

Herstellung langer Kunststoffzeiger durch Spritzgießen

A. Tewald, A. Laage (IKFF), U. Thissen (IZFM)

Beitrag zum

5ème congrès chronométrie in Besancon

18. – 19. Octobre 1994

© 1999 Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik

Herstellung langer Kunststoffzeiger durch Spritzgießen

A. Tewald, A. Laage
 Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik der Universität Stuttgart, D-70569 Stuttgart

U. Thissen
 Hahn-Schickard-Institut für Feinwerk- und Zeitmeßtechnik, D-72138 Stuttgart

Zusammenfassung

Das Ziel der Arbeit war die spritzgießtechnische Herstellung eines langen Kunststoffzeigers mit minimalem Massenträgheitsmoment. Hierzu wurde als erstes die geometrische Ausgestaltung des Zeigers erarbeitet. Durch eine Simulation konnten wichtige Parametereinflüsse ermittelt werden und die Einsetzbarkeit eines solchen Programmes auch für kleine Bauteile bzw. Wandstärken aufgezeigt werden. Bei der Beschreibung der Werkzeugkonstruktion wird insbesondere Wert auf die Gestaltung des Angußsystems gelegt. Die Ergebnisse der Abspritzversuche beschreiben eine vollständige Formfüllung durch eine Optimierung der einzelnen Parameter. Mit Hilfe einer induktiven Werkzeugtemperierung gelang es, das Spritzgießwerkzeug ohne wesentliche Verlängerung der Zykluszeit auf Temperaturen im Bereich der Schmelzetemperatur des Materials zu erwärmen.

Summary

The purpose of this project was to develop a long plastic pointer with a minimized mass moment of inertia by means of injection mold technique. In a first step the geometric shape of the pointer was elaborated. By the aid of simulation the influence of significant parameters could be detected and the applicability of such a program for even small parts and thickness was shown. In the description of the mold design emphasis was especially put on the gate construction. As a result of the injection mold tests, a complete filling of the cavity was achieved by optimizing each parameter. By means of an inductive tempering it was possible to heat up the skin of the mold to the melt temperature without increasing the cycle time essentially.

1. Einleitung

Die bei Quarzgroßuhrwerken eingesetzten Zeiger sind je nach Länge spritzgegossene Kunststoffzeiger oder gestanzte Aluminiumzeiger. Unter Berücksichtigung der Leistungsdaten batteriebetriebener Schrittmotorwerke, die das Massenträgheitsmoment der Zeiger begrenzen, besitzen bisher eingesetzte Kunststoffzeiger lediglich eine Länge von ca. 80mm. Im Rahmen eines vom Wirtschaftsministerium des Landes Baden-Württemberg geförderten Verbundvorhaben zwischen dem federführenden Hahn-Schickard-Institut für Feinwerk- und Zeitmeßtechnik, dem Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik der Universität Stuttgart sowie acht mittelständischen Unternehmen war die Aufgabe zu lösen, für ein typisches Quarzuhrwerk einen Kunststoffzeiger mit einer Länge von 120mm mittels Spritzgießen herzustellen.

2. Randbedingungen

Bei der Dimensionierung des Zeigers ist zu berücksichtigen, daß ein durchschnittliches Antriebsmoment von $150\mu\text{Nm}$ an der Sekundenachse und eine Antriebsimpulsdauer von 47 ms das maximale Massenträgheitsmoment des Zeigers auf 120gmm^2 beschränken, damit eine vollständige Schrittausführung gewährleistet ist. Zum zweiten ist zu fordern, daß die durch den kurzen Fortschaltvorgang angeregte Biegeschwingung des Zeigers möglichst klein und von kurzer Dauer ist.

Somit ergibt sich für den Zeiger folgendes Anforderungsprofil:

- Um das geforderte Massenträgheitsmoment nicht zu überschreiten ist darauf zu achten, daß die Masse des Zeigers so klein als möglich ist. Nach

$$M = \int_K r^2 dm \quad (1)$$

wird das Massenträgheitsmoment vor allem durch die Zeigerlänge bestimmt, da der Abstand der Masse zum Drehpunkt quadratisch in die Berechnung eingeht.

- Der Zeiger muß bei der Schrittausführung ein kurzes Einschwingverhalten zeigen. Die Amplitude wird durch die Steifigkeit des Zeigers reduziert. Zu diesem Zweck muß das Flächenträgheitsmoment senkrecht zur Zeigerlängsachse groß sein. Außerdem muß die Eigenfrequenz des Zeigers hoch sein, damit durch die Kinematik keine übermäßige Anregung des Zeigers zum Schwingen stattfindet bzw. die auftretende Schwingung rasch gedämpft wird.

Die beiden Forderungen widersprechen sich, d.h. bei einer optimalen Steifigkeit des Zeigers wird die Anforderung für das Massenträgheitsmoment verletzt und umgekehrt. Man muß also einen Querschnitt finden, der in einem Kompromiß beiden Anforderungen gerecht werden kann.

Eine erste Abschätzung für die 1. Eigenfrequenz des Zeigers erhält man mit folgendem Ansatz /2/.

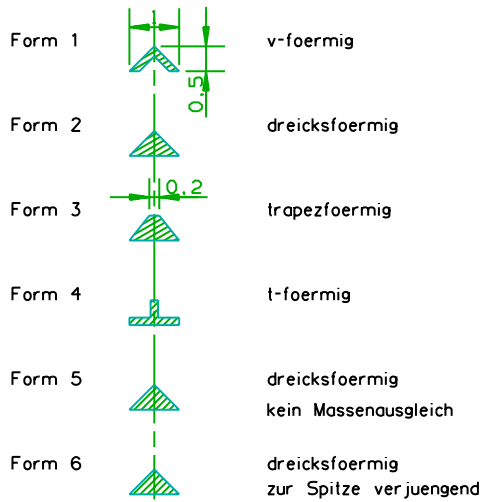
$$f_1 = \frac{3.515}{2\pi} \sqrt{\frac{EI_T}{\rho A l^4}} \quad (2)$$

wobei

ρ	Dichte	E	Elastizitätsmodul
I_T	Flächenträgheitsmoment	A	Querschnittsfläche
f_1	Eigenfrequenz	l	Länge

Betrachtet man den Zeiger als einseitigen eingespannten Stab, so hängt die Wellenlänge seiner jeweiligen Eigenform lediglich von seiner Länge ab. Die Wellenlänge für die erste Eigenform berechnet sich zu einem Viertel der Zeigerlänge,

d.h. sie beträgt 30 mm. Die Gleichung (2) zeigt, daß die Eigenfrequenzen neben einer Reduzierung der Wellenlänge, was durch die Längenvorgabe nicht möglich ist, in erster Linie durch eine Vergrößerung des Elastizitätsmoduls und des Flächenträgheitsmoments sowie durch eine Reduktion der Querschnittsfläche erhöht werden können.

