauf des Fügevorganges.

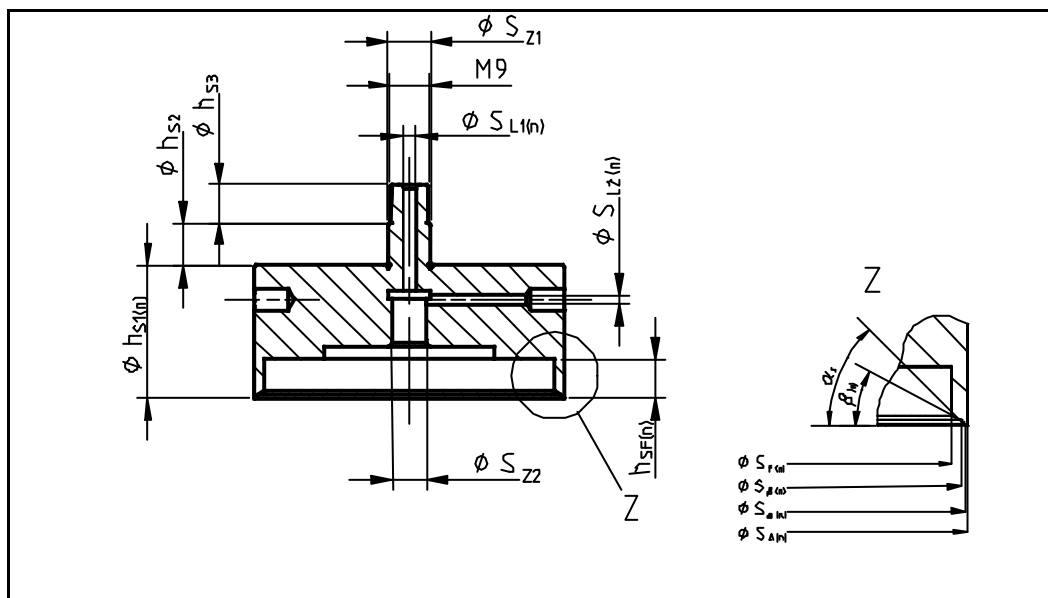


Bild 4.6 Stempel mit den wichtigsten Maßen

In Bild 4.6 sind die für den Umformprozeß wichtigsten Stempelmaße dargestellt. Tabelle 4.1 enthält alle für den Stempel relevanten Maße, deren Dimensionierung sowie deren geometrische Zusammenhänge im Umformprozeß.

Abkürzung	Bezeichnung	Dimensionierung		Zuordnung / Bemerkung
		Maß	Toleranz	
$\varnothing S_{A(n)}$	Außendurchmesser Stempel (Linse n)		- 0,1 mm	$\geq \varnothing S_{\alpha(n)} + 4 \text{ mm}$ $= \varnothing F_{F(n)} - 2s_{1(n)}$ $= \varnothing F_{G(n)} + 4 \text{ mm} + s_{2(n)}$
$\varnothing S_{F(n)}$	Durchmesser Freistich Stempel (Linse n)		+ 0,2 mm	$\varnothing S_{F(n)} = f(R_{B(n)}, \varnothing L_{(n)})$
$\varnothing S_{\alpha(n)}$	Durchmesser Winkel α_S Stempel (Linse n)			$= \varnothing F_{G(n)} + 0,1 \text{ mm}$ $= \varnothing L_{(n)} + 2(s_{1(n)} + b_B)$
$\varnothing S_{\beta(n)}$	Durchmesser Winkel $\beta_{(n)}$ Stempel (Linse n)			$= \varnothing L_{(n)} - 2 \cos \alpha_{L(n)} \cdot l_F$
α_S	Umformwinkel	45°	$\pm 2^\circ$	= Fasenwinkel α_L der Linse
$\beta_{(n)}$	Auslaufwinkel		$\pm 2^\circ$	$= \frac{1}{2} \arccos \left(1 - \frac{\varnothing L_{F(n)}^2}{2R_{B(n)}^2} \right)$ $= f(R_{B(n)}, \varnothing L_{F(n)})$

Tabelle 4.1 Die wichtigsten Stempelmaße und deren Zusammenhänge im Umformprozeß

Daraus ergibt sich folgender Berechnungsalgorithmus für das Werkzeug Stempel:

geg.: Linsenparameter:

- $\varnothing L_{(n)}$ Durchmesser Linse (n)
- $\alpha_{L(n)}$ Fasenwinkel Linse (n) (45°)
- $l_{F(n)}$ Fasenlänge Linse (n) (Toleranz $0,4 \pm 0,1 \text{ mm}$)
- $R_{B(n)}$ Krümmungsradius der Linse (n) auf Befestigungsseite
- $b_{U(n)}$ Breite Umformgrat (0,5 mm)
- $s_{1(n)}$ Spaltmaß 1 Fassung – Stempel (0,15 mm)

ges.: Stempelparameter

$$\varnothing S_{\alpha(n)} = \varnothing L_{(n)} + 2(s_{1(n)} + b_B) \quad (4.1)$$

$$\varnothing S_{\beta(n)} = \varnothing L_{(n)} - 2 * \cos \alpha_{L(n)} * l_F \quad (4.2)$$

$$\varnothing S_{A(n)} \geq \varnothing S_{\alpha(n)} + 4 \text{ mm} \quad (4.3)$$

$$\alpha_{S(n)} = \alpha_{L(n)} \quad (4.4)$$

$$\beta_{(n)} = \frac{1}{2} \arccos \left(1 - \frac{(\varnothing L_{(n)} - 2 \cos \alpha_{L(n)} * l_{F(n)})^2}{2R_{B(n)}^2} \right) \quad (4.5)$$

$$\varnothing S_{F(n)} = \varnothing S_{\beta(n)} - 4 \text{ mm} \quad (4.6)$$

Die Höhe des Freistiches ($h_{SF(n)}$) muß so groß sein, daß eine Berührung zwischen Stempel und Linse nicht möglich ist.

Zu berücksichtigen ist ebenso, daß diese Maße bei Betriebstemperatur ($\vartheta_B = 194^\circ \text{C}$) gelten!

Bei der Herstellung der Stempel muß der Unterschied zwischen Herstellungs- und Betriebstemperatur berücksichtigt werden. Dazu ist von den berechneten Maßen $\varnothing S_{A(n)}$, $\varnothing S_{\alpha(n)}$ und $\varnothing S_{\beta(n)}$ die Wärmeausdehnung zu subtrahieren.

Berechnungsgleichung für die Wärmeausdehnung

$$\Delta l = l_0 \cdot a \cdot \Delta t \quad (4.7)$$

Wärmeausdehnungskoeffizient für 100 Cr 6 bei 200° /58/

$$a_{100Cr6200^\circ C} = 12,2 \cdot 10^{-6} \frac{1}{K} \quad (4.8)$$

Betriebstemperaturkoeffizient /58/

$$J_B = 1 - a_{St200^\circ C} \cdot \Delta J \quad (4.9)$$

Die Werte für den Prozeß eingesetzt, ergibt folgende Formel zur Berechnung des Herstellmaßes der Stempeldurchmesser $\varnothing S_{A(n)}$, $\varnothing S_{\alpha(n)}$ und $\varnothing S_{\beta(n)}$:

$$\text{Herstellmaß} = \text{Sollmaß} \cdot 0,998 \quad (4.10)$$

Entscheidenden Einfluß auf den Umformvorgang sowie die Standzeit des Werkzeugs Stempel hat neben der Gestaltung der Kontaktfläche zwischen Werkzeug und Werkstück (siehe dazu Kapitel 4.4) vor allem der Umformgrad φ . Dieser wird hauptsächlich durch den Umformwinkel α bestimmt.

4.2.3 Der Umformwinkel α

Um den Umformprozeß effektiv zu gestalten ist es notwendig, die wichtigsten Prozeßgrößen zu optimieren.

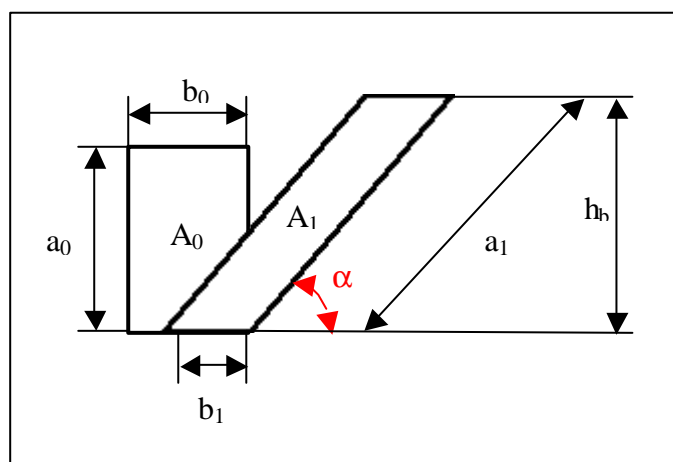


Bild 4.7 Geometrische Annahmen zum Umformwinkel α

Für das „Heat Molding“ ist neben den thermischen Parametern der Umformwinkel α die wichtigste Prozeßgröße.

Auf die Schnittebene (siehe Bild 4.7) bezogen und ohne Berücksichtigung des Auslaufbereiches ergeben sich mit der Annahme der Volumenkonstanz folgende Zusammenhänge.

Gegeben ist der Flächeninhalt des Rechtecks.

$$A_0 = a_0 \cdot b_0 \quad (4.11)$$

Mit Anwendung des Sinussatzes

$$h_b = a_1 \cdot \sin \mathbf{a} \quad (4.12)$$

und in die Flächengleichung für ein Parallelogramm eingesetzt folgt

$$A_1 = b_1 \cdot h_b = b_1 \cdot a_1 \cdot \sin \mathbf{a} \quad (4.13)$$

Die Änderungsfaktoren /114/

$$\Delta b = \mathbf{c} \cdot \Delta a \quad (4.14)$$

eingesetzt

$$A_1 = (a_0 + \Delta a) \cdot (b_0 - \Delta b) \cdot \sin \mathbf{a} \quad (4.15)$$

und angewandt auf die Berechnung der log. Formänderung ϕ (Umformgrad) /114/ resultiert

$$a_0 \cdot b_0 = (a_0 + \Delta a) \cdot (b_0 - \mathbf{c} \Delta a) \cdot \sin \mathbf{a} \quad (4.16)$$

Das Zwischenergebnis ergibt

$$\frac{a_0 \cdot b_0}{\sin \mathbf{a}} = a_0 \cdot b_0 + b_0 \cdot \Delta a - \mathbf{c} a_0 \cdot \Delta a - \mathbf{c} \Delta a^2 \quad (4.17)$$

und als quadratische Gleichung umgestellt

$$0 = \Delta a^2 - \frac{b_0 - \mathbf{c} a_0}{\mathbf{c}} \cdot \Delta a - \frac{a_0 b_0 \cdot \left(1 - \frac{1}{\sin \mathbf{a}}\right)}{\mathbf{c}} \quad (4.18)$$

Die Auflösung der quadratischen Gleichung liefert einen Grenzwert von $\alpha_{\text{Grenz}} = 39,792^\circ$.

Aufgrund wirtschaftlicher Betrachtungen hinsichtlich der Herstellung des Stempels und der Linsen wird der Umformwinkel α auf 45° definiert. Damit sind gleichzeitig die Werte der Winkel an Linse (α_L) und Stempel (α_S) mit 45° festgelegt.

4.2.4 Die Fassung

Die Fassung ist nach der Definition der Linsenanlageflächen (siehe Kapitel 3.1.2) mit dem in Kapitel 4.2.1 beschriebenen Umformgraden zu konstruieren. Wichtig für den Linsensitz ist die Planaufgabe. Unter Berücksichtigung der Toleranzkette wird der Linsenradius als Auflagerradius ($R_{A(n)}$) konzipiert, der für Verkippung enger toleriert ist. Somit gehen Fehler des optischen Bauelementes (wie z. B.: Keilfehler) nicht in diesen Radius ein.

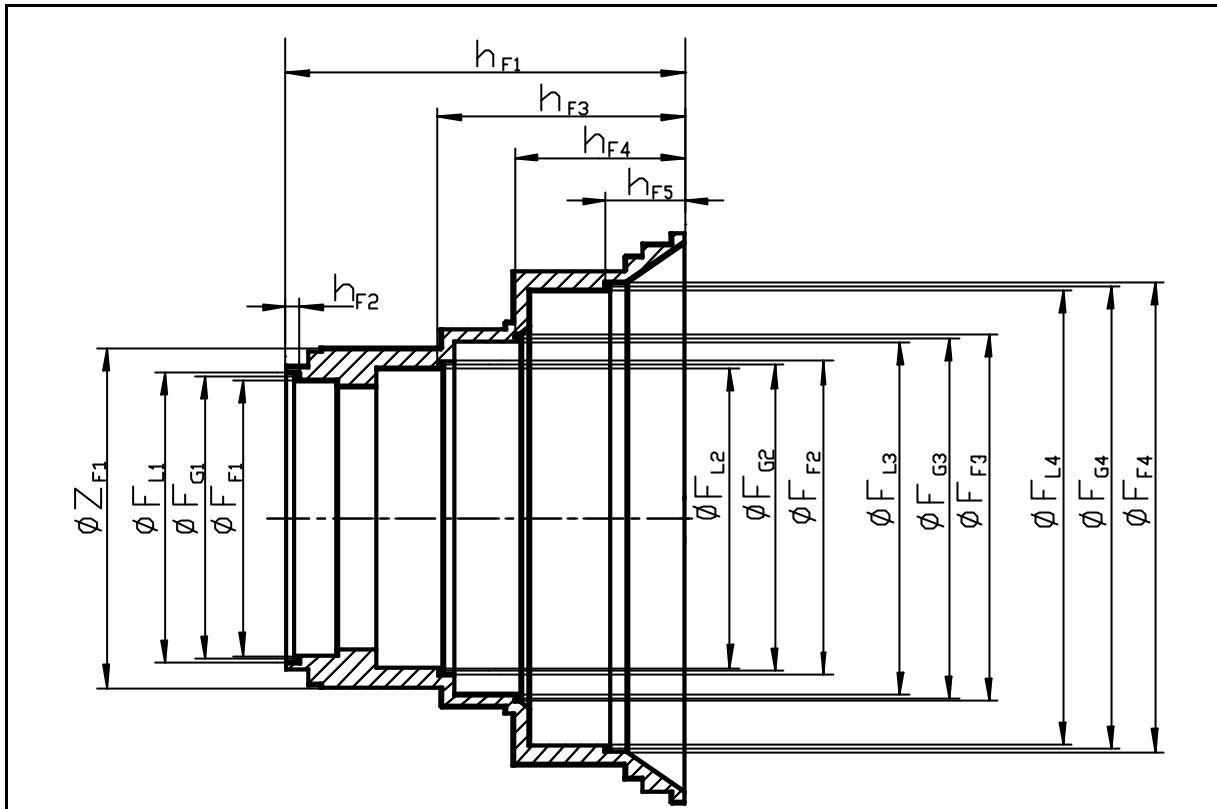


Bild 4.8 Fassungsbeispiel mit verfahrenstechnisch wichtigen Maßen

Abkürzung	Bezeichnung	Dimensionierung		Zuordnung
		Maß [mm]	Toleranz [mm]	
$\varnothing F_{F(n)}$	Durchmesser Freistich Fassung (Linse n)		Freimaß	$\geq F_{G(n)} + 5 \text{ mm}$
$\varnothing F_{G(n)}$	Durchmesser Grat Fassung (Linse n)		$\pm 0,05$	$= \varnothing F_{L(n)} + 2b_B$ $= \varnothing S_{\alpha(n)} - s_{1(n)}$
$\varnothing F_{L(n)}$	Durchmesser Linsensitz (n) Fassung		H 7	$\varnothing F_{L(n)} = \varnothing L_{(n)}$
$\varnothing F_{O(n)}$	optisch freier Durchmesser (Linse n)		+ 0,2	
H_U	Gesamthöhe Umformgrat	0,8	$\pm 0,05$	$h_B = h_{B1} + h_{B2}$
h_{B1}	Umformhöhe	0,5		nur theoret. Charakter
h_{B2}	Auslaufhöhe	0,3		nur theoret. Charakter
B_U	Breite Umformgrat	0,5	$\pm 0,05$	

Tabelle 4.2 Wichtige geometrische Kenngrößen zur Fassung

In Tabelle 4.1 sind die wichtigsten geometrischen Kenngrößen mit ihren Zusammenhängen zur Gestaltung der Fassung aufgelistet (siehe Bild 4.8).

Zur Berechnung der Fassungsgeometrien ergibt sich folgender Algorithmus:

ges.: Linsenparameter	$\varnothing L_{(n)}$	Durchmesser Linse (n)
	α_L	Fasenwinkel Linse (n)
	$l_{F(n)}$	Fasenlänge Linse (n) (Toleranz $0,4 \pm 0,1$ mm)
	$R_{B(n)}$	Krümmungsradius der Linse (n) auf Befestigungsseite
	$B_{U(n)}$	Breite Umformgrat (0,5 mm)

$$\text{ges.: Fassungsparameter } \varnothing F_{L(n)} = \varnothing L_{(n)} \quad (4.19)$$

$$\varnothing F_{G(n)} = \varnothing L_{(n)} + 2b_B = \varnothing L_{(n)} + 1 \text{ mm} \quad (4.20)$$

$$\varnothing F_{F(n)} \geq \varnothing L_{(n)} + 2b_B + 5 \text{ mm} \quad (4.21)$$

4.2.5 Das zu fassende optische Bauelement

Das rotationssymmetrische optische Bauelement, wie im Beispiel eine Linse, bedarf außer einer 45° Fase mit der Länge $0,4 \text{ mm} \pm 0,05 \text{ mm}$ am Krümmungsradius auf Befestigungsseite $R_{B(n)}$ keiner zusätzlichen fassungstechnologischen Anforderungen². In Tabelle 4.2 sind alle einfließenden Größen aufgelistet und deren Zusammenhänge erläutert.

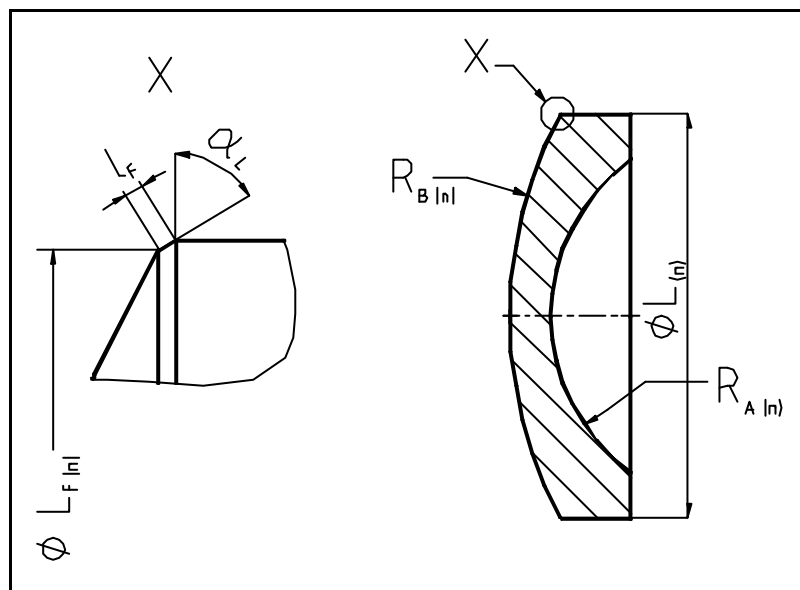


Bild 4.9 Linsenbeispiel mit verfahrenstechnisch wichtigen Maßen

² unter Berücksichtigung Planaufgabe siehe Kapitel 3.1.1

Abkürzung	Bezeichnung	Dimensionierung		Zuordnung
		Maß	Toleranz	
$\varnothing_{L_{F(n)}}$	Durchmesser Linse am Fasende (Linse n)		$\pm 0,05 \text{ mm}$	$\varnothing_{L_{F(n)}} = \varnothing_{L_{(n)}} - 2 \cos \alpha_{L_{(n)}} \cdot l_F$ $\varnothing_{L_{F(n)}} = \varnothing S_{\beta_{(n)}}$
$\varnothing_{L_{(n)}}$	Linsendurchmesser (Linse n)		g 6	
$R_{A(n)}$	Krümmungsradius der Linse auf Auflageseite (Linse n)			Toleranz rel. Flächenkipfung sollte $R_{B(n)} \geq R_{A(n)}$
$R_{B(n)}$	Krümmungsradius der Linse auf Befestigungsseite (Linse n)			Toleranz rel. Flächenkipfung $R_{A(n)} \leq R_{B(n)}$
l_F	Fasenlänge	0,4	$\pm 0,05 \text{ mm}$	Standardmaß (fix)
α_L	Fasenwinkel	45°	$\pm 2^\circ$	Standardmaß (fix)

Tabelle 4.3 Wichtige geometrische Kenngrößen zur Linse /110/

Beim Fassen von Kunststofflinsen ist es sinnvoll, herstellungsbedingte Eigenschaften zu nutzen. Die technologisch wichtige Fasenlänge l_F ist vorzugsweise als Maßfase auszulegen.

Qualitative Eigenschaften der montierten Baugruppe werden beim „Heat Molding“ durch

- das Passungsspiel,
- die Linsenrandhöhe,
- den Durchmesser und
- die Größe der Planfase als Auflagefläche bestimmt.

Die Ergebnisse der von mir durchgeführten Untersuchungen zeigten, daß bei in Toleranz befindlichen Einzelteilen ein Verkippen einzelner optischer Bauelemente auftritt. Die Ausfallrate erhöhte sich mit reduziertem Passungsspiel. Die Ursache ist nicht direkt im Befestigen zu sehen, sondern in der nicht ordnungsgemäßen Position der Linsen vor dem Fixieren. Speziell bei Versuchen mit Preßpassung hat das Einpressen der optischen Bauelemente zu sehr stabilen Ergebnissen geführt. /25/

4.3 Thermodynamische Vorbetrachtungen

Das „Heat Molding“ ordnet sich in die Gruppe der Warmumformverfahren ein. Bei amorphen Kunststoffen, die hier näher betrachtet werden, ist dies der Fall, wenn die Umformtemperatur oberhalb der Glasübergangstemperatur (T_G) und unterhalb der Schmelztemperatur (T_S) liegt (siehe Bild 4.10). Zum besseren Verständnis der Abläufe werden einige kunststoffspezifische Eigenschaften in Abhängigkeit zur Temperatur erklärt. Die ideale Umformtemperatur muß oberhalb der Glasübergangstemperatur (siehe Bild 4.10 T_g /99/) und unterhalb der Schmelztemperatur (T_S) liegen. In diesem Temperatursektor findet die energetisch effektivste Umformarbeit statt. (siehe Bild 4.12)

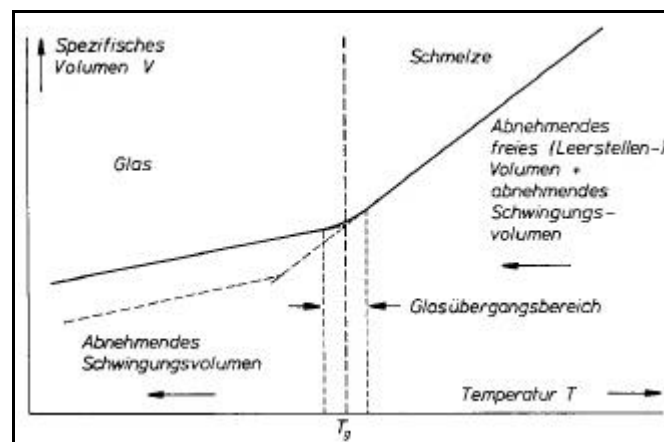


Bild 4.10 Glasübergangstemperatur /27/

4.3.1 Temperaturbereiche bei amorphen Kunststoffen

Bild 4.11 zeigt die Zusammenhänge zwischen Temperatur, Elastizitätsmodul (E), Festigkeit (δ) und Umformverhalten (Verformungsfähigkeit ϵ) der amorphen Kunststoffe.

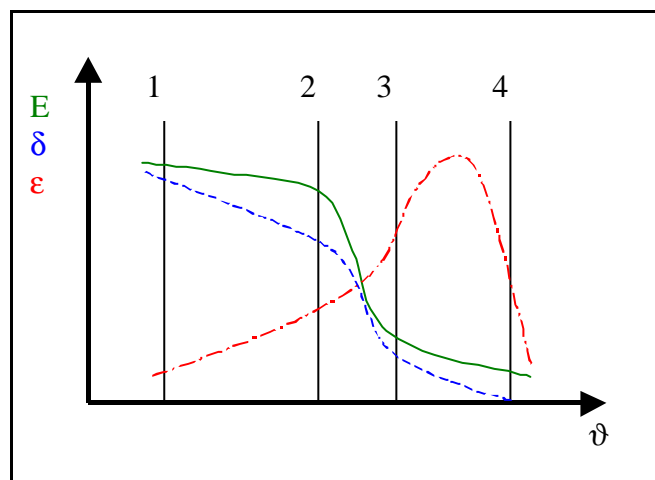


Bild 4.11 Temperaturbereiche von amorphen Kunststoffen /11/

Optimal ist die Temperatur im Bereich der höchsten log. Formänderung (φ) - maximaler Verformungsfähigkeit (ϵ). Für das hier diskutierte Material Polycarbonat mit 30% Kohlefaser liegt diese Temperatur bei 210°C. /11/26/28/29/ Hier sind die aufzubringenden Umformkräfte und die Prozeßzeit minimal.

4.3.1.1 Temperaturbereich 1 bis 2 (-100 ° C bis 130 ° C)

Der Temperaturbereich 1 – 2 (Bild 4.11) kennzeichnet die **Gebrauchstemperatur**. Im Fall Polycarbonat mit 30 % Kohlefaseranteil liegt diese zwischen –100 °C und + 130 °C. Das Material ist hart und spröde, die Molekülketten sind verfilzt. Charakteristisch dafür ist die hohe Zugfestigkeit bei geringer Bruchdehnung. Die amorphen Kunststoffe sind nicht nur transparent, sondern auch hart und spröde wie Glas. /31/26/

Der Elastizitätsmodul (E) bleibt über den gesamten Bereich nahezu konstant (17,7 – 15,2 GPa). Die Festigkeit (δ) nimmt mit zunehmender Temperatur um die Hälfte ab (Zugfestigkeit 210 – 140 MPA). Die Verformungsfähigkeit (ϵ) steigt mit zunehmender Temperatur um das Dreifache an (14 – 40 %). Das Material verhält sich elastisch, d.h. die Fließspannung k_f ist sehr hoch./96/

4.3.1.2 Temperaturbereich 2 bis 3 (130 ° C bis 150 ° C)

(Glasübergang T_g oder auch Erweichungstemperaturbereich)

Die **Glasübergangstemperatur T_g** ist lt. DIN 53436 die Temperatur, unterhalb derer die amorphen Kunststoffe hart und spröde wie Glas sind. /26/99/

Die Mikro- Brownsche Bewegung der hin- und herschwingenden Kettenbäuche zwischen den Verschlaufungspunkten nimmt ab, bis sie in einem stoffabhängig bestimmten Temperaturbereich endet und in Schwingungen der einzelnen Atome in den Ketten übergeht.

