

Expertensystem für die Entwicklung spritzgegossener Formteile aus polymeren Werkstoffen

An der Montanuniversität Leoben zur Erlangung des
akademischen Grades

Doktor der montanistischen Wissenschaften

eingereichte

Dissertation

von

Dipl.-Ing. Konrad Fischer
geb. in Neunkirchen / Österreich

Kurzfassung

Im Spritzgießverfahren werden technische Bauteile mit hohen Qualitätsanforderungen hergestellt. Kern des formgebenden Prozesses ist das Spritzgießwerkzeug. Die erforderlichen Kavitätsabmessungen zur Erzielung der gewünschten Formteilmaße müssen bereits in der Werkzeugkonstruktionsphase festgelegt werden. Dem Werkzeugkonstrukteur stehen dafür verschiedene Hilfsmittel zur Verfügung.

In den letzten drei Jahrzehnten wurden Simulationsprogramme für die Berechnung des Spritzgießprozesses entwickelt. Durch den Einsatz dieser Programme ist es unter anderem möglich, Fehler in der Werkzeugkonstruktion schon in der Konstruktionsphase zu erkennen. Für den sinnvollen Einsatz von Spritzgießsimulationsprogrammen gibt es eine wichtige Voraussetzung: Die Ergebnisse der Programme müssen experimentell verifiziert werden. Dies erfolgt durch die Messung der berechneten physikalischen Größen wie Druck und Temperatur sowie durch die Bestimmung von Schwindung und Verzug.

Der Werkzeugkonstrukteur ist vor allem an Schwindungswerten und dem zu erwartenden Verzug des Bauteils interessiert. Schwindung und Verzug werden allerdings durch Simulationsprogramme meist nicht realitätsgetreu berechnet. Daher sind im Werkzeugbau nach wie vor Werkzeugkorrekturschleifen notwendig, damit die hohen Qualitätsansprüche an die Spritzgießteile erfüllt werden können. Diese Korrekturschleifen sind zeit- und kostenintensiv.

In der vorliegenden Arbeit wird das Expertensystem EXINMOLD (= Expertensystem Injection Molding) für die Entwicklung spritzgegossener Formteile aus polymeren Werkstoffen vorgestellt. Das Expertensystem EXINMOLD ist eine Software, die den Konstrukteur durch alle Schritte der Werkzeugentwicklung begleitet. Es deckt alle qualitätsrelevanten Aspekte neben der Werkzeuggeometrie ab. Des Weiteren stellt EXINMOLD Informationen und Wissen über die Planung, Konstruktion und Produktion von Spritzgießformen und -teilen auf schnelle und strukturierte Weise zur Verfügung. Dies erlaubt „methodisches“ Konstruieren und hilft, zeit- und kostenintensive Werkzeugkorrekturen auf ein Minimum zu reduzieren.

Für die Entwicklung des Expertensystems wurden umfangreiche Untersuchungen an mehr als 35 Bauteilen und Werkzeugen durchgeführt. Alle Bauteile und Werkzeuge wurden mit dem Simulationsprogramm Moldflow Plastics Insight™ (MPI) berechnet. Die Simulationsberechnungen erfolgten mit den in MPI zur Verfügung stehenden Modellen (Midplane, Fusion und 3D). Darüber hinaus wurden die Einflüsse der Prozessparameter auf Schwindung und Verzug rechnerisch und experimentell untersucht. Die Berechnungsergebnisse aller Prozessphasen wurden experimentell verifiziert, wobei für die Evaluierung von Schwindung und Verzug ein neuartiger optischer 3D-Scanner mit spezieller Auswertesoftware zum Einsatz kam.

Die Erfahrungen aus diesen Untersuchungen sind in dem Expertensystem gespeichert. Darüber hinaus ist umfangreiches Literatur- und Expertenwissen in EXINMOLD hinterlegt. Durch die Bearbeitung und Dokumentation von Werkzeugprojekten mit EXINMOLD steigt dieses Wissen kontinuierlich an. Dieser integrierte Ansatz stellt die Einbindung und Wiederverwendung von Informationen aus bereits abgewickelten Projekten im Rahmen eines konsequenten Wissensmanagements dar.

Abstract

Technical parts with high quality requirements are manufactured by injection molding. Core of the forming process is the injection mold. The necessary cavity dimensions for the achievement of the desired part dimensions must be already specified in the tool construction phase. For this purpose different aids are available.

During the last three decades simulation programs for the computation of the injection molding process were developed. By the application of these programs it is possible to recognize errors in the tool design already while constructing. For the meaningful use of injection molding simulation programs there is an important condition: The results of the programs must be verified experimentally. This is done by measurement of computed physical dimensions such as pressure and temperature as well as by determination of shrinkage and warpage.

The tool designer is especially interested in shrinkage values and the warpage that can be expected for the injection molded part. Shrinkage and warpage are usually not computed close to reality by simulation programs. Therefore tool correction loops of the molding tool are still necessary in order to fulfill the high demands on quality. These correction loops are time- and cost-intensive.

In this thesis the expert system EXINMOLD (= expert system injection molding), which can be used for the development of injection molded parts out of polymer materials, is presented. The expert system EXINMOLD is a software, which assists the technical designer at all steps of the tool development. It covers all quality relevant aspects apart from the pure tool geometry. Furthermore EXINMOLD provides the tool designer with information and knowledge about planning, construction and production of injection molded parts and tools in a fast and structured way. This procedure allows "methodical" designing and helps to reduce time- and cost-intensive tool corrections to a minimum.

For the development of the expert system continuous investigations of more than 35 injection molded parts and tools were performed. All parts and tools were computed with the simulation program Moldflow Plastics Insight™ (MPI). The simulations were carried out with all available models in MPI (Midplane, Fusion and 3D). Beyond that the influences of the process parameters on shrinking and warpage were examined computationally and experimentally. The computation results of all molding process phases were experimentally verified. In this connection for the evaluation of shrinkage and warpage a new optical 3D-scanner with special evaluation software was used.

The experiences from these investigations are accumulated in the expert system. Beyond that substantial literature- and expert-knowledge is saved in EXINMOLD. By running and documentation of tool projects with EXINMOLD this knowledge rises continuously. This approach represents the integration and reuse of information from projects already completed, in the context of a consistent knowledge management.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Researcher an der Polymer Competence Center Leoben GmbH.

Mein besonderer Dank gilt Herrn o. Univ. Prof. Dr.-Ing. Günter R. Langecker, Ordinarius für Kunststoffverarbeitung und Vorstand des Instituts für Kunststoffverarbeitung an der Montanuniversität Leoben, für die Ermöglichung dieser Arbeit. Durch seinen persönlichen Einsatz für die Polymer Competence Center Leoben GmbH im Arbeitsbereich DECMOLD wurde ein interessantes Arbeitsumfeld geschaffen, das mich letztlich zur Durchführung dieser Dissertation bewogen hat. Bedanken möchte ich mich weiters für die laufende Unterstützung, wertvolle konstruktive Anregungen und die kritische Durchsicht dieser Arbeit.

Herrn o. Univ. Prof. Dr. Paul O'Leary, Ordinarius für Automation und Vorstand des Instituts für Automation an der Montanuniversität Leoben gilt mein spezieller Dank für hilfreiche Diskussionen, die Übernahme des Koreferates und die Durchsicht dieser Arbeit.

Die vorliegende Dissertation wurde im *K_{plus}*-Projekt „Durchgängigkeit der Werkzeugkonstruktion vom Bauteildesign bis zum maßgerechten Werkzeug für hochwertige Bauteile“ (Projekt Nr. 3.1) an der Polymer Competence Center Leoben GmbH im Rahmen des Kompetenzzentren-Programms *K_{plus}* des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie unter der wissenschaftlichen Leitung *des Instituts für Kunststoffverarbeitung an der Montanuniversität Leoben und mit Beteiligung der Partnerunternehmen Battenfeld Kunststoffmaschinen GmbH, Hella Fahrzeugteile Austria GmbH & Co. KG, HTP Fohnsdorf GmbH, Magna Auteca AG, Mahle Filtersysteme GmbH, Murchemie Leimüller & Komp. Ges.m.b.H. und Zizala Lichtsysteme GmbH* durchgeführt und mit Mitteln des Bundes und der Länder Steiermark und Oberösterreich gefördert.

Die wissenschaftliche Gesamtleitung des Projektes erfolgte durch Herrn o. Univ. Prof. Dr.-Ing. Günter R. Langecker, Vorstand des Instituts für Kunststoffverarbeitung an der Montanuniversität Leoben. Das Projekt wurde auch durch Prof. Langecker initiiert. An der Bearbeitung des Projektes waren neben mir auch die Herren Dipl.-Ing. Thomas Lucyshyn und Dipl.-Ing. Artur Fertschej, beide Doktoranden am Institut für Kunststoffverarbeitung, beteiligt. Großer Dank gebührt Dipl.-Ing. Thomas Lucyshyn, der dieses Projekt administrativ und budgetär geleitet und mich während der Durchführung meiner Arbeiten entscheidend unterstützt hat. Er hat in unzähligen Diskussionen die Forschungsarbeiten für diese Dissertation in die richtige Richtung gelenkt.

Weiters möchte ich mich besonders bei Dipl.-Inf. Maximilian Hirner bedanken. Er hat nach detaillierten Vorgaben die programmtechnische Umsetzung der Software EXINMOLD, unter der Leitung von Herrn o. Univ. Prof. Dr. Peter Auer, Vorstand des Lehrstuhls für Informationstechnologie an der Montanuniversität Leoben, durchgeführt.

Persönlich bedanken möchte ich mich an dieser Stelle auch bei den Vertretern der Partnerunternehmen, Dipl.-Ing. Christian Gornik, Ing. Erwin Karner, Dipl.-Ing. Heinz Rottleuthner, Dipl.-Ing. Johann Kropfitsch, Michael Faustmann, Irmgard Beyttolahi, Hartwig Pogoriutschnig, Karl Rosenbaum, Anton Pototschnik, Ernst Weinerer und Dipl.-Ing. Oliver Buchner, die durch ihren Einsatz dieses Projekt ermöglicht und unterstützt haben.

Martin Wassertheurer, Gerald Ebner, Johannes Haager, Tobias Greilberger und Peter Zaucher haben im Rahmen ihrer Studien- und Diplomarbeiten bzw. während ihrer Tätigkeit als studentische Hilfskräfte einen entscheidenden Beitrag zum Gelingen dieser Arbeit geleistet.

Für die Lösung kleinerer und auch größerer Probleme im Rahmen meiner Tätigkeit gilt mein Dank den folgenden Personen: Mag. Martin Payer, Dr. Walter Friesenbichler, Dipl.-Ing. Gerald Berger, Gernot Weiß, Ing. Rudolf Schatzer, Karl Ricko, Elke Holler, Carina Benedikt, Dipl.-Ing. Michael Buder-Stroißnigg, Michael Berschl, MMag. Jana Maurer, Ines Ragger und Michaela Ersl.

Schließlich möchte ich meiner Familie einen besonders herzlichen Dank aussprechen für die laufende Unterstützung und den Rückhalt. Ich möchte mich aber auch von ganzem Herzen bei meiner Lebenspartnerin Kerstin für die Liebe, die Geduld und den Beistand während all der Zeit, in der ich an dieser Dissertation gearbeitet habe, bedanken.

Leoben, Jänner 2007

Konrad Fischer

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und nur mit den angegebenen Hilfsmitteln durchgeführt habe.

Leoben, Jänner 2007

(Dipl.-Ing. Konrad Fischer)

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Zielsetzung	1
2	Schwindung und Verzug	4
2.1	Definitionen	4
2.2	Phänomene von Schwindung und Verzug	6
2.3	Einflussgrößen auf Schwindung und Verzug	7
2.3.1	Material.....	7
2.3.2	Formteilgeometrie.....	8
2.3.3	Prozess.....	11
2.4	Abschätzung von Schwindung und Verzug	15
2.4.1	Schwindungsangaben der Rohstoffhersteller.....	15
2.4.2	Schwindungsberücksichtigung aufgrund von Erfahrungen.....	16
2.4.3	Schwindungsfunktionen und Nomogramme.....	17
2.4.4	Berechnung von Schwindung und Verzug mittels Simulationsprogrammen....	18
3	Simulation des Spritzgießprozesses mit Moldflow Plastics Insight™ (MPI) 20	20
3.1	2 ½D- und 3D-Strömungssimulation	21
3.2	Modellerstellung	23
3.2.1	Eindimensionale Beam-Elemente.....	24
3.2.2	Mittelflächennetz für die 2 ½D-Berechnung.....	24
3.2.3	Fusion-Netz (Oberflächennetz) für die 2 ½D-Berechnung.....	25
3.2.4	3D-Volumenmodell.....	26
3.3	Füllphase	27
3.3.1	Grundgleichungen zur Beschreibung des Füllvorgangs.....	27
3.3.1.1	Kontinuitätsgleichung.....	28
3.3.1.2	Impulsgleichung.....	28
3.3.1.3	Energiegleichung.....	30
3.3.2	Numerische Lösung für die Füllphase.....	31
3.4	Nachdruckphase	35
3.4.1	Grundgleichungen für die Nachdruckphase.....	35
3.4.1.1	Kontinuitätsgleichung.....	35
3.4.1.2	Impulsgleichung.....	37

3.4.1.3	Energiegleichung	37
3.4.2	Numerische Lösung für die Nachdruckphase	38
3.5	Kühlberechnung	40
3.5.1	Grundgleichungen für die Kühlberechnung	41
3.5.1.1	Anfangs- und Randbedingungen	42
3.5.2	Iterative Berechnung der mittleren Werkzeugwandtemperatur.....	43
3.6	Berechnung von Schwindung und Verzug	43
3.6.1	Schwindung	43
3.6.2	Verzug	47
3.6.2.1	Berechnungsansatz über Dehnungsbetrachtung.....	48
3.6.2.2	“Corrected-Residual-In-Mold-Stress”–Modell (CRIMS)	49
3.7	Gegenüberstellung der Simulation zum experimentellen Spritzgießprozess ..	52
3.7.1	Einfluss des Simulationsmodells auf die Berechnungsergebnisse	54
3.7.1.1	Formteile aus dem Formteilkatalog.....	54
3.7.1.2	Forschungswerkzeuge: Platte und Schachtel.....	61
3.7.2	Geometrie-, Material- und Prozessabhängigkeit der Berechnungsgenauigkeit	67
3.7.2.1	Formteil Platte.....	68
3.7.2.2	Formteil Schachtel	72
3.7.3	Schlussfolgerungen der Gegenüberstellungen.....	76
4	Thermografie von Spritzgießwerkzeugen	77
4.1	Einleitung und Grundlagen.....	77
4.2	Experimentelle Untersuchungen an einer Formteilplatte	80
4.2.1	Vergleich zwischen Messungen und Berechnungen	81
4.3	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen.....	86
5	Optische Vermessung von Schwindung und Verzug.....	87
5.1	Einleitung und Triangulation	87
5.1.1	Aktive optische Sensorsysteme mit strukturierter Beleuchtung	88
5.1.2	Passive optische Sensorsysteme / Photogrammetrie	89
5.2	Vermessungssystem ATOS.....	90
5.2.1	Kalibrierung.....	91
5.2.2	Prinzip der Bauteildigitalisierung am Beispiel eines Messprojektes	93
5.2.3	Messtechnische Auswertung von Bauteildigitalisierungen	94
5.3	3D-Vermessungen an Spritzgussteilen	96

5.3.1	Istgeometrie in Referenz zur Sollgeometrie.....	96
5.3.2	Istgeometrie in Referenz zur berechneten Geometrie	99
5.3.3	Analyse der Nachschwindung an einem schachtelförmigen Formteil.....	101
5.4	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen.....	103
6	Expertensystem für die Entwicklung spritzgegossener Formteile aus thermoplastischem Kunststoff.....	105
6.1	Einleitung	105
6.2	Struktur und Aufbau des Expertensystems EXINMOLD.....	107
6.3	3D-Formteildesign / Urmodell.....	110
6.4	Formteilklassifizierung und Zuordnung der Werkzeugtechnik.....	111
6.5	Überprüfung der Bauteilkonstruktion.....	114
6.6	Ermittlung des werkzeuggerechten 3D-Modells.....	116
6.7	3D-Werkzeugkonstruktion	119
6.8	Analyse der Werkzeugkonstruktion.....	122
6.8.1	Vergleiche mit ähnlichen Bauteil- und Werkzeugkonstruktionen	122
6.8.2	Simulation der Werkzeugkonstruktion	123
6.9	Werkzeugfertigung	123
6.10	Werkzeugbemusterung.....	124
6.11	Formteilvermessung	124
6.12	Werkzeugrekursion	125
6.13	Projektdokumentation.....	127
6.14	Projektabschluss	127
7	Zusammenfassung, Schlussfolgerungen und Ausblick	129
8	Literatur.....	132
9	Verzeichnis der Symbole und Abkürzungen.....	137
9.1	Lateinische Symbole	137
9.2	Griechische Symbole	139
10	Anhang.....	140

1 Einleitung und Zielsetzung

Das Spritzgießen ist eines der wichtigsten Produktionsverfahren zur Herstellung von technischen Teilen aus thermoplastischen Kunststoffen. Ein wesentlicher Vorteil dieses Verfahrens ist die Herstellbarkeit komplexer Bauteilgeometrien in einem einzigen Produktionsschritt. Die hohe Reproduzierbarkeit des Prozesses und das große Automatisierungspotential machen das Verfahren vor allem für große Stückzahlen interessant.

Die in den meisten Fällen nachbearbeitungsfreie Verarbeitung unterschiedlicher Kunststoffe macht das Spritzgießverfahren besonders wirtschaftlich. Neben Merkmalen wie der Oberflächengüte ist die exakte Bauteilgeometrie die entscheidende Qualitätsgröße. Die Schwindung des thermoplastischen Materials ist prozessbedingt jedoch nicht vermeidbar.

Die Qualitätsmerkmale von Formteilen sind primär abhängig von den Grundeigenschaften des verwendeten Rohmaterials und durch chemische Modifikationen, Additive, Füll- und Verstärkungsstoffe in einem großen Bereich beeinflussbar.

Aufgrund von Druck- und Temperatureinflüssen während der Verarbeitung verändert der Werkstoff seine innere Struktur. Molekül- und/oder Faserorientierungen, Eigenspannungszustände und die Kristallinität bei teilkristallinen Materialien prägen ebenfalls das Eigenschaftsbild und die Qualität des Formteils. Daneben werden auch die mechanischen, chemischen, optischen und elektrischen Eigenschaften beeinflusst.

Kern des formgebenden Prozesses ist das Spritzgießwerkzeug. Das Spritzgießwerkzeug enthält das zu fertigende Formteil als Hohlraum und bestimmt damit im Wesentlichen die Abmessungen des Bauteils.

Neben den Maßen der Kavität werden die fertigen Bauteilabmessungen auch von der geometrischen Gestalt des Formteils (z.B. Wanddicken, Wanddickenverteilung, Verrippungen, etc.), von der Angussgestaltung (z.B. Art des Angusses, Anschnittlage), von der Werkzeugkühlung, von der Prozessführung (z.B. Temperaturen, Drücke) und vom Material (z.B. Viskosität, pvT-Verhalten) bestimmt.

Durch die Prozessführung sind die Schwindung und der Formteilverzug nur begrenzt beeinflussbar. Daher müssen die erforderlichen Kavitätsabmessungen zur Erzielung der gewünschten Formteilmaße bereits in der Werkzeugkonstruktionsphase festgelegt werden. Nur so ist es möglich, qualitativ hochwertige Formteile ohne wiederholte Werkzeugkorrekturen zu produzieren.

Eine korrekte Abschätzung der Formteilschwindung und des Formteilverzugs ist für den Konstrukteur äußerst schwierig, da das Zusammenspiel der beschriebenen Einflussgrößen sehr komplex ist.

Bereits seit ca. drei Jahrzehnten existieren Berechnungsprogramme zur Simulation des Füll- und Nachdruckverhaltens beim Spritzgießen. In den letzten Jahren sind diese Programme um Module zur Berechnung der Werkzeugkühlung und von

Schwindung und Verzug erweitert worden. Durch die Simulation können die aus dem Prozess resultierenden Qualitätsmerkmale (z.B. Bindenähte, Lufteinschlüsse, Schwindung und Verzug) sowie prozesstechnische Daten (z.B. Einspritzdruck, erforderliche Kühlzeit) ermittelt werden.

Die Simulation hilft Fehlkonstruktionen zu vermeiden und liefert bereits im Vorfeld wertvolle Hinweise für die Konstruktion des Formteils und des Werkzeugs sowie für die Ermittlung geeigneter Maschineneinstellungen. Diese Berechnungsmöglichkeiten sind mittlerweile Stand der Technik und werden in der Industrie regelmäßig angewendet.

Der Werkzeugkonstrukteur ist vor allem an Schwindungswerten und dem zu erwartenden Verzug des Bauteils interessiert. Schwindung und Verzug werden aber leider durch Simulationsprogramme meist nicht wahrheitsgemäß berechnet. Daher sind im Werkzeugbau nach wie vor Werkzeugkorrekturschleifen notwendig, damit die Qualitätsansprüche an die Bauteile erfüllt werden können.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde EXINMOLD (= Expert System Injection Molding) für die Konstruktion von Werkzeugen für spritzgegossene Formteile entwickelt. EXINMOLD stellt die Grundstufe eines Expertensystems dar. EXINMOLD umfasst ein „Decision Support System“. Von einem „Decision Support System“ wird der Benutzer zu Entscheidungen geführt. Der Handlungsschluss bleibt jedoch dem Menschen vorbehalten. Zu dem Begriff „Decision Support System“ gibt es keine direkte deutsche Übersetzung. Sinngemäß könnte der Begriff mit „System zur Entscheidungsfindung“ übersetzt werden. Diese Bezeichnung spiegelt jedoch nicht im vollen Umfang die Möglichkeiten von EXINMOLD wider.

Unter dem Expertensystem EXINMOLD ist im Rahmen der vorliegenden Arbeit ein Softwaresystem zu verstehen, das Expertenwissen für die Projektabwicklung zur Verfügung stellt. Dieses Expertenwissen kann durch den Benutzer erweitert werden. Der Benutzer wird von EXINMOLD gezielt durch alle Schritte der Werkzeugentwicklung geführt, teilweise erfolgt dies automatisch anhand von Regeln. Das System deckt alle konstruktions- und prozessrelevanten Aspekte neben der Werkzeuggeometrie ab. Die Entscheidung, wie ein Konstruktionsschritt ausgeführt wird, bleibt dem Konstrukteur selbst überlassen.

EXINMOLD unterstützt den Werkzeugkonstrukteur in seiner Entscheidungsfindung indem Kontrollen, Hilfen, Berechnungsmodule und Erfahrungen für die Projektabwicklung angeboten werden. Das Ziel ist, mit Hilfe dieser Systematik Konstruktions- und Abwicklungsfehler zu vermeiden und Werkzeugkorrekturschleifen einzusparen. Anhand dieser Systematisierung kann der Konstruktionsprozess beschleunigt werden, außerdem werden Kosten und Zeit eingespart.

Das Forschungsprojekt „Durchgängigkeit der Werkzeugkonstruktion vom Bauteildesign bis zum maßgerechten Werkzeug für hochwertige Bauteile“, welches im Rahmen der Polymer Competence Center Leoben GmbH (PCCL) unter der wissenschaftlichen Leitung des Instituts für Kunststoffverarbeitung der Montanuniversität Leoben abgewickelt wurde, beschäftigt sich mit der Beeinflussung der Formteilqualität durch die einzelnen Entwicklungsschritte. An der Bearbeitung des Projektes waren neben mir auch die Herren Dipl.-Ing. Thomas Lucyshyn und Dipl.-Ing. Artur Fertschej beteiligt. Die programmtechnische Umsetzung von EXINMOLD

erfolgte durch Dipl.-Inf. Maximilian Hirner unter der Leitung von Herrn o. Univ. Prof. Dr. Peter Auer, Vorstand des Lehrstuhls für Informationstechnologie an der Montanuniversität Leoben. Die Gesamtleitung des Projektes erfolgte durch Herrn o. Univ. Prof. Dr.-Ing. Günter R. Langecker, Vorstand des Instituts für Kunststoffverarbeitung an der Montanuniversität Leoben. Das Projekt wurde auch durch Prof. Langecker initiiert.

Die Analyse der Entwicklungsschritte bis zum produktionsreifen Spritzgießwerkzeug stellten den Ausgangspunkt der Arbeiten zur Entwicklung von EXINMOLD dar. Die wechselseitigen Einflussgrößen zwischen der Qualität des Werkzeugs und der letztlich produzierten Spritzgussteile beginnen bei der Formteilkonstruktion und enden bei der Qualitätssicherung der Formteilproduktion. Im Rahmen der Arbeiten wurden mehr als 35 Werkzeuge mit Hilfe der Spritzgießsimulation analysiert. Die Verzugsberechnungen wurden mit der realen Formteilgeometrie verglichen. Für die Vermessung von Schwindung und Verzug wurde ein neues optisches 3D-Messverfahren eingesetzt.

Diese Untersuchungen und weiterführende Projektarbeiten aus dem Forschungsprojekt bilden die Grundlage von EXINMOLD. In EXINMOLD ist weiters das Wissen von hoch qualifizierten Fachleuten und Wissenschaftlern abgebildet. Dieses wird zielgerichtet für die Abwicklung von Bauteil- und Werkzeugkonstruktionen zur Verfügung gestellt. Durch die Integration einer Schwindungsdatenbank in das Expertensystem stehen Erfahrungen für Schwindung und Verzug allgemein zur Verfügung und sind nicht auf wenige Personen beschränkt.

Mit der angebotenen Konstruktionssystematik in EXINMOLD soll der Konstrukteur zum analytischen und systematischen Konstruieren angeregt werden. Dadurch sind die Voraussetzungen für eine Optimierung von einzelnen Konstruktionsschritten im Hinblick auf die Gesamtkonstruktion gegeben. Der Konstrukteur wird mit Hilfe des Expertensystems in die Lage versetzt, die für seinen speziellen Aufgabenbereich sinnvollen Verbesserungsmöglichkeiten zu erkennen. Durch eine direkte Übernahme von Hilfen und die Anwendung von Zusatzprogrammen kann er diese dann realisieren.

Die richtige Interpretation der Ergebnisse, die durch die implementierten Auslegungshilfen erzielt werden, wird aber immer Konstruktionskenntnisse voraussetzen. Der Konstrukteur kann mit diesen Hilfsmitteln also nur unterstützt werden.

2 Schwindung und Verzug

2.1 Definitionen

Bei der Verarbeitung von thermoplastischen Kunststoffen im Spritzgießprozess verändert das Formteil während der Abkühlung seine Abmessungen. Diese Maßänderungen werden als Schwindung zusammengefasst.

In der Spritzgießtechnik wird unter Schwindung die Differenz zwischen einem beliebigen Maß der Werkzeugkavität und des Formteils bezogen auf das Werkzeugmaß verstanden:

$$s_l = \frac{L_W - L_F}{L_W}, \quad (1)$$

mit

s_l lineare Längenschwindung,
 L_W Werkzeugmaß,
 L_F Formteilmaß.

Die Schwindung ist eine relative Größe und die Angabe erfolgt meist in Prozent. Die Gleichung (1) beschreibt den eindimensionalen Bezugswert für die Schwindung und wird als lineare Schwindung bezeichnet.

Die Schwindung beruht auf der Kompressibilität und der Wärmeausdehnung der Kunststoffe. Bei der Schwindung von thermoplastischen Kunststoffen ändern sich nicht nur Längen, sondern das Volumen.

Unter fertigungstechnischen Gesichtspunkten wurde für das lineare Schwindungsverhalten der Begriff „Verarbeitungsschwindung“ eingeführt [59]. Die Verarbeitungsschwindung hat den Charakter einer technischen Dehnung. Sie ist in der DIN 16901 definiert als der Maßunterschied zwischen dem Werkzeugmaß bei $23^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ und dem Maß des Formteils, das nach seiner Herstellung nach 16-stündiger Lagerung im Normklima gemessen wird [45]. Die Schwindung äußert sich beim Spritzgießen meist als Maßverkürzung und wird positiv in Prozent angegeben.

Wie in Bild 1 qualitativ dargestellt, ist das Werkzeugmaß - betrachtet bei verschiedenen Zuständen über den Spritzgießzyklus - keine Konstante. Es ist eine von der Maschinengröße und von den Prozessgrößen, von den thermischen Bedingungen und dem Werkzeuginnendruck abhängige Größe. Die thermischen Dehnungen des Werkzeugs sind klein gegenüber den Änderungen, die das Bezugsmaß aufgrund von Werkzeugdeformationen, Setzungserscheinungen und Atmungsbewegungen aufweisen kann [41]. In [45] wird dieser Tatsache Rechnung getragen, indem unterschiedliche erreichbare Toleranzgruppen zugrunde gelegt werden, abhängig von der relativen Maßlage zur Schließrichtung.

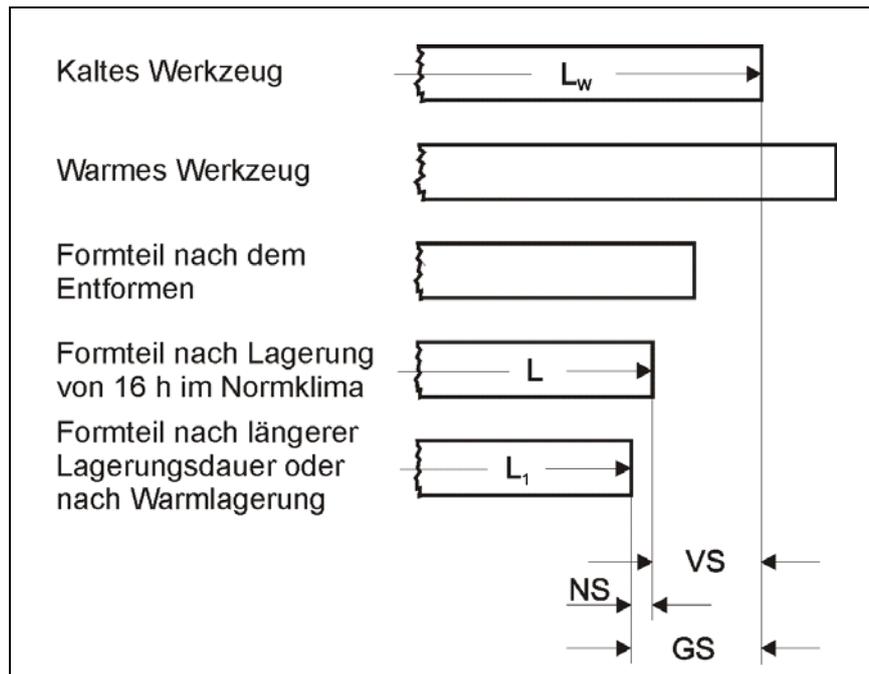


Bild 1: Definition der Verarbeitungsschwindung (VS), Nachschwindung (NS) und Gesamtschwindung (GS) [59]

Über den Zeitraum von 16 Stunden hinaus können durch Spannungsausgleichsvorgänge, durch Orientierungsrelaxation, durch Feuchtigkeits- und Temperaturschwankungen und durch Nachkristallisation bei teilkristallinen Kunststoffen noch Maßänderungen auftreten. Diese Vorgänge werden mit Nachschwindung bezeichnet. Die Gesamtschwindung ergibt sich daraus nach „langer“ Zeit aus der Summe von Verarbeitungs- und Nachschwindung.

Des Weiteren werden bei der Schwindung zusätzlich noch fließrichtungsbezogene Anisotropien beobachtet (z.B. Schwindung in und senkrecht zur Fließrichtung).

Werden statt der Längenmaße in Gleichung (1) die Volumina der Werkzeugkavität und des Formteils oder korrelierende lokale Volumina eingesetzt, spricht man von Volumenschwindung s_v (Bild 2).

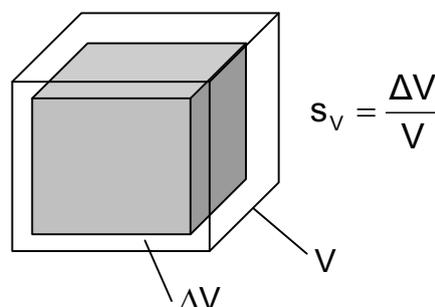


Bild 2: Definition der Volumenschwindung

Die Volumenschwindung beschreibt den durch den Prozess bedingten Volumenverlust. Problematisch ist, dass die Volumenschwindung messtechnisch nicht ermittelt werden kann.

Die Verarbeitungsschwindung und die Volumenschwindung sind theoretisch durch Gleichung (2) miteinander verknüpft:

$$s_v = 1 - (1 - s_l)(1 - s_b)(1 - s_d), \quad (2)$$

mit

- s_v Volumenschwindung,
- s_l Längenschwindung,
- s_b Breitenschwindung,
- s_d Dickenschwindung.

2.2 Phänomene von Schwindung und Verzug

Es existiert eine Vielzahl von Schwindungs- und Verzugseffekten (Bild 3), die durch die hohe Anzahl der möglichen Einflussgrößen begründet sind. Die Effekte hängen im Wesentlichen vom Materialverhalten des Kunststoffes, von der Prozessführung und der Formteilgeometrie ab.

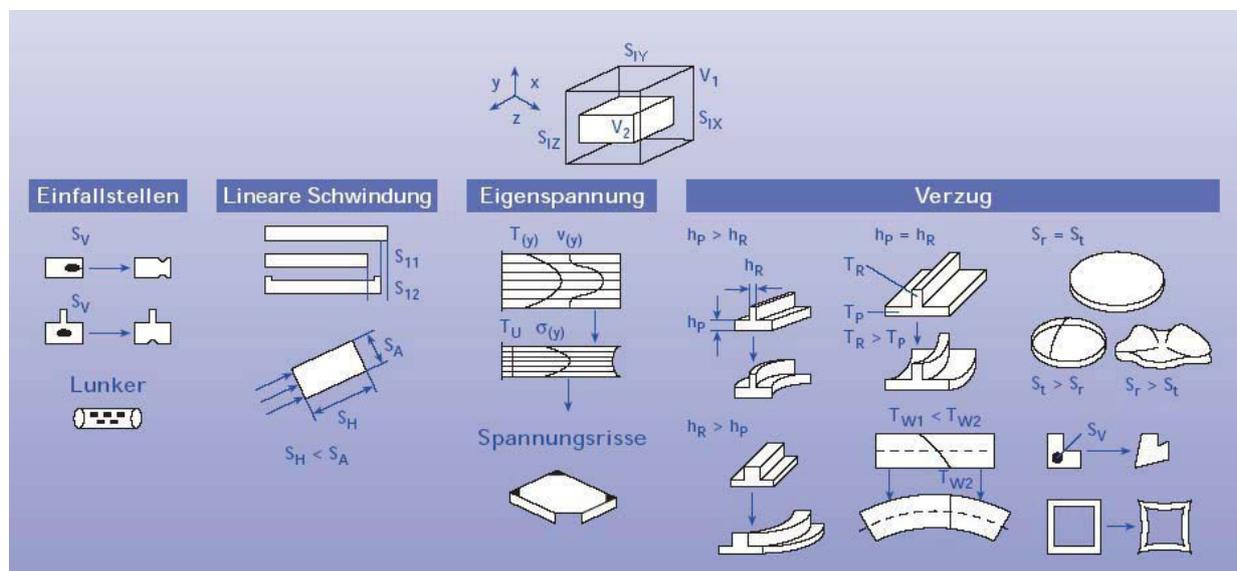


Bild 3: Schwindungs- und Verzugseffekte [72]

Aufgrund dieser vielfältigen Einflussgrößen soll zunächst ein Überblick über die durch die thermodynamische Schwindung verursachten Effekte und deren Beeinflussbarkeit gegeben werden.

2.3 Einflussgrößen auf Schwindung und Verzug

Die Einflussgrößen auf das Schwindungs- und Verzugsverhalten von thermoplastischen Spritzgussteilen sind sehr vielfältig. Ihr gegenseitiges Zusammenwirken ist komplex und oftmals nicht einfach vorauszusagen. Es lassen sich drei Haupteinflussgruppen klassifizieren (Bild 4). Zusätzlich haben die Auslegung des Werkzeugs und die verwendete Verarbeitungsmaschine Einfluss auf die Schwindung und den Verzug.

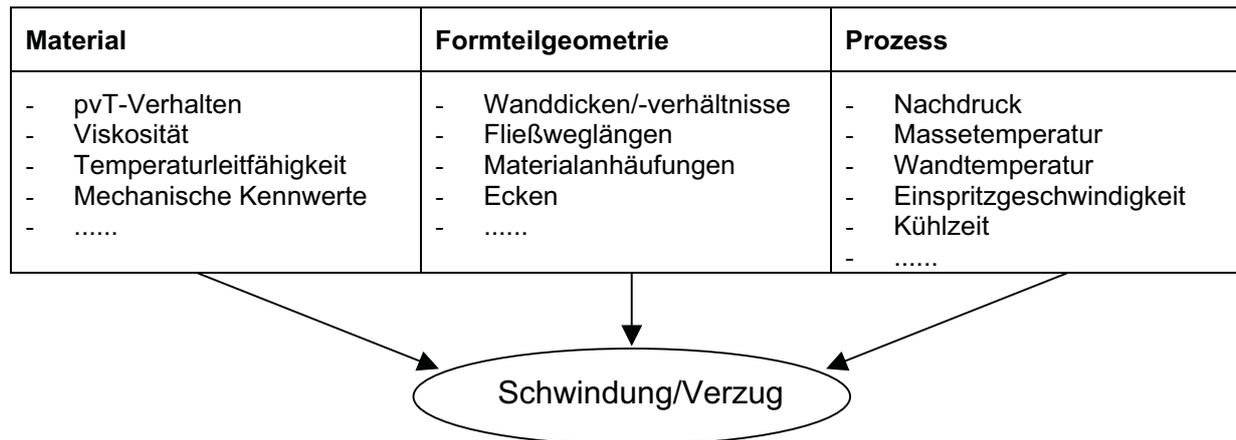


Bild 4: Einflussgrößen auf die Schwindung und den Verzug [71]

Eine komplette Darstellung der Einflussgrößen inklusive Wechselwirkungen ist aufgrund der großen Kombinationsvielfalt und der Geometriekomplexität nicht möglich. Im nächsten Abschnitt werden signifikante Beeinflussungsmöglichkeiten dargestellt, auf die Wechselwirkungen zwischen den Einflussgrößen wird nicht eingegangen. Entscheidend bei der nachfolgenden Betrachtung ist, dass die Korrelation der Einflussgrößen mit der Schwindung immer mit Bezug auf die Mechanismen

- Thermodynamischer Zustandsverlauf,
- Eigenspannungen und
- Kristallisation

gesehen wird. Hierdurch lässt sich die Abhängigkeit der Schwindung von den Einflussgrößen erklären.

2.3.1 Material

Eigentliche Ursache für die Schwindung spritzgegossener Formteile ist das thermodynamische Stoffverhalten des Materials (Bild 5). Diese als pvT-Verhalten bezeichnete Eigenschaft kennzeichnet die Kompressibilität und das thermische Ausdehnungsverhalten der Kunststoffe [42].

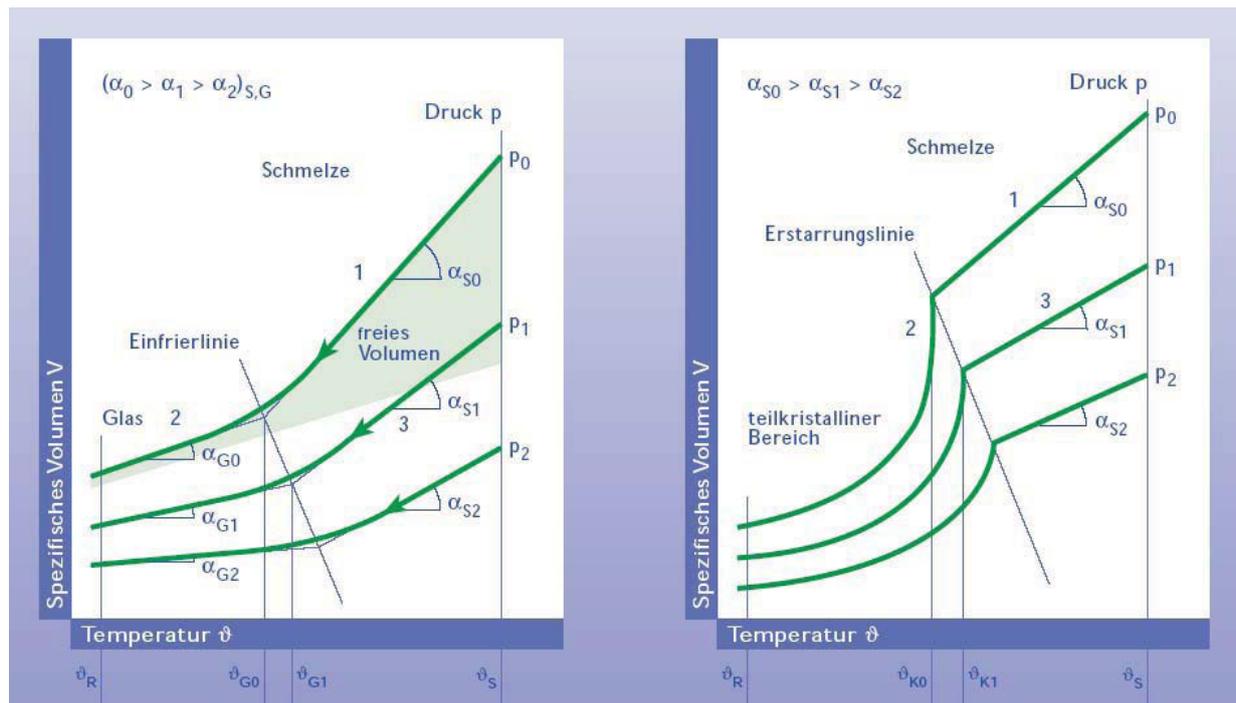


Bild 5: pV -Diagramme eines amorphen (links) und eines teilkristallinen (rechts) Kunststoffes bei langsamer Abkühlung unter verschiedenen Drücken p_0, p_1, p_2 ($p_0 < p_1 < p_2$) [72]

Beim pV -Verhalten muss grundsätzlich zwischen zwei Materialklassen (amorph und teilkristallin) unterschieden werden. Beide Materialtypen zeigen im Schmelzbereich eine lineare Abhängigkeit des spezifischen Volumens von der Temperatur. Wesentliche Unterschiede ergeben sich jedoch für den Feststoffbereich. Aufgrund der Kristallisationsvorgänge bei teilkristallinen Materialien nimmt das spezifische Volumen mit abnehmender Temperatur näherungsweise exponentiell ab, während amorphe Materialien auch im Feststoffbereich eine lineare Temperaturabhängigkeit zeigen.

Betrachtet man die Dichteänderung während des Prozessablaufs wird deutlich, dass die Volumenänderung bei teilkristallinen Kunststoffen wesentlich ausgeprägter als bei amorphen Materialien ist. Dies ist auch die Ursache für die höheren Schwindungswerte bei der Verarbeitung teilkristalliner Materialien. Im Allgemeinen liegt die lineare Schwindung für amorphe Kunststoffe im Bereich von ca. 0,2 bis 0,8 % und für teilkristalline zwischen ca. 0,7 bis 3 % [13, 43, 40]. Neben dem unterschiedlichen Schwindungsniveau ergeben sich unterschiedlich große Einflussbereiche auf Schwindung und Verzug.

2.3.2 Formteilgeometrie

Die Geometrie eines Formteils beeinflusst auf vielfältige Weise die thermischen, rheologischen und mechanischen Einflussgrößen auf die Schwindung und den Verzug.

Die Gestalt eines Formteils hat über die mechanischen Eigenspannungsverhältnisse im Werkzeug und die Eigensteifigkeit der Geometrie Einfluss auf das Schwindungsverhalten [59].

Beispiele für unterschiedliches Schwindungsverhalten zeigt die Unterscheidung in Bild 6.

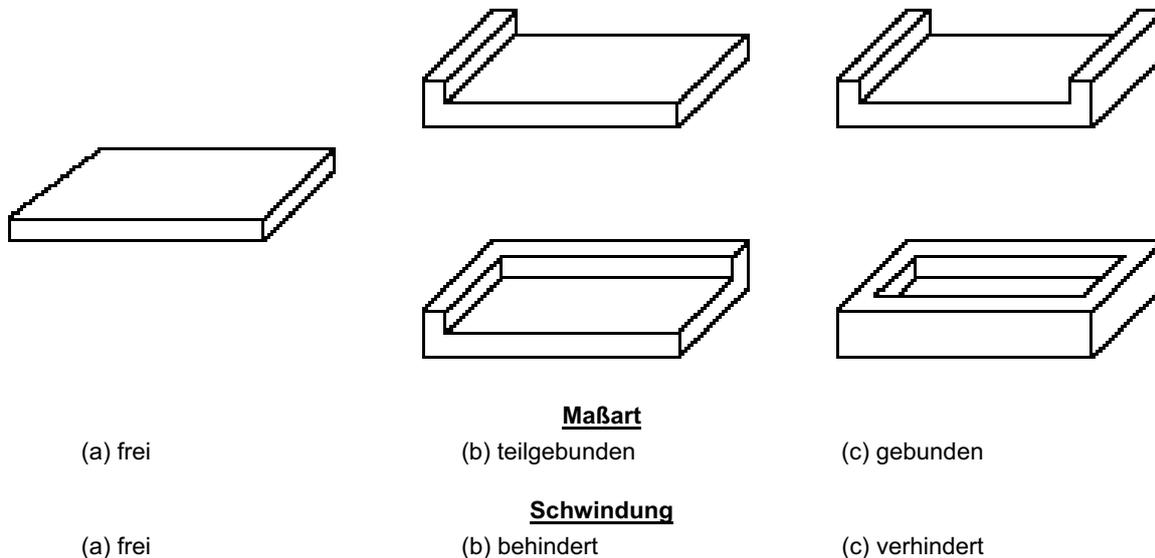


Bild 6: Unterscheidung verschiedener Schwindungsarten

Durch die zumeist komplexe Geometrie von Spritzgussteilen und die bei ausreichendem Druck vorliegende Wandhaftung beim Spritzgießen kann davon ausgegangen werden, dass die überwiegende Zahl aller Formteilmaße als gebunden betrachtet werden kann. Die in der Literatur [24, 55, 59] vielfach angegebenen Differenzen zwischen freien und gebundenen Maßen wurden ausschließlich an einfachen Geometrien bestimmt und sind daher wenig aussagekräftig für praktische Spritzgießformteile hoher Komplexität.

Während die äußere Gestalt die Eigenspannungsverhältnisse und damit die mechanischen Randbedingungen bestimmt, beeinflusst die Wanddicke vor allem die thermischen und rheologischen Verhältnisse.

Aussagen über den Einfluss der Formteildicke auf die Schwindung sind äußerst schwierig, da mit der Veränderung der Dicke alle den Formteilstand charakterisierenden inneren Parameter beeinflusst werden.

Dies sind die veränderten Strömungsverhältnisse sowie die veränderte Druckübertragung unter Nachdruck und die veränderte Kühlzeit im Werkzeug. Von besonderer Bedeutung sind die thermischen Verhältnisse, die sich bei teilkristallinen Materialien besonders in einem geänderten Kristallisationsablauf ausdrücken.

In der Literatur [67] wird bei amorphen Materialien eine leichte Zunahme der Schwindung mit der Wanddicke beschrieben. Dieser Zusammenhang wurde auch in eigenen Untersuchungen mit einem Plattenformteil und den Materialien ABS Urtal

M122 (ENICHEM POLYMERI, San Donato Milanese, I) sowie Polystyrol PS 454 C (BASF AG, Ludwigshafen, D) festgestellt (Bild 7 und Bild 8) [11]. Der Anguss ist bei diesem Plattenformteil als Kegelanguss mit anschließendem Filmschnitt ausgeführt. Der Anschnitt erstreckt sich über die gesamte Breitseite der Platte und ist 1 mm dick.

In den Bildern 7 und 8 ist der lineare Schwindungsverlauf in Abhängigkeit der Formteildicke für unterschiedliche Massetemperaturen und relative Nachdruckniveaus dargestellt. Der Nachdruck wurde jeweils bei 40 % und 80 % des maximalen Einspritzdruckes gewählt ($p_N/p_{E,max} = 0,4$ bzw. $0,8$).

Die Formteilgeometrie legt zusammen mit der Anspritzposition die strömungsbedingten Anisotropien beim Füllen des Formhohlraumes fest. Die komplexen Zusammenhänge bei der Moleküllorientierung und der Orientierungsrelaxation lassen keine eindeutigen Voraussagen hinsichtlich des Schwindungs- und Verzugsverhaltens zu.

Von großer Bedeutung ist die Schwindungsanisotropie für faserverstärkte Kunststoffe. Für diese Stoffklasse sind die Schwindungswerte in Faserorientierungsrichtung geringer als quer dazu.

Neben der Anspritzposition beeinflusst das Angussystem über die Fließquerschnitte und Fließweglängen die Druckübertragung in der Einspritz- und Nachdruckphase und somit vor allem das Schwindungsniveau.

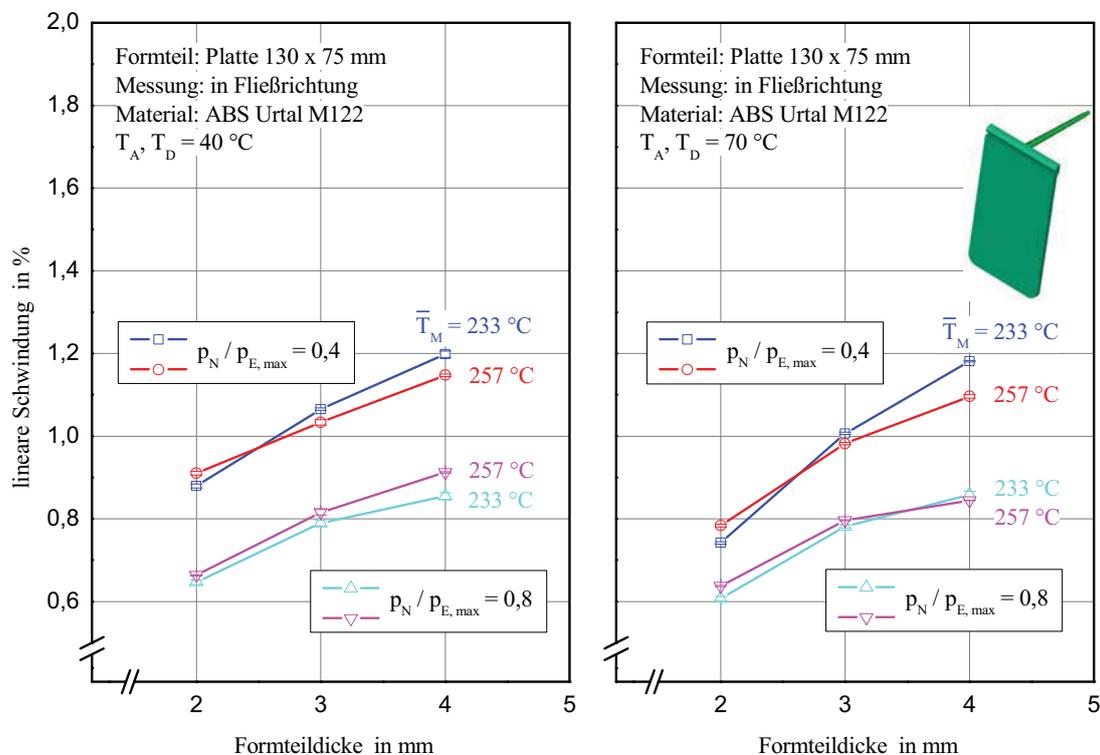


Bild 7: Gemessene Verarbeitungsschwindung in Fließrichtung für unterschiedliche Formteildickungen bei verschiedenen Nachdruckniveaus, Masse- und Temperaturmitteltemperaturen (Material: ABS Urtal M122) [11]

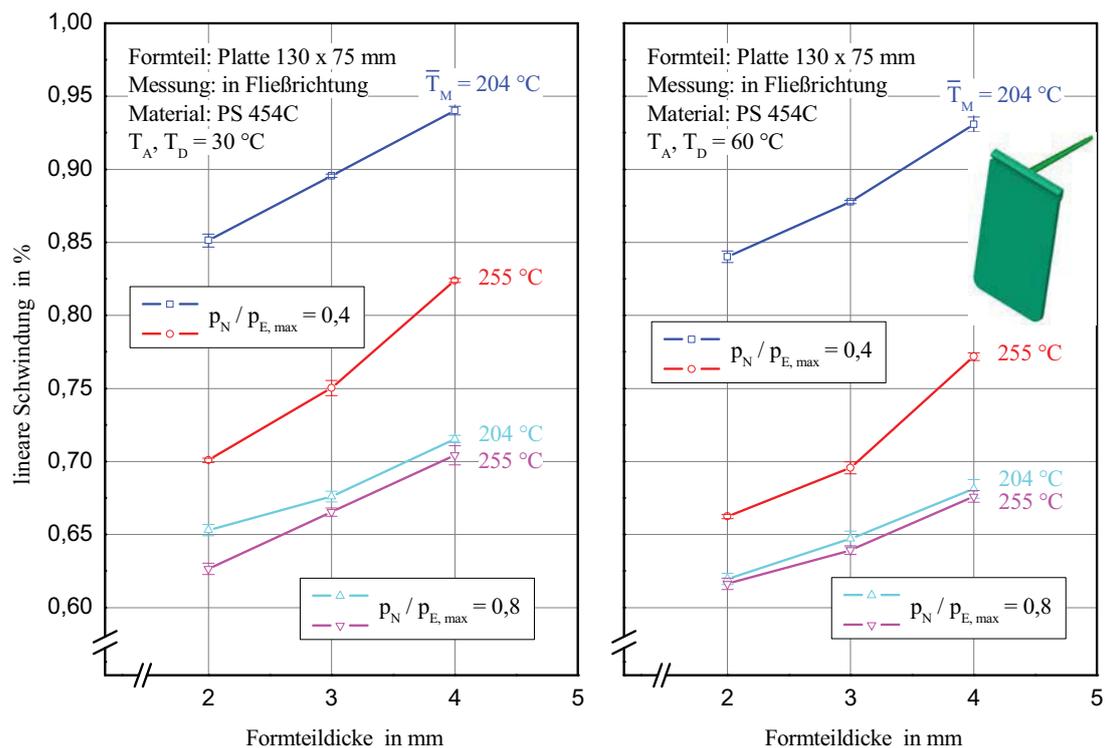


Bild 8: Gemessene Verarbeitungsschwindung in Fließrichtung für unterschiedliche Formteildickungen bei verschiedenen Nachdruckniveaus, Masse- und Temperaturmitteltemperaturen (Material: PS 454C) [11]

2.3.3 Prozess

Die Betrachtung des Prozesseinflusses auf das Schwindungs- und Verzugsverhalten ist von besonderem Interesse, da die Prozessführung für den Verarbeiter die einzige Einflussgröße ist mit deren Hilfe die Abmessungen des fertigen Formteils beeinflussbar sind.

Einen dominierenden Einfluss auf das Schwindungsverhalten von Thermoplasten hat die Nachdruckhöhe. Sowohl bei amorphen als auch bei teilkristallinen Kunststoffen werden die Schwindungswerte mit steigendem Nachdruck reduziert [26].

Das Bild 9 zeigt diesen Zusammenhang für die amorphen Kunststoffe ABS Urtal M122 und Polystyrol PS 454C bei unterschiedlichen Massetemperaturen. Im Rahmen dieser Untersuchungen wurde auch die Werkzeugtemperierung variiert.

Neben der Nachdruckhöhe ist die Nachdruckzeit eine entscheidende Einflussgröße zur Schwindungskompensation [26, 61, 33]. Die Nachdruckzeit bietet sich als Stellgröße für viele nachdruckrelevante Qualitätsmerkmale an [61]. Dies wird wegen des höheren Kontraktionsvermögens und des daher größeren Massestroms unter Nachdruck vor allem bei teilkristallinem Material deutlich (Bild 10). Die Schwindungsverringerung mit steigender Nachdruckzeit ist nur bis zum Erreichen des

Siegelpunkts möglich. Für amorphe Materialien ist der Einfluss der Nachdruckzeit wegen des geringeren nachzufördernden Volumens von geringerer Bedeutung als bei teilkristallinen Materialien. Zusätzlich ist dies aber auch von der Formteilgeometrie abhängig.

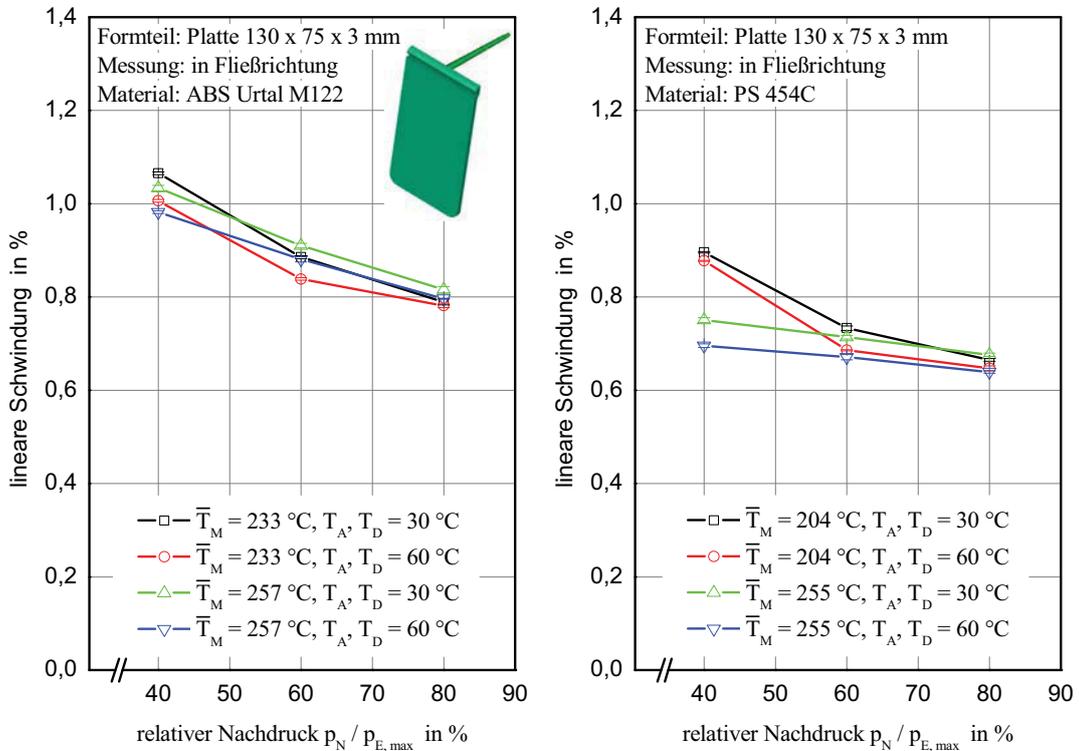


Bild 9: Einfluss der Nachdruckhöhe auf die Verarbeitungsschwindigkeit in Fließrichtung von ABS Urtal M122 und PS 454C (beide amorph) [11]

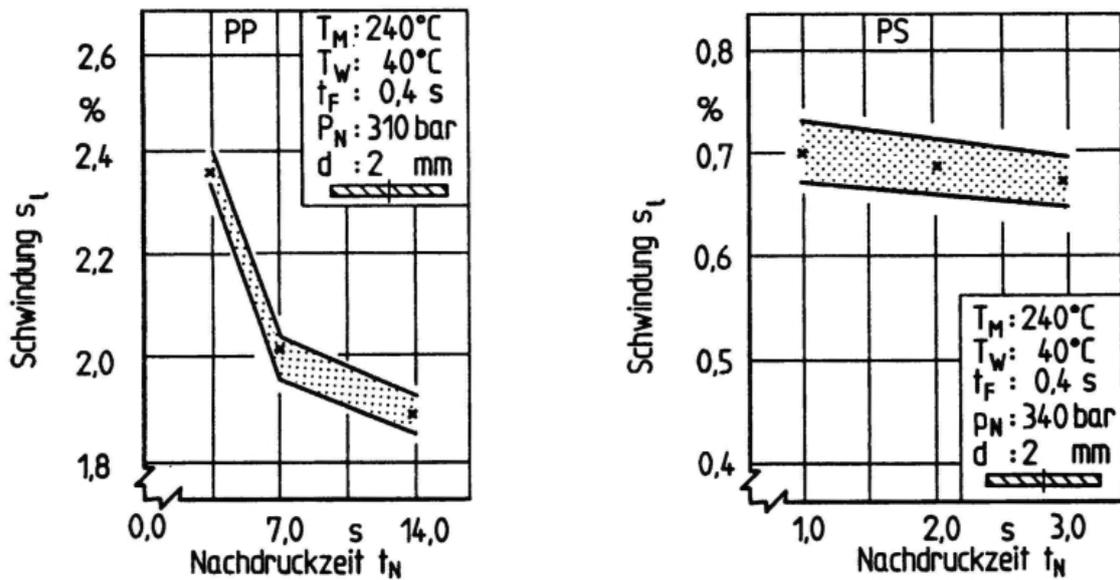


Bild 10: Einfluss der Nachdruckzeit auf die Schwindung; links: Polypropylen (teilkristallin); rechts: Polystyrol (amorph) [55]

Die Beeinflussung der Schwindung durch die Massetemperatur stellt sich wesentlich komplexer dar als die Beeinflussbarkeit durch den Nachdruck. Theoretisch hat eine erhöhte Massetemperatur zwei gegensätzliche Wirkungen. Einerseits resultiert aus einer höheren Temperatur eine höhere thermische Kontraktionsfähigkeit der Masse, andererseits bewirkt die dadurch verringerte Schmelzeviskosität eine bessere Druckübertragung und damit eine Schwindungsreduktion.

In [55] wird gezeigt, dass bei einem plattenförmigen Formteil für Polypropylen und Polystyrol die bessere Druckwirkung durch die erhöhte Massetemperatur gegenüber der höheren Kontraktionsfähigkeit in der Kavität überwiegt (Bild 11).

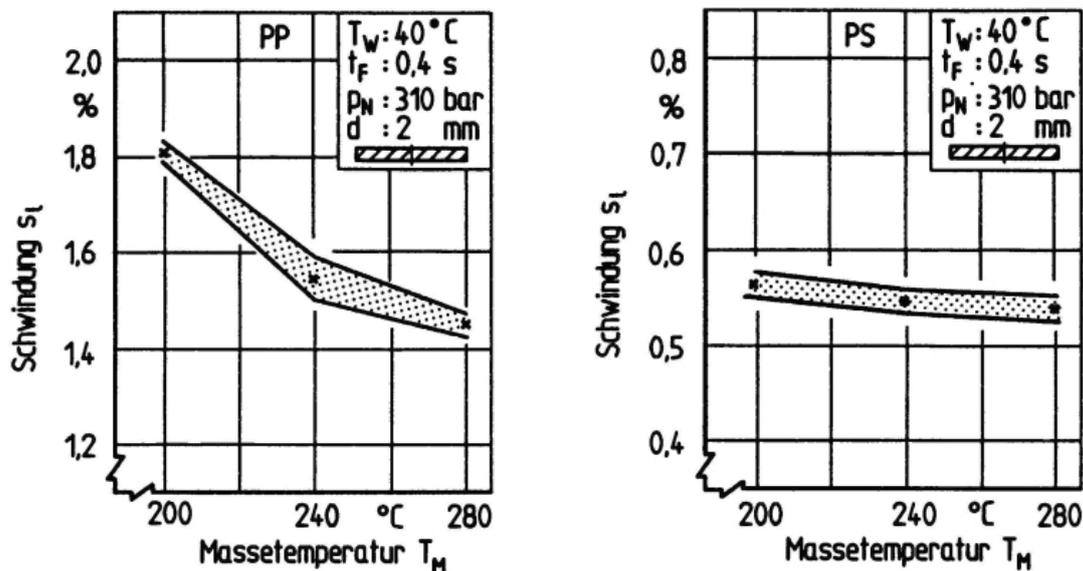


Bild 11: Einfluss der Massetemperatur auf die Schwindung [55]

Im Einzelfall wird jedoch der Einfluss der Temperatur auf das spezifische Volumen im Verhältnis zur Viskositätsverringering, sowie die resultierenden Fließwiderstände über die Möglichkeit der Schwindungsbeeinflussung entscheiden. Eigene Untersuchungen an einem plattenförmigen Formteil unterschiedlicher Dicke (2 mm und 4 mm) mit dem Material ABS Urtal M122 zeigen dies sehr deutlich. Ähnliche Abhängigkeiten können auch der Literatur [26, 33] entnommen werden.

Das Bild 12 zeigt, dass mit steigender Massetemperatur an den 2 mm und 4 mm dicken Formteilen sehr unterschiedliche Schwindungsphänomene quer zur Fließrichtung auftreten können. Während bei Wanddicken von 2 mm ein aufgefächertes Schwindungsniveau mit wachsender Entfernung vom Anguss erkennbar ist, sind die Schwindungsunterschiede an den 4 mm dicken Prüfkörpern wesentlich geringer.

Bei den 2 mm dicken Platten überwiegt bei hoher Massetemperatur vermutlich die Druckwirksamkeit am Fließwegende (115 mm) gegenüber vergleichbaren Einstellungen mit niedriger Massetemperatur. Die lineare Schwindung quer zur Fließrichtung wird geringer. Angussnah (15 mm) führt vermutlich die erhöhte thermische Kontraktionsfähigkeit (pVT -Verhalten) bei hoher Massetemperatur zu einer leichten Zunahme der Querschwindung.

Bei der 4 mm dicken Platte überwiegt im gesamten Bauteil das thermische Kontraktionspotential gegenüber der verbesserten Druckübertragung bei hoher Massetemperatur. Die Querschwindung ist daher an jeder Fließwegposition größer als bei niedriger Massetemperatur. Entscheidenden Einfluss hat in diesem Fall die Art der Angussausführung.

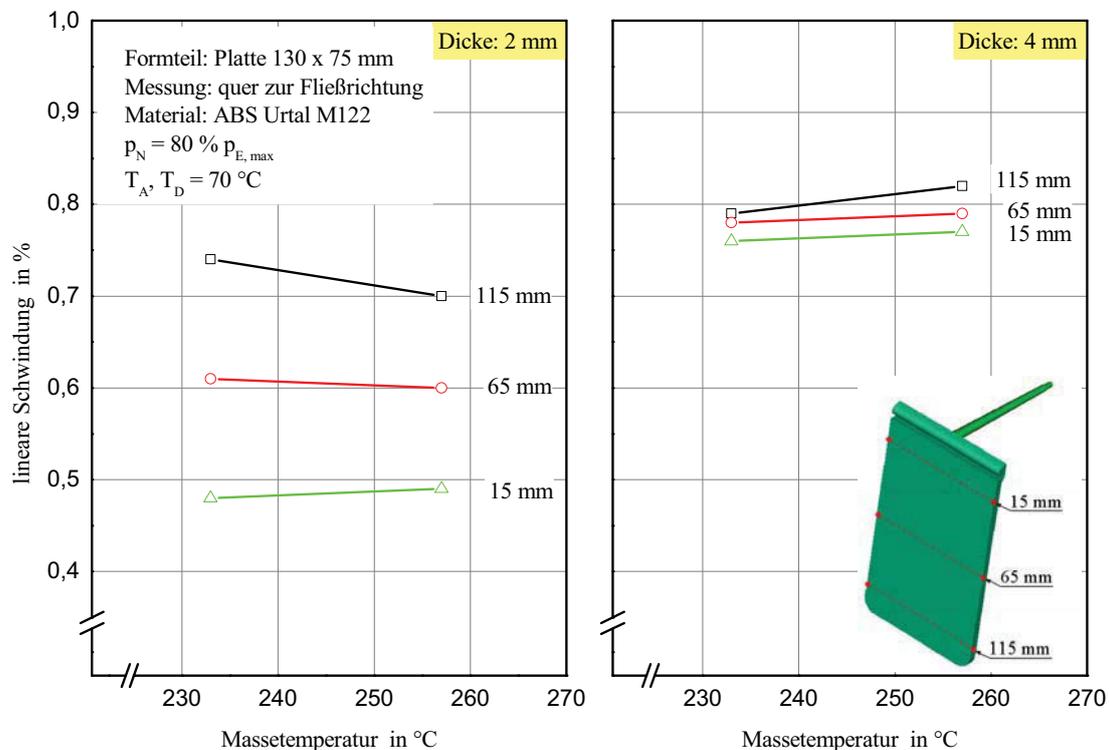


Bild 12: Einfluss der Massetemperatur auf die gemessene lineare Querschwindung für zwei Plattendicken und unterschiedliche Entfernungen vom Anguss (Material: ABS Urtal M122) [11]

Bei einer Veränderung der Werkzeugwandtemperatur bzw. der Temperiermitteltemperatur überlagern sich, wie bei der Massetemperatur, Einflüsse auf den Strömungsprozess mit Einflüssen durch die geänderten thermischen Verhältnisse. Die thermischen Veränderungen haben Einfluss auf das Eigenspannungsprofil und die Kristallisation. Im Fall des in Bild 13 dargestellten Polyamids überwiegt jedoch der thermische Einfluss gegenüber der Verringerung der Strömungsdruckverluste. Die Schwindung steigt mit zunehmender Werkzeugwandtemperatur.

Für teilkristalline Materialien wird dieser Zusammenhang in der Literatur [67, 57, 58, 33] bestätigt. Im Rahmen von Projektarbeiten konnte dieser Verlauf für teilkristalline Kunststoffe ebenfalls nachgewiesen werden [65]. Für amorphe Materialien zeigte sich bei den im Rahmen der Projektarbeiten durchgeführten Messungen nahezu kein Einfluss der Werkzeugtemperierung auf die Schwindung [11].