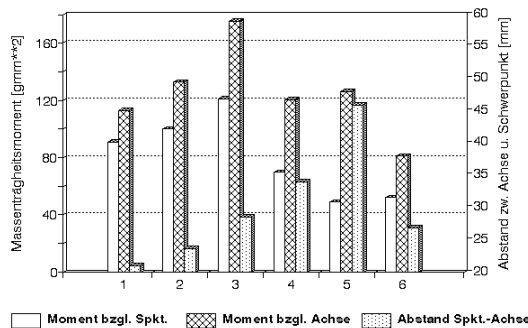


untersuchte Zeigerquerschnitte

Mit Hilfe einer FE-Simulation wurde das Massenträgheitsmoment und das dynamische Verhalten von unterschiedlichen Zeigerquerschnittsformen untersucht. Den Simulationsrechnungen liegen die Materialkennwerte von POM zugrunde, d.h. $E=2880\text{N/mm}^2$ und $\rho=1,42\text{g/cm}^3$. Die verschiedenen Querschnitte, für die eine Simulation durchgeführt wurde, sind in Bild 1 zusammengefaßt. Die massiveren Querschnitte (Form 2 und 3) besitzen zwar eine größere Steifigkeit, aber gleichzeitig resultiert daraus ein ungünstigerer Wert für das Massenträgheitsmoment (Bild 2).

Bei sämtlichen Modellen, die über die gesamte Länge dieselbe Querschnittsform besitzen, liegen die Werte für das Massenträgheitsmoment oberhalb bzw. dicht bei dem geforderten Wert von 120gmm^2 (Form 1-5). Nur bei einer Abnahme der Querschnittsfläche mit zunehmender Entfernung vom Drehpunkt (Form 6) ist ein gutes Ergebnis zu erzielen. Die berechneten Eigenfrequenzen liegen je nach Zeigerquerschnitt im Bereich zwischen 7 und 12 Hz.

Massenträgheitsmoment eines Zeigers
Einfluß des Zeigerquerschnitts

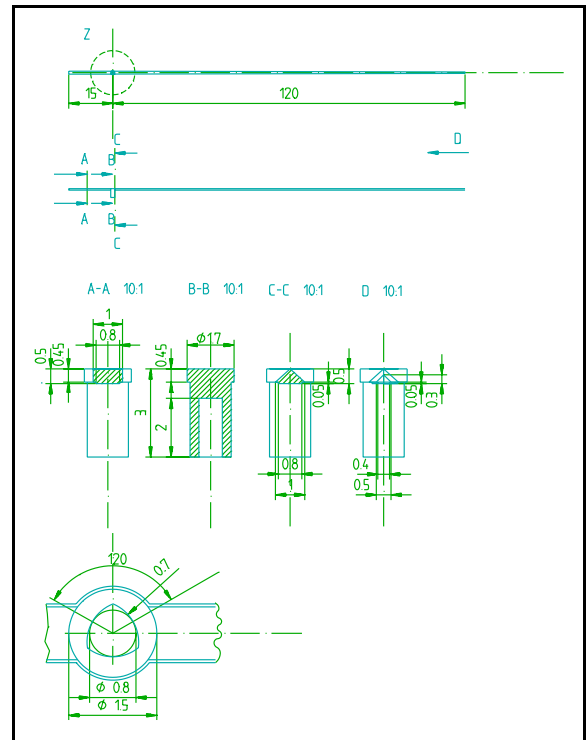


Abhängigkeit vom Querschnitt

3. Bauteilkonstruktion

3.1 Festlegung der Abmessungen

Aufgrund der durchgeführten Berechnungen wird die Querschnittsform 6 für den langen Zeiger gewählt (Bild 3). Das Ausgleichsgewicht besitzt eine Länge von 15mm, so daß das zusätzliche Moment beim Betrieb des Zeigers, welches durch den Schwerpunktabstand zur Achse hervorgerufen wird, so klein als möglich gehalten wird. Das Gesamtträgheitsmoment wird dadurch nur unwesentlich erhöht, da der Abstand der zusätzlichen Masse vom Drehpunkt minimal ist. Der sich verjüngende Zeigerquerschnitt reduziert das Massenträgheitsmoment und sorgt mit der Dreiecksform gleichzeitig für eine optimale Bauteilsteifigkeit. Die Nabe des Zeigers ist so gestaltet, daß das Bauteil auf eine Welle mit dem Durchmesser 0,8mm aufgepreßt werden kann. Der Nabenaußendurchmesser beträgt 1,5mm.



Zeiger

3.2 Auswahl des Polymerwerkstoffes

POM (Hostaform C52021)

Dieser Werkstoff wird im Präzisionsdruckguss häufig eingesetzt. Neben dem günstigen Preis zeichnet sich POM vor allem aus durch /4/:

- hohe Zähigkeit
- hohe Härte
- hohe Steifigkeit
- sehr gute Formbeständigkeit in der Wärme
- gute chemische Beständigkeit
- keine Spannungsrißbildung
- hohes Rückstellvermögen
- gutes Gleitverhalten
- hohe Maßbeständigkeit
- leichte Verarbeitbarkeit

Nachteilig bei POM ist vor allem die sehr hohe Verarbeitungsschwindigkeit. Bei dem hier eingesetzten Typ C52021 (Hoechst) handelt es sich um einen extrem leichtfließenden, niedrigviskosen Typ. Der erzielbare Kristallinitätsgrad in einem Bauteil ist für dessen Steifigkeit mit verantwortlich. Die

Kristallitbildung lässt sich durch eine günstige Geometrie und ein langsames Abkühlen begünstigen.

LCP

Bei diesem Polymertyp handelt es sich um ein thermotropes, d.h. in der Schmelze verarbeitbares flüssigkristallines Polymer (Liquid Crystallin Polymer = LCP) mit einer hohen Temperaturbeständigkeit. In der flüssigen Phase, d.h. in der Schmelze, befinden sich die Moleküle in einem Ordnungszustand, der zwischen der perfekten Ordnung im Kristall und der völligen Unordnung in einer Flüssigkeit liegt. Die stabförmigen Moleküle werden unter Einwirkung einer Dehn- oder Scherströmung zu Fasern und Fibrillen angeordnet. Beim Abkühlen wird diese Struktur eingefroren. Die innere Struktur eines Bauteils aus LCP ist der von Holz sehr ähnlich. Dies lässt sich beispielsweise an der Bruchfläche einer Zugprobe erkennen. Durch die stabförmige Polymerstruktur werden vor allem die mechanischen Eigenschaften erheblich verbessert.