Durch zunehmende Wärmebewegung zwischen den Sekundärbindungen (Makro- Brownsche Molekularbewegung) wird der Werkstoff thermoelastisch zäh (niedrige Zugfestigkeit, hohe Bruchdehnung). /27/

Die T_g ist von mehreren Faktoren abhängig:

- Matrixwerkstoff,
- Füllmaterial (siehe Kapitel 3.1.1),
- Ausrichtung der Molekülketten beim Spritzvorgang, sowie
- Struktur und Beweglichkeit der Molekülketten (d.h. Steifigkeit der Einzelketten und zwischenmolekularen Kräften [Verhältnis zwischen Hauptvalenzbindungen und Nebenvalenzbindung]).

Diese Betrachtungen zeigen, daß der Glasübergang kein exakter Punkt, sondern ein Bereich ist./26/27/99/

Das hat einen entscheidenden Einfluß auf die Umformtemperatur. Änderungen bei den oben genannten Faktoren spielen somit eine große Rolle für den Prozeßablauf. Das heißt, wird die Geometrie z.B. durch Nacharbeit verändert, hat das Einfluß auf die Ausrichtung der Molekülstrukturen in der Fassung, also auf den Umformprozeß. Gleiches gilt für veränderte Parameter beim Spritzvorgang oder Chargenschwankungen beim Compound. Diese machen sich neben der Maßhaltigkeit der gespritzten Fassungen auch durch Veränderung der Prozeßabläufe beim „Heat Molding“ bemerkbar. Die Anforderung an höchste Konstanz schließt daher alle Prozesse von der Herstellung des Compounds bis zum Fassen der optischen Bauelemente ein.

4.3.1.3 Umformtemperaturbereich 3 bis 4 (150 bis 230 ° C)

Oberhalb der Glas temperatur nehmen Steifigkeit (E-Modul) und Festigkeit (δ) weiter ab. Das Verhalten wird zunehmend plastisch und viskos; die innere Reibung nimmt ab. Die höchste logarithmische Formänderung erreicht das hier zum Einsatz kommende Material bei 210°C. Danach nimmt der Umformgrad wieder ab. Der Schmelzprozeß beginnt, das Material wird teigig.

Diese Zusammenhänge ermöglichen die Thermoformbarkeit der amorphen Kunststoffe.

4.3.1.4 Umformtemperaturbereich ab 4 (über 230 ° C)

Im thermoplastischen Bereich oberhalb der Fließtemperatur T_F (entspricht 4) nehmen die Sekundärbindungen ab, die Ketten können gegeneinander verschoben werden. Der Werkstoff ist teigig (niedrige Bruchdehnung und Zugfestigkeit) und seine Viskosität nimmt ab.

Steigt die Temperatur weiter an, werden oberhalb der Zersetzungstemperatur T_Z die Primärbindungen und damit der Werkstoff zerstört.

4.3.2 Die ideale Umformtemperatur

Die ideale Umformtemperatur muß oberhalb der Glasübergangstemperatur (T_g) und unterhalb der Schmelztemperatur (T_s) liegen. In diesem Temperatursektor kann die Umformarbeit energetisch am effektivsten verrichtet werden.

Optimal ist die Temperatur im Bereich der höchsten log. Formänderung (ϕ) - maximaler Verformungsfähigkeit (ϵ). Für das hier diskutierte Material Polycarbonat mit 30% Kohlefaser liegt diese Temperatur bei 210°C. Hier sind die aufzubringenden Umformkräfte und die Prozeßzeit minimal.

4.3.3 Der thermodynamische Ablauf

Der thermodynamische Ablauf wird im wesentlichen durch zwei Faktoren bestimmt; die vorhandene Wärmekapazität des Werkzeugs und die Fähigkeit, diese Energie in die Umformzone zu leiten.

4.3.3.1 Die Wärmekapazität des Werkzeugs

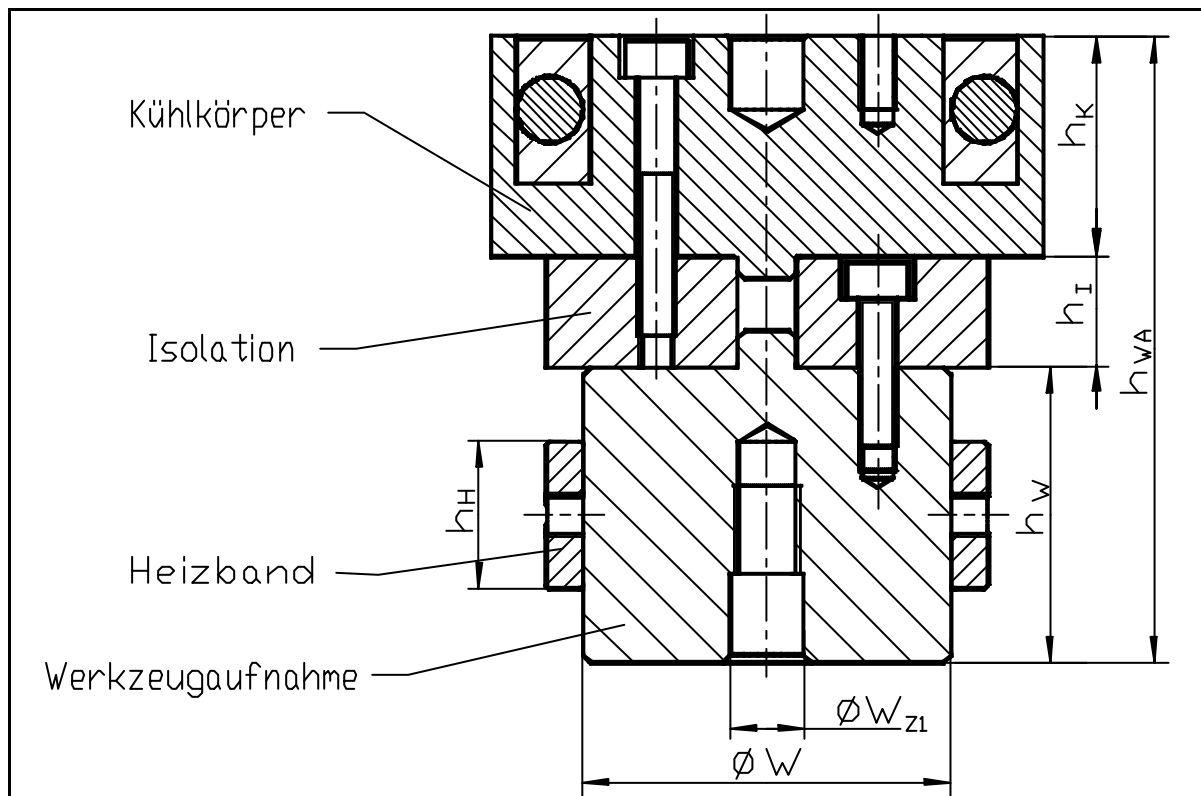


Bild 4.12 Aufbau der Thermischen Einheit am Realisierungsbeispiel

Die umformtechnische Eigenschaft des Werkzeugs ist charakterisiert durch die Fähigkeit des Materials, Wärme zu speichern. Zur Steigerung der Wärmekapazität wurde der Adapter zum Werkzeugwechsel gleichzeitig als Wärmespeicher ausgelegt. Die Wärmekapazität des Werk-

zeugs ist die Summe der Komponenten Adapter und Stempel und wird nach Gleichung (4.22) berechnet. /31/

$$C = \sum c_i \cdot z_i \cdot V_i \quad (4.22)$$

Daraus folgt, daß für eine maximale Wärmekapazität bei konstantem Volumen (V_i) die Dichte (ζ_i) und die spezifische Wärmekapazität (c_i) der verwendeten Werkzeugmaterialien ausschlaggebend sind.

Werkstoff (allg.)	$c \left[\frac{J}{kg \cdot K} \right]$	$\zeta \cdot 10^3 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$	$c \cdot \zeta \cdot 10^6 \left[\frac{J}{K \cdot m^3} \right]$
Stahl	470	7,8	3,7
Bronze	394	8,8	3,5
Kupfer	395	8,9	3,5
Aluminium	896	2,7	2,4

Tabelle 4.4 Wärmekapazitiver Vergleich div. Stempelmaterialien /30/32/

Für den Adapter ist Stahl das geeignete Basismaterial. Erstens ist die Wärmekapazität bei gleichem Volumen maximal und zweitens ist durch gleiches Wärmeausdehnungsverhalten an der Schnittstelle zum Werkzeugwechsel eine enge Tolerierung möglich (Tabelle 4.3). Für das Material des Stempels sind weitere Kriterien bestimmend. Diese werden in Kapitel 4.5 ausführlich erläutert.

4.3.3.2 Der Wärmetransport

Der Wärmetransport kennzeichnet die Wärmemenge (Q) bezüglich Fläche, Tiefe und Zeit, die von dem Stoff transportiert werden kann. /30/31/

$$Q = \frac{I_{PC} \cdot A_D \cdot t_{P(n)} \cdot \Delta J}{l_J} \quad (4.23)$$

Die sie beeinflussenden Größen sind /30/:

λ Wärmeleitfähigkeit, eine stoffabhängige Größe

$$\left[\lambda_{PC} = 0,37 \left[\frac{W}{m \cdot K} \right] \right]$$

A_D Durchtrittsfläche, eine geometrisch abhängige Größe ($A = f(\varnothing L, b_G)$)

$t_{P(n)}$ Prozeßzeit, Prozeßgröße (Einstellvariable) [s]

$\Delta \vartheta$ Temperaturdifferenz, eine verfahrenstechnisch definierte Prozeßgröße [ca. 174 K]

l_ϑ Länge (Dicke), an der die Temperatur gefragt ist, eine verfahrenstechnisch definierte geometrische Größe [0,5 mm]

Die Wärmeleitung hängt in Festkörpern von verschiedenen Transportmechanismen ab. Im wesentlichen erfolgt die Ausbreitung von Wärmeenergie in Form von Schwingungsenergie über gekoppelte Gitterschwingungen zwischen benachbarten Atomen und in Form von kinetischer Energie über Stoßprozesse zwischen den Leitungselektronen. In reinen Metallen, im allg. sehr gute Wärmeleiter, überwiegt der Beitrag der Elektronen zur Wärmeleitung. Bei Kunststoffen, im Gegensatz zu Metallen sehr schlechte Wärmeleiter, beruht die Wärmeleitfähigkeit auf der Wärmebewegung der Moleküle. Die Schwingungen werden von einem Molekül an das andere weitergegeben. Bei den Kettenmolekülen steigt zwar die Wärmebewegung der Moleküle, aber sie wird dadurch eingeschränkt, daß die Kettenmoleküle nie als Ganzes schwingen, solange der Kunststoff nicht geschmolzen ist. Je stärker die Molekülbewegung eingeschränkt ist, um so geringer ist die Fortpflanzung dieser Bewegung, die Wärmeleitung.

Die Ursache für den Transport von Wärmeenergie ist das Auftreten eines im allgemeinen zeitlich und räumlich veränderlichen Temperaturfeldes, /30/

$$T(r, t) = T(x, y, z, t) \quad (4.24)$$

in dem die Wärme stets längs eines Temperaturgefälles in Richtung von höheren zu tieferen Temperaturen strömt. Die in der Zeit dt durch eine Fläche A fließende Wärmemenge dQ bestimmt den Wärmestrom. /30/

$$\Phi_{th} = \frac{dQ}{dt} \quad (4.25)$$

Das Verhältnis aus dem Wärmestrom und der von ihm durchströmten Fläche definiert man als Wärmestromdichte q_{th} , die proportional zum Temperaturgefälle ist und senkrecht auf dieser Fläche steht. Daraus resultiert der vektorielle Charakter der Wärmestromdichte. Mit der Wärmeleitfähigkeit λ als Proportionalitätsfaktor erhält man die aus der Erfahrung abgeleitete Wärmeleitungsgleichung /30/123/

$$q_{th} = -\mathbf{1} \frac{dT(r)}{dr} \quad (4.26)$$

Das negative Vorzeichen in Gleichung (4.26) berücksichtigt die Richtung des Wärmestromes von höheren zu tieferen Temperaturen, d.h. der Temperaturgradient $dT \frac{(r)}{dr}$ ist negativ.

Diese Aussage ist jedoch nicht vollständig. Nach dem Energieerhaltungssatz ist die abgestrahlte und durch die elektrische Heizung zugeführte Wärmemenge mit in die Betrachtung der dem Stempel eigenen Wärmemenge einzubeziehen.

Das daraus folgende theoretische Ergebnis ist auf Grund nicht exakt definierbarer Größen (real abgestrahlter Wärmemenge) stark fehlerbehaftet, liefert aber wichtige Informationen für die Gestaltung des Werkzeugs.

Um Aussagen über das reale Verhalten treffen zu können, wurde das Temperaturleitverhalten gemessen. Ein Stempel mit senkrecht zur Achse liegender Fläche wurde auf 194 °C erwärmt. Die Fassung wurde entsprechend modifiziert und mit geeigneten Temperatursensoren im Abstand zur Berührungsfläche in 0,1 mm Schritten bis 1,0 mm versehen. Die so gemessenen Temperaturen ergaben folgenden Verlauf (Bild 4.13)

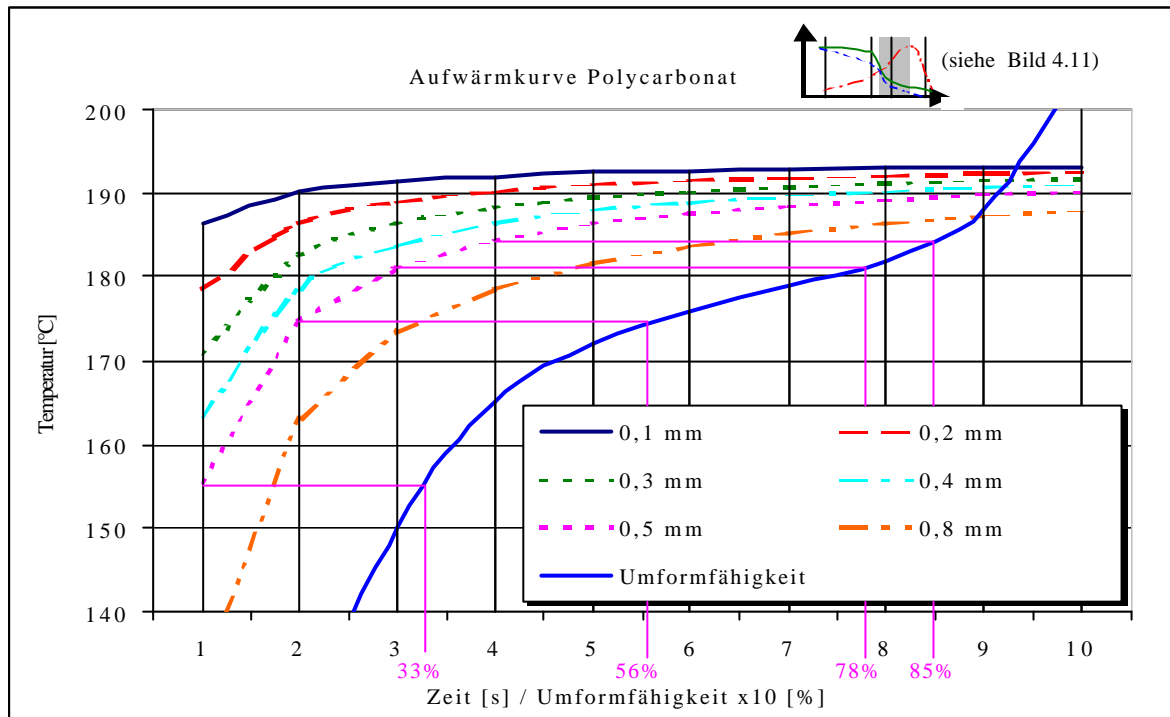


Bild 4.13 Aufwärmkurve Polycarbonat mit integrierter log. Formänderung

Daraus lassen sich Schlußfolgerungen zum logarithmischen Formänderungsvermögen ziehen und Prozeßzeiten ableiten. Die einzelnen Phasen des Umformvorganges werden im nachfolgenden Kapitel näher erläutert.

4.4 Die 5 Phasen des "Heat Molding"

In dieser Arbeit wird eine Technologie zum Fassen von optischen Bauelementen behandelt. Das Einlegen der Bauelemente ist dabei nicht Gegenstand der Untersuchungen und wird als gegeben vorausgesetzt. Alle Untersuchungen beruhen auf der Annahme, daß die optischen Bauelemente lt. Zeichnungsspezifikation entsprechend eingelegt sind. Sind die Ausgangspositionen für die Auswertung von Bedeutung, wird speziell die Ausgangssituation mit Meßergebnissen definiert.

Der Prozeß des Fassens untergliedert sich in 5 Phasen. Jede einzelne Phase und ihre wichtigsten Zusammenhänge sind in Tabelle 4.5 zusammengestellt.

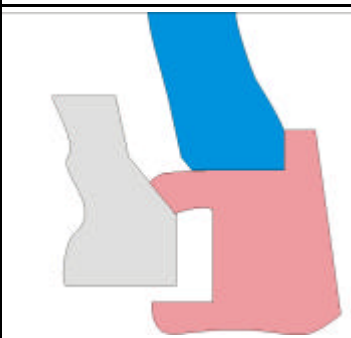
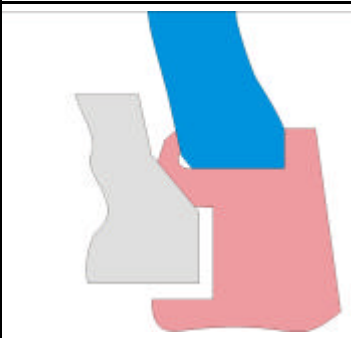
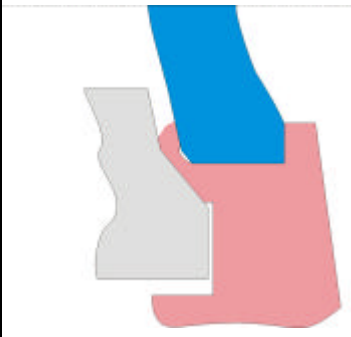
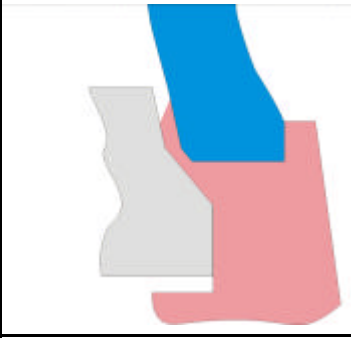
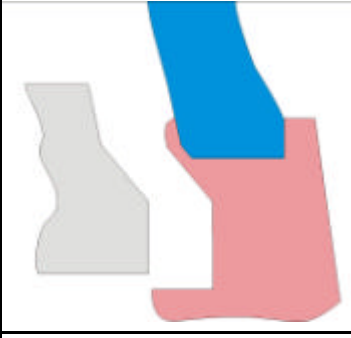





Phase	1 Erwärmen	2 Umlegen	3 Fließen	4 Relaxation	5 Abkühlen
Skizze					
Beschreibung	<ul style="list-style-type: none"> Stempel setzt auf Grat Grat wird erwärmt und gestaucht 	<ul style="list-style-type: none"> Material gleitet am Stempel Kontaktfläche wird größer E-Modul nimmt ab Temperatur steigt 	<ul style="list-style-type: none"> Material fließt weiter am Stempel Kontaktfläche wird größer E-Modul nimmt ab Temperatur steigt 	<ul style="list-style-type: none"> kein Fließen Molekülketten richten sich aus Innere Spannungen nehmen ab Temperatur steigt 	<ul style="list-style-type: none"> Temperatur fällt Linse ist unterhalb T_G fixiert
Zeit[s]/Weg[mm]	1/0,05	0,5/0,3	3 – 5/0,1	2 – 10/0,05	(2)/0
Relativgeschw. abhängig von	0,003 [m/min]	0,036 [m/min]	0,002 - 0,012 [m/min]	0,015 – 0,000,3 [m/min]	0 [m/min]
Schliffbild					

Tabelle 4.5 Die 5 Phasen des „Heat Molding“ und ihre wichtigsten Zusammenhänge

4.4.1 Phase 1 - Erwärmen

Der Stempel senkt sich und trifft auf den Umformgrat. Dort verharrt er für $t_v = 1$ s mit minimaler Kraft (Gewichtskraft plus Zustellkraft der Presse ca. 230 N). An der Kontaktstelle zwischen Stempel und Umformgrat findet ein Wärmeaustausch statt.

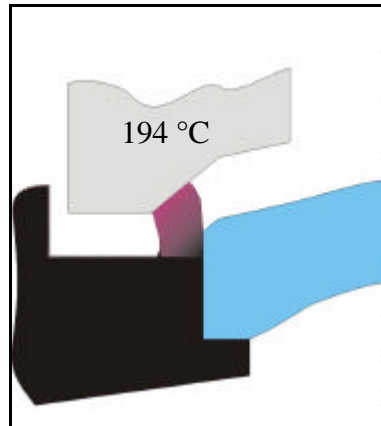


Bild 4.14 Phase 1 des „Heat Molding“

Auf Grund der schnellen Erwärmung der oberen Randschichten paßt sich der äußere Grat der Stempelgeometrie an (siehe Bild 4.14).

Aus den in Kapitel 4.3.3 beschriebenen Zusammenhängen ergibt sich folgende Charakteristika:

Eindringtiefe [mm]	Temperatur [°C]	Umformfähigkeit [%]
0,1	186	89
0,2	178	68
0,3	172	46
0,4	164	38
0,5	164	33

Tabelle 4.6 Temperatur und Umformfähigkeit in Phase 1

Bei der anschließend eingeleiteten Kraft wird somit die Hauptumformarbeit in den Bereichen bis 0,3 mm stattfinden.

4.4.2 Phase 2 - Umlegen

Nach der empirisch optimierten Haltezeit t_v von 1s beginnt Phase 2. Es wird Druck (Preßkraft $P = 1.000 \text{ N} \pm 20 \text{ N}$) über den Stempel auf den Grat ausgeübt. Durch den eingeleiteten Druck beginnt der bereits ausreichend erwärmte Bereich am Stempel zu fließen und legt sich um. Charakteristisch für Phase 2 ist die hohe Geschwindigkeit der Umformung. Die Umformge-

schwindigkeit ist für den gesamten Prozeß mit $0,6 \left[\frac{mm}{s} \right]$ am höchsten. Außerdem ist der Umformweg mit 0,3 mm maximal. Ursachen sind der hohe Druck (kleinste Fläche zwischen Stempel und Umformgrat) und die 3 Freiheitsgrade für die Bewegungsrichtung.

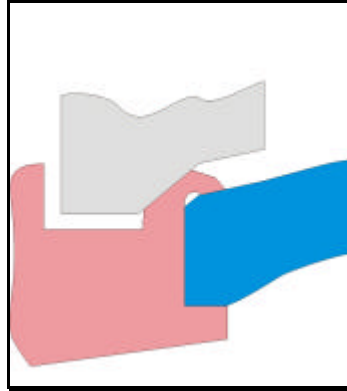


Bild 4.15 Phase 2 des „Heat Molding“

Durch den Umformwinkel α_S des Stempels entsteht eine Relativbewegung zwischen Stempel und Umformgrat. Diese Bewegung ist abhängig von der Reibung, dem Winkel α_S und dessen Schenkellänge. (siehe Kapitel 4.2.2.1)

4.4.3 Phase 3 - Anlegen

Der kontinuierliche Wärmeeintrag erweicht das Material weiter. Die innere Reibung nimmt stetig ab. Die Umformfähigkeit steigt. Das Material beginnt zwischen Linse und Stempel zu fließen (Zwangsflußrichtung).

Die Fläche zwischen Stempel und Umformgrat wird größer – der Druck nimmt weiter ab, die Umformgeschwindigkeit sinkt. Dem Grat bleibt nur noch der Freiraum zur Zwangsbewegung zwischen Linse und Stempel. Die weitere Erwärmung (u.a. unterstützt durch die größere Fläche) bewirkt, daß die innere Reibung des Materials abnimmt (Kapitel 4.3.1.3) und gleichzeitig der viskose Anteil zunimmt – die erwärmte Masse beginnt entlang des Stempels und der Linse zu fließen.

Der Grat wird im Bereich der Linsenfase vollständig an die Linse gepreßt. Die Rauheit der Fase unterstützt den Formschluß.

Auf den Schliffbildern (bzw. den Prinzipskizzen) ist deutlich ein Hohlraum zwischen Umformgrat und Linsenphase zu sehen. Die Ursache liegt in der noch nicht ausreichenden Umformfähigkeit. Diese wiederum ist auf nicht ausreichende Erwärmung sowie Wärmeabgabe an die Linse zurückzuführen.

Der Umformgrat paßt sich mit dem schon plastisch viskosen Bereich der Kontur des Stempels an und wird umgebogen - der Grat berührt die Linse. Dadurch vergrößert sich die Fläche und

der effektive Druck nimmt ab. Außerdem stellt die Linse einen Widerstand für die Umformbewegung dar. Die Umformgeschwindigkeit fällt ab.

4.4.4 Phase 4 – Relaxation (Fixieren / Entspannen)

Die Umformung ist abgeschlossen und die Entspannung des Materials beginnt. Der Stempel trifft auf das Vollmaterial der Fassung. Die Kraft verteilt sich, der Druck nimmt ab. Im Umformgrat haben die Moleküle und Kohlefasern Zeit, sich auszurichten (wg. Entropie) und zu entspannen. Die Spannungen, welche durch die Umfangreduzierung und Streckung des Grates hervorgerufen wurden, können sich durch Molekülbewegungen abbauen.

Die entscheidenden Einflußparameter auf die Zeit der Phase 5 sind:

- Länge der Kohlefasern (direkt proportional zur Phasenzeit) /12/
- Ausrichtung der Molekülketten beim Spritzgießen (individuell WZ-abhängig) /87/
- Temperatur in der Umformzone (indirekt proportional) /116/
- Umformgrad (direkt proportional) /116/

Die Temperatur hat im gesamten Umformgrat die Stempeltemperatur erreicht.

Die Zeit muß so gewählt werden, daß beim Abkühlen in Phase 5 ein Minimum an Restspannungen eingefroren wird!

4.4.5 Phase 5 - Abkühlen

Die Umformzone (der Umformgrat) hat sich innerhalb von 2s unterhalb der Glastemperatur auf 130° C abgekühlt. Das Material verhält sich nicht mehr plastisch. Alle bis zu diesem Zeitpunkt noch vorhandenen, durch die Umformung entstandenen Spannungen werden eingefroren.