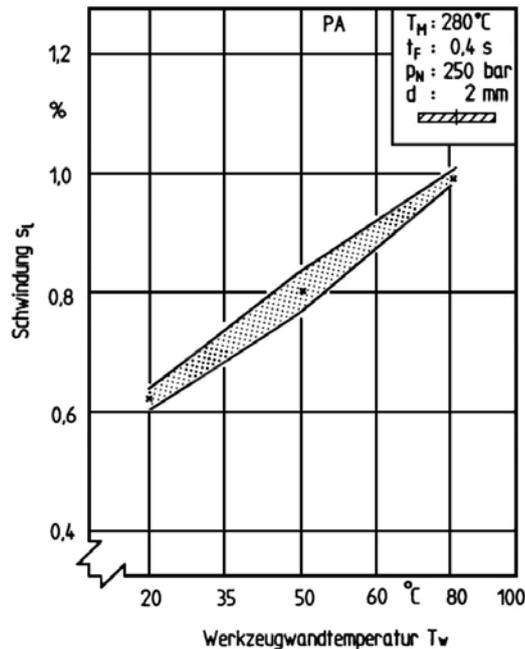


Bild 13: Einfluss der Werkzeugwandtemperatur auf die Schwindung [55]

Die Kühlzeit beeinflusst vor allem die thermischen und mechanischen Randbedingungen im Formteil. Innerhalb des Werkzeugs wird dem Formling die Formtemperatur aufgeprägt und die Schwindung ist behindert. Nach dem Auswerfen kann das Formteil frei kontrahieren und der Wärmetransport erfolgt verlangsamt über Konvektion.

2.4 Abschätzung von Schwindung und Verzug

Für die Festlegung der Kavitätsabmessungen stehen dem Werkzeugkonstrukteur verschiedene Hilfsmittel zur Verfügung. Diese Hilfsmittel werden mit variierender Häufigkeit und unterschiedlichem Erfolg eingesetzt.

2.4.1 Schwindungsangaben der Rohstoffhersteller

Rohstoffhersteller geben in ihren anwendungstechnischen Richtlinien zu jedem Material Schwindungsbereiche an. Diese Angaben können jedoch lediglich einen Hinweis auf die Größe des Schwindungsniveaus geben. Für den Werkzeugkonstrukteur ist das angegebene Toleranzband oft zu groß, um die Werte für eine Maßdefinition an komplexen Bauteilen nutzen zu können.

Als weiteres Problem stellt sich dar, dass diese Schwindungswerte vielfach ohne Angabe der Formteilgeometrie und ohne die für die Herstellung verwendeten Prozessdaten angegeben werden. Es wurde jedoch schon deutlich dargestellt, dass die Schwindung von diesen Einflussgrößen wesentlich beeinflusst wird.

Unterschiedliche Materialien mit der gleichen Schwindungsangabe können meist nicht objektiv miteinander verglichen werden, da zur Erzielung der angegebenen Schwindungsniveaus möglicherweise ganz unterschiedliche Prozesseinstellungen verwendet werden.

Angaben zum Verzugsverhalten werden von den Rohstoffherstellern nicht gemacht. Diese sind auch nicht zielführend, da der Verzug ganz wesentlich von der speziellen Formteilgeometrie, den Strömungsverhältnissen, den Fließorientierungen, der Temperierung, etc. abhängig ist.

2.4.2 Schwindungsberücksichtigung aufgrund von Erfahrungen

Oft werden im Zuge der Werkzeugkonstruktion die Werkzeugmaße durch einen „schwindungserfahrenen“ Konstrukteur festgelegt. Diese eignen sich ihr Wissen auf Basis bereits durchgeführter Schwindungsmessungen an bereits produzierten Formteilen an.

In [55] und [59] wird von sogenannten Erfahrungskatalogen berichtet, die für die Schwindungsberücksichtigung verwendet werden. Dadurch sind die Schwindungsdaten nicht mehr personengebunden, sondern können von jedem Konstrukteur im Unternehmen genutzt werden.

Materialdaten		ABS		Verfahrensdaten und Schwindung													Stapelkasten I ABS			
Materialbezeichnung : XYZ		Verarbeitungszustand : vorgetrocknet 16 h / 70 °C		Maß													Fließwinkel			
Wärmeausdehnungskoeffizient :		pvT-Verhalten :		Entfernung v. Anguß													Lokale Dicke			
MFI :				Fließweg/Wanddicke													Massestemperatur			
				Werkzeugwandtemp.													Entformungstemperatur			
				Volumenstrom													Einspritzzeit			
				Kühlzeit													Nachdruckzeit			
				Nachdruck (lokal)													Nachdruck (Maschine)			
				Schwindung																
				a	e	s	c/s	T _M	T _W	T _E	V	t _e	t _k	t _w	p _e	p _n	S			
				grad	mm	mm		°C	°C	°C	cm ³ /s	s	s	s	bar	bar	%			
Formteildaten				i ₁	0	39	2,1	19	248	50	52	15	3	18	4	756	0,65			
				b ₂	10	69	2,2	32									0,99			
				h ₁	33	115	1,6	74									0,67			
				h ₃	8	90	1,6	74									0,90			
				h ₅	17	100	1,6	63									0,69			
				s	-	110	1,9	58									1,05			
				i ₁	0	39	2,1	19	70	72							0,77			
				b ₂	10	69	2,2	32									0,99			
				h ₁	33	115	1,6	74									0,69			
				h ₃	8	90	1,6	74									0,88			
				h ₅	17	100	1,6	63									0,74			
				s	-	110	1,9	58									1,05			
				i ₁	0	39	2,1	19	90	92							0,89			
				b ₂	10	69	2,2	32									1,12			
				h ₁	33	115	1,6	74									0,74			
				h ₃	8	90	1,6	74									0,85			
				h ₅	17	100	1,6	63									0,77			
				s	-	110	1,9	58									0,52			

Bild 14: Datenblatt eines Erfahrungskatalogs [55]

Da die Ermittlung von Schwindungsdaten an konkreten Formteilen messtechnisch aufwändig, zeitintensiv und kostspielig ist, stellt dieses Wissen einen erheblichen betrieblichen Wert dar. Wesentlich bei den Erfahrungskatalogen ist, dass neben den Schwindungsdaten auch die Formteilgeometrie, die Anspritzsituation sowie die Prozess- und Materialdaten angegeben werden (Bild 14).

Diese Erfahrungskataloge bieten insbesondere Vorteile, wenn Werkzeuge für geometrisch ähnliche Formteile aus ähnlichem oder gleichem Material konstruiert und gebaut werden sollen. In diesem Fall werden sich auch die Prozessgrößen bei der Formteilherstellung nicht wesentlich unterscheiden. In diesem Bereich setzt auch das Expertensystem (Kapitel 6), das im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelt wurde, an.

Die Übertragbarkeit von Schwindungswerten aus Erfahrungskatalogen ist jedoch bei völligen Neukonstruktionen oder bei Verwendung eines anderen Materials, für das noch keine Schwindungserfahrungen existieren, eingeschränkt.

2.4.3 Schwindungsfunktionen und Nomogramme

In der Literatur [24, 55, 59] werden Schwindungsfunktionen bzw. Nomogramme als eine weitere Möglichkeit zur Schwindungsvorhersage angegeben.

Betrachtet man den Sprung von den Schwindungsangaben der Rohstoffhersteller zu den Erfahrungskatalogen, so wurden als weitere Informationen die Geometrie und die Verfahrensgrößen beim „Arbeitspunkt“ berücksichtigt.

Bei den Schwindungsfunktionen und Nomogrammen kommt weiterer Informationsgehalt durch Variation um diesen „Arbeitspunkt“ hinzu.

Ziel ist es dabei, eine allgemeine Bestimmungsgleichung der Form

$$S_i = f(T_M, T_W, p_N, t_K, t_F, \alpha, d, \dots) \quad (3)$$

zu finden. Unter der Annahme, dass die Einzeleinflussgrößen superponiert werden können, kann eine Bestimmungsgleichung in der folgenden Form angeschrieben werden:

$$S_i = S_{i_0} + f_1(T_M) + f_2(T_W) + f_3(p_N) + \dots \quad (4)$$

Die grafische Darstellung eines solchen Zusammenhangs stellt ein Schwindungsnomogramm dar.

Die Ermittlung von Schwindungsfunktionen und Nomogrammen ist aufgrund des hohen Aufwandes jedoch nur für Modellformteile bei insgesamt ähnlichem

Formteilspektrum sinnvoll. Eine Anwendung auf Neukonstruktionen mit komplexerer Geometrie ist deshalb nur beschränkt möglich.

Weiterhin sei angemerkt, dass eine getrennte Betrachtung der Einflussgrößen (siehe Gleichung (4)) korrekterweise nicht zulässig ist, da sich die Einzelparameter gegenseitig beeinflussen.

Eine besondere Problematik besteht darin, dass zur Schwindungsberechnung nach Gleichung (4) die lokalen Prozessgrößen, z. B. Druck und Temperatur, eingesetzt werden müssen. Diese lokalen werkzeugspezifischen Größen stehen meist nicht zur Verfügung, sodass stattdessen Maschineneinstellgrößen verwendet werden müssen, die damit von Spritzgießmaschine zu Spritzgießmaschine verschieden sind.

2.4.4 Berechnung von Schwindung und Verzug mittels Simulationsprogrammen

Für die Entwicklung von Spritzgießteilen werden seit geraumer Zeit Simulationsprogramme eingesetzt. Diese Programme können gestützt auf empirischen Werten und mathematischen Modellen, das Füllen des Werkzeuges, die Nachdruck- und Abkühlphase bis hin zur Entformung sowie den Verzug des Bauteiles berechnen [28, 6, 15]. Die diesen Programmen zugrunde liegende Vorgehensweise wird in weiterer Folge kurz erläutert.

Die meisten Programme zur Simulation des Spritzgießprozesses weisen eine modulare Programmstruktur auf. In Bild 15 ist der Aufbau des Programms Moldflow Plastics Insight™ (MPI) schematisch dargestellt.

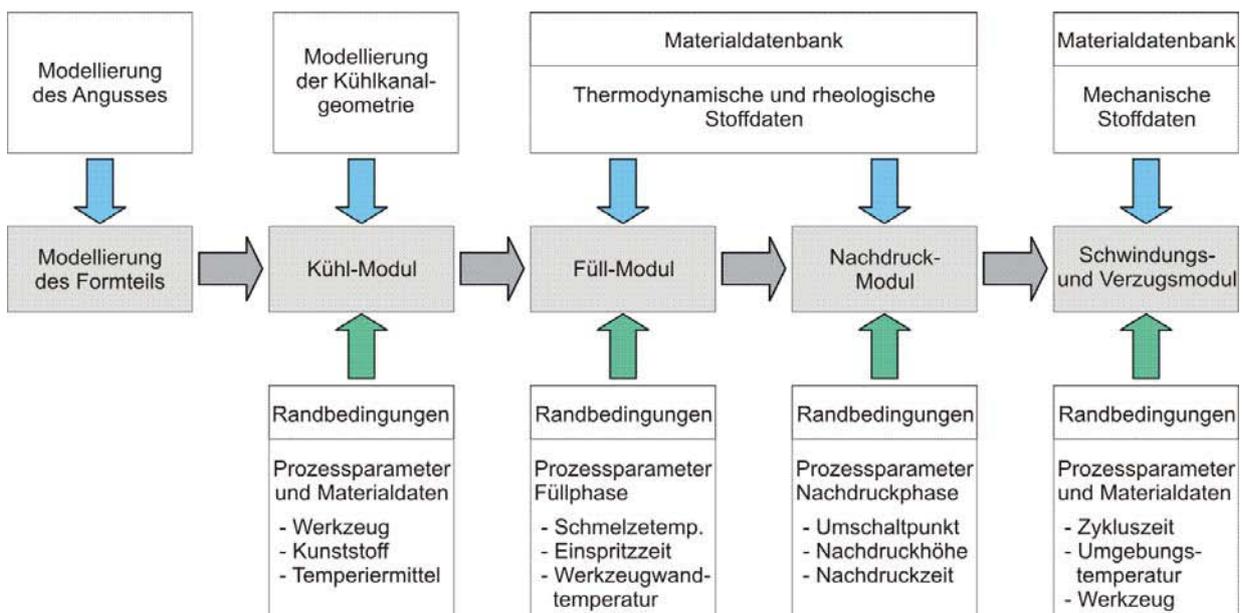


Bild 15: Modularer Aufbau des Simulationsprogramms MPI

Am Anfang einer Simulation muss ein Modell des zu untersuchenden Bauteils bzw. Werkzeugs generiert werden. In Moldflow kommen das Mittelflächen-, das Fusion- und das 3D-Modell zur Anwendung. Für den Anguss und die Werkzeugkühlung werden sogenannte Beam-Elemente verwendet. Auf die Unterschiede dieser Modelle und der verwendeten Finiten Elemente wird in Kapitel 3.2 eingegangen.

Zur genauen Berechnung der örtlichen Werkzeugwandtemperaturen kann der eigentlichen Prozesssimulation eine Abkühlrechnung im Kühl-Modul vorgeschaltet werden. Dies erfordert die zusätzliche Modellierung der Kühlkanalgeometrie des Werkzeugs. Als Randbedingungen gehen sowohl die Prozessparameter als auch die Materialdaten von Werkzeugstählen und des Kunststoffes ein.

Bei der Füll- und Nachdruckphasensimulation gehen als Randbedingungen die Prozessparameter und die thermischen und rheologischen Stoffdaten des verwendeten Kunststoffes ein. Letztere können aus umfangreichen Materialdatenbanken entnommen werden, die Bestandteil eines jeden kommerziellen Simulationsprogramms sind.

Die Ergebnisse dieser Berechnungen geben dem Anwender wichtige Hinweise zur Auslegung von Formteil, Werkzeug und Verteilersystem sowie zur Optimierung der Herstellbedingungen. So können beispielsweise anhand des berechneten Fließfrontenverlaufs Lufteinschlüsse und Bindenähte frühzeitig erkannt werden. Deren Auftreten kann durch gezielte Gegenmaßnahmen wie Änderung der Anschnittlage oder Variation von Wanddicken verhindert werden. Das Füllbild des Formteils gibt ferner Aufschluss über die optimale Lage der Entlüftungskanäle im Werkzeug.

Aufgrund der rein thermisch-rheologischen Betrachtungsweise können mit der Nachdruckphasensimulation nur Volumenschwindungswerte berechnet werden. Ausgehend von der Temperaturverteilung zum Siegelzeitpunkt müssen daher Schwindung und Verzug des Formteils mit einem weiteren Programmmodul simuliert werden. Dabei werden für jedes Element die sich während des weiteren Abkühlens aufbauenden Eigenspannungsprofile in mehreren Schritten berechnet. Zum Entformungszeitpunkt und nach Erreichen der Umgebungstemperatur werden die Knotenkoordinaten des vernetzten Modells korrigiert. Somit liegen gegen Ende der Schwindungs- und Verzugsberechnung die Verarbeitungsschwindung und die endgültige Gestalt des Formteils vor.

3 Simulation des Spritzgießprozesses mit Moldflow Plastics Insight™ (MPI)

Die Einbeziehung von CAD-Anwendungen bei der Entwicklung von neuen Bauteilen, die im Spritzgießprozess hergestellt werden, ist heute Stand der Technik. Mit CAM-Werkzeugen ist eine weitgehend automatisierte Programmierung der Werkzeugmaschinen für die Herstellung der Spritzgießformen möglich. Die Anwendung dieser Methoden gestattet eine hohe Effizienz und eine merkliche Verkürzung der Werkzeugbauzeiten. Die Forderung nach einer weiteren Effizienzsteigerung ist ein Grund für die Nachfrage nach Simulationsprogrammen für den Spritzgießprozess. Das Ziel bei der Simulation ist eine Bewertung und Optimierung der Qualität des fertigen Teils und der Herstellungskosten, schon bevor der erste Prototyp gefertigt wird.

Für die rheologische und thermische Auslegung von Bauteilen und Werkzeugen stehen Spritzgießsimulationsprogramme, wie z.B. Moldflow Plastics Insight™ (MPI) der Firma Moldflow, Moldex 3D von CoreTech Systems Co. Ltd. oder Cadmould der Firma Simcon, zur Verfügung. In der vorliegenden Arbeit wurden alle Untersuchungen mit dem Programm MPI durchgeführt.

Als die Firma Moldflow im Jahr 1978 gegründet wurde, konnten nur einfachste Berechnungen von Füllvorgängen durchgeführt werden. Gleichzeitig mit der rasanten Entwicklung im Computerbereich wurde auch das Programm ständig weiterentwickelt. Mit dem Kauf des größten Konkurrenten C-Mold im Jahr 2000 wurde die Firma Moldflow als Anbieter von Simulationssoftware für den Spritzgießprozess zum beherrschenden Marktführer. Die folgende Zusammenstellung zeigt einen kompakten Überblick über den aktuellen Stand der Berechnungsmöglichkeiten mit Moldflow [36].

- Standardspritzgießverfahren:
 - Füllphase (Bindenähte, Lufteinschlüsse, Spritzdruckbedarf, Detektieren von Füllproblemen, Faserorientierung, Schmelzetemperatur, Anteil der eingefrorenen Randschicht, etc.)
 - Nachdruck- und Kühlphase (Druckverteilung, Formteilmperaturen, Werkzeugtemperaturen, Kühlmediumtemperaturen, etc.)
 - Schwindung und Verzug (Eigenspannungen und Verzug von Formteilen)
 - Balancierung von Angussverteilern
 - Berechnung eines Verarbeitungsfensters
 - Versuchsplanmanager
 - Prozessoptimierung
- Sonderverfahren:
 - Gasinnendruckverfahren (Gasblasenausbreitung, Füllprobleme ...)
 - MuCell-Verfahren (Gaskonzentration, Gasblasengrößenverteilung ...)
 - 2K-Sandwichspritzgussverfahren (Füllverhalten, Schichtanteile ...)

- Spritzprägeverfahren (Prägespalt, Füllung, Schließkräfte, Verzug ...)
- RIM (Füllverhalten, Reaktionskinetik der Aushärtung von Harzen ...)
- Umspritzen von Mikrochips mit Harzen (Füllverhalten, thermische Verhältnisse, Deformation der Verdrahtung, Aushärtung ...)

3.1 2 ½D- und 3D-Strömungssimulation

Bevor auf die Modellerstellung, strömungsmechanischen Details und beschreibenden Differentialgleichungen eingegangen wird, soll erläutert werden, was unter den Begriffen 2 ½D- bzw. 3D-Berechnung zu verstehen ist.

Werden die Strömungsverhältnisse in einem einfachen Spritzgießteil analysiert, lassen sich mehrere Zustände unterscheiden (Bild 16).

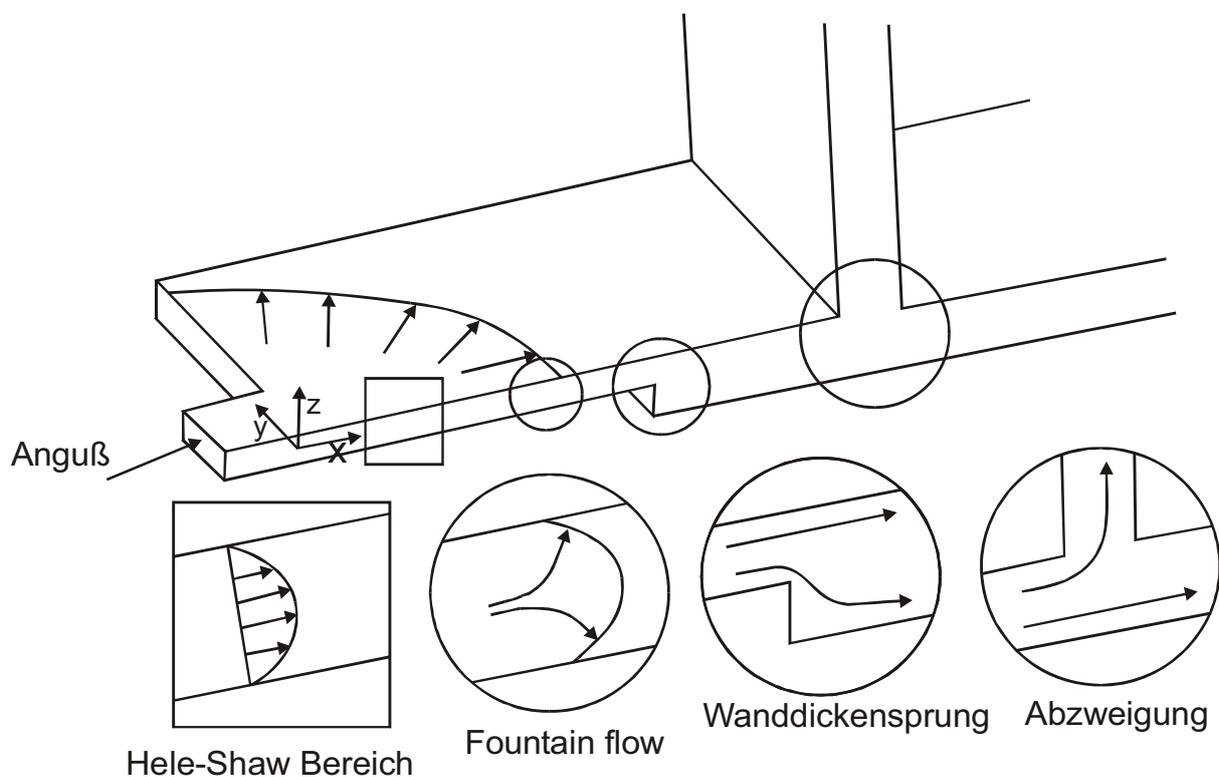


Bild 16: Strömungsverhältnisse in einer einfachen Spritzgießkavität [35]

In ebenen Bereichen, wo die Fließfront bereits weiter vorangeschritten ist, kann davon ausgegangen werden, dass keine Geschwindigkeitskomponente in z-Richtung auftritt. Man spricht in diesem Fall von einer sogenannten Hele-Shaw-Strömung [22, 4] (Bild 16 links). Da bei einem Großteil der spritzgegossenen Bauteile großflächige und dünnwandige Strukturen vorherrschen, wird die Hele-Shaw-Strömung als Basis für die Füllsimulation herangezogen.

Die Vernachlässigung der z-Komponente in den Differentialgleichungen der Strömungsmechanik reduziert den Rechenaufwand erheblich, ohne dabei die Genauigkeit zu sehr einzuschränken. Für die Hele-Shaw-Strömung wird mit gutem

Erfolgt die sogenannte 2 ½D-Berechnung verwendet. Dabei wird eine ebene Strömung angenommen, was einer 2D-Berechnung entspricht. Zusätzlich wird über die Dicke ein parabolisches Geschwindigkeitsprofil berechnet, welches sich aus dem strukturviskosen Fließverhalten der Kunststoffschmelze und der Randbedingung des Wandhaftens ergibt.

Die Strömung ist zwar dadurch dreidimensional beschrieben, allerdings ohne Berücksichtigung der dritten Geschwindigkeitskomponente. Dieser Ansatz stellt somit einen Kompromiss zwischen einer reinen 2D- und einer exakten 3D-Berechnung dar und wird üblicherweise als 2 ½D-Berechnung bezeichnet. Zur Diskretisierung in Finite Elemente genügen ebene Elemente, denen die Dicke als Attribut zugewiesen wird.

Neben dem Hele-Shaw-Bereich gibt es jedoch Fließphänomene, die nur mit einer 3D-Betrachtung sinnvoll beschrieben werden können. In Bild 16 sind mehrere Beispiele angegeben. Die Fließfront kann mit Hilfe der 2 ½D-Berechnung nicht exakt abgebildet werden, da hier eine Quellströmung (fountain flow) vorliegt, in der auch in z-Richtung ein Massefluss stattfindet. Dreidimensionale Strömungsvorgänge treten auch bei Wanddickensprüngen oder Abzweigungen (z.B. Rippen) auf, ebenso bei Freistrahlbildung. Die Beschreibung solcher Strömungsvorgänge mit Hilfe einer 3D-Berechnung erfordert die Verwendung von dreidimensionalen Finiten Elementen (z.B. Tetraeder). Um die Geometrie ausreichend fein zu vernetzen, müssen sehr viele Elemente verwendet werden. Der Rechenaufwand steigt dadurch erheblich gegenüber einer 2 ½D-Berechnung an.

Im Folgenden sind die charakteristischen Eigenschaften der 2 ½D- und 3D-Rechnung gegenüber gestellt [35]:

- *2 ½D-Berechnung*
Hele-Shaw-Strömung (ebene Strömung mit Geschwindigkeitsprofil über der Dicke),
Vernachlässigung der z-Geschwindigkeitskomponente,
günstig für flächige, dünnwandige Bauteile ohne Wanddickensprünge,
Richtwert für Breiten-/Höhen-Verhältnis des Strömungskanals: $b/h > 4$,
Verwendung von ebenen Elementen im FE-Netz (z.B. Dreiecke),
Rechenaufwand gering.
- *3D-Berechnung*
Dreidimensionale Strömung (Geschwindigkeitskomponenten in allen Raumrichtungen),
für Berechnung der Quellströmung, Wanddickensprünge, Umlenkungen und dickwandige Formteile ($b/h < 4$),
Verwendung von dreidimensionalen Elementen im FE-Netz (z.B. Tetraeder),
großer Rechenaufwand.

Dreidimensionale Strömungsvorgänge spielen eine nicht zu vernachlässigende Rolle. Schon in einfachen Spritzgussteilen finden sich verschiedene Bereiche mit einem ausgeprägten dreidimensionalen Strömungsfeld. Daher sind bei der Modellgenerierung verschiedenster Formteile oft Kompromisse in Kauf zu nehmen, da sie aufgrund ihrer Geometrie nicht immer eindeutig zu einer der beiden Berechnungsvarianten zuordenbar sind.

Bei der Werkzeugkonstruktion benutzen heute übliche CAD-Programme eine volumenorientierte Darstellung der Formteil- und Werkzeuggeometrie. Mit der Möglichkeit einer automatisierten Vernetzung dieser Modelle, wie sie z.B. im Programmpaket Moldflow Plastics Insight™ vorliegt, wird nur ein einziger Datensatz für die Konstruktion und die Simulation benötigt. Ferner entfällt der aufwändige Prozess der Mittelflächengenerierung. Dies erlaubt eine schnelle Analyse bei einer Neuauslegung oder Konstruktionsänderung und verringert so insgesamt die Dauer, die heute für eine komplette Werkzeugauslegung benötigt wird.

Ein Nachteil von 3D-Berechnungen sind die sehr langen Rechenzeiten. So liegen die Rechenzeiten teilweise auch für einfache Formteile im Bereich von mehreren Stunden bis Tagen. Mit der fortschreitenden Entwicklung der Computertechnologie wird dieser Nachteil aber in Zukunft aufgewogen.

3.2 Modellerstellung

Spritzgussteile haben oft eine ausgesprochen komplexe Geometrie. Es war lange Zeit nicht möglich, die ganze Komplexität des Teils in die Simulation zu übernehmen und jedes Detail zu berücksichtigen. Mit den neuesten Versionen der 3D-Füll- und Kühlsimulationsprogramme ist es nun möglich, auch eine äußerst komplizierte Bauteilgestalt zu behandeln [48]. Es gibt jedoch bei normalen Bauteilen derzeit noch gute Gründe, weiter mit einer vereinfachten Bauteilrepräsentation zu arbeiten.

- Viele notwendige Informationen zum Prozess können auch an einer vereinfachten Geometrie erlangt werden.
- Eine geschickte Vereinfachung der Bauteilgeometrie führt zu einer erheblichen Verkürzung der Berechnungszeit, ohne dass die Qualität der Ergebnisse merklich darunter leidet.

Aus dem geometrisch vereinfachten Modell muss eine für die Simulation geeignete Repräsentation des Teils erzeugt werden. Dazu wird ein Finite-Elemente-Netz erzeugt, das die Geometrie, die berechnet werden soll, in kleine Teile (Elemente) zerlegt. In Bild 17 sind die in MPI zur Auswahl stehenden Arten von FE-Netzen dargestellt.

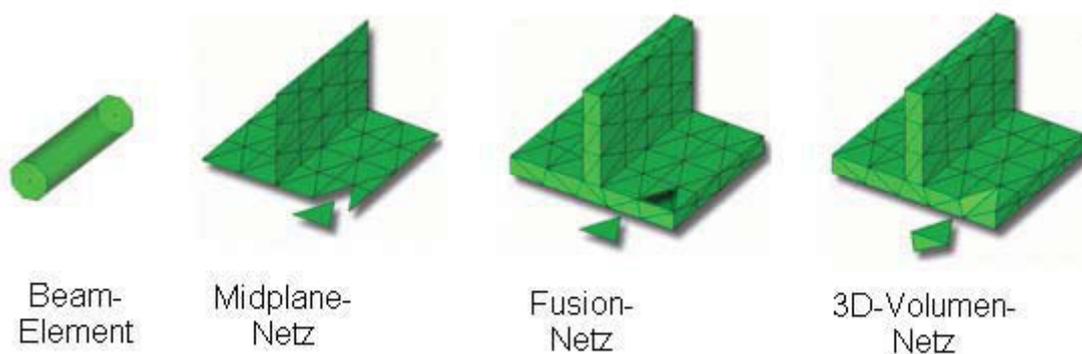


Bild 17: Unterschiedliche FE-Netztypen in MPI [49]

Die Elemente werden von Knoten aufgespannt, für welche die beschreibenden Differentialgleichungen aufgestellt werden. Nach der Lösung des Gleichungssystems für die einzelnen Knoten werden die Ergebnisse zusammengeführt und liefern die Gesamtlösung für das Formteil. Nur durch diese Methode ist es überhaupt erst möglich, Strömungsvorgänge in komplexen Spritzgießwerkzeugen zu berechnen.

3.2.1 Eindimensionale Beam-Elemente

Für die Beschreibung von Strömungsvorgängen in Angussverteilern oder Kühlkanälen werden eindimensionale Beam-Elemente verwendet, die aus Linien bestehen, denen ein Querschnitt als Eigenschaft zugewiesen wird. Dieser muss nicht wie in Bild 17 kreisförmig, sondern kann z.B. auch halbkreisförmig, trapezförmig, usw. sein. Als Berechnungsgrundlage für die Beschreibung der Strömung und des Wärmeaustausches werden die Erhaltungssätze der Strömungsmechanik (Vgl. Kapitel 3.3.1) in zylindrischen Koordinaten verwendet. Weichen die Querschnittsgeometrien von einer kreisförmigen Form ab, werden in MPI aus der vorgegebenen Geometrie (z.B. quadratischer Querschnitt) Ersatzquerschnitte berechnet.

Ein weiteres Anwendungsgebiet von Beam-Elementen sind zylindrische oder stabförmige Bereiche an Formteilen, die mit Mittelflächen oder einem Fusion-Netz nicht gut abzubilden sind. Der Vorteil von Beam-Elementen liegt hier vor allem darin, dass die Randbedingung des Wandhaftens für die Berechnung des Geschwindigkeitsprofils besser abgebildet wird. Es muss aber einschränkend angemerkt werden, dass die Verknüpfung von mehreren Elementtypen (also z.B. Beam-Elemente auf einem Mittelflächenetz) nur für die Füllberechnung vorteilhaft ist. Die Berechnung des Verzuges mit Beam-Elementen funktioniert zur Zeit noch nicht [36].

3.2.2 Mittelflächenetz für die 2 ½D-Berechnung

Das Erstellen eines Mittelflächenmodells war bis vor wenigen Jahren der einzige Weg der Modellvorbereitung für eine Moldflow-Berechnung. Das Mittelflächenetz beschreibt die Mitte der Bauteilwände durch Dreieckselemente. An den Stirnflächen des Teils hat das Mittelflächenetz Begrenzungskanten.

Die Wanddicke ist jedem Element als Attribut zugeordnet. Die Festlegung der Dimensionen bei der Vereinfachung ist oft schwierig, weil sich beispielsweise Steghöhen um die halbe Dicke der Bodenplatte vergrößern. Die automatische Ableitung eines Mittelflächenetzes aus einem CAD-Modell ist nicht immer einwandfrei, sodass eine manuelle Nachbearbeitung des Netzes erforderlich wird.

Die Berechnungsalgorithmen greifen auf die Finite-Elemente/Finite-Differenzen-Technik zurück, d.h. die Bauteildicke wird vor der eigentlichen Berechnung in eine vordefinierte Anzahl Schichten aufgeteilt. Die beiden Richtungen in der Ebene des Elements werden als X- und Y-Richtung definiert. Die Wanddicke liegt immer in der Z-Richtung des Elements.

Die Finite-Elemente/Finite-Differenzen-Technik hat u.a. zur Folge, dass die Massenausbreitung (Strömung) für die X- und die Y-Richtung berechnet wird, während in der Z-Richtung das Geschwindigkeitsprofil und die Scherung zwischen den Schichten zu den wesentlichen Berechnungsergebnissen gehören. Bei Berechnungen am Mittelflächenmodell können Prozessgrößen wie die Scherung, die Temperatur oder die Viskosität über der Bauteildicke dargestellt werden.

Obwohl der Aufwand für die Erstellung eines Mittelflächen-Netzes um ein Vielfaches größer ist als für ein Fusion-Netz (siehe Kapitel 3.2.3), gibt es noch einige Vorzüge dieses Modelltyps, die den hohen Modellierungsaufwand rechtfertigen:

- Bei Formteilen, die auf Grund ihrer Geometrie zu instabilem Bauteilverzug (Beulen, Knicken, etc.) neigen könnten, muss bei der Verzugsberechnung ein nichtlinearer Ansatz für große Deformationen verwendet werden, um realistische Ergebnisse zu erzielen. Diese Effekte können zur Zeit programmtechnisch in MPI nur durch ein Mittelflächenmodell berücksichtigt werden.
- Folgende Berechnungen sind derzeit ebenfalls nur mit Mittelflächenmodellen durchführbar:
 - Berechnung der Lage und Tiefe von Einfallstellen
 - Sandwich-Spritzgießen
 - Spritzprägeverfahren

3.2.3 Fusion-Netz (Oberflächennetz) für die 2 ½D-Berechnung

Beim Fusion-Netz (Bild 17) wird die gesamte Bauteiloberfläche mit Dreieckselementen dargestellt. Das Netz ist eine geschlossene Fläche ohne Begrenzungskanten. Weil Berechnungen am Oberflächennetz, so wie am Mittelflächennetz, auf die Finite-Elemente/Finite-Differenzen-Technik zurückgreifen, ist mit der Anwendung dieser Netzart kein tieferer Einblick in den Prozess möglich.

Das Oberflächennetz erlaubt jedoch den Modellieraufwand erheblich zu vermindern. Im Normalfall wird das CAD-Modell als STL-File oder IGS-File gespeichert. Im STL-File wird die Oberfläche bereits durch Dreiecke repräsentiert, die jedoch nicht für die Simulation geeignet sind. Die Oberfläche wird komplett, ohne vorheriger Erzeugung einer Mittelfläche, vernetzt.

Der Simulationsalgorithmus berechnet aus dem Abstand von gegenüberliegenden Elementen die Bauteildicke, teilt diese in Schichten auf und wendet dann im Grunde die gleichen Berechnungsvorschriften wie beim Mittelflächennetz an.

Besonders zu beachten ist der Übereinstimmungsrad von gegenüberliegenden Elementen. Bild 18 zeigt ein Beispiel für gute und schlechte Übereinstimmung.

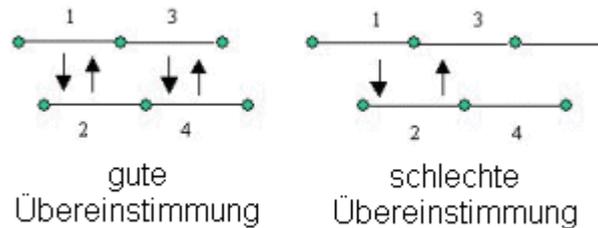


Bild 18: Übereinstimmung von Elementen in einem Fusion-Netz

Um brauchbare Berechnungsergebnisse zu erzielen, muss dieser Übereinstimmungsgrad („mesh matching“) deutlich über 80 % liegen. Das heißt, dass mindestens 80 % aller Elemente des Formteils gut abgestimmt sein müssen [36].

Berechnungen am Oberflächennetz liefern ansprechendere Ergebnisdarstellungen, die jedoch nicht auf einem anspruchsvolleren Berechnungsalgorithmus beruhen. Dieser Simulationsansatz liefert, wie auch das Mittelflächennetz, bei flächigen Teilen gute Berechnungsergebnisse.

Bei dicken, gedrunenen und klotzigen Teilen ist eine vorsichtige Interpretation der Ergebnisse zu empfehlen.

Abgesehen davon, dass einige Prozesse nicht mit einem Fusion-Netz berechnet werden können, steigt auch der Rechenaufwand gegenüber Mittelflächenmodellen, da bei gleicher Netzdicke doppelt so viele Elemente benötigt werden (durch die Vernetzung der gegenüberliegenden Flächen). Dieser Mehraufwand an Rechenzeit wird aber bei den meisten Formteilen durch die wesentlich kürzere Modellierungszeit kompensiert.

3.2.4 3D-Volumenmodell

Für Bauteile, die dreidimensional ausgebildet sind (z.B. mit großen Wanddickensprüngen) muss für eine genaue Beschreibung des Füllverhaltens ein 3D-Modell verwendet werden. Berechnungen am Volumennetz unterscheiden sich grundlegend von denen am Mittel- oder Oberflächennetz. Das Bauteil wird als Netz aus Tetraedern, also Volumenelementen, dargestellt. Damit ist auch eine Vernetzung über der Dicke (z-Richtung) gegeben. Die Anzahl der Elemente bzw. Knoten, für die die beschreibenden Differentialgleichungen gelöst werden müssen, erhöht sich dadurch dramatisch gegenüber der 2 ½D-Rechnung. Das heißt, dass für die Berechnungen sehr große Rechenleistungen gefordert sind, bzw. dass die Berechnungen sehr lange dauern.

Die Berechnungsalgorithmen für dieses Netz müssen fortschreitende Prozesse, wie etwa die Massenausbreitung, in alle drei Raumrichtungen berücksichtigen. Bei einer Füllberechnung wird daher auch die Quellströmung an der Fließfront erkennbar. Mit der 3D-Rechnung können bei gedrunenen/dicken Teilen, kritischem Füllverhalten und/oder komplexen Wärmeströmen wichtige Informationen zum Prozess gewonnen werden.

Für Standardspritzgießteile bietet das 3D-Volumenmodell keinen Vorteil gegenüber den 2 ½D-Modellen. Es ist sogar bei sehr dünnen Teilen wesentlich ungenauer, da bei begrenzter Elementanzahl die Diskretisierung über die Dicke viel gröber ist als bei der 2 ½D-Rechnung. Die Begründung dafür liegt in der Forderung nach einer geringen Verzerrung (aspect ratio) der Elemente.

Der aspect ratio ist durch das Verhältnis der Länge l der längsten Seite eines Dreieckselements zur Höhe h auf diese Seite definiert ($A = l/h$, siehe Bild 19). Im Fall von Tetraeder-Elementen gilt sinngemäß der gleiche Ansatz für jede Dreiecksfläche. Für die numerische Berechnung können Elemente, deren aspect ratio größer als 10 ist, Probleme bereiten.



Bild 19: Aspect ratio von Dreieckselementen

Für eine ausreichende Genauigkeit sollten mindestens sechs Tetraeder-Elemente über die Kanalhöhe vorgesehen werden. Bei dünnen großflächigen Formteilen bedeutet diese Forderung eine sehr kurze Elementlänge über die Formteildicke. Damit die Verzerrung der Elemente in Längsrichtung des Formteils nicht zu groß wird, muss gegenüber einem Fusion- oder Mittelflächenmodell eine wesentlich höhere Elementanzahl vorgesehen werden. Aufgrund der begrenzten Rechenleistung sind solche Modelle meist nicht mehr wirtschaftlich berechenbar [36].

3.3 Füllphase

In der Literatur [30, 22, 29, 9, 10, 31] ist die Berechnung der Füllphase häufig dargestellt. In der Füllphase wird die Strömung der Kunststoffschmelze in die Kavität bis zur volumetrischen Füllung beschrieben. Als Basis für die Berechnungen in MPI dienen die Grundgleichungen für Masse-, Impuls- und Energieerhaltung.

3.3.1 Grundgleichungen zur Beschreibung des Füllvorgangs

Bei der Simulation des Spritzgießprozesses erfolgt eine Lösung der allgemeinen Kontinuitäts-, Impuls- und Energiegleichung [5]. Diese beschreibenden Gleichungen können durch einige Annahmen stark vereinfacht werden. Bei den im Kapitel 3 dargestellten Ableitungen werden die grundlegenden Vereinfachungen für die 2 ½D-Modelle angeführt. Im Fall des 3D-Modells müssen die Gleichungskomponenten in allen Raumrichtungen berücksichtigt werden.

3.3.1.1 Kontinuitätsgleichung

Die Kontinuitätsgleichung besagt, dass die zeitliche Dichteänderung in einem festen Raumpunkt der Änderung des Massegeschwindigkeitsvektors in diesem Punkt entspricht.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho(\nabla \bar{v}) + (\bar{v} \nabla \rho) = 0 \quad (5)$$

Im Programm *MPI* wird als Vereinfachung konstante Dichte der Schmelze angenommen ($\rho = \text{konst.}$). Die Kompressibilität wird dahingehend berücksichtigt, dass die Reduktion des Volumenstroms in Folge von Druck- und Temperaturänderung berechnet wird. Die Vernachlässigung der Kompressibilität in der Kontinuitätsgleichung ist nur während der Füllphase zulässig und vereinfacht Gleichung (6) zu folgendem Ausdruck:

$$\nabla \bar{v} = 0, \quad (6)$$

bzw. in kartesischen Koordinaten:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (7)$$

Für Verteilerkanäle wird ähnlich vorgegangen, wobei die Gleichungen in Zylinderkoordinaten angegeben werden.

3.3.1.2 Impulsgleichung

Die Impulsgleichung setzt die Impulsänderung eines mit der Strömung mitbewegten Massepunktes gleich der Summe der auf diesen einwirkenden Oberflächen- und Volumenkräfte. In Vektorschreibweise lautet sie:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{v}) = \rho \bar{g} + [\nabla \cdot \underline{\sigma}] - [\nabla(\rho \bar{v})], \quad (8)$$

wobei \bar{g} die Körperschwerkraft und $\underline{\sigma}$ der Spannungstensor (Normal- und Schubspannungen) ist. In kartesischen Koordinaten kann Gleichung (8) beispielsweise für die x-Koordinate ausgedrückt werden mit:

$$\begin{aligned}
 & \text{(1)} \quad \text{(2)} \quad \text{(3)} \quad \text{(4)} \quad \text{(5)} \quad \text{(6)} \\
 & \rho \frac{\partial v_x}{\partial t} = \rho f_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(2\eta \frac{\partial v_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[\eta \left(\frac{\partial v_y}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\eta \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) \right] \\
 & - \rho \left(v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) \quad \text{(7)}
 \end{aligned} \tag{9}$$

Die einzelnen Terme haben jeweils eine physikalische Bedeutung. Term (1) ist die zeitliche Impulsänderung, Term (2) repräsentiert die Gravitationskraft, Term (3) ist der Druckgradient, die Terme (4) bis (6) beschreiben die viskosen Kräfte und Term (7) die Trägheitskräfte.

Unter der Annahme eines engen Spaltes, der üblicherweise bei Spritzgießteilen vorherrscht, können einige Terme vernachlässigt werden (2 ½D-Berechnung). Nach der Vereinfachung lauten die Impulsgleichungen für die drei Koordinatenrichtungen (z-Koordinate = Dickenrichtung):

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial p}{\partial x} &= \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) \\
 \frac{\partial p}{\partial y} &= \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) \\
 \frac{\partial p}{\partial z} &= 0
 \end{aligned} \tag{10}$$

Durch Integration der Kontinuitäts- und der Impulsgleichung sowie durch Vereinfachungen durch symmetrische Betrachtung des Strömungskanals kann eine vereinfachte Verknüpfung der beiden Gleichungen berechnet werden, welche als Basisgleichung für die Berechnung des Druckfeldes während der Füllphase dient:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(S_2 \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(S_2 \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 0, \tag{11}$$

wobei S_2 als Fluidität bezeichnet und nach Gleichung (12) berechnet wird:

$$S_2 = \int_0^h \frac{z^2}{\eta} dz \tag{12}$$

Die Fluidität ist direkt proportional zur Spalthöhe (ohne eingefrorene Randschicht) und verkehrt proportional zur Viskosität. Der Index 2 soll andeuten, dass es sich ausschließlich um eine zweidimensionale Strömung handelt.

3.3.1.3 Energiegleichung

Die Energiegleichung beschreibt die zeitliche Änderung der inneren Energie eines mit der Strömung mitbewegten Massepunkts durch drei verschiedene Ursachen: viskose Dissipation, Wärmeleitung und Kompressionsarbeit:

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \bar{v} \nabla T \right) = \beta T \left(\frac{\partial p}{\partial t} + \bar{v} \nabla p \right) + p \nabla \bar{v} + (\underline{\sigma} : \{\nabla \bar{v}\}) + \nabla(\lambda \nabla T) \quad (13)$$

Unter Vernachlässigung der viskoelastischen Effekte und unter der Annahme, dass die Wärmeleitfähigkeit λ konstant ist, vereinfacht sich Gleichung (13) zu:

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \bar{v} \nabla T \right) = \beta T \left(\frac{\partial p}{\partial t} + \bar{v} \nabla p \right) + \eta \dot{\gamma}^2 + \lambda \nabla^2 T \quad (14)$$

Wenn man die Vektorgleichung in kartesische Koordinaten umwandelt, erhält man:

$$\begin{aligned} \rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) &= \beta T \left(\frac{\partial p}{\partial t} + v_x \frac{\partial p}{\partial x} + v_y \frac{\partial p}{\partial y} + v_z \frac{\partial p}{\partial z} \right) \\ + \eta \dot{\gamma}^2 + \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + v_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + v_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) & \end{aligned} \quad (15)$$

Die einzelnen Terme haben wiederum physikalische Bedeutung. Term (1) beschreibt die zeitliche Änderung der Gesamtenergie und zusätzlich die Energie zufolge Konvektion in die x-, y- und z-Richtung. Term (2) charakterisiert die Energieänderung zufolge Kompression bzw. Expansion. Im Term (3) wird die dissipative Erwärmung aufgrund der Scherströmung berücksichtigt und Term (4) repräsentiert die Energieänderung durch Wärmeleitung in die drei Raumrichtungen.

Wenn z die Dickenrichtung des Strömungsspalts ist, so kann der konvektive Wärmetransport in diese Richtung ebenso vernachlässigt werden. Gleiches gilt für die Wärmeleitung in x- und y-Richtung. Somit bleibt nur die konvektive Wärmeänderung in den Strömungsrichtungen x und y, die Wärmeleitung normal dazu und die Scher-erwärmung übrig.

In der letzten Fassung lautet nun die (für 2 ½D) vereinfachte Energiegleichung:

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \eta \dot{\gamma}^2 + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}, \quad (16)$$

wobei gilt:

$$\dot{\gamma}^2 = \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_y}{\partial z} \right)^2 \quad (17)$$

3.3.2 Numerische Lösung für die Füllphase

Die numerische Lösung der vereinfachten Grundgleichungen für die Füllphase läuft für 2 ½D-Modelle im Wesentlichen in drei großen Abschnitten ab:

- Berechnung des Druckfeldes,
- Berechnung des Temperaturfeldes,
- Fortschreiten der Fließfront.

Für die Druckberechnung wird die Finite-Elemente-Methode verwendet, während die Temperaturberechnung mit Finiten Differenzen erfolgt. Für das Fortschreiten der Fließfront wird ein sogenannter Kontrollvolumen-Ansatz angewendet.

Die Gleichungen (11) und (16) müssen unter der Berücksichtigung folgender Randbedingungen gelöst werden:

- ◆ Der Druck an der Fließfront ist Null:

$$p = 0 \text{ an der Fließfront} \quad (18)$$

- ◆ Der Druck oder der Volumendurchsatz ist an den Stellen definiert, wo eingespritzt wird:

$$p = p_{in} \text{ oder } \dot{V} = \dot{V}_{in} \text{ am Einspritzpunkt} \quad (19)$$

- ◆ Der Druckgradient normal zu undurchdringlichen Begrenzungen ist Null:

$$\frac{\partial p}{\partial n} = 0 \text{ an der Wand} \quad (20)$$

- ◆ Die Temperatur an der Wand der Kavität oder innerhalb der Form ist definiert:

$$T = T_w \text{ bei } z = h \text{ oder } z = h + \delta \quad (21)$$

- ◆ Der Temperaturgradient in z-Richtung ist Null in der Symmetrieebene der Kavität:

$$\frac{\partial T}{\partial z} = 0 \text{ bei } z = 0 \quad (22)$$

- ◆ Die Schmelzetemperatur ist an den Einspritzpunkten definiert:

$$T = T_{in} \text{ am Einspritzpunkt} \quad (23)$$

Aufgrund der Abhängigkeit der Fluidität S_2 von der Viskosität, welche wiederum von der Temperatur und der Schergeschwindigkeit abhängt, müssten die Gleichungen (11) und (16) simultan gelöst werden. Für die numerische Lösung werden sie allerdings entkoppelt, wobei kleine Zeitinkremente gewählt werden. Zu einer bestimmten Zeit wird die Temperatur als konstant angenommen und das Druckfeld auf Basis der momentanen Viskosität berechnet. Bei ausreichend kleinen Zeitinkrementen liefert diese Methode zufriedenstellende Ergebnisse. [30]

Die Berechnungsphasen werden hier noch einmal detaillierter beschrieben.

- 1) Zuerst wird S_2 berechnet. Zu Beginn einer Berechnung wird der Viskositätswert bei Massetemperatur verwendet, andernfalls werden Schergeschwindigkeiten und Temperaturen aus dem vorhergehenden Berechnungsschritt herangezogen. Bei bekannter Fluidität wird Gleichung (11) unter Berücksichtigung der Randbedingungen (18), (19) und (20) berechnet. Mit den berechneten Drücken kann das Geschwindigkeitsfeld ermittelt werden. Daraus wiederum wird die Schergeschwindigkeit nach Gleichung (17) berechnet. Unter der Annahme einer konstanten Temperatur wird die Viskosität aktualisiert und damit die Fluidität erneut berechnet. Gleichung (11) wird noch einmal berechnet und der gesamte Prozess wiederholt. Es wird so lange iteriert, bis die Änderung des Druckfeldes bei zwei aufeinanderfolgenden Iterationen unterhalb einer Genauigkeitsschranke ist.
- 2) Nachdem die Druckberechnung konvergiert ist, werden die Geschwindigkeiten, die Schergeschwindigkeit und die Viskosität verwendet, um mit Gleichung (16) die konvektiven und dissipativen Wärmeströme zu berechnen. Konvektion und Dissipation werden als Wärmequellen behandelt und somit muss nur mehr das Wärmeleitungsproblem über die Dicke gelöst werden. Da nur ein 2D-Netz verwendet wird, werden über die Dicke Schichten angenommen. Über diese Schichten wird mit der Finite-Differenzen-Methode das Wärmeleitungsproblem gelöst. Als Ergebnis erhält man das Temperaturfeld über die Höhe in jedem Knoten. Mit der bekannten Temperatur werden nun die Viskositätswerte aktualisiert. Damit wird dann der Volumenstrom in jedes Kontrollvolumen an der Fließfront bestimmt.
- 3) Wenn der Volumenstrom in jedes Kontrollvolumen bekannt ist, ist es möglich vorherzusagen, welches im nächsten Zeitschritt gefüllt wird. Dem entsprechend schreitet die Fließfront fort.

Die Schritte 1) bis 3) werden so lange wiederholt, bis die Form gefüllt ist.

Im Folgenden wird kurz auf das Konzept des Kontrollvolumens eingegangen.

Bei diesem Schema wird jedem Knoten ein Volumen zugewiesen. Diese Kontrollvolumina sind durch Polygone definiert, die durch Verbindung der Mittelpunkte der Dreieckselemente entstehen (siehe Bild 20).

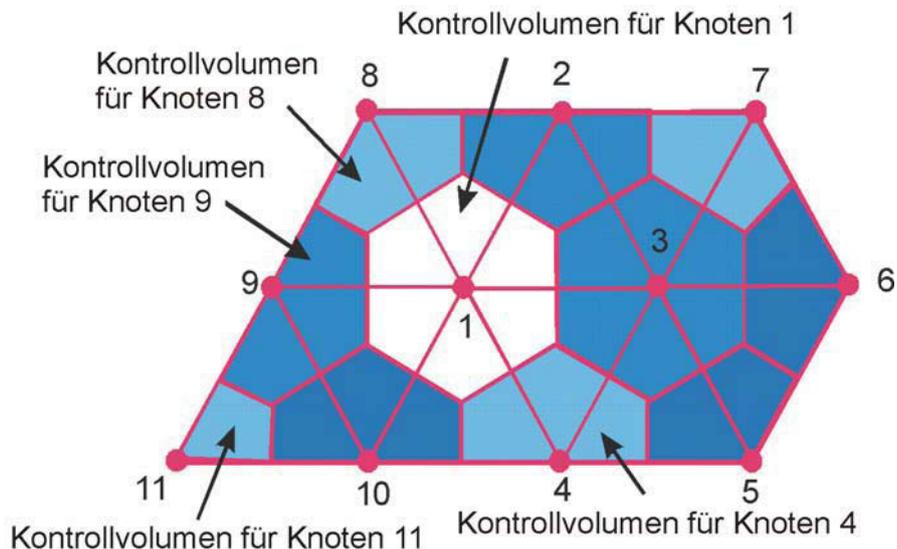


Bild 20: Kontrollvolumina und assoziierte Knoten (nach [30])

Nachdem die Gleichungen für das Druck- und Temperaturfeld gelöst worden sind, kann der Volumenstrom in jedes Kontrollvolumen berechnet werden. Wenn ein Knoten gefüllt ist, wird die Fließfront vorangetrieben, indem jeder Knoten, der mit dem zuletzt gefüllten verbunden ist, in die Fließfront mit einbezogen wird. Anhand eines kurzen Beispiels (Bild 21) wird dieser Vorgang illustriert. Vereinfachend wird angenommen, dass der Fließwiderstand in alle Richtungen gleich groß ist.

- 1) Knoten 1 – der Anspritzknoten – ist gefüllt. Die erste Annahme der Fließfront ist die Linie, welche alle Knoten verbindet, die am Knoten 1 hängen (Knoten 2, 7, 5, 3, 6 und 4). Dies ist die Fließfront zu Beginn. Aufgrund der Tatsache, dass diese Knoten gleich weit vom Knoten 1 entfernt sind, ist die Wahrscheinlichkeit für alle Knoten gleich, gefüllt zu werden.
- 2) Unter der Annahme, dass Knoten 2 der Anfangsfließfront als nächstes gefüllt wird, erweitert sich die Fließfront um alle Knoten, die mit Knoten 2 assoziiert sind. Allerdings werden die Knoten, die zu Knoten 2 gehören, später gefüllt, als die Knoten, die dem Knoten 1 zugeordnet sind. Daher wird als nächstes einer der Knoten 7, 5, 3, 6 oder 4 gefüllt.
- 3) Als nächster Knoten wird beispielsweise Knoten 5 gefüllt. Die Fließfront wird auf die umliegenden Knoten ausgeweitet. Der nächste Knoten an der Anfangsfließfront kann entweder 7, 3, 6 oder 4 sein.
- 4) Unter der Annahme, dass Knoten 6 als nächstes gefüllt wird, schreitet die Fließfront gemäß der Abbildung fort. In Folge kann Knoten 7, 3 oder 4 gefüllt werden.

- 5) Nach Füllung des Knoten 7 bleiben die Knoten 3 oder 4 übrig, die zunächst gefüllt werden.
- 6) Als nächstes wird Knoten 3 gefüllt.
- 7) Nachdem der letzte Knoten (Knoten 4) der ursprünglichen Fließfront gefüllt ist, sieht die Fließfront entsprechend Bild 21–7 aus. Einer der Knoten, die mit Knoten 2 assoziiert sind, wird als nächstes gefüllt und der Zyklus des „Knoten-Hüpfens“ wird fortgesetzt, bis die Form gefüllt ist.

Bei der Berechnung der Schmelzeströme in die einzelnen Kontrollvolumina wird die Kompressibilität in Folge von Druck- und Temperaturänderungen berücksichtigt.

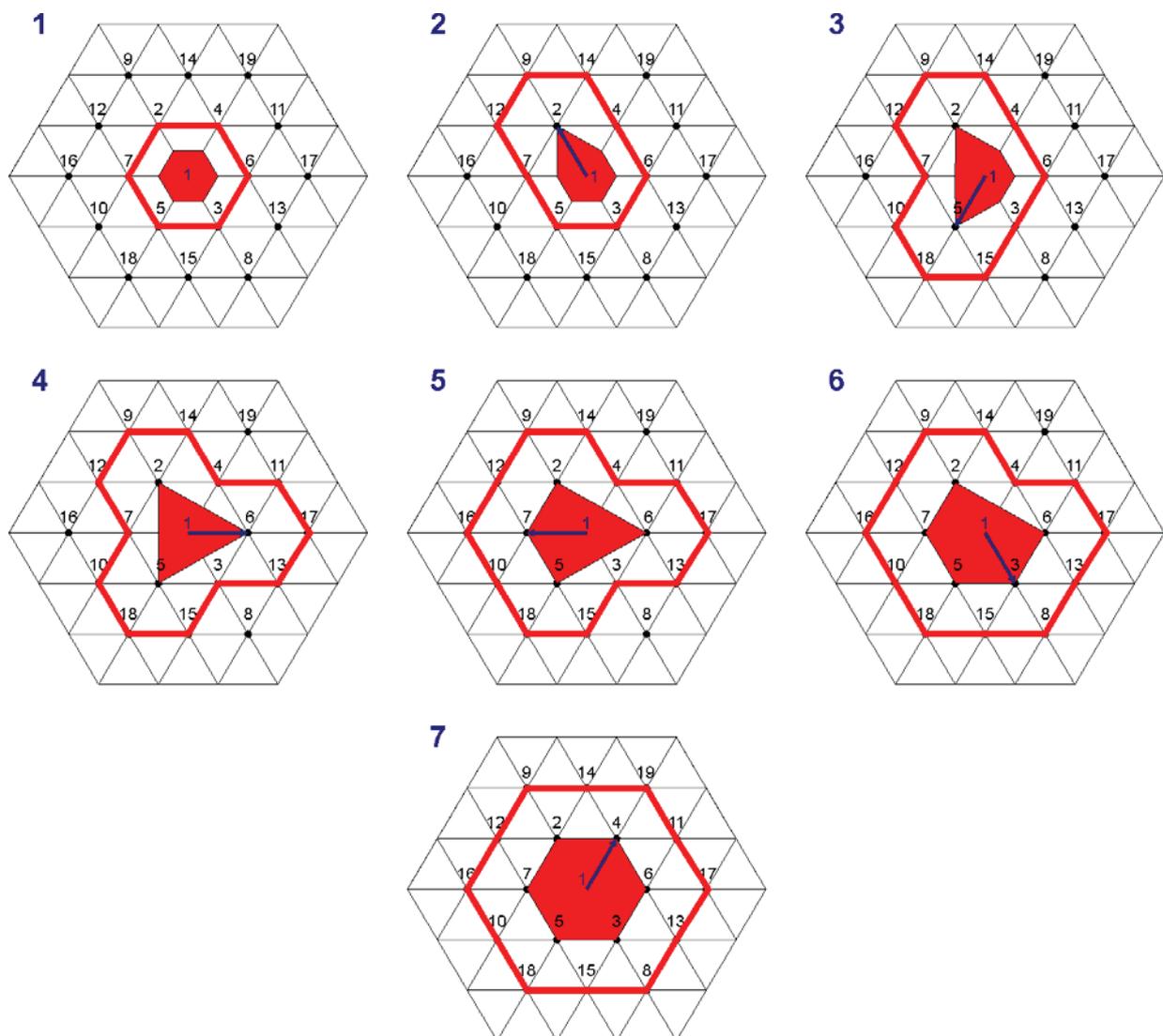


Bild 21: Fortschreiten der Fließfront in den einzelnen Stadien 1 bis 7 (nach [30])

3.4 Nachdruckphase

Nachdem die Kavität vollständig gefüllt ist, beginnt die Nachdruckphase. Während der Einspritzvorgang über die Schneckenvorlaufgeschwindigkeit gesteuert wird, ist in der Nachdruckphase der Druck die Regelgröße. Der Umschaltzeitpunkt zwischen Einspritzen und Nachdruck muss sorgfältig gewählt werden. Wenn zu früh auf Nachdruck umgeschaltet wird, ist die Form noch nicht ausreichend gefüllt und es kommt zu einem Stop der Fließfront beim Umschalten, was zu Oberflächenfehlern führt (Fließmarkierung). Erfolgt die Umschaltung zu spät, so kommt es zu einer Druckspitze sobald die Form gefüllt ist und die Schnecke noch immer mit vorgegebener Geschwindigkeit fahren sollte. Üblicherweise wird der Umschaltzeitpunkt knapp vor dem Ende der volumetrischen Formfüllung (ca. 98 %) eingestellt. Durch die elastische Expansion der während des Einspritzens komprimierten Kunststoffschmelze wird die Form ausgefüllt.

3.4.1 Grundgleichungen für die Nachdruckphase

Ebenso wie in der Füllphase dienen die drei Erhaltungssätze als Ausgangsbasis für die Berechnungen während der Nachdruckphase. Im Wesentlichen werden die gleichen Vereinfachungen getroffen wie in der Füllphase. Der einzige Unterschied besteht in der Berücksichtigung der Kompressibilität in den Formeln [30].

3.4.1.1 Kontinuitätsgleichung

Die Ausgangsgleichung lautet gleich wie bei der Füllphase:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + (\nabla \cdot \rho \vec{v}) = 0, \quad (24)$$

bzw. in kartesischen Koordinaten:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\rho \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) - \left(v_x \frac{\partial \rho}{\partial x} + v_y \frac{\partial \rho}{\partial y} + v_z \frac{\partial \rho}{\partial z} \right) \quad (25)$$

Die Dichte ist eine Zustandsvariable und vom Druck p und der Temperatur T abhängig. Durch Anwendung der Kettenregel erhält man:

$$\frac{\partial \rho}{\partial x} = \left(\frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_T \frac{\partial p}{\partial x} + \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \frac{\partial T}{\partial x}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial \rho}{\partial y} &= \left(\frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_T \frac{\partial p}{\partial y} + \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \frac{\partial T}{\partial y} \\ \frac{\partial \rho}{\partial z} &= \left(\frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_T \frac{\partial p}{\partial z} + \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \frac{\partial T}{\partial z} \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} &= \left(\frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_T \frac{\partial p}{\partial t} + \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \frac{\partial T}{\partial t}\end{aligned}\tag{26}$$

Durch Einsetzen der obigen Ausdrücke in (25) erhält man nach einer Umformung:

$$\begin{aligned}0 &= \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial t} \left(\frac{\partial p}{\partial t} + v_x \frac{\partial p}{\partial x} + v_y \frac{\partial p}{\partial y} + v_z \frac{\partial p}{\partial z} \right) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T} \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \\ &+ \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right)\end{aligned}\tag{27}$$

Die Dichte entspricht dem Kehrwert des spezifischen Volumens. Daher gilt:

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial p} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial p} \left(\frac{1}{v} \right) = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial v} \left(\frac{1}{v} \right) \frac{\partial v}{\partial p} = \frac{1}{\rho} \left(-\frac{1}{v^2} \right) \frac{\partial v}{\partial p} = -\frac{1}{v} \frac{\partial v}{\partial p} = \kappa,\tag{28}$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial T} \left(\frac{1}{v} \right) = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial v} \left(\frac{1}{v} \right) \frac{\partial v}{\partial T} = \frac{1}{\rho} \left(-\frac{1}{v^2} \right) \frac{\partial v}{\partial T} = -\frac{1}{v} \frac{\partial v}{\partial T} = -\beta,\tag{29}$$

wobei κ die isotherme Kompressibilität und β den isobaren kubischen Wärmeausdehnungskoeffizienten darstellen.

Schließlich folgt die Gleichung für die Nachdruckphase mit Berücksichtigung der Kompressibilität der Schmelze:

$$\begin{aligned}0 &= \kappa \left(\frac{\partial p}{\partial t} + v_x \frac{\partial p}{\partial x} + v_y \frac{\partial p}{\partial y} + v_z \frac{\partial p}{\partial z} \right) - \beta \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \\ &+ \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right)\end{aligned}\tag{30}$$

Da in der Nachdruckphase die Kavität volumetrisch gefüllt ist, erfolgt der Druck eher hydrostatisch. Daraus folgt, dass die Druckgradienten $\partial p/\partial x$ und $\partial p/\partial y$ sehr viel kleiner sind als während der Füllphase. Aus der Impulsgleichung (Gleichung (10)) ist bekannt, dass $\partial p/\partial z = 0$. Daraus folgen niedrige Geschwindigkeiten während des Nachdrucks. Daher wird angenommen, dass die Druck-Konvektions-Terme vernachlässigbar sind. Schließlich erhält man für die Nachdruckphase folgende Gleichung:

$$0 = \kappa \frac{\partial p}{\partial t} - \beta \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \quad (31)$$

3.4.1.2 Impulsgleichung

Die Berücksichtigung der Kompressibilität hat keinen Einfluss auf die Endform der Impulsgleichung. Sie lautet daher gleich wie Gleichung (10):

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial x} &= \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial p}{\partial y} &= \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial p}{\partial z} &= 0 \end{aligned} \quad (32)$$

3.4.1.3 Energiegleichung

Für die Energiebetrachtung während der Nachdruckphase gelten wiederum die gleichen Bedingungen wie in der Füllphase, allerdings mit Berücksichtigung der Kompressibilität. Die Ausgangsgleichung (33) ist wiederum gleich wie bei der Füllphase:

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \nabla T \right) = \beta T \left(\frac{\partial p}{\partial t} + \vec{v} \nabla p \right) + p \nabla \vec{v} + (\underline{\sigma} : \{\nabla \vec{v}\}) + \nabla (\lambda \nabla T) \quad (33)$$

Während Druck, Konvektion und Wärmeleitung in x- und y-Richtung wie bei der Füllphase vernachlässigt werden, bleibt in der Nachdruckphase der zeitliche Druckgradient $\partial p/\partial t$ erhalten. Diese Annahme trifft vor allem für den Zeitpunkt zu, in dem die Kavität volumetrisch gefüllt ist und der Druckgradient zufolge des Fließwiderstandes in einen annähernd hydrostatischen Zustand übergeht. Weiters wird die Konvektion in Dickenrichtung z vernachlässigt. Aus diesen Vereinfachungen folgt für die Nachdruckphase Gleichung (34):

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \beta T \frac{\partial p}{\partial t} + \eta \dot{\gamma}^2 + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}, \quad (34)$$

mit

$$\dot{\gamma}^2 = \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_y}{\partial z} \right)^2. \quad (35)$$

Diese Form der Energiegleichung wird im Programm *MPI* für die numerische Berechnung der Nachdruckphase verwendet.

Die zweite notwendige Gleichung erhält man aus der Kopplung von Kontinuitäts- und Energiegleichung.

Unter der Annahme, dass $\partial p / \partial t$ unabhängig von z ist, ergibt sich folgende Grundgleichung für die Berechnung der Druckbedingungen während der Nachdruckphase:

$$0 = \bar{\kappa} H \frac{\partial p}{\partial t} - \int_0^H \frac{\beta}{\rho c_p} \left(\eta \dot{\gamma}^2 + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) dz - \frac{\partial}{\partial x} \left(S_2 \frac{\partial p}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(S_2 \frac{\partial p}{\partial y} \right) \quad (36)$$

Dabei ist S_2 wiederum die Fluidität nach Gleichung (37):

$$S_2 = \int_0^h \frac{z^2}{\eta} dz \quad (37)$$

Für diese Gleichung wurde eine mittlere Kompressibilität über die Dicke nach Gleichung (38) definiert:

$$\bar{\kappa} = \frac{1}{H} \int_0^H \kappa dz \quad (38)$$

3.4.2 Numerische Lösung für die Nachdruckphase

Für die numerische Analyse der Nachdruckphase müssen Gleichung (34) und (36) gelöst werden. Da die zeitliche Änderung des Druckes sehr groß sein kann (beispielsweise bei volumetrischer Füllung der Form oder bei einer Änderung des Druckes, um ein bestimmtes Nachdruckprofil zu realisieren), müssen sehr kleine Zeitschritte für die Lösung verwendet werden. Um die notwendige CPU-Leistung zu reduzieren, werden Temperatur- und Drucklösung nicht in jedem Schritt zeitgleich

durchgeführt. Moldflow verwendet statt dessen eine isotherme Periode (Defaultwert von 0.05 s), während der die Temperatur als konstant angenommen wird. In diesem Zeitschritt werden unter Umständen mehrere Iterationen für das Druckfeld berechnet, bevor wieder das Temperaturfeld aktualisiert wird.