Das Material zeichnet sich aus durch /5/:

- sehr hohe Festigkeit und Steifigkeit in Fließrichtung, mit abnehmender Wandstärke zunehmend
- sehr hohe Zähigkeit, insbesondere Kerbschlagzähigkeit
- sehr niedriger thermischer Ausdehnungskoeffizient,

- vergleichbar dem von Metallen, Glas und Keramik
- geringe Schwindung
- geringe Schmelzwärme, d.h. eine hohe Erstarrungsgeschwindigkeit und damit eine kurze Zykluszeit
- niedrige Schmelzviskosität, d.h. eine sehr gute Fließfähigkeit
- sehr geringe Wasseraufnahme
- sehr gute Chemikalien- und Oxidationsbeständigkeit

Die Eigenschaften sind stark anisotrop, d.h. die Zugfestigkeit, die Steifigkeit und Zähigkeit sind in Orientierungsrichtung höher. Sehr ungewöhnlich ist die Kombination von hoher Steifigkeit mit hoher Zähigkeit, denn im Normalfall sind steife Polymere eher spröde. Die Orientierung ist umso höher, je dünner die Wandstärke ist. Diese Eigenschaft kommt der Tendenz zur Miniaturisierung in der Elektronik entgegen, da sich sehr dünne Wandstärken mit hoher Festigkeit realisieren lassen. Bei den im Rahmen dieses Projekts verwendeten Vectratypen erfolgt zusätzlich eine Verstärkung mit 30% Glasfasern. Vor der Verarbeitung sollte Vectra bei 150-160°C 4 h getrocknet werden. Die Einspritzgeschwindigkeit ist hoch zu wählen. Nach Möglichkeit ist die Kavität zu polieren. Die Schmelzviskosität nimmt mit zunehmender Deformationsgeschwindigkeit kontinuierlich ab.

In Tabelle 1 sind die wichtigsten Materialwerte der eingesetzten Werkstoffe aufgelistet.

			POM Hostaform	LCP Vectra	
Eigenschaften (alle Werte bei 23°C)	Einheit	Methode	C52021	A130	E130
Gehalt an Verstärkungsstoffen	Gew. %		-	30	30
Dichte	g/cm ³	DIN 53479	1,41	1,60	1,61
Verarbeitungsschwindigkeit längs	%		1,8	0,1	0,15
Verarbeitungsschwindigkeit quer	%		-	0,4	0,6
Mechanische Eigenschaften					
E-Modul (Zugversuch)	N/mm ²	DIN 53457-t	2950	16100	13000
Thermische Eigenschaften					
Schmelzpunkt (LCP)/Schmelzbereich (POM)	°C	DIN 53736 B2	164-167	280	355
Verarbeitung					
Verarbeitungstemperatur	°C		180-230	270-310	290-355
Werkzeugwandtemperatur	°C		60-120	50-180	50-180

Tab 1. Werkstoffdaten

4. Rheologische und thermische Werkzeugauslegung

4.1 Abschätzung des Druckverlustes im Zeiger

Das Aspektverhältnis zwischen der Länge ab Nabenmitte (120mm) und der Höhe des dreiecksförmigen Querschnitts als Ersatzwandstärke (0.5mm) beträgt 240:1. Der Druckabfall p in der Kavität ist aufgrund der geringen Querschnittsfläche sehr hoch, für eine isotherme Betrachtung ist in /3/ folgender Zusammenhang angegeben.:

$$\Delta p = \frac{1}{K^n G} \dot{Q}^{\frac{1}{n}} \quad (3)$$

wobei \dot{Q} Volumenstrom

- K Proportionalitätskonstante
- G Werkzeugkonstante
- n Fließexponent

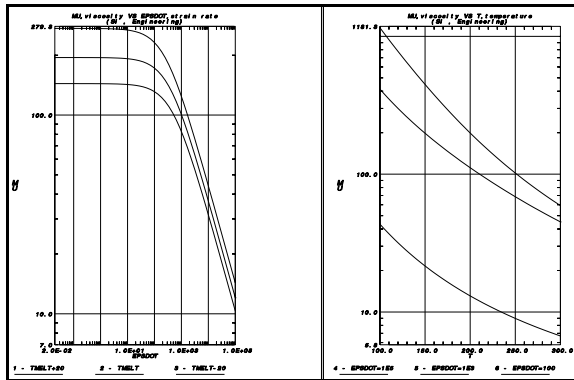
Bei der Bestimmung des Fließexponenten ist der Zusammenhang zwischen Viskosität und Schergeschwindigkeit notwendig. Polymerschmelzen besitzen im Gegensatz zu newtonschen Flüssigkeiten, wie beispielsweise Wasser, ein strukturviskoses Verhalten, d.h. mit Zunahme der Schergeschwindigkeit nimmt die Viskosität ab, wie in Bild 4 am Beispiel POM (Hostaform C52021) gezeigt.

Tabelle 2 enthält eine Aufstellung für den berechneten Druckabfall in der Kavität. Geht man von einer Füllzeit für den Zeiger von etwa 0,1s aus, ergibt sich bei einer Querschnittsfläche von rund 0,15 mm² für den Volumenstrom ein Wert von $Q=65 \cdot 10^{-8}$ m³/s. Die Rechnung wurde für 2 dreiecksförmige und für 2 flächengleiche Quadrate durchgeführt. Diese Querschnittsflächen werden auf einen Kreisquerschnitt mit gleichem hydraulischen Querschnitt umgerechnet. Die Schergeschwindigkeit nimmt mit Zunahme der Querschnittsfläche ab. Zusätzlich treten in einer Dreiecksfläche höhere Schergeschwindigkeiten auf, als in einer vergleichba-

Größe	Einheit	dreiecksförmiger Zeigerquerschnitt		quadratischer Zeigerquerschnitt	
Fläche	mm ²	0,15	0,2	0,15	0,2
Seitenlänge	mm	0,588	0,679	0,387	0,4473
γ_a	1/s	8526	5536	8010	5187
ΔP	bar	3792	2579	3196	2200

Tab. 2 Druckabfall nach /3/

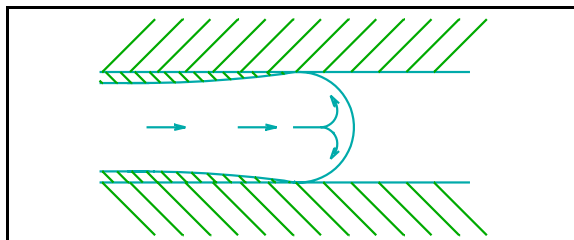
ren quadratischen Querschnittsfläche. Die Viskosität bzw. der Fließexponent ist mit Hilfe des Carreau Ansatzes bestimmt worden. Die Materialwerte konnten von der Firma Hoechst übernommen werden. Die zur Berechnung des Druckverlustes notwendige Werkzeugkonstante G beinhaltet die Querschnittsform und die Länge der Kavität. Der berechnete große Druckverlust für die Dreiecksform zeigt, daß eine vollständige Formfüllung mit erheblichen Schwierigkeiten verbunden sein wird.