Beim Verformen werden die amorphen Thermoplaste oberhalb der Erweichungstemperatur (Bereich 3 – 4 siehe Kapitel 4.3.1.3) gut verformbar, sind aber noch gummielastisch. Daraus ergeben sich zwei Anforderungen. Erstens ist die Zeitspanne der Phase 4 so einzustellen, daß die eingefrorenen Orientierungsspannungen minimal sind. Zweitens muß sowohl im Betrieb als auch beim Transport abgesichert sein, daß die Temperatur die Glastemperatur nicht überschreitet, da die unmittelbar nach dem Verformen zum Verhüten der Rückverformung unter der Verformungsspannung abgekühlten Werkstücke bei Überschreiten der Glastemperatur (T_G) ihre Form unter der Wirkung der eingefrorenen Orientierungsspannungen wieder verlieren. /89/

4.5 Tribologische Wechselwirkungen zwischen Stempel und Umformgrat

„Tribologie (griech. "Reibungslehre“) ist die Wissenschaft und Technik von aufeinander einwirkenden Oberflächen in Relativbewegung. Sie umfaßt das Gesamtgebiet von Reibung und Verschleiß, einschließlich Schmierung, und schließt entsprechende Grenzflächenwechselwirkungen sowohl zwischen Festkörpern als auch zwischen Festkörpern und Flüssigkeiten oder Gasen ein.“/62/

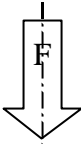

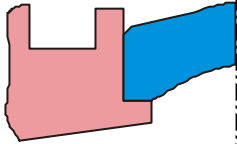
Relativbewegung	Preßkraft		
	Kontaktdauer		
	Kinematik		
Stempeloberfläche	Geometrie	Beschichtung	
	- α_s	- Gefüge	
	- R_a	- Härte	
	- Kontaktfläche	- Material	
Gratoberfläche	Molekülstruktur		
	Temperatur		
	R_a, R_z		
	Kontaktfläche		

Tabelle 4.7 Wichtige tribologische Einflußgrößen beim „Heat Molding“

Für einen exakten und reproduzierbaren Befestigungsprozeß ist die Optimierung der Einflußzonen von entscheidender Bedeutung. Die bei der tribologischen Betrachtung einfließende Relativbewegung wird in Tabelle 4.7 definiert. Durch die Umsetzung mit einer hydropneumatischen Presse (siehe Kapitel 5.3) besteht an dieser Stelle keine Möglichkeit der Beeinflussung. Die Relativbewegung wurde deswegen nicht weiter untersucht. Analog verhält es sich mit der Gratoberfläche. Deren Struktur und Eigenschaften (R_A, R_Z) verändern sich durch die Erwärmung deutlich, so daß eine Optimierung des Ausgangszustandes nicht sinnvoll ist.

Der Schwerpunkt der Optimierung lag somit beim Werkzeug.

4.5.1 Das Stempelgrundmaterial

Beim Stempel, dem entscheidenden Werkzeug beim „Heat Molding“, sind neben seiner Geometrie (siehe Kapitel 4.2) auch seine materialspezifischen Eigenschaften für einen ordnungsgemäßen Prozeßablauf wichtig.

Die Anforderung an das Stempelgrundmaterial sind /59/:

- hohe Standzeit (d.h. Oberflächenhärte ≥ 800 HV)
- ausreichende Festigkeit ($\geq 1.000 \frac{N}{mm^2}$)
- sehr gute Wärmeleitfähigkeit $\geq 30 \frac{W}{K * m}$ (siehe Kap. 4.3)
- gute Spanbarkeit
- Anlaßbeständigkeit bis 230°C
- galvanische Beschichtbarkeit
- Korrosionsbeständigkeit gegen PC und Kohlenstoff

Diese Anforderungen sind nicht bei Raumtemperatur sondern bei der Betriebstemperatur (210°C) zu erfüllen!

„Stähle sind normalerweise die einzigen Werkstoffe, die wirklich zuverlässig arbeitende Werkzeuge mit hohen Standzeiten garantieren“. /58/

Als sehr gutes Stempelgrundmaterial hat sich 100 Cr 6 herausgestellt. Neben seiner guten Zerspanbarkeit im weichgeglühten Zustand steigern die Legierungselemente Chrom und Kohlenstoff die Warmfestigkeit. Die 1,6 % Chrom erhöhen den Korrosionsschutz und der Mangananteil von 0,4 % erhöht die Festigkeit und Zähigkeit. Die Risiken der Wärmebehandlung, Maßänderung und Verzug, werden durch eine anschließende Feinbearbeitung beseitigt. Das Ausgangsmaterial ist im Anlieferzustand vergütet. /58/

Eigenschaft	Wert	Einheit
Anteil Kohlenstoff	1,0	[%]
Anteil Chrom	1,6	[%]
Anteil Mangan	0,4	[%]
Zugfestigkeit	990	$\left[\frac{N}{mm^2} \right]$
Oberflächenhärte ⁴	61	[HRC]
Wärmeleitfähigkeit (λ) ³	25,15	$\left[\frac{W}{m * K} \right]$
Wärmeausdehnungskoeffizient (α) ⁴	12,20	$\left[\frac{10^{-6} m}{K m} \right]$

Tabelle 4.8 spezifische Eigenschaften von 100 Cr 6 /58/

³ bei 200° C

4.5.2 Kontaktvorgänge in der Umformzone

Neben dem Basismaterial sind die mikrogeometrische Gestaltung und die Optimierung der Kontaktfläche erforderlich. Beim Kontakt der Stempeloberfläche mit dem Umformgrat tritt durch molekulare Wechselwirkung in der Kontaktgrenzfläche Adhäsion auf.

Innerhalb der Moleküle der in Berührung stehenden Oberflächen herrschen Schwankungen in der Elektronenverteilung. Aus ihnen resultiert deren Anziehungskraft, die **Adhäsion**./14/ Sie hat ihre Ursache in elektromagnetischen Wechselwirkungen. Entscheidender Faktor für die Stärke der Kraft ist die Entfernung zwischen den Molekülen der beiden Oberflächen.

4.5.3 Chemische Bindungen

Die Ursache einer Adhäsion kontaktierender Festkörper sind chemische Bindungen, die auch die Kohäsion, d.h. den inneren Zusammenhalt fester Körper, bewirken. Die Grundformen der chemischen Bindung werden eingeteilt in (starke) Hauptvalenzbindungen (Ionenbindung, Atombindung, metallische Bindung) mit einer typischen Bindungsenergie von 2 – 8 eV/Atom sowie (schwache) Nebervalenzbindungen (van der Waal'sche Bindung) mit etwa 0,1 eV/Atom. /31/

Die Oberflächenspannung hat ihre Ursache in den zwischenmolekularen Kräften, welche die betreffende Substanz zusammenhalten. Diese zwischenmolekularen Kräfte gleichen sich im Inneren als *Kohäsionskräfte* für die einzelnen Moleküle aus, da dort jedes Molekül allseitig von Nachbarmolekülen umgeben ist. An der Oberfläche gibt es jedoch nach außen hin keine Nachbarmoleküle. Daraus resultiert hier eine Kraft, die in das Innere gerichtet ist und z. B. bei Flüssigkeiten durch die Krümmung der Oberfläche deutlich wird. Rein formal ist die Oberflächenspannung (γ) definiert als die Kraft, die einer Oberflächenvergrößerung pro Längeneinheit entgegenwirkt.

Nach Rabel /63/ gelten für Polycarbonat bei Raumtemperatur folgende Oberflächenenergien:

$$\text{dispenser Anteil} \quad \mathbf{g}_d = 37 \frac{Nm}{m}$$

$$\text{polarer Anteil} \quad \mathbf{g}_p = 1,8 \frac{Nm}{m}$$

$$\text{gesamte Oberflächenenergie} \quad \mathbf{g} = 38,8 \frac{Nm}{m}$$

Energetisch betrachtet ergibt sich bei einem Festkörper – Festkörper Kontakt eine Änderung der Oberflächenenergie $\Delta\gamma$ dadurch, daß zwei Oberflächenenergien durch eine Grenzfläche niedrigerer Oberflächenenergie ersetzt werden. /62/ Die Stärke der Adhäsionskräfte ist indirekt proportional (Potenzfaktor 3-4) zum Kontaktabstand.

Lt. Owens und Wendt /65/ kann die Adhäsionsarbeit W_{ab} bei Kenntnis der polaren und dispersen Oberflächenenergieanteile der Gleitpartner durch folgende Beziehung abgeschätzt werden:

$$W_{ab} = 2\sqrt{\mathbf{g}_a^d \cdot \mathbf{g}_b^d} + 2\sqrt{\mathbf{g}_a^p \cdot \mathbf{g}_b^p} \quad (4.27)$$

Zur Berechnung nach Owens und Wendt fehlen in der Literatur (/72/ bis /85/) Angaben zu den polaren und dispersen Oberflächenspannungen diverser Antihafbeschichtungen. Außerdem gilt „die Darstellung der Elementarvorgänge der chemischen Bindung nur für idealisierte Verhältnisse (z.B. Einkristalle, ideal glatte und atomar saubere Oberflächen etc.). Beim Kontakt realer technischer Bauteile wird eine Adhäsion entscheidend durch den Aufbau technischer Oberflächen und ihre Mikrostruktur beeinflusst, so daß eine Berechnung der Wirkung von Adhäsionskräften kaum möglich ist.“/62/

Diese „idealen“ Vorgänge liefern aber wichtige Orientierungen für die Materialauswahl eines Tribologischen Systems zur Steigerung des Wirkungsgrades und Minimierung des Verschleißes. Außerdem kann nur mit einem stabilen Prozeß die Qualität des Umformgrades (glatt, gleichmäßig eben und ohne Ausbrüche) erreicht werden.

4.5.4 Reibung zwischen Umformgrat und Stempel

Zwei Flächen, die sich unabhängig voneinander berühren, bilden ein Reibpaar. Ein Reibpaar berührt sich nicht mit seiner geometrischen Fläche A_0 , sondern mit einer erheblich kleineren Berührungsfläche A_r . Trägt man die reale Eindringtiefe $\frac{h}{R_m}$ des einzelnen Reibpartners in die

Rauhigkeit des anderen auf, so erhält man die Profiltraganteilkurve, auch Abbotsche Stützflächenkurve genannt. /17/

Berühren sich zwei Körper, spricht man von Haftreibung. Entsteht durch äußere Krafteinwirkung eine Bewegung zwischen den beiden Körpern, wird zwischen Gleitreibung und Rollreibung unterschieden.

Haftreibung:
$$F_R = \mathbf{m}_0 * F_P * \sin \mathbf{a}_s \quad (4.28) /31/$$

Bei der hier auftretenden Gleitreibung beruht der Widerstand gegen die Bewegung auf den Unebenheiten der beiden Oberflächen.

Gleitreibung:
$$F_R = \mathbf{m} * F_P * \sin \mathbf{a}_s \quad (4.29) /31/$$

Setzt man die vorherrschenden, empirisch ermittelten Werte der Reibungskoeffizienten ($\mu_0=0,21$, $\mu=0,14$) und des Stempelwinkels α_s ein, ergeben sich äußere Reibungsverluste für den glasperlgestrahlten Stempel von 14 % (Haftreibung) bzw. 10 % (Gleitreibung). /123/

Bei der Reibung bewirken die molekularen Anziehungskräfte zwischen den Oberflächen den Widerstand gegen die Bewegung. Der Reibungswiderstand ist jeweils proportional zu der Kraft, mit der die beiden Gegenstände zusammengedrückt werden, d.h. es besteht eine direkte Abhängigkeit zum Winkel α_s des Stempels. (siehe Kapitel 4.2.2)

4.5.5 Mikroskopische Oberflächengestalt

Neben der physikalisch- chemischen Natur ist die Oberflächenrauheit, d.h. die mikrogeometrische Gestaltabweichung von der idealen makroskopischen Geometrie des Stempels, eine wichtige Charakteristik der Funktionsfläche. Die Oberflächenrauheit wird durch die Fertigungstechnologie geprägt und stellt eine dreidimensionale stochastische Verteilung von „Rauheitshügeln“ und „Rauheitstälern“ dar. /62/

Die Mikrogeometrie einer rauhen Oberfläche wird durch die Rauhtiefe R_t und den Mittenrauhwert R_a bestimmt.

Der Profiltraganteil t_p ist das Verhältnis der tragenden Längen l_t zur Rauheitsbezugsstrecke l .

$$t_p = 100 \frac{l_t}{l} [\%] \quad (4.30) /31/$$

Beim Vergleich zwischen einer polierten und einer glasperlgestrahlten Stempeloberfläche ergeben sich folgende Werte:

polierte Stempeloberfläche: $t_p = 82,7 \%$

glasperlgestrahlte Stempeloberfläche: $t_p = 73,5 \%$

Daraus folgt, daß die polierte Stempeloberfläche zwar eine niedrigere Flächenpressung besitzt, aber gleichzeitig die Berührungsfläche größer ist und somit die Adhäsion zum Kunststoff zunimmt.

Die Versuche ergaben, daß eine mit Glasperlen gestrahlte Stempelwirkoberfläche ein besseres Klebverhalten als ein polierter Stempel zeigt. Das heißt durch das Strahlen wird der Abstand der Moleküle größer und somit die Adhäsion zwischen Stempel und Fassungsmaterial kleiner.

4.5.6 Materialauswahl der Stempelbeschichtung:

Aus den zahlreichen (idealen) experimentellen Untersuchungen in der Literatur (/14/.../17/20/59/.../62/72/.../85/) gehen folgende grundlegende Erkenntnisse hervor.

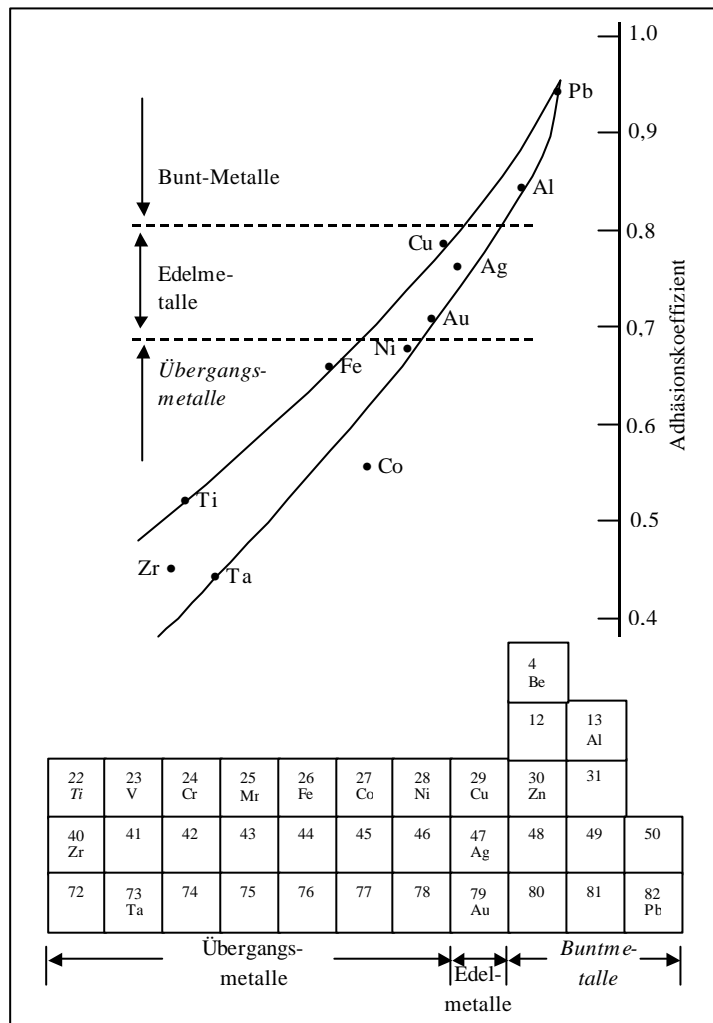


Bild 4.16 Einordnung von Beschichtungsmetallen ins PSE

- Mit steigender Härte nimmt bei Metallen die Adhäsion ab /62/
- Das Formänderungsvermögen stellt einen erheblichen Einflußfaktor auf die Adhäsion dar. Für kubisch flächenzentrierte Metalle ist die Ausbildung einer großen Kontaktfläche günstiger als für kubisch raumzentrierte Metalle oder Metalle mit hexagonaler Gitterstruktur. /62/
- Für die Stärke der Adhäsionsbindungen ist die Grenzflächendichte der freien Elektronen (“Jellium-Modell“) maßgeblich./62/

Basierend auf den Untersuchungen von K. Mohammed Jasim und E. S. Dwarakasa /76/ kann folgender mathematischer Zusammenhang zur annähernden Berechnung des adhäsiven Verhaltens gezogen werden:

$$W_r = \frac{E}{G} \cdot C_1 \cdot \frac{g}{H} \tag{4.31}$$

W_r Anziehungsfaktor (wear rate) $\left[10^9 \frac{cm^3}{cm} \right]$

E Elastizitätsmodul [GPa]

G Schubmodul [GPa]

C_1 Konstante des detaillierten Anziehungsvorgangs (particular wear process)

γ Oberflächenenergie $\left[\frac{erg}{cm^2} \right]$ [10.000 erg = 1 J = 1 Nm]

H Härte $\left[\frac{kg}{mm^2} \right]$

Mit den von Jasim und Dwarakadasa ermittelten Werten für die Materialien Aluminium, Blei, Kupfer, Nickel Silber, Eisen (α), Zink und Magnesium ergeben sich folgende grafische Zusammenhänge:

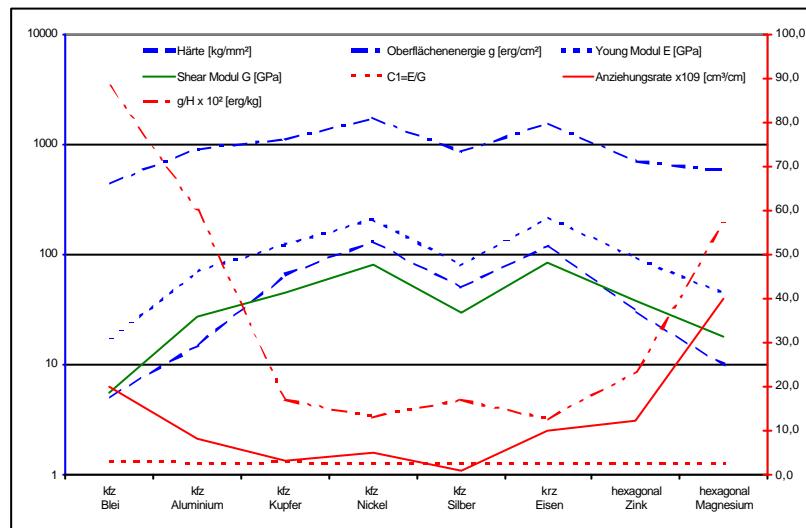


Bild 4.17 Zusammenhänge zwischen Härte, E-Modul, Oberflächenenergie und der Adhäsion bei metallischen Beschichtungen /76/

Unter diesen Gesichtspunkten sind Stempel mit Ti-, Cr-, Au-, Ni- und ohne Beschichtung untersucht worden. Außerdem wurden Gleitbeschichtungen auf oxidischer bzw. keramischer Basis trotz der schlechten Wärmeübertragungseigenschaften mit untersucht. /111/123/



Abbildung 4.18 Versuchsstempel mit TiN₂-Beschichtung

Die besten Ergebnisse wurden mit verchromter Oberfläche erzielt.

Chromschichten bis max. 0,5 µm Schichtdicke haben keine Mikrorisse. Darüber hinaus entstehen Mikrorisse mit 400 bis 800 Rissen/cm durch Zugspannungen in der Schicht. Oberhalb 2 ... 2,5 mm entstehen Makrorisse (bis 20 Risse/cm), die bis auf das Grundmetall hinunter gehen können. Die Bildung von Mikrorissen wird durch niedrige CrO₃-Gehalte und erhöhte Temperatur begünstigt. Ursache für die Entstehung von Mikrorissen ist ein bei der Verchromung gebildetes Chromhydrid CrH, das unter 18% Volumenkontraktion leicht zerfällt und dabei die Chromschichten unter Zugspannung setzt./15/

Ein weiteres Problem wird mit der Beschichtung des Stempels mit Chrom beseitigt. Unedle Metalle (wie z.B. Eisen) bilden bei Erhitzung an der Luftschicht eine Oxidschicht, deren Dicke mit der Temperatur und Zeit zunimmt. Durch Interferenzen des Lichtes entstehen die sogenannten Anlaßfarben. /32/ Das Problem ist nicht die Verfärbung, sondern die isolierende Wirkung der Oxidschicht und die damit einhergehende Reduzierung der Wärmeleitung (siehe Kapitel 4.3.3.2) sowie die chemische Neigung zur Bildung von Grenzschichten.

4.5.7 Verschleiß am Stempel

Eine weitere wichtige, tribologisch beeinflusste Eigenschaft ist das Standzeitverhalten des Werkzeuges. Die wichtigsten Verschleißarten, die bei der Konstruktion des Werkzeuges berücksichtigt werden müssen, sind adhäsiver, abrasiver und korrosiver Verschleiß.

Adhäsion als Verschleißmechanismus

Der Verschleißmechanismus Adhäsion besteht darin, daß bei einer tribologischen Beanspruchung infolge hoher lokaler Pressungen an einzelnen Oberflächenrauheitshügeln schützende Oberflächendeckschichten durchbrochen werden und lokale Grenzflächenbindungen entstehen. /59/ Diese Grenzflächenbindung wird im Falle metallischer Kontaktpartner auch als Kaltverschweißung bezeichnet. Beim Kontakt unterschiedlicher Werkstoffe erfolgt im allgemeinen ein Materialübertrag von dem kohäsiv schwächer gebundenen Partner zu dem kohäsiv stärker gebundenen Partner. /60/

Zur quantitativen Relation zwischen dem durch den Verschleißmechanismus Adhäsion entstehenden Verschleißvolumen und Beanspruchungsparametern gilt nach der Beziehung von Archard folgende empirische Relation /61/

$$W_v = K \cdot \frac{F_N \cdot s}{H} \quad (4.32)$$

F_N - Normalkraft

s - Gleitweg

H - Härte des weicheren Partners

Die Größe K ist der Archardsche Verschleißkoeffizient, der von einer Vielzahl von Einflußgrößen und Parametern der beiden Kontaktpartnern abhängt.

Das Metall mit wenigen Außenelektronen gibt Elektronen ab und wird elektrisch positiv (Kation). Der nichtmetallische Bindungspartner nimmt diese Elektronen auf und wird elektrisch negativ (Anion). In Abhängigkeit von den Umgebungsbedingungen (Oxidationszustand des Reibpartners, Sauerstoffpartialdruck, Luftfeuchte, usw.) entstehen Oxide, Hydroxide sowie Salze. Diese sind gekennzeichnet durch Eigenschaften wie große Bindungskräfte mit hoher Festigkeit und Härte. Eine plastische Umformung ist nicht möglich, da bei Verschiebung der Atome um einen Gitterabstand die abstoßenden Kräfte überwiegen.

Gezielte Werkstoffauswahl unter Beachtung des adhäsiven Verhaltens ist die einzige Möglichkeit, dem adhäsiven Verschleiß entgegen zu wirken. Der Einsatz von Schmiermittel entfällt, da es erstens durch den hohen Druck und die hohe Temperatur sehr schnell verdrängt würde und zweitens ist Schmierstoff in der Nähe von Optik stets zu vermeiden.

Angewandt auf die Kontaktfläche zwischen Stempel und Polycarbonat entsteht folgende Ausgangssituation:

- Fe besitzt zwei Außenelektronen in der N- Schale
- Cr besitzt ein Außenelektron in der N- Schale. /32/

Eisen kann doppelt so viele Bindungen mit dem Kunststoff eingehen wie Chrom. Je höherwertiger die Außenelektronen (Valenzelektronen) sind, desto leichter können sie austreten.

Die Chromoberfläche neigt wesentlich weniger (50%) zur Haftung, da nur ein Valenzelektron aus der N- Schale zur Verfügung steht. Eine Senkung des adhäsiven Verschleißes kann somit durch die Chrombeschichtung erreicht werden. Dies wurde durch die Experimente bestätigt.

Abrasiver Verschleiß:

Die Rauigkeitsspitzen des härteren Reibpartners (oder lose Partikel) dringen in das Material des weicheren Reibpartners ein und führen unter Pflugwirkung eine Mikrozerspannung durch. Es entstehen Riefen (radial), die keine Gratbildung an den Rändern aufweisen und Mikrospäne. /16/ Dem wird durch die Bestrahlung der Oberfläche mit Glasperlen Rechnung getragen.

Korrosiver Verschleiß:

In tribochemischer Reaktion reagieren die Werkstückoberflächen mit Bestandteilen der Umgebungsmedien. Es entstehen Oberflächenschichten mit verminderter Festigkeit. (z.B. Tribooxidation). /20/ Als Gegenmaßnahme entfällt die Senkung der Temperatur (ungünstig siehe Kapitel 4.3.2).

Durch wiederholte elastische und plastische Deformation der Oberflächenbereiche und dadurch bedingte Werkstoffermüdungen tritt der **Ermüdungverschleiß** auf. Es entstehen Verschleißpartikel durch Mikrorißbildung und spröde Rißausbreitung. Charakteristisch ist, daß diese Verschleißart eine Inkubationsperiode besitzt, innerhalb derer kein Verschleiß beobachtet wird. Um dieser Verschleißform entgegenzuwirken, wurde 100 Cr 6 als Basismaterial gewählt. Nach ca. 15.000 Montageprozessen war an keinem Stempel ein Anzeichen von Ermüdungverschleiß feststellbar. /123/

In Tabelle 4.7 sind die bestimmenden und verschleißgefährdeten Maße nach Nutzungsperioden bis zu 15.000 Objektivmontagen aufgeführt.

Da das exakte Verhalten (u.a. die chem. Reaktionen) zu komplex und nicht tiefgreifend bekannt ist, wurden zur Unterstützung der theoretischen Betrachtungen praktische Vergleichsversuche durchgeführt.

Meßstelle	Bezeichnung	Meßwerte					Toleranz	Einheit
		Soll	neu	nach 1.000	nach 5.000	nach 15.000		
[1]	Übergangsradius	0	0,277	0,307	0,311	0,312	≤ 0,4	[mm]
[2]	β_s	10	-1°24''	-0°43''	-0°10''	+0°30''	≤ 1,0	[°]
[3]	α_s	45	+2°10''	+2°51''	+3°20''	+3°22''	≤ 1,0	[°]
[4]	R_a	3,6	3,2	3,1	3,1	3,0	± 1	[µm]
[5]	R_z	16	12,5	11,9	11,7	11,7	± 5	[µm]

Tabelle 4.9 Verschleißerscheinungen am Stempel /123/

4.5.8 Fazit

Der Stempel ist aus Stahl (100Cr6) mit einer Kupfer-Kurzhartchromschicht (DIN 50690CuCr). Die gute Duktilität (Dehnbarkeit) des Kupfers trägt dazu bei, Spannungen zwischen dem Stempelgrundmaterial und der Verschleißschicht auszugleichen und die Haftung zwischen beiden Partnern zu erhalten. Diese Schicht ist 5-7µm dick. Das darauf elektrolytisch abgeschiedene Chrom besitzt eine sehr hohe Härte von 800 HV. Die Kurzhartchromschicht sollte 2 µm nicht überschreiten, da bei der Verchromung Chromhydrid CrH gebildet wird, das unter 18% Volumenkontraktion zerfällt und dabei die Chromschichten unter Zugspannung setzt und zu Mikrorissen führt. /32/

5 Fertigungseinrichtung Moldinganlage

Aufgabe der Moldinganlage ist es, die in Kapitel 4 genannten verfahrenstypischen Eigenschaften umzusetzen. Für das „Heat Molding“ wurde eine Sondermaschine entwickelt, die diese Anforderung erfüllt. Sie umfaßt 2 Arbeitsplätze mit je 2 Montagestationen (siehe in Bild 5.1 A und B).