Die Berechnungen werden mit folgenden Randbedingungen durchgeführt:

- ◆ Der Druck ist an den Stellen definiert, wo eingespritzt wird:

$$p = p_{in} \text{ am Einspritzpunkt} \quad (39)$$

- ◆ Der Druckgradient normal zu undurchdringlichen Begrenzungen ist Null:

$$\frac{\partial p}{\partial n} = 0 \text{ an der Wand} \quad (40)$$

- ◆ Die Temperatur an der Wand der Kavität oder innerhalb der Form ist definiert:

$$T = T_w \text{ bei } z = h \text{ oder } z = h + \delta \quad (41)$$

- ◆ Der Temperaturgradient in z-Richtung ist Null in der Symmetrieebene der Kavität:

$$\frac{\partial T}{\partial z} = 0 \text{ bei } z = 0 \quad (42)$$

- ◆ Die Schmelztemperatur ist an den Einspritzpunkten definiert:

$$T = T_{in} \text{ am Einspritzpunkt} \quad (43)$$

Die wesentlichen Schritte der Berechnung sind im Folgenden aufgelistet:

- 1) Berechnung des Druckfeldes zu einer neuen Zeit t_{n+1} .
- 2) Berechnung der Temperaturänderung in Folge der Kompression des Materials.
- 3) Berechnung der Dichte und deren Änderung zufolge Druck und Temperatur unter Verwendung der pVT-Daten und der Ergebnisse aus Schritt 1) und 2).
- 4) Aktualisierung der Viskosität und in weiterer Folge der Fluidität S_2 .
- 5) Erhöhung des Zeitschrittes.
- 6) Sofern die Zeit innerhalb einer isothermen Periode ist – wieder Beginn mit Schritt 1). Andernfalls geht es mit Schritt 7) weiter.

- 7) Berechnung der Temperaturänderung in Folge von Kompression, Konvektion, Dissipation und Wärmeleitung.
- 8) Aktualisierung der Viskosität.
- 9) Berechnung der Druckänderung in Folge der Temperaturänderung.
- 10) Berechnung der Dichte unter Verwendung der pvT-Daten.
- 11) Erhöhung des Zeitschrittes.
- 12) Wenn die Nachdruckzeit beendet ist – Berechnungsstop, andernfalls wieder Beginn mit Schritt 1).

3.5 Kühlberechnung

Für die Berechnung der Werkzeugkühlung verwendet Moldflow die Boundary-Element-Methode (BEM). Bei der BEM-Berechnungsmethode werden nur Flächen diskretisiert (Formteilflächen, Kühlkreisläufe etc.). Es ist keine vollständige dreidimensionale Diskretisierung des Werkzeuges notwendig.

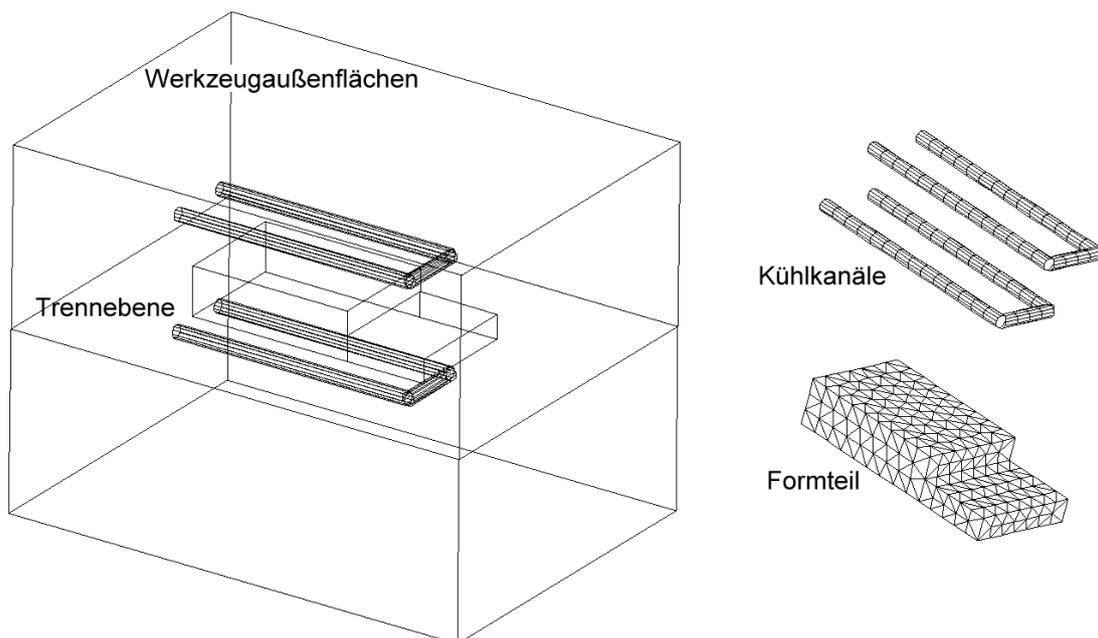


Bild 22: Schematische Darstellung des Berechnungsmodells bei einem 2 ½D-Modell (Formteil: diskretisiert mit Dreieckselementen, Kühlkreisläufe: diskretisiert mit eindimensionalen Beam-Elementen)

Für die Simulation wird das Formteil mit einer der drei möglichen Netztypen modelliert. Die Kühlkreise werden mit eindimensionalen Elementen, denen ein Querschnitt zugeordnet wird, ausgeführt (Beam-Elemente). Des Weiteren können Werkzeugbereiche mit erhöhter Wärmeleitfähigkeit („Inserts“), die Werkzeugaußenflächen und Trennebenen modelliert werden (Bild 22).

Ein wesentliches Ergebnis der thermischen Werkzeugberechnung ist eine über den Zyklus gemittelte Werkzeugoberflächentemperatur. Diese kann in sequentiellen Analysen – Berechnung der Füll- und Nachdruckphase – als Werkzeugwandtemperatur verwendet werden.

Im allgemeinen werden Kühlberechnungen in MPI getrennt von der Füllberechnung durchgeführt. Dadurch wird der konvektive und dissipative Energietransport während der Füll- und Nachdruckphase vernachlässigt.

3.5.1 Grundgleichungen für die Kühlberechnung

Die Kühlung von Spritzgusswerkzeugen findet über Wärmeleitung statt, wobei die Wärmeleitung in alle drei Raumrichtungen zu berücksichtigen ist. Die allgemeine beschreibende Differentialgleichung für die Temperaturverteilung im Werkzeug lautet:

$$\rho_w c_{p,w} \frac{\partial T_w}{\partial t} = \lambda_w \left[\frac{\partial^2 T_w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_w}{\partial z^2} \right], \quad (44)$$

wobei der Index w für Werkzeug steht. Da der Spritzgießprozess zyklisch abläuft, ist die Werkzeugtemperatur eine Funktion der Zeit.

Die oben genannte Gleichung (44) kann noch vereinfacht werden, um den Rechenaufwand zu verringern. Dazu wird die Werkzeugtemperatur in zwei Komponenten aufgeteilt. Eine dreidimensionale stationäre Komponente ($T_{w,s}$) und eine zeitabhängige Komponente ($T_{w,t}$):

$$T_w(x,y,z,t) = T_{w,s}(x,y,z) + T_{w,t}(x,y,z,t) \quad (45)$$

Näherungsweise wird in MPI der instationäre Term vernachlässigt. Es gilt somit:

$$T_{w,t} = 0 \text{ und } T_w = T_{w,s}(x,y,z) \quad (46)$$

Um eine allgemeine Gleichung für die stationäre dreidimensionale Temperaturverteilung des Werkzeugs aufzustellen, substituiert man T_w mit $T_{w,s}$ in Gleichung (44) und erhält unter Berücksichtigung, dass $T_{w,s}$ keine Funktion der Zeit ist:

$$\frac{\partial^2 T_{w,s}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{w,s}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_{w,s}}{\partial z^2} = 0 \quad (47)$$

Näherungsweise kann man auch die zeitabhängige Komponente $T_{w,t}$ berücksichtigen. Dabei trifft man die Annahme, dass die zeitliche Änderung der Temperatur in der Ebene des Formteiles sehr gering ist. Man berücksichtigt nur den Anteil in die z -

Richtung, d. h. $T_{W,t} = T_{W,t}(z,t)$. Damit erhält man für die Beschreibung des zeithabhängigen Terms folgende Differentialgleichung:

$$\rho_W c_{p,W} \frac{\partial T_{W,t}}{\partial t} = \lambda_W \frac{\partial^2 T_{W,t}}{\partial z^2} \quad (48)$$

Die Berechnung des zeitabhängigen Anteiles ist in Moldflow jedoch nicht implementiert. In MPI wird auf Basis eines gemittelten Wärmestroms die über den Zyklus gemittelte Temperaturverteilung im Werkzeug berechnet.

3.5.1.1 Anfangs- und Randbedingungen

An der Werkzeugoberfläche, die mit Schmelze in Kontakt kommt, kann der instationäre Wärmetransport wie folgt beschrieben werden:

$$-\lambda_w \frac{\partial T_{w,s}}{\partial n} = \dot{q}, \quad (49)$$

(n Flächennormale, \dot{q} instationärer Wärmestrom, der vom Formteil kommt).

Gleichung (49) kann wie folgt umgeschrieben werden:

$$-\lambda_w \frac{\partial T_{w,s}}{\partial n} = \bar{q} = \frac{1}{t_f + t_N + t_K + t_o} \left[\int_0^{t_f + t_N + t_K + t_o} \dot{q}(t) dt \right], \quad (50)$$

(t_f Füllzeit, t_N Nachdruckzeit, t_K Kühlzeit, t_o Öffnungszeit).

Während der Werkzeugöffnungsphase ist der Wärmestrom \dot{q} sehr klein und kann daher vernachlässigt werden.

Der Wärmestrom an der Schmelze-Werkzeuggrenzfläche $\dot{q}(t)$ kann über die eindimensionale Wärmeleitungsgleichung ermittelt werden:

$$\rho_F c_{p,F} \frac{\partial T_F}{\partial t} = \lambda_F \left[\frac{\partial^2 T_F}{\partial s^2} \right], \quad (51)$$

(T_F Schmelztemperatur, s Wanddickenkoordinate).

Als Anfangsbedingung wird entweder eine konstante Massetemperatur oder die Temperaturverteilung am Ende der Füllphase verwendet. Ferner wird zwischen dem Werkzeug und dem Formteil ein idealer Wärmeübergang angenommen. Für die Lösung von Gleichung (51) wird eine über dem Zyklus gemittelte Werkzeugwandtemperatur als Randbedingung verwendet.

An der Kühlkanaloberfläche lautet die Randbedingung:

$$\lambda_w \frac{\partial T_w}{\partial n} = \alpha_{TM} (T - T_{TM}). \quad (52)$$

(α_{TM} Wärmeübergangskoeffizient zwischen dem Werkzeug und dem Kühlmedium, T_{TM} Kühlmediumstemperatur).

Für die Werkzeugaußenflächen, die mit der Umgebungsluft in Kontakt stehen, gilt ebenfalls Gleichung (52) mit Ausnahme des Wärmeübergangskoeffizienten, der in diesem Fall für freie Konvektion bestimmt werden muss.

3.5.2 Iterative Berechnung der mittleren Werkzeugwandtemperatur

Gleichung (47) benötigt für die Lösung einen über die Zykluszeit gemittelten Wärmestrom. Dieser wird wiederum über die eindimensionale Wärmeleitungsgleichung (51) für das Formteil ermittelt. Jedoch wird für die Lösung der Wärmeleitungsgleichung für das Formteil die Werkzeugoberflächentemperatur als Randbedingung benötigt. Dies erfordert für die Lösung der beiden Gleichungen eine iterative Vorgehensweise.

Die Berechnung erfolgt nach folgenden Schritten:

- 1) Um die Iteration zu beginnen, wird eine gemittelte Werkzeugwandtemperatur angenommen. Näherungsweise kann diese der Kühlmittelinlaufstemperatur gleichgesetzt werden.
- 2) Es wird die eindimensionale instationäre Wärmeleitungsgleichung für die Schmelze (Gleichung (51)) mit einer über den Zyklus gemittelten Werkzeugwandtemperatur gelöst. In weiterer Folge wird nach Gleichung (50) ein gemittelter Wärmestrom berechnet.
- 3) Mit dem gemittelten Wärmestrom wird Gleichung (47) gelöst, um eine über den Zyklus gemittelte Werkzeugwandtemperatur zu erhalten.
- 4) Schritte 2) und 3) werden solange durchgeführt, bis es zu einer Konvergenz der Werkzeugwandtemperaturverteilung kommt.

3.6 Berechnung von Schwindung und Verzug

3.6.1 Schwindung

Moldflow verwendet für die Berechnung der Schwindung Ergebnisse aus den einzelnen zuvor erwähnten Prozessphasen. Bei Standardberechnungen mit dem Mittelflächen- oder Fusion-Modell werden nur zweidimensionale Elemente eingesetzt.

Um dennoch Ergebnisse über die Dicke des Bauteils zu erhalten, wird die Dicke in Schichten aufgeteilt. Dort wo die Knoten des Dreieckelements liegen, sind an den Schichtgrenzen Gitterpunkte definiert, an denen Berechnungsergebnisse ausgegeben werden. Moldflow rechnet bei Standardeinstellungen mit 12 Schichten über die Dicke, wobei die Anzahl vom Anwender vorgegeben werden kann.

Folgende Ergebnisse dienen zur Berechnung der Schwindung:

- Unbehinderte Volumenschwindung während der Nachdruckphase
- Abkühlgeschwindigkeit dT/dt an jedem Gitterpunkt zum Zeitpunkt des Erstarrens
- Schubspannung an jedem Gitterpunkt zum Zeitpunkt des Erstarrens
- Fließwinkel an jedem Gitterpunkt zum Zeitpunkt des Erstarrens

Der Ansatz, den Moldflow für die Berechnung heranzieht, unterteilt die Gesamtschwindung in einzelne Einflussgrößen, die in Summe zur resultierenden Schwindung beitragen. Die vier berücksichtigten Größen sind:

- Volumenschwindung
- Kristallisation
- Geometriebedingte Behinderung der Schwindung
- Orientierungseffekte

Die einzelnen Faktoren werden nun im Detail erläutert.

Volumenschwindung

Während der Füll-, Nachdruck- und Kühlphase wird für jedes Element die Volumenschwindung auf Basis des pvT -Verhaltens bei Gleichgewichtsbedingungen (d.h. bei nahezu konstantem Druck und konstanter Temperatur) berechnet. Dabei wird der zeitliche Verlauf von Druck und Temperatur mitberücksichtigt. Das entsprechende pvT -Verhalten wurde bereits in Kapitel 2.3.1 vorgestellt.

Kristallisation

Gleichgewichts- pvT -Daten sind nicht ausreichend, um die Volumenschwindung von teilkristallinen Kunststoffen zu beschreiben. Der Betrag der Schwindung hängt auch vom Kristallisationsgrad ab. Der wesentlichste Einflussfaktor auf die Kristallisation ist die Abkühlgeschwindigkeit, wobei diese einerseits von der Werkzeugtemperatur und andererseits von der Wandstärke der Formteile abhängt. Es gilt dabei, dass eine hohe Abkühlgeschwindigkeit zu geringerer Kristallisation führt und umgekehrt.

Geometriebedingte Behinderung der Schwindung

Während das Formteil in der Form ist, wird davon ausgegangen, dass in Ebenenrichtung keine Kontraktion erfolgen kann, sondern nur in Dickenrichtung. Beim Schwinden bauen sich Spannungen im Formteil auf, vor allem in den Bereichen, in denen die Verformung behindert wird. Die Spannungen relaxieren, wobei der zeitliche Temperaturverlauf während der Füll-, Nachdruck- und Kühlphase die Geschwindigkeit der Relaxation beeinflusst.

Orientierung

Die Polymermoleküle in einer Kunststoffschmelze richten sich bei einer Scherströmung in Fließrichtung aus. Das Ausmaß der Orientierung hängt von der Schergeschwindigkeit und der Temperatur ab. Wenn das Material einfriert, bevor die Moleküle relaxieren konnten, so bleibt die Orientierung zu diesem Zeitpunkt „eingefroren“. Die Orientierung wird dabei in Moldflow für jeden Gitterpunkt i über die Bauteildicke berechnet. Die dafür benötigten Größen sind:

- Schubspannung τ_i
- Abkühlgeschwindigkeit $(dT/dt)_i$
- Fließwinkel θ_i relativ zur lokalen x-Achse jedes Elements

Die Orientierung für einen Knoten ergibt sich durch Aufsummieren der Orientierungen in den Gitterpunkten über die Dicke des Elements. Das Material schwindet unterschiedlich in den Richtungen parallel und normal zur Orientierung.

Die zuvor beschriebenen Faktoren werden durch verschiedene Verarbeitungsparameter beeinflusst. Bild 23 zeigt die Auswirkung verschiedener Maschinen- bzw. Prozesseinstellungen auf das Schwindungsverhalten. Es wird dabei immer nur ein Parameter verändert:

- Nachdruckzeit
- Massetemperatur
- Einspritzgeschwindigkeit
- Nachdruckhöhe
- Werkzeugtemperatur
- Wanddicke des Formteils

Alle anderen Prozessgrößen werden konstant gehalten.

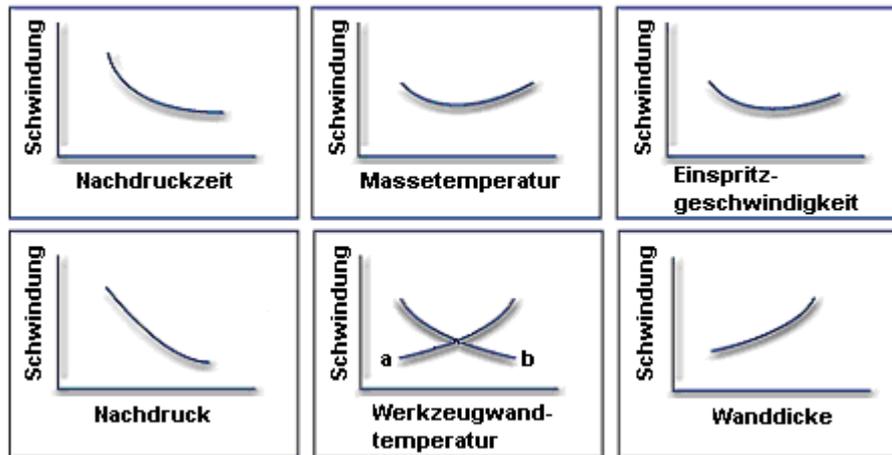


Bild 23: Einflussfaktoren für das Schwindungsverhalten

◆ *Nachdruckzeit*

Mit zunehmender Nachdruckzeit nimmt die Schwindung zunächst ab und bleibt schließlich auf einem konstanten Wert. Zuerst wird Material in die Kavität nachgedrückt, um die Volumenkontraktion aufgrund der Abkühlung im Werkzeug zu kompensieren. Ab dem Zeitpunkt, wo der Anschnitt einfriert und daher keine Schmelze mehr in die Form gelangt, bringt ein Aufrechterhalten des Nachdrucks keine Verbesserung im Schwindungsverhalten.

◆ *Massetemperatur*

Bild 23 zeigt starke Schwindung bei niedrigen und bei hohen Massetemperaturen mit einem Minimum der Kurve bei mittleren Temperaturen. Bei niedriger Massetemperatur ist die Schmelzeviskosität so hoch, dass es schwierig ist, einen gleichmäßigen Nachdruck über das ganze Formteil aufzubringen. Mit zunehmender Temperatur sinkt die Viskosität, wodurch der Nachdruck besser wirken kann. Bei einem weiteren Anstieg der Massetemperatur braucht jedoch der Anschnitt immer länger zum Einfrieren. Wenn dabei die Nachdruckzeit überschritten wird, kann die thermische Schwindung nicht vollkommen kompensiert werden, was in der Kurve zum Steigen der Schwindung bei hohen Massetemperaturen führt.

◆ *Einspritzgeschwindigkeit*

Unter der Annahme eines konstanten Nachdruckniveaus ist bei niedrigen Einspritzgeschwindigkeiten die Schwindung groß, weil die Randschichten schneller einfrieren und der Widerstand für einen gleichmäßig wirkenden Nachdruck zu groß ist. Mit zunehmender Einspritzgeschwindigkeit verringert sich der Anteil der eingefrorenen Randschicht und die Schwindung wird geringer. Bei einer weiteren Zunahme der Einspritzgeschwindigkeit kehrt sich der Effekt wieder um, weil Orientierungseffekte zunehmen, die eine größere Schwindung bewirken.

◆ *Nachdruckhöhe*

Je höher der Nachdruck gewählt wird, umso geringer ist die resultierende Schwindung. Limitierender Faktor ist hier die Schließkraft der Spritzgießmaschine.

◆ *Werkzeugwandtemperatur*

Bei einer Veränderung der Werkzeugwandtemperatur können unterschiedliche Schwindungsphänomene beobachtet werden.

a) Zunahme der Schwindung: Bei gleicher Nachdruckzeit kann bei höherer Werkzeugtemperatur das Material nicht bis zum Einfrieren nachgedrückt werden, da die Abkühlrate zu gering ist. Zusätzlich wird der Effekt bei teilkristallinen Thermoplasten dadurch verstärkt, dass bei einer geringeren Abkühlrate der Kristallisationsgrad zunimmt, was zu einer weiteren Erhöhung der Schwindung führt.

b) Abnahme der Schwindung: Bei niedriger Werkzeugwandtemperatur kühlt das Formteil rasch ab und der Anschnitt friert schneller ein. Die Schmelzeviskosität ist so hoch, dass es schwierig ist, bis zum Siegelzeitpunkt einen gleichmäßigen Nachdruck über das ganze Formteil aufzubringen. Mit zunehmender Temperatur sinkt die Viskosität und der Anschnitt ist länger offen. Bei ausreichender Nachdruckzeit kann der Nachdruck besser wirken. Dies führt zu einer Abnahme der Schwindung mit zunehmender Werkzeugwandtemperatur.

◆ *Wandstärke*

Die Zunahme der Schwindung mit größerer Wandstärke lässt sich mit den gleichen Effekten erklären wie bei der Werkzeugtemperatur.

3.6.2 Verzug

Während der Füllung des Werkzeuges und der Abkühlung des Formteiles kommt es zur Ausbildung von Eigenspannungen. Grundsätzlich kann man zwei Quellen für Eigenspannungen identifizieren. Erstens sind das Spannungen, die durch die Strömung in der Füll- und Nachdruckphase verursacht werden. Zweitens ergeben sich Spannungen durch die Abkühlung unter Druck. Die fließinduzierten Spannungen sind im Vergleich zu den druckinduzierten äußerst gering [2]. Bei einer asymmetrischen Verteilung der Eigenspannungen kommt es zum Verzug des Formteiles.

Unter Verzug wird die Abweichung der Gestalt des Formteiles von jener der Sollgeometrie verstanden. Würde jedes Volumenelement des Formteiles bei der Abkühlung die selbe Schwindung aufweisen, so wäre eine reine Verkleinerung ohne Änderung der Gestalt die Folge. Dem zufolge tritt Verzug sowohl durch lokal unterschiedliche Schwindung im Formteil als auch durch richtungsabhängige Schwindung auf. Auswirkungen des Verzuges sind das Verwölben und Verwinden von Flächen, sowie die Änderung von Winkelmaßen. Die Schwindungsunterschiede im Formteil werden durch

- lokal unterschiedliche Temperaturverhältnisse,
- lokal unterschiedliche Druckverhältnisse und
- Werkstoffanisotropie

verursacht, wobei sich die einzelnen Effekte überlagern.

Für die Berechnung des Verzuges mit FE-Simulationsprogrammen bieten sich zwei verschiedene Berechnungsansätze an, die beide in Moldflow Plastics Insight™ verwendet werden:

- Schwindung zufolge Restdehnung
- Schwindung zufolge Restspannung

Im Folgenden wird auf beide Ansätze näher eingegangen, wobei die Dehnungsbetrachtung immer mehr von der Spannungsbetrachtung abgelöst wird, was an der höheren Berechnungsgenauigkeit des Spannungsansatzes liegt.

3.6.2.1 Berechnungsansatz über Dehnungsbetrachtung

Bei der Dehnungsbetrachtung wird für die Bestimmung des Verzuges von unverstärkten Thermoplasten ein empirisches Schwindungsmodell mit experimentell bestimmten Schwindungskoeffizienten verwendet [64]. Das Schwindungsmodell bestimmt die Schwindung des Formteiles über die Schwindungen der Elemente in und normal zur Orientierungsrichtung entsprechend der folgenden Gleichungen:

$$S'' = a_1 M_v + a_2 M_K + a_3 M_B + a_4 M_o'' + a_5, \quad (53)$$

$$S^\perp = b_1 M_v + b_2 M_K + b_3 M_B + b_4 M_o^\perp + b_5, \quad (54)$$

mit

- M_v Volumetrische Schwindung,
- M_K Maß für die Kristallinität,
- M_B Effekt durch Schwindungsbehinderung im Werkzeug,
- M_o Maß für die Orientierung,
- a_i Schwindungskoeffizienten in Orientierungsrichtung,
- b_i Schwindungskoeffizienten normal zur Orientierungsrichtung.

Die Schwindungsdaten werden experimentell für einen Bereich von Prozessbedingungen (Einspritzgeschwindigkeit, Massetemperatur, Werkzeugtemperatur, Nachdruck, Kühlzeit) und für verschiedene Formteilmiddicken ermittelt. Werden diese Einstellungen und Geometrien mit dem Simulationsprogramm nachgerechnet, so können über entsprechende Modelle die Werte M_i bestimmt werden. Die Schwindungskoeffizienten a_i und b_i werden über lineare Regression mit den gemessenen experimentellen Daten bestimmt.

Als Versuchswerkzeug dient eine einfache Rechteckplatte, die über einen Filmanguss angespritzt wird und mit entsprechender Messsensorik (Druckaufnehmer, Temperaturfühler) ausgestattet ist (siehe Bild 24).

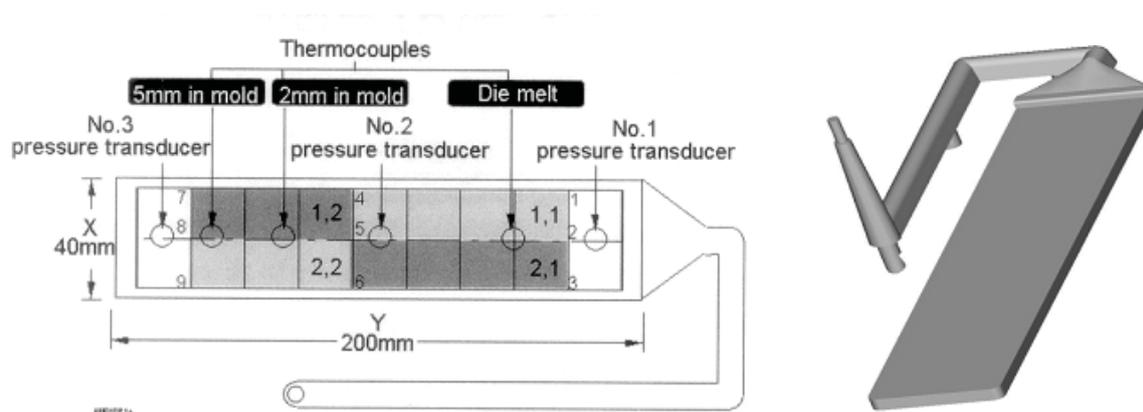


Bild 24: Schwindungswerkzeug zur Ermittlung von experimentellen Schwindungswerten

Wird eine thermische Werkzeugberechnung durchgeführt, so kann der Einfluss einer ungleichmäßigen Wandtemperatur in die Verzugsrechnung mit einfließen. Bei einer unterschiedlichen oberen und unteren Werkzeugtemperatur wird die Schwindungsdifferenz zwischen der Ober- und Unterseite berechnet und so der Effekt unterschiedlicher Werkzeugtemperaturen berücksichtigt.

Basierend auf vorangegangenen rheologischen Berechnungen, thermischen Berechnungen und den experimentell ermittelten Schwindungskoeffizienten werden volumetrische, isotrope und richtungsabhängige Schwindungen für jedes finite Element einzeln und unabhängig von den Nachbarelementen ermittelt. Erst die Berechnung des Verzuges kombiniert die Schwindungswerte mit der Steifigkeit der Elemente. Das Endergebnis ist die Gesamtverformung des Formteils.

3.6.2.2 “Corrected-Residual-In-Mold-Stress”-Modell (CRIMS)

Im Gegensatz zum Dehnungsansatz wird beim CRIMS-Modell direkt die Restspannungsverteilung für jedes Element berechnet. Diese Spannungsverteilung liefert die Spannung über die Dicke von jedem Element parallel und normal zur Fließrichtung. Anhand dieser Spannungsverteilung wird dann die Deformation des gesamten Formteils berechnet.

Dem Modell liegt ein lineares thermo-viskoelastisches Materialverhalten zugrunde. Es berücksichtigt die Spannungen, die sich beim Abkühlen unter Einwirkung von Druck im Werkzeug aufbauen. Im Detail werden thermisch induzierte Spannungen, die sich durch das Einfrieren und weitere Schwinden des Materials aufbauen, sowie druckinduzierte Spannungen (Druckverhältnisse beim Einspritzen und Nachdruck) berechnet. Da dieses Modell auf einer theoretischen Betrachtung beruht, ist man unabhängig von gemessenen Schwindungswerten. Allerdings können zusätzlich verfügbare Schwindungsdaten die Berechnungsergebnisse erheblich verbessern, indem korrigierte Spannungswerte berechnet werden, die dem Modell den Namen geben.

Im Flussdiagramm in Bild 25 ist schematisch dargestellt, wie bei der Berechnung der Spannungen in Moldflow vorgegangen wird. Diese Darstellung beinhaltet zusätzlich notwendige Berechnungen bei der Verwendung von fasergefüllten Materialien.

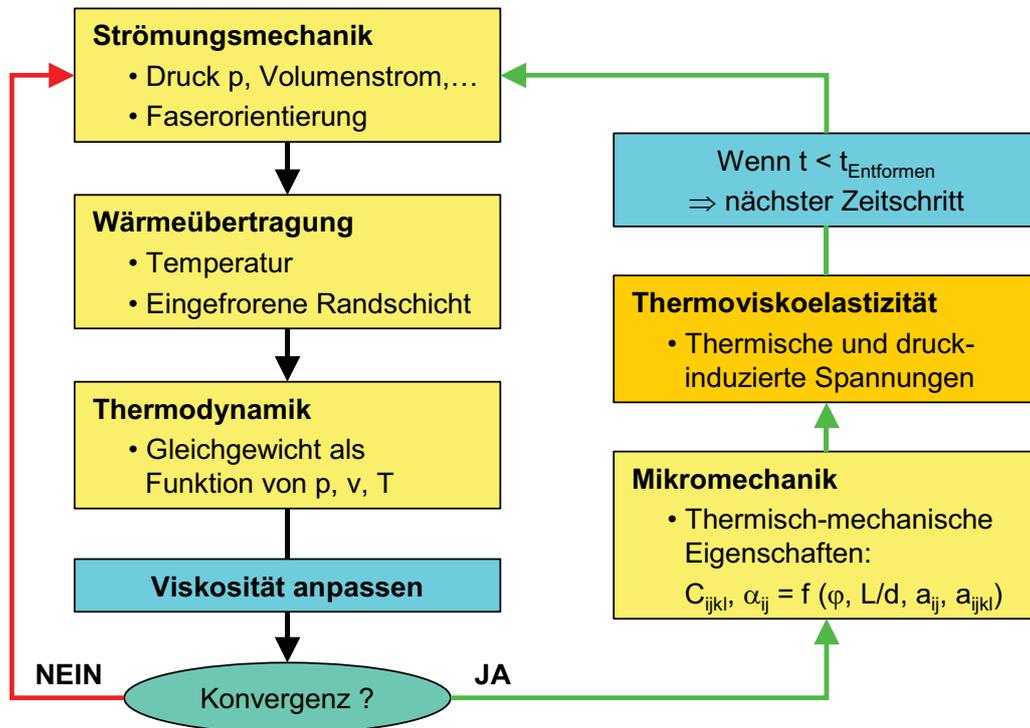


Bild 25: Schema für die Berechnung von thermischen und druckinduzierten Spannungen für fasergefüllte Kunststoffe mit Moldflow

Anwendung der Spannungsberechnung, wenn keine Schwindungsdaten verfügbar sind

Wenn keine Schwindungsdaten zur Verfügung stehen, wird nur auf ein anisotropes thermo-viskoelastisches Modell zurückgegriffen, welches in einer allgemeinen Form lautet:

$$\sigma_{ij} = \int_0^t c_{ijkl} (\xi(t) - \xi(t')) \cdot \left(\frac{\partial \varepsilon_{kl}}{\partial t'} - \alpha_{kl} \frac{\partial T}{\partial t'} \right) dt', \quad (55)$$

mit

c_{ijkl} ... viskoelastischer Relaxationsmodul in Tensorform,

α_{kl} ... Tensor der thermischen Eigenschaften,

$\xi(t)$... Pseudo-Zeitskala für die Berücksichtigung der Temperaturverschiebung und

$\xi(t) = \int_0^t \frac{1}{a_T} dt'$, wobei a_T der übliche Temperaturverschiebungsfaktor nach WLF oder Arrhenius ist.

Für ungefüllte Materialien wird das Modell isotrop, wobei für die Berechnung des mechanischen Eigenschaftstensors c_{ijkl} der E-Modul und die Querkontraktionszahl ν verwendet werden, wie sie in der Materialdatenbank von Moldflow gespeichert sind. Die thermischen Eigenschaften werden über die pvT-Daten ermittelt.

Für fasergefüllte Materialien werden diese Tensoren durch die anisotropen Eigenschaften des Faser-Matrix-Verbundes definiert, die auf Basis der berechneten Faserorientierung im Formteil bestimmt werden. In diesem Fall werden Spannungen parallel und quer zur Faserorientierung berechnet.

Das viskoelastische Modell basiert auf folgenden Annahmen:

- Es gibt so lange keinen Spannungsaufbau, bis das Material unter die sogenannte No-Flow-Temperatur abgekühlt ist.
- Im Bezug auf die lokalen Elementkoordinaten, wo x_3 normal zur Elementebene steht, sind die Schubspannungen $\tau_{13} = \tau_{23} = 0$.
- Die Normalspannung σ_{33} ist konstant über die Elementdicke.
- Solange $\sigma_{33} < 0$, hat das Material Kontakt mit der Werkzeugwand.
- Elastische Verformungen des Werkzeugs werden vernachlässigt.
- Nachdem das Formteil ausgeworfen wurde, verhält sich das Material wie ein elastischer Festkörper.

Die unkorrigierte Spannungsberechnung wird verwendet, wenn keine Schwindungsdaten vorhanden sind. Sie ist allerdings ziemlich ungenau, was die Absolutwerte der Deformation betrifft und kann daher nur zur Aussage über Trends herangezogen werden. Daher bietet das sogenannte CRIMS-Modell eine bessere Lösung.

Anwendung der Spannungsberechnung, wenn Schwindungsdaten verfügbar sind (CRIMS)

Die Hauptfaktoren, welche die Berechnungsgenauigkeit vom oben beschriebenen theoretischen Modell beeinflussen, sind:

- Empfindliche Abhängigkeit der Schwindung von der No-Flow-Temperatur und pvT-Daten, welche mit den heute üblichen Messmethoden nicht in Übereinstimmung mit den Bedingungen gemessen werden, wie sie im realen Spritzgießprozess auftreten.

- Keine Möglichkeit die molekulare Orientierung zu berechnen und daher für ungefüllte Kunststoffe keine Berücksichtigung von anisotropem Materialverhalten.
- Keine Möglichkeit, Kristallisationseffekte zu berücksichtigen.
- Mangel an Daten aus Relaxationsspektren für die viskoelastische Berechnung.

Daher wird mit gutem Erfolg ein Hybrid-Modell verwendet, welches zwar als unabhängige Basis das theoretische Modell verwendet, zusätzlich aber über gemessene Schwindungsdaten eine bessere Korrelation zwischen Berechnung und Realität herstellt (Bild 26).

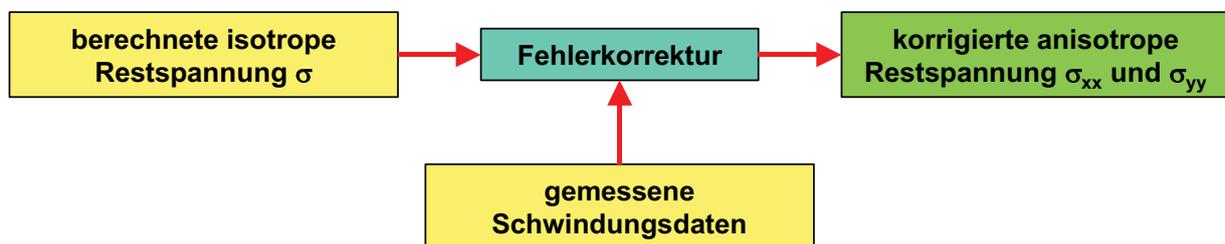


Bild 26: Schematischer Berechnungsablauf bei Verwendung gemessener Schwindungsdaten nach dem CRIMS-Modell (nach [49])

3.7 Gegenüberstellung der Simulation zum experimentellen Spritzgießprozess

Für die in den folgenden Kapiteln durchgeführten Auswertungen wurden exemplarisch Bauteile aus dem untersuchten Bauteilkatalog entnommen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden alle Prozessphasen des Spritzgießprozesses mit MPI berechnet und mit der Realität verglichen. Die Ergebnisse aus der Füllphase wurden beispielsweise auch in [11, 54, 65, 39, 33, 25] gegenüber gestellt. Hier zeigten sich oft gute Übereinstimmungen in den Füllbildern zwischen Berechnung und Realität. Ähnlich gute Ergebnisse für das Füllverhalten konnten durch eigene Berechnungen und Spritzgießversuche bestätigt werden (siehe Kapitel 3.7.1.2). Die Güte der Füllberechnungsergebnisse hängt im Wesentlichen von dem verwendeten Berechnungsmodell und der Netzfeinheit ab.

In der Literatur sind auch häufig die Ergebnisse des Füll- und Nachdruckes mit Experimenten gegenüber gestellt und können zum Beispiel in [63, 20, 34, 70] nachgelesen werden.

Die Ergebnisse der Druck- und Nachdruckberechnungen sind in hohem Maß von der Qualität der verwendeten rheologischen und thermodynamischen Materialdaten abhängig. Für ein plattenförmiges Formteil wurden Untersuchungen hinsichtlich des Fülldrucks und der Nachdruckwirkung mit dem Material Polystyrol 454C (PS 454C,

BASF AG, Ludwigshafen, D) durchgeführt. Der angussnahe Forminnendruck wurde mit einem Werkzeuginnendrucksensor gemessen und mit der Simulation verglichen. Der Drucksensor wurde angussnah, 11 mm vom Anschnitt, in der auswerferseitigen Werkzeugkavität positioniert.

Bei der Bemusterung des Formteils wurde ein maximaler Einspritzdruck an der Schneckenspitze von 150 bar gemessen. Es wurden drei verschiedene Nachdruckstufen (80 %, 60 % und 40 % von $p_{E,max}$) miteinander verglichen (Bild 27). Die Nachdruckzeit beträgt jeweils 15 Sekunden. Das Formteil wurde mit den Modellvarianten Midplane, Fusion und 3D modelliert und berechnet.

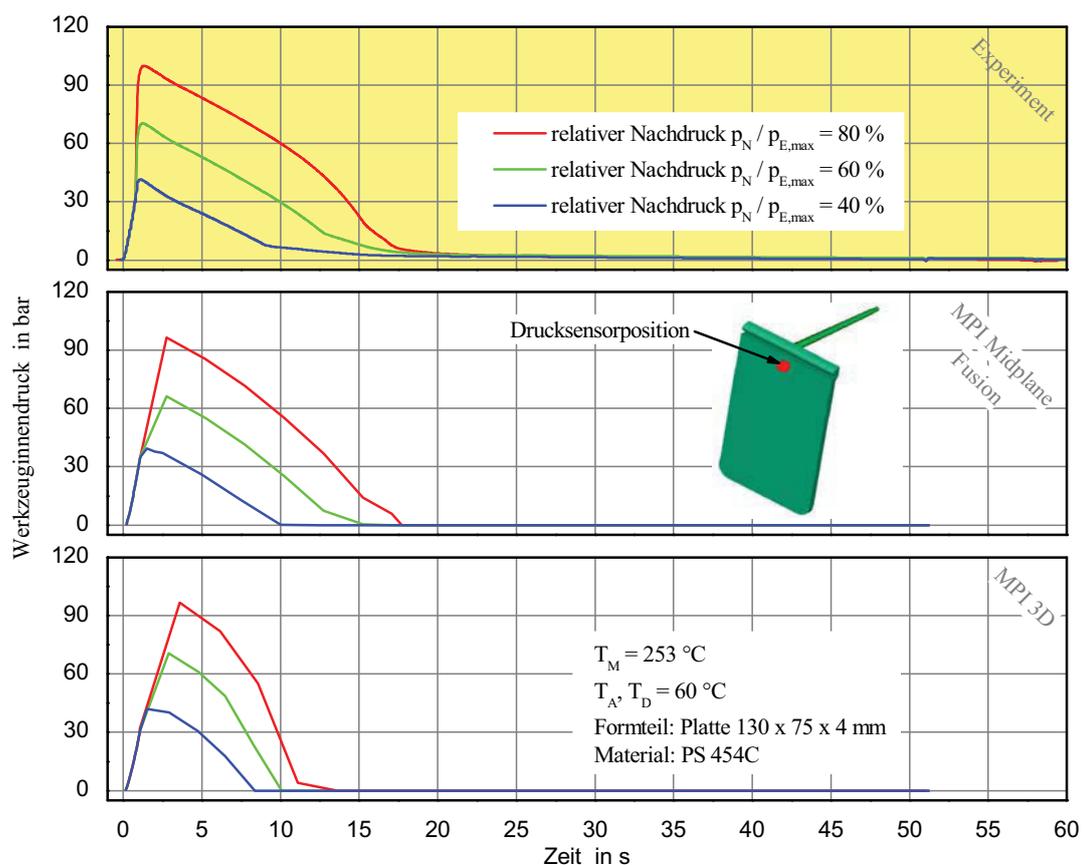


Bild 27: Experimentelle Werkzeuginnendruckkurven über der Zeit im Vergleich zu Berechnungen mit Moldflow Plastics Insight, Material: PS 454C

Bei allen Berechnungen wird das Druckniveau des Experiments erreicht. Für die Modelle MPI-Midplane und MPI-Fusion stimmen auch die Druckwirkzeiten sehr gut mit den Experimenten überein. Diese beiden Modelle liefern nahezu identische Ergebnisse.

Im Vergleich zur Realität werden bei den 3D-Simulationen die Druckwirkzeiten zu kurz berechnet, der Maximaldruck wird aber sehr genau ermittelt. Der Übergang des eindimensionalen Beam-Elementes vom Anguss auf die dreidimensionalen Tetraeder-Elemente des Formteils könnte hier die Ursache für die Unterschiede in den Druckwirkzeiten sein.

Weitere Experimente und Berechnungen mit anderen Materialien und Formteilen zeigten vergleichbare Tendenzen. Anzumerken ist jedoch, dass die tatsächlichen Druckniveaus zwischen Experiment und Berechnung oft Unterschiede zeigten. Auf der einen Seite sind hier die thermodynamischen und rheologischen Stoffdaten die Ursache. Andererseits zeigen neue Forschungen der Firma Moldflow, dass die Ursachen auch im Bereich der Beam-Elemente für Angüsse zu suchen sind. Bei Querschnittsänderungen im Angussbereich, die mit Beam-Elementen modelliert sind, wurden in früheren Moldflow-Versionen häufig Druckverluste sowie Reibungsverluste ungenau berechnet.

Um einen durchgängigen Vergleich zwischen Experiment und Simulation zu erhalten, müssen auch die Kühlberechnung sowie Schwindungs- und Verzugsergebnisse untersucht werden. Auf die Qualität der Kühlberechnung wird im Kapitel 4 eingegangen. Das Kapitel 5 beschäftigt sich mit der Ermittlung von Schwindung und Verzug durch 3-dimensionale Vermessung der Bauteile und Überlagerung mit der berechneten Geometrie.

3.7.1 Einfluss des Simulationsmodells auf die Berechnungsergebnisse

Im Folgenden werden Berechnungsergebnisse in Abhängigkeit des gewählten Berechnungsmodells gezeigt. Aus dem in dieser Arbeit untersuchten Formteilkatalog werden exemplarisch zwei Bauteile gegenüber gestellt. Anschließend werden Ergebnisse von Untersuchungen mit Forschungswerkzeugen dargestellt. Wichtig für die Vergleiche ist, dass jeweils die Prozessparameter aus der Abmusterung für die Simulation verwendet werden.

3.7.1.1 Formteile aus dem Formteilkatalog

3.7.1.1.1 Führungsschiene

Bei der Führungsschiene (Bild 28) handelt es sich um ein flächiges, dünnwandiges Bauteil ohne große Wanddickensprünge. Daher wird für dieses Bauteil vorzugsweise das Mittelflächen- oder Fusion-Modell verwendet.

Das Formteil wird aus Polyoxymethylen (POM, Hostaform C9021, Ticona) hergestellt. Die Hauptabmessungen betragen ca. 345 mm x 90 mm x 35 mm (L x B x H). Die Führungsschiene hat eine Grundwandstärke von 2,5 mm. In den Bereichen der innen liegenden Rippen und Verstärkungen findet man Wandstärken von ca. 0,5 mm. Beim Spritzgießwerkzeug handelt es sich um ein Zweifachwerkzeug, in dem eine rechte und eine linke Führungsschiene gleichzeitig hergestellt werden können. Das Formteil wird, wie in Bild 28 ersichtlich, an zwei Punkten (Stangenanguss mit Punktanschnitt) quer angespritzt.

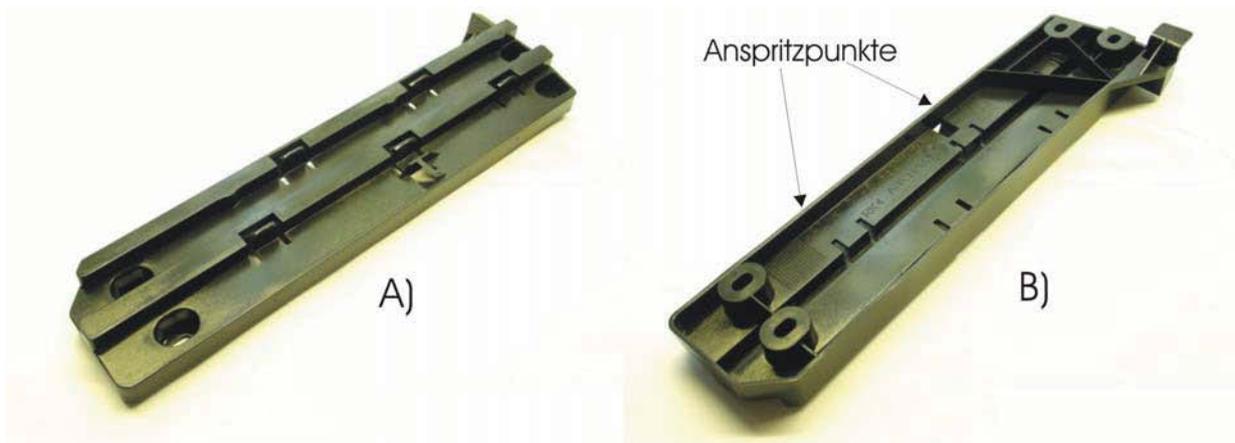


Bild 28: Führungsschiene: A) Oberseite, B) Unterseite

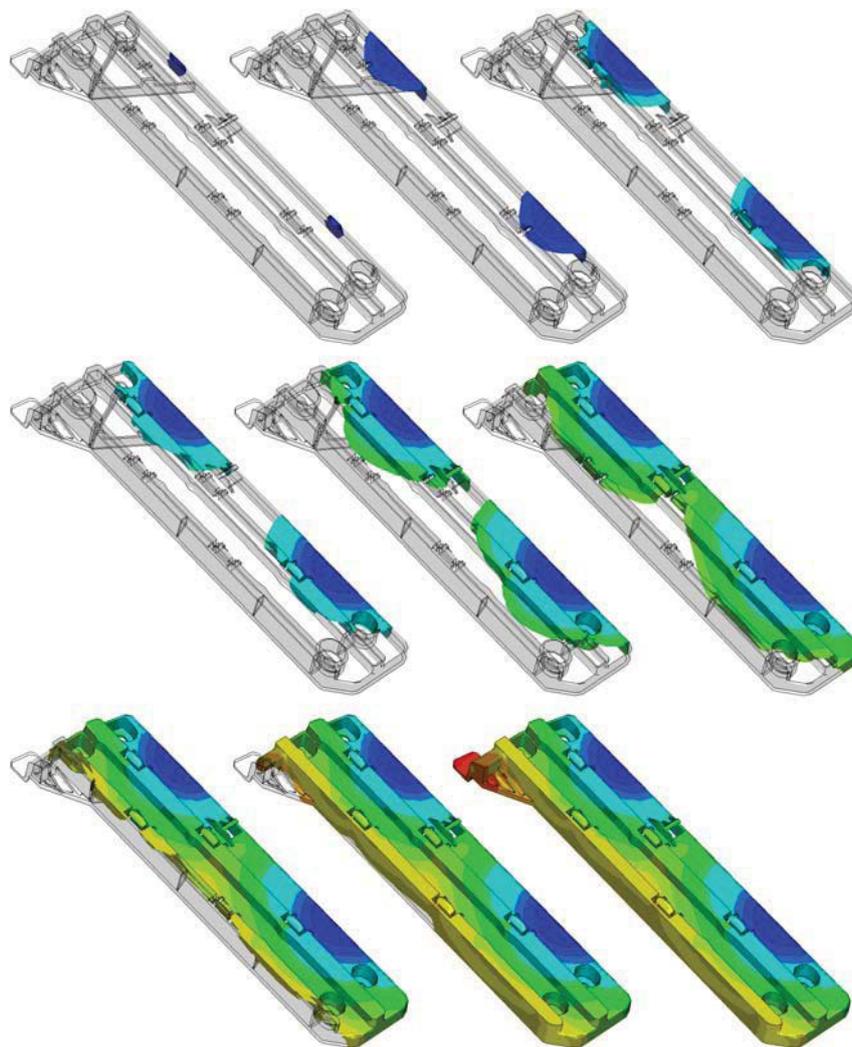


Bild 29: Fließfrontverlauf für unterschiedliche Füllzeitpunkte

Das Bild 29 zeigt die Position der Fließfront für unterschiedliche Füllzeitpunkte für das berechnete Fusion-Modell. Die Fließfrontausbreitung und die Ausbildung der Bindenähte sind anhand dieser Darstellungen sehr gut erkennbar. Es ist ersichtlich, dass die seitlich angehängte Lasche zum Schluss gefüllt wird. In Bild 30 sind die

Füllbilder der Führungsschiene für das Fusion- und Mittelflächenmodell gegenüber gestellt. Die beiden Füllbilder sind annähernd identisch. Die Füllzeit der Kavität beträgt 4,1 Sekunden.

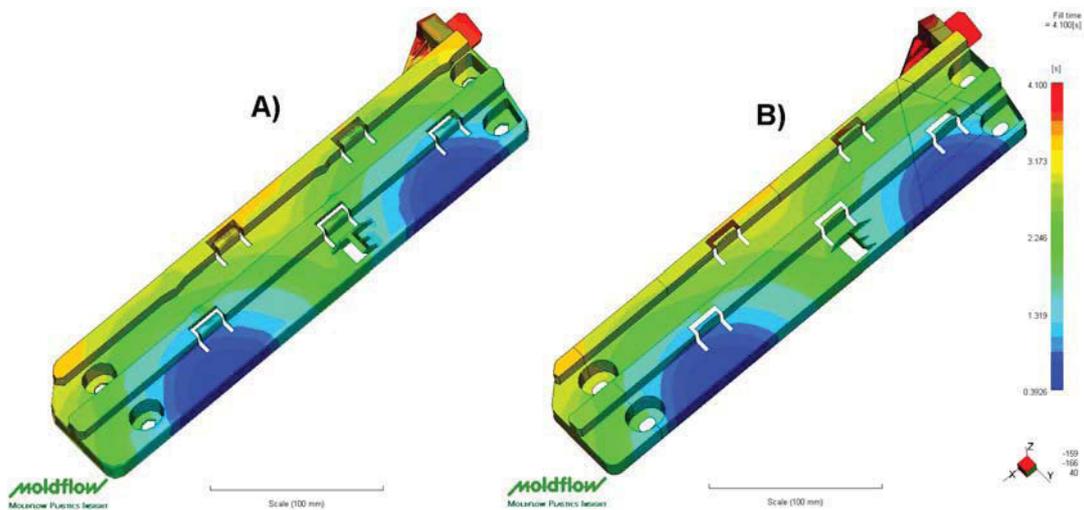


Bild 30: Berechnetes Füllbild der Führungsschiene: A) Fusion-Modell, B) Mittelflächenmodell

Die beiden Modelltypen berechnen einen sehr ähnlichen Druckverlauf bis zum Umschalten (Bild 31). Für das Fusion-Modell liegt der Umschaltdruck bei 143,6 bar. Beim Mittelflächenmodell wird der Umschaltdruck mit 149 bar berechnet.

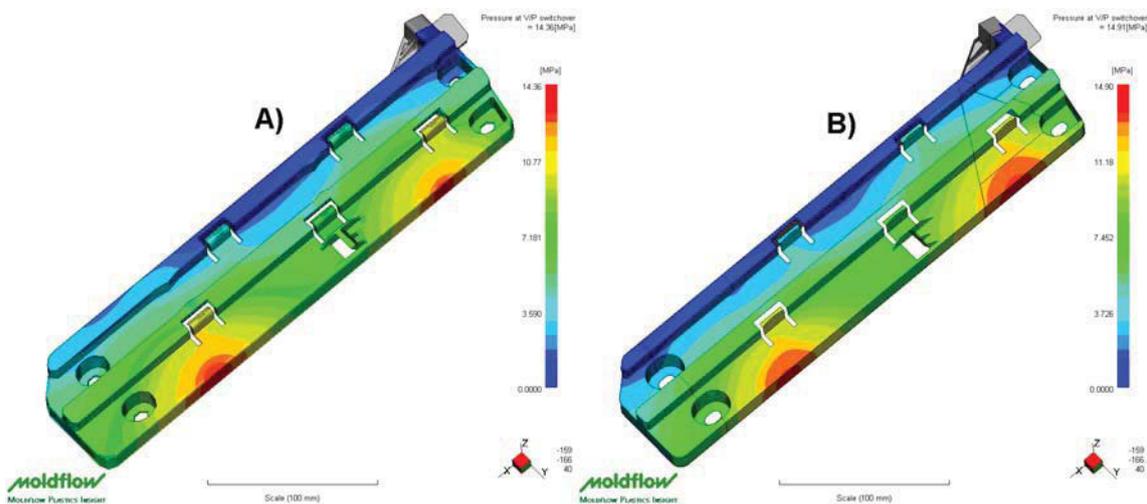


Bild 31: Druckverteilung zum Zeitpunkt des Umschaltens: A) Fusion-Modell, B) Mittelflächenmodell

In dem Bild 32 ist erkennbar, dass für beide Modelltypen ähnliche Temperaturverteilungen an der Kavitätsoberfläche berechnet werden. Von Moldflow wird eine über den Zyklus gemittelte Temperaturverteilung ausgegeben. Die Anzeige der Oberflächentemperaturen für bestimmte Zeitpunkte ist nicht möglich.

Die Formteilunterseite zeigt höhere Temperaturen als die Oberseite. Dieser Umstand wird durch die Auskernung an der Unterseite hervorgerufen. Die Berechnungs-

ergebnisse zeigen an beiden Modellen, dass hier mit einer verminderten Wärmeabfuhr zu rechnen ist.

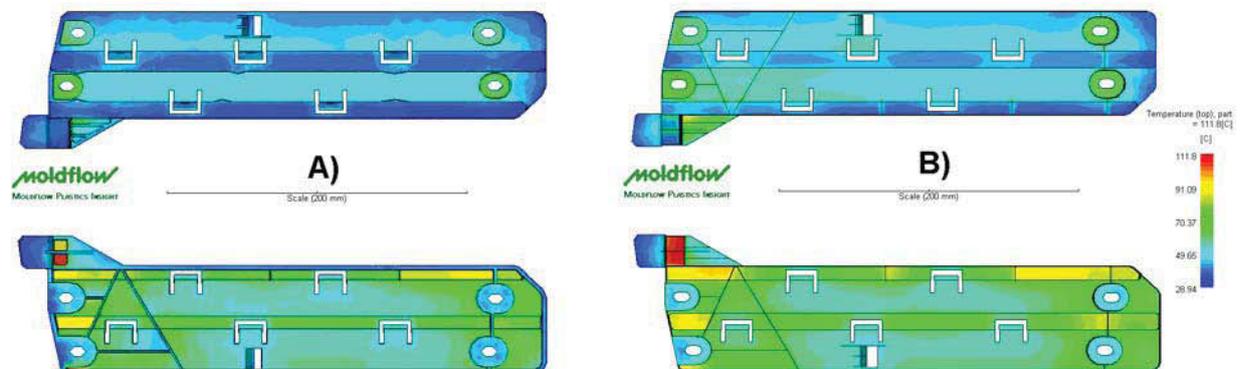


Bild 32: Über den Zyklus gemittelte Temperaturverteilung an der Kavitäts- und Formteiloberfläche (oben: Formteiloberseite, unten: Formteilunterseite): A) Fusion-Modell, B) Mittelflächenmodell

In Bild 33 sind die Verzugsergebnisse der Mittelflächen- und Fusion-Berechnung dargestellt. Das Bild zeigt die Gesamtdeformation des Formteils. Für die Auswertung besonders interessant ist hierbei die Unterseite des Formteiles. Der Skalierungsfaktor der Darstellung beträgt 4, das heißt die Deformationen sind 4-fach überzeichnet.

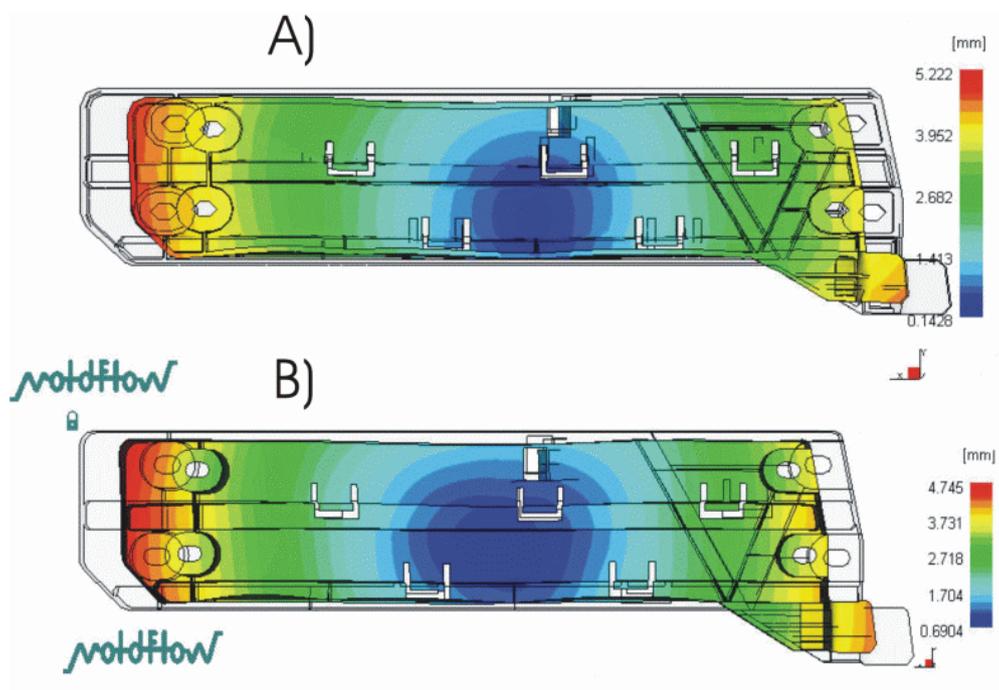


Bild 33: Berechnete Gesamtdeformation der Führungsschiene: A) Fusion-Modell, B) Mittelflächenmodell (Deformation 4-fach überzeichnet)

Vergleicht man die beiden Berechnungsergebnisse, so stellt man ähnliche Deformationstendenzen fest. Es lässt sich eine deutliche Schwindung in Längsrichtung feststellen. Die Maximalwerte betragen für das Fusion-Modell ca. 5,2 mm und

für Midplane ca. 4,7 mm. In den Bereichen der Sicken, jeweils an den oberen und unteren Rändern des Formteils, erkennt man einen Winkelverzug der Seitenflächen. Dieser ist an den Bauteilen selbst auch deutlich ausgeprägt. Der Winkelverzug tritt auf, weil sich die Wärme aus diesen ausgekernten Bereichen nur schlecht abführen lässt.

3.7.1.1.2 Locking Lever

Das Bild 34 zeigt den Locking Lever, ein Formteil, das als Komponente einer Türverriegelung von Fahrzeugen eingesetzt wird. Es wird aus Polyoxymethylen (POM, Delrin 500P, DuPont Engineering Polymers) hergestellt und ist ca. 97 mm lang, etwa 10 mm breit (hinterer Bereich in Bild 34) und im Bereich des zylindrischen Zapfens ca. 10 mm hoch. Die Herstellung des Bauteils erfolgt in einem Vierfach-Werkzeug, wobei jeweils zwei linke und zwei rechte Teile gleichzeitig gespritzt werden.

Das Formteil Locking Lever weist an den Enden dreidimensional ausgeprägte klotzige Bereiche auf. Dazwischen ist es als U-Profil ausgeführt. Es ist somit ein Bauteil, das vorteilhaft mit dem 3D-Modell berechnet wird. Für den Vergleich wurde auch das Fusion-Modell simuliert.



Bild 34: Locking Lever

Die nachfolgenden Auswertungen werden nur an einer der vier Kavitäten durchgeführt.

Bild 35 zeigt für die beiden untersuchten Modelltypen (Fusion und 3D) die Position der Fließfront für unterschiedliche Füllzeitpunkte. Die Füllzeit der Kavität beträgt 0,76 Sekunden.

Die beiden Füllbilder sind nicht ganz gleich. In den klotzigen Endbereichen sind bei genauer Betrachtung Unterschiede zu erkennen. Diese Bereiche sind eindeutig 3-dimensional dominiert und deswegen auch vorzugsweise mit einem 3D-Netz zu berechnen. Das Fusion-Modell hat hier Probleme die richtige Wanddicke zuzuordnen, da keine eindeutige gegenüberliegende Fläche vorhanden ist. Somit ist der Übereinstimmungsgrad zwischen gegenüberliegenden Elementen („mesh matching“)

schlecht, was die Berechnungsergebnisse beeinflusst. Im Bereich des geraden Verbindungsprofils ist der Fließfrontfortschritt für beide Modelle fast identisch.

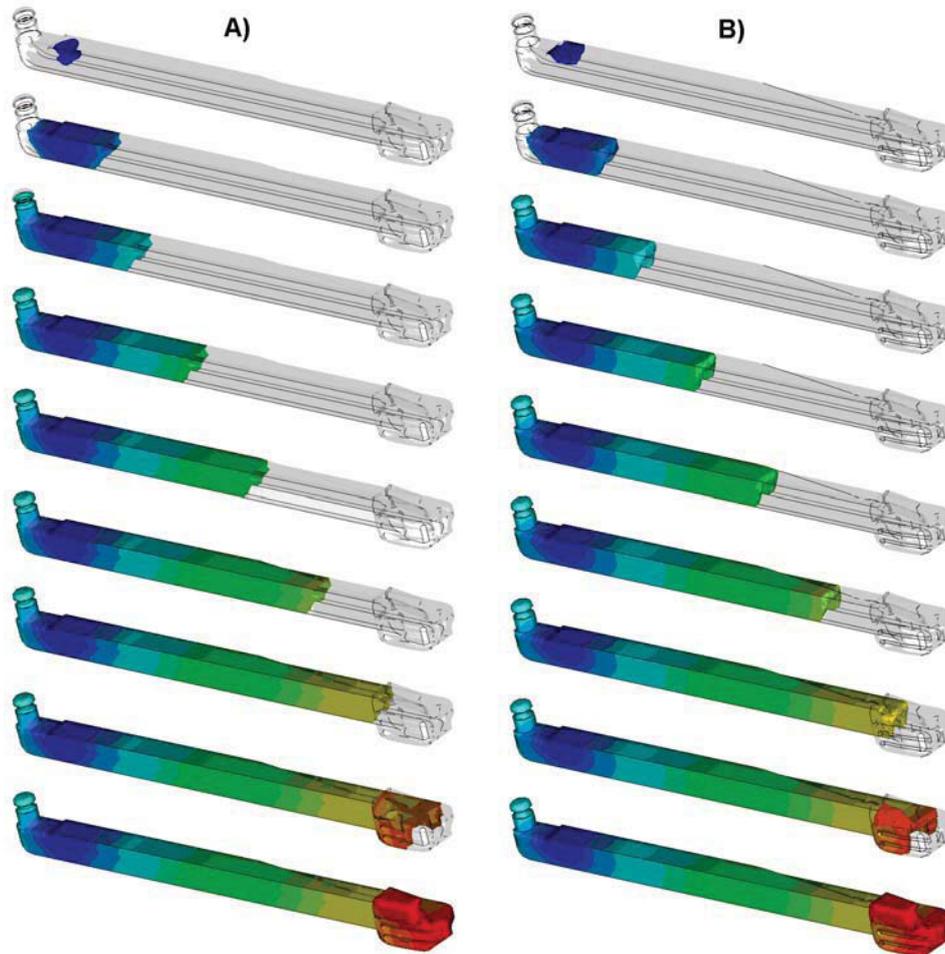


Bild 35: Fließfrontverlauf für unterschiedliche Füllzeitpunkte: A) Fusion-Modell, B) 3D-Modell

Der Druckverlauf am Umschaltzeitpunkt wird für die beiden Modelltypen fast gleich errechnet (Bild 36). Beim Fusion-Modell liegt der Umschaltdruck bei 297 bar. Für das 3D-Modell wird ein Umschaltdruck von 282 bar berechnet. Das Bild 36 zeigt, dass beim 3D-Modell die Umschaltung nicht bei gleichem Füllgrad erfolgt wie beim Fusion-Modell. Der Umschaltzeitpunkt wurde von der Berechnungssoftware automatisch errechnet. Durch das zeitlich frühere Umschalten beim 3D-Modell ist vermutlich der berechnete Umschaltdruck etwas geringer.

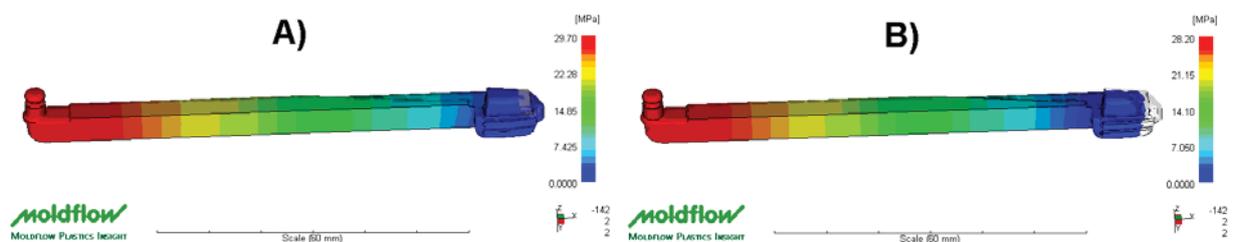


Bild 36: Druckverteilung zum Zeitpunkt des Umschaltens: A) Fusion-Modell, B) 3D-Modell

Die berechnete Temperaturverteilung an der Kavitätsoberfläche (Bild 37) zeigt größere Unterschiede zwischen den beiden Modellen. Das 3D-Modell berechnet prinzipiell höhere Temperaturen an der Ober- und Unterseite. Im Bereich der Innenseite des U-Profiles sind die Temperaturen höher als außen. Im linken klotzigen Bauteilbereich scheinen die Ergebnisse des 3D-Modells plausibler als beim Fusion-Modell. Aufgrund der Masseanhäufung sollte hier die Temperatur höher sein als in den übrigen Bereichen, da es zu einer langsameren Wärmeabfuhr kommt.

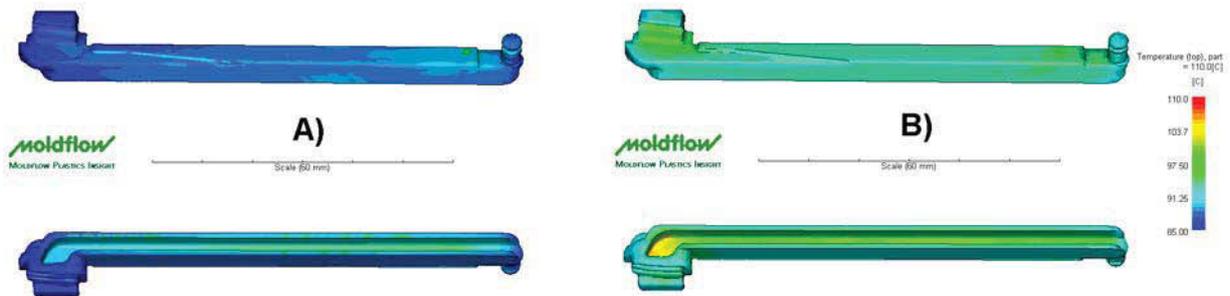


Bild 37: Über den Zyklus gemittelte Temperaturverteilung an der Kavitätsoberfläche (oben: Formteiloberseite, unten: Formteilunterseite):
A) Fusion-Modell, B) 3D-Modell

Das Bild 38 zeigt die Gesamtdeformation des Bauteils für das Fusion- und 3D-Modell. Der Skalierungsfaktor der Darstellung beträgt 5, das heißt die Deformationen sind 5-fach überzeichnet dargestellt. Bei der Betrachtung der beiden Verzugsdarstellungen erkennt man sofort, dass beide Modelle unterschiedliche Deformationstendenzen zeigen. Im Falle des Fusion-Modells wird eine Durchbiegung des Formteils nach oben, in Richtung der negativen y-Achse, berechnet. Die Berechnung mit dem 3D-Modell zeigt eine Durchbiegung des Locking Levers in die entgegengesetzte Richtung. Die Maximalwerte der Deformation unterscheiden sich ungefähr um den Faktor 3. Für das Fusion-Modell beträgt der Maximalwert ca. 0,64 mm, für das 3D-Modell ca. 1,95 mm.