Viskosität-Schergeschwindigkeit von C5201

Es handelt sich hierbei um eine Übersichtsrechnung, bei der der Zeiger mit einem konstanten Querschnitt angesetzt worden ist. Da weiterhin von einem isothermen Formfüllvorgang ausgegangen wurde, wurden auch die einfrrierenden Randschichten (Bild 5) nicht berücksichtigt. Bei sehr geringen Wandstärken können dazu führen, daß ein bereits gefüllter Querschnitt einfriert, bevor die ganze Kavität ausgeformt ist. Dieser Fall tritt um so schneller ein, je größer die Differenz zwischen Werkzeugwand- und Schmelzetemperatur ist.

Eine genauere Berechnung wurde mit einem Füllsimulationsprogramm durchgeführt, worauf in dem folgenden Abschnitt noch eingegangen wird.



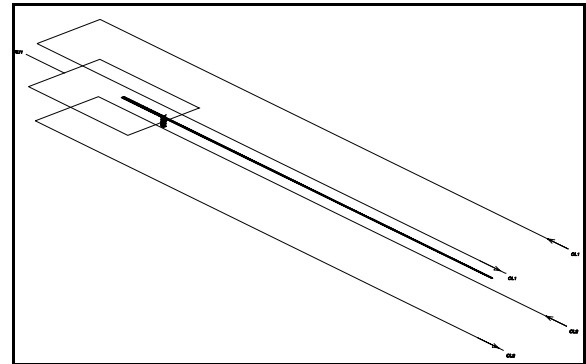
Randschichterstarrung

4.2 Berechnung des Formfüllvorgangs

Für die Berechnung des Spritzgießprozesses sind drei Informationsgruppen notwendig:

- Geometrie (Kavität, Kühlung, Anguß)
- Stoff (Werkzeugwerkstoff, Polymer, Temperiermedium)
- Prozeßparameter (Drücke, Temperaturen, Zeiten, ...)

Die durch die Konstruktion vorgegebene Geometrie des Zeigers und damit auch der Kavität wird durch zweidimensionale finite Elemente modelliert, da die Berechnung auf der Schalentheorie basiert. Dafür stehen Stab-, Dreiecks- und Viereckselemente zur Verfügung. Die Dicke bzw. der Durchmesser wird über ein Attribut dem jeweiligen Element zugeordnet. Im Bild 6 ist das FE-Netz im Bereich der Nabe dargestellt.



FE-Netz des Zeigers mit zweiseitigem Tunnelanguß

Für das Angußsystem wurden zwei verschiedene Varianten betrachtet. Das Tunnelangußsystem leitet die Schmelze von beiden Seiten direkt in den Nabenbereich, um möglichst dicht an den dünnen Zeigerquerschnitt heranzukommen. Da dies jedoch nur über ein längeres Angußsystem möglich ist, wurde als zweite Variante ein Stangenanguß gewählt (siehe auch Bild 11), dessen Anschnitt sich am Ausgleichsgewicht des Zeigers befindet.

Für die Berechnung konnte nur POM als Werkstoff herangezogen werden, da für die LCPs bislang noch keine hinreichend guten rheologischen Daten zur Verfügung stehen, um mit diesen eine Füllsimulation ausführen zu können. Bei Bauteilen mit so kleinen Querschnitten wie beim vorliegenden Zeiger sind die Materialdaten von sehr großer Bedeutung. Neben der Viskosität und der spezifischen Wärmekapazität in Abhängigkeit von der Temperatur sollte auch die Dichte als Funktion des Druckes und Temperatur vorliegen, da hier das kompressible Werkstoffverhalten nicht vernachlässigt werden kann.

Bei den Prozeßparametern wurde von den durch die am IKFF vorhandene Spritzgießmaschine vorgegebenen Drücke und Einspritzgeschwindigkeiten ausgegangen. Die zunächst eingegebenen Temperaturen (Form- und Düsentemperatur) wurden aus den Angaben des Materialherstellers entnommen.

Das Ziel der Berechnungen war es, eine Parametereinstellung zu finden, mit der es möglich ist, die Kavität zu füllen bzw. den Grad der Teilfüllung zu errechnen. In diesem Sinne

konnte auch berechnet werden, welches der beiden Angußsysteme für das bessere Füllergebnis sorgen kann.

Das Ergebnis der Berechnung war, daß der Zeiger nur gefüllt werden konnte, wenn die Werkzeugwandtemperatur auf Werte zwischen der No-flow- und der Verarbeitungstemperatur erhöht wird, also ein quasi isothermer Formfüllvorgang vorliegt. Bei den niedrigeren Temperaturen wächst die Randschicht zu schnell an, so daß die Druckverluste zu groß werden und die Fließfront einfriert.

Für die Formtemperaturen 110°C und 140°C wurden die Teilfüllungen beim Tunnelanguß mit dem Experiment verglichen, wobei sich eine relativ gute Übereinstimmung ergeben hat, wie dies die folgende Tabelle zeigt.

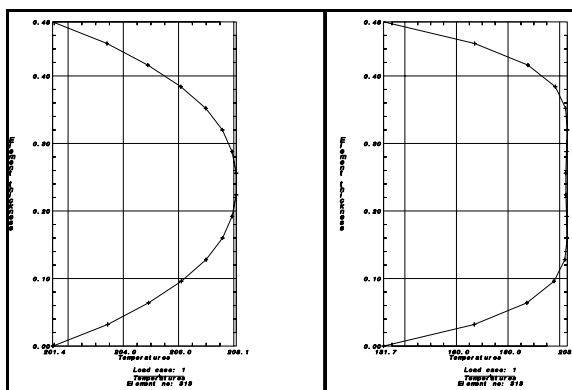
Werkzeugtemperatur	Simulation	Experiment
110°C	60 mm	41 mm
140°C	77 mm	85 mm

Tab. 3 erreichbare Zeigerlänge bei Tunnelangußsystem

Bei den Versuchen wurden der Maximaldruck (2400 bar) und die maximal mögliche Einspritzgeschwindigkeit (34 cm³/s) bei einer Massetemperatur von 210°C eingestellt.