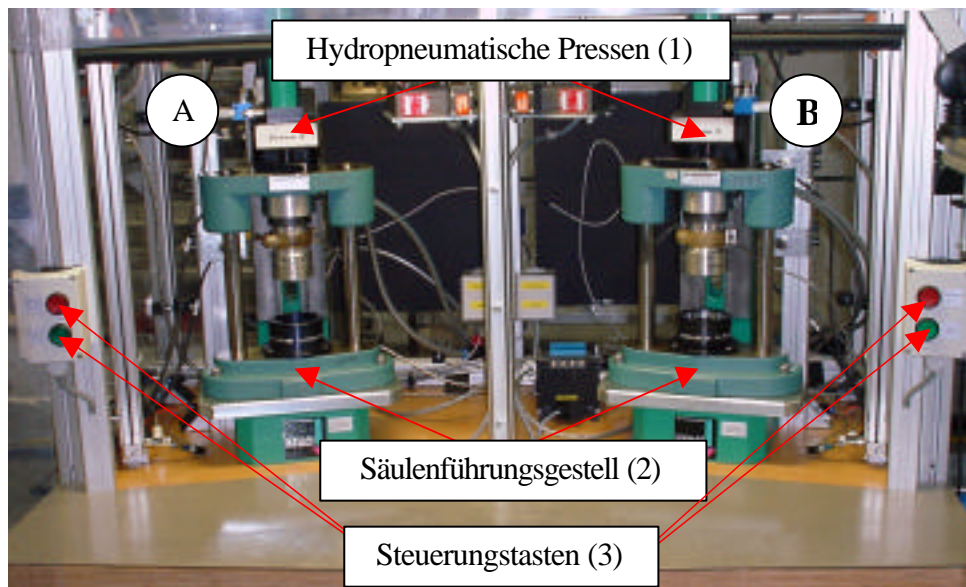


Bild 5.1 Ein Arbeitsplatz zum „Heat Molding“ mit 2 Montagestationen

Die gesamte Anlage ist im vorgestellten Beispiel (Bild 5.1) als Nestfertigung mit Fließliniencharakter konzipiert.

Alle Funktionen und Sensoren werden von einer zentralen SPS gesteuert und überwacht. Der identische Aufbau aller Montagestationen schafft höchste Flexibilität und ermöglicht Austauschbau. Die Antriebsenergie für den Umformvorgang liefern 4 hydropneumatische Pressen (1). Der Vorteil liegt im einfachen Aufbau, dem geschlossenen Hydrauliksystem und einem breiten Einstellbereich. Die Aufgabe des Werkzeughalters übernimmt das Säulenführungsgestell (2). /19/23/ Es ist ein gebräuchliches Normteil aus dem Umformbereich und sichert die exakte Positionierung von Werkzeug und Werkstück (d.h. Stempel zur Fassung mit eingelegter Linse) während des Montageprozesses.

Eine SPS Steuerung koordiniert und regelt alle prozeßrelevanten Daten. Außerdem ist durch die Ansteuerung gewährleistet, daß keine Fehlfunktion auftreten kann und die Sicherheit des Bedienpersonals durch die Presse nicht gefährdet ist.

Der symmetrische Aufbau aller 4 Montagestationen gewährleistet eine flexible Auslastung der Sondermaschine.

5.1 Das Säulenführungsgestell

Das Säulenführungsgestell (SFG) (Bild 5.1 (2) und 5.2) ist die zentrale Positionier- und Führungseinheit für die Relativbewegung zwischen Werkzeug und Werkstück. Bild 5.2 zeigt ein komplett montiertes SFG.

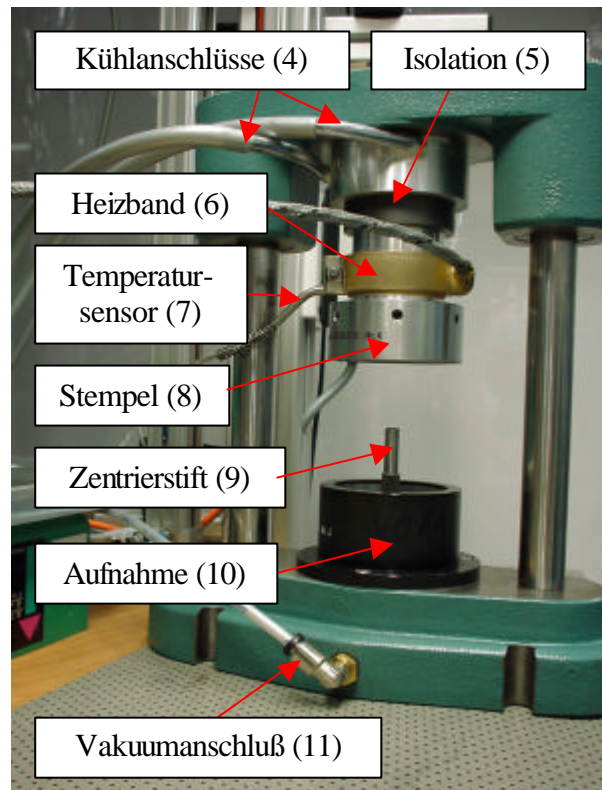


Bild 5.2 Komponenten im Säulenführungsgestell

Die wichtigsten Baugruppen sind die Thermische Einheit (Bild 5.2 (4) – (7)), der Stempel (8) und die Aufnahme, welche im folgenden näher erläutert werden.

5.2 Die Thermische Einheit

Die Thermische Einheit besteht aus Heizung (6,7), Isolation (5), Kühlung (4), und Werkzeugaufnahme (12) (siehe Abb. 5.2 und 5.3).

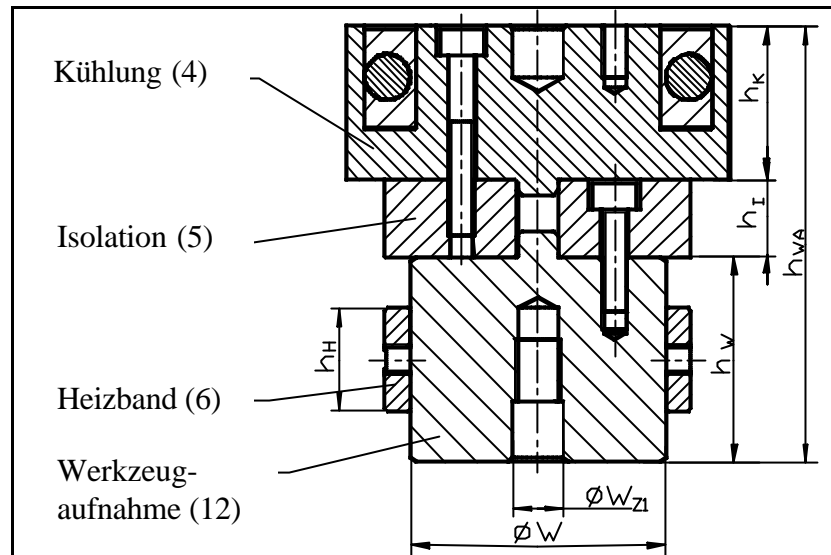


Bild 5.3 Die Komponenten der thermischen Einheit

Ihre Aufgabe ist es, die Temperatur in der Umformzone auf ± 2 K konstant zu halten. Wie in Kapitel 4. 3. erläutert, hat die Stabilität der Temperatur als Prozeßparameter entscheidenden Einfluß auf die Reproduzierbarkeit des Verfahrens.

Eine weitere Funktion besteht in der sicheren und exakten Aufnahme des Stempels bei niedriger Rüstzeit (< 1 min) und hoher Lagesicherung (Koaxialität $< 10 \mu\text{m}$; Parallelität $< 5 \mu\text{m}$). Das wird durch die Werkzeugaufnahme (12) realisiert. Sie ist so konstruiert, daß im kalten Zustand eine Zentrierung zwischen Stempel (8) und Aufnahme (10) mittels Zentrierstift (9) schnell und sicher erfolgen kann.

Als Heizelement kommt ein in der kunststoffverarbeitenden Industrie bewährtes Düsenheizband zum Einsatz. Mittels einer Zweipunktregelung wird die Temperatur in den Toleranzen $\pm 2\text{K}$ gehalten. Die Regelung erfolgt durch einen frei konfigurierbaren Temperaturregler. Hier erfolgt das komplette Temperaturmanagement. Die Alarmausgänge sind mit der SPS verbunden und verhindern für den Fall, daß die Temperatur nicht im Sollbereich liegt, eine Auslösen des Montagevorganges.

Das Spiel zwischen den Laufbuchsen und den Säulen vom Säulenführungsgestell beträgt ca. $6 \mu\text{m}$. Oberhalb $45 \text{ }^\circ\text{C}$ ist dieses Spiel aufgebraucht und das SFG beginnt zu klemmen. Durch Umwandlung der Prozeßkraft F_P wird die Prozeßkraft $F_{\bar{P}}$ reduziert. Um die geforderten Toleranzen einhalten zu können und damit volle Betriebsfähigkeit der Säulenführungsgestelle sicherzustellen, müssen Werkzeug und Werkzeugführung thermisch entkoppelt sein.

Diese Aufgabe übernimmt die Isolation (Bild 5.4). Besonders diffizile Materialanforderungen sind an den Isolationskörper gestellt. Bei Temperaturen über 200 °C und Preßkräften von 1.000 N muß die geometrische Form im µm Bereich garantiert sein. Außerdem sollte die thermische Isolierwirkung bei über 99% liegen. Mit 20% Grafit angereichertes PEEK erfüllt diese Forderungen. /12/

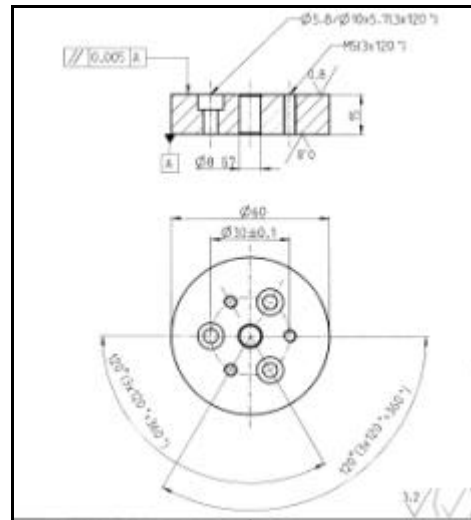


Bild 5.4 Isolation aus PEEK

Da auf Grund des hohen Energieeintrages nach mehrstündiger Funktion die Isolationswirkung nicht ausreicht, ist ein geschlossener Kühlkreislauf integriert. Positiver Nebeneffekt ist eine weitere Steigerung der Temperaturstabilität.

5.3 Die Presse

Die Preßkraft beeinflusst drei wichtige Parameter:

- die nach dem Vorgang eingetretene Passeänderung
- die Prozeßzeit und damit die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens
- die Prozeßsicherheit.

Zur Sicherung der Reproduzierbarkeit und mit dem Ziel einer einzigen Prozeßvariablen ($t_{p(n)}$), wurde diese Kraft für die Durchmesserbereiche 10 – 70 mm als konstant definiert. Nach der geometrischen Definition der Umformzone (siehe Kapitel 4) haben Versuche mit unterschiedlichen Durchmessern ergeben, daß die günstigste Presskraft unter den oben genannten Kriterien bei 1000 N liegt.

Als Antrieb wurde eine hydropneumatische Presse ausgewählt. Diese bietet im Vergleich zu alternativen Antrieben folgende Vorteile:

- Standardprodukt, welches im Reparaturfall leicht austauschbar ist
- kompaktes Einbaumaß

- geringer Verschleiß
- Werkzeug- und Werkstückschonung durch sanftes Aufsetzen im Eilhub
- getrenntes Regeln von Geschwindigkeit und Kraft in allen Phasen des Prozesses
- Kontrolle der Kraft durch Öldruckschalter und Manometer
- automatische Krafthubzuschaltung, d.h. Werkstückgeometrien (Höhe) werden ausgeglichen und können anlagenseitig vernachlässigt werden
- erfüllt Reinraumbedingungen
- äußerst niedriger Geräuschpegel

5.4 Die Werkstückaufnahme



Bild 5.5 Werkstückaufnahme (Typ innere Aufnahme)

Die Werkstückaufnahme hat die Aufgabe, die Fassung zum Stempel zu positionieren. In axialer Richtung wird dies über die Passung zwischen Fassung $\varnothing F_{Z(n)}$ und Aufnahme $\varnothing A_{Z2(n)}$ realisiert (Bild 5.6). Das hierfür erforderliche Spiel wird mit $g7 / H8$ definiert.

Prinzipiell kommen zwei Arten von Aufnahmen zum Einsatz. Die innere Aufnahme beschreibt die Lage der Fassung innerhalb der Aufnahme. Bei der äußeren Aufnahme wird die Fassung auf die Aufnahme aufgesteckt (Bild 5.6 und 5.7). Die Unterscheidung hat keine funktionale Ursache. Vielmehr kann durch diese Unterscheidung ein einfacher mathematischer Algorithmus bei der Berechnung der Geometrie helfen (siehe auch Gleichung (5.5) bis (5.5)).

Die Bilder 5.6 und 5.7 sowie Tabelle 5.1 enthalten die wichtigsten geometrischen Beziehungen beider Varianten.

innere Aufnahme

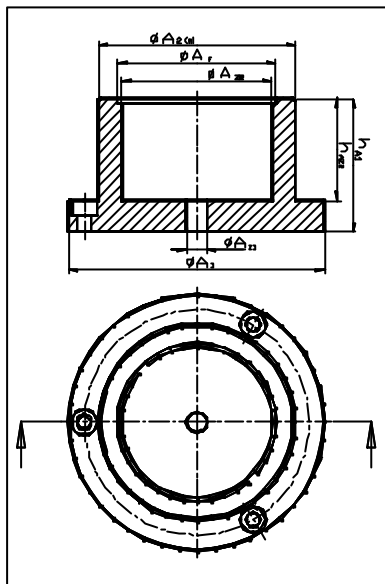


Bild 5.6 Innere Aufnahme

äußere Aufnahme

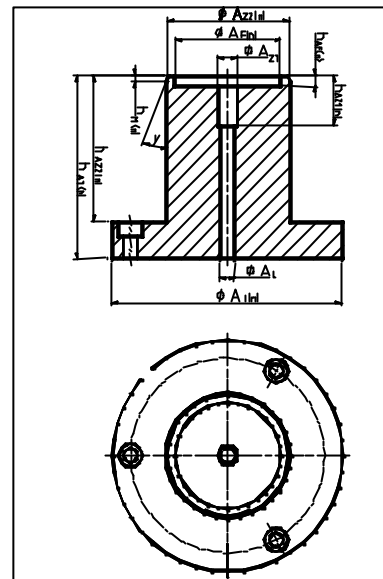


Bild 5.7 Äußere Aufnahme

Abk.	Bezeichnung	Dimensionierung		Zuordnung /Bemerkung
		Maß	Toleranz	
$\varnothing A_1$	Durchmesser 1 Aufnahme	100	Freimaß	Koaxialität
$\varnothing A_{2(n)}$	Durchmesser 2 Aufnahme			Koaxialität
$\varnothing A_{Z1(n)}$	Zentrierdurchmesser 1 Aufnahme	8 mm	G7	Koaxialität
$\varnothing A_{Z2(n)}$	Zentrierdurchmesser 2 Aufnahme		innerer g7 äußerer G7	Koaxialität
$\varnothing A_{F(n)}$	Durchmesser Freistich Aufnahme		Freimaß	= f ($R_{A(n)}$)
$h_{AF(n)}$	Höhe Freistich Aufnahme		Freimaß	= f ($R_{A(n)}$)
$h_{AZ1(n)}$	Höhe 1 Zentrierung Aufnahme	≤ 15 mm	Freimaß	
$h_{AZ2(n)}$	Höhe 2 Zentrierung Aufnahme		Freimaß	BT abhängig
$h_{A1(n)}$	Höhe 1 Aufnahme (Gesamthöhe)		Freimaß	BT abhängig
$h_{M(n)}$	Höhe Montageschräge (-hilfe)	≤ 5 mm	Freimaß	BT abhängig
γ	Winkel Montageschräge (-hilfe)	$\leq 15^\circ$	Freimaß	

Tabelle 5.1 Parameter der Werkstückaufnahme (innere und äußere)

Als Toleranzanforderung kann eine Koaxialitätsabweichung von $\leq 0,03$ mm zum Linsensitz als ausreichend angesehen werden. Ziel ist, zu diesem Zweck eine spätere Funktionsfläche (z.B. Linsensitz oder Führungszylinder) zu nutzen. Das kürzt die Toleranzkette, erhöht damit die Genauigkeit und senkt die Kosten.

Des weiteren muß, um eine Deformation der Fassung und eventuell schon befestigter Linsen zu vermeiden, eine Fläche zur Aufnahme der Kraft (F_P) vorhanden sein. Diese stellt den Gegenpunkt dar, um die Umformkraft des Stempels einleiten zu können (Bild 5.9). Diese Fläche muß orthogonal zur Preßkraft, bzw. zur optischen Achse ausgerichtet sein und überdeckt mindestens die Bereiche:

innere Aufnahme

$$\varnothing A_{2(n)} \geq \varnothing S_{2(n)} \quad (5.1)$$

$$\varnothing A_{F(n)} \leq \varnothing S_{3(n)} \quad (5.2)$$

äußere Aufnahme

$$\varnothing A_{Z2(n)} \geq \varnothing S_{2(n)} \quad (5.3)$$

$$\varnothing A_{F(n)} \leq \varnothing S_{3(n)}. \quad (5.4)$$

Um die Fassung in das Werkzeug einlegen zu können ist es wichtig, daß die zur Verfügung stehende Werkzeugöffnung (siehe Bild 5.10) nicht überschritten wird (siehe Gleichung (5.5)).

$$h_{A1(n)} + h_{F1} + h_{S(n)} \leq h_z \quad (5.5)$$

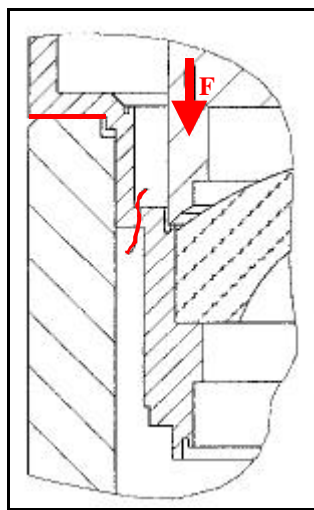


Bild 5.8 Falsche Auflage

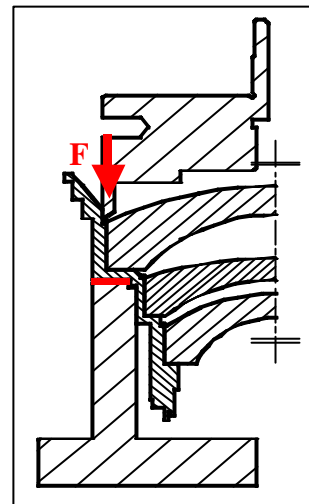


Bild 5.9 Korrekte Auflage

Die eingeleitete Umformkraft muß von der Fassung aufgenommen werden. Es kommt zu Deformation und Rissgefahr.

Die Aufnahme nimmt die eingeleitete Kraft in gerader Linie direkt auf.

Die Aufnahmen bestehen aus der Aluminiumlegierung AlMg5. Diese gewährleistet sehr gute Spanbarkeit und ermöglicht eine anschließende Oberflächeneloxierung als Verschleiß- und Reflexionsschutz. Das geringe Gewicht ist besonders beim Umrüsten von Vorteil.

Die Werkstückaufnahme ist ergänzt mit einem variabel einstellbaren Vakuumanschluß. Das Vakuum erfüllt die Funktion eines geometrisch ungebundenen Niederhalters für die Restkleb-

neigung zwischen Fassung und Stempel. Die Einstellung des Vakuums richtet sich nach den zu befestigenden Bauelementen.

5.5 Werkzeugwechsel / Umrüsten

Das Säulenführungsgestell kann mittels eigens entwickelter Schnellkupplung (sog. Hufeisen) und 2 Schrauben sehr schnell aus der Presse entnommen werden.

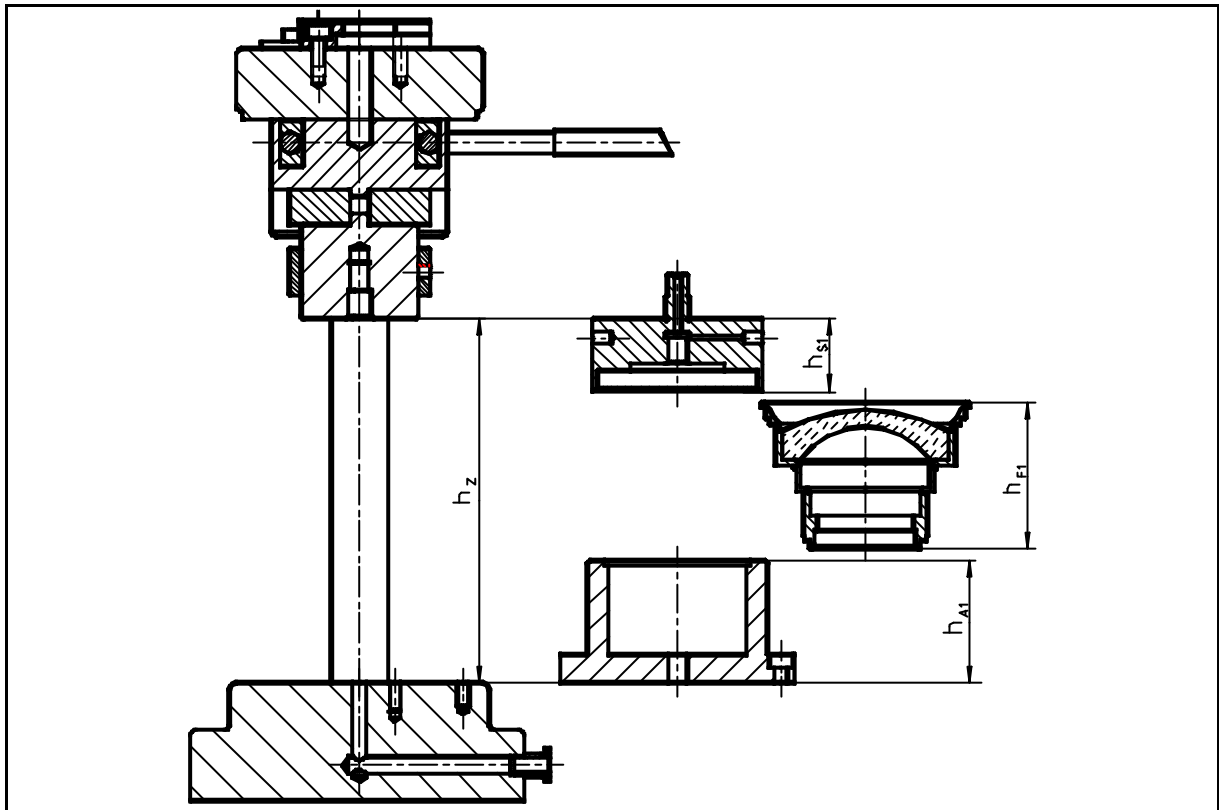


Bild 5.10 Zusammensetzung der Höhenmaße im Säulenführungsgestell

In die Werkzeugaufnahme wird der Stempel eingeschraubt. Die Werkstückaufnahme wird mit drei Schrauben in das Unterteil des SFG eingeschraubt. Die zum Molding notwendige Zentrierung zwischen Stempel und Aufnahme erfolgt seitens der Werkzeugaufnahme über den Zentrierdurchmesser ($\varnothing W_{Z1}$). Selbige Funktion erfüllt in der Werkstückaufnahme der Zentrierdurchmesser ($\varnothing A_{Z1}$). In Kombination mit dem Zentrierstift (Bild 5.2 Nr. 9) erfolgt beim Werkzeugwechsel die axiale Ausrichtung des kompletten Werkzeuges.

Für die Reproduzierbarkeit der Einstellungen sind alle in den Prozeß eingreifenden Meß- und Regelgeräte an ihrem Einsatzort kalibriert. Ein Wartungs- und Kalibrierplan sichert den ordnungsgemäßen Zustand aller Bauelemente ab.

6 Qualitative und quantitative Einschätzung des Prozesses

Auf den Herstellungsprozeß von Produkten wirken eine Reihe von Störungen ein. /39/44/ Das sind z.B. Verschleiß der Werkzeuge, Maschinenschwingungen, Schwankungen in der Qualität der Werkstoffe oder im Produktionsklima. Da Abweichungen über bestimmte Toleranzwerte unzulässig sind, ist es erforderlich, einen Prozeß vor Fertigungsbeginn auf seine Fähigkeit zur Erzeugung des geforderten Qualitätsniveaus zu überprüfen und während der Fertigung laufend zu überwachen. Hierzu können statistische Methoden zur Maschinenfähigkeitsuntersuchung (MFU) und zur Prozeßfähigkeitsuntersuchung (PFU) herangezogen werden.

Für die gefügten Baugruppen sind die wichtigsten (meßbaren) Qualitätskriterien (s. Kapitel 3)

- Fixierung unter Einsatz- und Transportbedingungen, sowie die Einhaltung der Toleranz
- der Luftabstände,
- der relativen Flächenkipfung und
- der Feinpasse.

Der Einsatz einer Modulation Transfer Function (MTF) Messung als komplexes Kriterium der Abbildungsfunktion war zum Zeitpunkt der Untersuchungen leider nicht möglich.

6.1 Qualitative Einschätzung

Die qualitative Bewertung der Fassungstechnologie beinhaltet alle Aussagen, die den späteren Gebrauchswert der gefassten Baugruppe charakterisieren. Hierbei wird zwischen zerstörenden und nicht zerstörenden Prüfverfahren unterschieden. Zu den nicht zerstörenden Prüfverfahren zählt die Messung der Lage der optischen Achsen aller gefassten Bauelemente zur mechanischen Achse der Bezugsfläche der Fassung. Diese Methode wird im weiteren Verlauf vereinfacht als Zentriermessung bezeichnet, deren quantitative Beschreibung die relative Flächenkipfung ist. In der zerstörenden Prüfung werden die Fassungen äußeren Kräften in Form von Schwingungen, Wechseltemperaturen oder Druck ausgesetzt. /36/42/

6.1.1 Prozeßfähigkeit/Prozeßsicherheit/ Reproduzierbarkeit

Prozesse sind dadurch gekennzeichnet, daß mindestens eine, in der Regel aber mehrere Ursachen zusammenwirken, um ein Ergebnis zu erzeugen. Um Prozesse handhabbar zu machen, muß man sie in einzelne Prozeßschritte zerlegen. Charakteristisch für jeden Prozeßschritt ist, daß an seinem Beginn mehrere meßbare Eingangsgrößen stehen und an seinem Ende meßbare Ausgangsgrößen. Demzufolge kann auch eine Veränderung gemessen werden. Es ist äußerst

wichtig, schon bei den ersten Schritten Maßnahmen zur Sicherung der Prozeßqualität einzubauen.

Die Lösung des Problems besteht nicht darin, zwischen jedem Prozeßschritt 100% zu kontrollieren, sondern darin, Fehler gar nicht erst entstehen zu lassen.

Die Maschinenfähigkeitsuntersuchung (MFU) findet bei der Installation einer neuen Maschine statt. Zu diesem Zweck werden aus einer einzigen großen Stichprobe die Merkmale der Teile gemessen und beurteilt. Im Rahmen der Prozeßfähigkeitsuntersuchung (PFU) werden über einen längeren Zeitraum kleine Stichproben aus einem laufenden Prozeß entnommen und statistisch ausgewertet.

Da in diesen Ausführungen der Prozeß im Mittelpunkt der Untersuchungen steht, wird der Maschinenfähigkeitsnachweis als gegeben vorausgesetzt.

Ziel ist, den Beweis zu erbringen, daß der Prozeß auf Dauer ein Ergebnis oder Produkt hervorbringt, welches seine vorgegebenen Spezifikationen und Qualitätsmerkmale erfüllt. Wichtig ist dabei ein dokumentierendes Nachweisverfahren, welches einen hohen Grad an Sicherheit liefert, daß der untersuchte Prozeß kontinuierlich Produkte erzeugt, die ihre festgelegten Leistungsparameter und Qualitätscharakteristiken erfüllen.