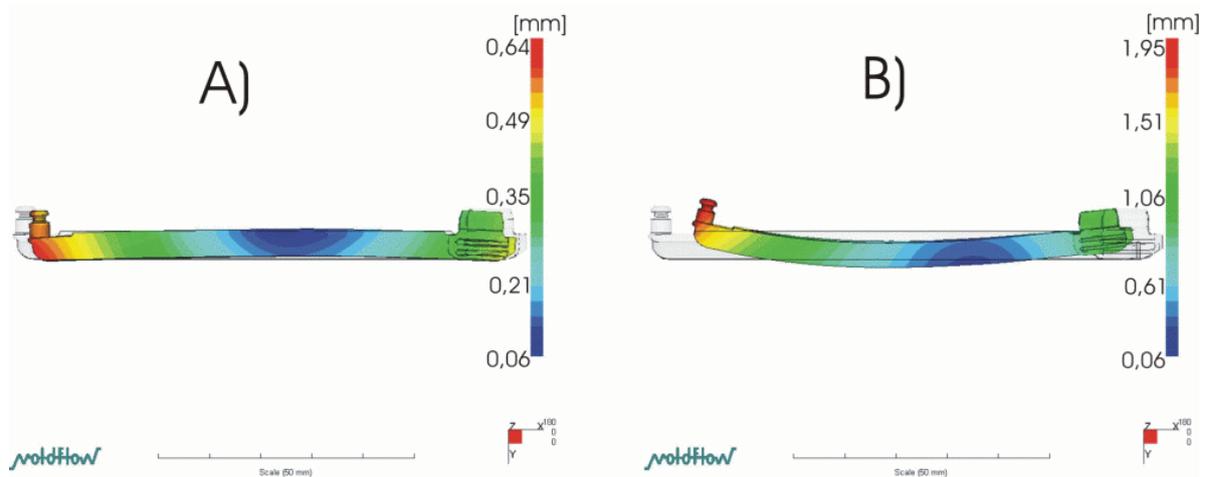


Bild 38: Berechnete Gesamtdeformation des Locking Lever: A) Fusion-Modell, B) 3D-Modell (Deformation 5-fach überzeichnet)

Die reale Bauteilgeometrie des Locking Lever ist in Bild 39 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Deformation des Fusion-Modells nicht der Realität entspricht. Das 3D-Modell liefert tendenziell das richtige Ergebnis.

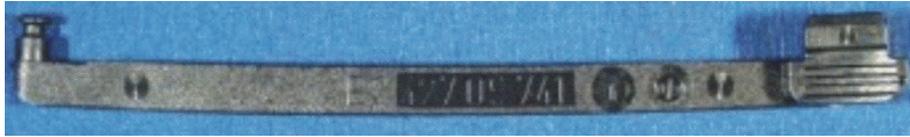


Bild 39: Deformationsverhalten des Formteils Locking Lever

In gleicher Weise wie für die Führungsschiene und den Locking Lever wurde noch eine Vielzahl von Untersuchungen an komplexen Formteilen, die von den Partnerunternehmen zur Verfügung gestellt wurden, durchgeführt. Ergebnisse dieser Untersuchungen werden an dieser Stelle nicht dargestellt. Die Ergebnisse fließen jedoch in das entwickelte Expertensystem ein und stehen dort als Erfahrungswissen für zukünftige Projektabwicklungen zur Verfügung.

3.7.1.2 Forschungswerkzeuge: Platte und Schachtel

An diesen Forschungswerkzeugen wurden Berechnungen mit allen drei verfügbaren Modellierungsansätzen (Mittelfläche, Fusion und 3D) durchgeführt und miteinander verglichen.

3.7.1.2.1 Platte

Das für die Untersuchungen verwendete Plattenformteil ist 130 mm lang und 75 mm breit. Die Wanddicken können im Werkzeug von 2 mm bis 4 mm in 1 mm-Stufen variiert werden. Das Angussystem besteht aus einem Kegelanguss mit anschließendem Schmelzeverteiler und Filmanschnitt (Bild 40).

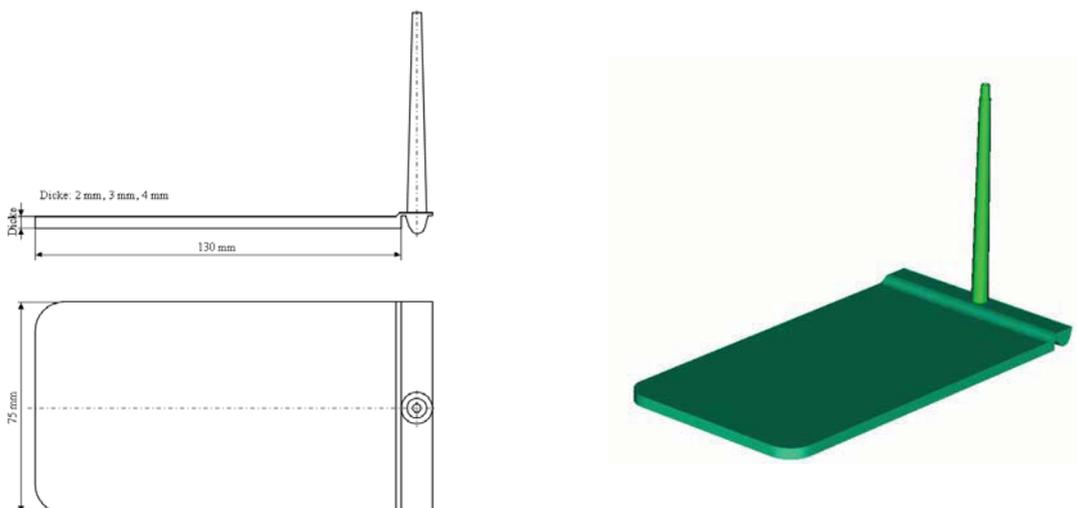


Bild 40: Untersuchtetes Plattenformteil 130 x 75 mm (Wanddicken 2 mm, 3 mm und 4 mm) mit Kegelanguss, Schmelzeverteiler und Filmanschnitt

Zur Kontrolle der Fließbedingungen in der Kavität wurden Teilfüllungen durchgeführt und den Berechnungsergebnissen aus MPI gegenübergestellt. Zu Beginn der Formfüllung liegt eine Quellströmung vor, die mit Fortschreiten der Fließfront immer weniger wird. Durch diese Art der Füllung werden keine zusätzlichen Dehnungen oder Orientierungen in Querrichtung eingebracht.

Das Bild 41 zeigt einen Vergleich der berechneten mit den experimentellen Formteillfüllungen der 3 mm dicken Plattenformteile aus ABS Urtal M122. Es sind die berechneten Füllbilder des Mittelflächenmodells dargestellt. Auch das Fusion- und 3D-Modell ergeben ausgezeichnete Übereinstimmungen mit den experimentellen Fließfrontformen bei allen untersuchten Wanddicken.

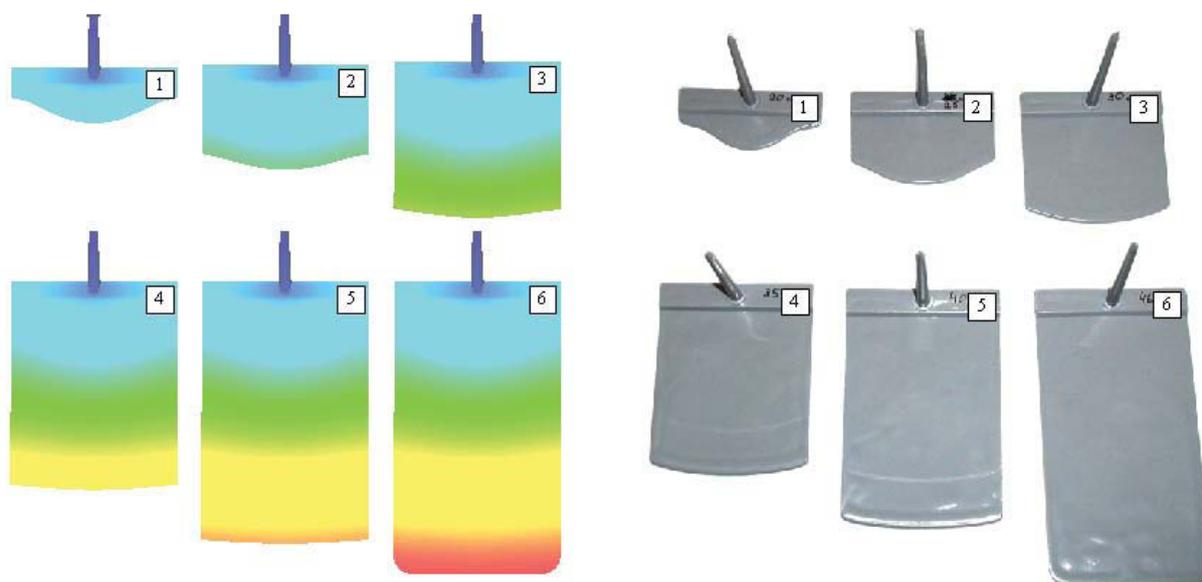


Bild 41: Gegenüberstellung der berechneten und experimentellen Formteillfüllung nach (1) 0,27 s; (2) 0,43 s; (3) 0,60 s; (4) 0,77 s; (5) 0,93 s; (6) 1,13 s; Platte 130 x 75 x 3 mm; (Material: ABS Urtal M122)

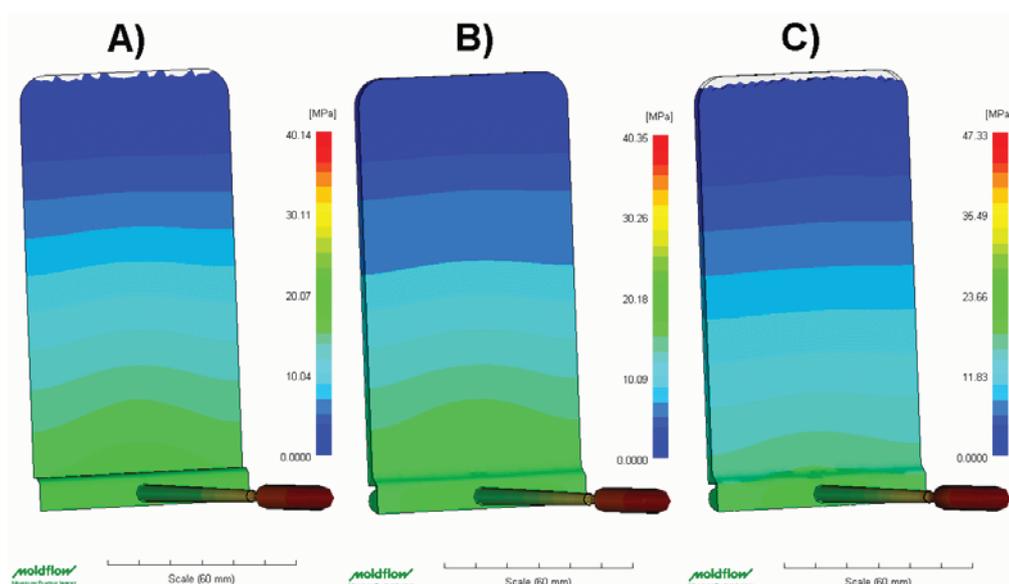


Bild 42: Druckverteilung zum Zeitpunkt des Umschaltens: A) Midplane-Modell, B) Fusion-Modell, C) 3D-Modell (Material: ABS Urtal M122)

Alle drei untersuchten Modelltypen berechnen den Druckverlauf in der Kavität sehr ähnlich. Der Druckverlauf am Umschaltzeitpunkt wird für die beiden Modelltypen Midplane (401,4 bar) und Fusion (403,5 bar) fast gleich errechnet (Bild 42). Beim 3D-Modell liegt der Umschaltdruck höher. Er beträgt 473,3 bar. Der Umschaltpunkt wurde bei 99 % Füllvolumen gewählt.

Aus der Temperaturberechnung der Kavitätsoberfläche (Bild 43) ist erkennbar, dass alle drei Modelltypen ähnliche Temperaturverteilungen berechnen. Im Detail sind jedoch Unterschiede erkennbar. Im ebenen Plattenbereich errechnet das 3D-Modell die geringsten Temperaturen.

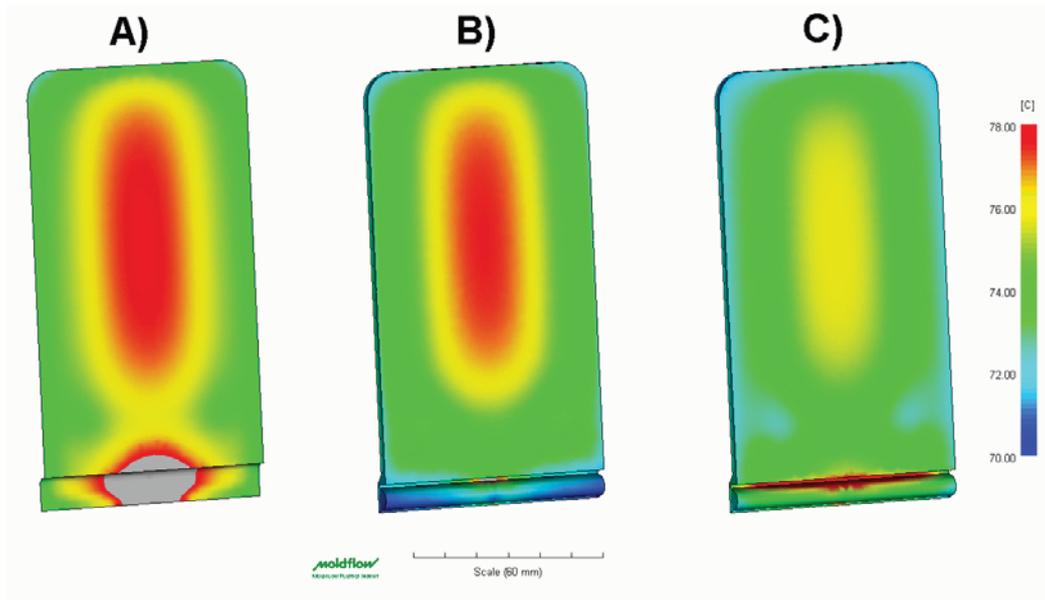


Bild 43: Über den Zyklus gemittelte Temperaturverteilung an der Kavitätsoberfläche: A) Midplane-Modell, B) Fusion-Modell, C) 3D-Modell (Material: ABS Urtal M122)

Im Angussbereich des Midplane-Modells wird eine sehr hohe Temperatur berechnet (Bild 43 A, grau dargestellt). Hier werden große Temperaturdifferenzen am Übergang der Beam-Elemente (Stangenanguss) zu den Dreieckselementen (Schmelzeverteiler) ermittelt. Der Grund dafür ist, dass keine Übergangsbedingungen von Beam- auf Dreieckselemente in MPI berücksichtigt werden können. Die Simulation mit dem 3D-Modell berechnet im Bereich des Filmschnittes realistischere Temperaturen. Der Anschnittbereich wurde beim 3D-Modell mittels Tetraeder-Elementen vernetzt. Damit wird der Wärmeaustausch mit dem Werkzeug richtungsbezogen berechnet, wodurch bessere Ergebnisse erzielt werden.

In Bild 44 sind die Verzugsergebnisse der Mittelflächen-, Fusion- und 3D-Berechnung dargestellt. Das Bild zeigt die Gesamtdeformation des Formteils. Der Skalierungsfaktor der Darstellung beträgt 3.

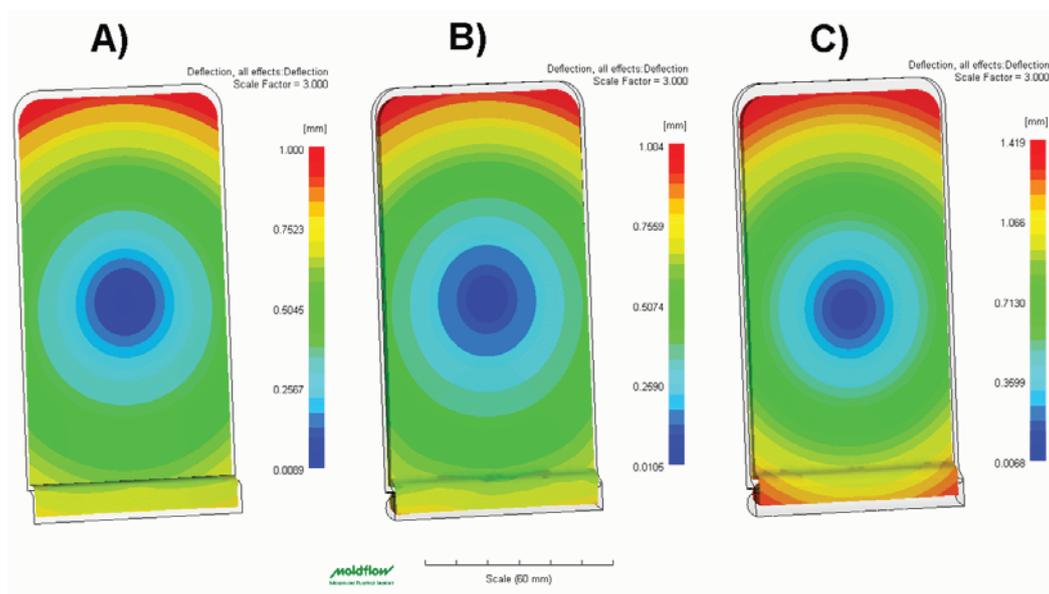


Bild 44: Berechnete Gesamtdeformation der Platte (Deformation 3-fach überzeichnet): A) Midplane-Modell, B) Fusion-Modell, C) 3D-Modell (Material: ABS Urtal M122)

Vergleicht man die Berechnungsergebnisse, so stellt man gleiche Deformationstendenzen fest. Das 3D-Modell berechnet die größte Deformation. Die Maximalwerte betragen für das Midplane-Modell 1,000 mm, für das Fusion-Modell 1,004 mm und für das 3D-Modell 1,419 mm. Eine mögliche Erklärung für die Unterschiede in den Ergebnissen ist die grundlegend andere Dickenberücksichtigung durch das 3D-Modell. Während die 2 ½D-Modelle über der Dicke mit einem Finite-Elemente/Finite-Differenzen-Ansatz rechnen, wird beim 3D-Modell die Bauteildicke durch Tetraeder-Elemente diskretisiert (siehe Kapitel 3.2).

3.7.1.2.2 Schachtel

Das für die Untersuchungen verwendete Schachtelformteil hat eine Seitenlänge von 100,6 x 100,6 mm. Die Höhe der Schachtel beträgt 40 mm, die Wanddicke liegt bei 1,8 mm. Das Angusssystem besteht aus einer Direktanspritzung mit Heißkanalanguss. (Bild 45).

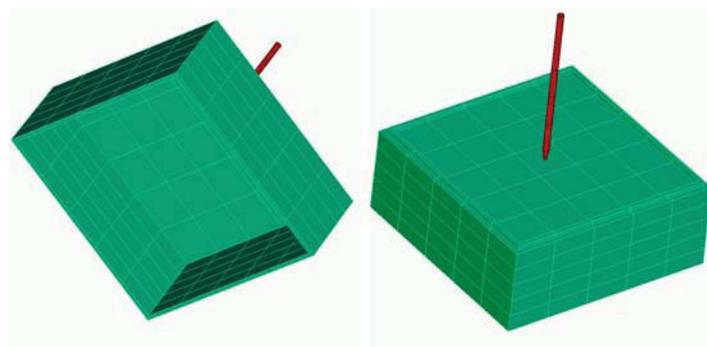


Bild 45: Untersuchtetes Schachtelformteil mit Heißkanalanguss (Werkzeugmaße: 100,6 x 100,6 x 40 mm, Wanddicke 1,8 mm)

Die Bemusterungen und Simulationsrechnungen wurden mit dem Material Ultraform N2320 (POM) von BASF durchgeführt.

Zum Vergleich der realen Fließbedingungen mit den Berechnungsergebnissen aus MPI wurden Teilfüllungen durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Bild 46 gegenübergestellt. Alle Modelle berechnen das Füllbild nahezu identisch und in Übereinstimmung mit dem experimentell ermittelten Füllbild.

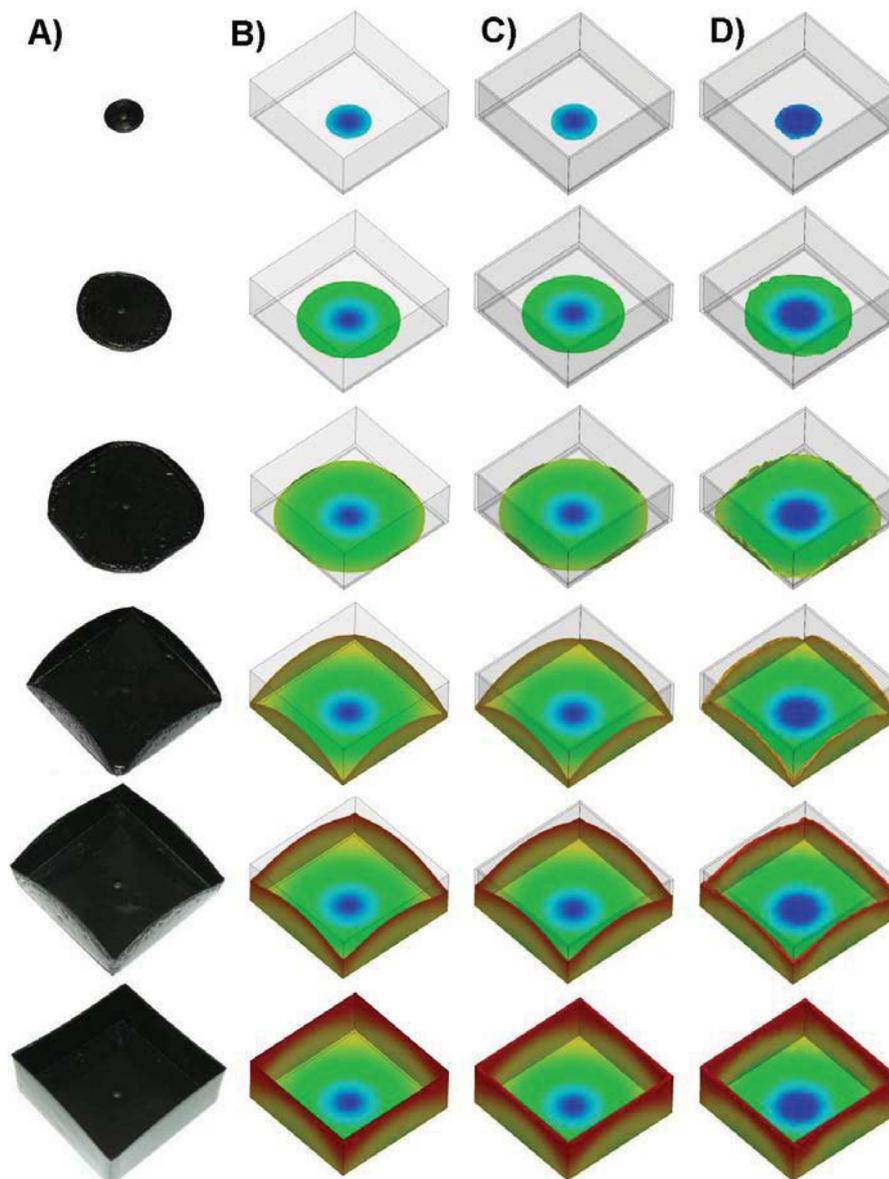


Bild 46: Fließfrontverlauf für unterschiedliche Füllzeitpunkte: A) Realität, B) Mittelflächenmodell, C) Fusion-Modell, D) 3D-Modell (Material: Ultraform N2320)

Der Druckverlauf zum Zeitpunkt der Umschaltung von Füllen auf Nachdruck wird in Bild 47 gezeigt. Der Umschaltpunkt wurde für die Berechnungen bei 99 % des gesamten Füllvolumen gewählt.

Für die beiden Modelltypen Midplane und Fusion wird der Umschaltdruck fast gleich errechnet (937 bar bzw. 930 bar). Beim 3D-Modell liegt der Umschaltdruck höher. Er beträgt 1071 bar. Die gleiche Tendenz hat auch der Vergleich der Ergebnisse beim Plattenformteil gezeigt.

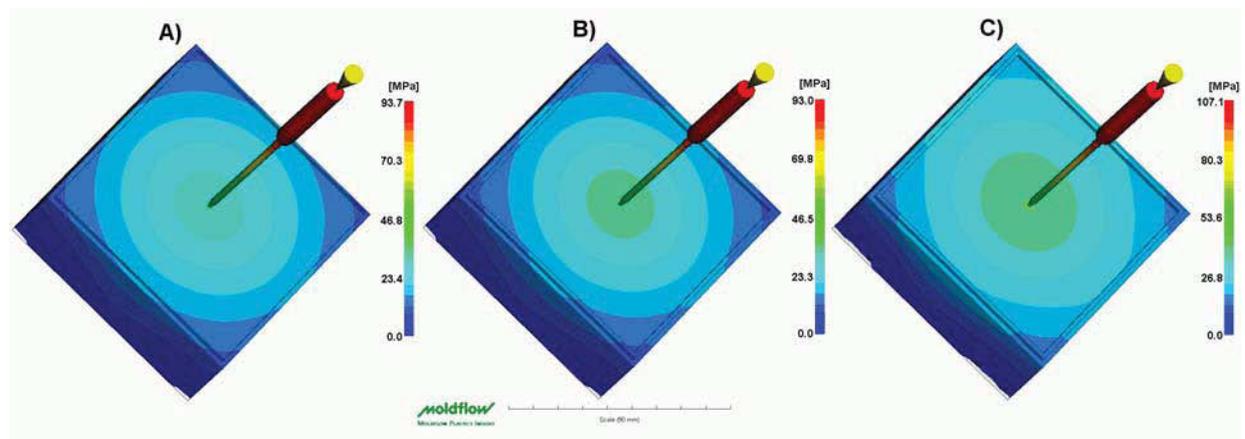


Bild 47: Druckverteilung zum Zeitpunkt des Umschaltens: A) Midplane-Modell, B) Fusion-Modell, C) 3D-Modell (Material: Ultraform N2320)

Aus der Temperaturberechnung der Kavitätsoberfläche (Bild 48) ist erkennbar, dass alle drei Modelltypen grundsätzlich ähnliche Temperaturverteilungen berechnen. Es sind jedoch Unterschiede im Temperaturniveau sowie Abweichungen im Anschnittbereich erkennbar.

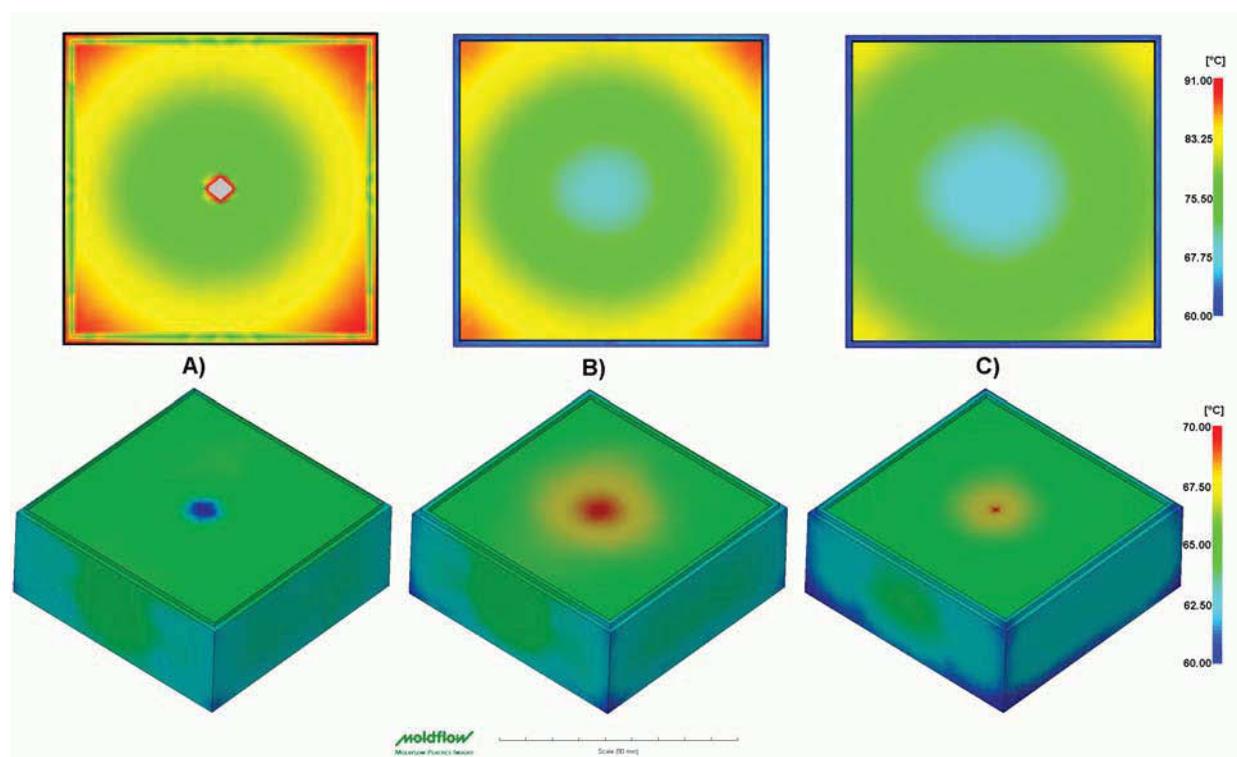


Bild 48: Über den Zyklus gemittelte Temperaturverteilung an der Kavitätsoberfläche; oben: Schachtelinnenseite, unten: Schachtelaußenseite: A) Midplane-Modell, B) Fusion-Modell, C) 3D-Modell (Material: Ultraform N2320)

Beim Mittelflächenmodell werden im Anschnittbereich an der Bodenplatte falsche Werte berechnet. Dies konnte auch schon bei den Mittelflächen-Berechnungen am Formteil Platte festgestellt werden (Kapitel 3.7.1.2.1). Durch den Heißkanalanguss muss an der Bodenaußenseite eine höhere Temperatur auftreten als an der Innenseite. Die Modelle Fusion und 3D zeigen hier die richtige Tendenz. Der durch den Heißkanalanguss beeinflusste Bereich ist jedoch vor allem beim 3D-Modell zu klein.

Prinzipiell werden an der Schachtelinnenseite bei allen Modellen höhere gemittelte Grenzflächentemperaturen berechnet als an der Außenseite. Besonders an den Ecken der Schachtel ist die Wärmeabfuhr schlecht, deshalb treten hier die höchsten Temperaturen auf.

Die Berechnungsergebnisse der Gesamtdeformation zeigen für alle Modelle ähnliche Tendenz (Bild 49). Die Minimal- und Maximalwerte weichen jedoch voneinander ab. Die größten Deformationen werden vom Mittelflächenmodell berechnet. Die berechnete Gesamtdeformation ist beim 3D-Modell am geringsten. Beim Formteil Platte wurde genau der gegenteilige Trend festgestellt (Kapitel 3.7.1.2.2).

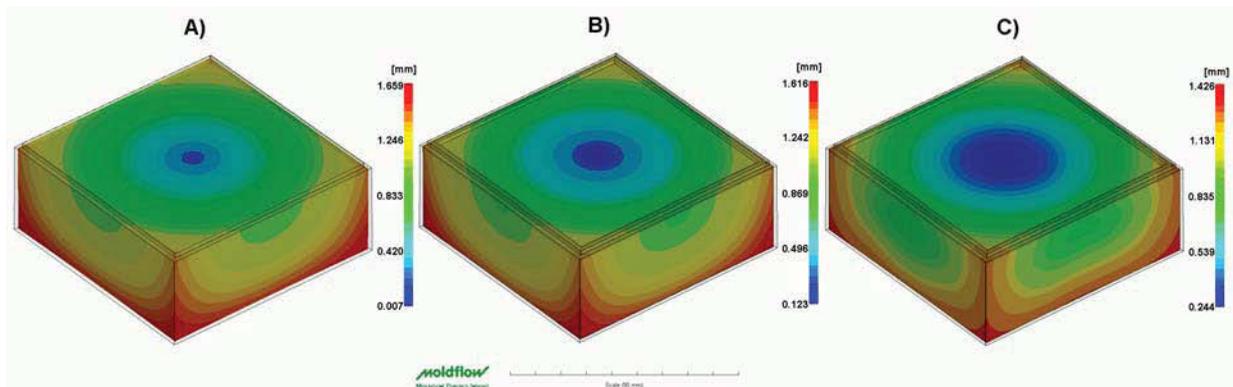


Bild 49: Berechnete Gesamtdeformation der Schachtel: A) Midplane-Modell, B) Fusion-Modell, C) 3D-Modell (Material: Ultraform N2320)

3.7.2 Geometrie-, Material- und Prozessabhängigkeit der Berechnungsgenauigkeit

An den zuvor beschriebenen Forschungswerkzeugen (Platten- und Schachtelwerkzeug) wurden Untersuchungen zur Geometrie-, Material- und Prozessabhängigkeit der Berechnungsergebnisse durchgeführt. Im Rahmen dieser Untersuchungen wurden alle in MPI zur Verfügung stehenden Modelle (Midplane, Fusion und 3D) für Berechnungen herangezogen und mit Ergebnissen aus Experimenten gegenüber gestellt.

3.7.2.1 Formteil Platte

3.7.2.1.1 Einfluss der Wanddicke und der Nachdruckhöhe

Material ABS Urtal M122 (amorph)

Die Nachdruckhöhe hat einen dominierenden Einfluss auf das Schwindungsverhalten. Bild 50 zeigt, dass bei den 2 mm und 3 mm dicken Formteilen die experimentelle Beeinflussbarkeit durch den Nachdruck annähernd linear ist. Bei den 4 mm dicken Platten liegt ein degressiver Verlauf vor, das heißt, die Schwindungsreduktion wird mit zunehmender Nachdruckhöhe geringer.

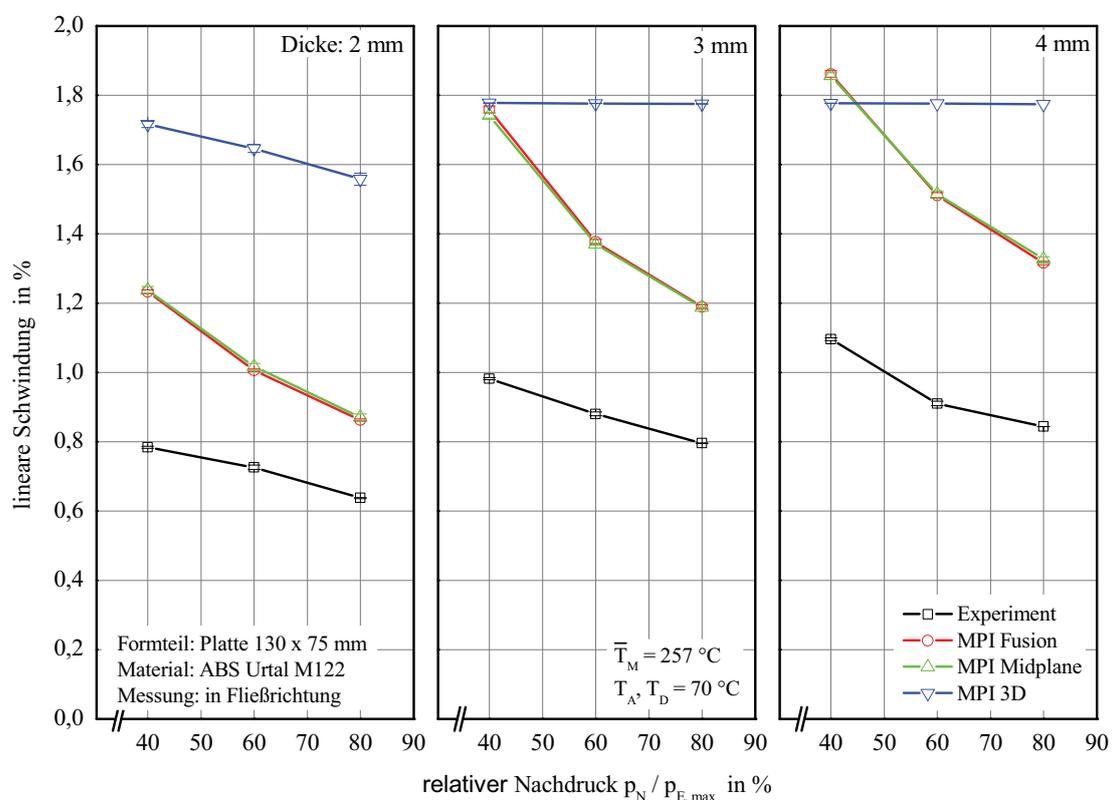


Bild 50: Lineare Schwindung in Fließrichtung über der relativen Nachdruckhöhe für unterschiedliche Wanddicken (Material: ABS Urtal M122)

In Bild 50 ist die relative Nachdruckhöhe angegeben. Diese errechnet sich aus dem Verhältnis von Nachdruck (p_N) zum maximalen Einspritzdruck ($p_{E,max}$). In der Literatur wird für amorphe Kunststoffe vielfach ein linearer Zusammenhang zwischen Schwindung und Nachdruck angegeben [24].

Aus dem Bild 50 ist erkennbar, dass die Simulationsergebnisse für alle Modelle über den experimentell ermittelten Schwindungen liegen. Vom Verlauf her zeigt sich eine tendenziell gute Übereinstimmung der Midplane- und Fusion-Modelle mit den Experimenten. Die Berechnungen mit diesen Modellen sagen für alle Wanddicken ein degressives Schwindungsverhalten voraus. Das 3D-Modell berechnet für die 2 mm

dicken Platten einen linear fallenden Verlauf und für die dickeren Formteile (3 mm und 4 mm) eine konstante Schwindung mit zunehmender Nachdruckhöhe.

Material PS 454C (amorph)

Das Bild 51 zeigt die lineare Verarbeitungsschwindung in Fließrichtung von Polystyrol PS 454C über der relativen Nachdruckhöhe $p_N / p_{E,max}$. Die Ergebnisse sind für die Wanddicken 2 mm, 3 mm und 4 mm dargestellt. Im Gegensatz zum ABS liegen die Berechnungsergebnisse aller Modelle unterhalb der am Formteil ermittelten Schwindungswerte.

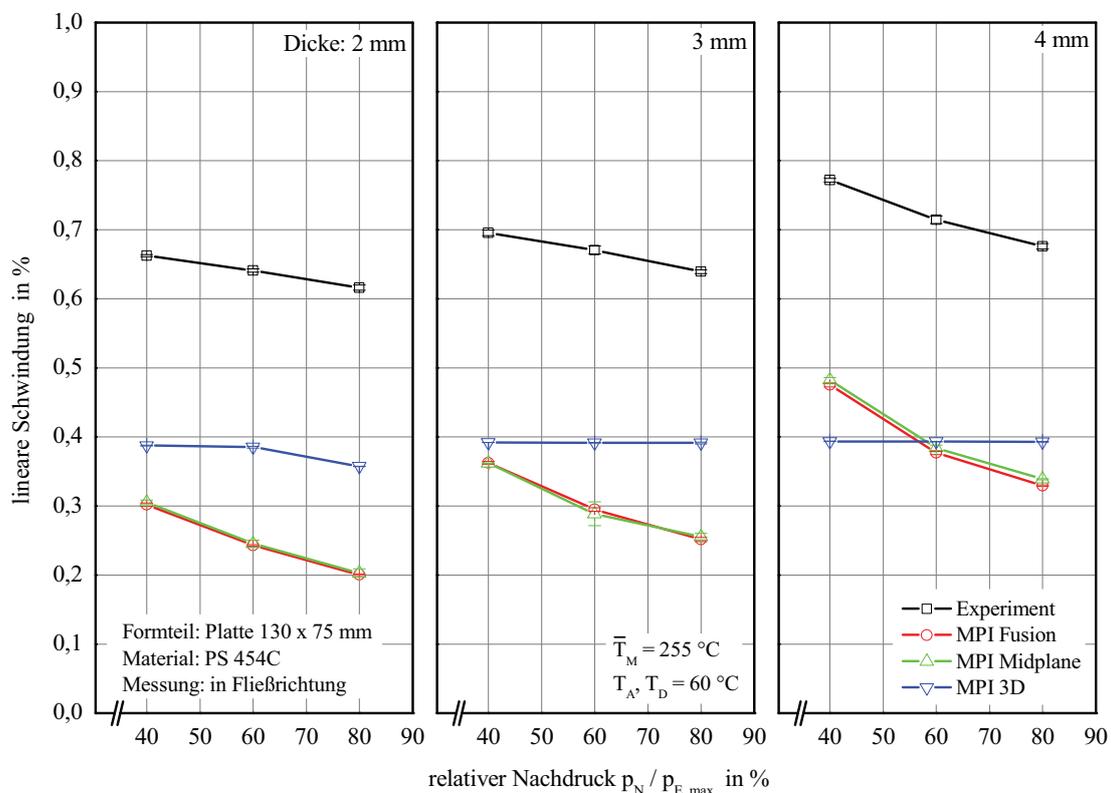


Bild 51: Lineare Schwindung in Fließrichtung über der Nachdruckhöhe für unterschiedliche Wanddicken (Material: PS 454C)

Die MPI-Midplane- und MPI-Fusion-Verläufe stimmen tendenziell gut mit den Experimenten überein. Die Experimente zeigen für die 2 mm und 3 mm dicken Formteile einen linearen und für die 4 mm dicken Platten einen degressiven Schwindungsverlauf. Dies wurde auch bei Untersuchungen mit ABS Urtal M122 beobachtet.

Im Gegensatz dazu berechnen die $2 \frac{1}{2}D$ -Modelle für alle drei Wanddicken ein degressives Schwindungsverhalten mit steigendem Nachdruck.

Bei allen 3D-Berechnungen konnte, wie bei ABS Urtal M122, an den 3 mm und 4 mm dicken Rechteckplatten eine konstante Schwindung in Fließrichtung für unterschiedliche relative Nachdruckhöhen festgestellt werden.

3.7.2.1.2 Einfluss der Fließweglänge

Material ABS Urtal M122 (amorph)

Das Bild 52 zeigt die Verarbeitungsschwindung quer zur Fließrichtung in Abhängigkeit von der Fließweglänge. Die Schwindung wird an jedem Ort durch den örtlichen und zeitlichen Temperatur- und Druckverlauf bestimmt. Bei gleichmäßiger Abkühlung nimmt der Druck über der Fließweglänge ab. Daher wird mit längerem Fließweg (kürzeren Druckwirkzeiten) die Schwindung größer.

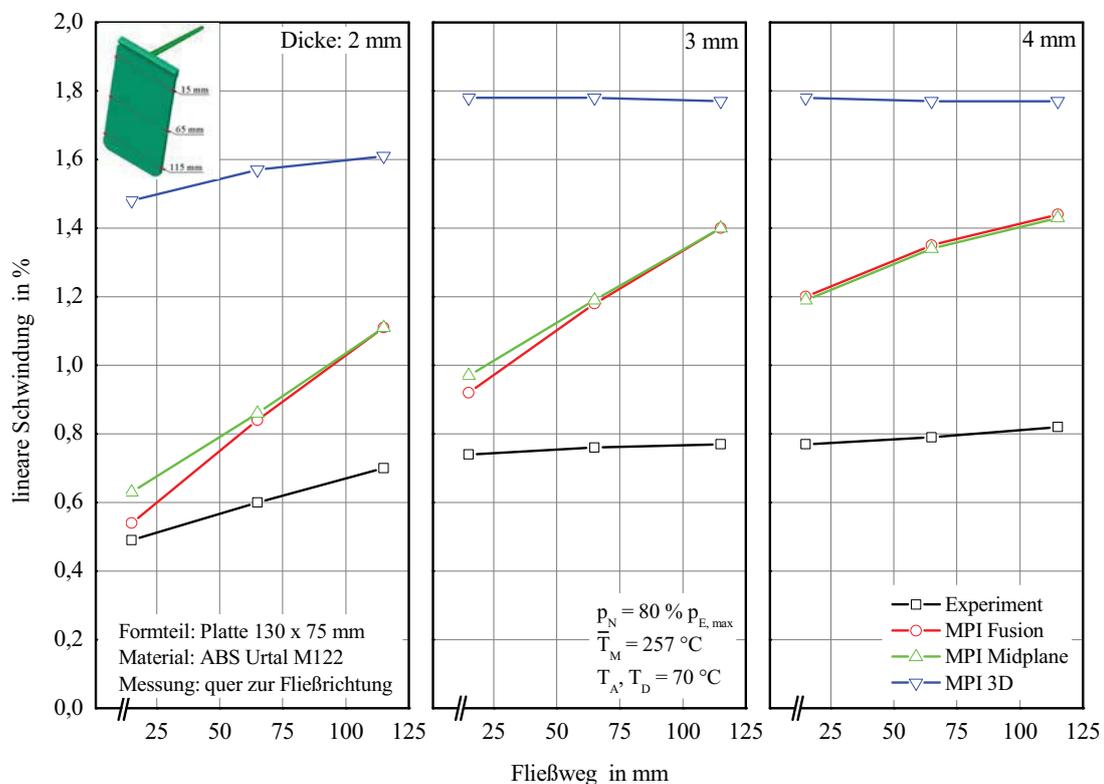


Bild 52: Lineare Querschwindung in Abhängigkeit vom Fließweg bei unterschiedlichen Wanddicken (Material: ABS Urtal M122)

Aus dem Bild 52 wird deutlich, dass bei den dicken Formteilen (3 mm, 4 mm) die zunehmende Entfernung vom Anguss nur eine untergeordnete Rolle auf die gemessenen Schwindungswerte spielt. Bei der 2 mm dicken Platte ist die Zunahme der Querschwindung stärker ausgeprägt.

Die Berechnungsergebnisse liegen für alle Modelle über den gemessenen Schwindungswerten. Mittelflächen- und Fusion-Modell zeigen im Vergleich zu den

gemessenen Daten durchwegs eine überproportionale Zunahme der Schwindung mit dem Fließweg. Das 3D-Modell errechnet nur für die 2 mm dicke Platte eine höhere Schwindung bei längerem Fließweg. Für die 3 mm und 4 mm dicken Platten ist beim 3D-Modell keine Abhängigkeit von der Fließweglänge ersichtlich.

Material PS 454C (amorph)

Die Verarbeitungsschwindung quer zur Fließrichtung in Abhängigkeit vom Fließweg für PS 454C zeigt das Bild 53. Im Gegensatz zu ABS Urtal M122 kann für das Polystyrol eine ausgeprägte Abhängigkeit der gemessenen Schwindung von der Fließweglänge bei den dickeren Formteilen (3 mm, 4 mm) festgestellt werden (Vgl. Bild 52).

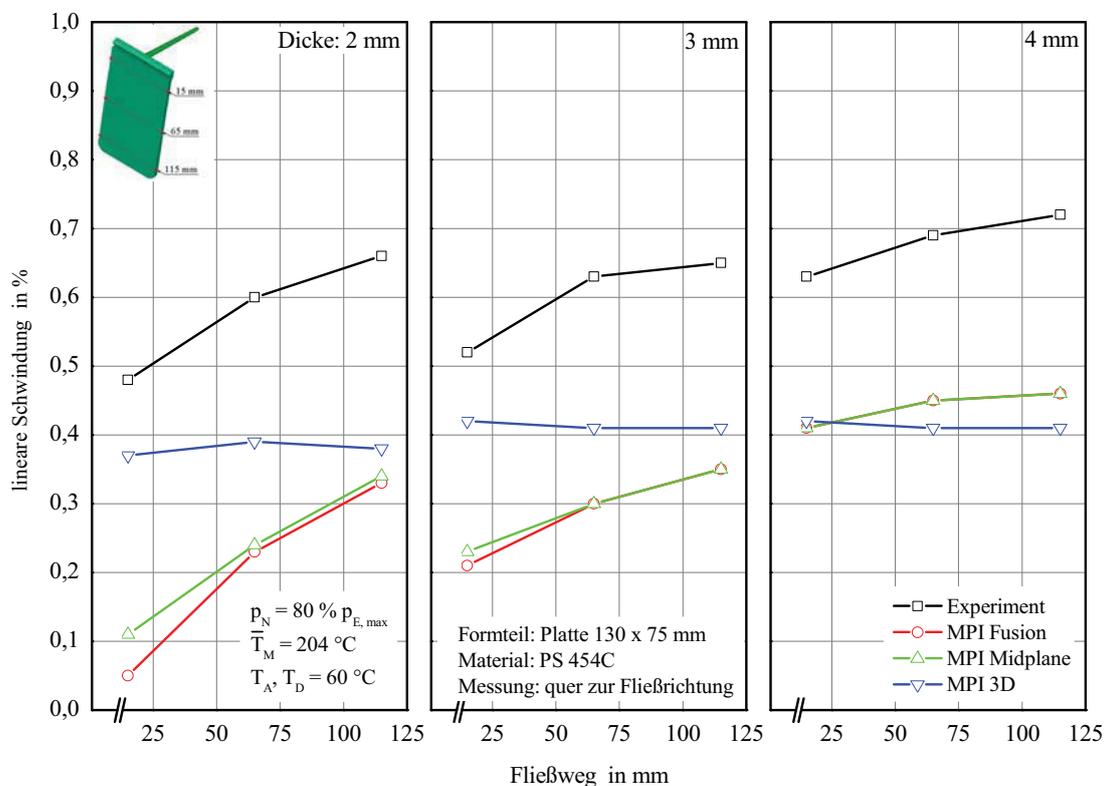


Bild 53: Lineare Querschwindung in Abhängigkeit vom Fließweg bei unterschiedlichen Wanddicken (Material: PS 454C)

Wiederum zeigen sich nennenswerte Unterschiede zwischen den 2 ½D- und 3D-Berechnungen. Die 2 ½D-Simulationen geben den tendenziellen Schwindungsverlauf der experimentellen Untersuchungen besser wieder als die 3D-Berechnungen.

Bei diesem Material liegen alle Berechnungsergebnisse unterhalb der am Formteil gemessenen Schwindungen.

3.7.2.2 Formteil Schachtel

3.7.2.2.1 Einfluss der Nachdruckhöhe und der Maßart

Material Ultraform N2320 (POM, teilkristallin)

Neben den Prozessgrößen wird die Schwindung der Schachtel auch durch die unterschiedliche Schwindungsbehinderung im Werkzeug beeinflusst. An der Schachtel wurden drei verschiedene Maße für die Schwindungsauswertungen ausgewählt (Bild 54). L1 ist die Länge der Bodenfläche, L2 die Länge der Seitenkanten und L3 ist die Schachtelhöhe. Bei den Maßen L1 und L2 handelt es sich um gebundene Maße, die durch den Werkzeugkern behindert werden, solange das Bauteil nicht ausgeworfen wird. L3 stellt ein teilgebundenes Maß dar.

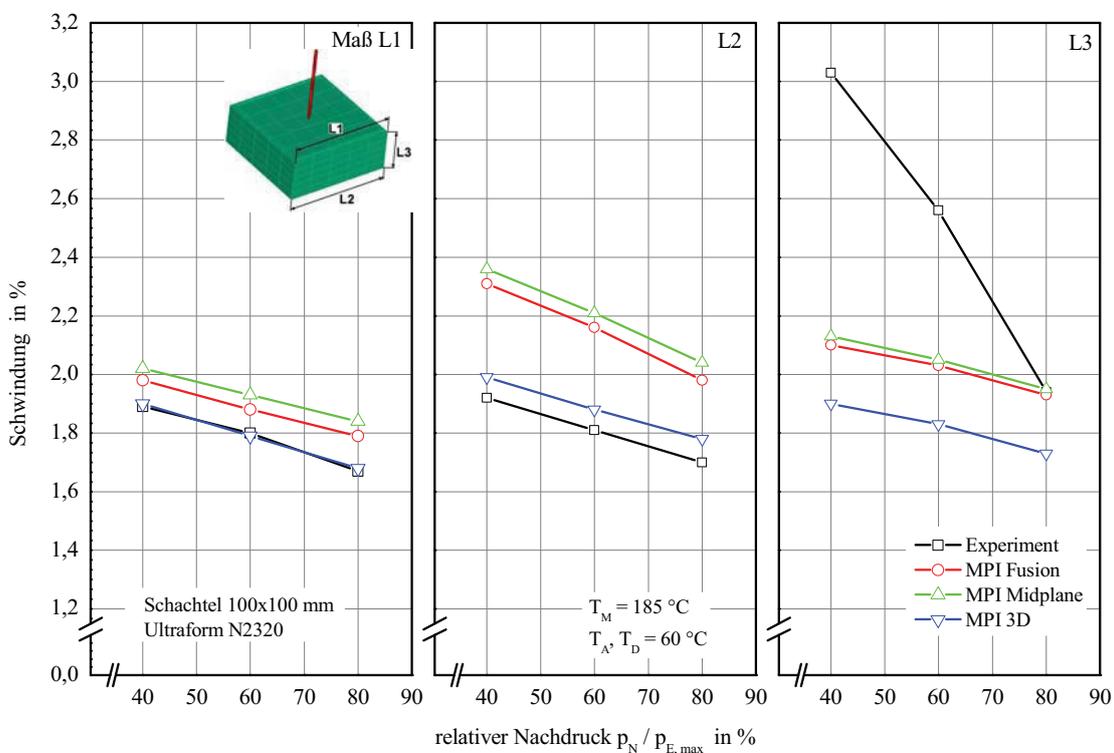


Bild 54: Lineare Schwindung über der Nachdruckhöhe für unterschiedliche Maße (Material: Ultraform N2320)

Das Bild 54 zeigt die Abhängigkeit der berechneten und experimentell ermittelten Schwindung von der Nachdruckhöhe für unterschiedliche Maße. Die dargestellten Kurven wurden für das Material Ultraform N2330 ermittelt.

Es ist erkennbar, dass die am Bauteil gemessene Schwindung von der Maßart abhängig ist. Das Maß L3 weist vor allem bei geringen Nachdrücken eine deutlich größere Schwindung auf als die beiden gebundenen Maße L1 und L2. Die Abhängigkeit der Schwindung vom Nachdruck ist für das Maß L3 am höchsten. Dies ist an der Steigung der Kurve im rechten Diagramm sehr gut zu erkennen.

Die Berechnungen geben die Steigungen nicht für jedes Maß realitätsgetreu wieder. Die berechneten Schwindungen zeigen für alle Maße durchwegs sehr ähnliche Abhängigkeit vom Nachdruck, die Steigungen der Kurven sind für alle dargestellten Berechnungen fast gleich.

Die Berechnungsergebnisse liegen bei den 2 ½D-Modellen für die Maße L1 und L2 über der Realität, beim Maß L3 unterhalb. Die 3D-Berechnung zeigt annähernd gleich große Werte für jedes Maß. Die am Formteil auftretende Schwindung der Bodenfläche (L1) wird von der 3D-Berechnung ausgezeichnet ermittelt, die beiden Kurven sind beinahe deckungsgleich.

Material Stapron E EM605 (PC/PET-Blend, teilkristallin)

Beim Material Stapron E EM605 verhalten sich die Ergebnisse grundsätzlich anders als beim Ultraform N2320 (Bild 55).

Die im Experiment ermittelten Schwindungen für das Maß L3 sind nur beim niedrigen Nachdruck ($p_N / p_{E,max} = 40 \%$) höher als die Schwindungen der gebundenen Maße L1 und L2. Im Experiment ist der Einfluss der Nachdruckhöhe auf die Schwindung beim Maß L3, wie beim Material Ultraform N2320, wieder am höchsten (Steigung der Kurve).

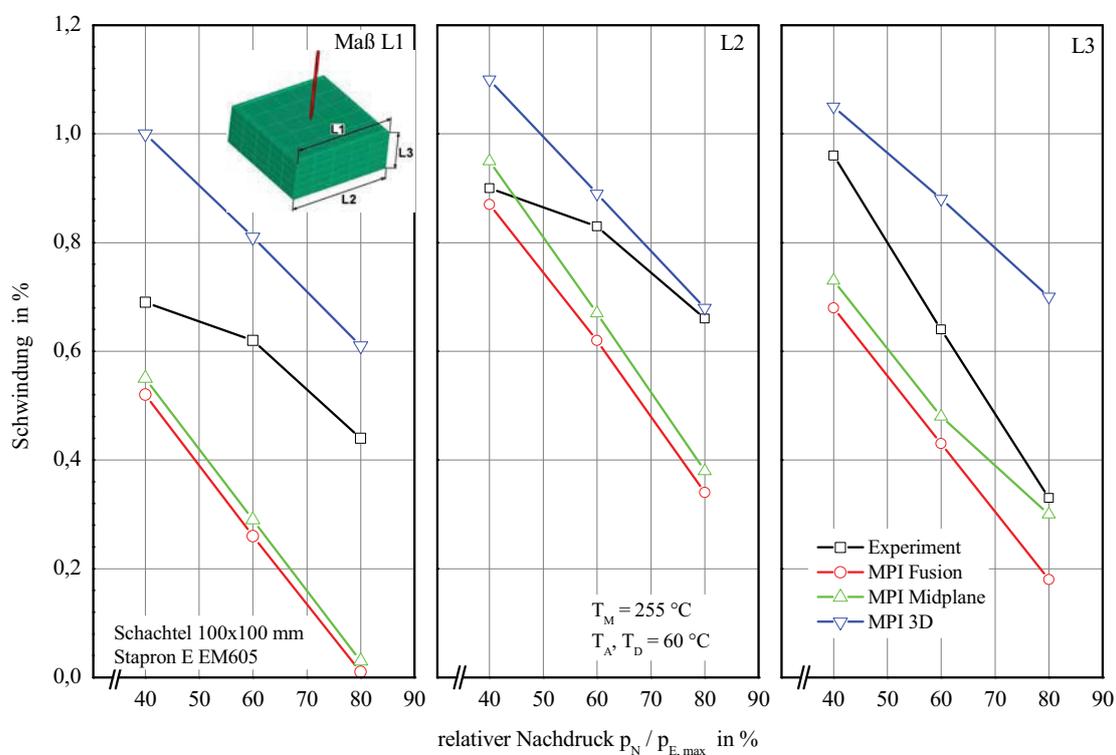


Bild 55: Lineare Schwindung über der Nachdruckhöhe für unterschiedliche Maße (Material: Stapron E EM605)

Die Berechnungsergebnisse für die 2 ½D-Modelle liegen für das Stapron E EM605 durchwegs unterhalb der experimentell ermittelten Schwindungen (Ausnahme L2 bei 40 % relativem Nachdruck). Die 3D-Berechnungsergebnisse zeigen für jedes Maß zu hohe Schwindungswerte. Die experimentell ermittelte progressive Schwindungsabnahme der Maße L1 und L2 in Abhängigkeit des Nachdruckes wird von keinem der Berechnungsmodelle richtig ermittelt.

3.7.2.2 Einfluss der Massetemperatur

Material Ultraform N2320 (POM, teilkristallin)

Die Massetemperatur beeinflusst auf wesentlich komplexere Weise als der Nachdruck das Schwindungsverhalten. Es treten in der Praxis zwei gegenläufige Effekte auf. Eine zunehmende Massetemperatur führt zu einer erhöhten thermischen Kontraktionsfähigkeit der Formmasse und damit zu einer Zunahme der Schwindung. Gleichzeitig trägt eine erhöhte Massetemperatur zur Verringerung der Schmelzviskosität und somit zur besseren Druckübertragung bei, die eine Schwindungsreduktion bewirkt [72, 11, 12].

Im Regelfall überwiegt die verbesserte Druckübertragung gegenüber dem Kontraktionspotential. Bei ungünstigen Wanddickenverhältnissen und schlechter Druckübertragung kann man aber durch eine Erhöhung der Massetemperatur erhöhte Schwindungen feststellen [72].

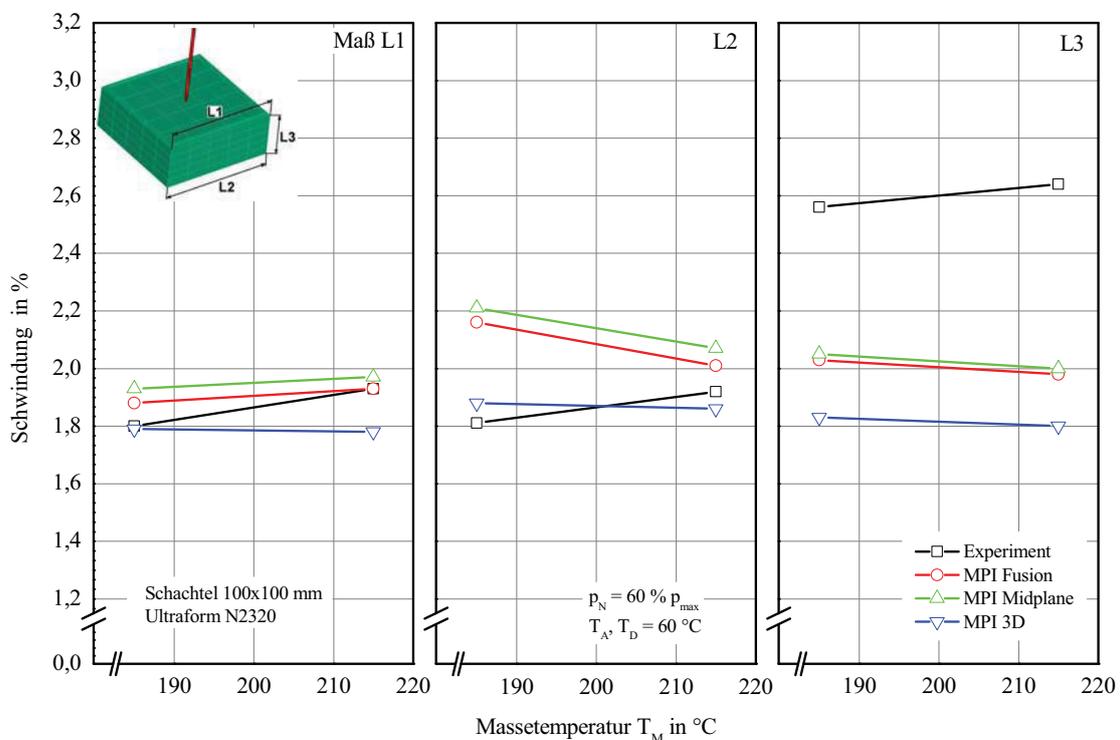


Bild 56: Lineare Schwindung in Abhängigkeit der Massetemperatur für unterschiedliche Maße (Material: Ultraform N2320)

Im Experiment sind an der Schachtel höhere Schwindungen nach einer Erhöhung der Masstemperatur festgestellt worden. Dieser Zusammenhang ist aus dem Bild 56 ersichtlich. Die Abhängigkeit der Schwindung von der Masstemperatur ist für alle drei Maße L1 bis L3 gleich. Dies ist an der gleichen Steigung erkennbar.

Die Berechnungsergebnisse geben diese Abhängigkeiten nicht richtig wieder. Die berechneten Schwindungen zeigen je nach Maß und Berechnungsmodell unterschiedliche Abhängigkeit von der Masstemperatur.

Für das Maß L1 haben die 2 ½D-Modelle tendenziell den richtigen Verlauf, für die Maße L2 und L3 sind die Verläufe jedoch gegenläufig. Das 3D-Modell berechnet mit zunehmender Masstemperatur für jedes Maß eine geringfügige Abnahme der Schwindung.

Material Stapron E EM605 (PC/PET-Blend, teilkristallin)

Für das Material Stapron E EM605 zeigen die Experimente wie bei Ultraform N2320 einen Anstieg der Schwindungen mit zunehmender Masstemperatur (Bild 57).

In diesem Fall werden mit dem 3D-Modell die Verläufe für jedes Maß tendenziell richtig ermittelt, die Schwindungen sind jedoch höher als in der Realität. Wie beim Material Ultraform N2320 sind die Tendenzen der 2 ½D-Modelle nur für das Maß L1 richtig wieder gegeben. Für die Maße L2 und L3 sind die Abhängigkeiten gegenläufig.

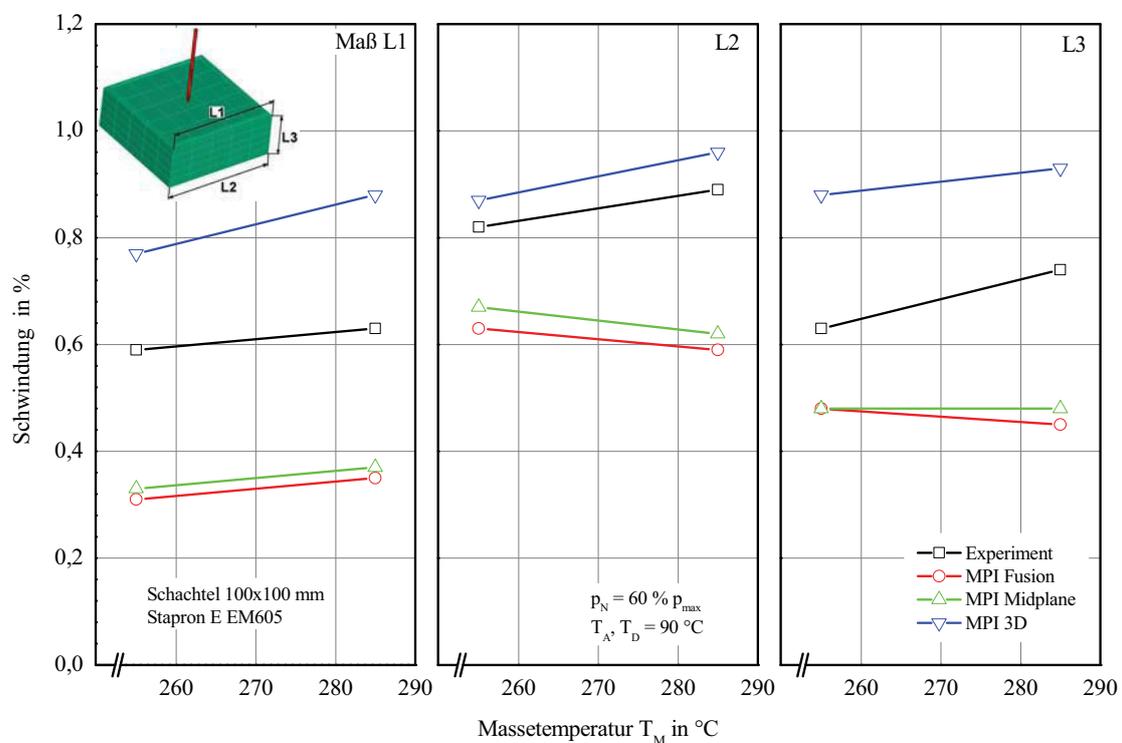


Bild 57: Lineare Schwindung in Abhängigkeit der Masstemperatur für unterschiedliche Maße (Material: Stapron E EM605)

3.7.3 Schlussfolgerungen der Gegenüberstellungen

Zusammenfassend können auf Basis der Untersuchungen aus dem Kapitel 3.7 die folgenden Schlussfolgerungen hinsichtlich der Berechnungsgenauigkeiten gezogen werden:

- 1) Die Füllbilder werden mit allen Modelltypen ähnlich und realitätsnah berechnet. Für flächige Teile sind bevorzugt die 2 ½D-Modelle (Midplane und Fusion) einzusetzen. Für dickwandige Teile mit Wanddickensprüngen, Rippen, etc. ist das 3D-Modell zu verwenden.
- 2) Der maximale Einspritzdruck wird für die 2 ½D-Modelle nahezu identisch berechnet. Die 3D-Berechnungen liefern nicht immer die gleichen Ergebnisse wie die 2 ½D-Berechnungen. Die Ergebnisse liegen einmal über, das nächste Mal unter den experimentell ermittelten Werten, abhängig vom verwendeten Material und Modell. Dabei ist kein Muster erkennbar.
- 3) Für die Kühlberechnungen gelten sinngemäß die gleichen Aussagen wie in Punkt 2. Mit Vorsicht sind die Ergebnisse der Kühlberechnung im Bereich der Übergänge von Beam- zu Mittelflächelementen zu interpretieren. Hier treten Ungereimtheiten auf, die dadurch erklärt werden können, dass keine Übergangsbedingungen zwischen diesen Elementtypen berücksichtigt werden können.
- 4) Die größten Unterschiede zwischen den Modellen sind bei den Ergebnissen der Schwindungs- und Verzugsberechnungen festzustellen. Die Berechnungen an den beiden 2 ½D-Modellen liefern immer ähnliche Ergebnisse. Zu berücksichtigen ist, dass je nach Komplexität des Bauteils für die 2 ½D-Modelltypen Kompromisse beim Modellieren eingegangen werden müssen, die sich direkt auf die Qualität der Ergebnisse auswirken können.
- 5) Die Schwindungs- und Verzugsergebnisse der 3D-Modelle weichen meist von den Ergebnissen der 2 ½D-Modelle ab. Es sind nicht nur Abweichungen in der Höhe der Ergebnisse feststellbar, teilweise wird der Verzug auch qualitativ anders errechnet. Für die richtige Auswahl des Berechnungsmodells ist also die Bauteilgeometrie ausschlaggebend.
- 6) Die Qualität der Schwindungsergebnisse ist auch an die Qualität der zugrunde gelegten Stoffdaten, insbesondere der pvT- und Viskositätskurven, gebunden. Dies konnte in den Untersuchungen in Kapitel 3.7.2 festgestellt werden. Es konnte kein eindeutiger Zusammenhang zwischen der absoluten Genauigkeit der Schwindungsergebnisse und der Stoffklasse des Kunststoffes (amorph, teilkristallin) ermittelt werden. Die Ergebnisse liegen einmal über und einmal unter den experimentell ermittelten Werten, ohne einem bestimmten Muster.
- 7) Die Prozessabhängigkeit der Schwindung wird von den Verläufen her durch die 2 ½D-Modelle tendenziell meist richtig berechnet. Für das 3D-Modell gilt dies nicht immer. Bei dem Plattenformteil wurde für das 3D-Modell überwiegend eine konstante Schwindung in Abhängigkeit vom Nachdruck berechnet, was nicht der Realität entspricht.