Da der POM-Zeiger aufgrund der zu geringen Steifigkeit relativ früh nicht mehr weiterverfolgt wurde, liegen keine experimentellen Ergebnisse mit dem Stangenanguß vor. Aus der Simulation ergibt sich, daß die Zeigerlänge mit diesem Anguß mit ca. 80 mm genau so groß ist wie beim Tunnelanguß. Das resultiert daraus, daß die Temperaturen und Drücke beim Eintritt in den engen Zeigerquerschnitt in beiden Fällen etwa gleich sind.

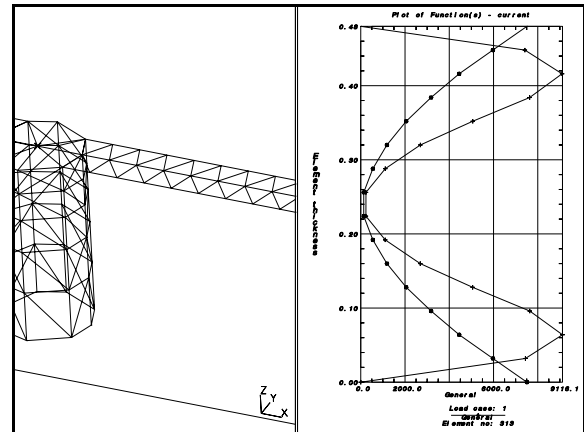
Der starke Einfluß der Temperaturverteilung auf den Formfüllvorgang wird anhand des Vergleichs zwischen einer Berechnung mit 200°C und 110°C Werkzeugtemperatur deutlich. Im Bild 7 sind in Dickenrichtung eines Elements nahe der Nabe (siehe auch Bild 8) die Temperaturverteilungen der beiden Fälle wiedergegeben. Mit der Wandtemperatur von 200°C (Bild 7 links) liegt ein quasi isothermer Formfüllvorgang mit einer sehr flachen Temperaturverteilung vor.



Temperaturverteilung

Bei der Werkzeugtemperatur von 110°C entstehen aufgrund der großen Differenz zur Schmelztemperatur (210°C) eingefrorene Randschichten, die sich auf die Geschwindigkeitsverteilung im Element auswirken. Die im isothermen Fall nicht auftretenden Randschichten verengen den Fließquerschnitt. In Verbindung mit den höheren Viskositäten bei niedrigeren Temperaturen ist ein erheblich größerer Druckbedarf für den nicht isothermen Füllprozeß notwendig. Im Bild 8 ist die

Schergeschwindigkeitsverteilung beider Fälle in Dickenrichtung am gleichen, nahe der Nabe liegenden Element übereinandergelegt. (Die Schergeschwindigkeit ist die Ableitung der Geschwindigkeit über die Wandstärke.) Während im isothermen Fall das Maximum direkt an der Kavitätswand liegt, verschiebt es sich im nicht isothermen Fall in den Grenzbereich zwischen der eingefrorenen Randschicht und der fließenden plastische Seele.



Schergeschwindigkeitsverteilung

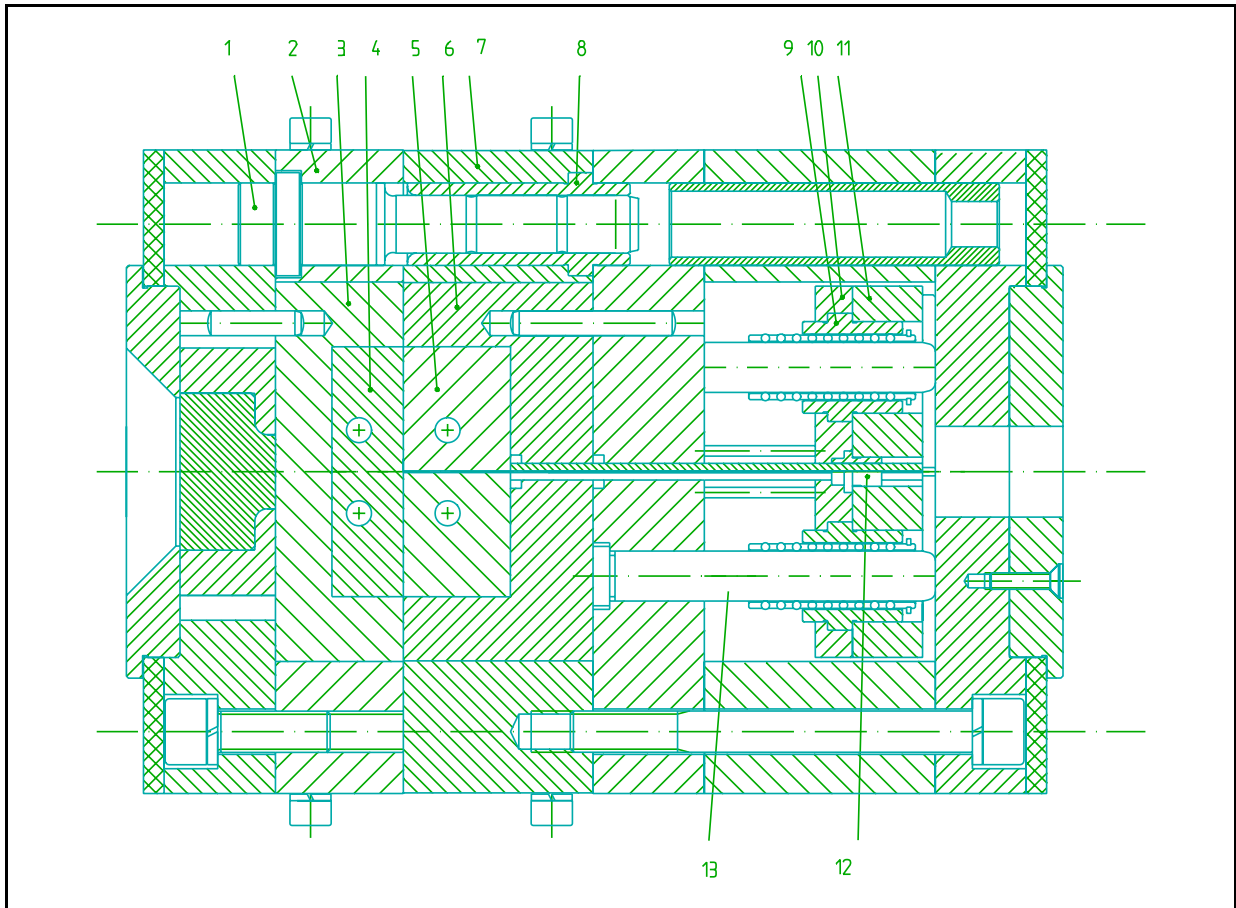
Die hier nur auszugsweise wiedergegebenen Ergebnisse zeigen, daß grundsätzlich auch solche feinwerktechnischen Probleme mit der Simulation vorausberechnet werden können. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, daß es sich hier um eine sehr einfach über Schalenelemente nachzubildende Geometrie handelt. Die Modellbildung komplizierterer Strukturen setzt einige Erfahrung voraus. Jede Vereinfachung nimmt Einfluß auf das Ergebnis und muß entsprechend bei deren Interpretation berücksichtigt werden.