6.1.2 Kennzeichen von Prozessen

Prozesse werden durch vier verschiedene Merkmale charakterisiert. Diese Merkmale gelten nicht nur für Prozesse und Tätigkeiten innerhalb einer Unternehmung, sondern sind auf jede Art von Prozessen anzuwenden. Schematisiert kann ein Prozeß, wie in Bild 6.1 erkennbar, dargestellt werden.

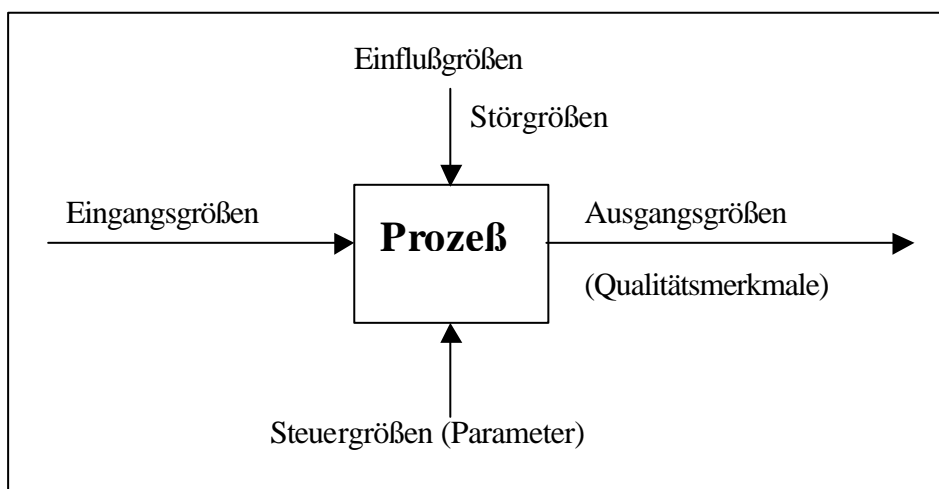


Bild 6.1 Schematische Darstellung am Prozessen beteiligter Größen /116/

An diesem Prozeßschema lassen sich verschiedene Prozeßmerkmale erkennen.

Als erstes Kennzeichen besitzt ein Prozeß definierte Ein- und Ausgangsgrößen. Zu den Eingangsgrößen des hier behandelten Prozesses zählen die Optik- und Mechanikkomponenten sowie die Anlage.

Eine Ausgangsgröße ist das Prozeßergebnis bzw. Endprodukt des Prozesses. Dies stellt praktisch das eigentliche Ziel des Prozesses dar. Neben dem Endprodukt können aber noch weitere Größen als Ausgangsgrößen auftreten. Diese werden als Nebenprodukte bezeichnet und sehr oft nicht weiter verwendet.

Das Prozeßergebnis als eine Ausgangsgröße legt in seinen Merkmalen die Eingangsgrößen fest.

Je nach Anwendungsbereich und Art des Prozesses haben die Elemente der Eingangsgrößen unterschiedliches Gewicht in der Bedeutung für den Prozeß. Sie können entweder einzeln oder in Kombination auftreten.

Als zweites Kennzeichen gilt die Verkettung eines betrachteten Prozesses mit ihm vor- und nachgeschalteten Prozessen.

Dieses zweite Kennzeichen von Prozessen macht deutlich, wie wichtig es ist, den einzelnen Prozeß nicht isoliert zu betrachten, sondern ihn im Zusammenhang eines Komplexes von Prozessen zu verstehen. Vorgelagerte Prozesse und deren Prozeßergebnisse nehmen als Eingangsgrößen für den betrachteten Prozeß Einfluß auf seine Ausgangsgrößen und dieser folglich wieder auf die nachgelagerten Prozesse. Für den einzelnen Prozeß ist eine ganzheitliche Betrachtung des ihn umfassenden Prozeßkomplexes notwendig.

Das dritte Kennzeichen eines Prozesses ist seine Abhängigkeit von beeinflussbaren und von nicht beeinflussbaren Größen.

Mit beeinflussbaren Größen sind solche Größen gemeint, deren Einfluß auf den Prozeß kontrolliert und gesteuert werden kann. Ihre Wirkungen auf den Prozeß sind genau bestimmt. Durch Veränderung einer dieser Größen sind definierte Änderungen am Prozeß möglich.

Zu den beeinflussbaren Größen gehört die gesamte Gruppe der Steuergrößen, die auch als Parameter bezeichnet werden. Sie sind durch ein Werkstück oder eine Zeichnung vorgegeben und werden von Entwicklung, Arbeitsvorbereitung oder Konstruktion einmalig bestimmt und dürfen durch den Maschinenbediener oder -benutzer nicht mehr verändert werden. /116/

Auch einzelne Eingangsgrößen gehören zur Gruppe der beeinflussbaren Größen. Diese Eingangsgrößen sind zwar grundsätzlich für den Prozeß vorgegeben, können jedoch vom Bediener eingestellt werden. Bei den Eingangsgrößen handelt es sich im regeltechnischen Sinne um die eigentlichen Steuergrößen, da während des Prozeßablaufes mit ihnen auf den Prozeß Einfluß genommen werden kann.

Neben den beeinflussbaren gibt es die Gruppe der nicht beeinflussbaren Größen. Zu dieser gehören alle Störgrößen. Die Auswirkungen dieser Größen auf den Prozeß sind nicht genau definiert. Ändert sich eine dieser Störgrößen, dann kann nicht genau gesagt werden, inwiefern sich Prozeßablauf und Prozeßergebnis verändern werden. Die Störgrößen können gar nicht oder nur mit sehr großem Aufwand in ihren Auswirkungen auf den Prozeß kontrolliert werden.

Auch in die Gruppe der nicht beeinflussbaren Größen lassen sich einzelne Eingangsgrößen einordnen. Es sind Eingangsgrößen, die vom Maschinenbediener oder -benutzer nicht oder nur mit großem Aufwand verändert werden können.

Das vierte Kennzeichen ist die steuerbare Ausführung von Prozessen. Mit Hilfe der beeinflussbaren Größen ist es möglich, den Prozeß innerhalb bestimmter Grenzen ablaufen zu lassen. Das bedeutet, daß die Qualitätsmerkmale der Ausgangsgrößen y nur innerhalb bestimmter Toleranzen schwanken dürfen. Mit Hilfe der Steuergrößen und der Eingangsgrößen muß der Prozeß so eingestellt werden, daß über einen Zeitraum nur qualitativ einwandfreie Produkte den Prozeß verlassen. Mit Hilfe des in Bild 5.1 dargestellten Regelkreises kann die Steuerung und Überwachung eines Prozesses durchgeführt werden. Über eine Auswertung der Prüfung der Stichproben werden die Abweichungen von Ausgangsgrößen mit den Einflußgrößen in Verbindung gebracht. Durch definierte Veränderung der beeinflussbaren Größen werden die Abweichungen der Ausgangsgrößen reduziert oder abgestellt. Dieser Regelkreis muß bei jeder Anwendung eines Prozesses durchlaufen werden. /116/

6.1.3 Struktur der Einflußgrößen (Ishikawa Diagramm)

Die Einflußgrößen werden in Gruppen eingeordnet. Ziel dieser Strukturierung ist es, eine möglichst hohe Transparenz aller Einflußgrößen zu erhalten. Dies soll mit Hilfe eines Ishikawa Diagramms erreicht werden. Diese Art der Darstellung wurde durch den Japaner Ishikawa entwickelt und nach ihm benannt. Es wird eigentlich als Ursache- Wirkungs- Diagramm und aufgrund seines Aussehens **häufig** auch als Fischgräten- Diagramm bezeichnet. Das Ishikawa- Diagramm kann als ein einfach anzuwendendes Instrument der Problemanalyse bezeichnet werden. Kern der Betrachtungen eines Ishikawa- Diagramms ist die Trennung von Ursache und Wirkung. Die Ursachen, auch Einflüsse genannt, werden in Haupt- und Nebenursachen getrennt und haben eine bestimmte Wirkung oder ein Problem zur Folge. Die Zusammenhänge für das "Heat Molding" sind graphisch in Bild 5.2 dargestellt. /93/116/

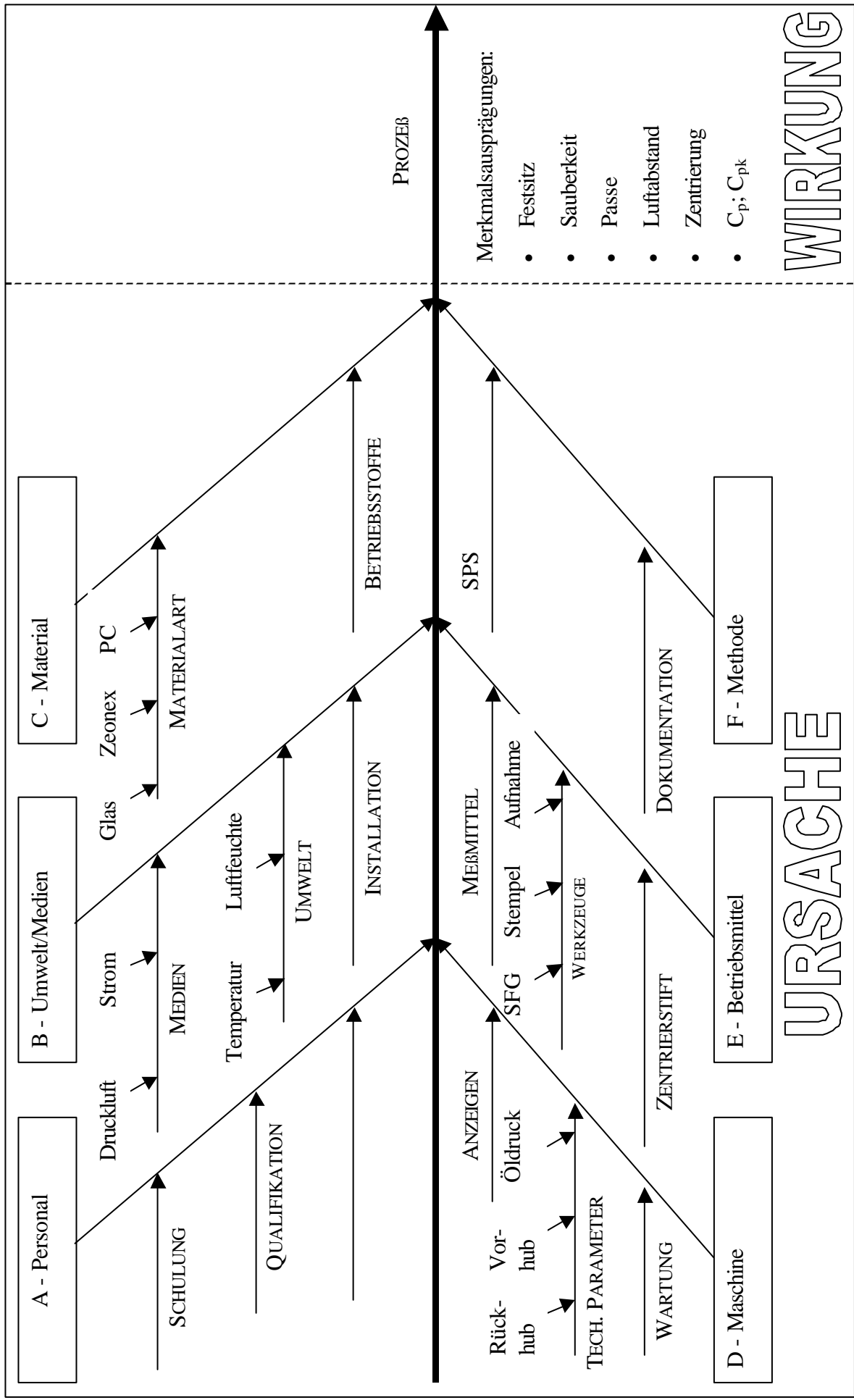


Bild 6.2 Ishikawa Diagramm (Ursache- Wirkungs- Diagramm) für das „Heat Molding“ /93/119/

6.1.4 Beschreibende Eigenschaften der gefassten Baugruppe

Entscheidend für die qualitative Bewertung einer Fassungsstechnologie ist die Lagestabilität des montierten optischen Bauelements. /39/41/108/ Im Fall einer ungerichteten Montage bedeutet das keine störende Veränderung der Position des losen optischen Bauelementes zum gefassten Zustand. Die wichtigsten beschreibenden Parameter sind die **Zentrierung** /107/ und der **Luftabstand** (LA) /106/. Des weiteren dürfen die optischen Eigenschaften der Bauelemente nicht verändert werden. Der hierfür entscheidende beschreibende Parameter ist die **Feinpasse**. /104/

6.1.5 Umsetzung

Im Unterschied zum Taylorschen Ansatz ist es das Ziel, den Nachweis zu erbringen, daß ein Prozeß "auf Dauer" oder "kontinuierlich" qualitativ einwandfreie Produkte hervorbringt. /3/

Das heißt, die Teilprozesse der Herstellung und nicht die in ihnen gefertigten Werkstücke stehen im Fokus der Untersuchung. Das heißt: **einen Prozeß zu befähigen und nicht das Produkt**. /93/

Als erster Schritt müssen hierzu alle Einflußgrößen aufgelistet und im Anschluß mit Hilfe des Pareto- Prinzips analysiert werden.

6.1.5.1 Bewertung der Einflüsse

Die Wichtung der Einflußgrößen/ Parameter wurde anhand von Einflußfaktoren tabellarisch geordnet:

A Personal

Eingangsgröße Einflußgröße	Parameter	Spezifizierung Wert/Bereich für den Prozeß	Ergebnis Einfluß Ja/nein	Begründung bei „nein“ Risikobetrachtung bei „ja“
Qualifikation	Prozeßdurchführung	Facharbeiter	ja	Belehrung/ Schulung
	Maschinenbedie- nung	Facharbeiter	ja	Belehrung/ Schulung
Sicherheitsbeleh- rung	Arbeitsschutz	Facharbeiter	nein	Belehrung/ Schulung

Tabelle 6.1 Personaleinflußgrößen /93/

B Umwelt/Medien

Eingangsgröße Einflußgröße	Parameter	Spezifizierung Wert/Bereich für den Prozeß	Ergebnis Einfluß Ja/nein	Begründung bei „nein“ Risikobetrachtung bei „ja“
Stromversor- gung	Versorgungs- spannung	207-241 V	ja	Verifiziert nach GA-GM 003
	Frequenz	50 Hz	ja	Betrieb unsicher
Druckluft	Druck	5,5 - 8,0 bar	ja	Steuerung schaltet ab
Umwelt	Temperatur	29°C ± 1°K	nein	separate Regelung der Stempel- und Kühlmittel- temperatur
	Luftfeuchte	max. 30 - 70 %	ja	für Betrieb nicht relevant

Tabelle 6.2 Einflußgrößen Umwelt und Medien /93/

C Material

Eingangsgröße Einflußgröße	Parameter	Spezifizierung Wert/Bereich für den Prozeß	Ergebnis Einfluß Ja/nein	Begründung bei „nein“ Risikobetrachtung bei „ja“
Materialart	- Polycarbonat - Glas - Zeonex		nein	entfällt durch Wa- reneingangsprüfung
Betriebsstoffe	Kühlflüssigkeit	Füllstand	ja	Klemmen der SFG

Tabelle 6.3 Einflußgröße Material /93/

D Maschine

Eingangsgröße Einflußgröße	Parameter	Spezifizierung Wert/Bereich für den Prozeß	Ergebnis Einfluß Ja/nein	Begründung bei „nein“ Risikobetrachtung bei „ja“
Instandhaltung	Inspektion, War- tung, Instandset- zung	Inspektion War- tungsplan Instand- setzung	nein	Vertrag mit Fremd- firma
Anzeigen				
Hydraulik	Druck	bar	nein	Steuerung schaltet ab
Pneumatik	Druck	bar	nein	Funktionsprüfung bei planmäßiger Wartung und Inspektion
Software	Fehlermeldung	textuelle Erklärung	ja	Steuerung schaltet ab und gibt Fehlerursache an
technische Pa- rameter Presse 1-4	Stempeltempera- tur	Datenblätter	ja	Steuerung schaltet ab
	Öldruck	Datenblätter	ja	Steuerung schaltet ab
	Preßzeit	Datenblätter	ja	Steuerung schaltet ab

Tabelle 6.4 Einflußgröße Maschine /93/

E- Betriebsmittel

Eingangsgröße Einflußgröße	Parameter	Spezifizierung Wert/Bereich für den Prozeß	Ergebnis Einfluß Ja/nein	Begründung bei „nein“ Risikobetrachtung bei „ja“
Komplettwerkzeuge	Stempel	lt. Zeichnung	ja	Linsensitz außer Toleranz
	Aufnahme	lt. Zeichnung	ja	Linsensitz außer Toleranz
	Isolation	lt. Zeichnung	ja	Linsensitz außer Toleranz
Prüfmittel	Thermometer	Prüfergebnis	ja	Ergebnisbewertung falsch
Justierhilfe	Meßgenauigkeit	Meßergebnis	ja	Ergebnisbewertung falsch

Tabelle 6.5 Einflußgröße Betriebsmittel /93/

F Methode

Eingangsgröße Einflußgröße	Parameter	Spezifizierung Wert/Bereich für den Prozeß	Ergebnis Einfluß Ja/nein	Begründung bei „nein“ Risikobetrachtung bei „ja“
Software	SPS Steuerprogramm	Parameterbereich	nein	Arbeitsschutz nicht gewährleistet
			ja	Fertigung fehlerhaft
Dokumentation	Zeichnung	Prozeßergebnis	ja	Fertigung fehlerhaft
	Arbeitsplan Datenblätter	Prozeßdaten Parameterbereich	ja ja	Fertigung fehlerhaft Fertigung fehlerhaft

Tabelle 6.6 Methodische Einflußgrößen /93/

Bei der Untersuchung des Teilprozesses „Heat Molding“ auf der Sondermaschine wird mit einer festgelegten Anzahl der ausgewählten Baugruppe die Prozeßfähigkeitsuntersuchung (PFU) durchgeführt.

Die PFU belegt die Prozeßfähigkeit der Sondermaschine über den Fertigungszeitraum des Testloses.

Die Toleranzgrenzwerte der montierten Baugruppe wurden an Hand der technischen Dokumentationen festgelegt. Die Auswahl der Toleranzgrenzwerte erfolgt nach prozeßbestimmenden Anforderungen an die Sondermaschine. Die *Worst Case*⁵ Teile (siehe Kapitel 6.1.5.9) wurden auf der Grundlage der Toleranzbereiche der Produktion für die Montage der Vorderfassung und der entsprechenden Prüfspezifikation hergestellt.

⁵ alle Einflußgrößen werden auf die ungünstigsten Werte eingestellt

6.1.5.2 Risikobetrachtungen

Für eine sichere Montage ist auch die Risikobewertung der zum Einsatz kommenden bzw. umgebenden Medien von entscheidender Bedeutung. Im Falle des „Heat Molding“ sind das die 220 V Netzspannung und die Druckluft zum Antrieb der hydropneumatischen Presse (siehe Kapitel 5.3) (Tabelle 6.7).

Risikobeschreibung	Folge/ Ereignis	Maßnahmen	Fehlereinschätzung	Prüfer
Stromausfall	Equipment schaltet ab, kein Ergebnis	Equipment muß neu gestartet werden	unkritisch	Maschinenbediener
Ausfall der Druckluft	Equipment schaltet ab, kein Ergebnis	bei Erreichen des Betriebsdruckes wieder volle Funktionsfähigkeit	unkritisch	Maschinenbediener
Luftfeuchte außerhalb Toleranz	kein Einfluß	nicht notwendig	unkritisch	Entfällt
Raumtemperatur	Kein Einfluß	Nicht notwendig	Unkritisch	Entfällt

Tabelle 6.7 Risikobetrachtung zum Ausfall der Medienversorgung /93/

Die Umgebungsbedingungen (Tabelle 6.7) sind auf Grund der allgemeinen Anforderungen der Optik Montage in sehr engen Toleranzen und können vernachlässigt werden.

6.1.5.3 Untersuchung der Prozeßfähigkeit

Der Nachweis der PFU orientiert sich an den weltweit anerkannten Forderungen der amerikanischen Nahrungs- und Arzneimittelbehörde FDA. Die Forderungen sind im „Good Manufacturing Practice“ (GMP) festgelegt. Das Ziel von GMP ist es, allgemein ein hohes Maß an Sicherheit dafür zu gewährleisten, daß ein (medizinisches) Produkt beim Kunden auch wirklich den Anforderungen gerecht wird, für die es entwickelt wurde. GMP bezieht sich jedoch dabei nicht auf einzelne Geräte oder eine Gruppe von Geräten, sondern allgemein auf alle Herstellungsbereiche, von der Entwicklung bis zum Versand. Betont wird, daß alle Prozesse auf die vom Gerät geforderten Spezifikationen ausgerichtet sind.

Die Forderungen der FDA im GMP sind deutlich härter als vergleichsweise die in der DIN EN ISO 9001 und DIN EN ISO 9004 formulierten. In beiden wird der Begriff Validierung explizit angesprochen, allerdings besitzt er dabei nicht die umfassende Bedeutung der in den von der FDA formulierten Forderungen. Danach heißt Validierung:

„Ziel ist, den Nachweis zu erbringen, daß ein Prozeß auf Dauer oder kontinuierlich qualitativ einwandfreie Produkte hervorbringt.“

Die Sondermaschine wird außerdem in ihren prozeßbestimmenden Parametern während dieser Validierung über ein *Worst Case* Teil (siehe Kapitel 6.1.5.9) der Serienproduktion für den Teilprozeß „Heat Molding“ bestätigt. /93/ Die *Worst Case* Anforderungen der Serienproduk-

tion werden entsprechend den Zeichnungsforderungen und den Prozeß bestimmenden Parametern der Sondermaschine sowie auf der Basis der Qualitätsanforderungen der zu fertigen Baugruppen bestimmt. In der Zeichnung sind die Qualitätsanforderungen unter Berücksichtigung der Maschinenfunktionen festgelegt und in der Tabelle 6.8 zusammengefaßt.

6.1.5.4 Kalibrierung

Unter Kalibrierung versteht man die Prüfung die sicherstellt, daß die Sondermaschine in der Lage ist, innerhalb der vorgegebenen Grenzen und Toleranzen zu arbeiten.

Um die Einstellungen reproduzierbar einstellen zu können, wurden alle Meß- und Regelgeräte an ihrem Arbeitsort kalibriert.

Die Kalibrierung, in Verbindung mit dem Hersteller- Prüfzertifikat, den Heizbändern und Temperatursensoren, gewährleistet die Multivalenz des Heizregelkreises.

Folgende Prozeßvariablen müssen an der Anlage kalibriert werden:

- Stempeltemperatur
- Preßkraft
- Prozeßzeit

Um Fehler der beteiligten Komponenten auszuschließen, erfolgt die Messung der Linsen und Fassungen vor der Montage. Somit wird ein unabhängiger Ausgangszustand zur realen Prozeßbeurteilung erreicht.

6.1.5.5 Beschreibung der Bewertungskriterien

lfd.- Nr.	Produktanforderung	Prüfspezifikation	Toleranz	Spezifikation der Vorgaben
1	Maßhaltigkeit	Ablage/ relative Flächenkipfung	Fläche 1: 6,9 min Fläche 2: 5,5 min Fläche 3: 5,5 min Fläche 4: 3,5 min Fläche 5: 4,2 min Fläche 6: 1,0 min Fläche 7: 1,0 min Fläche 8: 1,6 min	DIN 3140
2	Formtoleranzen	Passe	0,2 λ	DIN 3140
3	Festigkeit	„Klappern“	ja/nein	lt. Prüfspezifikation
4	Ausführung	Bördelgrat	sauber und rißfrei	lt. Prüfspezifikation

Tabelle 6.8 Qualitätskriterien zur Produktbewertung /93/

6.1.5.6 Herstellung des Prüfloses

Als Referenzteil wurde die im Kapitel 2 vorgestellte Vorderfassung mit der dazugehörigen Optik zufällig aus der laufenden Serienproduktion ausgewählt. Anschließend wurden die Komponenten vermessen, lt. Arbeitsplan montiert, gestreßt und erneut vermessen.

Die Festlegung des Prüfumfanges erfolgte für alle attributiven Merkmale gemäß DIN ISO 2859 (zzgl. 40080). Die Prüfung der variablen Merkmale richtet sich nach den Vorgaben von DIN 3951.

Die Bewertung der attributiven Merkmale erfolgte nach folgenden Prüfkriterien:

Prüfmerkmal 1: Linse fest

Prüfmerkmal 2: gleichmäßiges, nicht ausgefrantes Bild des umgelegten Grates

Nach Tabelle I DIN ISO 2859, Teil 1, Prüfniveau II (K) folgt die Stichprobenanweisung mit $c = 1$ erlaubten Ausfällen:

Die Sichtprüfung gilt als bestanden, wenn bei maximal 1 (Annahmehzahl) der 125 geprüften Gruppen Fehler auftreten. Eine Gruppe gilt als fehlerhaft, wenn ein Prüfmerkmal nicht erfüllt ist.

Für die Variablenprüfung sind ein Streuungs- und Niveauindex die Beurteilungskriterien. Der Streuungsindex c_p beschreibt die Streubreite des Prozesses im Vergleich zum Toleranzintervall. Anzustreben ist eine Prozeßstreuung, die relativ klein zur Breite des Toleranzintervalls ist, da dann die Wahrscheinlichkeit von Merkmalswerten außerhalb der Toleranz ebenfalls klein ist. Je größer der Index, desto größer ist die Breite des Toleranzintervalls im Verhältnis zur Prozeßstreuung. Die Breite des Toleranzintervalls wird dabei in δ -Einheiten des jeweiligen Prozesses ausgedrückt. Im vorliegenden Fall wird

$$c_p > \frac{4}{3} \quad (6.1)$$

d.h.

$$T_o - T_u > 8\delta \quad (6.2)$$

gefordert und entspricht einem statistischen Ausschußanteil von 63,33 ppm.

Ausgehend von einer Prozeßfähigkeit von $C_p \geq 1,66$ wird der Prüfumfang in Anlehnung an DIN ISO 2859 Teil 1 für Test 1-8 auf $n = 125$ festgelegt.

Die Bewertung aller (125) Gruppen erfolgt nach folgenden Prüfmerkmalen:

Prüfparameter 3:	Passe	[λ]
Prüfparameter 4:	x-Ablage Fläche 1	[μm]
Prüfparameter 5:	x-Ablage Fläche 2	[μm]
Prüfparameter 6:	y-Ablage Fläche 1	[μm]

Prüfparameter 7: y-Ablage Fläche 2 [µm]

Prüfparameter 8: rel. Flächenkipfung Fläche 1 [min]

Prüfparameter 9: rel. Flächenkipfung Fläche 2 [min]

Ziel der statistischen Auswertung ist es, von der Stichprobe auf die Gegebenheiten der zugehörigen Grundgesamtheit zu schließen. Anders ausgedrückt heißt das, mit Hilfe der einzelnen Stichproben n soll ein Rückschluß auf die Verteilung in der Grundgesamtheit, aus der die Stichproben stammen, ermöglicht werden.

Alle Meßwerte sind in /93/ nachzulesen. Um einen Überblick über die Streuung der einzelnen Meßwerte und ihre Lage zu den Toleranzgrenzen zu erhalten, wurden sie in Tabelle 6.9 zusammengefaßt.