4 Thermografie von Spritzgießwerkzeugen

4.1 Einleitung und Grundlagen

Thermografie bedeutet wörtlich „Darstellung Thermischer Effekte“ [52]. Jeder Körper sendet oberhalb der Temperatur des absoluten Nullpunkts von 0 Kelvin Temperaturstrahlung aus. Sein infraroter Spektralbereich reicht von ca. 800 nm bis zu einer Wellenlänge von etwa 1 mm (Bild 58). Dies wird bei der Infrarot-Thermografie dazu genutzt, die Temperatur des abstrahlenden Körpers zu bestimmen. Dabei ermittelt eine Thermografiekamera die von einem Körper abgestrahlte Leistung und ordnet dieser Leistung eine Temperatur zu [62].

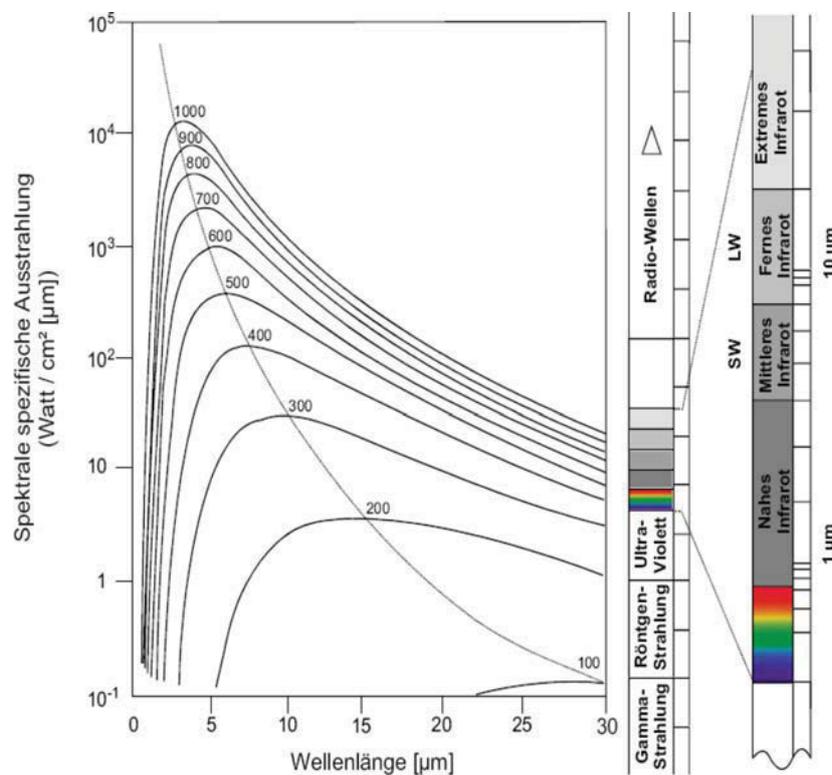


Bild 58: Spektrale spezifische Ausstrahlung eines schwarzen Körpers bei verschiedenen Temperaturen nach dem Planckschen Strahlungsgesetz (links) und Lage der Infrarotstrahlung im elektromagnetischen Spektrum (rechts) [62]

Mathematisch wird der Zusammenhang von Temperatur und Strahlungsleistung durch das Plancksche Strahlungsgesetz beschrieben. Zusätzlich müssen noch geometrische Zusammenhänge und Kenngrößen des Detektors berücksichtigt werden, der zur Messung der Strahlungsleistung verwendet wird.

Die Temperatur- oder Schwarzkörperstrahlung besitzt ein kontinuierliches Emissionsspektrum. Durch spontane und induzierte Emission, sowie Absorption als Wechsel-

wirkungen zwischen Strahlung und einem thermodynamischen Teilchensystem lässt sich die Temperaturstrahlung für den stationären Zustand berechnen.

Das Plancksche Strahlungsgesetz liefert den Zusammenhang der abgestrahlten Leistung $M(\lambda, T)$ als Funktion der Temperatur T und der Wellenlänge λ :

$$M(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right)} - 1} \quad (56)$$

Dabei ist M die aufgrund der Temperatur emittierte hemisphärische und unpolarisierte spezifische Ausstrahlung pro Wellenlänge in $\text{W/m}^2\text{m}$ mit

der Lichtgeschwindigkeit $c = 2,99792 \cdot 10^8 \text{ m/s}$,

der Boltzmann-Konstanten $k = 1,3806 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ und

der Planck-Konstanten $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$.

Die Lage der Strahlungsmaxima verschiebt sich mit zunehmender Temperatur hin zu kleineren Wellenlängen (Bild 58). Dies beschreibt das Wiensche Verschiebungsgesetz:

$$\lambda_{\max} = \frac{2,898 \cdot 10^{-3}}{T} \quad [m] \quad (57)$$

Integriert man das Plancksche Strahlungsgesetz über alle Wellenlängen, so erhält man die spezifische Ausstrahlung nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz:

$$M(T) = \int_0^{\infty} M(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4, \quad (58)$$

mit

der Stefan-Boltzmann-Konstanten $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$.

Diese Strahlungsgesetze gelten jedoch nur für ideale Schwarze Körper.

Misst man die von einem Oberflächenelement emittierte flächenspezifische Ausstrahlung, so lässt sich daraus die Temperatur T_W der Wandoberfläche berechnen. Dieses Verfahren wird in der Thermografiekameratechnik angewendet. Dabei setzen die Kameras Detektorelemente ein, die nur in einem beschränkten Wellenlängenintervall (im Allgemeinen 3-5 μm oder 8-13 μm) Strahlung registrieren. In diesen Bereichen können die Einflüsse, die der Weg der Strahlung durch die Atmosphäre vom Sender zum Empfänger ausübt, vernachlässigt werden [62].

Nur ideale schwarze Strahler (ss) emittieren nach dem Planckschen Strahlungsgesetz. Reale Strahler (rs) emittieren nur einen Teil der Temperaturstrahlung des schwarzen Strahlers. Dieses Verhalten wird durch den Emissionskoeffizienten ε beschrieben. Die meisten thermografisch interessanten Stoffe besitzen einen von der Wellenlänge nahezu unabhängigen Emissionskoeffizienten ε [62]. Für die spezifische Abstrahlung gilt:

$$M_{rs}(T) = \varepsilon \cdot M_{ss}(T) \quad (59)$$

Sie setzt sich aus drei Anteilen zusammen: einem Teil, der den Körper durchdringt (Transmission), ein weiterer bildet die Umgebungsstrahlung, die am Körper reflektiert wird (Reflexion) und der dritte Teil wird vom Körper selbst aufgrund seiner Temperatur abgestrahlt (Emission). Für die Summe von Emissions-, Transmissions- und Reflexionskoeffizienten gilt:

$$\varepsilon_R + \varepsilon_E + \varepsilon_T = 1 \quad (60)$$

Unter der Annahme, dass die Transmission vernachlässigbar ($\varepsilon_T = 0$) ist, setzt sich die ausgesandte Strahlung aus zwei Anteilen, der Reflexion ε_R und der Emission ε_E , zusammen, sodass gilt:

$$\varepsilon_E \sigma T_W^4 + \varepsilon_R \sigma T_U^4 = \sigma T_E^4 \quad (61)$$

Der erste Term in Gleichung (61) stellt die von der Wandoberfläche mit der Temperatur T_W ausgesandte Strahlung dar. Die aus der Umgebung mit der Temperatur T_U auf die Wand treffende und von dort reflektierte Strahlung wird durch den zweiten Summanden beschrieben. Empfängerseitig ordnet die Kamera der einfallenden Strahlung eine Temperatur T_E zu. Die wahre Wandoberflächentemperatur des betrachteten Objekts T_W lässt sich mit folgender Gleichung unter Berücksichtigung von Gleichung (60) berechnen zu:

$$T_W = \left[\frac{T_E^4 - (1 - \varepsilon_E) T_U^4}{\varepsilon_E} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (62)$$

Man erkennt, dass zur Bestimmung der Wandoberflächentemperatur T_W der Emissionswert ε_E und die Temperatur der Umgebung T_U bekannt sein müssen. Zur quantitativen Auswertung von Thermografien ist also eine Emissionswert-Korrektur notwendig. Diese kann mit der für die Untersuchungen zum Einsatz kommenden Thermografie-Auswerteeinheit und der implementierten Software durchgeführt werden.

4.2 Experimentelle Untersuchungen an einer Formteilplatte

Im Spritzgießbereich ergeben sich vielfältige Möglichkeiten, thermische Probleme an Formteilen und Werkzeugen zu erkennen. Die direkte Messung am Formteil ermöglicht die Visualisierung von Hot-Spots und das Erkennen von Temperaturdifferenzen, auch das Abkühlverhalten eines Formteils kann so beobachtet werden. So sind thermisch verursachte Formteilfehler wie Oberflächenfehler, Maß- und Verzugsprobleme durch den Einsatz von Infrarotkameras eindeutig erkennbar und zuzuordnen [47].

Für die Untersuchungen wurde ein 4 mm dickes Plattenformteil herangezogen. Das Formteil wurde mit einer Massetemperatur von 256 °C und einer Werkzeugtemperatur von 40 °C gespritzt. Unmittelbar nach dem Entformen wurde die Temperaturverteilung der auswerfer- und düsenseitigen Werkzeugkavität und des Plattenformteils mit einer Infrarotkamera vom Typ JADE-UC der Firma CEDIP Infrared Systems (Croissy-Beaubourg, F) aufgenommen. Die technischen Daten der verwendeten Infrarotkamera zeigt die Tabelle 1.

Tabelle 1: Technische Daten der verwendeten Infrarotkamera [46]

Eigenschaft	Einheit	Kameratype
		CEDIP Infrared Systems JADE-UC
Detektor		Ungekühlter FPA-Mikrobolometer
Auflösung	in Pixel	320 x 240
Spektralbereich	in μm	8 - 12
Thermische Empfindlichkeit	in mK	90 (bei 30 °C)

Die Messergebnisse der Infrarot-Thermografie werden mit Berechnungsergebnissen aus MPI verglichen.

Die Kameraaufnahmen sind in einer Entfernung von ca. 1 m schräg vor der zu untersuchenden Werkzeugkavität für eine Dauer von jeweils ca. 10 Sekunden durchgeführt worden (Bild 59). Zur Visualisierung der Temperaturdifferenzen und des

Abkühlverhaltens am Formteil wurde dieses nach dem Auswerfen exakt in der auswerfer- oder düsenseitigen Kavität positioniert und ebenfalls für 10 Sekunden aufgenommen.

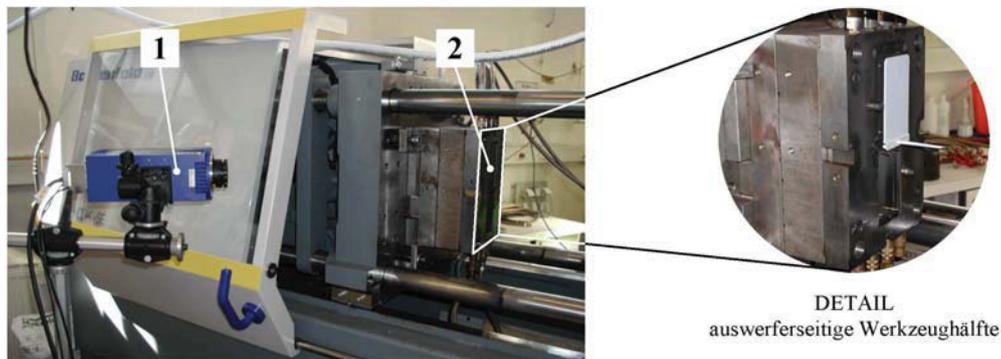


Bild 59: Versuchsaufbau der Infrarot-Thermografie zur Aufnahme der düsenseitigen Werkzeugkavität: (1) Infrarotkamera, (2) auswerferseitige Werkzeughälfte mit Formteil

Grundsätzlich lassen sich Spritzgießwerkzeuge nicht oder nur bedingt ohne grobe Fehler mittels Thermografie untersuchen. Durch Reflexion und auftretende Strahlungsfehler, welche durch die zum Teil hochglänzenden Oberflächen auftreten, kann die Oberflächenstrahlung örtlich nicht hinreichend genau erfasst werden. Des Weiteren ist der Emissionskoeffizient der Werkzeugoberfläche nicht bekannt. Um möglichst die Eigenschaften eines schwarzen Strahlers zu erhalten, wurde daher die zu messende Oberfläche mit einer Graphit-Sprühschicht geschwärzt. Diese Sprühschicht haftet für mehrere Spritzgießzyklen an der Oberfläche, wodurch annähernd ein schwarzer Strahler während der Messungen realisiert werden kann. Die an der Auswerteeinheit angezeigten Temperaturen sind somit Oberflächentemperaturen.

4.2.1 Vergleich zwischen Messungen und Berechnungen

Das Temperiersystem soll eine gleichmäßige Wärmeabfuhr aus dem entsprechenden Formteil gewährleisten. Das heißt, das Formteil soll nach dem Entformen eine örtlich konstante mittlere Entformungstemperatur aufweisen. Ungleichmäßigkeiten in der Wärmeabfuhr führen zu Schwindungsdifferenzen und zum Verzug.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden die Möglichkeiten eines Infrarotkamarasystems zur Bestimmung der Temperaturverteilung am Spritzgießwerkzeug untersucht. Die Messungen wurden mit Berechnungsergebnissen aus MPI verglichen.

In Bild 60 ist der Anfahrvorgang von dem verwendeten Versuchswerkzeug für das 4 mm dicke Plattenformteil aufgetragen. Die Werkzeugtemperatur stellt sich ausgehend von der Temperiermitteltemperatur (T_A , $T_D = 40\text{ °C}$) bei Betriebsbeginn ($t = 0\text{ s}$) auf die Gleichgewichtstemperatur im Automatikbetrieb ein.

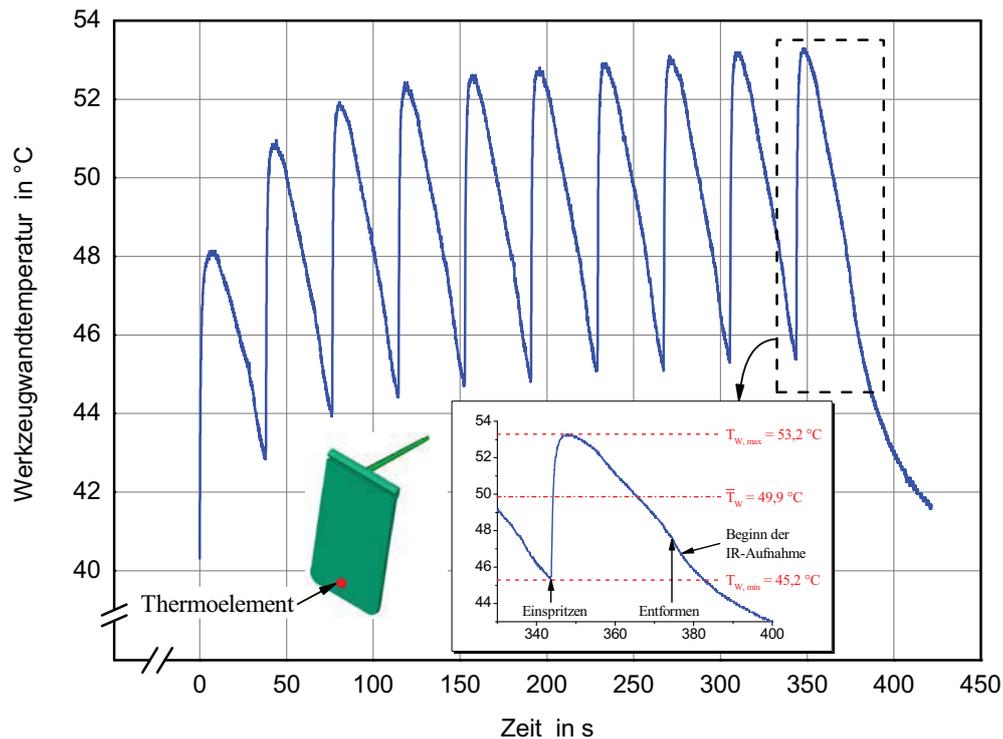


Bild 60: Auswerferseitige Werkzeugwandtemperatur über der Zeit: Platte 130 x 75 x 4 mm; Material: ABS Urtal M122; Massetemperatur 256 °C; Werkzeugtemperierung 40 °C; Einspritzzeit 0,9 s; Kühlzeit 28 s

Nach zirka 8 Zyklen wird der quasistationäre Zustand erreicht. In der Detailansicht von Bild 60 wurden auch der Einspritz- und Entformungszeitpunkt sowie der Beginn der IR-Aufnahme eingetragen. Die mittlere Werkzeugtemperatur liegt bei 49,9 °C. Während eines Zyklus variiert die Werkzeugoberflächentemperatur in etwa um 8 °C.

Das Bild 61 zeigt die gemessene Temperaturverteilung der auswerferseitigen Werkzeughälfte unmittelbar nach der Formteilentformung. Eine Gegenüberstellung der auswerferseitigen Simulationsergebnisse aus MPI ist in Bild 62 für die Modell-Ansätze Midplane, Fusion und 3D dargestellt.

Qualitativ lassen sich gute Übereinstimmungen zu den Messergebnissen mit allen drei Berechnungsmodellen erkennen. Absolut gesehen weicht die gemessene Temperaturverteilung von den Berechnungen ab, da die IR-Thermografie Oberflächentemperaturen nach dem Spritzgießzyklus zeigt. Die MPI-Berechnungen liefern hingegen gemittelte Temperaturen über den Spritzgießzyklus. Die gemittelten Temperaturen sind immer höher.

Wird eine Verschiebung der Berechnungsergebnisse um die Differenz ($\Delta T = -3,1$ °C) der mittleren Werkzeugwandtemperatur ($\bar{T}_W = 49,9$ °C) und der Thermoelementtemperatur zum Zeitpunkt der IR-Aufnahme (in etwa 46,8 °C) durchgeführt, so erhält man annähernd vergleichbare Darstellungen.

Nach der Verschiebung stimmen die Berechnungsergebnisse der Midplane- und Fusion-Modelle quantitativ sehr gut mit den Thermografieaufnahmen überein. Im Vergleich dazu berechnet das 3D-Modell zu geringe Temperaturen.

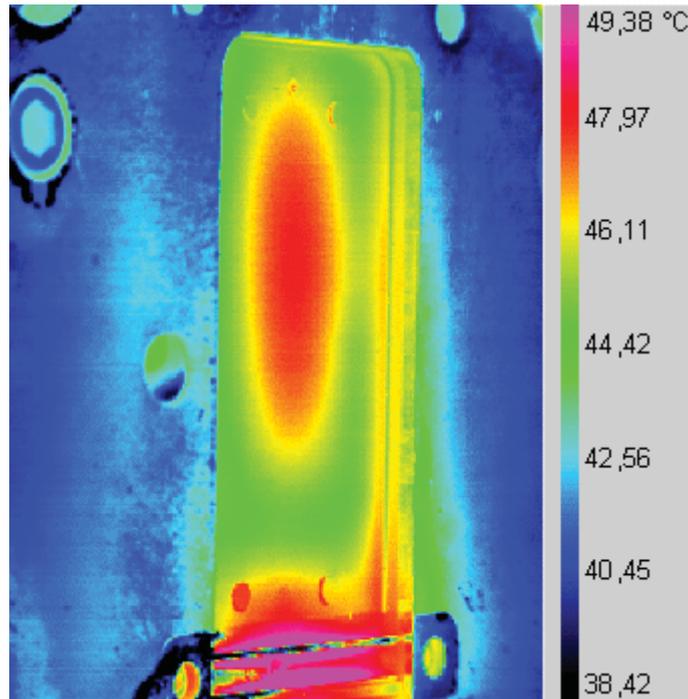


Bild 61: Auswerferseitige Werkzeugthermografie unmittelbar nach der Formteilentformung; Platte 130 x 75 x 4 mm; Material: ABS Urtal M122; Massetemperatur 256 °C; Werkzeugtemperierung 40 °C; Einspritzzeit 0,9 s; Kühlzeit 28 s

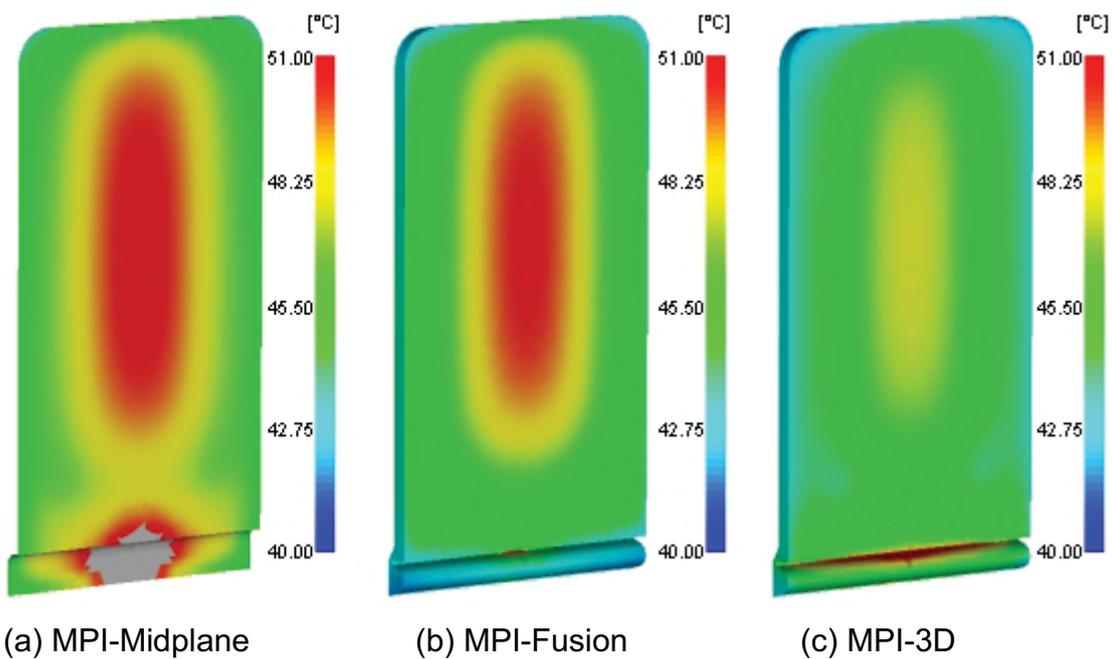


Bild 62: Gegenüberstellung der mit MPI-Midplane, MPI-Fusion und MPI-3D berechneten, über den Zyklus gemittelten Temperaturverteilung der auswerferseitigen Werkzeugkavität; Platte 130 x 75 x 4 mm; Material: ABS Urtal M122; Massetemperatur 256 °C; Werkzeugtemperierung 40 °C; Einspritzzeit 0,9 s; Kühlzeit 28 s

Die größten Unterschiede zwischen Messung und Berechnungen ergeben sich im Angussbereich. Dafür sind mehrere Gründe anzuführen. Im Werkzeug wird die Schmelzeverteilung über einen eigenen Formneusteinsatz durchgeführt. Der Formneinsatz ist vermutlich aus einem anderen Werkzeugstahl hergestellt wie der Rest des Formnestes. Durch die Einsatztrennflächen treten vermutlich Spalte auf, die einen inhomogenen Wärmehaushalt zur Folge haben. Dies können Gründe dafür sein, warum die Thermografie in diesem Bereich wesentlich höhere Temperaturen zeigt als im Plattenbereich.

Ein weiterer Grund könnte sein, dass es aufgrund der Geometrie im Angussverteilerbereich zu Mehrfachreflexionen der Temperaturstrahlung kommt und daher das Temperaturniveau höher ist.

Der Umstand der veränderten Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität des Anguss-einsatzes findet in den Berechnungsmodellen keine Berücksichtigung.

Im Angussbereich des Midplane-Modells (Bild 62(a), grau dargestellt) kommt es zu Unstetigkeiten der Temperaturverteilung am Übergang der Beam-Elemente zu den Dreieckselementen. Der Grund dafür ist, dass in MPI keine Übergangsbedingungen zwischen diesen Elementtypen berücksichtigt werden können. Die Simulationsergebnisse mit dem 3D-Modell zeigen im Bereich des Angussvertailers exaktere Temperaturniveaus sowie auch eine bessere Temperaturverteilung. Der Anschnittbereich wurde beim 3D-Modell mittels Tetraeder-Elementen vernetzt. Damit wird der Wärmeaustausch mit dem Werkzeug richtungsabhängig berechnet. Das Fusion-Modell berechnet zu niedrige Temperaturen im Bereich des Angussvertailers.

In Bild 63 ist das Abkühlverhalten an verschiedenen Positionen in der Werkzeugkavität nach der Formteilentformung dargestellt. Der Zeitpunkt $t = 0$ s bezeichnet den Beginn der IR-Aufnahme, die Position 1 liegt zirka 120 mm (entspricht der Thermoelementposition), Position 2 ist 65 mm und Position 3 ist 20 mm vom Anschnitt entfernt (siehe auch Detail in Bild 63). Nach 10 Sekunden Messzeit beträgt die Abnahme der Werkzeugoberflächentemperatur je nach Position zwischen $1,6$ °C und $2,2$ °C. Die gemessene Abkühlung mit dem Thermoelement liegt bei zirka $2,1$ °C (Bild 63).

In Bild 64 ist die auswerferseitige Werkzeugoberflächentemperatur über der Plattenbreite für drei verschiedene Zeitpunkte aufgetragen. Der Zeitpunkt $t = 0$ s bezeichnet den Beginn der IR-Aufnahme, die Positionen 10 mm und 68 mm auf der Abszisse den Randabstand von der Längsseite des Formhohlraums (siehe auch Detail in Bild 64).

Unmittelbar nach der ersten IR-Aufnahme ($t = 0$ s) beträgt der Temperaturunterschied zwischen Plattenmitte und -rand noch 3 °C, nach 10 s nur mehr $1,9$ °C. Der Wärmeausgleich im Formnest erfolgt nicht nur durch Strahlung der freien Werkzeugoberfläche an die Umgebung, sondern auch durch Konvektion, durch Wärmeleitung von wärmeren zu kühleren Werkzeugregionen und durch den Wärmestrom, den das Temperiersystem abführt. Das bedeutet, mit zunehmender Werkzeugstillstandszeit ($t = 10$ s) trägt das Temperiersystem vermehrt zum Temperatúrausgleich bei.

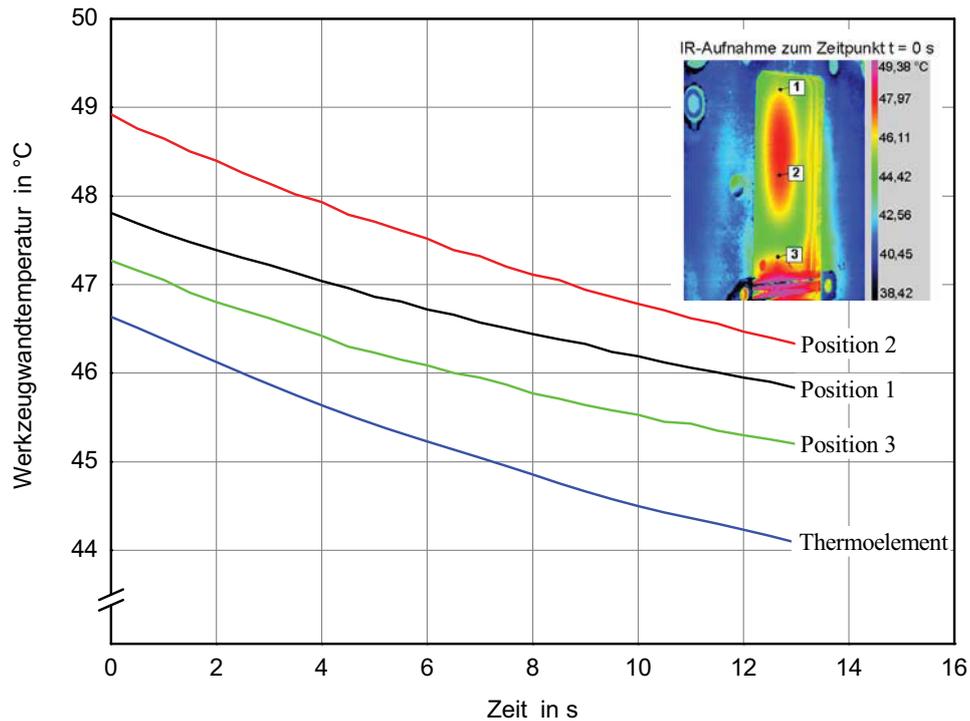


Bild 63: Auswerferseitige Werkzeugoberflächentemperatur über der Zeit für 3 IR-Positionen und das Thermoelement: Platte 130 x 75 x 4 mm; Material: ABS Urtal M122; Massetemperatur 256 °C; Werkzeugtemperierung 40 °C; Einspritzzeit 0,9 s; Kühlzeit 28 s

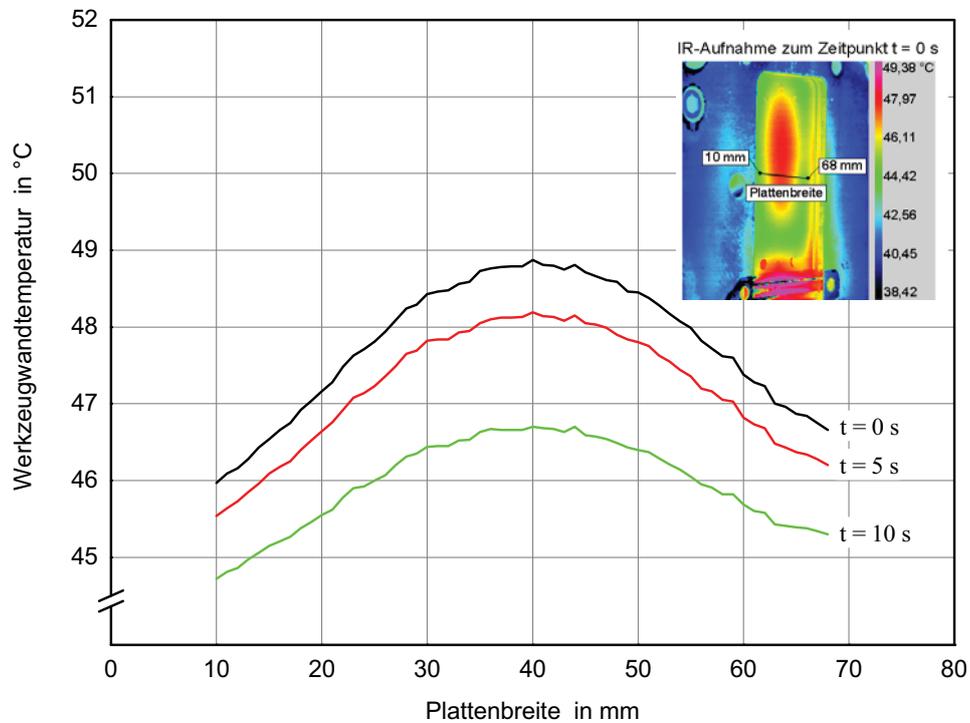


Bild 64: Auswerferseitige Werkzeugoberflächentemperatur über der Plattenbreite für verschiedene Zeitpunkte: Platte 130 x 75 x 4 mm; Material: ABS Urtal M122; Massetemperatur 256 °C; Werkzeugtemperierung 40 °C; Einspritzzeit 0,9 s; Kühlzeit 28 s

4.3 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Grundsätzlich können bei der Thermografie von Spritzgießwerkzeugen Fehler auftreten, die die Messergebnisse beeinflussen. Durch Reflexion und auftretende Strahlungsfehler, welche durch die zum Teil hochglänzenden Oberflächen auftreten, kann die Oberflächenstrahlung örtlich nicht hinreichend genau erfasst werden.

Um möglichst die Eigenschaften eines schwarzen Strahlers zu erhalten, wurde daher die zu messende Oberfläche mit einer Graphit-Sprühschicht geschwärzt. Damit können die störenden Umgebungseinflüsse weitgehend vermieden werden.

Durch diese Vorgehensweise können die Temperaturen im Formnest zuverlässig mittels Infrarotthermografie gemessen werden. Die Vergleiche von Simulationen mit den gemessenen Oberflächentemperaturen zeigen im Wesentlichen, dass die thermischen Verhältnisse im Werkzeug in guter Übereinstimmung mit der Realität berechnet werden. Dies ist eine wichtige Voraussetzung für die nachfolgenden Berechnungsschritte, da die Berechnung von Schwindung und Verzug wesentlich von den berechneten thermischen Verhältnissen im Werkzeug beeinflusst wird.

5 Optische Vermessung von Schwindung und Verzug

5.1 Einleitung und Triangulation

Die optische 3D-Messtechnik hat das Ziel, die x-, y-, z-Koordinaten der Oberfläche eines Messobjektes zu bestimmen. Der Vorteil gegenüber den traditionellen taktilen Verfahren mit Koordinatenmessmaschinen liegt insbesondere darin, dass mit der optischen 3D-Messtechnik bis zu mehrere Millionen Punkte gleichzeitig erfasst werden können. Dadurch werden die Messzeiten extrem verkürzt. Weitere Vorteile folgen aus der Tatsache, dass optische Messungen berührungslos erfolgen. Somit können auch Messungen an weichen Materialien durchgeführt werden. Die optische Messtechnik stößt an Grenzen, wenn beispielsweise hochglänzende Oberflächen oder tiefe Bohrungen am Messobjekt vorhanden sind.

Obwohl mit einem optischen 3D-Sensor sehr viele Punkte gleichzeitig gemessen werden können, kann pro Messung immer nur eine Ansicht betrachtet werden. Um die gesamte Oberfläche eines Messobjekts aufzunehmen, müssen die unterschiedlichen Ansichten richtig zusammengesetzt werden.

Optische Systeme zur Bestimmung der Oberflächentopografie haben sich in den letzten Jahren als am häufigsten eingesetzte Oberflächenmessverfahren durchgesetzt. Prinzip und Anwendung sind beispielsweise in [32, 37, 38] erläutert. Obwohl es eine große Vielfalt unterschiedlicher Verfahren gibt, haben alle einige wesentliche Merkmale gemeinsam. Die Bestimmung der Oberflächengeometrie basiert immer auf einer Triangulation (Bild 65).

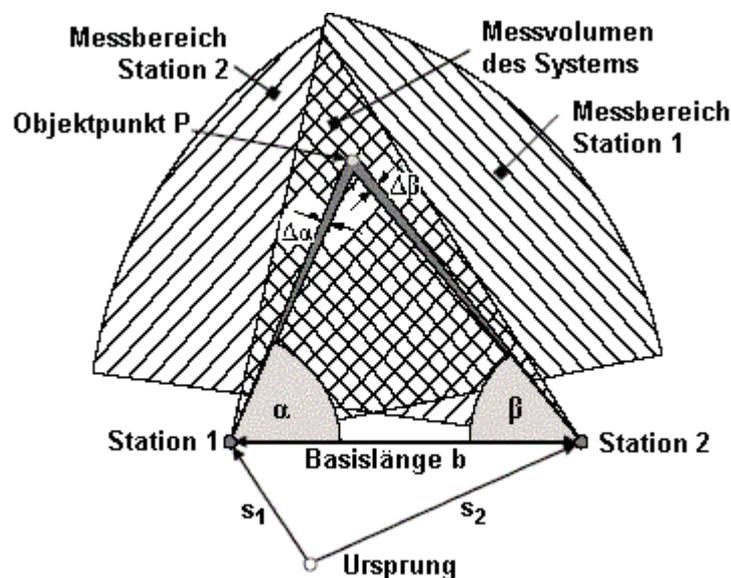


Bild 65: Grundprinzip der Triangulation im zweidimensionalen Fall: Von zwei verschiedenen Stationen an den Positionen s_1 und s_2 wird der zu bestimmende Objektpunkt P angepeilt. Dabei erhält man die beiden Winkel α und β mit der Genauigkeit $\Delta\alpha$ und $\Delta\beta$. Unter der Kenntnis der Basislänge b können dann die Koordinaten von P relativ zum Koordinatenursprung bestimmt werden. Der Messbereich des Gesamtsystems ist die Schnittmenge der Messbereiche der Einzel-Messsysteme [66]

Das Grundprinzip der Triangulation ist schon seit dem Altertum bekannt [66]. Ein Objektpunkt wird, wie in Bild 65 dargestellt, von zwei Standorten mit bekanntem Abstand angepeilt. Die Basislinie und die beiden Peilstrahlen bilden ein Dreieck, in dem alle Winkel und eine Seite bekannt sind. Die Position des dritten Eckpunktes kann damit relativ zu den beiden anderen Ecken berechnet werden.

In der optischen Messtechnik sind grundsätzlich aktive und passive Verfahren zu unterscheiden. Passive Verfahren greifen nicht in die zu vermessende Szene ein. Sie sind von der in der Szene vorhandenen Strahlung abhängig. Aktive Verfahren bringen hingegen gezielt Energie in die zu vermessende Szene ein und detektieren die reflektierte oder transmittierte Energie. Sie arbeiten in der Regel effizienter und robuster als passive Verfahren [19].

Im Folgenden wird ein Überblick über aktiven und passiven Sensorsysteme zur optischen Vermessung gegeben.

5.1.1 Aktive optische Sensorsysteme mit strukturierter Beleuchtung

Bei den aktiven Verfahren findet mindestens eine (strukturierte) Lichtquelle Anwendung. Das Messobjekt wird - je nach Verfahren - mit einem definierten Muster beleuchtet. Von einem Sensor wird dieses Muster aufgrund der Objektgeometrie verschoben und/oder verzerrt aufgenommen. Da das projizierte Muster bekannt ist, kann von diesen Verzerrungen auf die Geometrie des Messobjekts geschlossen werden.

Das einfachste Muster ist der Lichtpunkt, der von Laser-Triangulationssensoren verwendet wird. Ein Lichtpunkt wird auf das Objekt projiziert und mit einer Zeilenkamera oder einer Kamera mit flächenhaftem Sensor erfasst. Die Position des Lichtpunktes wird im Kamerabild bestimmt und dient der Berechnung eines einzelnen Objektpunktes. Aufgrund der guten Fokussierbarkeit werden vorrangig Laserlichtquellen eingesetzt. Um die gesamte von einem Sensorstandpunkt aus sichtbare Oberfläche zu erfassen, muss sowohl die horizontale als auch die vertikale Position des Lichtpunktes verändert werden. Dieser Vorgang ist sehr zeitaufwändig und stellt hohe Anforderungen an die hierfür benötigte Kinematik. [19]

Wird der punktförmige Laser durch einen Linien-Laser ersetzt, so erhält man einen Lichtschnittsensor, mit dem komplette Profilschnitte ausgewertet werden können und somit die Erfassung einer Bauteiloberfläche auf einen y-Scan reduziert.

Werden gleichzeitig viele parallele Linien – also ein Streifenmuster – projiziert, so wirkt jede Hell-Dunkel-Kante wie ein Lichtschnitt. Diesen Ansatz nutzen die Streifenprojektionsverfahren. Hier wird auf die zu vermessende Oberfläche unter einem definierten Winkel ein regelmäßiges Muster aus hellen und dunklen Streifen projiziert und unter einem anderen Winkel beobachtet. Aus Sicht der Kamera verschieben sich die Streifen, abhängig von der jeweiligen Objektgeometrie. Aus dieser Verschiebung kann unter Berücksichtigung des Systemaufbaus durch Triangulationsrechnung die Höhe des Bauteils an der betreffenden Stelle berechnet werden [69].

Eine Genauigkeitssteigerung lässt sich erreichen, indem ein projiziertes Streifenmuster um eine bekannte Phase verschoben wird (Phasenverschiebungsverfahren, engl. Phase-Shift). Zu den aktiven Musterprojektionsverfahren zählen ebenfalls die Moire-Techniken. Bei ihnen wird die Tiefeninformation aus dem durch die Überlagerung zweier auf das Objekt projizierter Gitter entstehenden Moire-Muster gewonnen. Erfolgt die Aufnahme durch ein Gitter, genügt auch eine Projektion. Für die quantitative Bestimmung der Tiefeninformation ist das Verfahren aber selbst bei Verwendung kalibrierter Kameras und Beleuchtung zu ungenau [32, 38].

5.1.2 Passive optische Sensorsysteme / Photogrammetrie

Das wahrscheinlich bekannteste passive Verfahren ist das der Stereobildauswertung aus der Photogrammetrie. Hier werden zeitliche oder räumliche Bildsequenzen des Messobjekts von verschiedenen bekannten Positionen aufgenommen.

Um die Koordinaten eines Objektpunktes bestimmen zu können, muss er in mindestens zwei Aufnahmen identifiziert werden (Bild 66). Das kann durch die Korrelation vorhandener Objektmerkmale oder durch die automatische Identifizierung von künstlichen Markierungen erfolgen. Welche Methode angewandt wird, hängt in erster Linie von der Größe des Messobjektes und der gewünschten Genauigkeit ab. In der Satelliten- oder Luftbildphotogrammetrie, sowie bei der Gebäudevermessung werden in der Regel Objektmerkmale benutzt. Kommt es auf höchste Präzision im Nahbereich an, wird auf künstliche, meistens automatisch identifizierbare, Markierungen zurückgegriffen [66].

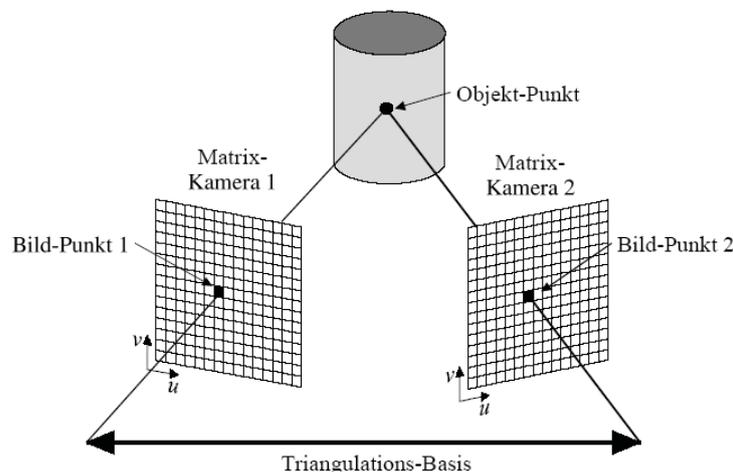


Bild 66: Funktion der passiven Triangulation mit zwei Matrix-Kameras. In beiden Bildern werden die Bildkoordinaten (u, v) des gesuchten Objektpunktes P bestimmt. Mit den bekannten äußeren und inneren Orientierungen der Kameras werden dadurch zwei Geraden im Raum definiert, die sich im Idealfall im Objektpunkt schneiden [66]

Die Anzahl der Kameras richtet sich in erster Linie nach der Veränderungs- und Bewegungsgeschwindigkeit der Messobjekte. Das am weitesten verbreitete Verfahren für statische Aufgaben, die digitale Nahbereichsphotogrammetrie wird für Objekte bis zu Schiffs- oder Brückengröße eingesetzt und arbeitet mit nur einer Kamera und künstlicher Signalisierung. Der große Vorteil liegt in der Selbst- oder Simultan- kalibrierung. Die Kalibrierinformation der Kamera(s) wird aus den Messbildern selbst gewonnen. Bleibt die Kamera während der Messung stabil, kann davon ausgegangen werden, dass die Kalibrierinformation hinreichend genau aus den Daten gewonnen werden kann. Eine aufwändige Laborkalibrierung, deren Gültigkeit nach einem Transport der Kamera nicht mehr gewährleistet ist, kann somit entfallen. [66]

5.2 Vermessungssystem ATOS

Im Rahmen dieser Arbeit wurde das Messsystem ATOS (Advanced Topometric Sensor) der Firma Gesellschaft für optische Messtechnik mbH (GOM mbH), Braunschweig, D, für die flächenhafte Formteilvermessung verwendet (Bild 67). Beim System ATOS handelt es sich um einen topometrischen 3D-Sensor zur sekundenschnellen, hochgenauen und flächenhaften Objekterfassung.

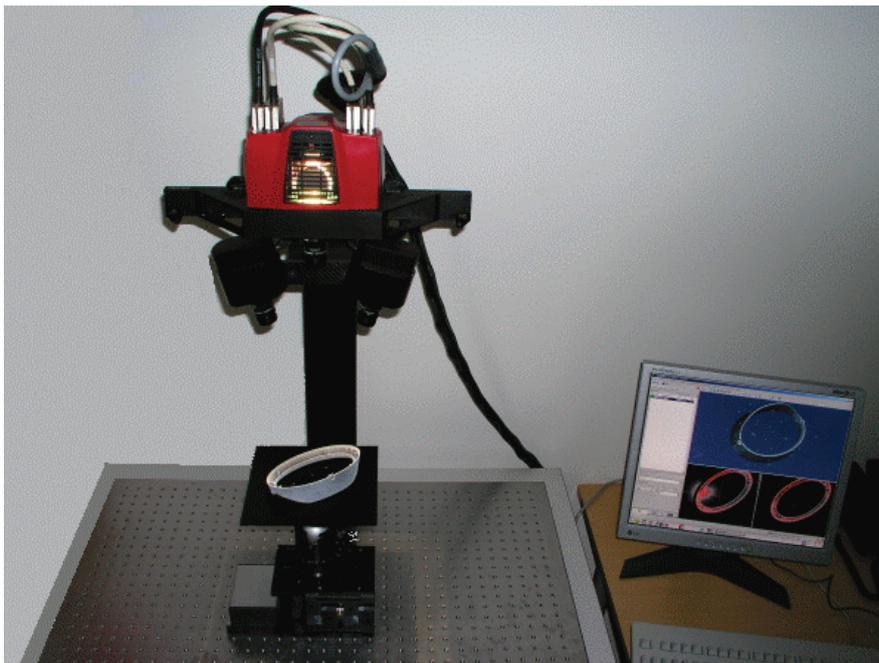


Bild 67: Optisches 3D-Messsystem ATOS

Der Aufbau dieses topometrischen Sensors ist in Bild 68 schematisch dargestellt. Mittels zweier CCD-Videokameras wird das zu vermessende Objekt aus zwei unterschiedlichen Perspektiven betrachtet. Der Projektor wirkt lediglich passiv und wirft Lichtmuster aus verschiedenen parallelen Streifen auf die Objektoberfläche, die durch die Struktur der Oberfläche verzerrt werden. Die Streifenmuster sind auf einem Glasdiagramm aufgebracht. Da der Projektor lediglich als passives Element wirkt, muss er nicht kalibriert werden [56].

Die der Koordinatenberechnung zugrundeliegende Triangulation wird nicht wie allgemein üblich zwischen Projektor, Objekt und Kamera gebildet, sondern nur zwischen Messobjekt und den beiden CCD-Kameras [51, 56]. Bei der verwendeten Messkonfiguration können mit einer Messung für bis zu 1,3 Mio. Bildpunkte die 3D-Koordinaten der Objektoberfläche berechnet werden.

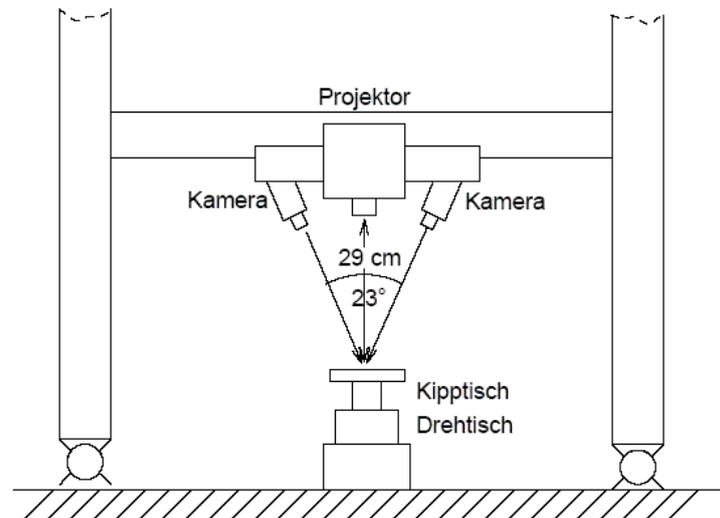


Bild 68: Messaufbau des topometrischen Digitalisiersystems [7]

In Abhängigkeit der Messaufgabe kommen wechselnde Messvolumina zum Einsatz. Die Anpassung der Optik an das jeweilige Messobjekt erfolgt durch die Verwendung unterschiedlicher Objektive mit 12 mm, 17 mm, 23 mm, 35 mm oder 50 mm Brennweite. Damit sind für das ATOS II SO System Messvolumina von $35 \times 28 \times 15 \text{ mm}^3$ bis $200 \times 160 \times 160 \text{ mm}^3$ realisierbar [44]. Die für eine Messung erforderliche Zeit ist bestimmt durch die Vorschubgeschwindigkeit des Glasdias sowie die Übertragung und Verarbeitung der Daten mit der Bildverarbeitungskarte im Rechner. Die Messzeit einer einzelnen Aufnahme beträgt etwa 7 Sekunden.

5.2.1 Kalibrierung

Die Anwendung des Sensors setzt eine Kalibrierung des topometrischen Systems voraus. Es müssen die Parameter der inneren und äußeren Orientierungen der beiden Kameras bestimmt werden. Dazu wird ein dem Messvolumen angepasstes Kalibrierobjekt verwendet, wie es in Bild 69 dargestellt ist. Das Kalibrierobjekt ist ein starres Passpunktfeld auf einer Platte. Auf der Platte sind etwa hundert Kreismarken aufgebracht. Einige der Kreismarken sind durch ihre Größe hervorgehoben. Aufgrund ihrer geometrischen Anordnung lassen sich alle Kreismarken rotations- und größeninvariant identifizieren [56].

Von diesem Passpunktfeld muss lediglich eine Strecke S zwischen zwei Punkten bekannt sein, die den Maßstab definiert (Bild 70) [56].

Die unbekanntenen Koordinaten der Passpunkte werden simultan zu den gesuchten Parametern der inneren und äußeren Orientierung des Sensors mitbestimmt. Weitere

zusätzliche Bedingungen sind eine feste relative Orientierung der beiden Kameras zueinander und eine freie Lagerung des Koordinatensystems [56].

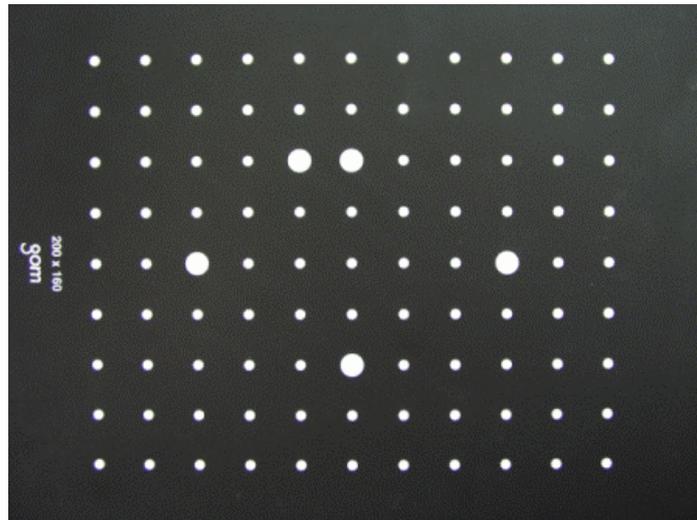


Bild 69: Kalibrierplatte mit Passpunktfeld

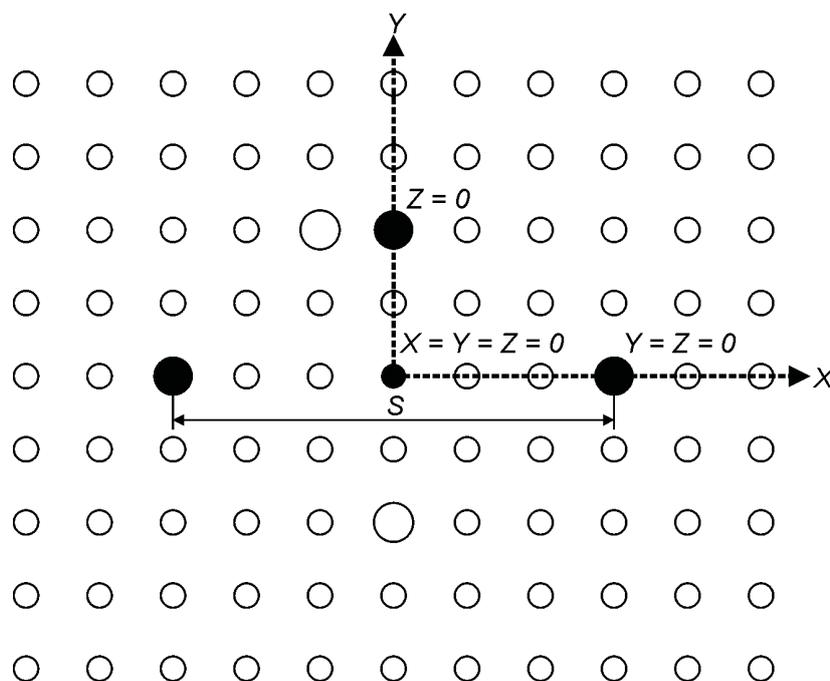


Bild 70: Definition des Koordinatensystems und der Skalierung auf dem Kalibrierobjekt [56]

Während der Kalibrierung wird die Kalibrierplatte mehrfach von den beiden Kameras aus unterschiedlichen Perspektiven aufgenommen. In allen Ansichten müssen die zur Orientierungserkennung benötigten fünf großen Kreismarken nach Bild 69 sichtbar sein. Anschließend werden die Parameter der inneren und äußeren Orientierung der Sensoranordnung berechnet. Relativ zu dem Messsensor wird dabei der Ursprung eines Koordinatensystems sowie dessen Ausrichtung definiert. Die Koordinaten aller gemessenen Oberflächenpunkte beziehen sich auf dieses Koordinatensystem.

5.2.2 Prinzip der Bauteildigitalisierung am Beispiel eines Messprojektes

Ein umfassender Überblick über die möglichen Messstrategien in Verbindung mit den entsprechenden Objektbeschaffenheiten würde den Rahmen dieser Arbeit überschreiten. Daher wird in diesem Kapitel nur richtungsweisend auf einige der wichtigsten Schritte eingegangen. Entscheidend bei der Auswahl der Messstrategie und des Messvolumens sind immer die Anforderungen an die Qualität der Messdaten.

Zunächst werden Referenzmarken auf dem Objekt oder dessen damit fest verbundener Umgebung aufgebracht (Bild 71). Je nach verwendetem Messvolumen besitzen die Referenzmarken unterschiedlich große Durchmesser.

Die Oberflächenbeschaffenheit spielt eine wichtige Rolle für die Digitalisierung eines Objektes. Wenn die projizierten Streifenmuster nicht mit ausreichendem Kontrast von den Kameras aufgenommen werden können, dann ist mit einer reduzierten Qualität der digitalisierten Daten oder auch mit überhaupt keinen Daten zu rechnen. In diesem Fall muss die Oberfläche mit einem entsprechenden Mittel eingesprüht werden. Bei schwarzen Kunststoffoberflächen ist dies immer erforderlich. Graue oder farbige Oberflächen lassen sich auch ohne Einsprühen digitalisieren. Als Sprühschicht hat sich die Verwendung von Titandioxidpulver bewährt. Dieses wird in einem Lösungsmittel dispergiert und mit einer Airbrush-Pistole auf das Objekt gesprüht. Das Lösungsmittel verdampft an der Luft und das Titandioxidpulver bildet eine hauchdünne Deckschicht.



Bild 71: Digitalisierung eines mit Titandioxid besprühten Objektes. Die Referenzmarken (schwarz) sind auf dem Objekt aufgeklebt [50]

Zur vollständigen Vermessung eines 3D-Objektes sind in der Regel mehrere Messungen notwendig. Zu diesem Zweck werden Teilflächenmessungen aus verschiedenen Objektansichten durchgeführt. Jede einzelne resultierende Teilfläche wird in Form einer Punktwolke dargestellt. Die erste Messung soll in der Objektmitte

erfolgen und möglichst viele Referenzmarken erfassen. Das Koordinatensystem der ersten Messung dient als Referenz. Bei den Folgemessungen müssen immer mindestens drei, besser vier der bereits bekannten Referenzmarken mit erfasst werden. Die Einzelmessungen werden mit Hilfe der bereits bekannten Referenzmarken in eine gemeinsame 3D-Ansicht übergeführt. Für die Messung unterschiedlich großer Objekte kommen unterschiedliche Messstrategien zum Einsatz. Die beschriebene Vorgangsweise wird so oft mit neuen Teilflächenansichten wiederholt, bis das Objekt vollständig erfasst ist (Bild 72).

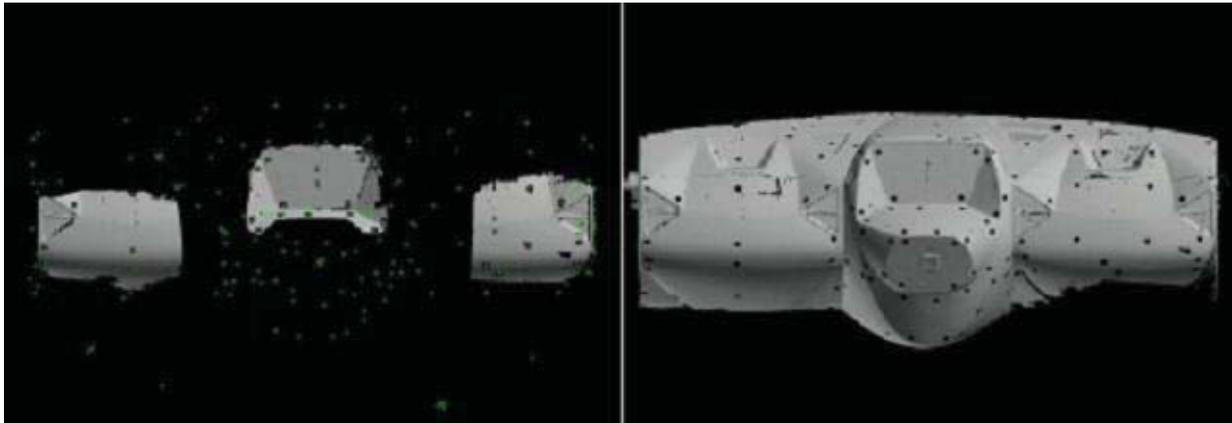


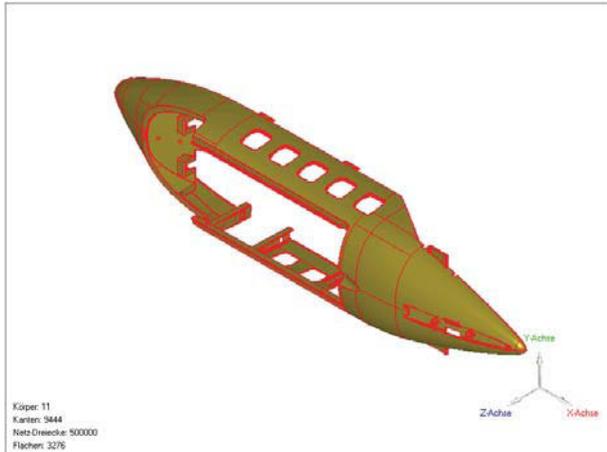
Bild 72: *Drei Einzelmessungen (links), vollständige Vermessung (rechts) [50]*

5.2.3 Messtechnische Auswertung von Bauteildigitalisierungen

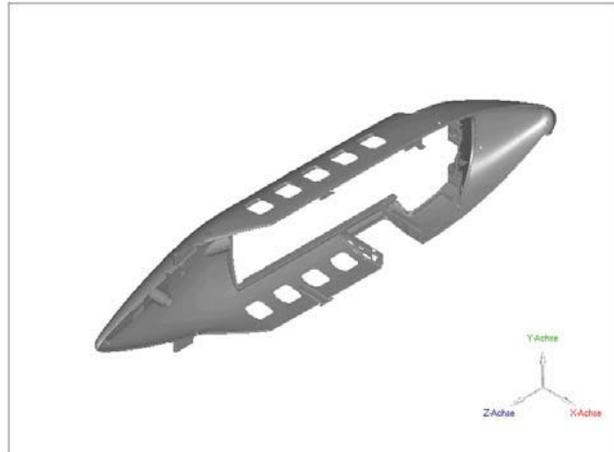
Die messtechnische Auswertung erfolgt mit der Software Geomagic Qualify[®] der Firma Geomagic Incorporated. Die Stärken des Programms Geomagic Qualify[®] sind vor allem die übersichtliche Bedienoberfläche, die fortgeschrittene Überlagerungstechnik von verschiedenen Geometrien und die Reportgenerierung. Der Arbeitsablauf für die Auswertung der Bauteildigitalisierung mit Geomagic Qualify[®] wird im Folgenden beschrieben und ist in Bild 73 dargestellt.

Die CAD-Daten des Bauteils sowie die Scan-Daten der Bauteilhülle sind Ausgangsbasis für die Auswertung. Die CAD-Daten dienen als Referenzgeometrie. Die Scan-Daten müssen vor der Auswertung gegebenenfalls nachbearbeitet werden, indem Löcher geschlossen bzw. Scan-Fehler behoben werden. Danach erfolgt eine Zusammenführung der beiden Modelle in ein Auswertungsprojekt. In dem Auswertungsprojekt werden die Scan-Daten mit den CAD-Daten überlagert. Für die Überlagerung werden unterschiedliche Strategien eingesetzt. Sehr oft kommt der sogenannte „Best-Fit“-Algorithmus zum Einsatz. Bei diesem Algorithmus werden die Abweichungen zwischen dem Referenzteil und dem Auswerteteil berechnet. Das Auswerteteil wird von der Software solange im Raum verschoben, bis die Abweichungen über den gesamten interessierenden Bereich minimal sind. Im Anschluss wird ein maßlicher Vergleich der beiden Geometrien und eine Abweichungsanalyse durchgeführt.

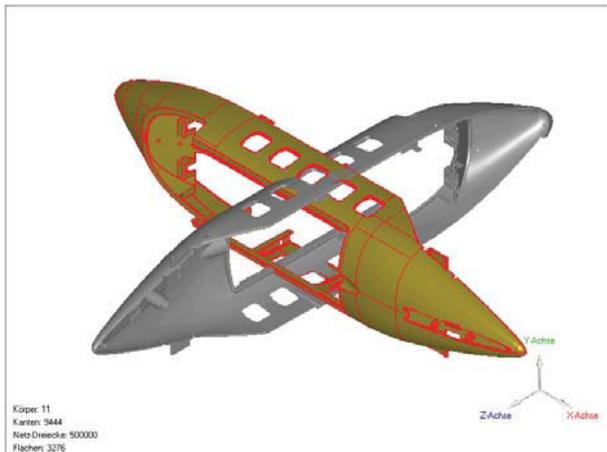
CAD-Daten



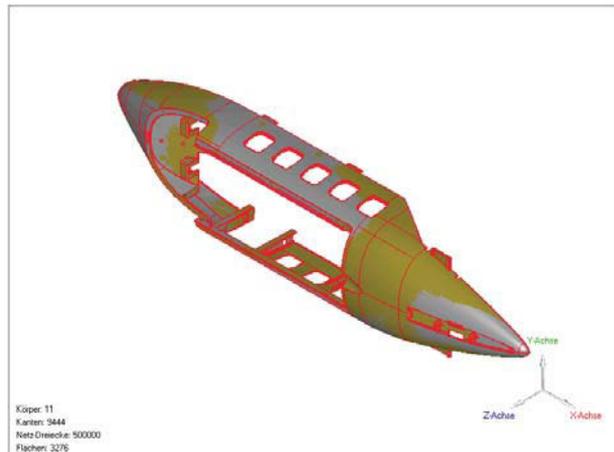
Scan-Daten



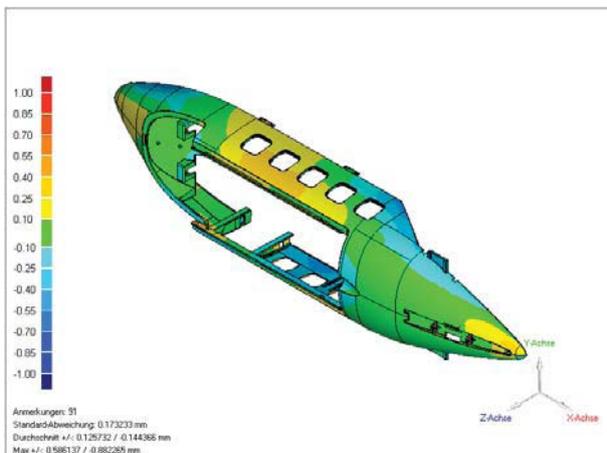
Zusammenführung der Modelle



Überlagerung der Modelle



Abweichungsanalyse



Abweichungsanalyse mit Messmarken

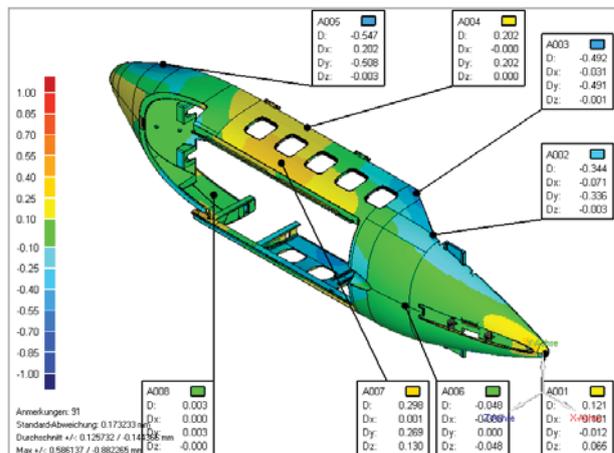


Bild 73: Arbeitsablauf für die messtechnische Auswertung von Bauteildigitalisierungen

Die maßlichen Abweichungen der Scan-Daten von den CAD-Daten werden farblich dargestellt. Auf Basis dieser Überlagerung sind unterschiedliche Auswertungen möglich. Es können z.B. bestimmte Maße dreidimensional vermessen werden, oder Abweichungen an Kontrollpunkten der Bauteiloberfläche angezeigt werden. Des Weiteren können Schnitte durch das Bauteil gelegt und vermessen werden.

5.3 3D-Vermessungen an Spritzgussteilen

In den folgenden Kapiteln werden mehrere Vermessungsbeispiele an Spritzgussteilen gezeigt. Anhand dieser Beispiele werden die Leistungsfähigkeit und die Grenzen der Messtechnik dargestellt.

5.3.1 Istgeometrie in Referenz zur Sollgeometrie

Die reale Formteilgeometrie wird anhand der „Best-Fit“-Methode mit der CAD-Sollgeometrie überlagert. Durch diese Überlagerung lassen sich alle Unterschiede in den Hauptabmessungen und auch in Details erfassen. Die CAD-Sollgeometrie muss in einem CAD-Austauschformat (z.B. *.igs, *.step oder *.stl) vorliegen, um sie in das Auswerteprogramm Geomagic Qualify[®] einlesen zu können.

Die Auswertung wird anhand des Formteils „Glashalterahmen“ gezeigt. Beim „Glashalterahmen“ (Bild 74) handelt es sich um ein mittelgroßes elliptisch geformtes Bauteil (Hauptachsenlänge 160 mm, Nebenachsenlänge 100 mm, Höhe ca. 35 mm). Das Bauteil wird für eine Scheinwerferbaugruppe verwendet. Die Wanddicke liegt zu einem Großteil bei 2 mm. Dünnere Wandstärken sind am Rand zu finden, größere Wanddicken im Bereich der Verschneidung der Innenfläche mit der Außenfläche.



Bild 74: Glashalterahmen

Die Digitalisierung des Glashalterahmens erfolgte mit einem Messvolumen von $200 \times 160 \times 160 \text{ mm}^3$. Die Referenzmarken wurden sowohl am Bauteil als auch auf dem Bauteilträger angebracht. Unter- und Oberseite des Bauteils wurden in je einem eigenen Messprojekt digitalisiert. Anschließend wurden die beiden Messprojekte

mittels gemeinsamer Referenzmarken zu einem Messprojekt zusammengeführt. Durch diese Messstrategie wird der Messfehler minimiert.