5. Werkzeugkonstruktion

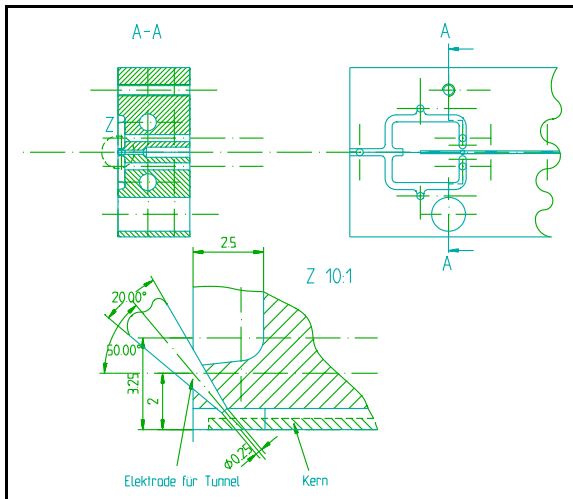
Der Aufbau des Spritzgießwerkzeugs (Bild 9) erfolgt weitestgehend mit Normalien. Der eigentliche Formeinsatz (Pos.3/4/5/6) ist in einem Wechselrahmen (Pos.2,7) fixiert, so daß für das Werkzeug eine möglichst große Flexibilität erzielt werden kann. Die Form wird in der Trennebene angespritzt. Damit wird zum einen eine zentrische Position des langen Bauteils ermöglicht, was ansonsten nur bei einer Zweifachform realisierbar wäre. Zum anderen wird dadurch der Anguß so kurz als möglich.

Die Gravur ist in beide Formhälften eingearbeitet. Auswerferseitig ist als Zeigerkavität ein 50µm tiefes rechteckförmiges Profil erodiert. Dadurch wird erreicht, daß der Zeiger nach dem Öffnen des Werkzeugs besser über seine gesamte Länge auf der Auswerferseite haften bleibt. Angußseitig ist die Profiltiefe für den Dreiecksförmigen Querschnitt von 450µm auf 250µm abnehmend eingebracht.

Im Schnitt sind die im Werkzeug integrierten kegelig ausgebildeten Führungseinheiten nicht dargestellt. Beim Präzisions-spritzguß ist es unerlässlich, neben der Führung durch die Führungssäulen des Werkzeugs (Pos.1,8) zusätzlich eine Zentrierhilfe für eine exakte Positionierung in unmittelbaren Nähe zur eigentlichen Kavität in das Werkzeug zu integrieren (kegelige Führungsstifte, schräge trapezförmige Führungsflächen).



Schnitt durch die Spritzgießform



auswerferseitiger Formeinsatz mit Tunnelanguß

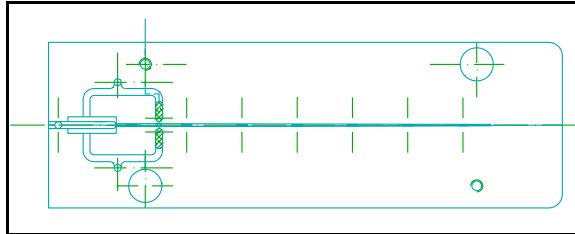
Das Ausformen des Bauteils ohne Deformationen stellt ein Problem dar. Die Zeigernabe kann sehr einfach mit einer Hülse ausgeformt werden. Für die Entformung des Zeigers ist entweder ein konturförmig gestalteter Auswerfer notwendig oder es sind entsprechende Flachauswerfer zu verwenden. In unserem Fall werden sieben Flachauswerfer (0,4mmx3,8mm) über die gesamte Zeigerlänge angeordnet (Pos 12). Dadurch ist die Gefahr des Verbiegens bzw. Abknicken des Bauteils beim Ausstoßen geringer. Der auswerferseitige Formeinsatz (Pos. 5) ist zweiteilig gefertigt, um so die Führungen der Flachauswerfer einarbeiten zu können. Durch die kugelgeführte Auswerferplatte (Pos 9/10/11/13) ist das Auswerfersystem leichtgängig und es kommt zu keinem Verkannten bei der

Bewegung. Die Einpassung der Flachauswerfer stellt sich als problematisch dar, da der Auswerferspalt einerseits eine einwandfreie Beweglichkeit des Flachauswerfers gewährleisten sollte, andererseits der Spalt nicht höher als 5 bis 10 μm sein darf, um bei niedrigviskosen Kunststoffen ein Einfließen der Schmelze in den Spalt zu verhindern.

Bei langen Bauteilen ist eine schnelle Entlüftung beim Einspritzen des Kunststoffes wichtig. Wird die Luft in der Kavität nicht verdrängt, sondern lediglich komprimiert, kommt es aufgrund des Dieseleffektes zu Verbrennungserscheinungen am Spritzgießteil. Die Entlüftung erfolgt bei diesem Werkzeug über die Trennebene, durch die Auswerferspalte sowie durch einen an der Zeigerspitze angebrachten Entlüftungsschlitz.

Als erste Variante für das Angußsystem wird ein Tunnelanguß nach Bild 10 verwendet. Die Kunststoffschmelze wird hier in zwei Teilströme aufgeteilt und von zwei Seiten gegen den Kernstift im Nabenbereich eingespritzt. Durch die beidseitige Belastung des Stiftes wird dessen Durchbiegung durch den Einspritzdruck kompensiert. In diesem Fall ist auch die Gefahr einer Freistrahlbildung relativ gering. Das Werkzeug füllt sich mit einer normalen Quellflußbildung. Außerdem beträgt die maximale Fülllänge genau die 120mm Zeigerlänge. Nachteilig ist jedoch, daß die Schmelze mehrfach umgelenkt werden muß, wodurch sich das Angußsystem und somit der Druckabfall im Angußsystem vergrößern. Mit dieser Angußvariante konnte keine vollständige Formfüllung erzielt werden.