6.1.5.7 Testplan zur Prozeßfähigkeitsuntersuchung (PFU)

Die PFU erfolgt an 5 aufeinander folgenden Arbeitstagen in der laufenden Serienproduktion. Die aufgeführten Schritte 1 – 4 werden an allen fünf Tagen zu unterschiedlichen Zeitpunkten durchgeführt.

Schritt 1 Sondermaschine entsprechend Werkzeugdatenblatt einrichten und Betriebsbereitschaft abwarten

Schritt 2 Das Testlos komplett lt. Plan fertigen und visuell sowie akustisch kontrollieren.

1. Linse Passe messen
2. Linse einlegen (mit Füllrohr)
3. Zentrierung messen
4. Linse befestigen
5. Fixierung prüfen (akustisch)
6. Zentrierung messen
7. Passe messen
8. Klima-, Transport- und Lagertest durchführen
9. Fixierung prüfen (akustisch)
10. Zentrierung messen
11. Ausdrückkraft messen

Schritt 3 13 Werkstücke entnehmen, mit der zugehörigen Nummer kennzeichnen und der Qualitätsauswertung zuführen.

Schritt 4 Prüfparameter an den entnommenen Werkstücken prüfen, den Meßwert in die Tabelle eintragen, den Prozeßparameter berechnen und mit Datum, Uhrzeit, Unterschrift bestätigen. Die entsprechenden Werte der Stichprobe in die Qualitätsregelkarte eintragen.

6.1.5.8 Auswertung der Testergebnisse

Der Schätzwert für den Mittelwert μ der Grundgesamtheit ist

$$\hat{m} = \bar{x} \quad (6.3)$$

mit

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (6.4)$$

Dabei ist \bar{x} der Gesamtmittelwert aus allen Einzelwerten. Die Berechnung des Vertrauensbereiches für die Standardabweichung erfolgt nach Gleichung (6.5)

$$\mathbf{m}_{\text{unten}}^{\text{oben}} = \bar{X} \pm t * \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (6.5)$$

Der Schätzwert für die Standardabweichung δ der Grundgesamtheit ist

$$\hat{d} = S \quad (6.6)$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (6.7)$$

S ist die Standardabweichung aus allen Einzelwerten mit dem nach Gleichung (6.8) zu berechnenden Vertrauensbereich.

$$\mathbf{d}_{\text{unten}}^{\text{oben}} = \mathbf{c}_{\text{unten}}^{\text{oben}} * S \quad (6.8)$$

Die Grenzen der Mittelwertkarte werden mit den Gleichungen (6.9 bis 6.12) berechnet:

$$\text{OEG} = \mu + 3\delta \quad 99\% \quad \text{OEG} = \hat{m} + \frac{2,576}{\sqrt{n}} * \hat{d} \quad (6.9)$$

$$\text{UEG} = \mu - 3\delta \quad 99\% \quad \text{UEG} = \hat{m} - \frac{2,576}{\sqrt{n}} * \hat{d} \quad (6.10)$$

$$\text{OWG} = \mu + 2\delta \quad 95\% \quad \text{OWG} = \hat{m} + \frac{1,96}{\sqrt{n}} * \hat{d} \quad (6.11)$$

$$\text{UWG} = \mu - 2\delta \quad 95\% \quad \text{UWG} = \hat{m} - \frac{1,96}{\sqrt{n}} * \hat{d} \quad (6.12)$$

Zur Berechnung der Regelgrenzen für die np-Regelkarten dienen die Gleichungen (6.13) und (6.14)

$$\text{Mittellinie} = n * \bar{p} \quad (6.13)$$

$$\text{OEG} = n\bar{p} + \sqrt{n\bar{p}(1-\bar{p})} \quad (6.14)$$

Die Berechnung der unteren Eingriffsgrenze (Gleichung (6.15)) besitzt nur theoretischen Charakter.

$$\text{UEG} = n\bar{p} - \sqrt{n\bar{p}(1-\bar{p})} \quad (6.15)$$

Meßgröße	Karte	n	Max	Min	R	\hat{m}	\hat{d}	μ^{oben}	μ^{unten}	σ^{oben}	δ_{unten}	OEG	UEG	OWG	UWG	C_p	C_{pk}
Temperatur Linse 1	x	300	195,8	192,5	3,3	194,2	0,638	entf.	entf.	entf.	entf.	196,1	192,3	entf.	entf.	2,091	0,813
Temperatur Linse 2	x	300	194,9	192,1	2,8	193,8	0,509	entf.	entf.	entf.	entf.	195,4	192,3	entf.	entf.	2,621	0,649
Temperatur Linse 3	x	300	195,5	190,9	4,6	193,7	0,958	entf.	entf.	entf.	entf.	196,6	190,9	entf.	entf.	1,392	1,190
Temperatur Linse 4	x	300	194,9	191,3	3,6	193,2	0,810	entf.	entf.	entf.	entf.	195,6	190,8	entf.	entf.	1,646	0,864
Preßkraft Linse 1	x	125	1036	983	53	1009	16	entf.	entf.	entf.	entf.	1057	962	entf.	entf.	1,405	1,352
Preßkraft Linse 2	x	125	1030	983	47	1004	14,5	entf.	entf.	entf.	entf.	1048	961	entf.	entf.	1,552	1,462
Preßkraft Linse 3	x	125	1031	980	51	1008	16,3	entf.	entf.	entf.	entf.	1040	959	entf.	entf.	1,379	1,376
Preßkraft Linse 4	x	125	1038	986	52	1011	15,6	entf.	entf.	entf.	entf.	1057	964	entf.	entf.	1,464	1,380
Zentrieränderung Fläche 1	\bar{X} -R	125	0,78	-0,48	1,26	-0,02	0,250	entf.	entf.	entf.	entf.	0,73	entf.	0,48	entf.	2,3	4,64
Zentrieränderung Fläche 2	\bar{X} -R	125	1,7	-0,75	2,45	-0,04	0,420	entf.	entf.	entf.	entf.	1,22	entf.	0,80	entf.	1,09	2,21
Zentrieränderung Fläche 3	\bar{X} -R	125	0,27	-0,44	0,71	-0,04	0,150	entf.	entf.	entf.	entf.	0,40	entf.	0,26	entf.	3,12	6,32
Zentrieränderung Fläche 4	\bar{X} -R	125	0,34	-0,95	1,29	-0,14	0,250	entf.	entf.	entf.	entf.	0,61	entf.	0,36	entf.	1,17	2,52
Zentrieränderung Fläche 5	\bar{X} -R	125	0,11	-0,45	0,56	-0,06	0,110	entf.	entf.	entf.	entf.	0,28	entf.	0,16	entf.	3,08	6,35
Zentrieränderung Fläche 6	\bar{X} -R	125	0,15	-0,28	0,43	-0,06	0,140	entf.	entf.	entf.	entf.	0,35	entf.	0,21	entf.	0,62	1,37
Zentrieränderung Fläche 7	\bar{X} -R	125	0,16	-0,33	0,49	-0,03	0,120	entf.	entf.	entf.	entf.	0,34	entf.	0,22	entf.	0,68	1,42
Zentrieränderung Fläche 8	\bar{X} -R	125	0,49	-0,20	0,14	0,00	0,220	entf.	entf.	entf.	entf.	0,65	entf.	0,43	entf.	0,62	1,23
Änderung Luftabstand Fläche 2-3	\bar{X} -R	125	0,001	-0,007	0,008	-0,002	0,002	-0,001	-0,003	0,003	0,002	0,004	-0,008	0,002	-0,006	15,64	15,32
Änderung Luftabstand Fläche 4-5	\bar{X} -R	125	0,002	-0,091	0,093	-0,006	0,018	0,001	-0,004	0,026	0,024	0,047	-0,060	0,030	-0,042	1,86	1,75
Änderung Luftabstand Fläche 6-7	\bar{X} -R	125	0,003	-0,008	0,011	-0,002	0,002	-0,001	-0,003	0,004	0,002	0,005	-0,010	0,003	-0,007	13,54	13,252
Passeänderung Fläche 1	\bar{X} -R	125	0,026	-0,014	0,040	0,006	0,006	0,008	0,005	0,008	0,005	0,008	0,005	0,007	0,005	7,02	0,36
Passeänderung Fläche 2	\bar{X} -R	125	0,017	-0,012	0,029	0,006	0,004	0,007	0,05	0,006	0,003	0,007	0,005	0,007	0,005	9,88	0,47
Passeänderung Fläche 3	\bar{X} -R	125	0,024	-0,006	0,031	0,007	0,005	0,008	0,006	0,008	0,004	0,008	0,006	0,008	0,006	7,85	0,44
Passeänderung Fläche 4	\bar{X} -R	125	0,019	-0,004	0,024	0,007	0,004	0,008	0,007	0,006	0,003	0,008	0,006	0,008	0,007	10,25	0,61
Passeänderung Fläche 5	\bar{X} -R	125	0,030	-0,003	0,033	0,008	0,005	0,008	0,007	0,007	0,004	0,009	0,007	0,008	0,007	9,06	0,55
Passeänderung Fläche 6	\bar{X} -R	125	entf.	entf.	entf.	entf.	entf.	entf.	entf.	entf.	entf.	entf.	entf.	entf.	entf.	entf.	entf.
Passeänderung Fläche 7	\bar{X} -R	125	0,037	-0,039	0,076	0,007	0,004	0,007	0,006	0,006	0,003	0,008	0,006	0,007	0,006	10,22	0,55
Passeänderung Fläche 8	\bar{X} -R	125	0,022	-0,007	0,029	0,008	0,004	0,009	0,007	0,006	0,003	0,009	0,007	0,009	0,007	10,69	0,69
Festsitz	np	125	1	0	entf.	entf.	entf.	entf.	entf.	entf.	entf.	1	entf.	entf.	entf.	1,667	1,667
Austrisse / Fehler	np	125	2	0	entf.	entf.	entf.	entf.	entf.	entf.	entf.	2	entf.	entf.	entf.	1,33	1,33

Tabelle 6.9 Meßergebnisse zur qualitativen Einschätzung des „Heat Molding“ /93/

6.1.5.9 „Worst Case“ Betrachtungen

In Anlehnung an die Vorschriften der FDA zur Validierung, die für diesen Prozeß erfolgreich durchgeführt wurde /93/, wird hier die zusätzliche Nachweisführung mittels *Worst Case* Teile verkürzt. Ziel ist, mit Teilen und Komponenten, deren Parameter in den für den Prozeß ungünstigsten Toleranzgrenzen (teilweise auch darüber) liegen, ein voll funktionsfähiges Produkt innerhalb der Spezifikation herzustellen. Angewandt auf die Charakteristik des "Heat Molding" bedeutet das, folgende speziell ausgesuchten oder teilweise auch speziell hergestellten Teile zu montieren.

	A (n = 25)	B (n = 25)
Linsenspiel	max.	min.
h _{B1}	0,3 mm	0,7 mm
Stempeltemperatur	197°C	190°C
Bördelzeit	+ 0,5 s	- 0,5 s
Preßkraft	1060	950
Festsitz	25 i.O.	24 i.O. 1 n.i.O.
Aussehen	25 i.O.	25 i.O.
Ausdrückkraft	≥ 7 g	≥ 7 g
Passeänderung	≤ 0,01	≤ 0,005
Δ rel. Flächenkipfung	nicht nachweisbar	nicht nachweisbar
Luftabstandsänderung	≤ 0,002	≤ 0,002
Ergebnis	alle Teile in Spezifikation	24 Teile in Spezifikation

Tabelle 6.10 Ergebnisse der „Worst Case“ Betrachtungen /93/

Die Meßergebnisse bestätigen den Prozeß „Heat Molding“ auf der in Kapitel 5 beschriebenen Sondermaschine als beherrscht und qualitätsfähig.

6.1.6 Absicherung der Prozeßfähigkeit

Für den laufenden Prozeß wurde der Nachweis der Prozeßfähigkeit erbracht. Wichtig ist jetzt, diesen Fertigungsprozeß im Zusammenhang mit seinem Umfeld zu beherrschen. Man spricht von einem beherrschten Prozeß, wenn sich das Prozeßverhalten praktisch nicht oder nur in bekannter Weise oder nur innerhalb bekannter Grenzen ändert.

Mit Hilfe von Qualitätsregelkarten (QRK) kann das Prozeßverhalten bezüglich seiner Lage und Streuung visualisiert werden. Dazu werden Kennwerte zur Lage- und Streuungsbeurteilung über der Zeit dargestellt und mit Grenzklinien (sogenannten Eingriffsgrenzen) verglichen.

Anhand dieser Vergleiche kann eine Aussage über die Güte (Stabilität) der Prozesse getroffen werden.

Für den Prozeß kommen drei Arten von QRK zur Anwendung. Tabelle (6.11) zeigt exemplarisch alle wesentlichen Parameter zur Prozeßkontrolle beim "Heat Molding".

Die einfachste Art einer Prozeßregelkarte stellt die \bar{x} -Karte dar. Mit ihrer Hilfe lassen sich der Trend und die Tendenz eines Prozesses erkennen. Eine solche Regelkarte besitzt zwei Regelgrenzen, die im Abstand von $\pm 3\sigma$ vom Sollwert gezogen sind. Die \mathfrak{B} -Grenze entspricht für normalverteilte Meßwerte einer Aussagewahrscheinlichkeit von 99,73 %.

Bei der **Mittelwert Spannweitenkarte** handelt es sich um eine Kombinationskarte. Gleichzeitig ist sie die gebräuchlichste QRK. Wenn sich bei einem Prozeß die Streuung der Einzelwerte verändert, dann verändert sich auch die Streuung der Mittelwerte.

Zur Steigerung der Aussagefähigkeit wird deshalb die Mittelwertkarte mit einer Prozeßregelkarte für das Streuungsmaß kombiniert.

Das sehr einfach zu ermittelnde Streuungsmaß R (Gleichung 6.16) ist als Differenz der Extremwerte in der Stichprobe definiert.

$$R = x_{\max} - x_{\min} \quad (6.16)$$

Die hier eingesetzten Prozeßregelkarten werden mit einer beidseitigen Aussagewahrscheinlichkeit von $PA = 99\%$ für die Eingriffsgrenzen (OEG, UEG) und $PA = 95\%$ für die Warngrenzen (OWG, UWG) errechnet.

Die **np Prozeßregelkarte** ist eine QRK zum Erfassen von Zählwerten. Der zu untersuchende Bereich sollte zwischen $n = 50 \dots 100$ liegen und muß konstant bleiben. Die Größe c kennzeichnet die Anzahl schlechter (fehlerhafter) Teile, und p ist der relative Anteil schlechter Teile.

$$\bar{p} = \frac{c}{n} \quad (6.17)$$

Mit Gleichung (6.17) ergibt sich der Mittelwert aller p -Werte aus mehreren Stichproben.

Meßgröße	n	obere Toleranz	untere Toleranz	OEG	UEG	c _p	Einheit
Temperatur Linse 1	300	198	190	entf.	196,1	2,091	[°C]
Temperatur Linse 2	300	198	190	entf.	195,4	2,621	[°C]
Temperatur Linse 3	300	198	190	entf.	196,6	1,392	[°C]
Temperatur Linse 4	300	198	190	entf.	195,6	1,646	[°C]
Preßkraft Linse 1	125	1060	955	entf.	1057	1,405	[N]
Preßkraft Linse 2	125	1060	955	entf.	1048	1,552	[N]
Preßkraft Linse 3	125	1060	955	entf.	1040	1,379	[N]
Preßkraft Linse 4	125	1060	955	entf.	1057	1,464	[N]
Zentrieränderung Fläche 1	125	3,45	0	entf.	0,73	2,3	[°]
Zentrieränderung Fläche 2	125	2,75	0	entf.	1,22	1,09	[°]
Zentrieränderung Fläche 3	125	2,75	0	entf.	0,40	3,12	[°]
Zentrieränderung Fläche 4	125	1,75	0	entf.	0,61	1,17	[°]
Zentrieränderung Fläche 5	125	2,1	0	entf.	0,28	3,08	[°]
Zentrieränderung Fläche 6	125	0,5	0	entf.	0,35	0,62	[°]
Zentrieränderung Fläche 7	125	0,5	0	entf.	0,34	0,68	[°]
Zentrieränderung Fläche 8	125	0,8	0	entf.	0,65	0,62	[°]
Luftabstand Fläche 2 - 3	125	11,043	11,023	0,002	0,004	15,64	[mm]
Luftabstand Fläche 4 – 5	125	3,558	3,358	0,024	0,047	1,86	[mm]
Luftabstand Fläche 6 - 7	125	11,377	11,357	0,002	0,005	13,54	[mm]
Passeänderung Fläche 1	125	0,25	0	0,005	0,008	7,02	[λ]
Passeänderung Fläche 2	125	0,25	0	0,003	0,007	9,88	[λ]
Passeänderung Fläche 3	125	0,25	0	0,004	0,008	7,85	[λ]
Passeänderung Fläche 4	125	0,25	0	0,003	0,008	10,25	[λ]
Passeänderung Fläche 5	125	0,25	0	0,004	0,009	9,06	[λ]
Passeänderung Fläche 6	125	0,25	0	entf.	entf.	entf.	[λ]
Passeänderung Fläche 7	125	0,25	0	0,003	0,008	10,22	[λ]
Passeänderung Fläche 8	125	0,25	0	0,003	0,009	10,69	[λ]
Festsitz	125	1	0	entf.	1	1,667	[Stck.]
Austrisse / Fehler	125	2	0	entf.	2	1,33	[Stck.]

Tabelle 6.11 exemplarische Tabelle als Basis einer Qualitätsregelkarte beim „Heat Molding“ /93/

Bild 6.3 zeigt beispielhaft eine geführte Qualitätsregelkarte der Preßkraft an der Presse 4.

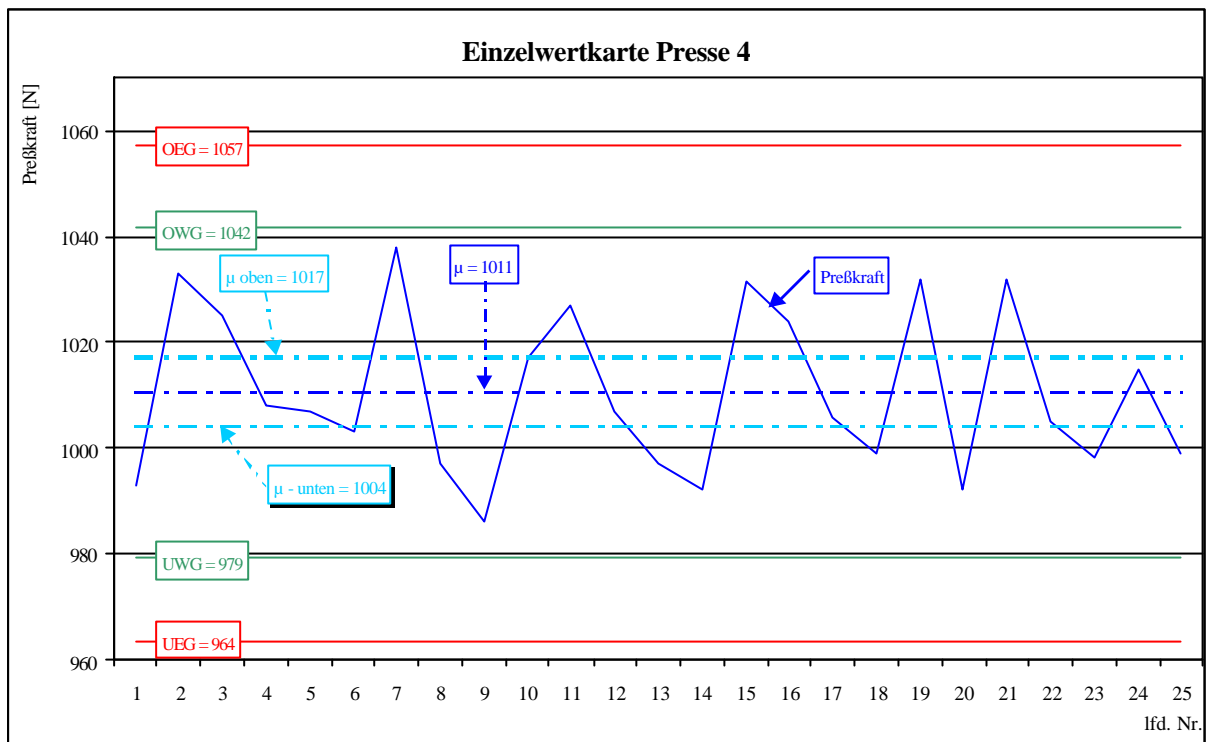


Bild 6.3 Qualitätsregelkarte (Einzelwertkarte) der Presse 4 /93/

Turnusmäßig erfolgt die Prozeßfähigkeitsuntersuchung des „Heat Molding“ auf der Sondermaschine jährlich. Unter folgenden Gesichtspunkten muß sie zusätzlich durchgeführt werden:

- Änderung des Standorts,
- Havarien am Equipment, die qualitätsbestimmende Maschinenteile und Maschinenfunktionen betreffen und wodurch die Qualifikation des Equipments nicht mehr gegeben ist,
- gravierende Änderungen an der Geometrie des Stempels oder
- gravierende Änderungen am Prinzip oder Fassungsmaterial

6.1.7 Möglichkeit zur Automatisierung

Auf Grund der nachgewiesenen Prozeßfähigkeit und des Einsatzes der statistischen Prozeßkontrolle besteht beim "Heat Molding" die Möglichkeit zur teilweisen Automatisierung. Beim Kleben stellt die Beherrschung der Viskosität des Klebstoffes die größte Schwierigkeit dar. Beiden Verfahren ist eins aber gemeinsam: das Einlegen der optischen Bauelemente ist nur über deren optisch wirksamer Fläche realisierbar. Alle bisherigen Versuche, rückstandsfreie Sauger zu entwickeln, schlugen fehl. /56/

Nach dem Einlegen der Linsen kann der Prozeß des "Heat Molding" vom Bestücken der Anlage bis zur Entnahme der gefassten Baugruppe automatisch mit der nachgewiesenen Stabilität erfolgen.

6.2 Quantitative Einschätzung der Technologie

Die in Kapitel 2 angeführte Tabelle zum Vergleich von Fassungs-technologien wurde mit den in dieser Arbeit entwickelten neuen Technologien ergänzt (siehe Tabelle 6.14).

Wichtige Kriterien zur Bewertung der Montagetechnologie für den gezielten Anwendungsfall Jahresstückzahl ≥ 50.000 sind Montagekosten und -zeiten. Wie in Kapitel 2 erläutert, ist die **Wertzuwachskurve** ein effizientes Werkzeug zur Analyse. Tabelle 6.12 enthält die hierfür erforderlichen Daten.

Bewertungskriterien	Entscheidungsparameter	"Heat Molding"
Montageparameter	Rüstzeit t_r	20 min
	Verteilzeit t_v	45 min
	Einzelteilzeit t_e	0,33 s
	Losgröße	1 - ∞ Stück
	Aufwand bei Typänderung	je Palette 6.950,- DM
Kosten	HK Fassung	10,82 ⁴ DM
	HK Linse 4	27,41 DM
	HK Linse 3	11,09 DM
	HK Linse 2	30,67 DM
	HK Linse 1	51,67 DM
Personalaufwand	Stundenlohn	85 DM / h
	Qualifikation (Lohngruppe)	05

Tabelle 6.12 Ausgangssituation Basis Kunststofffassung

Aufbereitet für die Darstellung im Wertzuwachs / Durchlaufzeit Diagramm ergibt das folgende Übersicht (siehe Tabelle 6.13).

	Nr.	Linse [DM]	Aluminium Fassung [DM]	Montage [DM]	Fixierzeit [h:min]	Brachzeit [h:min]	kum. Kosten [DM]	nach [h:min]
1	4014	27,41 D	10,82				38,23	0:00
2				0,54	00:00	0:01	38,77	0:01
3	4013	11,09	0,00				49,86	0:01
4				0,40	00:00	0:01	50,26	0:02
5	4012	30,67	0,00				80,86	0:02
6				0,54	00:00	0:01	81,40	0:03
7	4011	51,67	0,00				133,07	0:03
8				0,76	00:00	0:01	133,83	0:04

Tabelle 6.13 Aufbereitete Kosten der Kunststofffassung

Daraus kann das Wertzuwachs / Durchlaufzeit Diagramm (Bild 6.4) erstellt werden.