In Bild 75 ist eine Bildschirmansicht der Bauteildigitalisierung dargestellt. Die beiden Kameras des ATOS-Sensors liefern Bilder von unterschiedlichen Ansichten (Bild 75 unten). Nur für die Bereiche, die von beiden Kameras gleichzeitig erfasst werden, wird die Objekthülle in Form einer Punktwolke berechnet. Im linken Kamerabild wird der Bereich ausgewählt, der in die 3D-Ansicht (Bild 75 oben) übernommen werden soll. Das Bauteil wird so oft von unterschiedlichen Ansichten aufgenommen, bis die gesamte Objektoberfläche gescannt ist.

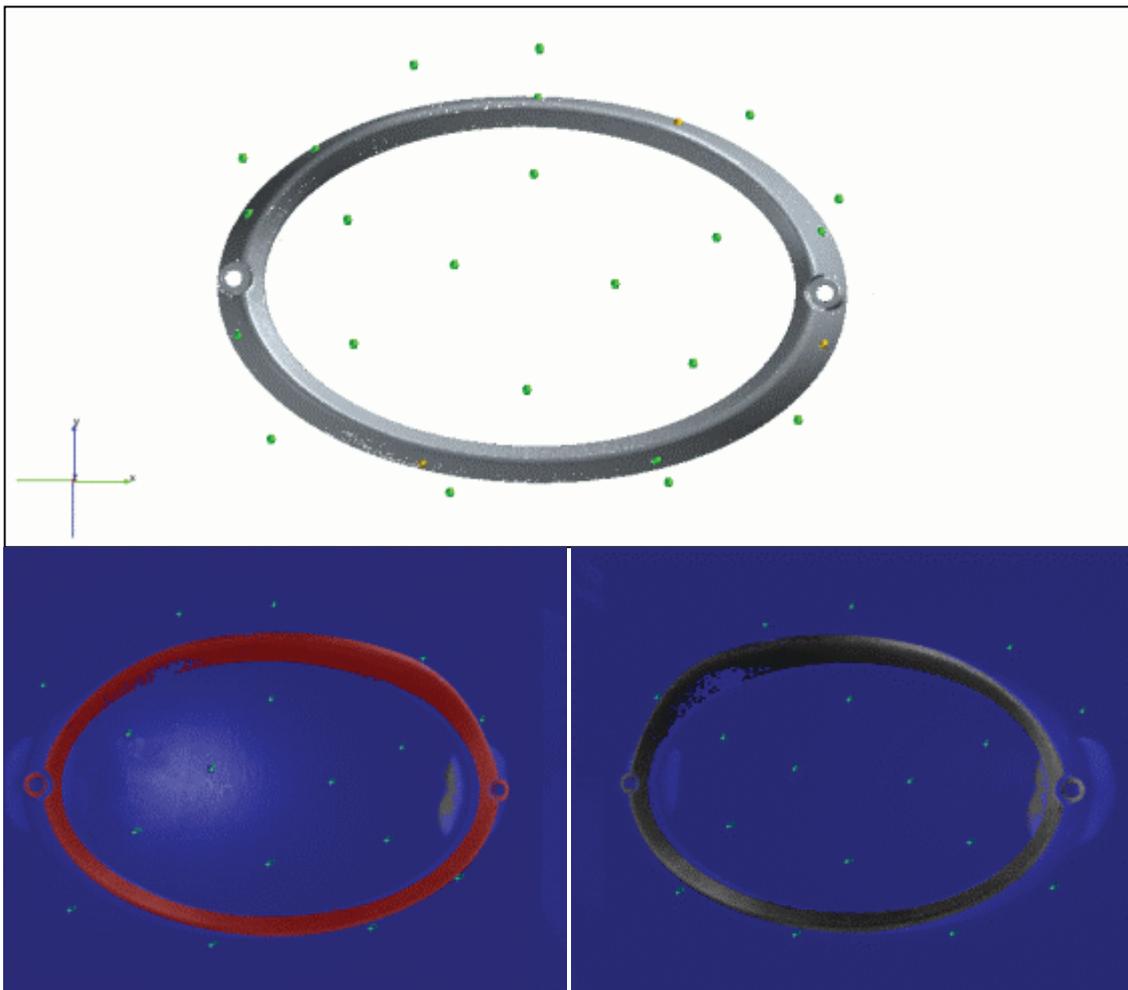


Bild 75: Bildschirmansicht der Digitalisierung des Bauteils Glashalterahmen. Oben: 3D-Ansicht, unten links: linke Kameraansicht, unten rechts: rechte Kameraansicht

Durch die Aufnahmen von unterschiedlichen Seiten werden manche Bereiche mehrmals selektiert. Die Folge sind Überlappungen der Punktwolken in diesen Oberflächenbereichen. Bevor die Messdaten zur Auswertung verwendet werden können, wird die Bauteilhülle auf Basis der Punktwolken mit Dreiecken vernetzt und die Oberfläche geglättet. Dabei werden auch die überlappenden Bereiche bereinigt.

Die vernetzte Geometrie wird anschließend aus der ATOS-Software exportiert und im Programm Geomagic Studio[®] nachbearbeitet. Im Zuge der Nachbearbeitung werden unter anderem Löcher geschlossen und Digitalisierungs- bzw. Vernetzungsfehler bereinigt.

Danach wird die Auswertung in Geomagic Qualify[®] durchgeführt. Je nach Inspektionsaufgabe können jetzt z. B. Abstände und Winkel gemessen, die Maßhaltigkeit im Hinblick auf die Soll-Daten geprüft, Flächenabweichungsplots erstellt sowie Randkantenvergleiche durchgeführt werden.

Das Bild 76 zeigt zwei Ansichten eines Flächenabweichungsplots für den Glashalterahmen mit eingetragenen Abweichungen an ausgewählten Punkten. Rote Bereiche bedeuten, dass das Bauteil größer ist als die CAD-Geometrie, blau heißt, dass das Bauteil kleiner ist. Eine grüne Färbung zeigt, dass die Bauteiloberfläche nahe an der Soll-Oberfläche liegt. Am Beispiel des Glashalterahmens erkennt man, dass das Bauteil in der Hauptachse bedeutend länger ist als die Soll-Länge. Die Nebenachse ist nur unwesentlich länger als die zugehörige Soll-Länge.

Das heißt, dass die Schwindung und der Verzug nicht richtig in der Werkzeugkonstruktion berücksichtigt wurden. In Richtung der Hauptachse wurde das Werkzeugmaß zu groß ausgeführt. In Nebenachsenrichtung stimmen die getroffenen Annahmen relativ gut mit der Realität überein.

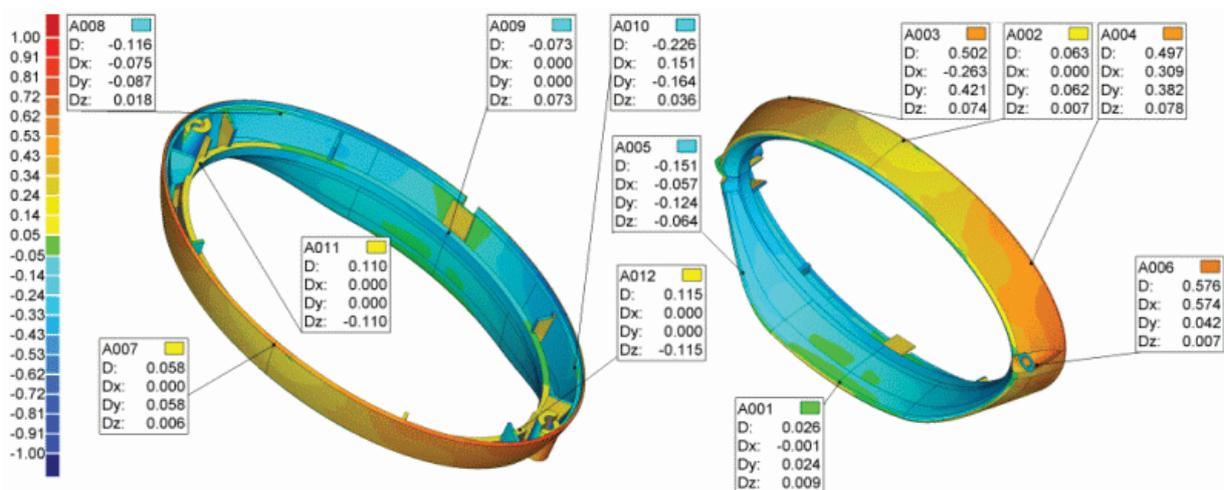


Bild 76: Flächenabweichungsplots in verschiedenen Ansichten (Vermessung in Referenz zur CAD-Sollgeometrie)

In Bild 77 ist ein Schnitt durch das Bauteil dargestellt. Die Referenzgeometrie ist als durchgezogener schwarzer Strich gezeichnet. Die Bauteilhülle ist farblich mit ihren maßlichen Abweichungen von der Solloberfläche dargestellt. An ausgewählten Stellen wurden die Abweichungen dokumentiert.

Das Bild 78 zeigt die gleiche Schnittebene wie Bild 77. Hier ist jedoch die Schnittkurve des realen Bauteils dargestellt. An diesem Schnitt sind zum Beispiel die Haupt- und Nebenachsenlängen bemaßt.

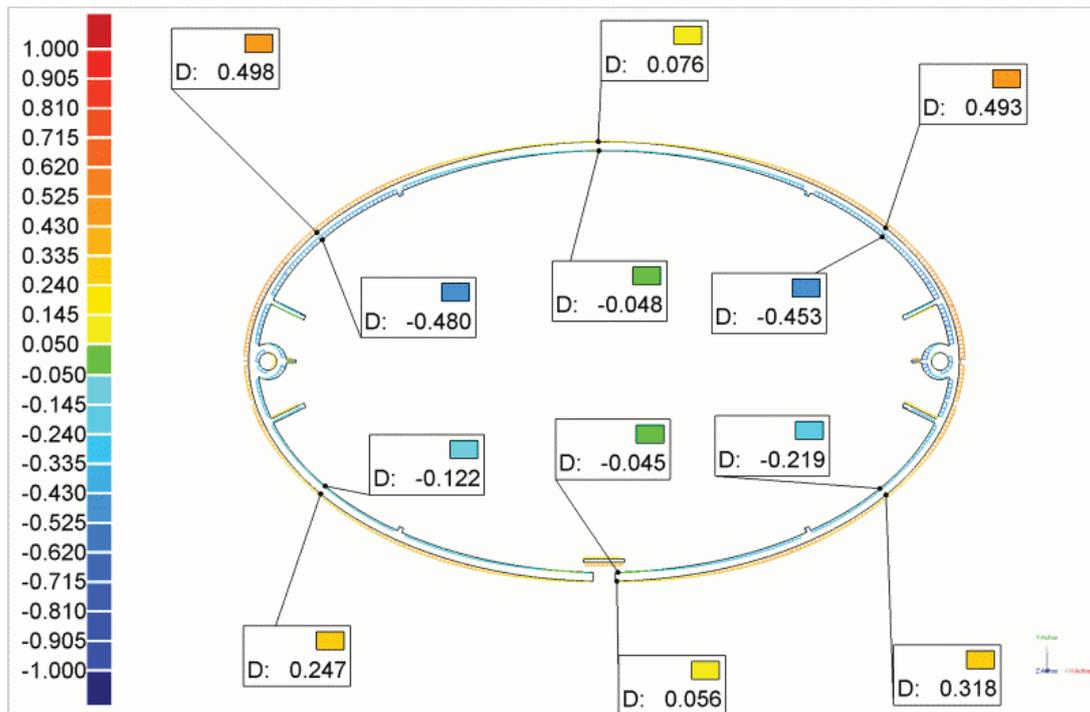


Bild 77: Farblich gekennzeichnete Abweichungen durch einen Bauteilschnitt (Vermessung in Referenz zur Sollgeometrie)

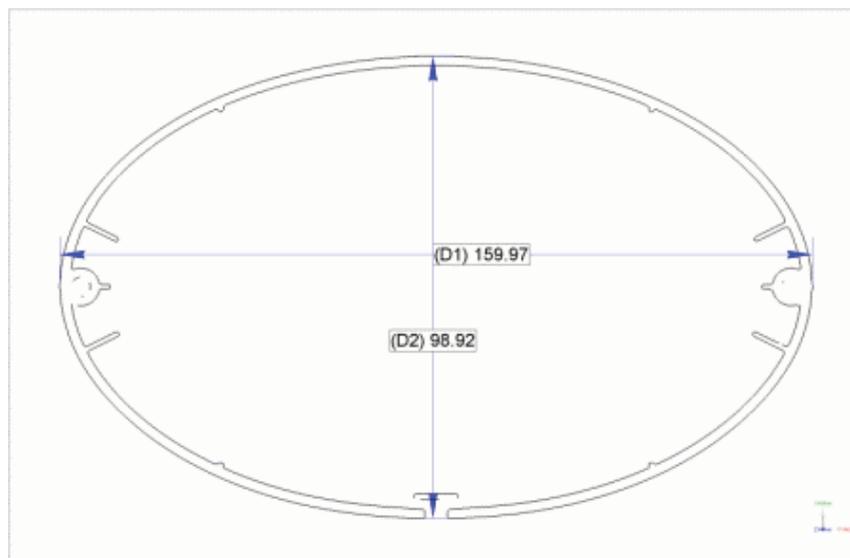


Bild 78: Bemaßung an einem Schnitt der gescannten Formteilhülle

5.3.2 Istgeometrie in Referenz zur berechneten Geometrie

Ein herausragender Vorteil der Auswertesoftware des Messsystems ist, dass auch die mit MPI berechnete Geometrie mit der Geometrie der realen Formteilgeometrie verglichen werden kann. Anhand dieser Methode ist eine objektive Bewertung des berechneten Bauteilverzugs möglich.

Im Folgenden wird wieder die Auswertung des Glashalterahmes gezeigt. Aus MPI wird die berechnete Bauteilhülle als Dreiecksnetz ausgelesen. Diese kann direkt in die Auswertesoftware Geomagic Qualify[®] eingelesen werden. Die berechnete Bauteilhülle wird als Referenzgeometrie gewählt und das reale gescannte Bauteil wird mit dieser Geometrie überlagert. Die Auswertung erfolgt in gleicher Weise wie in Kapitel 5.2.3 beschrieben.

Das Bild 79 zeigt zwei Ansichten des Flächenabweichungsplots mit eingetragenen Abweichungen an ausgewählten Punkten. Die Farbskala wurde gleich gewählt wie in Bild 76. Der Flächenabweichungsplot zeigt, dass die berechnete Geometrie nur wenig von der realen Bauteilgeometrie abweicht. Es sind keine dunkelroten und dunkelblauen Bereiche vorhanden. Viele Bereiche sind grün, gelb oder hellblau. Diese Farben bedeuten, dass Abweichungen von bis zu maximal ca. $\pm 0,2$ mm vorkommen.

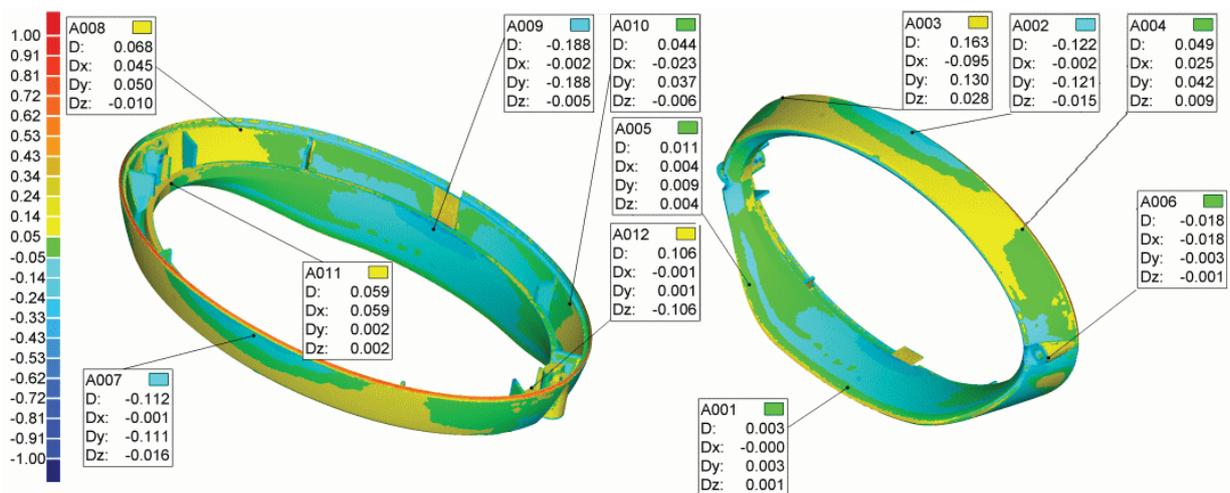


Bild 79: Flächenabweichungsplots in verschiedenen Ansichten (Vermessung in Referenz zur berechneten Geometrie)

Die Auswertung zeigt, dass die Berechnung die reale Bauteilgeometrie sehr gut widerspiegelt. Liegt eine derartige Erkenntnis vor der Werkzeugkonstruktion vor, kann der Konstrukteur dementsprechend reagieren. In diesem Fall kann der Konstrukteur dem Bauteilverzug direkt durch Vorhalten im Werkzeug entgegen wirken.

Problematisch ist dabei jedoch, dass die Berechnungsergebnisse nicht für alle Formteilgeometrien und Materialklassen die gleiche Qualität aufweisen. Simulationen mit amorphen und teilkristallinen verstärkten Materialien liefern tendenziell meist gute Schwindungs- und Verzugsergebnisse. Die Berechnungsergebnisse mit teilkristallinen unverstärkten Materialien streuen stark in ihrer Qualität und können daher nur mit Einschränkungen zur Schwindungs- und Verzugsberücksichtigung in der Werkzeugkonstruktion verwendet werden.

In Bild 80 ist ein Schnitt durch das Bauteil und die berechnete Geometrie dargestellt. Die berechnete Geometrie ist als durchgezogener schwarzer Strich gezeichnet. Die Bauteilhülle ist farblich mit ihren maßlichen Abweichungen in Bezug zur Oberfläche der berechneten Hülle dargestellt. Die Abweichungen zwischen den beiden Geometrien sind sehr klein und daher kaum ersichtlich. An ausgewählten Stellen wurden Werte eingetragen.

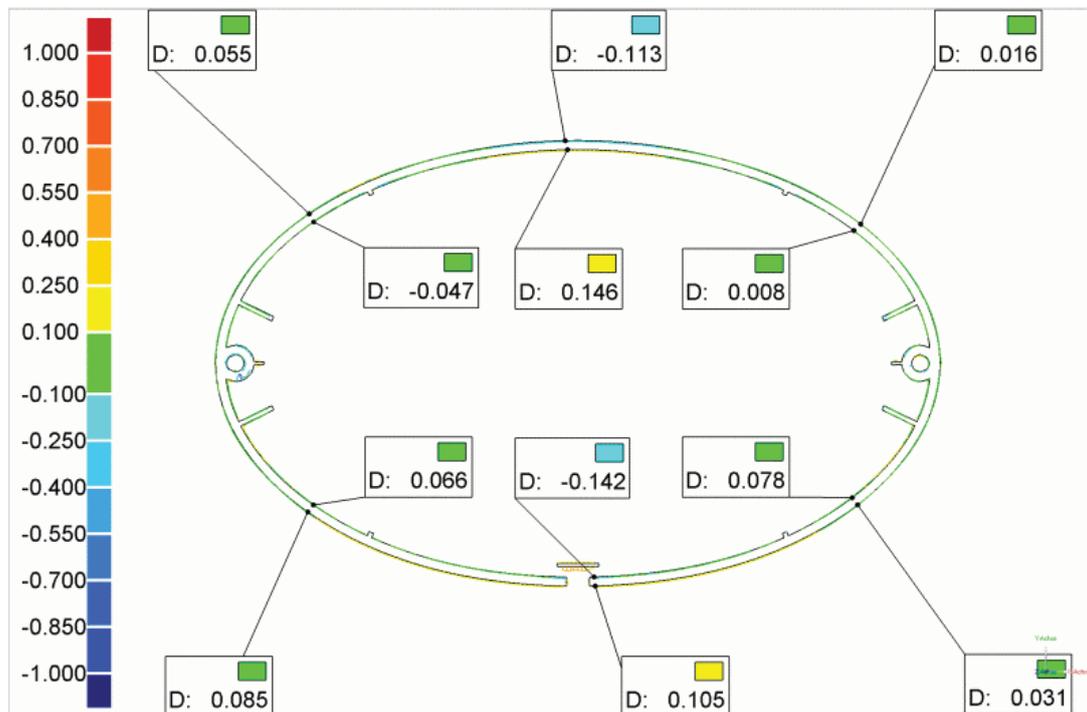


Bild 80: Farblich gekennzeichnete Abweichungen durch einen Bauteilschnitt (Vermessung in Referenz zur berechneten Geometrie)

5.3.3 Analyse der Nachschwindung an einem schachtelförmigen Formteil

An der Schachtel aus Kapitel 3.7 wurden Nachschwindungsuntersuchungen mit teilkristallinen Kunststoffen durchgeführt. Die Schachtel wurde mit Ultraform N2320 (POM, Fa. BASF) bemustert. Nach 16-stündiger Lagerung im Normklima wurde das Formteil digitalisiert (entspricht der Verarbeitungsschwindung). Danach erfolgte eine Warmlagerung für einen Zeitraum von 168 Stunden bei 80 °C. Nach der Abkühlung auf Raumluft und 24-stündiger Lagerung im Normklima wurde die Schachtel erneut digitalisiert (entspricht der Gesamtschwindung nach Auslagerung).

In Bild 81 sind Schnittdarstellungen durch das Bauteil, das nach 16-stündiger Lagerung gemessen wurde, dargestellt. Man erkennt, dass sich die Seitenwände stark nach innen biegen. Es tritt sogenannter Winkelverzug auf. Der Boden fällt ebenfalls nach innen ein.

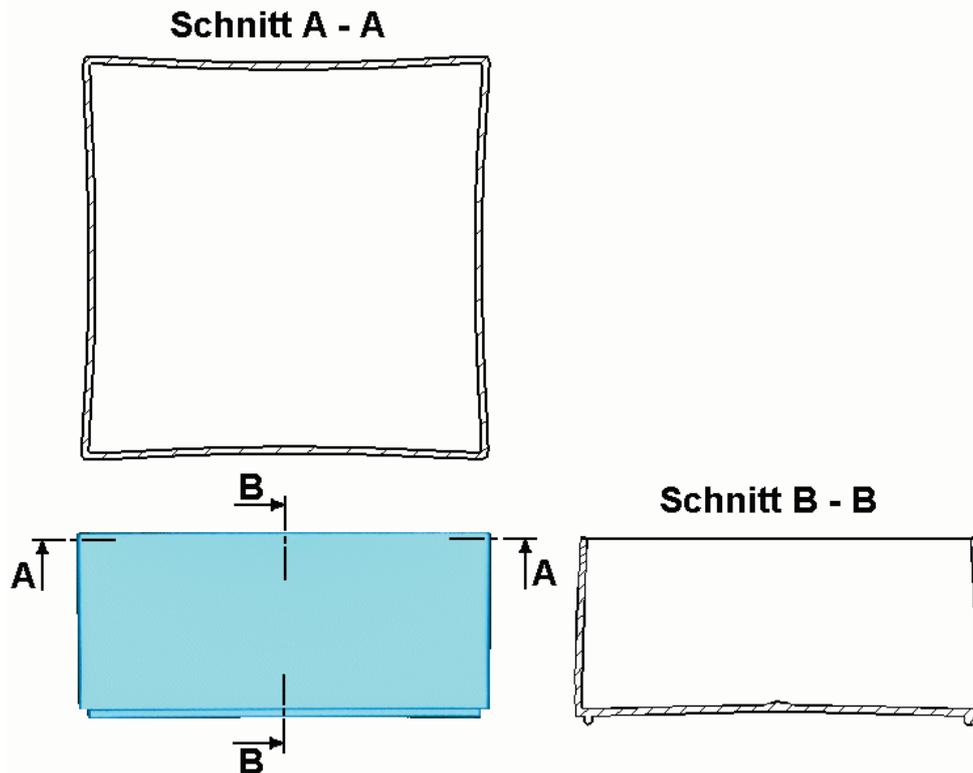


Bild 81: Darstellung des Bauteils nach 16-stündiger Lagerung

In Bild 82 ist die Überlagerung der beiden Messungen dargestellt. Die Digitalisierung nach 16 Stunden dient als Referenz. Die Messung nach der Auslagerung wird dazu in Relation gebracht.

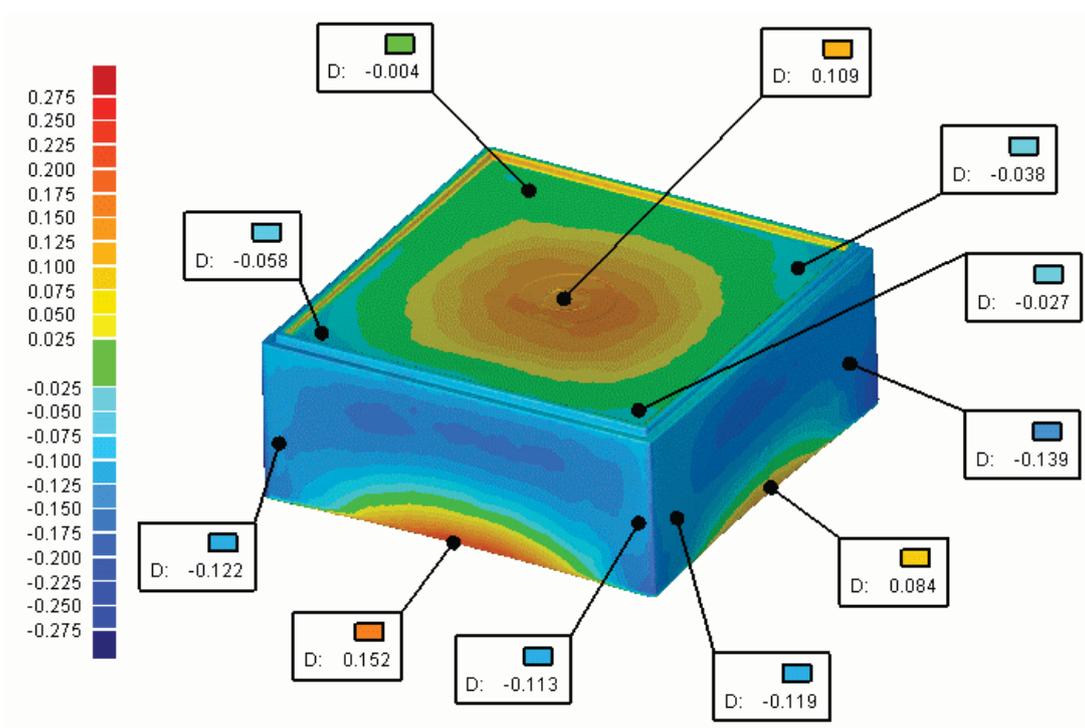


Bild 82: Flächenabweichungsplot (Messung nach Auslagerung in Referenz zur Messung nach 16 Stunden)

Man kann erkennen, dass sich beträchtliche Unterschiede zwischen den beiden Digitalisierungen ergeben. Die Seitenlänge der Schachtel ist nach der Auslagerung kürzer (blaue Färbung), das Bauteil schwindet nach. Dieser Effekt darf auf Grund der Nachkristallisation und der damit verbundenen Nachschwindung erwartet werden.

In der Mitte der Seitenwände und im Bodenbereich tritt eine Verlängerung der Maße nach der Auslagerung auf (rote Farbe). Das heißt, der Boden und die Seitenwände biegen sich nach der Auslagerung weniger stark durch als vorher. Im Bereich der Seitenwände beträgt die Rückstellung ca. 0,1 mm für jede Seite. Dieser Effekt ist etwas überraschend. Er kann jedoch mit der Relaxation der durch die Spritzgießherstellung eingefrorenen Spannungen im Bereich der Schachtecken erklärt werden.

Die Abweichungen werden anhand eines Schnittes durch das Bauteil sehr gut verdeutlicht (Bild 83). In Bild 83 sind die Abweichungen in 10-facher Überzeichnung dargestellt.

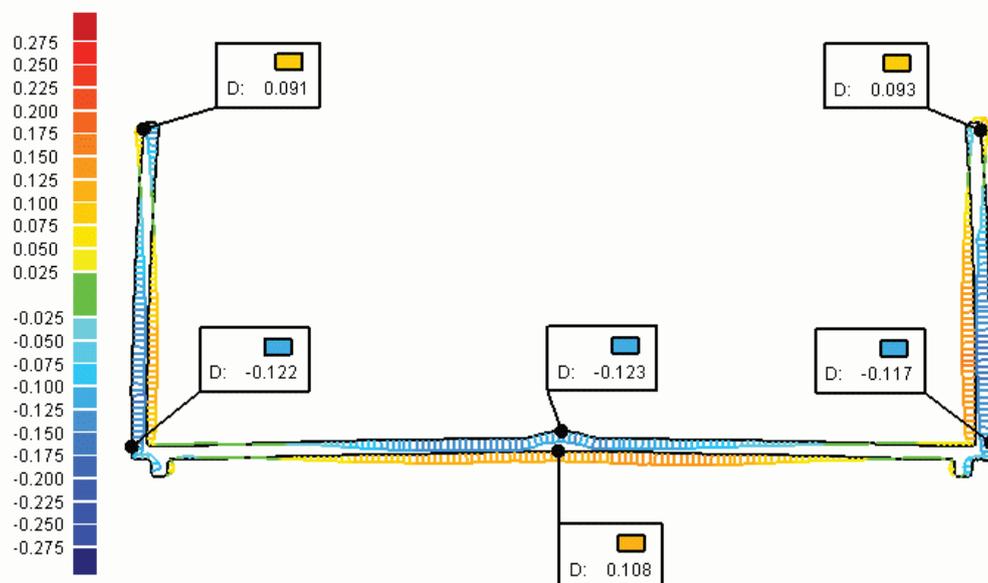


Bild 83: *Farblich gekennzeichnete Abweichungen durch einen Bauteilschnitt (durchgezogene dunkle Linie: Referenz; farblich dargestellte Abweichungen: Bauteil nach Auslagerung; Abweichungen 10-fach überzeichnet)*

5.4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Der 3D-Scanner ATOS (Advanced Topometric Optical Sensor) wurde erfolgreich für die Vermessung von Schwindung und Verzug sowie zur Evaluierung von Verzugsberechnungen eingesetzt.

Nach der Digitalisierung der Bauteiloberfläche wird diese anhand einer „Best-Fit“-Methode mit der jeweiligen Referenzgeometrie überlagert. Durch diese Überlagerung

lassen sich alle maßlichen Abweichungen an der Bauteiloberfläche zur Referenzgeometrie erfassen.

Die Verwendung eines optischen Messverfahrens ermöglicht somit eine objektive und quantitative Bewertung des berechneten Bauteilverzugs an der gesamten Oberfläche. Dies trägt dazu bei, Ergebnisse von Verzugsberechnungen besser zu interpretieren und Unterschiede bzw. Auswirkungen der Bauteilmodellierung besser zu verstehen. Damit können Richtlinien für die Wahl des Berechnungsmodells abgeleitet werden.

Auch die Nachschwindung von teilkristallinen Thermoplasten sowie die Maß- und Formänderungen durch Relaxation von eingefrorenen Verarbeitungsspannungen können anhand der Überlagerung gezeigt werden. Solche Untersuchungen ermöglichen grundsätzliche Aussagen über das Verhalten von Kunststoffbauteilen bei hohen Gebrauchstemperaturen bzw. langen Nutzungszeiten.

6 Expertensystem für die Entwicklung spritzgossener Formteile aus thermoplastischem Kunststoff

6.1 Einleitung

Im folgenden Kapitel wird EXINMOLD (Expertensystem Injection Molding) vorgestellt. EXINMOLD stellt die Grundstufe eines Expertensystems dar. EXINMOLD umfasst ein „Decision Support System“. Von einem „Decision Support System“ wird der Benutzer zu Entscheidungen geführt. Der Handlungsschluss bleibt jedoch dem Menschen vorbehalten.

Zu dem Begriff „Decision Support System“ gibt es keine direkte deutsche Übersetzung. Sinngemäß könnte der Begriff mit „System zur Entscheidungsfindung“ übersetzt werden. Diese Bezeichnung spiegelt jedoch nicht im vollen Umfang die Möglichkeiten von EXINMOLD wider. Unter dem Expertensystem EXINMOLD ist im Rahmen dieser Arbeit ein Softwaresystem zu verstehen, das Expertenwissen für die Projektabwicklung zur Verfügung stellt. Dieses Expertenwissen kann durch den Benutzer erweitert werden. Der Benutzer wird von EXINMOLD gezielt durch alle Schritte der Werkzeugentwicklung geführt, teilweise erfolgt dies automatisch anhand von Regeln. Das System deckt alle konstruktions- und prozessrelevanten Aspekte neben der Werkzeuggeometrie ab [17]. Die Entscheidung, wie ein Konstruktionsschritt ausgeführt wird, bleibt dem Konstrukteur selbst überlassen.

Das in EXINMOLD gespeicherte Wissen und die hinterlegten Erfahrungen können vom Werkzeugkonstrukteur als Entscheidungshilfen für die Konstruktion von Neuwerkzeugen eingesetzt werden. Durch die konsequente Nutzung von Erfahrungen aus früheren Projekten werden Abwicklungsfehler bei Neukonstruktionen vermieden.

Die Analyse der Entwicklungsschritte bis zum produktionsreifen Spritzgießwerkzeug stellt den Ausgangspunkt zur Entwicklung der Software EXINMOLD dar. Die Entwicklungsschritte wurden in Form der 3D-CAX-Prozesskette in einem Flussdiagramm dargestellt (Bild 84). Der Buchstabe X steht hier für die im Rahmen der 3D-Bearbeitung verwendeten Methoden Design (D), Engineering (E) und Manufacturing (M).

Das Flussdiagramm erfasst alle Einflussfaktoren auf die Qualität des Werkzeugs und des Spritzgussteils. Es startet bei der Formteilkonstruktion und deckt die Schritte bis zur Qualitätssicherung sowie allenfalls notwendige Rekursionen ab. Mit Hilfe des Flussdiagramms werden die wechselseitigen Einflussgrößen der einzelnen Arbeitsschritte und Prozessabläufe schon während der Werkzeugkonstruktion offenkundig.

Das Flussdiagramm schafft eine Systematik und trägt zur Fehlervermeidung bei. Das Ziel ist, anhand dieser Systematik die sogenannten Rekursionsschleifen zu minimieren und dadurch Entwicklungszeit und –kosten einzusparen.

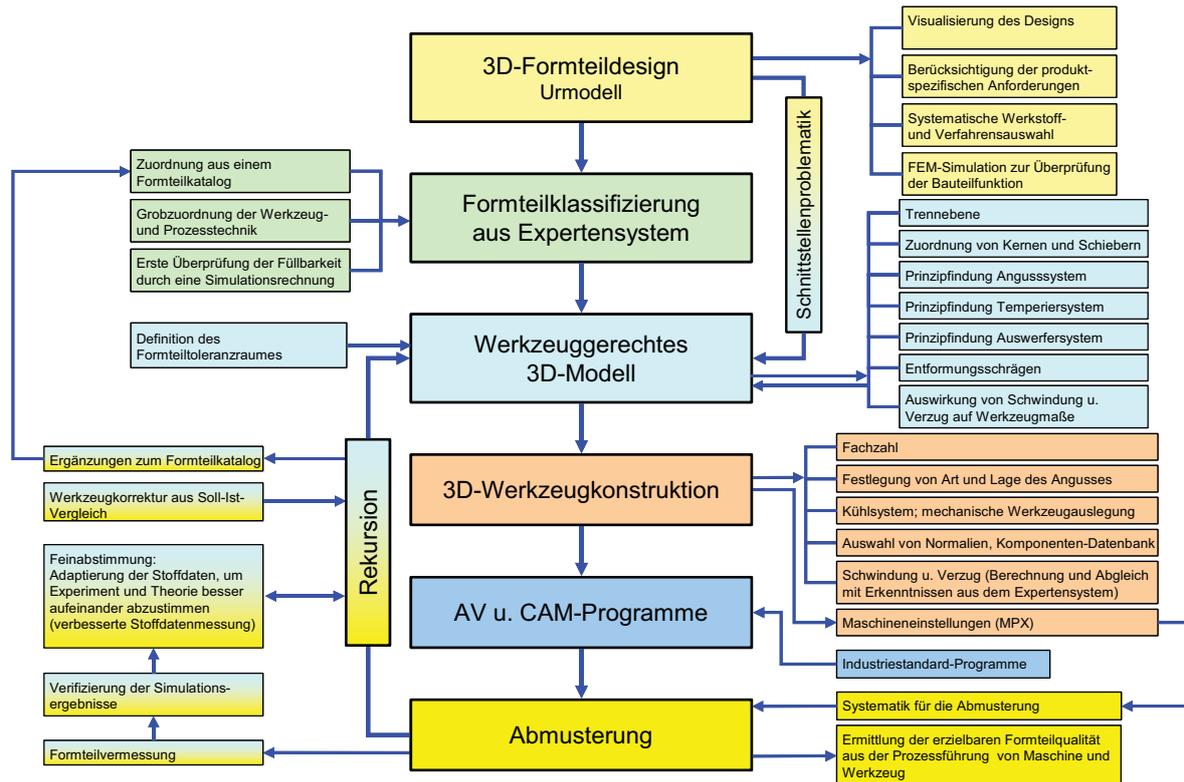


Bild 84: 3D-CAX-Prozesskette im Spritzgießwerkzeugbau

Zur Entwicklung von EXINMOLD wurden zahlreiche Untersuchungen an Spritzgießwerkzeugen und Bauteilen mit Hilfe der Spritzgießsimulation und der optischen 3D-Messtechnik durchgeführt. Die 3D-CAX-Prozesskette erwies sich bei diesen Untersuchungen als richtungsweisend. Alle Erfahrungen aus den Untersuchungen sowie die Probleme an den Formteilen und mit den Werkzeugen wurden in EXINMOLD hinterlegt.

Diese Untersuchungen haben gezeigt, dass Werkzeugkonstruktionen oft ohne zureichende Systematisierung durchgeführt und daher wiederholt die gleichen Fehler gemacht werden. Die Spritzgießsimulation wird von den Werkzeugbaubetrieben meist erst zur Problemlösung eingesetzt, wenn das Werkzeug bereits bemustert wurde. Änderungen am Werkzeug sind in diesem Stadium der Werkzeugkonstruktion meist zeitaufwändig und teuer.

In EXINMOLD wurden diese Fehler dokumentiert und ein Leitfaden für die Durchführung hochwertiger Konstruktionen entworfen. Dabei wird auf die frühzeitige Verwendung von Spritzgießsimulationen zur Fehlervermeidung hingewiesen. Eine qualitativ hochwertige Bauteilvermessung rundet das erforderliche Profil für die Werkzeugentwicklung ab.

Bild 85 zeigt in schematischer Weise das Zusammenwirken der wesentlichen Komponenten Spritzgießsimulation, 3D-Bauteilvermessung und EXINMOLD. Diese drei Säulen tragen - jede für sich oder kombiniert - zur Qualitätserreichung und damit zum Erfolg von Werkzeugkonstruktionen bei (Bild 85).

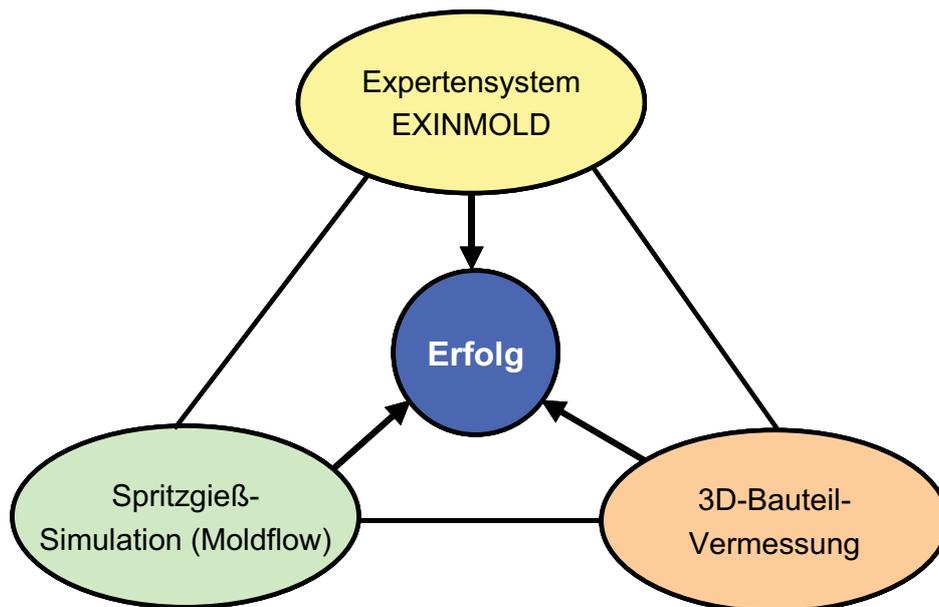


Bild 85: Bewerkstelligung erfolgreicher Werkzeugkonstruktionen durch den Einsatz des Expertensystems in Verbindung mit der Spritzgießsimulation und einer 3D-Vermessung

Die in den vorangegangenen Kapiteln gezeigten Methoden und Untersuchungen sind die Basis zur Einbindung von Wissen, Erfahrungen und Daten in das Expertensystem. Im Folgenden wird die Methodik des entwickelten Programms vorgestellt. Die Darstellungen der Methode erfüllen nicht den Anspruch an eine vollständige Programmdokumentation. Eine Programmdokumentation wird im Rahmen einer Dissertation am Lehrstuhl für Informationstechnologie an der Montanuniversität Leoben durchgeführt.

Im Folgenden wird nur auf die Systematik der Projektbearbeitung mit EXINMOLD eingegangen, die Strukturierung erläutert und auf ausgewählte Funktionen eingegangen. Dies erfolgt anhand von Flussdiagrammen, die einen Einblick in die Zusammenhänge vermitteln sollen.

6.2 Struktur und Aufbau von EXINMOLD

Das Expertensystem EXINMOLD ist in das Wissensmanagement-System PLONE eingebunden. Dieses ist auf dem Web-Application-Server-System Zope aufgebaut und benutzt die objektorientierte Datenbank ZODB, um Daten zu speichern. EXINMOLD benötigt externe Programme, um z.B. CAD-Files, Simulationsergebnisse oder Vermessungen begutachten zu können. Im Expertensystem sind Berechnungsprogramme wie z.B. ein Programm zur Kühl- und Zykluszeitberechnung implementiert.

Das Expertensystem ist modular aufgebaut. Durch die Segmentierung in einzelne Module bzw. Bereiche wird der gesamte Prozess transparenter und erlaubt eine „methodische“ Vorgehensweise während der Werkzeugkonstruktion. Dabei wird eine

sinnvolle Reihenfolge der Konstruktionsschritte vorgeschlagen, welche jedoch nicht zwingend eingehalten werden muss.

In Bild 86 sind die Module von EXINMOLD in einer linearen Abfolge in der Hauptkette dargestellt. Die Module beinhalten Bearbeitungsschritte, Berechnungen, Prozessführung und/oder Hilfen. Diese sind auszugsweise in den Seitenketten des Flussdiagramms angedeutet.

Die Hauptmodule des Flussdiagramms sind:

- 3D-Formteildesign / Urmodell
- Formteilklassifizierung und Zuordnung der Werkzeugtechnik
- Überprüfung der Bauteilkonstruktion
- Werkzeuggerechtes 3D-Modell
- 3D-Werkzeugkonstruktion
- Analyse der Werkzeugkonstruktion
- Werkzeugfertigung
- Werkzeugbemusterung
- Formteilvermessung
- Rekursion
- Projektdokumentation

Jedem Modul des Flussdiagramms ist eine eigene Checkliste mit Unterpunkten zugeordnet. Diese Checklisten stellen einen Leitfaden für die Bearbeitung eines Projektes dar. Anhand der Checklisten werden wichtige Entscheidungshilfen angeboten. Die getroffenen Konstruktionsentscheidungen müssen vom Bearbeiter dokumentiert werden. Eine Ampelcodierung (rot – gelb – grün) zeigt den Bearbeitungsstatus der Checkliste und unterstützt den Benutzer visuell.

In Bild 86 sind die Verknüpfungen der einzelnen EXINMOLD-Module untereinander dargestellt, die zu bearbeitenden Schritte und hinterlegte Hilfen sind diesen Modulen nicht zu entnehmen. Im Folgenden werden die Mechanismen, die diesen Modulen zugrunde liegen, näher erläutert.

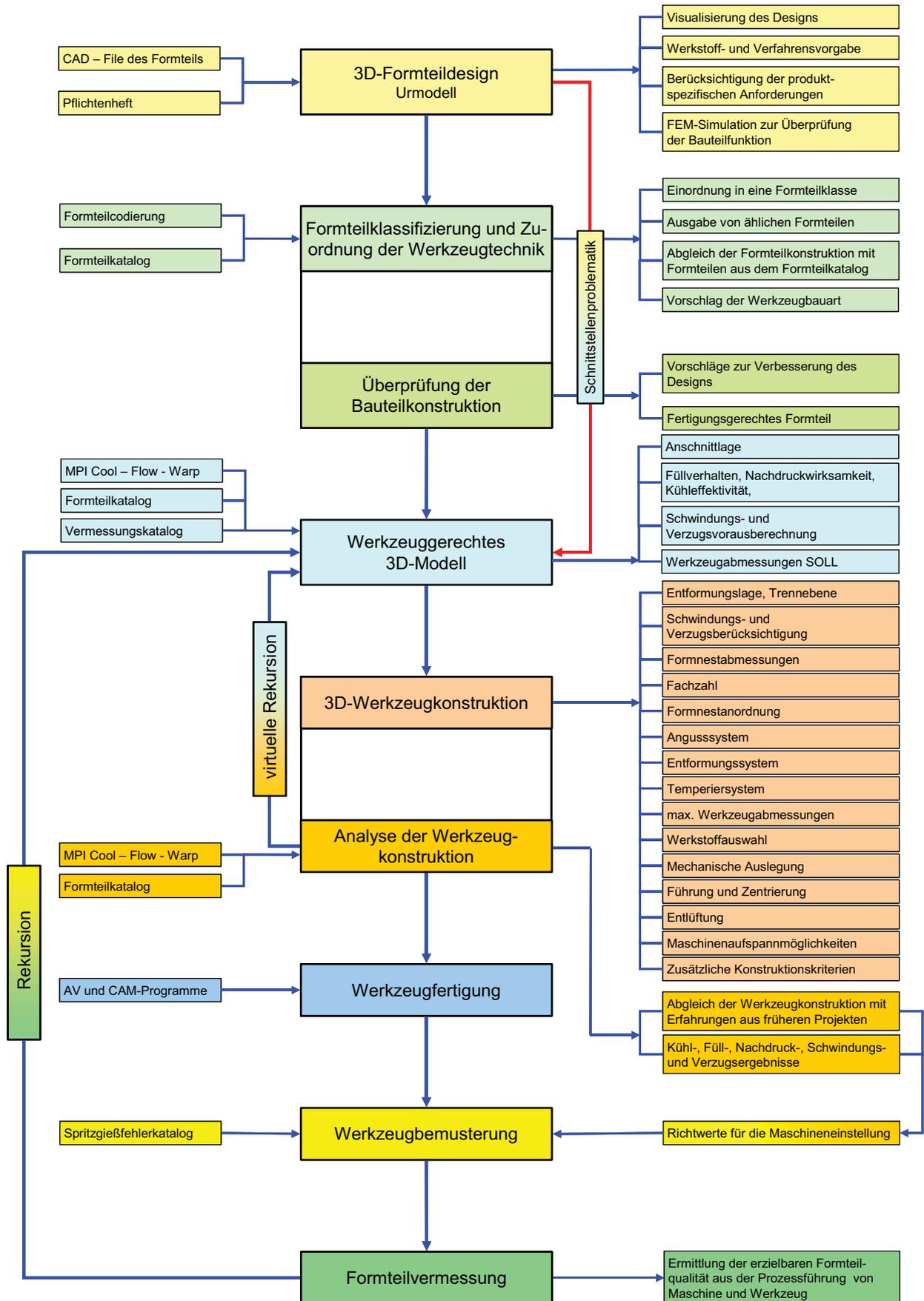


Bild 86: Flussdiagramm zur Darstellung der Module und der wechselseitigen Einflussgrößen in EXINMOLD

6.3 3D-Formteildesign / Urmodell

In Bild 87 ist das Flussdiagramm für das Modul „3D-Formteildesign“ dargestellt. Zu bearbeitende Schritte eines Moduls sind grün gekennzeichnet. Die orange gekennzeichneten Felder stellen Erläuterungen der zu bearbeitenden Schritte dar. Die hellblauen Felder bezeichnen Informationsquellen, auf die über das System zugegriffen werden kann. Wie diese Informationen verarbeitet werden, kann dem Ablaufdiagramm nicht entnommen werden.

Im Programmmodul „3D-Formteildesign“ werden wichtige Daten für die Auftragsabwicklung dokumentiert. In jedem Modul werden Checklisten zur Verfügung gestellt, anhand derer die getroffenen Entscheidungen während der Projektbearbeitung dokumentiert werden müssen. Zu jedem Unterpunkt einer Checkliste sind Beschreibungen und Hilfen enthalten.

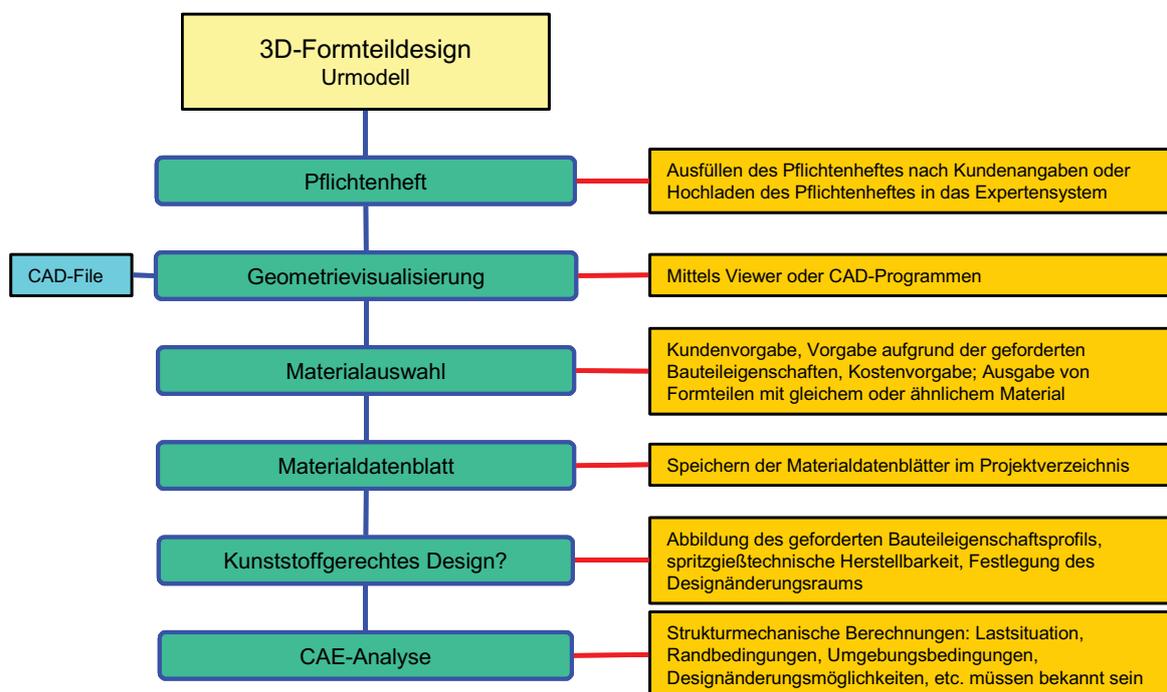


Bild 87: Flussdiagramm des Programmmoduls „3D-Formteildesign / Urmodell“

Zu Beginn des Moduls „3D-Formteildesign / Urmodell“ wird der Konstrukteur dazu aufgefordert, das Kundenpflichtenheft auf das System zu laden. Liegt das Pflichtenheft nicht in elektronischer Form vor, ist es entweder einzuscannen oder ein Leerformular auszufüllen. Im Pflichtenheft sollten folgende Informationen enthalten sein:

1. Konstruktionsgesichtspunkte (Konstruktionsunterlagen, Formteilmvolumen, Formteilgewicht, Formteilwerkstoff, etc.)
2. Maschinendaten (Schließkraft, Plastifizierleistung, Maximales Schussvolumen, Werkzeugaufspannflächen, Holmabstände, etc.)
3. Auftragsbezogene Kriterien (Losgröße, Terminplan, Fertigungstermine, etc.)

Mittels eines firmeninternen CAD-Programms bzw. eines CAD-Viewers erfolgt die Visualisierung der Formteilkonstruktion. Dazu ist ein CAD-File des Formteils im firmeninternen Dateiformat oder in einem geläufigen Austauschformat (*.igs oder *.stl) erforderlich. Anhand der 3D-Visualisierung erhält der Konstrukteur einen ersten Überblick über die Formteilgeometrie. Dies erleichtert die Kommunikation mit dem Kunden.

Die Werkstoffauswahl kann eine Vorgabe durch den Kunden, durch die geforderten Bauteileigenschaften, durch Kosten, etc. sein. Nach der Eingabe des gewählten Materials wird im Expertensystem automatisch nach Formteilen mit gleichem oder ähnlichem Material gesucht. Auf diese Informationen kann ab diesem Zeitpunkt immer zugegriffen werden. In weiterer Folge ist das entsprechende Werkstoffdatenblatt des Rohstoffherstellers in das System zu speichern.

Unter kunststoffgerechtem Design sind hier die Abbildung des geforderten Formteileigenschaftsprofils (Gewicht, Maße, mechanische Eigenschaften, Oberfläche, etc.), die spritzgießtechnische Durchführbarkeit und die erlaubten Änderungen des Formteildesigns zu verstehen.

In dem Modul „3D-Formteildesign“ ist ferner abzuklären, ob für das Formteil eine strukturmechanische Berechnung gemacht werden muss. Sollte das der Fall sein, müssen genauere Informationen für die Lastsituation, Randbedingungen, Umgebungsbedingungen, Designänderungsmöglichkeiten, etc. festgehalten werden. Die externen oder internen CAE-Analyseinformationen und Berechnungsergebnisse können ebenfalls im System abgespeichert werden.

6.4 Formteilklassifizierung und Zuordnung der Werkzeugtechnik

Der Ausgangspunkt für die Konstruktion eines Werkzeuges ist das Formteildesign. Der Konstrukteur wird jeden neuen Konstruktionsauftrag gedanklich einer gegebenenfalls schon gelösten ähnlichen Aufgabe zuordnen. Bei einer großen Ähnlichkeit wird er die vormaligen Konstruktionsdaten heranziehen. Selbst bei geringer Ähnlichkeit können von ihm aber immer noch Teillösungen bzw. Teile der vorher gemachten Erfahrungen übernommen werden. Dieses Konzept wird in Bild 88 gezeigt und auch in EXINMOLD verwendet.

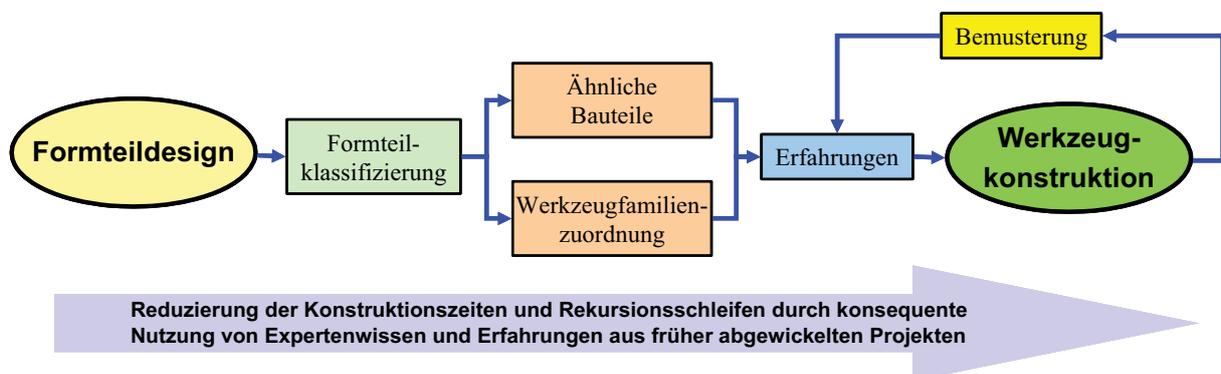


Bild 88: Schematischer Arbeitsablauf in EXINMOLD

Die Zuordnung zu ähnlichen Formteilen und Werkzeugen erfolgt im Programmmodul „Formteilklassifizierung und Zuordnung der Werkzeugtechnik“. Dieser Modulbereich wird schematisch durch das Flussdiagramm in Bild 89 dargestellt.

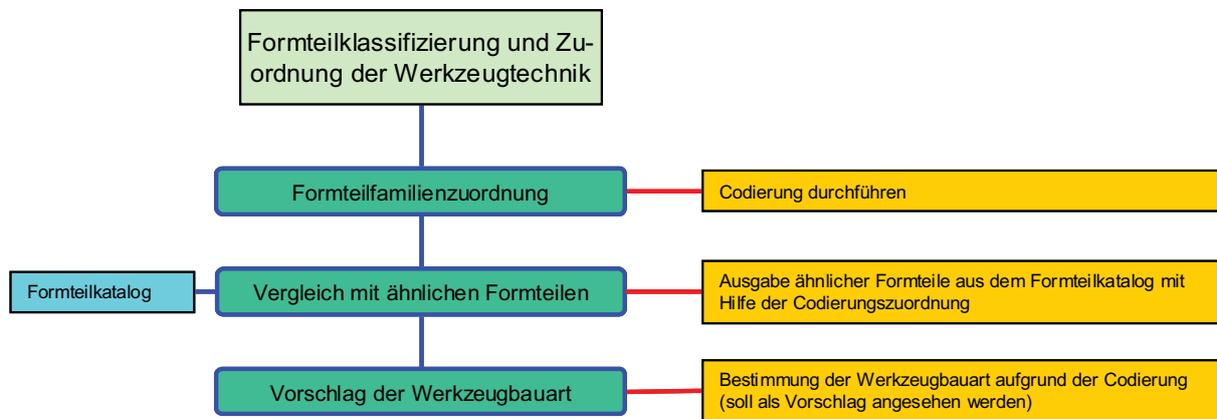


Bild 89: Flussdiagramm des Programmmoduls „Formteilklassifizierung und Zuordnung der Werkzeugtechnik“

Eine Formteilmfamilie besteht aus ähnlichen Formteilen, die bei Beachtung bestimmter Kriterien (Geometrie, Größe, Formnestzahl, Material, Anforderungen) mit konstruktiv ähnlichen Werkzeugen hergestellt werden können. Auch geometrisch unterschiedliche Formteile können zum Teil mit konstruktiv ähnlichen Werkzeugen hergestellt werden. Die Zuordnung zu einer Formteilmfamilie erfolgt über einen Codierungsschlüssel, indem bestimmten Formteilmerkmalen ein bestimmter Code zugeordnet wird (Tabelle 2). Dieser Code besteht aus 7 Stellen. Die erste Stelle des Codes ist die Grundgeometrie, dann folgt die Querschnittform, usw.

Tabelle 2: Codierungsschlüssel für die Zuordnung von Bauteilen zu Formteilmfamilien

Codierungsstelle	Kriterium	Absutufungsbeispiel	Code
1	Grundgeometrie (Grundriss)	Rund/Oval Quadratisch/Rechteckig Unregelmäßig	1 2 3
2	Querschnitt	Flach Gekrümmt Gedrunken Hohl	1 2 3 4
3	Abmessungen (Einteilungsvorschlag)	Breite/Länge < 1 : 2 Breite/Länge 1 : 2 bis 1 : 5 Breite/Länge > 1 : 5	1 2 3
4	Mittlere Wanddicken (Einteilungsvorschlag)	Dünn < 1,5mm Mittel 1,5mm bis 3mm Dick > 3mm	1 2 3
5	Formteilmgewicht	< 20g 20g bis 120g > 120g	1 2 3
6	Hinterschneidungen in Öffnungsrichtung	Nein Ja	1 2
7	Gewinde	Nein Ja	1 2

Der Benutzer wird während der Projektbearbeitung in EXINMOLD dazu aufgefordert, die geometrischen Merkmale per Mausklick auszuwählen. Die Zuordnung zu einer Formteilmfamilie wird vom System automatisch durchgeführt. Auf Basis der Codierung werden ähnliche Bauteile aus dem Formteilkatalog ausgegeben, die in weiterer Folge für die Bearbeitung des Projektes zur Verfügung stehen.

Nach diesem Schritt können die ähnlichen Formteile vom Werkzeugkonstrukteur begutachtet werden. Alle Informationen und Erfahrungen der bisherigen Konstruktionen sind in Projektverzeichnissen gespeichert und können für die Konstruktion des neuen Werkzeuges als Entscheidungshilfe herangezogen werden.

Zusätzlich zur Formteilmfamilie ordnet EXINMOLD auf Basis der Codierung automatisch die Werkzeugbauart zu. An dieser Stelle soll der Begriff Werkzeugbauart erläutert werden. Eine Werkzeugbauart besteht aus konstruktiv ähnlichen Werkzeugen, für die nur eine bzw. mehrere definierte Varianten (Lösungen) zugelassen werden. Mit den Werkzeugen einer Werkzeugbauart können alle Formteile einer bestimmten Formteilmfamilie hergestellt werden. Die Werkzeuge einer Werkzeugbauart können sich in ihren Abmessungen stark unterscheiden.

Die Nutzung von einheitlichen Werkzeugbauarten beinhaltet eine Reihe von Vorteilen:

- Systematischere und wirtschaftlichere Werkzeugkonstruktionen,
- Vereinheitlichung und wirtschaftliche Verbesserung der Fertigungsabläufe,
- einheitliche Normalien und Reduzierung der Normalienvielfalt,
- Ähnliche mechanische Werkzeugbeanspruchung,
- Reduzierung der Sonderlösungen,
- etc.

Die im Rahmen der Entwicklung des Expertensystems durchgeführten Untersuchungen an den von Partnerunternehmen zur Verfügung gestellten Formteilen zeigen das in Tabelle 3 dargestellte Werkzeug- und Formteilspektrum. Zwei Werkzeugbauarten werden besonders oft verwendet. Werkzeuge mit Schiebern für Bauteile mit Hinterschneidungen und sogenannte Standardwerkzeuge für Bauteile ohne Hinterschneidungen. Bei den untersuchten Formteilen haben sich nur zwei Werkzeuge von diesen beiden genannten Werkzeugbauarten unterschieden.

Trotz der Ergebnisse aus der Codierung kann aus wirtschaftlichen oder technischen Gründen eine Diskrepanz zu dem Anforderungsprofil des neuen Werkzeuges vorliegen. Wird dies vom Konstrukteur erkannt, besteht für ihn die Möglichkeit, auch auf andere ähnliche Werkzeugbauarten zurückzugreifen.

Tabelle 3: Untersuchtes Formteil- und Werkzeugspektrum

Formteil	CODE							WERKZEUGBAUART
Schachdeckel	2	4	1	2	2	1	1	Standardwerkzeug
Playmobil Jet Oberteil	3	2	2	2	2	2	1	Schieberwerkzeug
Playmobil Jet Unterteil	1	2	2	2	3	1	1	Standardwerkzeug
Playmobil Jet Tragfläche	2	2	2	2	3	1	1	Standardwerkzeug
Transistorleuchte	1	2	1	1	2	1	1	Standardwerkzeug
Gehäuse oval 100 H9	1	4	1	2	3	2	1	Schieberwerkzeug
Filter	1	4	2	2	2	1	1	Standardwerkzeug
Gehäuse mit Drehgelenk	2	4	1	2	2	2	1	Schieberwerkzeug
Glashalterahmen oval 100	1	2	1	2	2	1	1	Standardwerkzeug
Führungsschiene	2	3	2	2	3	2	1	Schieberwerkzeug
A-Säule	3	2	2	2	3	2	1	Schieberwerkzeug
B-Säule	3	2	2	2	3	2	1	Schieberwerkzeug
Windscreen	3	3	3	2	3	2	1	Schieberwerkzeug
Blende	3	3	3	2	2	2	1	Schieberwerkzeug
Obergehäuse MR4	1	3	1	2	1	1	1	Standardwerkzeug
Untergehäuse MR4	1	3	1	1	1	2	1	Schieberwerkzeug
Adapterplatte	1	1	1	1	1	1	1	Standardwerkzeug
Reibschale MR4	1	2	1	2	1	2	1	Schieberwerkzeug
Pulley	1	3	1	2	2	2	1	Backen- u. Dreiplattenwerkzeug
Tube OF68	1	4	2	3	3	2	2	Abschraub- u. Backenwerkzeug
Gehäuse KH 20	1	4	1	2	2	2	1	Schieberwerkzeug
Deckel KH 20	2	3	1	2	1	2	1	Schieberwerkzeug
Boden KH 20	1	3	1	3	1	2	1	Schieberwerkzeug
Endscheibe LX 814/1	1	1	1	2	3	1	1	Standardwerkzeug
Servo chassis	2	1	1	2	1	1	1	Standardwerkzeug
Driving Wedge	3	3	2	2	1	2	1	Schieberwerkzeug
Locking Lever	3	3	3	2	1	2	1	Schieberwerkzeug
Getriebedeckel	2	1	1	2	2	1	1	Standardwerkzeug
Lenkstockverkleidung	3	2	2	2	2	2	1	Schieberwerkzeug
Streuscheibe 610	3	2	3	2	2	2	1	Schieberwerkzeug
Reflektor 625	3	4	1	2	3	2	1	Schieberwerkzeug
Hauptscheinwerfer 624	3	4	2	2	3	1	1	Standardwerkzeug
Einstellhebel 631	3	3	1	2	1	2	1	Schieberwerkzeug
Adapter 628	3	4	1	2	2	2	1	Schieberwerkzeug

6.5 Überprüfung der Bauteilkonstruktion

Die Bauteilkonstruktion ist für die Qualität des produzierten Spritzgießbauteils von wesentlicher Bedeutung. Qualitätsprobleme des Bauteils lassen sich durch eine konsequente Begutachtung des Bauteildesigns hinsichtlich spritzgießrelevanter Kriterien bereits frühzeitig vermeiden.

Die Überprüfung der Bauteilkonstruktion lässt sich in qualitäts- und zykluszeitbestimmende Faktoren und in die Reduzierung der Werkzeugaufwendungen unterteilen. Die Unterteilung der Kriterien ist Bild 90 zu entnehmen. Die grünen Felder kennzeichnen wieder die zu überprüfenden Kriterien, die orangen Felder sind Erläuterungen.

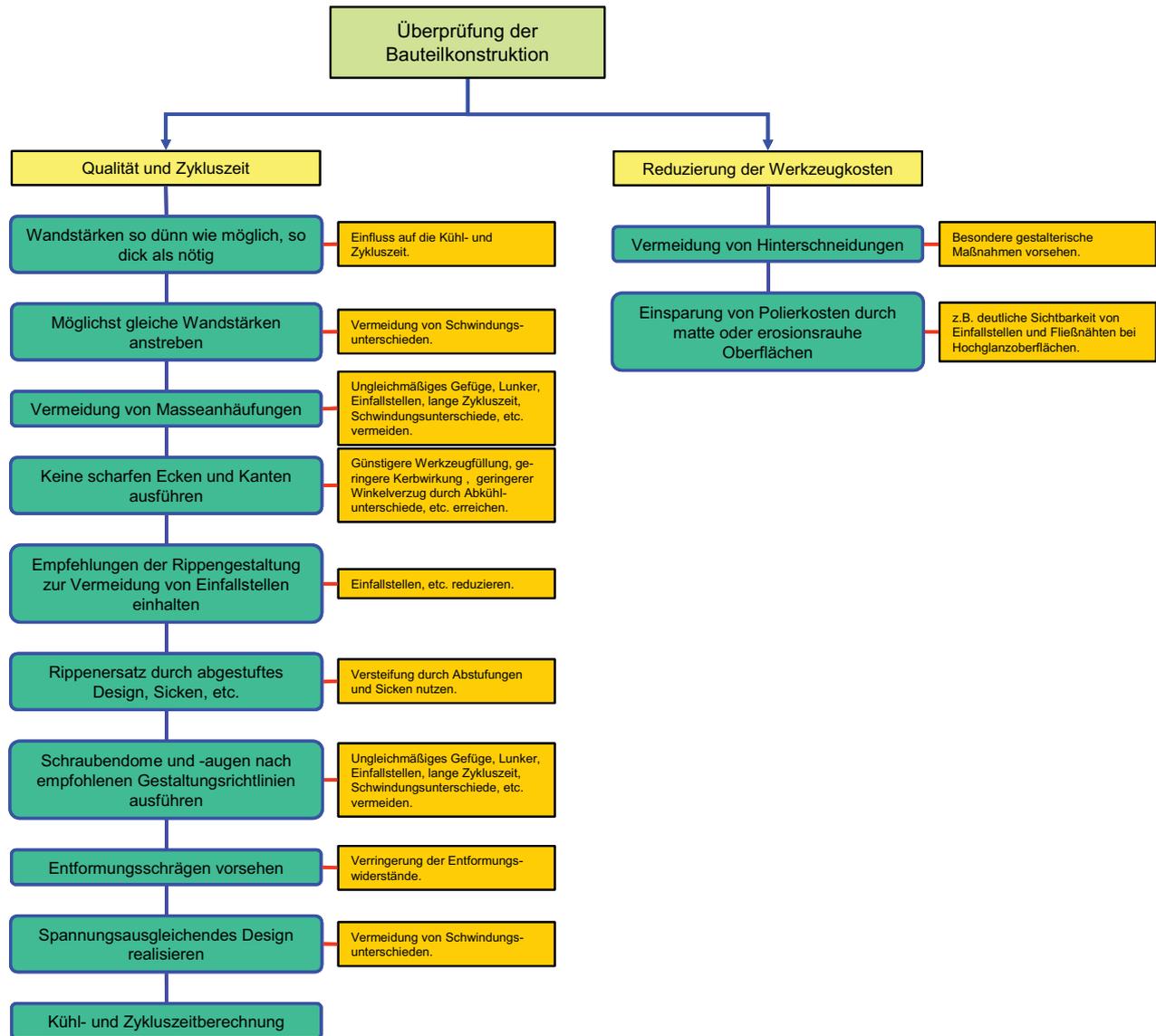


Bild 90: Flussdiagramm des Programmmoduls „Überprüfung der Bauteilkonstruktion“

In diesem Modul werden die Anforderungen an Schwindung und Verzug noch nicht behandelt. Im Vordergrund steht z.B. die Fragestellung möglichst dünner Wandstärken zur Erreichung niedriger Zykluszeiten. Weitere Kriterien sind möglichst einheitliche Wanddicken des Formteils, Vermeidung von Masseanhäufungen und scharfen Kanten, die Rippengestaltung, die Ausführung von Schraubenaugen und Schraubdomen, Entformungsschrägen, die Realisierung von spannungsarmen Formteilen sowie einer ersten Kühl- und Zykluszeitberechnung.