In einer zweiten Angußvariante (Bild 11) ist der Anschnittpunkt an das Ende des Masseausgleichs verlegt worden. An dieser



auswerferseitiger Formeinsatz mit Punktanschnitt

Stelle kann im Bauteil wegen der geringen Kavitätstiefe kein Tunnelanguß realisiert werden. Die Anbindung erfolgt durch einen Punktanschnitt. Der Tunnellanschnitt wurde durch Einsätze verschlossen. Die zu füllende Bauteillänge hat sich jetzt um 15mm, die Länge der Ausgleichsmasse, vergrößert. Allerdings erfährt die Schmelze im Angußsystem keine Umlenkung. Im Bereich der Ausgleichsmasse kann es zu einer Freistrahlabildung kommen. Erst dann trifft die Schmelze gegen ihr erstes Hindernis. Mit dieser Angußvariante konnte das Bauteil vollständig gefüllt werden.

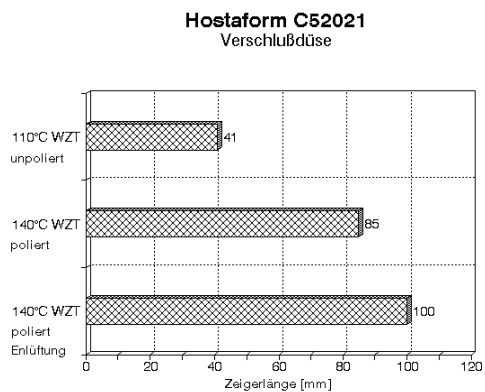
6. Spritzgießergebnisse

Die Bilder 12 bis 15 geben einen Überblick über die mit unterschiedlichen Parametern durchgeführten Abspritzversuche. Mit Ausnahme der Abspritzungen mit Hostaform (Bild 12) und der markierten Versuche mit A130 (Bild 13) sind die Spritzversuche mit dem zweiten Angußsystem (Punktanschnitt am hinteren Ende) durchgeführt worden. Für die Versuche in Bild 14 und 15 ist die Gravur angußseitig um $50\mu\text{m}$ tiefer erodiert worden.

Im folgenden werden die einzelnen Parameter diskutiert:

Material

Mit dem niedrigviskosen POM C52021 ist keine vollständige Formfüllung erzielt worden. Eine kleine Längensteigerung ist durch eine Erhöhung der Werkzeugwandtemperatur (WZT) möglich (Bild 12). Allerdings haftet der Zeiger an der heißen Form, so daß die Entformung schwierig ist. Die abgespritzten Zeiger besitzen aufgrund des kleinen Elastizitätsmoduls und der nicht ausreichenden Kristallinität keine ausreichende Steifigkeit und sind ferner nicht gerade.



Hostaform C52021

Die Anisotropie bei LCP, d.h. eine große Orientierung der Fasern in Fließrichtung, liefert ein anderes Bauteilverhalten. Der Zeiger ist einerseits gerade und andererseits sehr steif, so daß

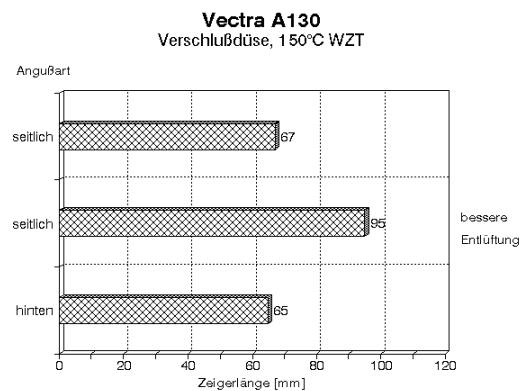
mit diesem Werkstoff die Funktion des Bauteils gewährleistet werden kann.

Spritzdruck

Der Spritzdruck ist bei den Versuchen nicht variiert worden. Bei allen Abspritzungen ist mit dem maximalen Spritzdruck (2400 bar) gearbeitet worden, der bei mit der eingesetzten 22er Schnecke möglich ist. Unter Berücksichtigung der Druckverluste im Zylinder und im Angußsystem verbleiben ca. 1200 bar zur Formfüllung.

Entlüftung

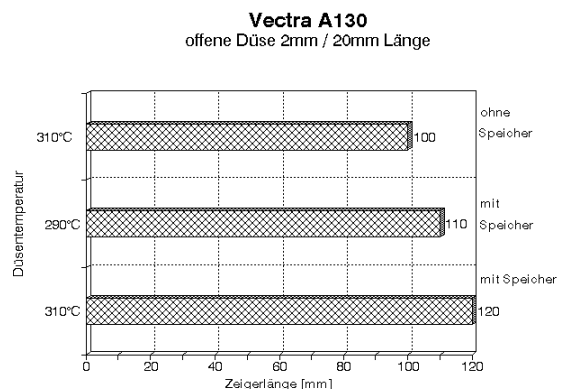
Zur Erzielung einer vollständigen Formfüllung ist eine ausreichende Entlüftung notwendig. Sowohl bei POM (Bild 12) als auch bei LCP (Bild 13) ist eine Längenzunahme bei einer Vergrößerung des Querschnitts für die Entlüftung zu beobachten.



Vectra A130

Geschwindigkeiten

Mit den beiden Materialien A130 und E130 sind Abspritzungen an einer Spritzgießmaschine mit Druckspeicher zur Erhöhung der Einspritzgeschwindigkeit durchgeführt worden. Beim Kunststoff A130 ist eine vollständige Formfüllung nur mit Speicher erreicht worden (Bild 14, oberer und unterer Balken). Bei E130 ist bei einer optimalen Massetemperatur eine vollständige Zeigerlänge auch ohne Speicher erreicht. Für die Versuche auf Bild 15 ist jedoch ein Speicher eingesetzt worden.

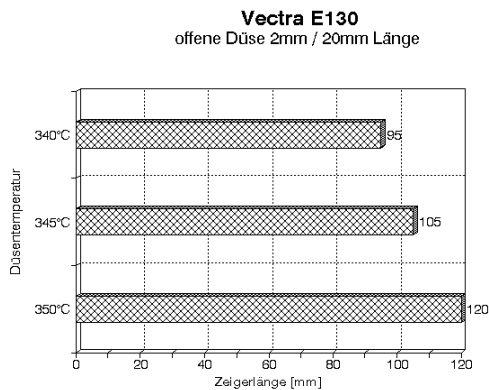


Vectra A130, tiefere Gravur, 150°C WZT

Die Ursache für das bessere Fließverhalten ist darin begründet, daß die Viskosität von E130 bei sonst vergleichbaren Parametern niedriger ist.

Massetemperaturen

Für eine vollständige Formfüllung ist dieser Parameter am signifikantesten. Mit Zunahme der Massetemperatur nimmt die Viskosität der Schmelze ab. Bei Bauteilen extremer wie beispielsweise einem langen schlanken Zeiger muß die Massetemperatur im oberen Bereich des vom Hersteller angegebenen Temperaturfensters gehalten werden. Selbstverständlich ist darauf zu achten, daß es wegen der hohen Schmelztemperatur zu keiner Materialschädigung kommt.