⁴ incl. Nacharbeit siehe Kapitel 3.1.2

Bewertungskriterien	Entscheidungsparameter	Kleben in gedrehte eloxierte Aluminiumumfassung mit UV-Klebstoff	Fassen mit Vorschraubring in gedrehte eloxierte Aluminiumumfassung	„Heat Molding“ der Spritzgüßfassung aus Polycarbonat mit 30% Kohlefaseranteil	Snap-In mit Spritzgüßfassung aus Polycarbonat mit 30% Kohlefaseranteil
Funktionale Kenngrößen und Leistungsgrenzen					
	Toleranzgerade IT [µm]	≤ 6	≤ 6	≤ 8 mit Nacharbeit ≤ 6	
	Krümmungsmittelpunktsablage Δh *	≤ 5 µm	≤ 5 µm	≤ 5 µm	
	relative Flächenkipfung (Ø ≥ 30 – 50 mm) *	≤ 10°	≤ 20° (trotz def. Anzugsmoment und ordnungsgem. Rindschneide)	≤ 4°	
	Passänderung *	≤ $\sqrt{10}$	≤ $\sqrt{10}$	≤ $\sqrt{10}$	
	Füllfassungstauglich	ja	ja	ja	
	Realisierbare Durchmesserbereiche	0 – 200 mm	10 – 100 mm	15 – 80 mm (theor. 0 – 120 mm)	
	Ausgleichswirkung auf Linsendicken-schwankungen	ja	ja	ja	
	Dichtungsfunktion	ja	nein	ja	
	Vibrationsfestigkeit	ja	nein	ja	
	Spannungsdoppelbrechung	≤ 5 nm			
	Temperatureinsatz	- 20 ... + 60°C	- 20 ... + 60°C	- 20 ... + 60°C	
Montageparameter					
	Rüstzeit tr *	20 min	entfällt	20 min	
	Verteilzeit tv *	2 h		15 s	
	Einzelteilzeit te *	10 s	4 s	2 ... 15 s	
	Losgrößen	Asymthek begrenzt			
	Aufwand bei Typänderung	gering	entfällt bei Standardteilen	neue Aufnahme und Stempel	
Kosten	HK Fassung *				
(Analogekosten)	HK Zusatzteile *	entfällt			
(Investkosten)	HK Hilfsstoffe *				
(WZ-Kosten)	Nebenkosten *				
(Vorrichtungen)	WZ Standzeit	500 Stück	kein Verschleiß erkennbar	≥ 5.000 Stück	
(Hilfsmittel)	min. max. Stückzahlen (wirt.)				
Logistik / Disposition					
Automatisierbarkeit	bezahlte Zeit / Fassung *	unter Vorbehalt ja	unter Vorbehalt ja	unter Vorbehalt ja	
Personalaufwand	Qualifikation (LG) *	06	06	05	
	Aufwand im allg.	hoch	mittel	gering	
Sonstiges	Recycling	Klebstoff!	ja	ja	
	Reparatur	mit Aufwand ja	ja	nein	
	zusätzlich notwendige Prozesse	Vorbereitung; Aushärten; Klebstoffhandlung	nein	nein	
	Platzbedarf (konstruktiv)	≤ 1 mm auf Ø	≥ 2 mm auf Ø	≥ 2,5 mm auf Ø	
	geeignet für Kunststofflinsen	ja	ja	ja	
	SPC	Viskosität Klebstoff Schwachpunkt			

in der Praxis noch nicht umgesetzt

Tabelle 6.14 Vergleichsübersicht Kleben, Fassen mit Vorschraubring und „Heat Molding“

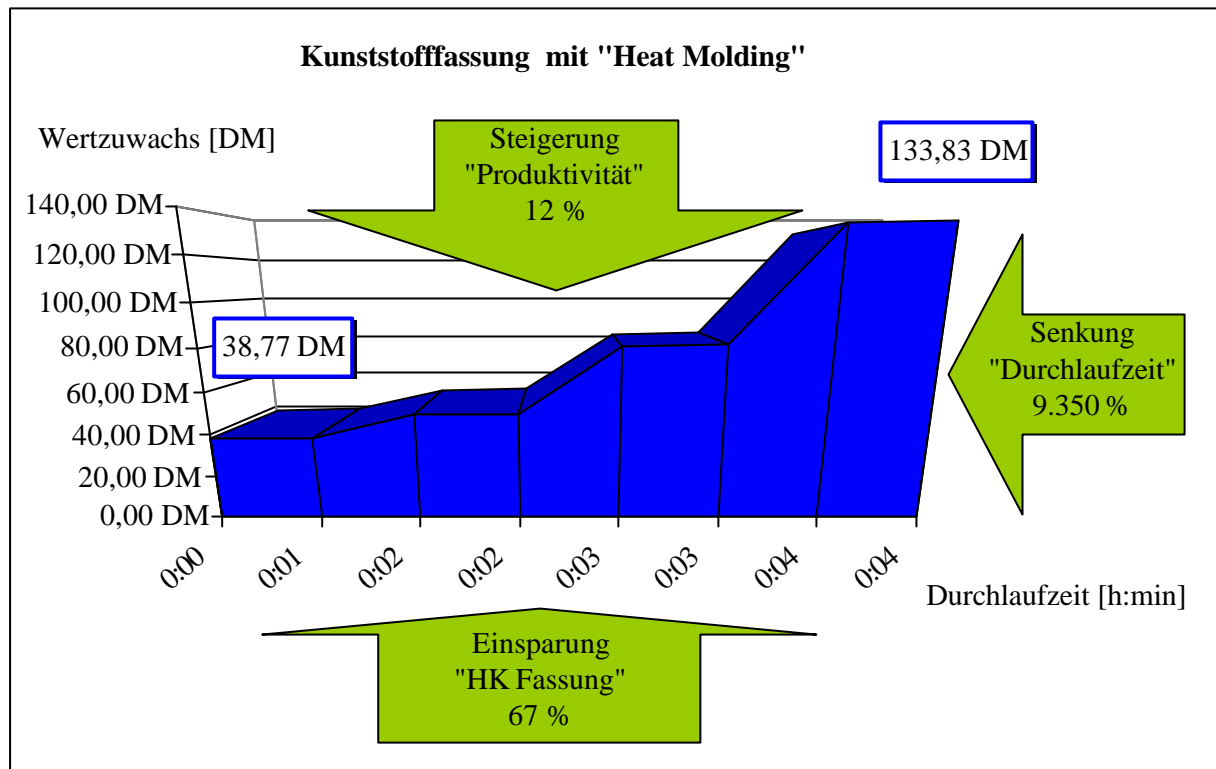


Bild 6.4 Wertzuwachs / Durchlaufzeit Diagramm der Kunststofffassung mit Einsparungen

Bild 6.4 zeigt die drei Schwerpunkte zur Optimierung in der Wertzuwachskurve für die Kunststofffassung. Unter den Gesichtspunkten einer Jahresproduktion von 50.000 Stück ergeben sich folgende Ergebnisse.

Die **Herstellkosten der Fassung** verringerten sich durch den Einsatz von Kunststoff als Fassungsmaterial um 22,13 DM. Die Herstellkosten der gesamten Baugruppe konnten somit um 14,5 % reduziert werden.

Durch Reduzierung der Einzelbearbeitungszeit t_E wurde die **Produktivität** um 12 % erhöht.

Wie in Kapitel 2 angeführt, ist die Senkung der **Durchlaufzeit** und der daraus resultierenden **Bestandkostensenkung** ein entscheidender Punkt. Die Durchlaufzeit konnte von 362 min auf 4 min gesenkt werden. Ein positiver Nebeneffekt der reduzierten Umlaufzeiten ist die Verbesserung der Sauberkeit.

Die Charakteristika des "Heat Molding" spezifizieren diese Technologie zur Volumenproduktion. Vorteilen, wie niedrige Prozeß- und Rüstzeiten, stehen einige entscheidende Nachteile formgebundener Herstellverfahren gegenüber. Die Herstellung des Spritzgußwerkzeugs mit anschließender Optimierung kostet je nach Komplexität zwischen 30.000,- und 100.000,- DM. Das bedeutet, daß sich der Einsatz von formgebunden hergestellten Fassungen erst bei hohen Stückzahlen rentiert. Zeitlich liegen zwischen Konstruktionsende und den ersten Serienteilen 10 – 15 Wochen. Außerdem erfordert seitens der Fassung jede konstruktive Änderung einen hohen Zeit- und Kostenaufwand.

Bild 6.5 zeigt den Gesamtkostenvergleich aller für ein Produktionsvolumen von 43.000 Stück/a erforderlichen Werkzeuge, Vorrichtungen, Hilfsmittel für den hier diskutierten Fall der Fassung mit 4 zu fassenden Einzellinsen.

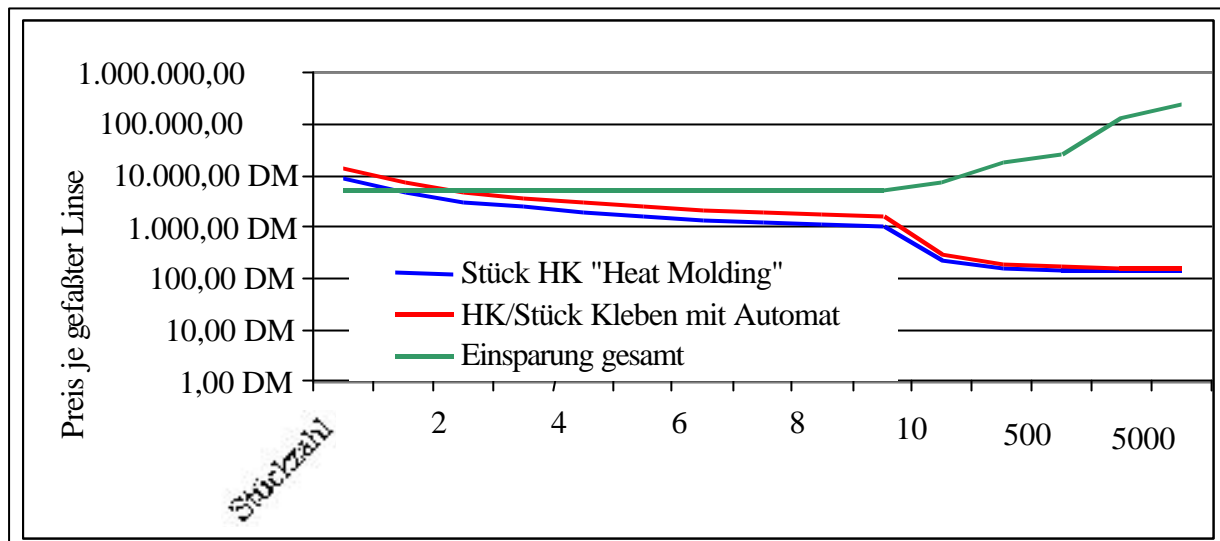


Bild 6.5 Gesamtkostenvergleich

Zuverlässige Informationen für eine kompetente Entscheidung darüber zu erlangen, welche technische Lösungsvariante zum Einsatz kommt, ist nur über den Vergleich der wirtschaftlichen und technischen Eigenschaften der zu verwendenden Elemente und der zu ihrer Fertigung nutzbaren Technologien möglich.

Eine Voraussetzung dafür ist eine übersichtliche Darstellung gesicherter und aktueller Daten der vorhandenen Technologien. Diese Übersicht liefert gleichzeitig Aussagen, an welchen Punkten die vorhandenen Technologien noch Potential zur Optimierung bzw. Einsparung besitzen. Im nachfolgenden Kapitel werden einige Schwerpunkte technologischer Entwicklungen und Untersuchungen für Fassungstechnologien höherer Stückzahl diskutiert.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Im vorangegangenen Kapitel wurde das „Heat Molding“ technisch und wirtschaftlich charakterisiert. Basierend auf den im Rahmen dieser Dissertation erarbeiteten Ergebnissen wird es seit ca. 2 Jahren in der Serienfertigung von Objektiven und Okularen unterschiedlichster Produkte eingesetzt. Dabei kamen Ansatzpunkte für weitere Verbesserungen zu Tage, die im folgenden genannt werden sollen.

7.1 Handlungsbedarf und Verbesserungspotential beim „Heat Molding“

Der erste Schwerpunkt für weitere technologische Untersuchungen ist das Standzeitverhalten des Stempels. Dabei steht nicht die mechanische Deformation des Stempels im Mittelpunkt des Interesses, sondern adhäsive Ablagerungen von Partikeln des Fassungsmaterials. Hierbei werden zwei Wege verfolgt. Erstens wird werkstofftechnisch die Stempelbeschichtung optimiert. Zweiter Ansatzpunkt ist die Senkung der Formbeständigkeitstemperatur des Fassungsmaterials. Versuche haben gezeigt, daß eine Reduzierung der Ablagerungen am Stempel möglich ist. Die Senkung der Umformtemperatur von 194°C auf 183°C (möglich durch Veränderung des Compounds) brachte eine Verbesserung der Adhäsionsneigung um über 230 %.

Unter Ausnutzung der Elastizität des Kunststoffes kann von der Spielpassung zwischen Linse und Fassung eine Preßpassung zum Einsatz kommen. Hier sind, in Abhängigkeit von der Qualität der Zentrierung der optischen Bauelemente, deutliche Steigerungen in der Zentriergenauigkeit möglich.

Die Zentriergenauigkeit kann auch mit der Optimierung des Kunststoffes gesteigert werden. Durch kürzere Kohlefasern wird die Anisotropie im Verbund reduziert und somit die Reproduzierbarkeit des Spritzgusses gesteigert.

Ein weiterer Ansatzpunkt zur Steigerung der Produktivität ist die Umsetzung des Füllfassungsprinzips. Besonders zu berücksichtigen ist hierbei die negative Auswirkung auf die Toleranzkette.

Trotz oder wegen des Verbesserungspotentials besitzt dieses Fassungsverfahren die Berechtigung, in weiteren Anwendungen bei vorhandenen und neuen Produkten zum Einsatz zu kommen. Um diese Technologie breiter einsetzen zu können, ist es von entscheidender Bedeutung, diesbezüglich Wissen bereitzustellen. Es muß eine Basis für aktives Wissensmanagement geschaffen werden, die jedem Interessierten das erarbeitete Wissen einfach und aktuell zur Verfügung stellt.

7.2 Allgemeine Trends in der Fassungstechnologie

Das hier vorgestellte Verfahren „Heat Molding“ ist, wie die Ergebnisse in Kapitel 6 zeigen, eine alternative Fassungstechnologie für hohe Stückzahlen.

Zur weiteren Optimierung sollen hier 3 Schwerpunkte diskutiert werden.

Erster Schwerpunkt ist der verbesserte Umgang mit dem neuen Fassungsmaterial Kunststoff.

Durch den Einsatz von, im Spritzgußverfahren hergestellten Kunststofffassungen konnten die Kosten im vorgestellten Beispiel reduziert werden. Verbesserungspotential steckt hier noch im eigens angefertigten Compound. Weitere Untersuchungen sollten darauf orientieren, ein Compound zu verwenden, welches in großen Mengen am Markt eingesetzt wird. Dabei müssen speziell die Anforderungen an die fertige Fassung gezielt überarbeitet werden (siehe Kapitel 3).

Eine weitere Steigerung der Genauigkeit liegt im kunststoffgerechten Design. Physikalisch bedingt ist die Reproduzierbarkeit einer gespritzten Fläche umgekehrt proportional zu ihrer Größe. Angewandt auf die hier diskutierte Problematik bedeutet das den Einsatz von Stegen zur Lagedefinition der optischen Bauelemente (Bild 7.1 und 7.2).

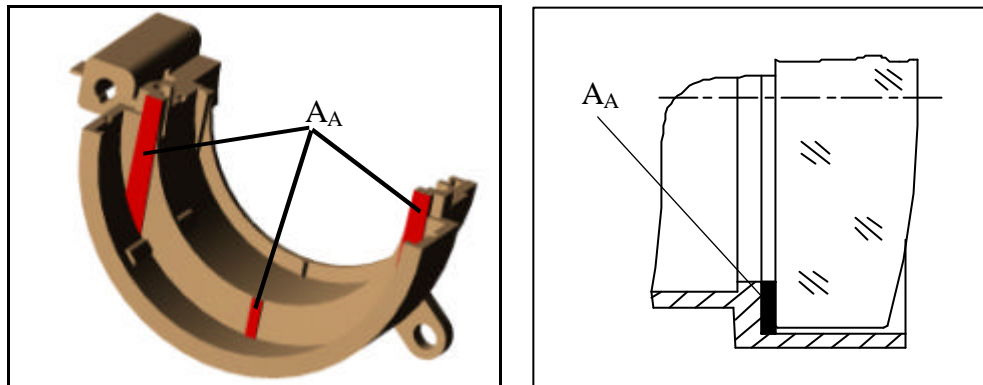


Bild 7.1 Axiale Lagedefinition der Linsen durch Anlagestege (A_A) /124/

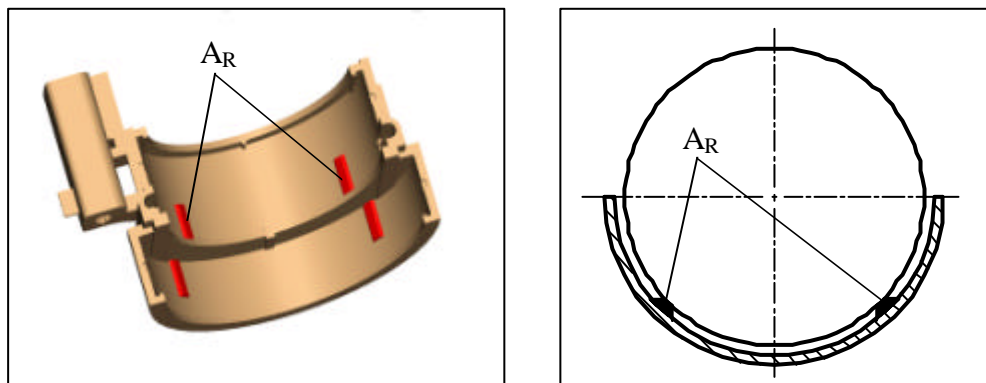


Bild 7.2 Radiale Lagedefinition der Linsen durch Auflagestege (A_R) /124/

Der zweite Ansatzpunkt zur Verbesserung ist das grundsätzliche Prinzip der Montage.


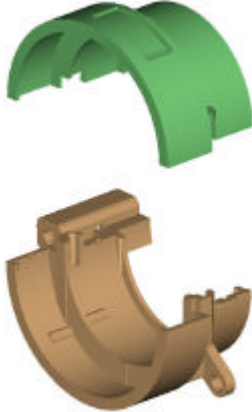
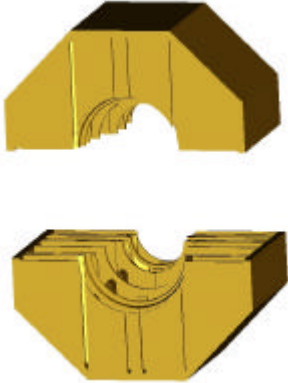

Zylinder	Halbschale		
Rotationssymmetrisch	asymmetrisch	symmetrisch	symmetrisch
			

Tabelle 7.1 Symmetrische und asymmetrische Gestaltungsvarianten einer Fassung /124/

Tabelle 7.1 zeigt zwei prinzipielle Ansätze zur Gestaltung der Fassung.

Bei konventionellen Technologien, wie auch dem „Heat Molding“, werden die Linsen in einer zylindrischen Fassung gehalten. Durch geeignete Passungswahl (z.B. G7/h8) wird die Lage- definition erreicht.

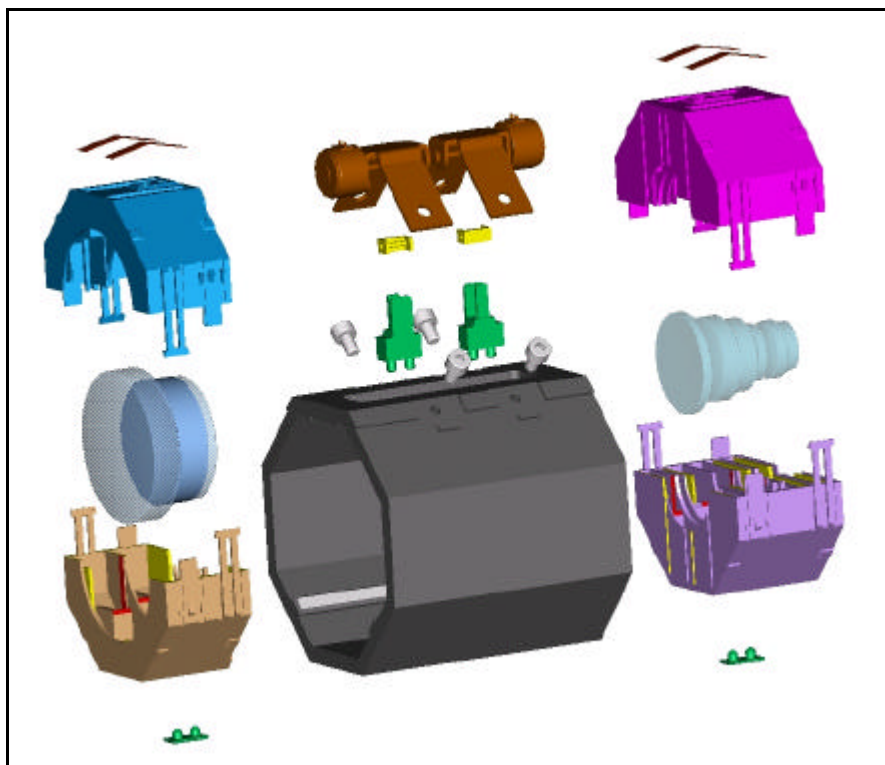


Bild 7.3 prinzipieller Aufbau eines Objektivs mit Halbschalenfassung /124/

Aus Montagesicht interessanter ist das Halbschalenprinzip. Hierbei besteht die Fassung aus zwei Kunststoffschalen. Bild 7.3 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Objektivs mit Halbschalenfassung.

Die Vorteile liegen zum einen in der uneingeschränkten Automatisierbarkeit. Die optischen Bauelemente müssen nicht mehr, wie bei der Zylindrischen Fassung, über die optische Fläche sequentiell in die Fassung eingefädelt werden. Das Bestücken erfolgt parallel über den Randzylinder, ohne die optische Fläche zu berühren. Somit besteht keine Gefahr der Verschmutzung oder Beschädigung. /56/ Des weiteren kann die Reinigung bei eingelegten Linsen erfolgen, was wiederum einen deutlichen Gewinn in punkto Sauberkeit bedeutet.

Die Halbschalen können symmetrisch oder asymmetrisch aufgebaut sein (Tabelle 7.1)

Bei der asymmetrischen Variante setzt sich die Fassung aus der Ober- und der Unterschale zusammen. Die Position der Linsen wird in der Unterschale bestimmt. Für die radiale Orientierung kommen die Auflagestege zum Einsatz, so daß alle Linsen zur optischen Achse ausgerichtet sind (Bild 7.1). Sie bilden durch ihre um 90° zueinander versetzte Position ein V-Lager, in welchem die Linsen liegen. Die axiale Linsenlage, d.h. die Abstände zwischen den Linsen, wird über die drei Anlagestege definiert (Bild 7.2). Geeignete konstruktive Maßnahmen müssen die Linsen in der so erreichten Lage fixieren.

Für die Montage bedeutet diese Art der Linsenfassung wesentliche Verbesserungen. Die verringerte Teilezahl sowie das einfache Einsetzen der Linsen in die Halbschale aus nur einer Fügerrichtung bringen eine erhebliche Montagezeitreduzierung gegenüber der zylindrischen Fassung /124/125/. Neben der damit verbundenen Kostenreduzierung bietet sich zudem die Möglichkeit, das Halbschalenprinzip in ein Plattformkonzept zu integrieren.

Den symmetrischen Aufbau der Halbschale zeigt Bild 7.3. Hierbei sind Ober- und Unterschale identisch. Im Gegensatz zur asymmetrischen Variante ergibt sich daraus der Vorteil nur eines Spritzgußwerkzeugs. Nachteilig ist der deutlich höhere Aufwand bei der Optimierung des Werkzeugs.

Abschließend soll die Möglichkeit der Integration jedweder Blenden in die Fassung als Anregung zu weiteren Untersuchungen genannt werden.

LITERATURVERZEICHNIS

- 1 Lenkungskreis „Optische Technologien für das 21. Jahrhundert“, ISBN 3-00-006083-9, VDI- Technologiezentrum, Düsseldorf, Mai 2000
- 2 angelehnt an die Definition aus Harnessing Light, National Resaerch Council (Hrsg.), National Academy Press, Washington, D.C., 1998
- 3 Wildemann, H.: „Die modulare Fabrik“, Verlag TCW-Transfer-Centum GmbH München, 1994
- 4 Hedrich, J.: „Objektorientierte Systematisierung fügetechnischer Entwicklungen im Automobilbau“ Diss. TU München, 1995
- 5 Fischer, A.: „Untersuchungen zum Stand und zur Weiterentwicklung der Fassungstechnologie und Montage von Rundoptik“. Diplomarbeit TH Ilmenau, 1987
- 6 Böswetter, G.: Steffens, H.-J.: „Fassen von Mittelklasseoptik hoher Stückzahlen“ Feingerätetechnik, Berlin 34 (1985) 2, S. 56 - 57
- 7 Böswetter, G.: Brückner, H.; Denzin, K.; Hennecke, D.: „Beitrag zur Automatisierung der Montage optischer Geräte“ 31. Intern. Wiss. Koll. Ilmenau 1986, Heft 4, S. 3 - 5
- 8 Böswetter, G.: „Anwendung des automatischen Justierklebens zur Montage von Rundoptik“34. Intern. Wiss. Koll. TH Ilmenau 1989, Heft 4, S. 7 - 10
- 9 Berg, U.: „Entwicklung von Linsenhaltern für ein SMIF-kompatibles Magazinsystem und deren Fertigung durch Mikrospritzguß“, internes Material des Institutes für Mikrotechnik Mainz, 1995
- 10 Kulke, W.: „Fertigungstechnik Metall, Wissensspeicher für die Berufsbildung“, Verlag Technik Berlin, 1979
- 11 Illig, A.: „Thermoformen in der Praxis“, Carl Hanser Verlag München Wien, 1997
- 12 Grellmann, W., Seidler, S.: „Deformation und Bruchverhalten von Kunststoffen“, Springer Verlag Berlin Heidelberg, 1998
- 13 Natti S. Rao, „Formeln der Kunststofftechnik“, Carl Hanser Verlag München Wien, 1989
- 14 Buckley, D.H.: „Adhäsion und Verschleißwiderstand von Werkstoffen, Vortrag des 39. WEH-Seminars „Hartstoffschichten zur Verschleißminderung“, Bad Honnef 1986
- 15 Holleck, H.: „Möglichkeiten und Grenzen einer gezielten Stoffauswahl für Verschleißmindernde Hartstoffschichten“, Vortrag des 39. WEH-Seminars „Hartstoffschichten zur Verschleißminderung“, Bad Honnef 1986
- 16 Zum Gahr, K.H.: „Abrasiveverschleiß harter Schichten“, Vortrag des 39. WEH-Seminars „Hartstoffschichten zur Verschleißminderung“, Bad Honnef 1986
- 17 Eligehausen, J.: „Herstellung und Eigenschaften von Hartstoffschichten als Kontaktwerkstoff“, Vortrag des 39. WEH-Seminars „Hartstoffschichten zur Verschleißminderung“, Bad Honnef 1986
- 18 Kämpf, G.: „Industrielle Methoden der Kunststoff-Charakterisierung“, Carl Hanser Verlag München Wien, 1996
- 19 Grüning, K.: „Umformtechnik“, 4. Auflage, Viewegs Fachbücher der Technik, 1986
- 20 Müller, K.-P.: „Praktische Oberflächentechnik“, Viewegs Fachbücher der Technik, 1995
- 21 Jungnickel, B.-J.: „Kunststofftechnik“, expert-Verlag Würzburg, 1988
- 22 Retting, W.: „Mechanik der Kunststoffe“, Carl Hanser Verlag München Wien, 1989

- 23 Lange, K.: „Umformtechnik, Handbuch für Industrie und Wissenschaft“, 2. Auflage, Springer Verlag Berlin, Heidelberg, 1990
- 24 Konczalla, M.: „FE-Berechnungen thermischer Spannungen und Kriechverformungen in geklebten optischen Bauteilen“, Zeitschrift „Kleben & Dichten“ Jahrgang 38 9/94
- 25 Steinhoff, K.: „Berechnung der Fügekraft beim Fügen durch Einpressen“, Forschungsbericht 5.05.015, 1995, TU Harburg
- 26 „Kunststoff-Werkstoffe im Gespräch, Aufbau und Eigenschaften“, 2. Auflage, Interne Weiterbildungsunterlagen der BASF AG
- 27 „Kunststoff-Physik im Gespräch“, 7. Auflage, Interne Weiterbildungsunterlagen der BASF AG, 1988
- 28 „Kunststoff-Verarbeitung im Gespräch, 1 Spritzgießen“, 6. Auflage, Interne Weiterbildungsunterlagen der BASF AG, 1991
- 29 „Kunststoff-Verarbeitung im Gespräch, 2 Extrusion“, 4. Auflage, Interne Weiterbildungsunterlagen der BASF AG, 1991
- 30 Göbel, R.: „Wissenspeicher Physik“, 10. Auflage, Verlag Volk und Wissen, Berlin 1986
- 31 Lipsmeier, A., Teml, A.: „FRIEDRICH[®] Tabellenbuch Metall- und Maschinentechnik“, Ferd. Dümmers Verlag, Bonn, 1993
- 32 Pusch, G. Krempe, M.: „Technische Stoffe“, 11. Auflage, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1982
- 33 Wüst, K., Vollrath, W.: „Zentrierbarkeit von Linsen im Spannzentrierverfahren“, F & M 101 (1993), Carl Hanser Verlag München, S. 403 ff
- 34 Rothe, E.: „Worauf's beim optischen Design ankommt“, F & M 103 (1995), Carl Hanser Verlag, München, S. 332 ff
- 35 Becker, M., Güther, R., Staske, R.: „Laserschweißen als Präzisionsfügeverfahren für optische Mikrosysteme“, Fachbeiträge Mechanik, Berlin 1994
- 36 Springguth, S.: „Rechnergesteuertes Justierkleben – Ein Beitrag zur Automatisierung des Montageprozesses in der Optikfertigung“, Wiss. Z. TH Ilmenau 37 (1991) Heft 5 S. 187 ff
- 37 Georg Schmidt, Integrierte Entwicklung von Optik und Mechanik, F & M 104 (1996), Carl Hanser Verlag, München, S. 448
- 38 Merkel, K.: „Deutlich verbesserte Optikfertigung und –montage durch CNC und Digitalinterferometrie“, F & M 98 (1990) 1-2, Carl Hanser Verlag, München, S. 37
- 39 Schael, R.: „Optikentwicklung und –fertigung rationalisieren“, F & M 98 (1990) 4, Carl Hanser Verlag, München, S. 167
- 40 Guyenot, V.: „Rechner unterstützen das Montieren von Hochleistungsobjektiven“, F & M 98 (1990) 9, Carl Hanser Verlag, München, S. 361
- 41 Hanke, P.: „Linsen und Spiegelsysteme exakt montieren“, F & M 99 (1991) 1-2, Carl Hanser Verlag, München, S. 24
- 42 Lenhardt, K.: „Hochauflösende Fernsehobjektive auslegen und prüfen“, F & M 98 (1990) 1-2, Carl Hanser Verlag, München, S. 23
- 43 Götschmann, N., Hahn, O.: „Klebverbindungen an optischen Linsen berechnen“, F & M 101 (1993) 1-2, Carl Hanser Verlag, München, S. 18
- 44 Blume, F., „Einführung in die Fertigungstechnik“, Verlag Technik Berlin, 1981
- 45 Petter, J., „Einrichtung zum Erfassen der Dezentrierung optischer Elemente und deren Justierung unter Verwendung faseroptischer Sensoren“, Projektarbeit, TH Ilmenau, 300-92-52, 1992
- 46 Zocher, K.-P.: „Lehrmaterial für die Studienrichtung Produktionstechnik“, TU Ilmenau, 1998