Zur Überprüfung der Reduzierung der Werkzeugkosten müssen die ersten Überlegungen hinsichtlich der Lage der Werkzeugtrennebene, der Vermeidung von Hinterschneidungen und den Aufwendungen der Formteiloberflächenausführungen angestellt werden. Zu jedem dieser Kriterien können Entscheidungshilfen und Hinweise direkt aus EXINMOLD entnommen werden.

6.6 Ermittlung des werkzeuggerechten 3D-Modells

Im Modul „Werkzeuggerechtes 3D-Modell“ gilt es, die verarbeitungsbedingte Materialschwindung und den Formteilverzug so gut wie möglich im Voraus zu ermitteln und in das CAD-Modell einzuarbeiten (Bild 91). Auf der einen Seite sind Schwindung und Verzug mit entsprechenden Berechnungsprogrammen wie Moldflow Plastics Insight (MPI) zu berechnen. Auf der anderen Seite sind aber auch die bisherigen Erfahrungen aus den bereits abgewickelten Projekten heranzuziehen.

Die Erfahrungen aus dem Kapitel 3.7 haben gezeigt, dass je nach verwendetem Material (amorph oder teilkristallin) und je nach Bauteil die zu erwartenden Vorausberechnungen für Schwindung und Verzug unterschiedlich gut sein können.

Für die rechentechnische Bestimmung der Soll-3D-Werkzeuggeometrie sind die Erfahrungen mit den verschiedenen Simulationsmodellen aus Moldflow Plastics Insight™ (Midplane, Fusion, 3D) im System hinterlegt. Gleiches gilt für die unterschiedliche Genauigkeit des Berechnungsprogramms bei Verwendung von amorphen und teilkristallinen bzw. verstärkten Polymeren. Die entsprechenden Hilfestellungen können aus EXINMOLD entnommen werden.

Zur rechentechnischen Ermittlung von Schwindung und Verzug wird das CAD-Modell des Formteils benötigt. Ausgangsbasis für jegliche Spritzgießsimulation ist das Vorhandensein korrekter Stoffdaten. Für die Simulation sind die rheologischen und thermodynamischen Stoffdaten des Kunststoffes erforderlich. Ist das verwendete Material nicht in der Datenbank des Simulationsprogramms vorhanden, muss entschieden werden, ob Berechnungen mit einem ähnlichen Ersatzmaterial durchgeführt werden können oder ob die Ermittlung der erforderlichen Stoffdaten in Auftrag gegeben werden muss. Hilfen zur Auswahl von Ersatzmaterialien werden in diesem Arbeitsschritt von EXINMOLD angeboten.

Da in diesem Stadium der Werkzeugauslegung noch keine Werkzeugkonstruktion vorliegt, die Berechnungen jedoch nach Möglichkeit mit integrierter Kühlung durchgeführt werden müssen, ist zumindest näherungsweise ein erstes Layout der Kühlkanäle notwendig. Gegebenenfalls reicht bei Mehrfachwerkzeugen ein vereinfachter Kühlkanalentwurf für ein Formnest aus. In der Regel wird die Gleichmäßigkeit der Formteilkühlung durch den Platzmangel bzw. die machbare Unterbringung des Kühlsystems bestimmt. Anregungen für die Platzierung der Kühlkanäle können aus dem Formteilkatalog entnommen werden.

Danach wird das Angussystem festgelegt. Zu diesem Zeitpunkt der Werkzeugkonstruktion ist die genaue Festlegung der Werkzeugtrennebene unabdingbar. Anschnittlage und Werkzeugtrennebene stehen in einem gewissen Zusammenhang. Gegebenenfalls ist die bevorzugte Anschnittlage bereits im Pflichtenheft gekennzeichnet oder der Konstrukteur schlägt die Anschnittlage aufgrund seiner Erfahrungen vor. Zusätzlich gibt es die Möglichkeit, eine Empfehlung für die Anschnittlage mit dem in Moldflow Plastics Insight™ integrierten Programmmodul „Gate Location“ zu ermitteln.



Bild 91: Flussdiagramm des Programmmoduls „Werkzeuggerechtes 3D-Modell“

In der Regel wird der Anschnitt so gewählt, dass das Formteil nach Möglichkeit in alle Richtungen gleichmäßig gefüllt wird und Lufteinschlüsse vermieden werden. Angussort und Angussausführung bestimmen aber Schwindung und Verzug mit. Die Konsequenzen lassen sich in der Regel erst durch unterschiedliche Anschnittpunkte näher bestimmen.

Für die ersten Berechnungen von Schwindung und Verzug wird empfohlen, mit einem einheitlichen Schwindungsfaktor für das Bauteil zu rechnen. Schwindungsfaktoren zeigen neben ihrer Materialabhängigkeit auch eine Prozess- und Geometrieabhängigkeit (siehe Kapitel 2.3 und 3.7.2). Anhaltspunkte für die richtige Annahme von Schwindungsgrößen sind aus der in EXINMOLD enthaltenen Schwindungsdatenbank (siehe Anhang) und dem Formteilkatalog für gleiche Materialien zu entnehmen.

Die Schwindungsdatenbank wurde aus Untersuchungen im Rahmen von Projektarbeiten mit Materialien und Bauteilen der Partnerunternehmen zusammengestellt. Bemerkenswert an dieser Datenbank ist, dass neben den Schwindungsdaten auch die Formteilgeometrie und die Verfahrensparameter angegeben sind. Des Weiteren wird zwischen der Verarbeitungsschwindung und der Nachschwindung unterschieden.

Diese Schwindungsdatenbank bietet insbesondere Vorteile, wenn geometrisch ähnliche Formteile aus ähnlichem oder gleichem Material produziert werden sollen. In diesem Fall werden sich vermutlich auch die Prozessgrößen bei der Herstellung des Formteils nicht wesentlich unterscheiden. Die Übertragbarkeit von Schwindungswerten ist jedoch eingeschränkt bei völligen Neukonstruktionen oder bei einem Material, für das noch keine Schwindungswerte existieren.

Die Fertigstellung des Simulationsmodells zur Ermittlung des werkzeuggerechten 3D-Modells erfolgt schließlich auf Basis der für die Entscheidungsfindung hinterlegten Fakten für die richtige Auswahl des Berechnungsmodells (Midplane, Fusion, 3D). Für die Simulationsrechnung werden nun noch die Verfahrensparameter in Hinblick auf Temperatur, Druck und maximaler Einspritzgeschwindigkeit benötigt. Diese sind entweder aus den Richtlinien der Rohstoffhersteller oder aus den Erfahrungen des Formteilkatalogs zu entnehmen.

Die Interpretation der Berechnungsergebnisse setzt einige Erfahrung mit der Simulationssoftware voraus und umfasst die Analyse aller Berechnungsmodule. Im Bereich der Füllberechnung liegt das Hauptaugenmerk am Füllbild. Bindenähte, Lufteinschlüsse, Fließ- und Faserorientierungen sind weitere Ergebnisse, die aus der Füllphase resultieren.

Das Ziel ist, über die Wahl der richtigen Anschnittlage, ein möglichst ausgeglichenes Füllbild zu erreichen. Das heißt, dass bei manchen Formteilen eine Füllung von einer Seite her bevorzugt werden sollte, bei anderen Formteilen mit zentralem Anschnitt hat die Ausgeglichenheit (Fließfront erreicht den Formteilrand überall möglichst zur gleichen Zeit) des Füllbildes Priorität. Die Nachdruckberechnung liefert Hinweise betreffend der Nachdruckwirksamkeit im Formteil sowie die erforderliche Nachdruckzeit, um den Siegelpunkt zu erreichen.

Unter der Voraussetzung der Gültigkeit eines vereinfachten Kühlkanalsystems kann aus den Berechnungen die Effektivität der Kühlung (Gleichmäßigkeit der Temperierung/Kühlung, Auftreten von Hotspots, usw.) ermittelt werden. Aus der Analyse der Kühl-, Füll- und Nachdruckergebnisse können Schwachstellen in der Formteilausführung bzw. des gewählten Anschnittsystems erkannt werden. Diese Mängel sind vor der Werkzeugkonstruktion zu beseitigen.

In der Regel zeigt sich, dass sich durch eine ausgeglichene Füllphase geringere Unzulänglichkeiten von Schwindung und Verzug ergeben. Zur Abschätzung der Genauigkeit der Schwindungs- und Verzugsergebnisse können die umfangreichen Schwindungsuntersuchungen und Erfahrungen aus dem Expertensystem herangezogen werden.

Sollten sich zwischen der Berechnung und den Erfahrungswerten größere Unterschiede ergeben, sind Unsicherheitsfaktoren zu berücksichtigen, die eine Werkzeugnacharbeit zulassen, ohne gesamte Werkzeugbereiche neu zu fertigen. Dies ist insbesondere bei der Verarbeitung von ungefüllten teilkristallinen Materialien empfehlenswert.

Die Schwindungs- und Verzugsberechnung liefert die Deformationen des Formteils. Um die Werkzeuggeometrie für ein „schwindungs- und verzugsfreies“ Formteil zu erhalten, muss dem Verzug entsprechend gegengehalten werden. Dies kann in MPI durch Spiegeln der vorausberechneten Geometrie erfolgen. Als Referenz dient dabei die für die Berechnung eingesetzte Sollgeometrie des Formhohlraums. Nach der Durchführung der Spiegelung wird ein weiterer Berechnungsgang zur Überprüfung empfohlen.

Die gespiegelte vorausberechnete Geometrie mit partiell vorgehaltenen Maßen muss nun noch vom Konstrukteur in ein CAD-File übergeführt werden, damit die 3D-Werkzeugkonstruktion auf den ermittelten „Werkzeugabmessungen Soll“ basiert.

6.7 3D-Werkzeugkonstruktion

Dieser Bereich von EXINMOLD wird unabhängig von dem CAD-Programm verwendet, in dem die Werkzeugkonstruktion durchgeführt wird. Vorwiegend werden hier Entscheidungshilfen angeboten, die aus umfangreichem Literatur- und Expertenwissen aus Unternehmen zusammen gesetzt sind. Damit können alle relevanten Arbeitsschritte zur Konstruktion eines Spritzgießwerkzeugs flexibel, schnell und sicher unterstützt und durchgeführt werden.

Die Arbeitszeiten zur Konstruktion aufwändiger Spritzgießformen können durch die Nutzung dieser Entscheidungshilfen erheblich gesenkt werden. Weniger erfahrene Konstrukteure werden Schritt für Schritt durch den Konstruktionsprozess geführt – Experten erreichen schnell das höchste Niveau an Produktivität.

Die Konstruktionsschritte sind in einer sinnvollen Reihenfolge angeordnet, die dem Flussdiagramm in Bild 92 zu entnehmen ist.

Die Vorteile dieser Systematik sind:

- kontrollierte Konstruktionsvorgänge
- sinnvolle Konstruktionsabfolge
- Schaffung von Entscheidungshilfen durch die integrierte Dokumentation
- gezielte Anwendung von Simulationsrechnungen
- Produktion von Konstruktionsqualität
- Reduzierung der Konstruktionszeit
- Hilfestellung für unerfahrenere Mitarbeiter bei der Konstruktion von schwierigen Werkzeugkonstruktionen

An dieser Stelle sollen die Begriffe „Variantenkonstruktion“ und „Freie Konstruktion“ aus Bild 92 erläutert werden:

Unter „Variantenkonstruktion“ wird die Ermittlung des konstruktiven Werkzeugaufbaus durch Analyse des Formteils anhand der Codierung im Modul „Formteilklassifizierung und Zuordnung der Werkzeugtechnik“ verstanden. Anhand der Codierung wird eine Werkzeugbauart zugeordnet, die bei ähnlichen Formteilen bereits umgesetzt wurde und auf die in weiterer Folge direkt zurückgegriffen wird.

In der „Freien Konstruktion“ wird der gesamte Werkzeugaufbau Schritt für Schritt aufgrund der aktuellen konstruktiven Erfordernisse neu aufgebaut. Ausgehend vom Formteil wird das Werkzeug mittels der angebotenen Entscheidungshilfen baukastenartig zusammengesetzt.

Bei der Ermittlung des Werkzeugaufbaus für ein aktuelles Formteil sollte der Konstrukteur zunächst immer versuchen, im Rahmen der Variantenkonstruktion die Konstruktion vorzunehmen. Erst wenn dem Formteil kein ähnliches Formteil mit zugehörigem Werkzeug aus dem Formteilkatalog zugeordnet werden kann, muss in der freien Konstruktion der Aufbau des Werkzeugs neu erarbeitet werden. Die grundsätzliche Vorgehensweise ist in EXINMOLD hinterlegt und Bild 92 zu entnehmen. Eine weitere Erläuterung der einzelnen Schritte des Flussdiagramms wird hier nicht durchgeführt.



Bild 92: Flussdiagramm des Programmmoduls „3D-Werkzeugkonstruktion“

6.8 Analyse der Werkzeugkonstruktion

Mit Hilfe dieses Moduls (Bild 93) erfolgt die „virtuelle Analyse“ des Werkzeugs, bevor die Werkzeugkonstruktion „in Stahl“ umgesetzt wird. Prinzipiell ist es einerseits möglich, Vergleiche mit bereits durchgeführten Projekten zu ziehen, die nach Projektabschluss in den Formteilkatalog übernommen wurden. Andererseits ist die Vorgehensweise der „virtuellen Analyse“ auf Basis der Spritzgießsimulation an der zuvor erstellten Werkzeugkonstruktion orientiert.

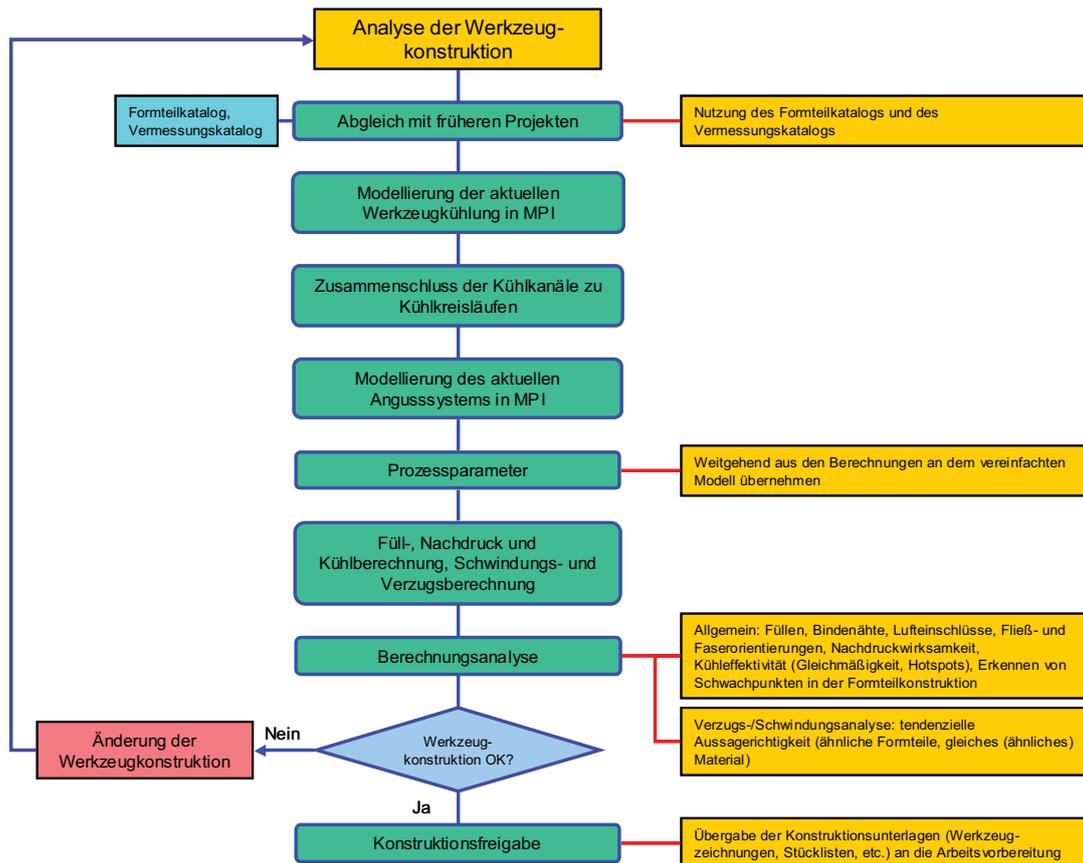


Bild 93: Flussdiagramm des Programmmoduls „Analyse der Werkzeugkonstruktion“

Ist kein Spritzgießsimulationsprogramm verfügbar, kann darauf auch verzichtet werden und nur Erfahrungen aus der Vergangenheit herangezogen werden. Auf die zuvor angeführten Möglichkeiten wird im Folgenden eingegangen.

6.8.1 Vergleiche mit ähnlichen Bauteil- und Werkzeugkonstruktionen

Im Bauteilkatalog des Expertensystems befinden sich alle Informationen, Berechnungen, Konstruktionszeichnungen und –unterlagen sowie Spritzgießprotokolle, Prüferichte und dokumentierte Werkzeugkorrekturschleifen von früher durchgeführten Projekten. Diese Informationen werden für die Überprüfung der

Neukonstruktion herangezogen. Als Basis werden die ähnlichen Formteile und Werkzeuge aus der Formteilcodierung verwendet. Jedes Projekt ist mit der gleichen Projektstruktur bzw. Verzeichnisstruktur in EXINMOLD abgelegt. Anhand dieser Systematik wird gewährleistet, dass zugeordnete Informationen in den richtigen Verzeichnissen abgelegt und wieder gefunden werden.

Die im Laufe der Projektbearbeitung dokumentierten Schritte und aufgetretenen Probleme von abgeschlossenen Projekten sind als Zusammenfassung aus dem jeweiligen Projektbericht ersichtlich. Anhand dieser Berichte kann schnell ein ähnliches Formteil mit bestehendem Werkzeug gefunden werden. Je ähnlicher das Material des gefundenen Formteils dem aktuell verwendeten Material ist, desto zielführender sind die Informationen, die dem Expertensystem entnommen werden können. Die aktuelle Werkzeugkonstruktion kann auf diese Weise mit Hilfe von ehemaligen Erfahrungen überprüft werden. Dem Werkzeugkonstrukteur steht damit ein Hilfsmittel zur qualitativen Überprüfung des Konstruktionsergebnisses zur Verfügung.

6.8.2 Simulation der Werkzeugkonstruktion

Die Überprüfung der Werkzeugkonstruktion auf rechnerischem Weg setzt den Einsatz der Spritzgießsimulation voraus. Das Berechnungsmodell aus dem Modul „Werkzeuggerechtes 3D-Modell“ muss in weiterer Folge der aktuellen Werkzeugkonstruktion angepasst werden. Die Werkzeugkühlung und das Angussystem werden im Berechnungsmodell ergänzt. Bei Bedarf wird das Modell auf Mehrfachkavitäten erweitert. Für die nachfolgende Berechnung werden die bereits vorhandenen Prozessparameter aus dem Modul „Werkzeuggerechtes 3D-Modell“ übernommen.

Nach der Berechnung wird die Überprüfung der Qualitätsanforderungen an das Formteil in ähnlicher Weise wie beim Einsatz des Moduls „Werkzeuggerechtes 3D-Modell“ durchgeführt. Bei Bedarf muss eine Rekursion erfolgen und Änderungen in der Werkzeugkonstruktion vorgenommen werden. Es handelt sich hierbei um eine „virtuelle“ Rekursion, da zu diesem Zeitpunkt noch kein Werkzeug vorliegt.

Dieser virtuelle Kreislauf wird so lange durchgeführt, bis keine Änderungen an der Werkzeugkonstruktion mehr notwendig sind. Abschließend erfolgt die Freigabe der Werkzeugkonstruktion und es können alle Konstruktionsunterlagen erstellt und an die Arbeitsvorbereitung bzw. den Werkzeugbauer übergeben werden.

6.9 Werkzeugfertigung

Auch für die Werkzeugfertigung ist ein Modul im Expertensystem vorgesehen (Bild 86). Da die Werkzeugfertigung meist unternehmensspezifisch erfolgt, ist für diesen Bereich keine umfangreiche Checkliste entwickelt worden. Es wurde jedoch eine Möglichkeit zum Speichern von Fertigungsdaten wie zum Beispiel CAM-Files,

Programmfiles von Erodierelektroden, Arbeitsvorbereitungs-Daten, Bestelllisten, etc. in das Expertensystem integriert.

6.10 Werkzeugbemusterung

Nachdem die Werkzeugfertigung und der Zusammenbau des Werkzeugs durchgeführt sind, erfolgt die Funktionsprüfung anhand einer Bemusterung. Die Aufgaben der Werkzeugbemusterung sind im Expertensystem in mehrere Schritte aufgeteilt, die dem Maschineneinrichter Entscheidungs- und Abwicklungshilfen bieten (Bild 94).

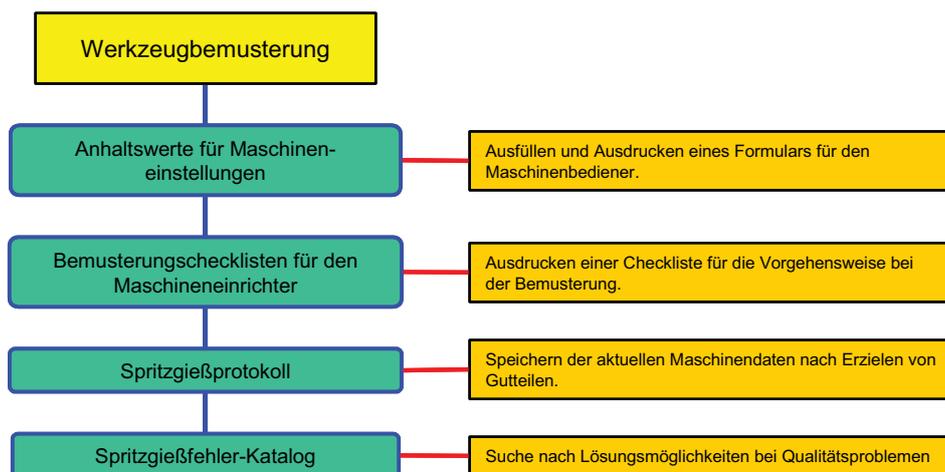


Bild 94: Flussdiagramm des Programmmoduls „Werkzeugbemusterung“

Aus diesem Modul kann der Werkzeugeinrichter Anhaltswerte für die Maschineneinstellungen entnehmen. Ein entsprechender Vorschlag kann ausgedruckt werden. Sollten in dem Formular für die Maschineneinstellungen spezifische Daten fehlen, sind diese durch den Konstrukteur oder den Maschineneinrichter zu ergänzen.

Die Vorgehensweise für die Werkzeugbemusterung ist in Form einer Checkliste im Expertensystem hinterlegt. Die letztlich aktuellen Maschinendaten, nach dem Erzielen von Gutteilen, sind in Form eines Spritzgießprotokolls in das Expertensystem zurückzuführen.

Sollten im Zuge der Werkzeugbemusterung Probleme bzw. Spritzgießfehler am Formteil auftreten, ist es möglich, sich Rat aus dem Expertensystem zu holen.

6.11 Formteilvermessung

Neben der optischen Beurteilung der Formteile im Laufe der Abmusterung erfolgt die Qualitätsüberprüfung durch Vermessungen bzw. andere Funktionsprüfungen. Die Artikelabmessungen werden von der Qualitätskontrolle erfasst, dokumentiert und ausgewertet. Der Werkzeugkonstrukteur ist über die Ergebnisse der Qualitätskontrolle zu informieren. Gleichfalls sind die Ergebnisse in EXINMOLD einzugeben (Bild 95).

Der Projektleiter, die Qualitätssicherung, der Konstrukteur, der Werkzeugmacher und der Maschineneinrichter müssen im Falle von größeren Abweichungen adaptierende Änderungsmaßnahmen entscheiden und im Sinne des Expertensystems eine Werkzeugrekursion einleiten (Bild 95).

Sind keine Änderungsmaßnahmen am Werkzeug erforderlich, wird das Modul der Werkzeugrekursion übersprungen und der Benutzer von EXINMOLD wird zur abschließenden Projektdokumentation aufgefordert.

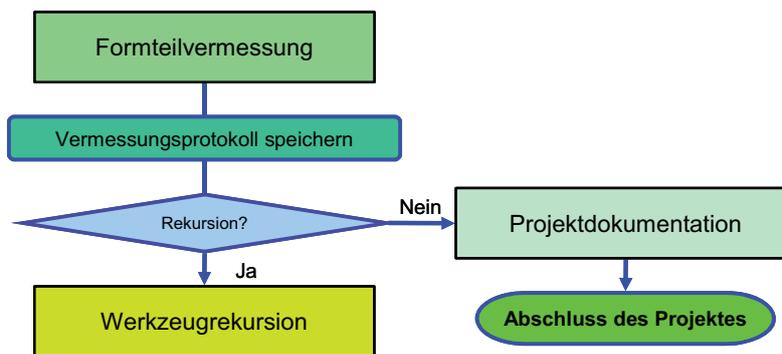


Bild 95: Flussdiagramm der Programmmodule „Formteilvermessung“, „Werkzeugrekursion“ und „Projektdokumentation“

6.12 Werkzeugrekursion

Die Werkzeugrekursion ist in ihren Maßnahmen im Expertensystem zu dokumentieren (Bild 96).

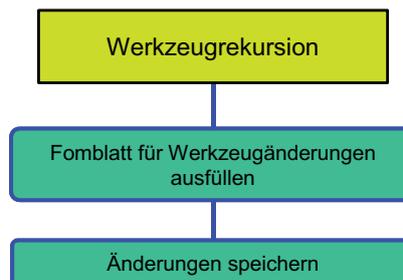


Bild 96: Flussdiagramm des Programmmoduls „Werkzeugrekursion“

Als Hilfsmittel sind Formblätter für die Werkzeugänderung auszufüllen. Für jede Rekursionsschleife wird vom Expertensystem ein separates Formblatt mit den vorhergehenden Änderungen ausgegeben, gleichzeitig erfolgt eine automatische Nummerierung der Änderungsschleifen.

Die Änderungen können sehr unterschiedlicher Natur sein. Dies ist in Bild 97 durch strichlierte Linien angedeutet. Im einfachsten Fall werden nochmals Abmusterungen mit veränderten Prozessparametern oder einem anderen Material durchgeführt. Die

weitaus komplizierteren Änderungen sind Änderungen am Werkzeug oder sogar am Formteildesign. In diesem Fall würden geänderte Werkzeugzeichnungen oder Änderungen an der Formteilgeometrie erforderlich werden. Die konstruktiven Änderungen sind ebenfalls im laufenden Projekt mit zu dokumentieren. Sie dienen einerseits der Qualitätssicherung und andererseits der Kostenkontrolle.

Durch das Einleiten einer Werkzeugrekursionsschleife wird im Expertensystem automatisch eine Rücksetzung mehrerer Checklistenunterpunkte durchgeführt. Auf diesem Weg wird dem Konstrukteur signalisiert, dass z.B. ein Spritzgießprotokoll oder ein Vermessungsbericht für die jeweilige Werkzeugrekursion gespeichert werden muss.

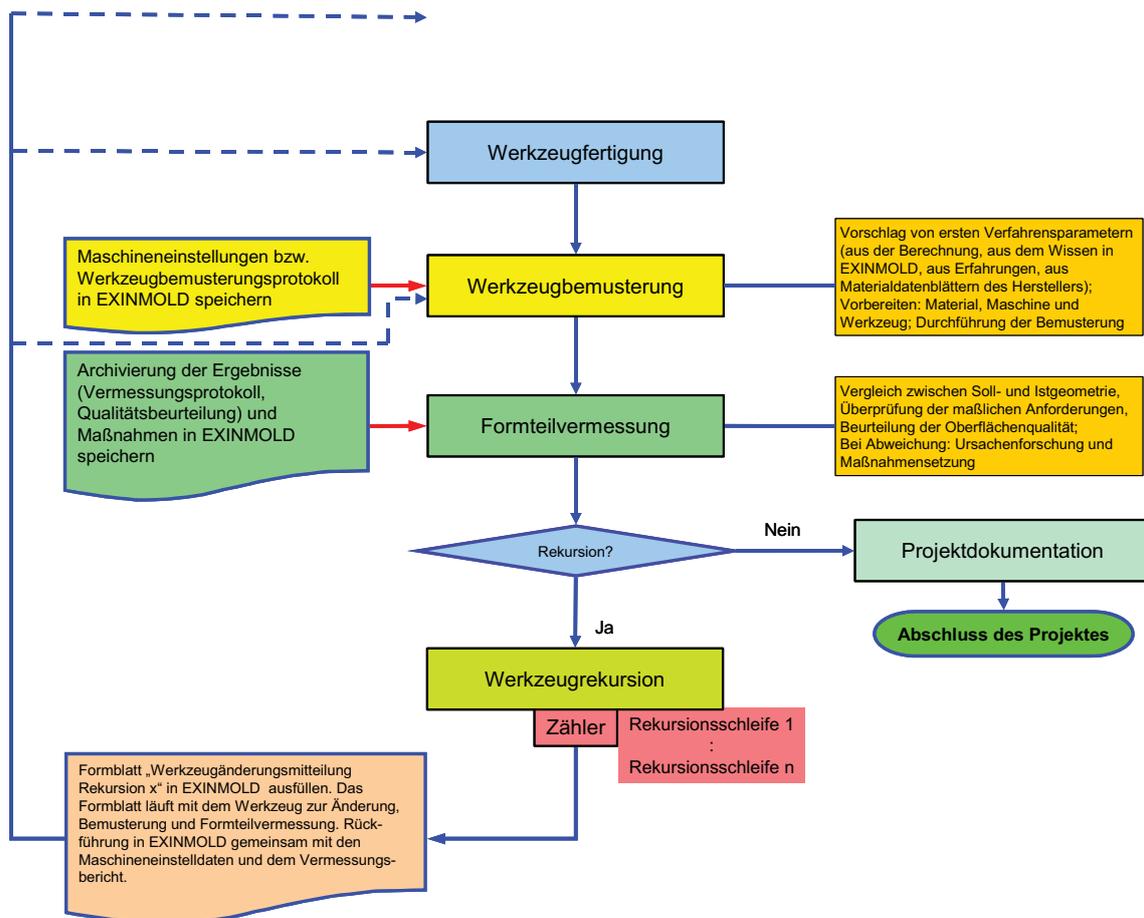


Bild 97: Schematische Darstellung der Einleitung von „Werkzeugrekursionsschleifen“ und mögliche Rückkoppelung zu den vorangegangenen Modulen

Die Schleife der Werkzeugrekursion wird so oft im Expertensystem durchlaufen, bis keine Änderungsmaßnahmen mehr notwendig sind. Danach wird der Konstrukteur zur abschließenden Projektdokumentation aufgefordert.

6.13 Projektdokumentation

In der Projektdokumentation (Bild 98) werden alle bisher noch nicht erfassten Daten gespeichert. Die letztendliche Werkzeugfreigabe erfolgt durch die Qualitätssicherung und ist ebenfalls im System zu dokumentieren.

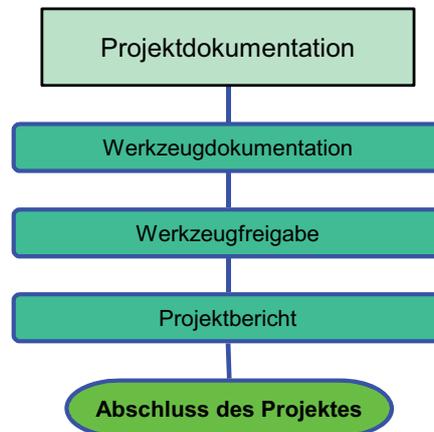


Bild 98: Flussdiagramm des Programmmoduls „Projektdokumentation“

Durch die strikte Dokumentation an den entsprechenden Platzhaltern in EXINMOLD kann schließlich nach der Werkzeugfreigabe automatisch ein Projektbericht erstellt werden.

Der Projektbericht dient der Dokumentation der Qualitätssicherung, der Nachkalkulation und der Feststellung der Durchlaufzeit, der Information bei weiteren ähnlichen Neukonstruktionen und nicht zuletzt der Dokumentation der Maschineneinstelldaten. Darüber hinaus dokumentieren diese Projektberichte Erfahrungen, welche insbesondere von der Unternehmensführung als Entscheidungshilfen genutzt werden können. Die Voraussetzung dafür ist jedoch, dass die Dokumentation während der Projektbearbeitung durchgängig und konsequent erfolgt.

6.14 Projektabschluss

Durch integrierte Abfragen der Dokumentationsmöglichkeiten in den Unterpunkten der Checklisten erkennt EXINMOLD automatisch, ob in jedem Modul die erforderlichen Schritte bearbeitet wurden. Sind Unterpunkte übersprungen oder vergessen worden, wird der Benutzer dazu aufgefordert, fehlende Informationen nachzureichen. Sobald alle Projektdaten vollständig auf das System geladen sind, ist es möglich, das Projekt abzuschließen. In diesem Zuge wird das aktuelle Projekt in das Verzeichnis der „abgeschlossenen Projekte“ verschoben. Es steht ab diesem Zeitpunkt als Erfahrungswissen im Expertensystem zur Verfügung und wird automatisch in den Konstruktionsprozess neuer Werkzeuge einbezogen.

Anhand dieser Methode wird die Wissensbasis ständig durch die bearbeiteten Projekte erweitert. Je mehr Projekte abgeschlossen werden, umso mehr Erfahrungen

werden gespeichert. Dies hat zur Folge, dass das System bei der Suche nach ähnlichen Formteilen und ähnlichen Werkzeugkonstruktionen immer bessere Treffer landet. Somit erhält der Benutzer ein System, das durch seine eigenen Erfahrungen belebt wird, wodurch die Akzeptanz einer derartigen Konstruktionshilfe gegeben ist.

Durch die beschriebene Systematik wird weiters gewährleistet, dass das Wissen einzelner Konstrukteure dauerhaft gespeichert wird. Dies ist insbesondere von Bedeutung, wenn erfahrene Mitarbeiter aus der Firma ausscheiden. Das Expertensystem kann folglich auch für die Schulung jüngerer oder noch nicht erfahrener Mitarbeiter verwendet werden.

Wenn man die Möglichkeiten der entwickelten Systematik betrachtet, begründet die Entscheidungsunterstützung mit EXINMOLD einen großen Schritt nach Vorne, gemessen an den heutigen Möglichkeiten der Werkzeugentwicklung in kleinen und mittelständischen Unternehmen.

7 Zusammenfassung, Schlussfolgerungen und Ausblick

Im Spritzgießverfahren werden technische Bauteile mit hohen Qualitätsanforderungen hergestellt. Kern des formgebenden Prozesses ist das Spritzgießwerkzeug. Die erforderlichen Kavitätsabmessungen zur Erzielung der gewünschten Formteilmaße müssen bereits in der Werkzeugkonstruktionsphase festgelegt werden.

In den letzten drei Jahrzehnten wurden verschiedene Simulationsprogramme für die Berechnung des Spritzgießprozesses entwickelt. Durch den Einsatz dieser Programme ist es unter anderem möglich, Fehler in der Werkzeugkonstruktion schon in der Konstruktionsphase zu erkennen. Für den sinnvollen Einsatz von Spritzgießsimulationsprogrammen gibt es eine wichtige Voraussetzung: die Ergebnisse der Programme müssen experimentell verifiziert werden. Dies geschieht durch Messung der berechneten physikalischen Größen wie Druck und Temperatur sowie durch die Bestimmung von Schwindung und Verzug.

Der Werkzeugkonstrukteur ist vor allem an Schwindungswerten und dem zu erwartenden Verzug des Bauteils interessiert. Schwindung und Verzug werden allerdings durch Simulationsprogramme meist nicht wahrheitsgemäß berechnet. Daher sind im Werkzeugbau nach wie vor Werkzeugkorrekturschleifen notwendig, damit die Qualitätsansprüche an die Bauteile erfüllt werden können. Diese Korrekturschleifen sind zeit- und kostenintensiv. Zur Lösung dieser Schwierigkeiten soll diese Arbeit beitragen.

In der vorliegenden Arbeit wird das Expertensystem EXINMOLD für die Konstruktion von Spritzgießteilen und -werkzeugen vorgestellt. Für die Entwicklung des Expertensystems wurden durchgängige Untersuchungen an mehr als 35 Bauteilen und Werkzeugen durchgeführt. Die Bauteile und Werkzeuge wurden mit dem Simulationsprogramm Moldflow Plastics Insight™ (MPI) berechnet. Die Qualität der Berechnungsergebnisse wurde für alle Prozessphasen experimentell verifiziert.

Vergleiche der Füllphase mit Berechnungsergebnissen zeigen gute Übereinstimmung zwischen Realität und Simulation. Die Fließfront wird für die untersuchten Modelle (Midplane, Fusion und 3D) in guter Übereinstimmung mit dem Experiment errechnet.

Der Fülldruck wird von den Berechnungen innerhalb einer gewissen Bandbreite, abhängig vom Simulationsmodell, prozessgetreu bestimmt. In der Simulation fällt der Forminnendruck jedoch meist schneller ab als in der Realität. Ursachen für diesen Umstand sind in den benötigten Stoffdaten zu suchen. Dazu zählen unter anderem das p_vT -Verhalten und die Scherviskosität. Diese Stoffdaten müssen mit ausreichender Genauigkeit bekannt sein.

Für den Vergleich der thermischen Werkzeugberechnung mit den tatsächlich im Werkzeug auftretenden thermischen Bedingungen wurde die Infrarotthermografie mit gutem Erfolg eingesetzt. Die Berechnungen mit MPI spiegeln im Wesentlichen die tatsächlichen thermischen Verhältnisse im Werkzeug wider.

Die Evaluierung von Schwindung und Verzug der Bauteile erfolgte mit dem optischen 3D-Scanner ATOS (Advanced Topometric Sensor). Für den Vergleich mit den Berechnungsergebnissen wurde die gescannte Bauteilhülle herangezogen. Beim Vergleich zeigten sich für die verschiedenen Materialklassen unterschiedlich gute Übereinstimmungen zwischen realer und berechneter Geometrie:

- Bei amorphen Thermoplasten werden, mit wenigen Ausnahmen, meistens gute Schwindungs- und Verzugsberechnungsergebnisse erzielt.
- Teilkristalline verstärkte Thermoplaste liefern in der Regel gute Berechnungsergebnisse, es sind jedoch vereinzelt Ausnahmen möglich.
- Bei der Berechnung mit teilkristallinen unverstärkten Thermoplasten konnten wenige gute und viele schlechtere Berechnungsergebnisse beobachtet werden.

Auch die Bauteilgeometrie hat einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die Schwindungs- und Verzugsberechnungen. Die Wahl des richtigen Simulationsmodells ist hierfür von größter Bedeutung.

Die Erfahrungen der durchgeführten Untersuchungen sind in das entwickelte Expertensystem eingeflossen. Das Expertensystem EXINMOLD ist eine Software, die den Werkzeugkonstrukteur durch alle Schritte der Werkzeugentwicklung begleitet. Das Expertensystem wurde entwickelt, um die Rekursionsschleifen und Durchlaufzeiten im Werkzeugbau zu minimieren. EXINMOLD wird unabhängig von dem CAD-System, in welchem die Werkzeugkonstruktion erfolgt, als Entscheidungshilfe eingesetzt. Es deckt alle Aspekte neben der bloßen Werkzeuggeometrie ab.

Das Expertensystem EXINMOLD ist in das Wissensmanagement-System PLONE eingebunden. Dieses ist auf dem Web-Application-Server-System Zope aufgebaut und benutzt die objektorientierte Datenbank ZODB, um Daten zu speichern.

Das Expertensystem hat eine modulare Struktur. Durch die Segmentierung in einzelne Module bzw. Bereiche wird der gesamte Konstruktionsprozess transparenter und erlaubt eine „methodische“ Vorgehensweise. Dabei wird eine sinnvolle Reihenfolge der Konstruktionsschritte vorgeschlagen, welche jedoch nicht zwingend vom Benutzer eingehalten werden muss. Die Module beinhalten Bearbeitungsschritte, Berechnungen, Prozessführung und/oder Hilfen.

Die Hauptmodule von EXINMOLD sind:

- 3D-Formteildesign / Urmodell
- Formteilklassifizierung und Zuordnung der Werkzeugtechnik
- Überprüfung der Bauteilkonstruktion
- Werkzeuggerechtes 3D-Modell
- 3D-Werkzeugkonstruktion
- Analyse der Werkzeugkonstruktion
- Werkzeugfertigung
- Werkzeugbemusterung
- Formteilvermessung
- Rekursion
- Projektdokumentation

Alle während der Bearbeitung generierten Projektinformationen werden in der objektorientierten Datenbank von EXINMOLD gespeichert und verwaltet.

Abgeschlossene Projekte stehen als Erfahrungswissen im Expertensystem zur Verfügung und werden automatisch in den Konstruktionsprozess neuer Werkzeuge mit einbezogen. Anhand dieser Methode wird die Datenbank von EXINMOLD ständig durch die bearbeiteten Projekte erweitert.

Durch die beschriebene Systematik wird gewährleistet, dass das Wissen einzelner Konstrukteure dauerhaft gespeichert wird. Dies ist insbesondere von Bedeutung, wenn erfahrene Mitarbeiter aus der Firma ausscheiden. Das Expertensystem kann folglich auch für die Schulung jüngerer bzw. noch nicht erfahrener Mitarbeiter verwendet werden.

Ausblick

Das Expertensystem EXINMOLD stellt den ersten Schritt zur Implementierung einer wissensbasierten Konstruktionsunterstützung in der Werkzeugentwicklung für Spritzgussteile dar. Die Entwicklung der Software wurde für Werkzeuge zur Herstellung von Bauteilen im Standardspritzgießverfahren durchgeführt.

In weiterführenden Arbeiten sollte das Expertensystem mit neuen Themen im Bereich der Spritzgießsondertechnik (Mehrkomponententechnik, Inserttechnik, etc.) erweitert werden. Ferner sollten Berechnungsmodule, z.B. für die Schließkraftabschätzung oder Ermittlung der Formnestanzahl, hinzugefügt werden, wodurch schließlich ein durchgängiges Hilfsmittel für die Werkzeugentwicklung realisiert werden kann.

8 Literatur

- [1] *Austin T. B.*: Fighting the Flow – How predicting the way plastic moves saved us money. ANTEC 2006, S 1860 - 1871
- [2] *Baaijens F.P.T.*: Calculation of residual stresses in injection molded products. *Rheologica Acta* 30, 284-299; 1991
- [3] *Beaumont J., Stewart Ch., Ezzo M.*: Controlling intra-cavity melt flow and weld strength through new runner design technology. ANTEC 2005, S 860 - 864
- [4] *Bikas A., Pantelidis N., Kanarachos A.*: Computational tools for the optimal design of the injection moulding process. *Journal of Materials Processing Technology* 122 (2002), S 112 - 126
- [5] *Bird R. A., Stewart W. E., Lightfoot E. N.*: Transport Phenomena. John Wiley & Sons, New York, 1960
- [6] *Bogensperger H.*: Durchblick – Erfahrungen mit Spritzgießsimulationen. *Kunststoffe* 85 (1995), S 44ff
- [7] *Böröcz Z. K.*: Optische Erfassung und numerische Analyse von Kontakten in der dynamischen Okklusion mittels digitalisierter Situationsmodelle. Dissertation an der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster, 2004
- [8] *Brummel M., Linhart J., Macku T.*: Beziehungen zwischen ausgewählten technologischen Parametern und der Schwindung von Spritzgussteilen aus einem Polypropylenverbund. *Plaste und Kautschuk*, 34. Jahrgang, Heft 11/1987, S 418 – 420
- [9] *Chiang H. H., Hieber C. A., Wang K.K.*: A unified simulation of the filling and postfilling stages in injection moulding, Part 1: Formulation. *Polymer Engineering Science*. 31 (1991) S 116 - 124
- [10] *Crochet M. J., Dupret F., Verleye V.*: in S. G. Advani (Ed.), *Flow and Rheology in Polymer Composites Manufacturing*. Elsevier, Amsterdam, 1994, Kap. 11
- [11] *Ebner G. J.*: Prozess und wanddickenabhängige Schwindungsuntersuchungen an rechteckigen Formteilen und Vergleiche mit Simulationsrechnungen. Diplomarbeit am Institut für Kunststoffverarbeitung an der Montanuniversität Leoben, 2005
- [12] *Ebner G. J.*: Prozessabhängige Schwindungs- und Verzugsuntersuchungen an einem Schachtelformteil. Zwischenbericht PCCL-Projekt 3.1, 2005
- [13] *Erhard G.*: Konstruieren mit Kunststoffen. Hanser Verlag, 1995

- [14] *Fertschej A.*: Experimentelle Bestimmung und Berechnung des Winkelverzuges an einem speziellen thermoplastischen Winkelformteil. Diplomarbeit am Institut für Kunststoffverarbeitung an der Montanuniversität Leoben, 2001
- [15] *Filz P. F., Genoske H.*: Simulieren statt Probieren. *Kunststoffe* 88 (1998), S 954 - 956
- [16] *Fischer K.*: EXINMOLD v1.0 Benutzerinformation. Handbuch für das Expertensystem Spritzgießen, 2006
- [17] *Fischer K.*: EXINMOLD: Ein Expertensystem für die Entwicklung von Spritzgießwerkzeugen. Tagungsbeitrag zum 19. Leobener Kunststoffkolloquium, Institut für Kunststoffverarbeitung an der Montanuniversität Leoben, 2006
- [18] *Galantucci L. M., Spina R.*: Evaluation of filling conditions of injection moulding by integrating numerical simulations and experimental tests. *Journal of Materials Processing Technology* 141 (2003), S 266 - 275
- [19] *Gühring J.*: 3D-Erfassung und Objektrekonstruktion mittels Streifenprojektion. Dissertation an der Universität Stuttgart, 2002
- [20] *Han S., Zheng R., Kennedy P., Xu J., Kishbaugh L.*: Numerical analysis of microcellular injection molding. ANTEC 2003, S 696 - 700
- [21] *Hemmler M.*: Photogrammetrische Auswertung elektronenmikroskopischer Bilddaten. Dissertation an der Technischen Universität Berlin, 2001
- [22] *Hieber C.A., Shen S.F.*: A finite-element/finite-difference simulation of the injection-moulding filling process. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics* 7 (1980), S 1 - 32
- [23] *Hosdez V., Kech A., Meylheuc L.*: Optimisation of micro injection moulding with respect to material data under process conditions. PPS-21 (2005)
- [24] *Hoven-Nievelstein W. B.*: Die Verarbeitungsschwindung thermoplastischer Formmassen. Dissertation an der RWTH Aachen, 1984
- [25] *Ilinca F., Héту J.-F., Derdouri A.*: Numerical simulation of the filling stage in the micro-injection molding process. ANTEC 2004, S 636 - 640
- [26] *Isayev A. I., Kwon K., Kim K. H.*: Anisotropic shrinkage in injection molding of various polyesters. ANTEC 2006, S 1190 - 1194
- [27] *Jaworski M. J., Yuan Z.*: Theoretical and experimental comparison of the four major types of mesh currently used in CAE injection molding simulation software. ANTEC 2003, S 642 - 646
- [28] *Kallien L.*: Optimierung des Spritzgießprozesses von Duromeren mit 3D-Simulation. Veröffentlichung der Sigma Engineering GmbH, Aachen

- [29] *Kamal M. R., Kenig S.:* The injection moulding of thermoplastics, Part I: Theoretical model. *Polymer Engineering. Science* 12 (1972), S 294 - 301
- [30] *Kennedy P.:* Flow Analysis of Injection Molds. Carl Hanser Verlag, Munich Vienna New York, 1995
- [31] *Kietzmann C. v. L., Van Der Walt J. P., Morsi Y. S.:* A free-front tracking algorithm for a control-volume Hele-Shaw method. *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 41 (1998), S 253 - 269
- [32] *Kraus K.:* Photogrammetrie – Band 2: Verfeinerte Methoden und Anwendungen. 3. Auflage, Dümmler, Bonn, 1996
- [33] *Kwon K., Isayev A. I., Kim K. H., van Sweden C.:* Anisotropic shrinkage in injection moldings of semicrystalline polymers: simulation and experiment. ANTEC 2005, S 506 - 510
- [34] *Lee S., Lee D.-M, Kim M.-Y., Han D.-K.:* Plastic Injection Mold with Cavity Pressure/Temperature Sensors. PPS-22, 2006
- [35] *Lucyshyn T.:* Vorlesungsunterlagen zu Computerunterstützte Auslegung von Spritzgießwerkzeugen, WS 2002/2003. Institut für Kunststoffverarbeitung an der Montanuniversität Leoben, 2002
- [36] *Lucyshyn T., Fischer K.:* Auslegung von Spritzgießwerkzeugen mit Hilfe der FEM-Simulation. 17. Leobener Kunststoffkolloquium, 2003
- [37] *Luhmann T.:* Nahbereichsphotogrammetrie – Grundlagen, Methoden und Anwendungen. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, 2000
- [38] *Maas H.-G.:* Mehrbildtechniken in der digitalen Photogrammetrie. Habilitationsschrift, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie der ETH Zürich, 1997
- [39] *Majmundar R. B., Asthana A., Ghumman B. S., Barry C. M. F.:* Comparison of predicted and experimental filling of micromolded parts. ANTEC 2005, S 47 - 50
- [40] *Malloy R. A.:* Plastic Part Design for Injection Molding. Hanser Verlag, 1994
- [41] *Menges G., Sarholz R., Beese U., Hengesbach H.S., Wübken G.:* Spritzgießen – Verfahrensablauf, Verfahrensparameter, Prozessführung. Carl Hanser Verlag, München Wien, 1979
- [42] *Menges G.:* Werkstoffkunde der Kunststoffe. München Wien, Carl Hanser Verlag, 5. Auflage 2002
- [43] *Michaeli W., Brinkmann Th., Lessenich-Henkeys V.:* Kunststoffbauteile werkstoffgerecht konstruieren. Hanser Verlag, 1995

- [44] N. N.: ATOS v5.3.0, Benutzerinformation. Gesellschaft für Optische Messtechnik, Braunschweig (D), 2004
- [45] N. N.: DIN 16901, Kunststoff-Formteile, Toleranzen und Abnahmebedingungen für Längenmaße. 1982
- [46] N. N.: <http://www.cedip-infrared.com>: Homepage von Cedip Infrared Systems
- [47] N. N.: IR-Thermografie: Möglichkeiten, Anwendung, Nutzen im Spritzgießbereich. Anwendungsbericht, Flir Systems GmbH, D
- [48] N. N.: Praktikum Prozesssimulation, Spritzgießsimulation. Skriptum des Lehrstuhls für Kunststofftechnik, Universität Erlangen-Nürnberg
- [49] N. N.: Programmhilfe von Moldflow Plastics Insight™ 6.0 Revision 3. Moldflow Cooperation Headquarters, Wayland, MA 01778, USA
- [50] N. N.: Qualitätssicherung und 3D-Digitalisierung mit Photogrammetrie und Streifenprojektion. Publikation der Gesellschaft für Optische Messtechnik mbH, 2001
- [51] N. N.: Übung Optische Vermessung von Mikrostrukturen. Vorlesungs- und Übungsskriptum der TU Cottbus, Lehrstuhl für Mikrosystemtechnik
- [52] N. N.: Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung - Praktikum: Thermografie und Optische LockIn Thermografie. Skriptum des Instituts für Kunststoffkunde und Kunststoffprüfung, Universität Stuttgart
- [53] *Obendrauf W.*: Neue Methoden zur Temperatur- und Dehnviskositätsmessung für die Simulation von Kunststoffverarbeitungsprozessen. Dissertation am Institut für Kunststoffverarbeitung an der Montanuniversität Leoben, 1996
- [54] *Peinhopf W.*: Auslegung von Spritzgießwerkzeugen mittels der Methode der finiten Elemente. Dissertation am Institut für Kunststoffverarbeitung an der Montanuniversität Leoben, 2000
- [55] *Pötsch G. H.*: Prozesssimulation zur Abschätzung von Schwindung und Verzug thermoplastischer Spritzgussteile. Dissertation an der RWTH Aachen, 1991
- [56] *Reich C.*: Vollständige optische Formerfassung durch photogrammetrische Verknüpfung von Teilflächen. Dissertation an der Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, 1999
- [57] *Schauf D.*: Zusammenhänge zwischen Schwindung, Orientierung, Toleranzen und Verzug bei der Herstellung von Formteilen. *Plaste und Kautschuk*, 25. Jahrgang, Heft 11/1978, S 650 - 655
- [58] *Schlunke M., Paschke E.*: Der Einfluss der Verarbeitungsbedingungen auf die Maßabweichungen von Spritzgussteilen aus Acetalcopolymerisat und Polypropylen. *Plastverarbeiter* 22, 1971, Heft 2, S 89 - 96

- [59] *Schmidt T. W.*: Zur Abschätzung der Schwindung. Dissertation an der RWTH Aachen, 1986
- [60] *Schwarte R., Heinol H. G., Buxbaum B., Ringbeck T., Xu Z., Hartmann K.*: Principles of Three-Dimensional Imaging Techniques. In B. Jähne et al, Handbook of Computer Vision and Applications, Vol. I, Sensors and Imaging, Academic Press, San Diego, 1999
- [61] *Stitz S.*: Analyse der Formteilbildung beim Spritzgießen von Plastomeren als Grundlage für die Prozesssteuerung. Dissertation an der RWTH Aachen, 1973
- [62] *Unwerth Th.*: Experimentelle Verifikation eines Simulationssystems für eine Gasscrew. Dissertation an der Universität Dortmund, 2002
- [63] *Van Huffel P.*: Use of cavity pressure sensors to build viscosity data for flow simulations. ANTEC 2001
- [64] *Walsh S. F.*: Shrinkage and warpage prediction for injection molded components. ANTEC 1992, S 965-968
- [65] *Wassertheurer M.*: Rechnerische und experimentelle Untersuchungen zu Schwindung und Verzug von teilkristallinen Kunststoffen. Diplomarbeit am Institut für Kunststoffverarbeitung an der Montanuniversität Leoben, 2006
- [66] *Wiora G.*: Optische 3D-Messtechnik: Präzise Gestaltvermessung mit einem erweiterten Streifenprojektionsverfahren. Dissertation an der Ruprechts-Karls-Universität Heidelberg, 2001
- [67] *Woebcken W.*: Einfluss der Verarbeitung auf die Maßgenauigkeit von thermoplastischen Spritzgussteilen. Kunststoffe Band 67 (1977), S 179 – 183
- [68] *Woebcken W.*: Erfahrungen bei der Qualitätskontrolle und Gütesicherung von Kunststoff-Erzeugnissen unter besonderer Berücksichtigung des Formteilverzugs. Kunststoffe 71 (1981), S 229 - 233
- [69] *Wolf Th.*: Streifenprojektion zur Inspektion großflächiger Bauteile in der Formteil-Serienproduktion. Dissertation an der Universität Hannover, 2003
- [70] *Zheng R., Kennedy P., Xu J., Kishbaugh L.*: Simulation of microcellular foaming in injection molding. ANTEC 2002
- [71] *Zöllner O., Sagenschneider U.*: Schwindung und Verzug glasfaserverstärkter Thermoplaste lassen sich berechnen. Anwendungstechnische Information der Fa. BAYER AG, ATI 969 d,e
- [72] *Zöllner O.*: Grundlagen zur Schwindung von thermoplastischen Kunststoffen. Anwendungstechnische Information der Fa. BAYER AG, ATI 1120d, Ausgabe 00 06

9 Verzeichnis der Symbole und Abkürzungen

9.1 Lateinische Symbole

a_i	Schwindungskoeffizienten in Orientierungsrichtung
a_T	Temperaturverschiebungsfaktor für die Viskosität
b_i	Schwindungskoeffizienten quer zur Orientierungsrichtung
c	Lichtgeschwindigkeit
c_p	spezifische Wärmekapazität
C_{ijkl}	Viskoelastischer Relaxationsmodul
d	Bauteildicke
g	Erdbeschleunigung
h	Planck-Konstante
k	Boltzmann-Konstante
L_W	Werkzeugmaß
L_F	Formteilmaß
$M(\lambda, T)$	Strahlungsleistung
p_E	Einspritzdruck
p_N	Nachdruck
q	Wärmestromdichte
\dot{q}	Instationärer Wärmestrom
S	Schwindung
S^\perp	Schwindung quer zur Orientierungsrichtung
S''	Schwindung in Orientierungsrichtung
S_2	Fluidität
S_V	Volumenschwindung
s_l	Längenschwindung

s_b	Breitenschwindung
s_d	Dickenschwindung
T	Temperatur
\bar{T}	Mittlere Temperatur
T_A	Werkzeugtemperatur auswerferseitig
T_D	Werkzeugtemperatur düsenseitig
T_M	Massetemperatur
T_{TM}	Kühlmediumstemperatur
T_U	Umgebungstemperatur
T_W	Werkzeugtemperatur
t	Zeit
t_F	Füllzeit
t_k	Kühlzeit
t_n	Nachdruckzeit
t_o	Öffnungszeit
V	Volumen
v	Geschwindigkeit
z	Spalthöhe

9.2 Griechische Symbole

α_{TM}	Wärmeübergangskoeffizient Temperierkanal
α	Linearer Wärmeausdehnungskoeffizient
β	Volumenausdehnungskoeffizient
$\dot{\gamma}$	Schergeschwindigkeit
Δ	Differenz
ε	Dehnung
ε_E	Emissionskoeffizient
ε_R	Reflexionskoeffizient
ε_T	Transmissionskoeffizient
η	Viskosität
θ	Fließwinkel
κ	Kompressibilität
$\bar{\kappa}$	Mittlere Kompressibilität
λ	Wärmeleitfähigkeit, Wellenlänge
λ_W	Wärmeleitfähigkeit des Werkzeuges
ρ	Dichte
σ	Normalspannung, Stefan-Boltzmann-Konstante
$\underline{\sigma}$	Spannungstensor
τ	Schubspannung

10 Anhang

Im Kapitel 6 wurde die Methodik von EXINMOLD vorgestellt. Im Folgenden wird eine kurze Bedienungsanleitung für EXINMOLD dargestellt, die einen allgemeinen Überblick über die Projektbearbeitung zeigt.

Projektbearbeitung mit EXINMOLD

Der Benutzer steigt über einen Log-In Bereich in EXINMOLD ein (Bild 99). Dies erfolgt mit einem eigenen Benutzerzugang.

Die Benutzergruppe kann sich aus den Aufgabenbereichen

- Werkzeugmanagement,
- Formteilkonstruktion,
- Werkzeugkonstruktion,
- Arbeitsvorbereitung,
- Werkzeugbau,
- Werkzeugbemusterung und
- Qualitätssicherung

zusammen setzen. Der Hauptbenutzer des Systems ist der Werkzeugkonstrukteur, der auch die Projektverantwortung über das zu konstruierende Werkzeug hat.

Nachdem sich der Anwender im System angemeldet hat, wird er auf die Projektverwaltungsseite (Bild 100) weitergeleitet, in der er die folgenden Auswahlmöglichkeiten vorfindet:

- [Neues Projekt](#)
- [Aktuelle Projekte](#)
- [Abgeschlossene Projekte](#)
- [Bauteilkatalog](#)
- [Schwindungsdatenbank](#)

Über diese Schaltflächen kann im Expertensystem navigiert werden.

In diesem Bereich des Systems ist auch eine Suchfunktion verfügbar. Über diese Funktion kann innerhalb des Systems jederzeit gezielt nach Informationen gesucht werden. Diese Suche beschränkt sich nicht nur auf Seiten des Expertensystems, sondern alle über das System extern hoch geladenen Dokumente im *.doc, *.xls und *.pdf Format können nach Stichworten durchsucht werden. [16]

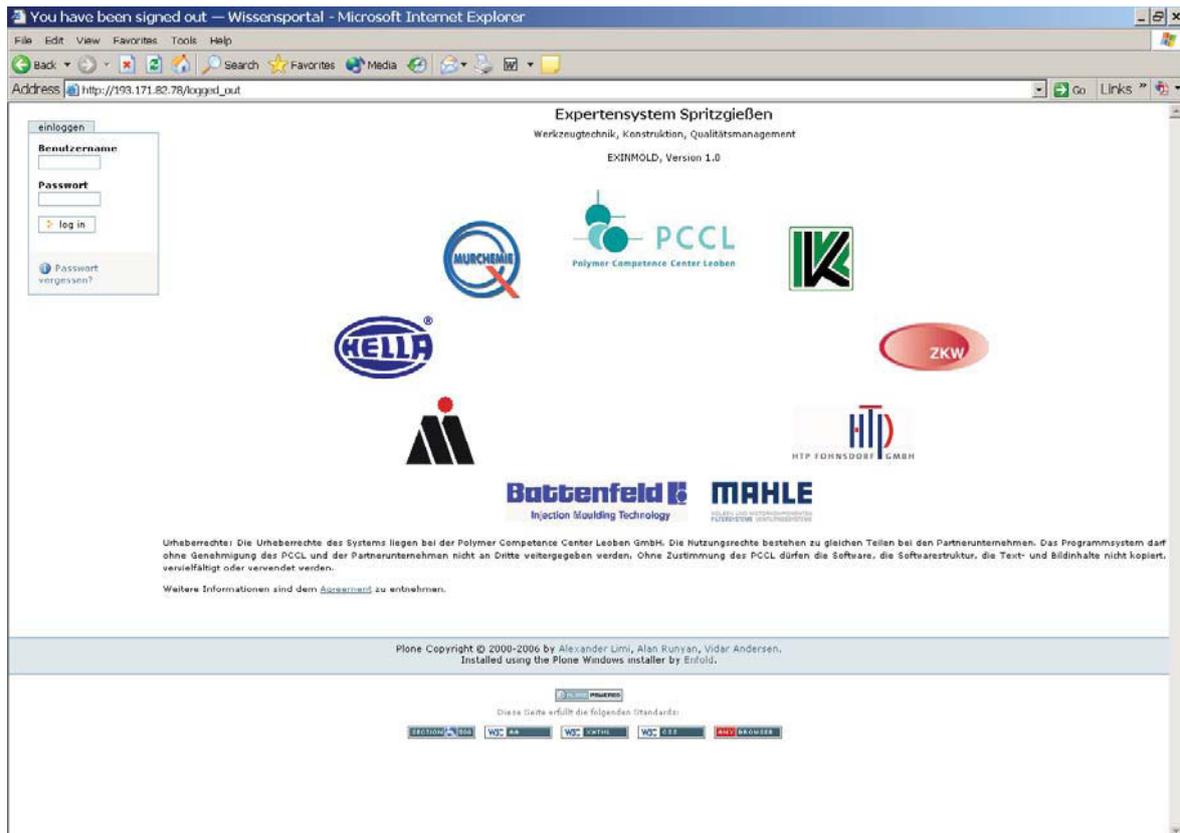


Bild 99: LOG-IN Bereich des Expertensystems Spritzgießen

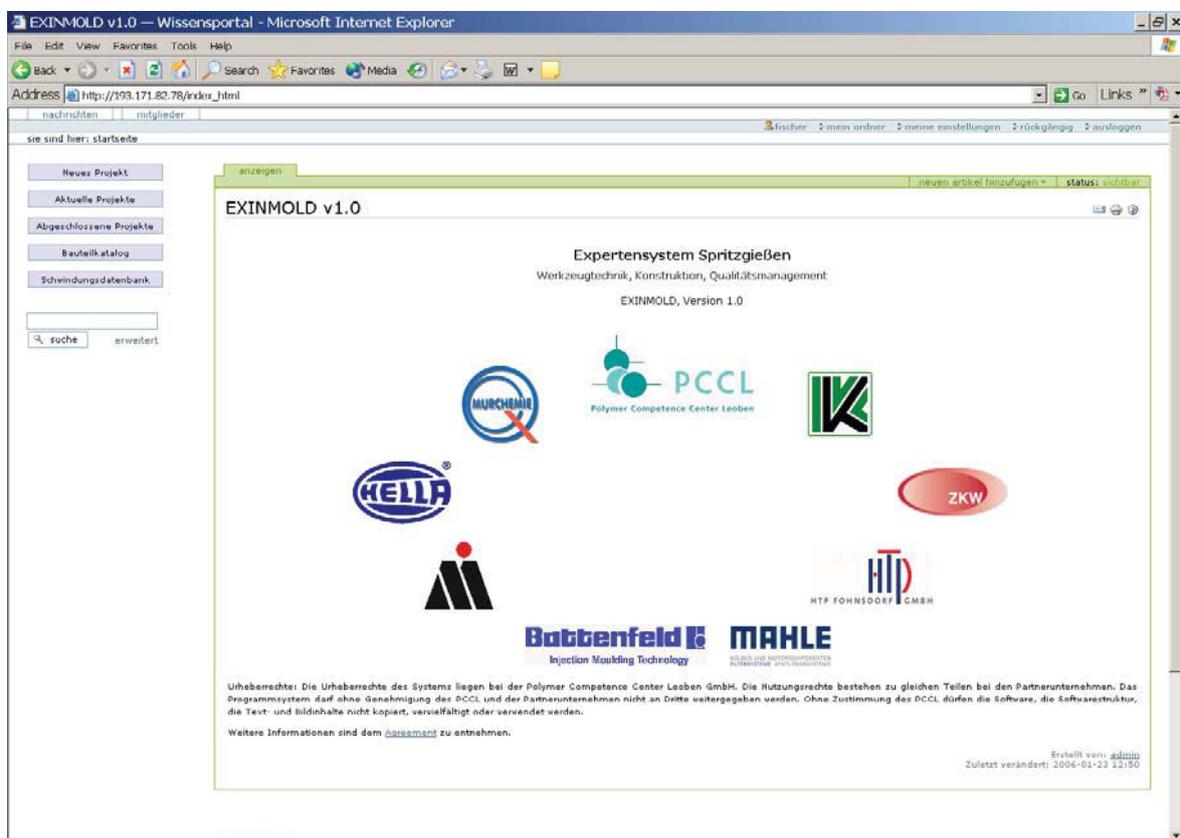


Bild 100: Projektverwaltungsseite in EXINMOLD

Legt der Benutzer ein neues Projekt an oder arbeitet er an einem laufenden Projekt weiter, wird er stets zur Projekthauptseite geleitet (Bild 101). In der Projekthauptseite ist die 3D-CAX-Prozesskette aus dem Bild 86 in einem übersichtlichen Ablaufdiagramm ohne Seitenäste abgebildet.

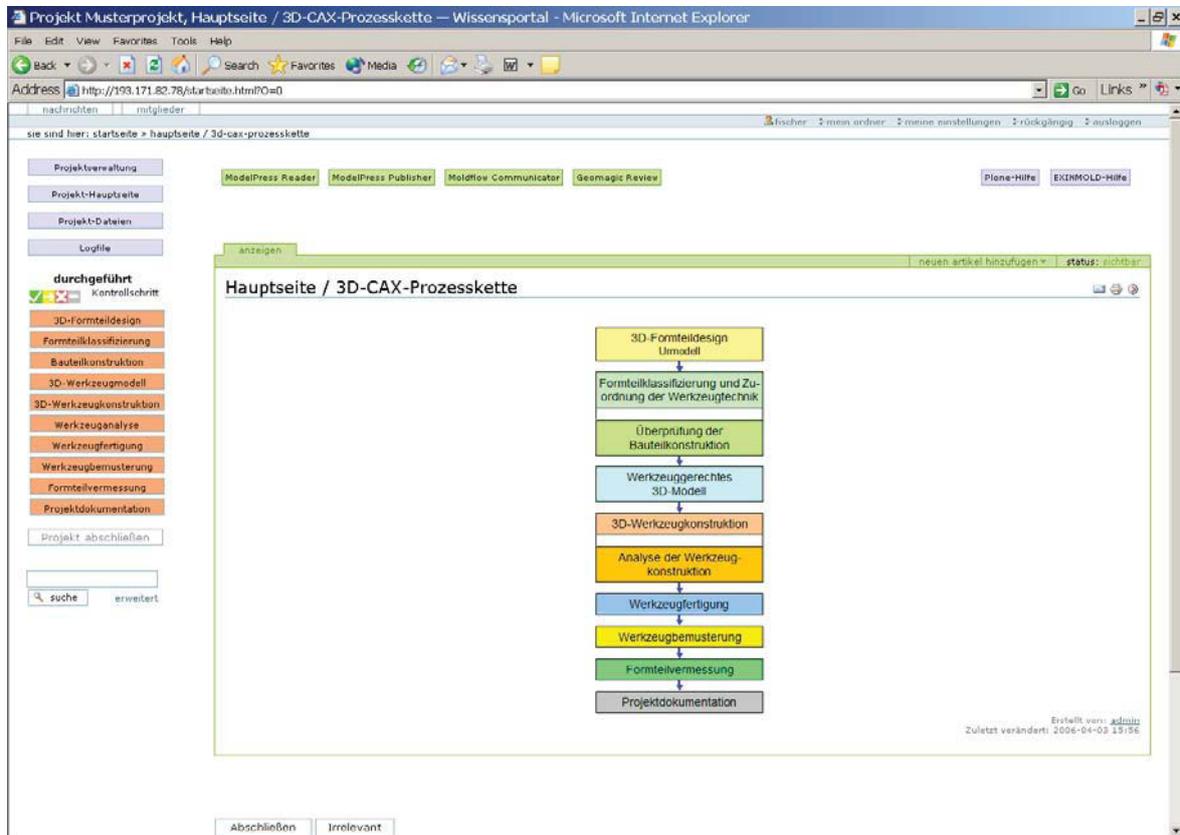


Bild 101: Bildschirmansicht der Projekthauptseite / 3D-CAX-Prozesskette

Die Hauptmodule, die im Expertensystem angezeigt werden, sind:

- 3D-Formteildesign / Urmmodell
- Formteilklassifizierung und Zuordnung der Werkzeugtechnik
- Überprüfung der Bauteilkonstruktion
- Werkzeuggerechtes 3D-Modell
- 3D-Werkzeugkonstruktion
- Analyse der Werkzeugkonstruktion
- Werkzeugfertigung
- Werkzeugbemusterung
- Formteilvermessung
- Projektdokumentation

Wenn Werkzeugkorrekturschleifen notwendig sind, wird zusätzlich das Modul „Rekursion“ verfügbar.