Vectra E130, tiefere Gravur, 150°C WZT

Aufgrund der vertikalen Position des Spritzkolbens besteht die Gefahr, daß die leichtfließende Masse aus der offenen Düse heraustropft. Deshalb ist in diesem Fall die Verwendung einer Verschlussdüse notwendig. Die bei den Versuchen an der Spritzgießmaschine eingestellten Temperaturen für die Düse beziehen sich auf die eingesetzte offene Düse, deshalb kann dieser Wert bei einer anderen Düse unterschiedlich sein.

Werkzeugtemperatur

Bei einer ansonsten optimalen Einstellung für die übrigen Parameter ist die Werkzeugtemperatur zweitrangig. Die Werkzeugtemperatur bei A130 betrug im Versuch zunächst 150°C. Bei einer Düsentemperatur von 310°C bei A130 wurde der Zeiger vollständig gefüllt. Das der Werkzeugtemperatur auf 100°C ergab bezüglich der Formfüllung dasselbe Ergebnis.

In einer weiteren Versuchsreihe konnte allerdings für A130 bei einer Düsentemperatur von 290°C, d.h. bei einer nicht optimalen Viskosität, durch eine Variation der Werkzeugtemperatur ein vollständiger Zeiger abgespritzt werden. Die Werkzeugtemperatur liegt jedoch hierbei im Bereich der Schmelztemperatur des Kunststoffes. Diese Versuche sind im folgenden Abschnitt näher erläutert.

7. Induktive Werkzeugtemperierung

Bei dem am IKFF entwickelten Temperierverfahren wird induktiv ein bestimmter Bereich des Werkzeugs erwärmt. Bild 16 zeigt eine Prinzipskizze /5/.

Bei geöffnetem Spritzgießwerkzeug wird ein speziell an die Kavität angepaßter Induktor zwischen die beiden Formhälften eingefahren. Der einseitig oder beidseitig wirkende Induktor erwärmt ein eng begrenztes Gebiet auf der Oberfläche. Die Erwärmungszeit beim Zeigerwerkzeug beträgt sechs Sekunden. Der Induktor wird entfernt und das Spritzgießwerkzeug geschlossen. Die Werkzeugtemperatur liegt beim Einspritzen im Bereich der Schmelztemperatur des Kunststoffes, so daß damit die Fließfähigkeit im Werkzeug deutlich verbessert wird. Die Abkühlung erfolgt durch Wärmeleitung in kältere Werkzeugbereiche.

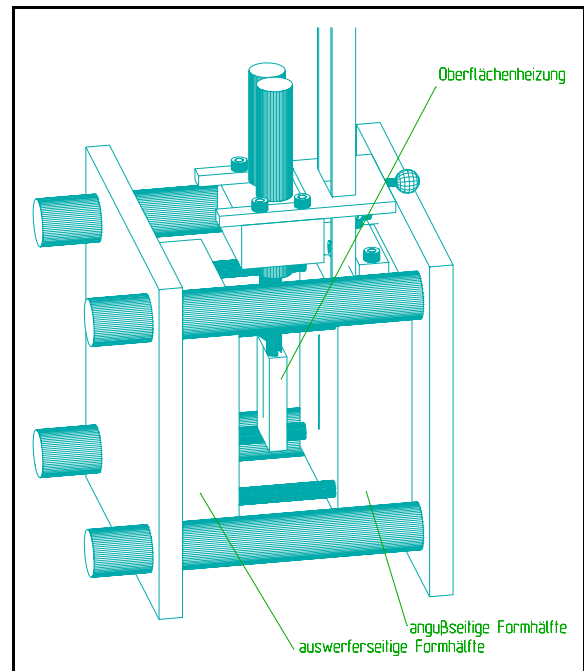


Bild 16 Induktive Werkzeugtemperierung

Mit dem für diese Anwendung weiterentwickelten Verfahren ist es möglich, mit dem Werkstoff Vectra A 130 auch bei einer Düsentemperatur von 290°C, bei der selbst unter Einsatz des Druckspeichers keine vollständige Formfüllung zu erzielen ist (vgl. Bild 14), den Zeiger auf die geforderte Länge von 120mm abzuspritzen.

8. Zusammenfassung

Durch eine Optimierung der einzelnen Parameter konnte eine vollständige Formfüllung beim Zeigerwerkzeug realisiert werden. Durch die Simulation konnte der Einsatz eines solchen Programmes auch für kleine Bauteile bzw. Wandstärken aufgezeigt werden. Mit Hilfe der induktiven Werkzeugtemperierung wurde eine Möglichkeit vorgestellt, das Spritzgießwerkzeug ohne eine wesentliche Verlängerung der Zykluszeit auf Temperaturen zu erwärmen, die im Bereich der Schmelztemperatur des Materials liegen.

Danksagung

Wir danken dem Wirtschaftsministerium des Landes Baden-Württemberg für die finanzielle Unterstützung dieser Arbeiten im Rahmen des Verbundvorhabens 'Präzisions-spritzgießen'. Den Firmen AESCULAP AG, Arburg, Hermle&Sohn, Beiter, KUNDO-Staiger, Marquardt, PEZET, Schmidt Feintechnik und Thomson-Brandt gilt Dank für die engagierte Mitarbeit im Arbeitskreis 'Präzisions-spritzgießen'.

Literaturverzeichnis

- /1/ Stocker Th.: Maßnahmen zur Geräuschminderung schrittmotorgetriebener Quarzgroßuhrwerke. Dissertation, Stuttgart 1991
- /2/ Timoshenko: Schwingungsprobleme der Technik. Berlin: Springer Verlag, 1932
- /3/ Natti S. Rao: Formeln der Kunststofftechnik. München: Hanser Verlag, 1989
- /4/ Hostaform, Firmenschrift. Hoechst Aktiengesellschaft, Frankfurt
- /5/ Vectra, Firmenschrift. Hoechst Aktiengesellschaft, Frankfurt
- /6/ Diepold T., Tewald A.: Induktive Temperierung einer Spritzgießform. Stuttgart: Studienarbeit am IKFF, 1993

Neue Telefon- und Telefaxnummer:

Telefon: +49 (0)711 685 – 6 6402

Telefax: +49 (0)711 685 – 6 6356

Neue E-Mail-Adressen:

ikff@ikff.uni-stuttgart.de

linearantriebe@ikff.uni-stuttgart.de

piezoantriebe@ikff.uni-stuttgart.de

spritzguss@ikff.uni-stuttgart.de

zuverlaessigkeit@ikff.uni-stuttgart.de