- 47 Bergmann, H.W.: „Konstruktionsgrundlagen für Faserverbundwerkstoffe“, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1998
- 48 Starke: „Konstruieren mit Kunststoffen; Toleranzen, Passungen und Oberflächengüte in der Kunststofftechnik“, Tagungshandbuch 1997
- 49 Ehrenstein, G.-W.: „Konstruieren mit Polymerwerkstoffen“, 2., völlig überarb. Aufl., 1995
- 50 Ehrenstein, G.-W.: „Faserverbund-Kunststoffe“, Carl Hanser Verlag München 1992
- 51 Michaeli, Brinkmann, Lessenich-Henkys: „Kunststoff-Bauteile werkstoffgerecht konstruieren“, Carl Hanser Verlag München, 1995
- 52 Erhard, G.: „Konstruieren mit Kunststoffen“, Carl Hanser Verlag München 1995
- 53 Leitel, A.: „Abschlußbericht Produktklinik“, interner Bericht Carl Zeiss Jena GmbH, 1999
- 54 Paul, H., „Lexikon der Optik“, Sonderausgabe für die Carl Zeiss Gruppe Band 1 Spektrum, Akad. Verl. 1999
- 55 Paul, H., „Lexikon der Optik“, Sonderausgabe für die Carl Zeiss Gruppe Band 2 Spektrum, Akad. Verl. 1999
- 56 Böswetter, G., Denzin, K., Hennecke, D.: „Handhaben von Linsen mit Vakuumgreifern“. Feingerätetechnik, Berlin 37 (1988) 6, S. 253 - 254
- 57 Böswetter, G. „Montage von Rundoptikbaugruppen der Mittelklasseoptik“, Habil.-Schr., 1990, TU Ilmenau
- 58 Menges, G., Mohren, P.: „Spritzgießwerkzeuge“, Carl Hanser Verlag, München, 4. Auflage 1998,
- 59 de Gee, A.-W.-J.: „Adhäsionsverhalten von Werkstoffen und Maßnahmen zur Verhinderung des „Fressens“ von Bewegungselementen, in Reibung und Verschleiß von Werkstoffen, Bauteilen und Konstruktionen“, Grafenau, Expert Verlag, 1982, S. 75
- 60 Buckley, D. H.: “Surface effects in adhesion, friction, wear and lubrication”, Amsterdam, Elsevier, 1981, S. 456
- 61 Archard, J. F.: “Wear control book” (Autoren Peterson, M. B. und Winer, W. O.), New York: Mechanical society of engineers), 1980, S. 35
- 62 Czichos, H.: „Handbuch Tribologie“ Vieweg Verlag, 1992
- 63 Rabel, W.: „Einige Aspekte der Benetzungstheorie und ihre Anwendung auf die Untersuchung und Veränderung der Oberflächeneigenschaften von Polymeren“, Farbe Lack 77, 1971 S. 997
- 64 Uetz, H., Wiedemeyer. J.: „Tribologie der Polymere“. München, Carl Hanser Verlag 1985
- 65 Owens, D: K., Wendt, R. C., Estimation of surface free energy of polymers, Polymer Scientist 13, 1969 S. 1741
- 66 Hennemann, O. D.: „Fertigungstechnologie Kleben“, Ingenieur-Werkstoffe, Band 4 (1992) Heft 10, S. 58-61
- 67 Wolf H., Laasch M.: „Möglichkeit zur Bewertung von Montageklebstoffen“, Adhäsion, Band 35 (1991) Heft 12, S. 34-37
- 68 Hanke P.: „Linsen und Spiegelsysteme exakt montieren“, Feinwerktechnik und Meßtechnik, Band 99 (1991) Heft 1 / 2 Seite 24-26
- 69 Senf B.: „Optik-Mechanik-Konstruktion mit CAD“, Feinwerktechnik, Meßtechnik, Band 99 (1991) Heft 1 / 2 Seite 21-23
- 70 Danuser, R.: „Fassungen für Präzisionsobjektive automatisch zentrieren“, F & M 100 (1992), Carl Hanser Verlag, München S. 233 ff

- 71 Uder, S.; Wiesner, P.; Böswetter, G.: „Maßnahmen zur Verbesserung des thermischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen“, Konstruktion 47 (1995) 10, S. 335-338
- 72 Mater, J.: “The relative surface energy of hexagonal close-packed crystals”, Chem. Phys. (1999), 60(1), 70-78 CODEN: MCHPDR; ISSN: 0254-0584
- 73 Sudarshan, T. S.; Khor, K. A.; Jeandin, M.: “Tribological and surface energy properties of diamond-like nanocomposite coatings Surf”, Modif. Technol. XII, Proc. Int. Conf., 12th (1998), 533-539. ASM International, Materials Park, Ohio. CODEN: 67TGAY
- 74 Mater, J.: “Calculation of surface energy of metals and alloys by the electron density functional method”, Sci. Technol. (Shenyang, People's Repub. China) (1998), 14(4), S. 320-322 CODEN: JSCTEQ; ISSN: 1005-0302
- 75 “Surface energy and magnetism of the 3d metals Surf”, Sci. (1994), 315(1-2), 157-72 CODEN: SUSCAS; ISSN: 0039-6028
- 76 Mater, J.: “Effect of mechanical properties on the adhesive wear of metals, Sci. Lett. (1992), 11(19), 1309-11 CODEN: JMSLD5; ISSN: 0261-8028
- 77 “EAM study of surface selfdiffusion of single adatoms of fcc metals nickel, copper, aluminum, silver, gold, palladium and platinum”, Surf. Sci. (1991), 253(1-3), 334-44 CODEN: SUSCAS; ISSN: 0039-6028
- 78 Xiyou, J.: “Calculation of the surface energy of pure titanium”, (1989), 8(1), 54-5 CODEN: XIJID9; ISSN: 0258-7076
- 79 Condens, B., Matter, J.: “Theoretical and experimental study of a surface state on chromium”, (110) Phys. Rev. (1986), 33(12, Pt. 2), 8814-17 CODEN: PRBMDO; ISSN: 0163-1829
- 80 “Polymer-aluminum adhesion. The surface energy of aluminum in relation to its surface treatment”, J. Adhes. (1983), 15(2), 151-61 CODEN: JADNAJ; ISSN: 0021-8464
- 81 Glaeser, W. A.; Ludema, K. C.; Rhee, S. K.: “The dependence of the adhesive wear coefficient on the surface energy of adhesion Wear Material”, Int. Conf. (1977), 36-40. Publisher: ASME, New York, N. Y. CODEN: 40FDAM
- 82 “Segregation of boron to grain boundaries in iron and a stainless steel”, J. Phys. (Paris), Colloq. (1975), (4), 137-40 CODEN: JPQCAK
- 83 “Surface and grain boundary energies of iron, cobalt, and nickel”, Comments, Mater. Sci. Eng. (1975), 20(3), 291-2 CODEN: MSCEAA
- 84 “Temperature dependence of surface energy of metal wires”, Draht (1973), 24(8), 406-12 CODEN: DRAHA5
- 85 “Surface energy and adhesion at metal contacts”, Acta Met. (1972), 20(8), 1001-8 CODEN: AMETAR
- 86 Ratzel, W.-I.: „Umsetzung von Qualitätsstrategien im Spritzgießbetrieb gemäß QS 9000“ Spritzgießtechnisches Kolloquium 2000, Aalen, Robert Bosch GmbH Waiblingen
- 87 Gierth, M.: „Vorhersehbare Qualität, Online-Qualitätsüberwachung“, Spritzgießtechnisches Kolloquium 2000, Aalen
- 88 Eckardt, H.: „Qualitätssteigerung durch innovative Spritzgießverfahren“ Spritzgießtechnisches Kolloquium 2000, Aalen
- 89 Kleinebrahm, M.: „Maschineninterne Möglichkeiten zur Erhöhung der Formteilqualität“ Spritzgießtechnisches Kolloquium 2000, Aalen
- Unternehmensinterne Berichte und Protokolle
- 90 Benchmarkbericht Kunststoffobjektive in Camcordern, 1998
- 91 Benchmarkbericht Datenprojektoren im 1,5 kg Segment, 2000
- 92 Untersuchungsbericht Fassungsmaterialien Carl Zeiss Jena GmbH, 1991

- 93 Validierungsbericht „Thermisches Bördeln“, 1998
- 94 Konstruktionsrichtlinie Fassen von Rundoptik
- 95 Prüfrichtlinie für Projektionsobjektive
- 96 Produktdokumentation, Fa. Lehmann und Voss, Hamburg

angeführte DIN-Normen

- 98 286 Teil 1 und 2 Passungen (Einheitsbohrung, Einheitswelle)
- 99 53436 Glasübergangstemperatur von Kunststoffen
- 100 8593 (9.85) Struktur Fügeverfahren
- 101 50323 Tribologie
- 102 4768 Tastschnittverfahren zur Messung von Oberflächenrauheiten
- 103 58161 Teil 3, Prüfung von Optikeinzelteilen, Bestimmung von Krümmungsradien mit dem Ringsphärometer
- 104 58161 Teil 5, Prüfung von Optikeinzelteilen, Passefehler
- 105 58207 Gläser für Refraktionslinsen
- 106 58170 Blatt 51 Zeichnungsangaben für Optiksysteme, Axiale Abstände
- 107 58170 Blatt 52 Zeichnungsangaben für Optiksysteme, Zentrierfehler
- 108 58170 Blatt 53 Zeichnungsangaben für Optiksysteme, Verbundteile
- 109 58187 Qualitätsbewertung optischer Systeme, Radiale Verzeichnung
- 110 3140 Teil 6 Maß- und Toleranzangaben für Optikeinzelteile

Im Rahmen der Entwicklung der Fassungstechnologie betreute Studienarbeiten

- 111 Diplomarbeit Hendrik Merkel, „Wirtschaftliche Betrachtung technologischer Zusammenhänge bei der Montage optischer Bauelemente“, TU-Ilmenau, 1998
- 112 Diplomarbeit Daniel Görlich, „Konzept zur Montageplanung bezüglich Materialfluß und Lieferantenauswahl“, FH Jena, 1999
- 113 Diplomarbeit Wolfgang Kühnel, FH Jena „Optische Montagetechnologien“ 1999
- 114 Praktikumsbericht Thomas Helmrich, FH Jena, 03.96 – 09.96
- 115 Praktikumsbericht Florian Schießl, „Konzeptstudie einer Fertigungsstrecke zur Produktion von Objektiven für die Digitale Projektion“, Jena WS 97/98
- 116 Praktikumsbericht Thomas Richter „Überführung der Montagetechnologie "Thermisches Bördeln" vom Prototyp zur Serienfertigung, Jena, 03.98 – 08.98
- 117 Praktikumsbericht Reiner Franz, „Integration des Klebautomaten Asymthek in die Fließlinie der Digitalen Projektion“, Jena 08.98 – 03.99
- 118 Praktikumsbericht Markus Böhme, „Möglichkeiten zur Durchführung von Rationalisierungsmaßnahmen bei der Montage opt. BG“, Jena, 10.98 – 02.99
- 119 Praktikumsbericht Jürgen Löscher, „Montagegerechte Optimierung von Vorrichtungen in der Serienproduktion von Objektiven“, Jena, 09.98 – 02.99
- 120 Vorpraktikum Christian Martin, „Möglichkeiten zur Durchführung von Rationalisierungsmaßnahmen bei der Montage opt. BG“, Jena, 08.98 – 10.98
- 121 Praktikumsbericht Ullrich Wetzl „Ultraschallbördeln“, 1999
- 123 Praktikumsbericht Erik Leimbach „Thermisches Bördeln“, 1998
- 124 Diplomarbeit Axel Fischer: „Auswahl, Konzept und Konstruktion zur Unterstützung einer analytischen Methode für die Umsetzung innovativer Ansätze im Objektivbau“, 2001
- 125 Diplomarbeit Stefan Hartmann: siehe Axel Fischer

ANHANG 1 VERZEICHNIS DER VERWENDETEN GLEICHUNGEN

Nummer	Gleichung	Seite
(2.1)	$A = \frac{A_{\max} \cdot A_{\text{soll}} \cdot \ddot{U}_{\text{Ampli}} \cdot \ddot{U}_{\text{Sono.}}}{100\%}$	10
(3.1)	$\alpha \cdot E \leq 1,6 \text{ MPa/K}$	15
(3.2)	$f = \frac{2}{3} \cdot \frac{e \cdot l^2}{h}$	31
(3.3)	$H_{\text{zul}} = \frac{3}{2} \cdot \frac{l^2}{h} \cdot \frac{e_{\text{zul}}}{100}$	31
(3.4)	$d = \frac{M_B}{W}$	31
(3.5)	$W = \frac{b \cdot h^2}{6}$	32
(3.6)	$Q = \frac{b \cdot h^2}{6} \cdot \frac{E_S \cdot e_{\text{zul}}}{l}$	32
(3.7)	$h_{F/H} = \frac{m + \tan \alpha_{F/H}}{1 - m \cdot \tan \alpha_{F/H}}$	32
(3.8)	$F_F = Q \cdot h_F$	32
(3.9)	$F_H = Q \cdot h_H$	32
(4.1)	$\varnothing S_{\alpha(n)} = \varnothing L_{(n)} + 2(S_{1(n)} + b_B)$	38
(4.2)	$\varnothing S_{\beta(n)} = \varnothing L_{(n)} - 2 \cdot \cos \alpha_{L(n)} \cdot l_F$	38
(4.3)	$\varnothing S_{A(n)} \geq \varnothing S_{\alpha(n)} + 4 \text{ mm}$	38
(4.4)	$\alpha_{S(n)} = \alpha_{L(n)}$	38
(4.5)	$\beta_{(n)} = \frac{1}{2} \arccos \left(1 - \frac{(\varnothing L_{(n)} - 2 \cos \alpha_{L(n)} \cdot l_{F(n)})^2}{2R_{\beta(n)}^2} \right)$	38
(4.6)	$\varnothing S_{F(n)} = \varnothing S_{\beta(n)} - 4 \text{ mm}$	38
(4.7)	$\Delta l = l_0 \cdot a \cdot \Delta t$	39
(4.8)	$a_{100\text{Cr}6200^\circ\text{C}} = 12,7 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{K}}$	39
(4.9)	$J_B = 1 - a_{St200^\circ\text{C}} \cdot \Delta J$	39
(4.10)	$\text{Herstellmaß} = \text{Sollmaß} \cdot 0,998$	39
(4.11)	$A_0 = a_0 \cdot b_0$	40

Nummer	Gleichung	Seite
(4.12)	$h_b = a_1 \cdot \sin \mathbf{a}$	40
(4.13)	$A_1 = b_1 \cdot h_b = b_1 \cdot a_1 \cdot \sin \mathbf{a}$	40
(4.14)	$\Delta b = \mathbf{c} \cdot \Delta a$	40
(4.15)	$A_1 = (a_0 + \Delta a) \cdot (b_0 - \Delta b) \cdot \sin \mathbf{a}$	40
(4.16)	$a_0 \cdot b_0 = (a_0 + \Delta a) \cdot (b_0 - \mathbf{c} \Delta a) \cdot \sin \mathbf{a}$	40
(4.17)	$\frac{a_0 \cdot b_0}{\sin \mathbf{a}} = a_0 \cdot b_0 + b_0 \cdot \Delta a - \mathbf{c} a_0 \cdot \Delta a - \mathbf{c} \Delta a^2$	40
(4.18)	$0 = \Delta a^2 - \frac{b_0 - \mathbf{c} a_0}{\mathbf{c}} \cdot \Delta a - \frac{a_0 b_0 \cdot \left(1 - \frac{1}{\sin \mathbf{a}}\right)}{\mathbf{c}}$	40
(4.19)	$\emptyset F_{L(n)} = \emptyset L_{(n)}$	42
(4.20)	$\emptyset F_{G(n)} = \emptyset L_{(n)} + 2b_B = \emptyset L_{(n)} + 1 \text{ mm}$	42
(4.21)	$\emptyset F_{F(n)} \geq \emptyset L_{(n)} + 2b_B + 5 \text{ mm}$	42
(4.22)	$C = \sum c_i \cdot \mathbf{z}_i \cdot V_i$	48
(4.23)	$Q = \frac{\mathbf{I} \cdot A \cdot t \cdot \Delta \mathbf{n}}{l}$	48
(4.24)	$T(\mathbf{r}, t) = T(x, y, z, t)$	49
(4.25)	$\Phi_{th} = \frac{dQ}{dt}$	49
(4.26)	$q_{th} = -\mathbf{I} \frac{dT(r)}{dr}$	49
(4.27)	$W_{ab} = 2\sqrt{\mathbf{g}_a^d \cdot \mathbf{g}_b^d} + 2\sqrt{\mathbf{g}_a^p \cdot \mathbf{g}_b^p}$	58
(4.28)	$F_R = \mathbf{m}_0 * F_P * \sin \mathbf{a}_S$	58
(4.29)	$F_R = \mathbf{m}^* F_P * \sin \mathbf{a}_S$	58
(4.30)	$t_p = 100 \frac{l_t}{l}$	59
(4.31)	$W_r = \frac{E}{G} \cdot C_1 \cdot \frac{\mathbf{g}}{H}$	61
(4.32)	$W_v = K \cdot \frac{F_N \cdot s}{H}$	63
(5.1)	$\emptyset A_{2(n)} \geq \emptyset S_{2(n)}$	72
(5.2)	$\emptyset A_{F(n)} \leq \emptyset S_{3(n)}$	72

Nummer	Gleichung	Seite
(5.3)	$\emptyset A_{Z2(n)} \geq \emptyset S_{2(n)}$	72
(5.4)	$\emptyset A_{F(n)} \leq \emptyset S_{3(n)}$	72
(5.5)	$h_{A1(n)} + h_{F1} + h_{s(n)} \leq h_z$	72
(6.1)	$c_p > \frac{4}{3}$	84
(6.2)	$T_o - T_u > 8\delta$	84
(6.3)	$\hat{m} = \bar{x}$	86
(6.4)	$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$	86
(6.5)	$\mathbf{m}_{\text{unten}}^{\text{oben}} = \bar{X} \pm t * \frac{s}{\sqrt{n}}$	86
(6.6)	$\hat{d} = S$	86
(6.7)	$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}$	86
(6.8)	$\mathbf{d}_{\text{unten}}^{\text{oben}} = \mathbf{c}_{\text{unten}}^{\text{oben}} * s$	86
(6.9)	$OEG = \hat{m} + \frac{2,576}{\sqrt{n}} * \hat{d}$	86
(6.10)	$UEG = \hat{m} - \frac{2,576}{\sqrt{n}} * \hat{d}$	86
(6.11)	$OWG = \hat{m} + \frac{1,96}{\sqrt{n}} * \hat{d}$	86
(6.12)	$UWG = \hat{m} - \frac{1,96}{\sqrt{n}} * \hat{d}$	86
(6.13)	$Mittellinie = n * \bar{p}$	86
(6.14)	$OEG = n\bar{p} + \sqrt{n\bar{p}(1-\bar{p})}$	86
(6.15)	$UEG = n\bar{p} - \sqrt{n\bar{p}(1-\bar{p})}$	86
(6.16)	$R = x_{\max} - x_{\min}$	89
(6.17)	$\bar{p} = \frac{c}{n}$	89

ANHANG 2 TABELLEN- UND BILDERVERZEICHNIS

Tabelle	Titel	Seite
2.1	Bewertungskriterien angewandt auf die Montageverfahren Kleben und Fassen mit Vorschraubring	4
2.2	Bewertungskriterien an der Beispielfassung „Aluminium geklebt“	6
2.3	Kosten der „Aluminiumfassung geklebt“	6
2.4	Arbeitsfolgen beim Ultraschallbördeln	12
2.5	Vergleich der Technologien „Caulking“, „Ultraschallbördeln“ und „Heat Molding“	13
3.1	Eigenschaften von Polycarbonat mit und ohne Kohlefaserverstärkung	16
3.2	Messergebnisse der ersten Abspritzung	17
3.3	Wärmeleitkoeffizienten von Aluminium und PC 30% CF	25
3.4	Vor- und Nachteile von Kunststoff als Fassungsmaterial	27
3.5	Compound Prüfkriterien	28
3.6	Gegebene Größen zur Berechnung von Snap-In Haken	33
3.7	Gesuchte Größen zur Berechnung von Snap-In Haken	33
4.1	Die wichtigsten Stempelmaße und deren Zusammenhänge im Umformprozeß	38
4.2	Wichtige geometrische Kenngrößen zur Fassung	41
4.3	Wichtige geometrische Kenngrößen zur Linse	43
4.4	Wärmekapazitiver Vergleich div. Stempelmateriale	48
4.5	Die 5 Phasen des „Heat Molding“ und ihre wichtigsten Zusammenhänge	51
4.6	Temperatur und Umformfähigkeit in Phase 1	52
4.7	Wichtige tribologische Einflußgrößen beim „Heat Molding“	55
4.8	spezifische Eigenschaften von 100 Cr 6	56
4.9	Verschleißerscheinungen am Stempel	65
5.1	Parameter Werkstückaufnahme (innere und äußere)	71
6.1	Einflußgröße Personal	79
6.2	Einflußgrößen Umwelt und Medien	80
6.3	Einflußgröße Material	80
6.4	Einflußgröße Maschinen	80
6.5	Einflußgröße Betriebsmittel	81
6.6	Methodische Einflußgrößen	81
6.7	Risikobetrachtung Ausfall der Medienversorgung	82
6.8	Qualitätskriterien zur Produktbewertung	83
6.9	Messergebnisse zur qualitativen Einschätzung des „Heat Molding“	87
6.10	Ergebnisse der „Worst Case“ Betrachtungen	88
6.11	Exemplarische Tabelle als Basis einer Qualitätsregelkarte beim „Heat Molding“	90
6.12	Bewertungskriterien an der „Heat Molding“ Fassung	92
6.13	Aufbereitete Kosten der „Heat Molding“ Fassung	92
6.14	Vergleichsübersicht Kleben, Fassen mit Vorschraubring und „Heat Molding“	93
7.1	Symmetrische und asymmetrische Gestaltungsvarianten einer Fassung	98

Bild	Titel	Seite
2.1	Vergleichsbasis Aluminium Vorderfassung mit Linsen	3
2.2	Zur Bewertung herangezogenes Objektiv	5
2.3	Wertzuwachskurve Fassung „Aluminium geklebt“ mit Einsparpoten- tialen	7
2.4	KAZAMA Caulking Anlage THP 2A	9
3.1	Zeitaufteilung für das Befestigen einer Linse beim Ultraschallbördeln	12
3.2	Charakteristische Meßpunkte am Untersuchungsobjekt	18
3.3	Meßergebnisse Längenmaß 24,3 mm der gespritzten Kunststofffas- sung	19
3.4	Meßergebnisse am Durchmesser 59 h6	20
3.5	Ergebnisse der Messungen zur Rundheit am Durchmesser 59 mm	20
3.6	Kreisdiagramme zur Rundheitsmessung am Linsensitz ②	21
3.7	Zylinderformabweichung am Durchmesser 59 (Linse ②)	21
3.8	Messungen der Zylinderformabweichung am $\varnothing 40,8^{-0,05}$ mm	21
3.9	Lagedefinition der Linsen durch Planauflage und Ringschneide	22
3.10	Kostenvergleich zwischen der Aluminium- und Kunststofffassung	23
3.11	Radiale Deformation der Vorderfassung bei -40 °C	24
3.12	Radiale Deformation der Vorderfassung bei $+70$ °C	25
3.13	Vergleich Temperatur- Zeitverlauf bei einer Aluminium und einer Kunststofffassung	26
3.14	Snap-Haken	31
4.1	Fassung mit Snap-Haken	31
4.2	Refraktionslinse	34
4.3	Einordnung des „Heat Molding“ in die Fertigungstechnik	35
4.4	Geometrie zwischen Stempel, Linse und Fassung	35
4.5	Die „ideale“ Linsenlage	36
4.6	Zusammenhang zwischen Gratgeometrie und Ausdrückkraft	36
4.7	Stempel mit den wichtigsten Maßen	37
4.8	Geometrische Annahmen zum Umformwinkel α	39
4.9	Fassungsbeispiel mit verfahrenstechnisch wichtigen Maßen	41
4.10	Linsenbeispiel mit verfahrenstechnisch wichtigen Maßen	42
4.11	Glasübergangstemperatur	44
4.12	Temperaturbereiche von amorphen Kunststoffen	44
4.13	Aufbau der Thermischen Einheit am Realisierungsbeispiel	47
4.14	Aufwärmkurve Polycarbonat mit integrierter log. Formänderung	50
4.15	Phase 1 des „Heat Molding“	52
4.16	Phase 2 des „Heat Molding“	53
4.17	Einordnung von Beschichtungsmetallen im PSE	60
4.18	Zusammenhänge zwischen Härte, E-Modul, Oberflächenenergie und Adhäsion bei metallischen Beschichtungen	61
5.1	Versuchsstempel mit TiN_2 -Beschichtung	62
5.2	Arbeitsplatz zum „Heat Molding“ mit 2 Montagestationen	66
5.3	Komponenten im Säulenführungsgestell	67
5.4	Die Komponenten der thermischen Einheit	68
5.5	Isolation aus PEEK	69
5.6	Werkstückaufnahme (Typ innere Aufnahme)	70
5.7	Innere Aufnahme	71
	Äußere Aufnahme	71
5.8	Falsche Auflage	72

Bild	Titel	Seite
5.9	Korrekte Auflage	72
5.10	Zusammensetzung der Höhenmaße im Säulenführungsgestell	73
6.1	Schematische Darstellung am Prozessen beteiligter Größen	75
6.2	Ishikawa Diagramm (Ursache- Wirkungs- Diagramm) für das „Heat Molding“	78
6.3	Qualitätsregelkarte (Einzelwertkarte) der Presse 4	91
6.4	Wertzuwachskurve Kunststofffassung mit Einsparungen	94
6.5	Gesamtkostenvergleich	95
7.1	Axiale Lagedefinition der Linsen durch Anlagestege (A_A)	97
7.2	Radiale Lagedefinition der Linsen durch Auflagestege (A_R)	97
7.3	Prinzipieller Aufbau eines Objektivs mit Halbschalenfassung	98