Auf der linken Seite in Bild 101 ist eine Checkliste zur Bearbeitung der einzelnen Module zu erkennen. Jedem Modul des Flussdiagramms ist eine eigene Checkliste mit Unterpunkten zugeordnet.

Die Farbe der Checkliste kennzeichnet den Bearbeitungszustand des Projektes. Eine rote Checkliste wurde noch nicht bearbeitet. Mit der Bearbeitung nimmt sie die Farbe gelb an. Jede Checkliste besteht aus mehreren Unterpunkten (Bild 102 linke Seite und Bild 103). Mit dem Anklicken der Checkliste werden die dazugehörigen Unterpunkte angezeigt. Wurden alle Unterpunkte bearbeitet, nimmt die Checkliste die Farbe grün an. Diese Farbsystematik gilt auch für die Bearbeitung der Unterpunkte.

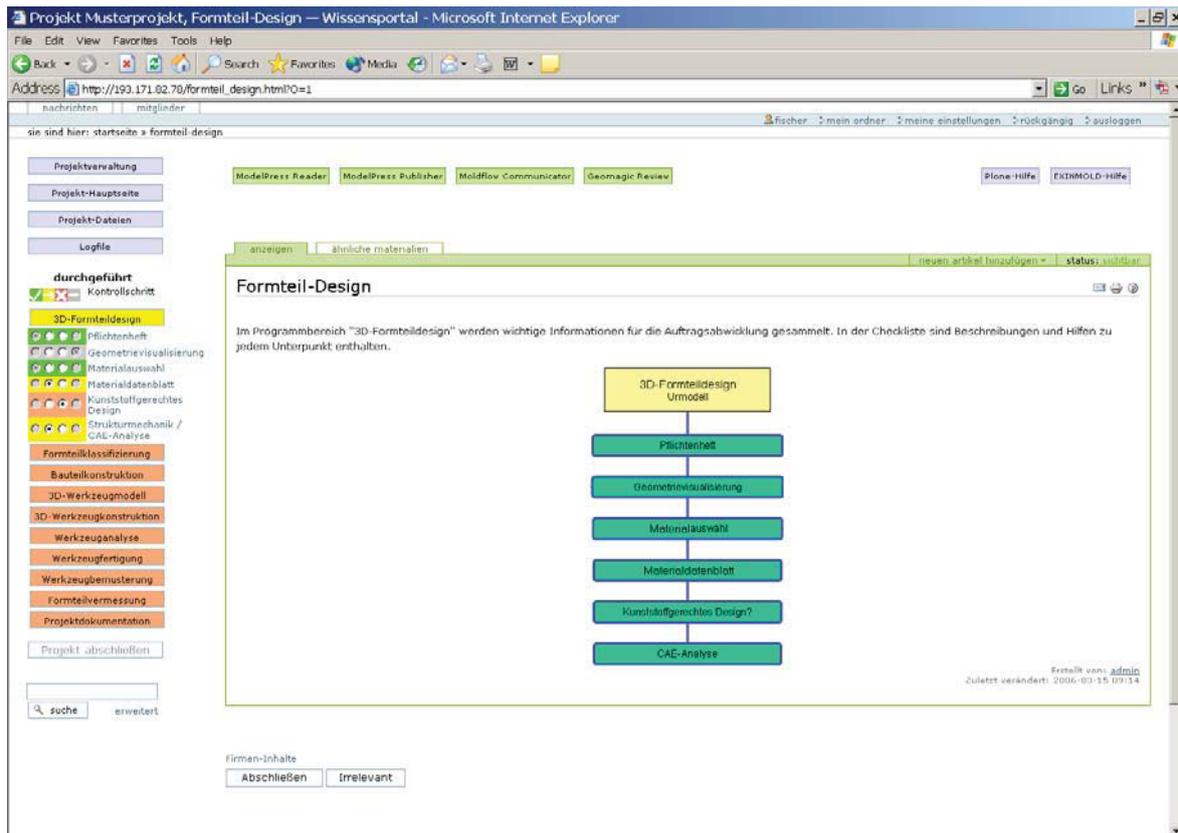


Bild 102: Beispiel für das „Aufklappen“ einer Checkliste während der Bearbeitung eines Projektes in EXINMOLD

Nach der Bearbeitung der Unterpunkte wird der Benutzer vom System aufgefordert, die Bearbeitungsschritte zu dokumentieren. Durch die Bestätigung der Dokumentation werden die Unterpunkte von gelb auf grün gesetzt. Die vom Benutzer als nicht relevant gekennzeichneten Unterpunkte werden im System grau gekennzeichnet (Bild 103).

Alle durchgeführten Arbeiten und die dazugehörigen Informationen werden in einem „LOG-File“ gespeichert. Die LOG-Files haben darüber hinaus folgende Funktion:

1. Der Bearbeitungszustand des Projektes wird durch das LOG-File überprüft. Nicht abgeschlossene Projekte werden in ihrem Bearbeitungszustand zwischengespeichert. Bei einer weiteren Bearbeitung des Projektes wird der letzte Bearbeitungszustand dargestellt.

- Das LOG-File ist die Basis für den abschließenden Projektbericht. In einem entsprechend vorformatierten Berichtsformular werden die Informationen des LOG-Files abgelegt. Damit wird ein vereinheitlichtes Berichtswesen sichergestellt.

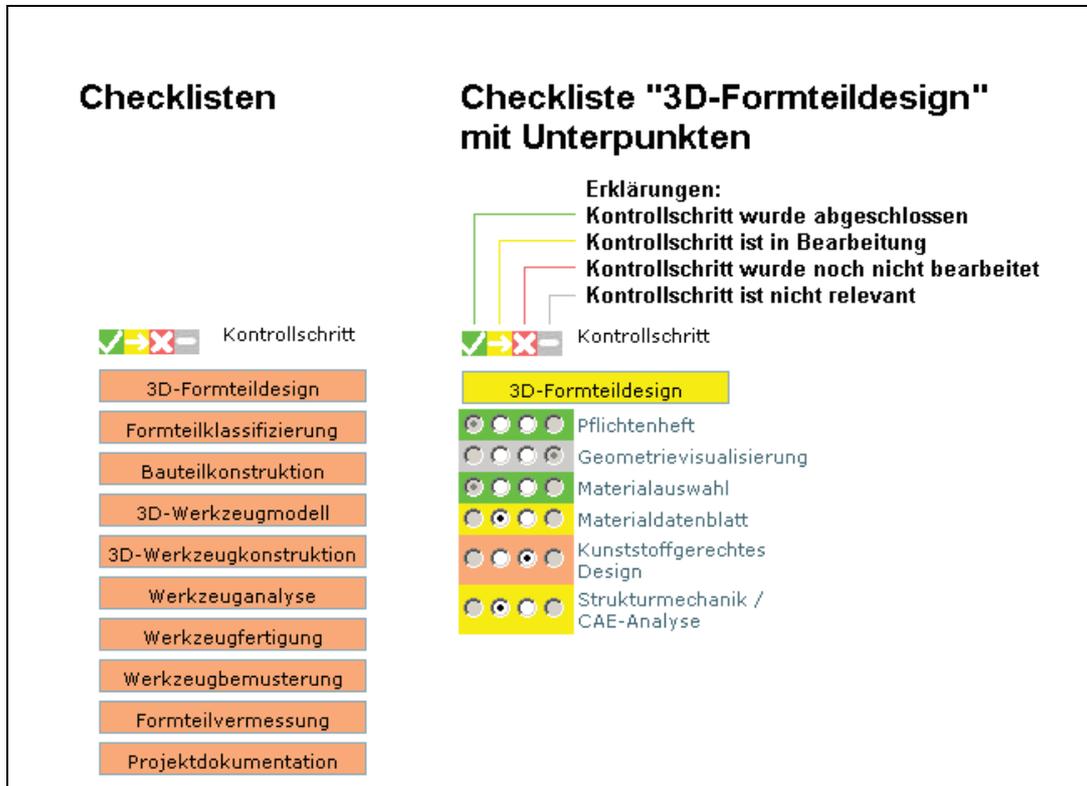


Bild 103: Darstellung der Checklisten (links) und der Unterpunkte für den Bereich 3D-Formteildesign (rechts)

Im Folgenden werden die einzelnen Module zur Projektbearbeitung vorgestellt und ausgewählte Checklistenunterpunkte beschrieben.

3D-Formteildesign

In diesem Modul (Bild 104) werden wichtige Daten und Informationen für die Projektabwicklung dokumentiert und allgemeine Fragen im Vorfeld der Werkzeugkonstruktion abgeklärt. Als erstes wird der Benutzer dazu aufgefordert, das Kundenpflichtenheft zu speichern. Liegt das Pflichtenheft nicht in elektronischer Form vor, ist es entweder einzuscannen oder ein Leerformular auszufüllen.

Unter Geometrievisualisierung ist die Begutachtung des Formteildesigns mittels eines firmeninternen CAD-Programms bzw. des in EXINMOLD integrierten STL-Viewers (Model Press Reader) zu verstehen. Anhand der Visualisierung wird eine erste Überprüfung des CAD-Modells durchgeführt.

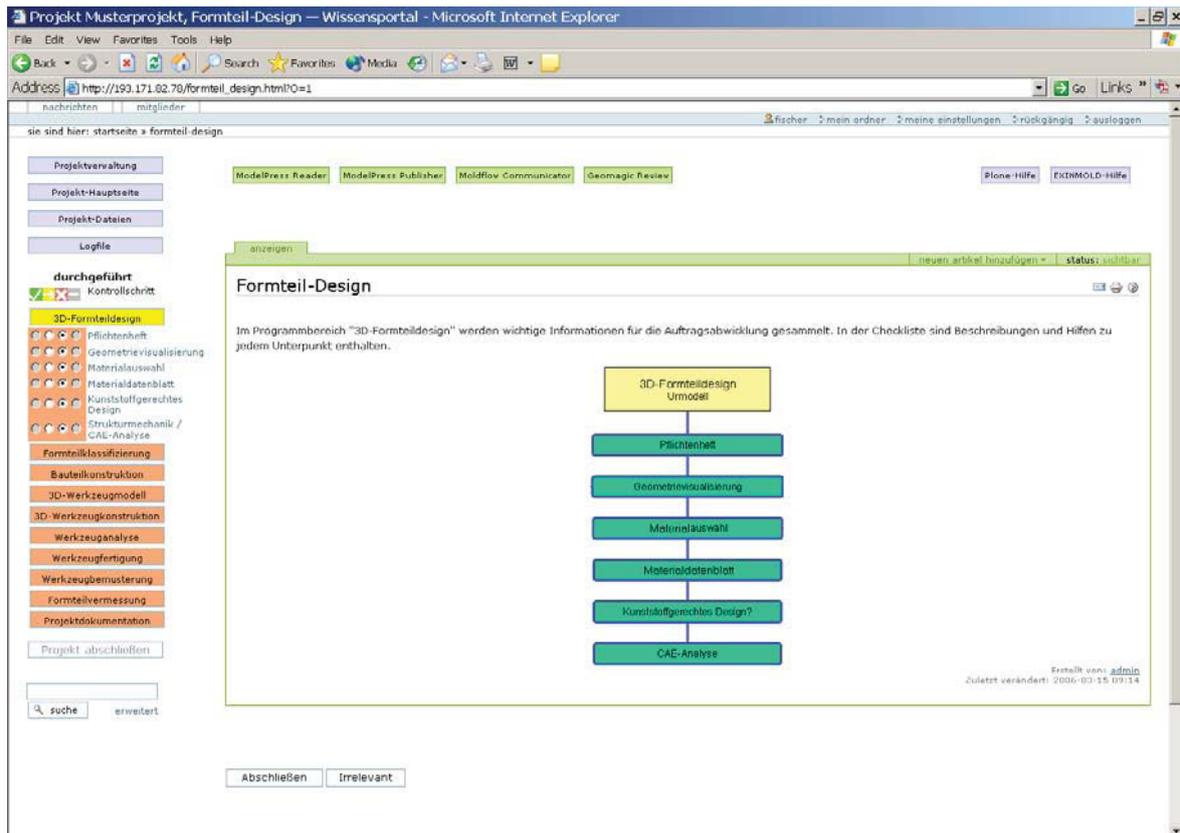


Bild 104: Modul „3D-Formteildesign / Urmittel“

Die Materialauswahl kann eine Vorgabe durch den Kunden, durch die geforderten Bauteileigenschaften, durch Kosten, etc. sein. Im Unterpunkt Materialauswahl muss ein Formular mit allen wichtigen Materialangaben ausgefüllt werden (Bild 105). Diese Angaben werden für die Suche nach Bauteilen mit gleichem oder ähnlichem Material verwendet. Nach Drücken des Knopfes „Material speichern“ wird ein Reiter mit der Bezeichnung „ähnliche Materialien“ in der Bildschirmansicht eingefügt (Bild 106), der ab diesem Zeitpunkt im Projekt zur Verfügung steht. Durch die Verwendung dieses Reiters können jederzeit Informationen zu Bauteilen mit gleichem oder ähnlichem Material gefunden werden, die in dem Expertensystem gespeichert sind.

Das entsprechende Materialdatenblatt des Rohstoffherstellers ist über den Unterpunkt „Materialdatenblatt“ in das System zu speichern. Unter dem Checklistenunterpunkt „kunststoffgerechtes Design“ sind die Abbildung des geforderten Formteileigenschaftsprofils (Gewicht, Maße, mechanische Eigenschaften, Oberfläche, etc.), die spritzgießtechnische Durchführbarkeit und die erlaubten Änderungen des Formteildesigns zu verstehen.

In dem Modul „3D-Formteildesign“ ist ferner abzuklären, ob für das Formteil eine CAE-Analyse durchgeführt werden muss. Unter CAE-Analyse sind z.B. strukturmechanische Berechnungen bzw. Festigkeitsuntersuchungen gemeint. Sollte das der Fall sein, müssen genauere Informationen über die Lastsituation, Randbedingungen, Umgebungsbedingungen, Designänderungsmöglichkeiten, etc. festgehalten werden. Die externen oder internen CAE-Analyseinformationen sind ebenfalls in dem System abzuspeichern.

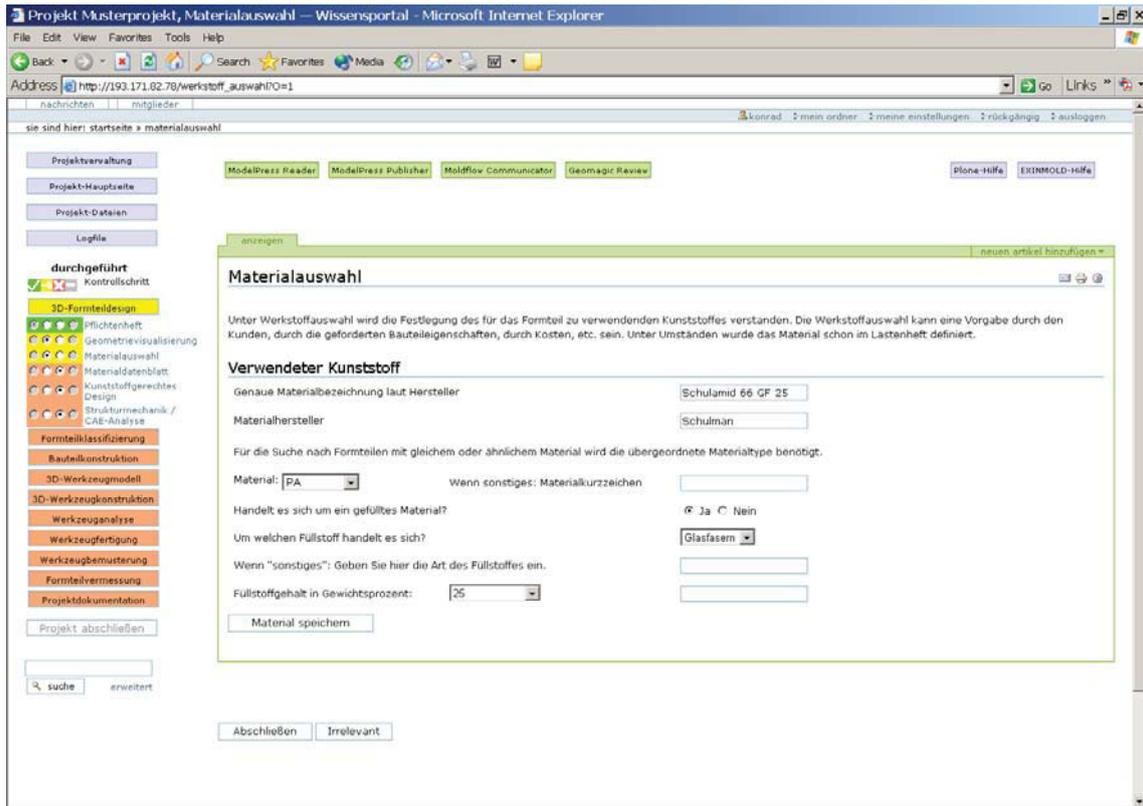


Bild 105: Checklisten-Unterpunkt „Materialauswahl“ mit Spezifikationsformular für den verwendeten Kunststoff

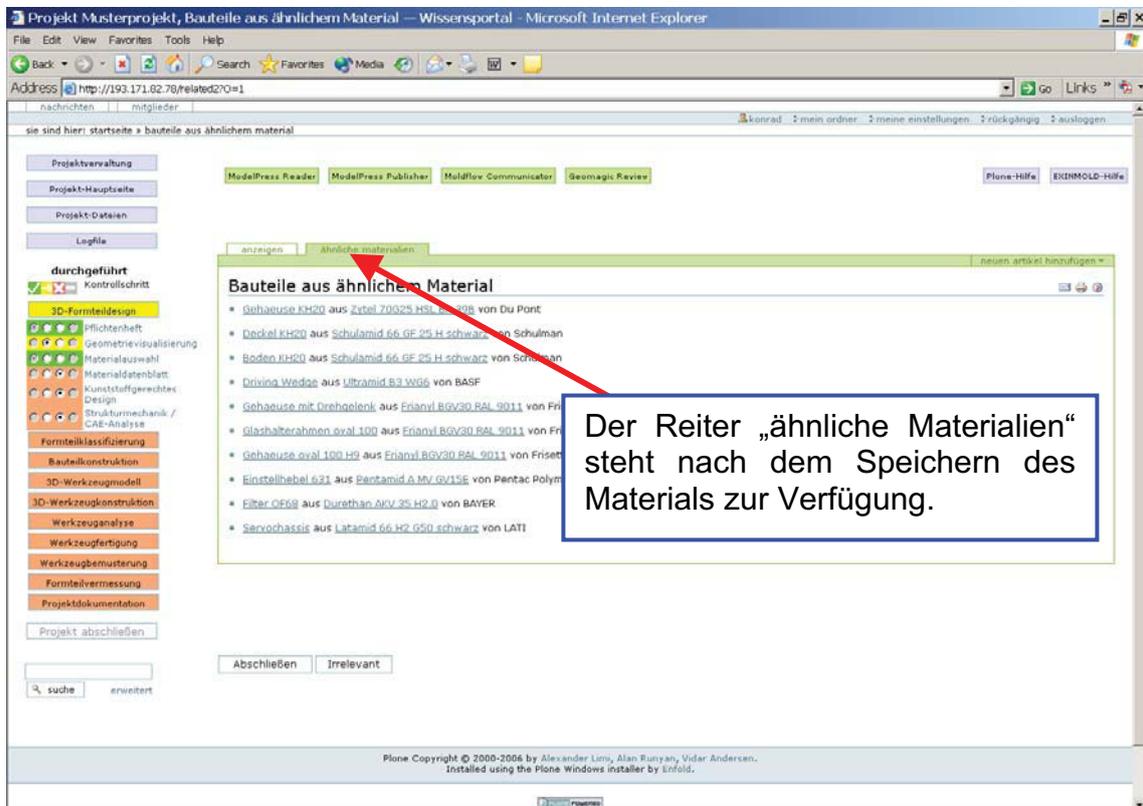


Bild 106: Anzeige von Bauteilen aus gleichem oder ähnlichem Material

Formteilklassifizierung und Zuordnung der Werkzeugtechnik

Dieser Modulbereich wird schematisch durch das Bild 107 dargestellt. Die Zuordnung des Formteils zu einer Formteilmfamilie erfolgt nach mehreren Kriterien (Bild 108), die in weiterer Folge erläutert werden.

Eine Formteilmfamilie besteht aus ähnlichen Formteilen, die bei Beachtung bestimmter Kriterien (Formnestzahl, Größe, Material, Anforderungen) mit konstruktiv ähnlichen Werkzeugen hergestellt werden können.

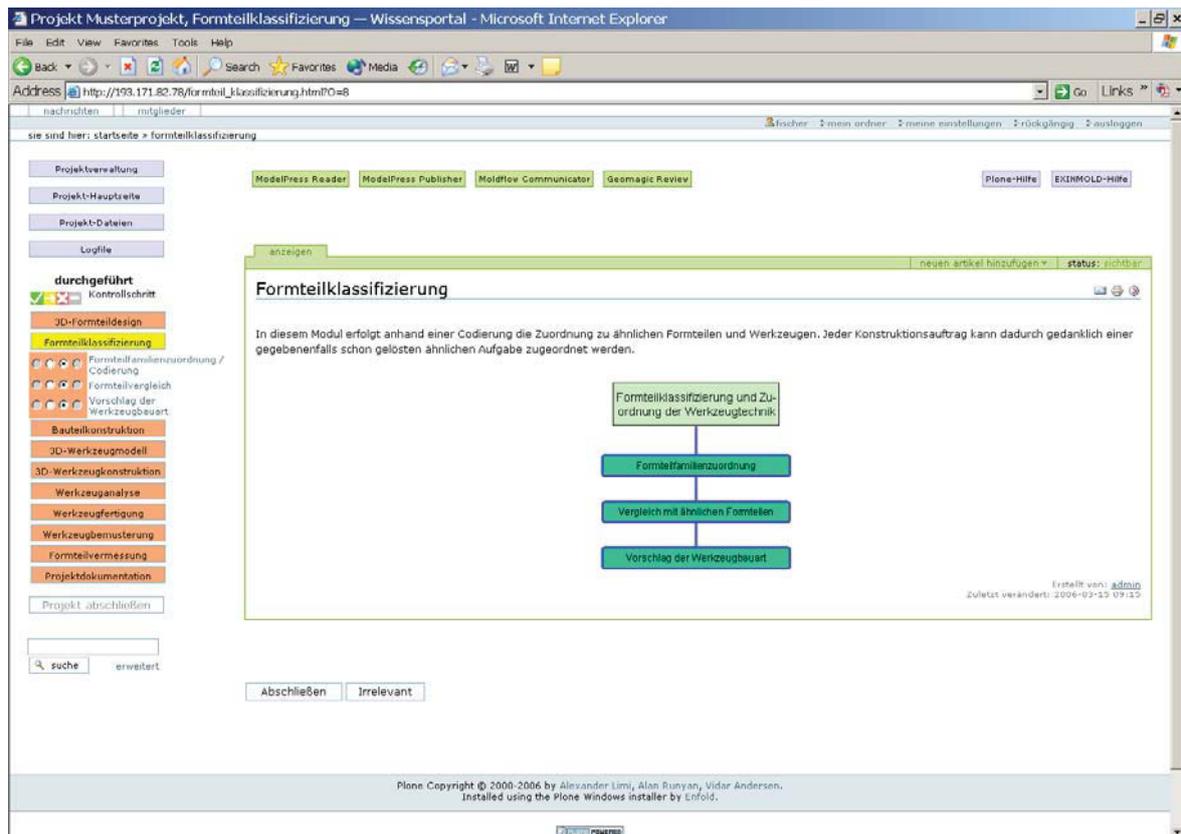


Bild 107: Modul „Formteilklassifizierung und Zuordnung der Werkzeugtechnik“

Der Benutzer wird dazu aufgefordert, die geometrischen Merkmale per Mausklick auszuwählen (Bild 108). Die Einordnung in eine Formteilmfamilie wird vom System automatisch durchgeführt. Anhand dieser Zuordnung werden aus dem in EXINMOLD enthaltenen Formteilkatalog ähnliche Bauteile ausgegeben, die in weiterer Folge für die Bearbeitung des Projektes als Erfahrungswissen zur Verfügung stehen.

Nach Drücken der Schaltfläche „Klassifizieren“ wird ein Reiter mit der Bezeichnung „ähnliche Bauteile“ in der Bildschirmansicht eingefügt und ab diesem Zeitpunkt immer angezeigt (Bild 109). Nach diesem Schritt können die ähnlichen Formteile begutachtet werden. Informationen und Erfahrungen der bisherigen Konstruktionen können als Entscheidungsgrundlage für die Konstruktion des neuen Werkzeugs herangezogen werden.

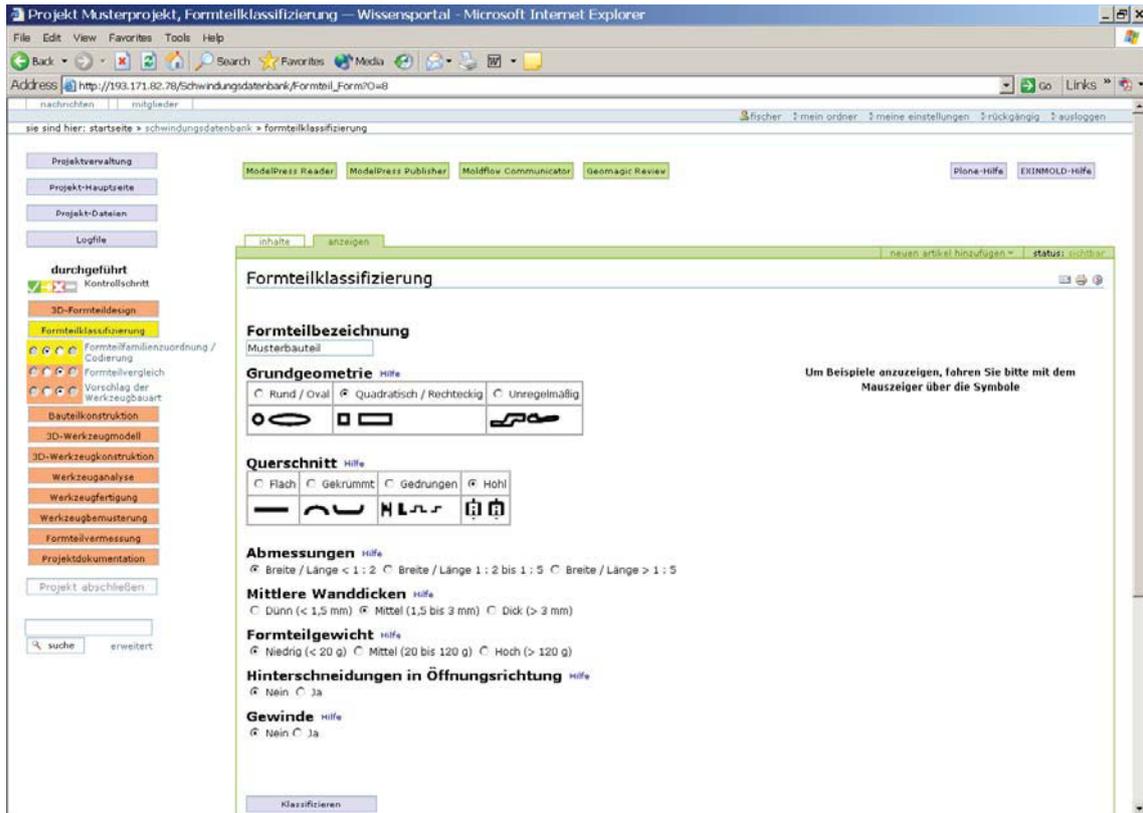


Bild 108: Abfrage bestimmter Geometriemerkmale für die Formteilklassifizierung

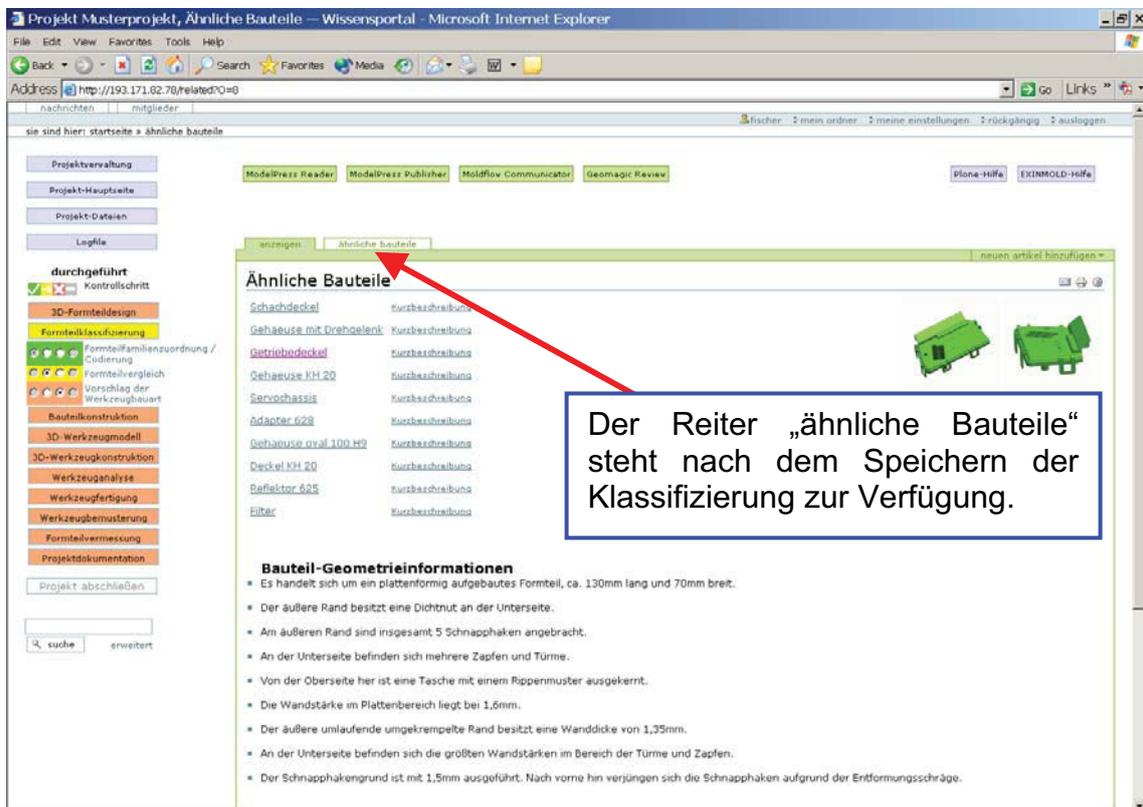


Bild 109: Anzeige der ähnlichen Bauteile aus dem Formteilkatalog nach der Klassifizierung

Als nächstes wird von EXINMOLD auf Basis der Formteilkodierung automatisiert die Werkzeugbauart vorgeschlagen (Bild 110). Die richtige Zuordnung wird anhand der Formteile im Formteilkatalog durchgeführt.

Trotz der Ergebnisse aus der Codierung kann aus wirtschaftlichen oder technischen Gründen eine Diskrepanz zu dem Anforderungsprofil des neuen Werkzeuges vorliegen. Wird dies vom Konstrukteur erkannt, besteht die Möglichkeit, die Werkzeugbauart zu ändern und auf andere ähnliche Werkzeuge zurückzugreifen. Dies wird mit dem Checklisten-Unterpunkt „Vorschlag der Werkzeugbauart“ durchgeführt.

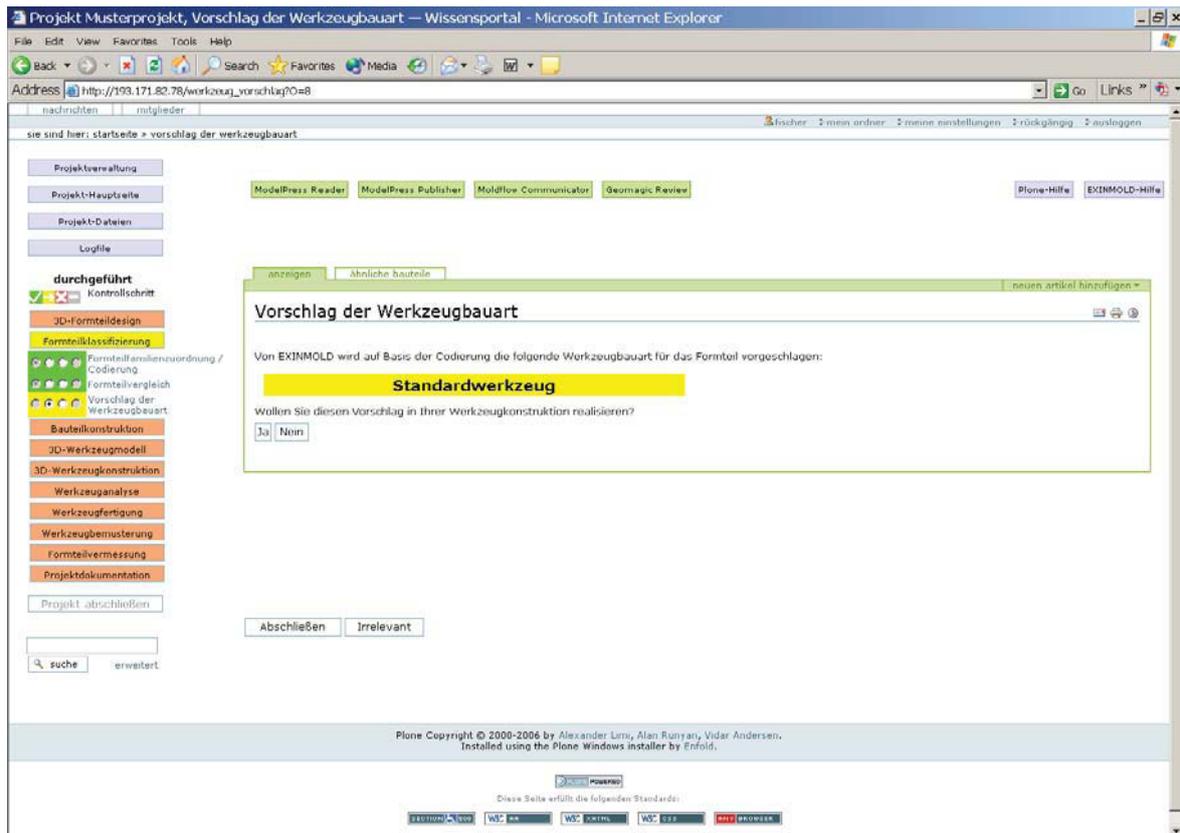


Bild 110: Automatische Zuordnung der Werkzeugbauart anhand der Formteilklassifizierung

Überprüfung der Bauteilkonstruktion

Um Bauteile mit hohen Qualitätsanforderungen herstellen zu können, muss die Bauteilkonstruktion spritzgerecht ausgeführt sein. Fehler im Design des Bauteils können durch eine konsequente Begutachtung der Konstruktion, hinsichtlich spritzgießrelevanter Kriterien, bereits frühzeitig vermieden werden.

Die Überprüfung der Bauteilkonstruktion ist in EXINMOLD in qualitäts- und zykluszeitbestimmende Faktoren und in die Reduzierung der Werkzeugaufwendungen unterteilen. Die Unterteilung der Kriterien mit den zugehörigen Checklistenpunkten ist dem Bild 111 zu entnehmen.

Hilfen zu jedem Unterpunkt können direkt aus EXINMOLD entnommen werden. Die Unterpunkte werden durch einen Klick auf den jeweiligen Eintrag bearbeitet.

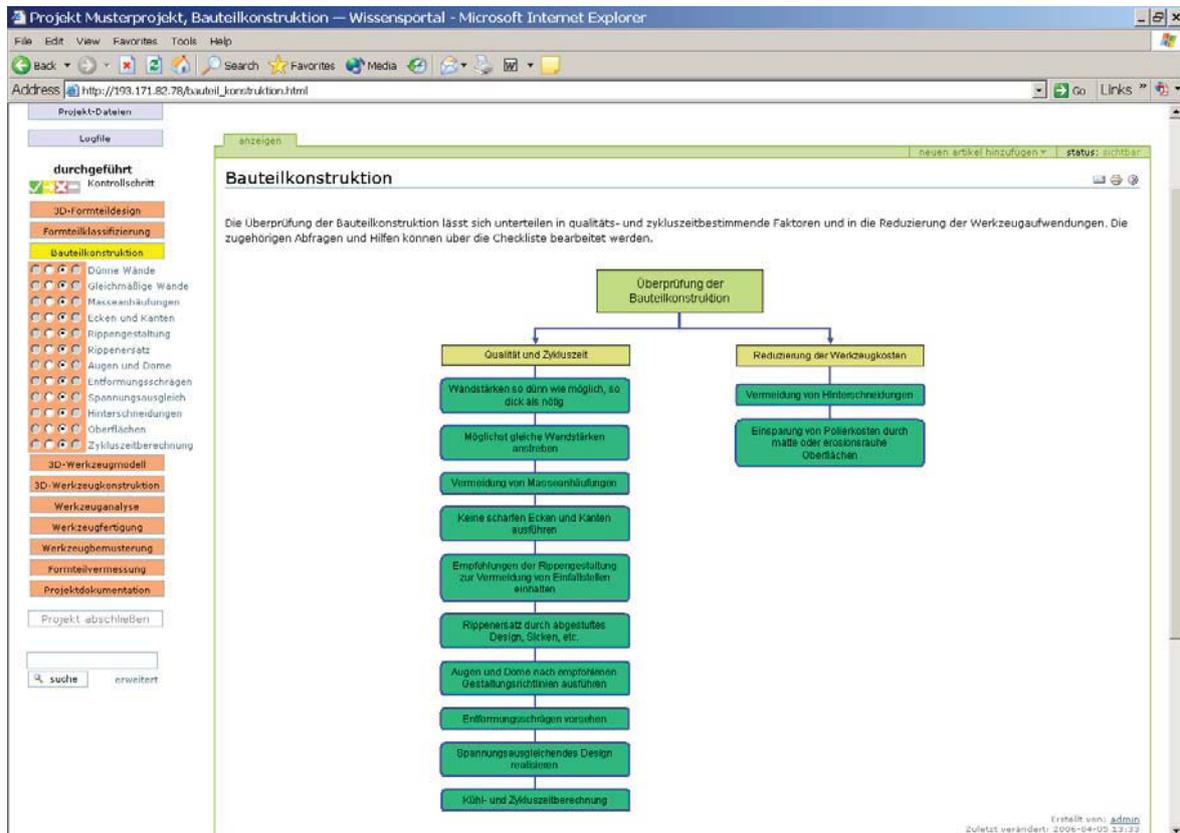


Bild 111: Modul „Überprüfung der Bauteilkonstruktion“

Zykluszeitberechnung

Im Modul „Überprüfung der Bauteilkonstruktion“ ist auch ein Berechnungsprogramm für die Abschätzung der erforderlichen Zykluszeit vorhanden (siehe Bild 111). Die Vorgangsweise zur Durchführung einer Berechnung wird im Folgenden beschrieben.

Nachdem der Unterpunkt „Zykluszeitberechnung“ ausgewählt wurde, wird am Bildschirm ein Formular für die Berechnungseingaben und –ausgaben angezeigt (Bild 112). Für die Durchführung der Berechnung werden Hilfen zur Vorgehensweise sowie zu einzelnen Eingaben am Bildschirm angeboten.

Bild 113 und Bild 114 zeigen eine Zykluszeitberechnung. Die Berechnung gestaltet sich wie folgt:

- 1) Aus dem Pull-down-Feld wird das verwendete Material ausgewählt.

In der Datenbank sind Empfehlungen für ca. 30 verschiedene Thermoplaste sowie physikalisch notwendige Materialdaten für die Berechnung gespeichert. Sollte das verwendete Material nicht in der Liste enthalten sein, sind die entsprechenden Eingabewerte aus dem Materialdatenblatt des Herstellers zu entnehmen.

Das verwendete Material wird von EXINMOLD automatisch ausgewählt, sofern im Modul „3D-Formteildesign“ zuvor eine Materialauswahl durchgeführt wurde.

Voraussetzung für die automatische Übernahme ist, dass das Material in der Datenbank enthalten ist.

- 2) Als weitere Eingaben sind die größte Wanddicke des Formteils (kühlzeitbestimmend) und die Dimensionen im Anschnittbereich (nachdruckzeitbestimmend) erforderlich.
- 3) Des Weiteren müssen die Masstemperatur, Werkzeugwandtemperatur und Entformungstemperatur eingegeben werden. Diese sind in der Konstruktionsphase meist noch nicht bekannt und müssen daher möglichst prozessnah geschätzt werden. Zur Orientierung dienen die empfohlenen Temperaturen, die im Formular angezeigt werden.
- 4) Als nächstes wird die effektive Temperaturleitfähigkeit durch Drücken der Schaltfläche „berechnen“ aus der Datenbank ermittelt. Bei einem neuen nicht in der Liste angeführten Material muss der Wert für die Temperaturleitfähigkeit individuell eingetragen werden.
- 5) Um die Zykluszeit berechnen zu können, ist nun noch die Eingabe der Werkzeugnebenzeiten (Werkzeug öffnen, entformen, schließen) erforderlich.
- 6) Nachdem alle Eingaben erfolgt sind, wird die Schaltfläche „Berechnung durchführen“ gedrückt. Die Berechnung wird ausgeführt und die Ergebnisse für Kühl-, Nachdruck- und Zykluszeit werden im Ausgabe-Feld angezeigt.

The screenshot shows a web browser window with the title 'Projekt Musterprojekt, Zykluszeitberechnung -- Wissensportal - Microsoft Internet Explorer'. The address bar contains 'http://193.171.82.78/Schwindungsdatenbank/Zykluszeitberechnung_Form?O=12'. The main content area is titled 'Zykluszeitberechnung' and includes a 'Hilfe zur Berechnung der Zykluszeit' section. The form is divided into 'Eingaben' (Inputs) and 'Ausgaben' (Outputs) sections.

Eingaben

Verwendetes Material auswählen:		Empfohlene Temperatur (min / max), in °C:
s (in mm)	größte Wandstärke des Bauteils <small>Hilfe</small>	
s _A (in mm)	Wanddicke im Anschnittbereich bzw. Anschnittdurchmesser <small>Hilfe</small>	
T _M (in °C)	Masstemperatur zu Beginn des Einspritzvorganges	<input type="text"/> <input type="text"/>
T _W (in °C)	mittlere Werkzeugtemperatur	<input type="text"/> <input type="text"/>
T _E (in °C)	maximale Entformungstemperatur <small>Hilfe</small>	ca. <input type="text"/>
α _{eff} (in mm ² /s)	effektive Temperaturleitfähigkeit (Materialkennwert)	<input type="text"/> <input type="button" value="berechnen"/>
t _{Neben} (in s)	Eingabe der Werkzeugnebenzeit (Abschätzung) <small>Hilfe</small>	<input type="text"/>

Ausgaben

t _K (in s)	errechnete gesamte Kühlzeit <small>Hilfe</small>	<input type="text"/>
t _N (in s)	errechnete Nachdruckzeit	<input type="text"/>
t _{Zykl.} (in s)	errechnete Zykluszeit	<input type="text"/>

Bild 112: Formular für die Zykluszeitberechnung

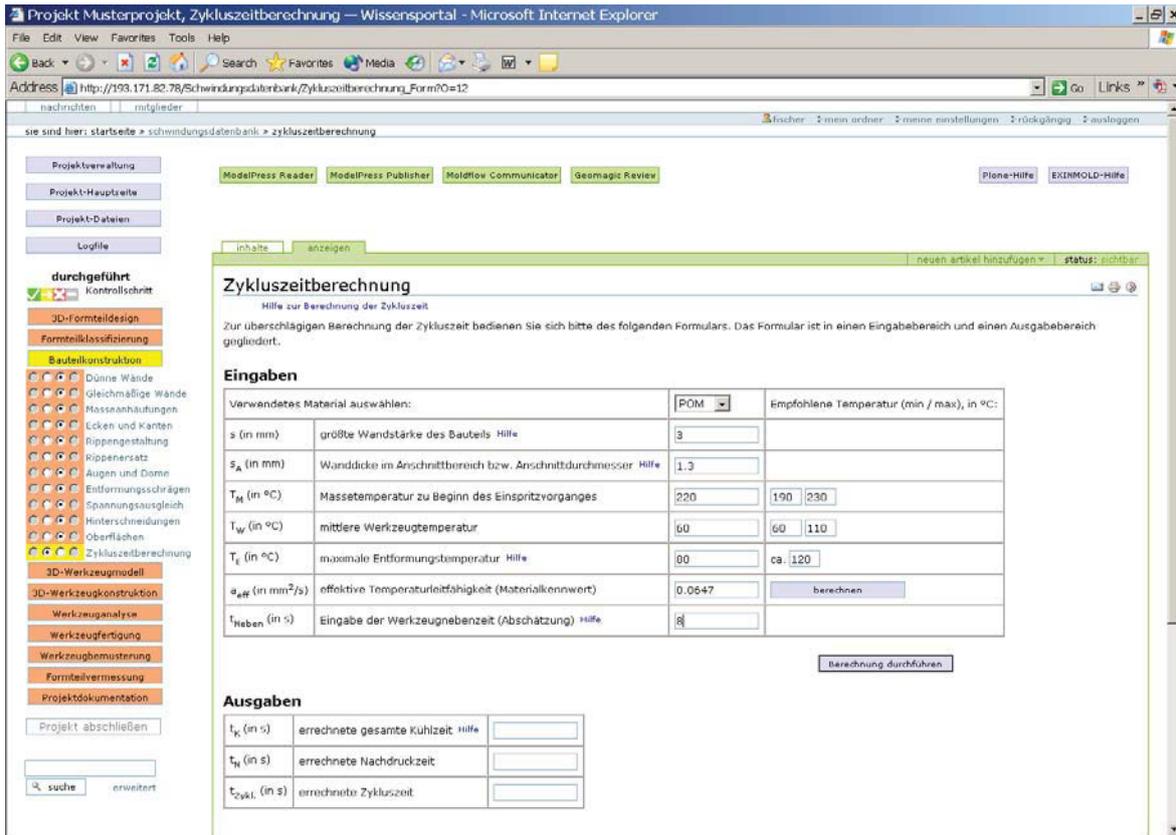


Bild 113: Eingabe der für die Berechnung erforderlichen Daten

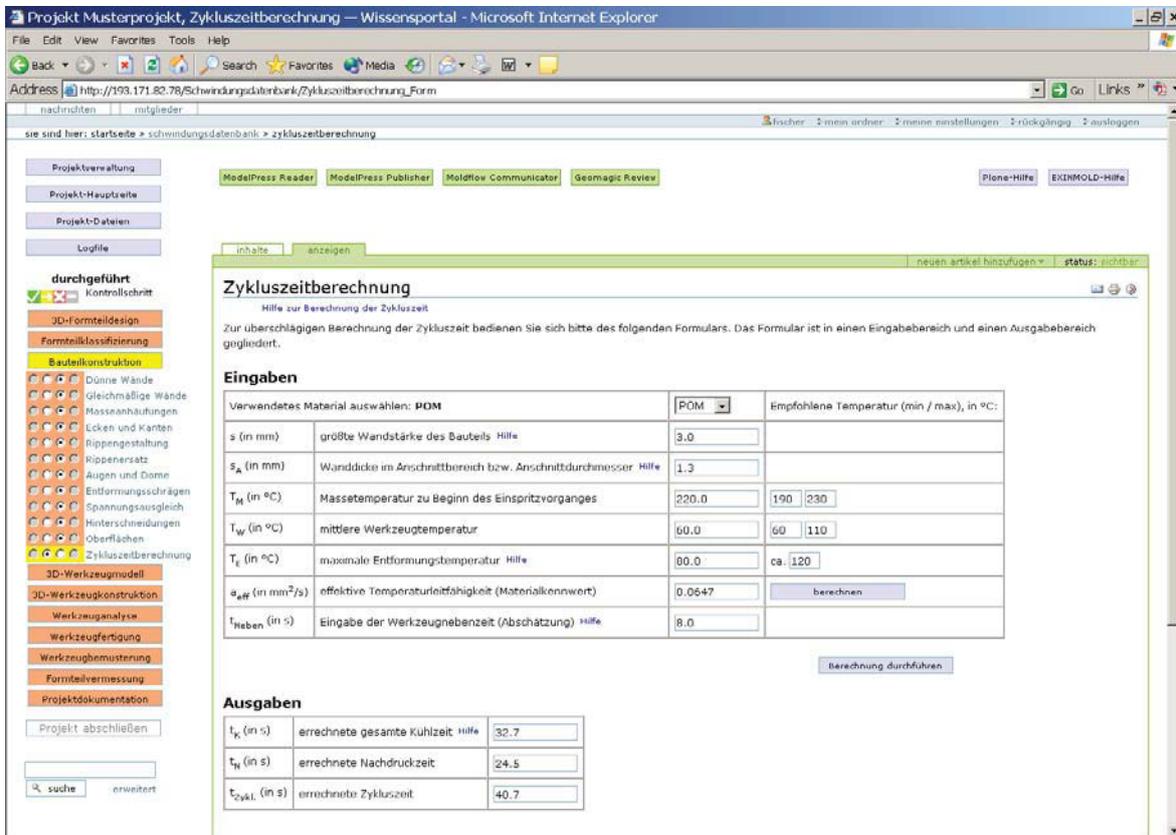


Bild 114: Bildschirmanzeige nach einer durchgeführten Berechnung

Werkzeuggerechtes 3D-Modell

In diesem Programmbereich werden alle notwendigen Entscheidungen für die richtige Berücksichtigung der Materialschwindung und des Verzugs angeführt (Bild 115). Auf der einen Seite wird ein Weg mit Unterstützung der Spritzgießsimulation gezeigt. Auf der anderen Seite sind aber auch die bisherigen Erfahrungen aus bereits abgewickelten Projekten verfügbar.

The screenshot shows a web browser window displaying a project management interface. The main content area features a flowchart titled 'Werkzeuggerechtes 3D-Modell' which details the steps from CAD model creation to final simulation setup. The flowchart includes decision points for 'Anschnittlage OK?' and 'Änderungen an der Formelbestätigung notwendig?'. A sidebar on the left lists various project tasks, and a search bar is located at the bottom left.

```

graph TD
    A[Werkzeuggerechtes 3D-Modell] --> B[CAD-Modell Formteil Soll]
    B --> C[Stoffdaten]
    C --> D[Vereinfachter Kuhlkanalentwurf]
    D --> E[Wahl der Anschnittlage, Entwurf des Angussystems]
    E --> F[Materialschwindung aufschlagen]
    F --> G[Auswahl des Berechnungsmodells  
Modul: Mittelflächenmodell / Fusion-  
Modell / 3D-Modell]
    G --> H[Wahl der Prozessparameter]
    H --> I[Füll-, Nachstück und Kühlberechnung,  
Schwindungs- und  
Verzugsberechnung]
    I --> J[Berechnungsanalyse]
    J --> K{Anschnittlage OK?}
    K -- Nein --> L[Neue Anschnittlage]
    L --> E
    K -- Ja --> M{Änderungen an der  
Formelbestätigung  
notwendig?}
    M -- Ja --> N[Formeloptimierung]
    N --> B
    M -- Nein --> O[Unsicherheitsfaktor der  
Verzugsvorhersage definieren,  
Konsequenzen über Verhalten der  
Geometrie (beidh. Werkzeug-  
änderung) durchdenken]
    O --> P[Spiegeln der vorausberechneten  
Geometrie in Referenz zur  
Sollgeometrie]
    P --> Q[Gespiegelte Geometrie rechnerisch  
überprüfen]
    Q --> R[Kavitätsabmessungen Soll]
    R --> S[Umsetzung ins CAD-Modell  
(= Werkzeuggerechtes 3D-Modell  
erstellen)]
  
```

Bild 115: Programmmodul „Werkzeuggerechtes 3D-Modell“

Werden für das aktuelle Projekt keine Simulationsberechnungen durchgeführt, so können die meisten Punkte in diesem Modul mit „nicht relevant“ gekennzeichnet werden. Zu diesem Zweck ist die Schaltfläche [„Simulationsrelevante Unterpunkte überspringen“](#) vorgesehen (Bild 116).

Zu den einzelnen Checklistenpunkten finden sich Hilfen und Erklärungen, die den Benutzer bei der Bearbeitung und Entscheidungsfindung unterstützen.

Für die richtige Annahme von Schwindungsgrößen sind Anhaltspunkte aus der Schwindungsdatenbank und dem Formteilkatalog für gleiche Materialien zu entnehmen. Ein Link zur Schwindungsdatenbank ist unter dem Checklistenunterpunkt „Materialschwindung“ vorhanden (Bild 116).

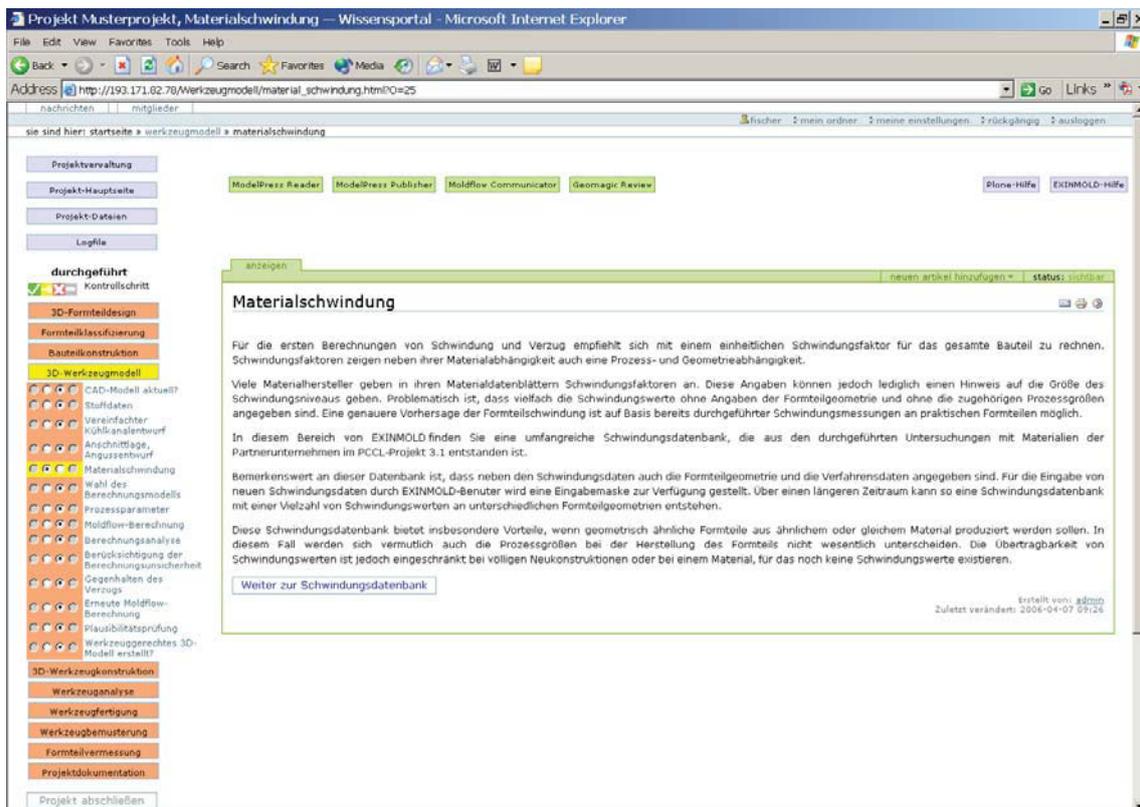


Bild 116: Checklistenunterpunkt „Materialschwindung“ mit Link zur Schwindungsdatenbank

Schwindungsdatenbank

Durch die Integration einer Schwindungsdatenbank in das Expertensystem stehen Erfahrungen für Schwindung und Verzug allgemein zur Verfügung und sind nicht auf wenige Personen beschränkt.

Die Schwindungsangaben in EXINMOLD sind auf konkrete Formteile und Prozessbedingungen bezogen, sodass praxismgerechte Angaben gefunden werden können. Im Gegensatz dazu machen Materialhersteller in ihren Datenblättern meist keine Angaben zum Spritzgießprozess und zur Probekörpergestalt.

Nach Aufruf der Schwindungsdatenbank kann zwischen

„Schwindungsdatenbank-Abfrage“ und

„Schwindungsdatenbank ergänzen“ gewählt werden (Bild 117).

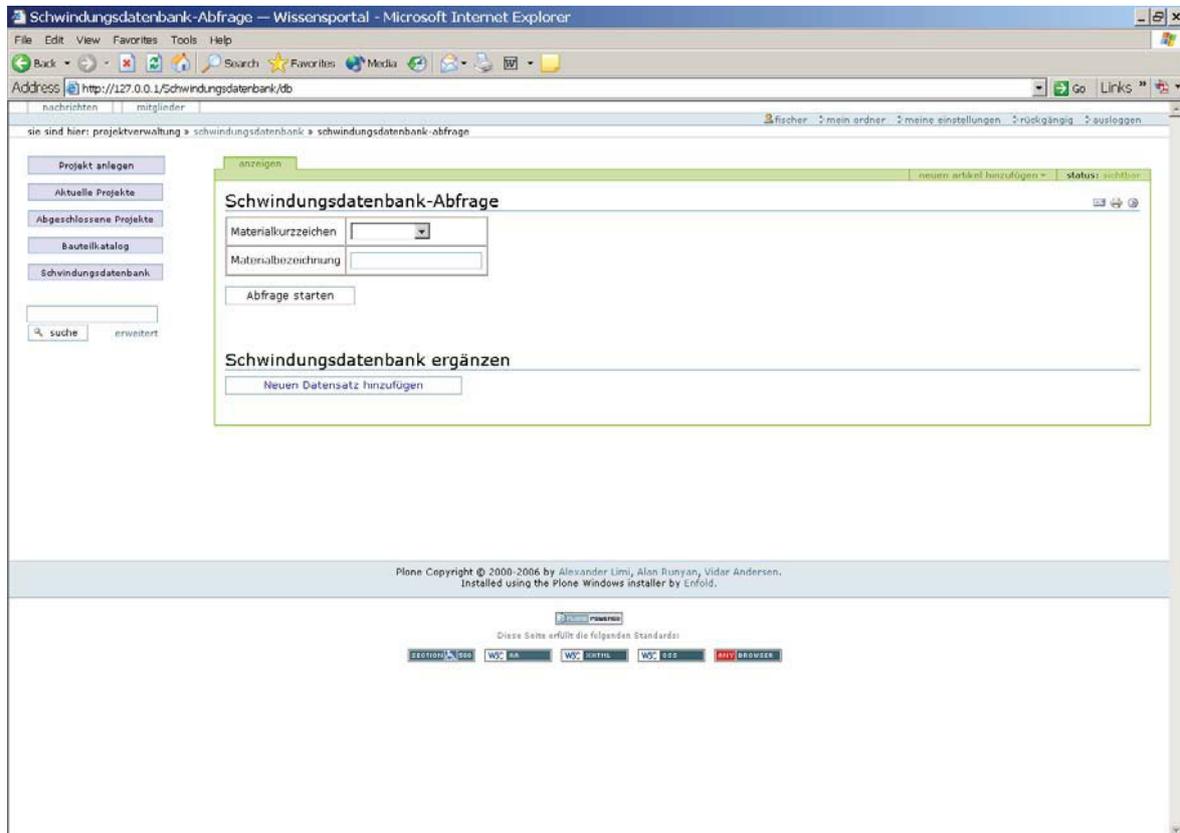


Bild 117: Hauptseite der Schwindungsdatenbank

Schwindungsdatenbank-Abfrage

Die Abfrage von Schwindungsdaten ist auf 2 Arten möglich:

- 1) Abfrage mittels Materialkurzzeichen
- 2) Suche mittels Materialbezeichnung

Suchtreffer werden je nach Abfragestrategie anders angezeigt (Bild 118 bzw. Bild 119). Durch Weiterklicken gelangt der Benutzer letztlich immer auf die Seite „Schwindungsdatenbank-Ergebnisse“ (Bild 119), in der die Daten für das gesuchte Material übersichtlich angegeben werden.

Sind für die Abfragespezifikation keine Schwindungsdaten gespeichert, wird dies ebenfalls durch eine entsprechende Meldung angezeigt.

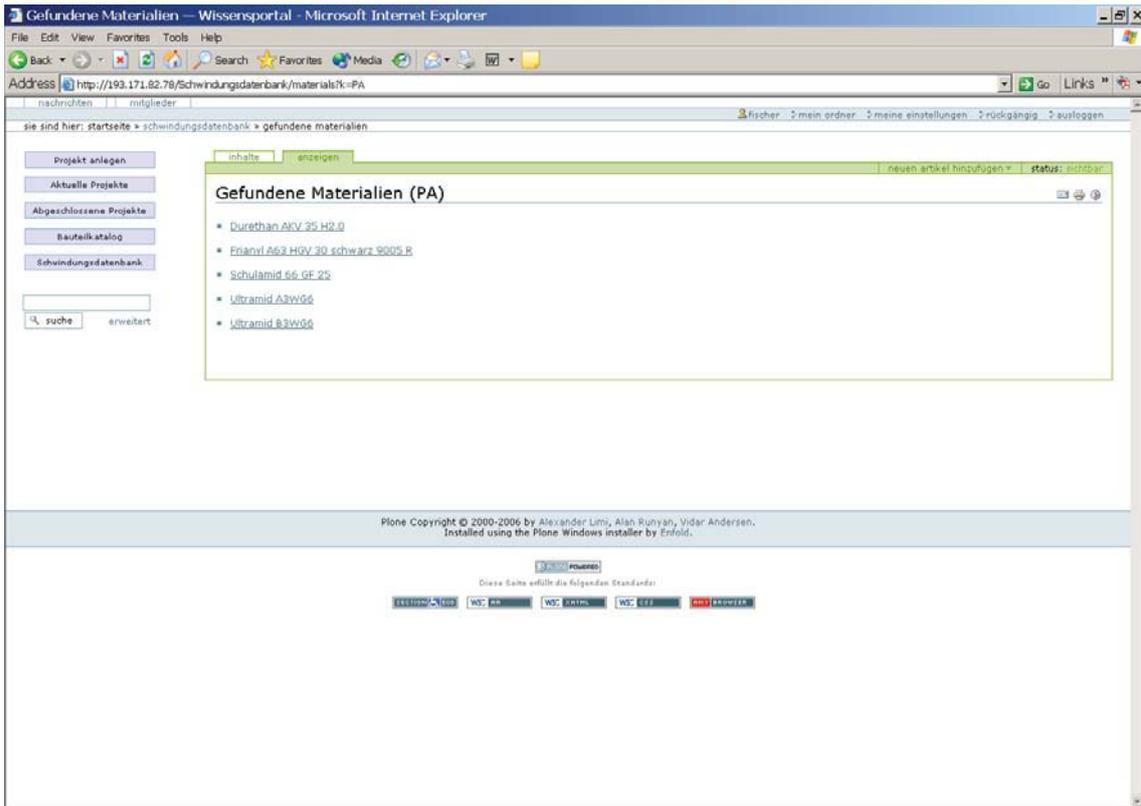


Bild 118: Anzeige der Schwindungsdatenbank-Ergebnisse bei der Suche nach dem Materialkurzzeichen

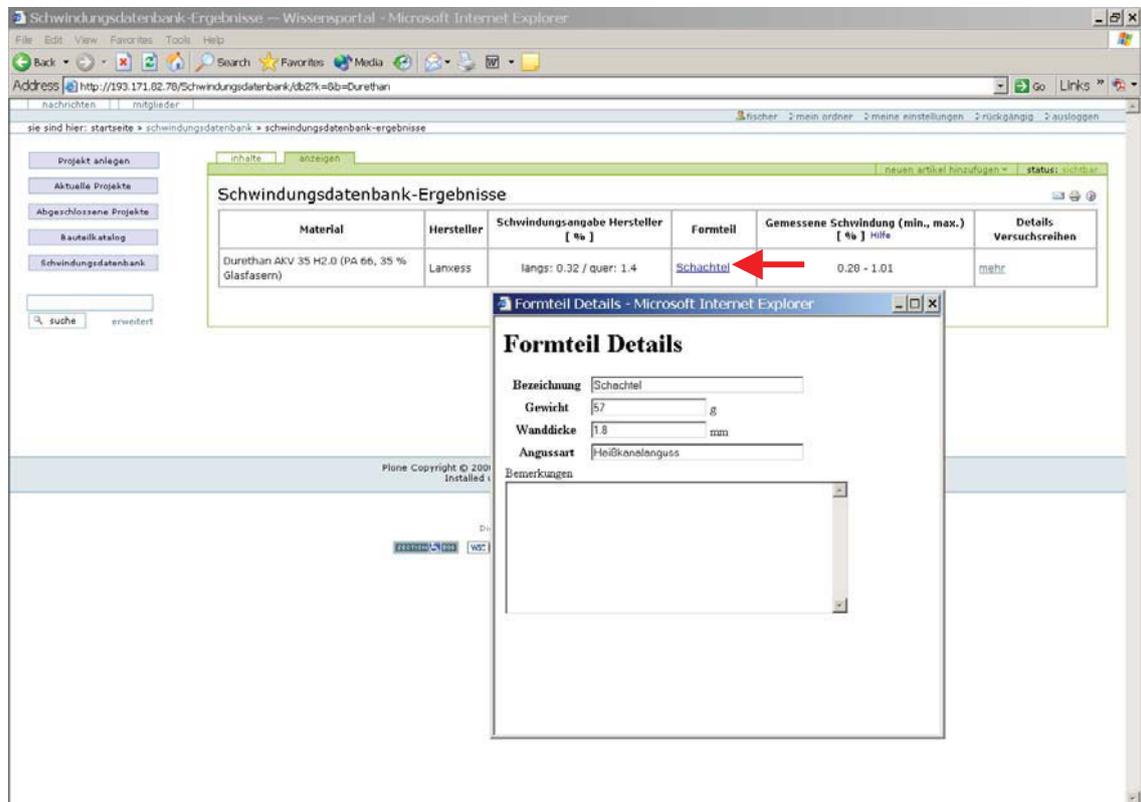


Bild 119: Anzeige der Schwindungsdatenbank-Ergebnisse bei der Suche nach der Materialbezeichnung

Die Schwindungsdatenbank-Ergebnisse werden immer in gleicher Weise dargestellt (Bild 119). Man findet die genaue Materialbezeichnung, den Hersteller, Schwindungsangaben des Herstellers, gemessene Schwindungsdaten und das Formteil, an dem die Schwindungsdaten ermittelt wurden. Zusätzlich können Details zum Formteil anzeigen werden.

Genauere Informationen zu den Versuchsreihen sind in tieferen Ebenen der Schwindungsdatenbank eingetragen. Im dargestellten Fall in Bild 120 sind zum Beispiel 12 Datensätze mit unterschiedlichen Maschineneinstellungen gespeichert. Für jeden Datensatz sind die gemessenen Schwindungen in einer Bandbreite angegeben. Zusätzlich sind die wichtigsten Prozessgrößen angeführt.

Die Schwindungsdaten können für alle Datensätze im Detail abgerufen werden. Schließlich werden am Bildschirm die Verarbeitungsschwindung, Gesamtschwindung (= Verarbeitungsschwindung + Nachschwindung) und Prozessparameter sowie Maschinendaten angezeigt (Bild 121).

In den Tabellen Verarbeitungs- und Gesamtschwindung werden die Schwindungen für die vermessenen Bauteillängen angegeben. Zusätzlich sind der Fließwinkel, die Fließweglänge, die lokale Wanddicke und das Fließweglängen/Wanddickenverhältnis eingetragen, um die lokalen Verhältnisse zu definieren. Es ist möglich, sich eine Bemaßungsskizze mit den Messstellen der einzelnen Schwindungsmaße anzeigen zu lassen (Bild 122).

schwindungsdaten für Formteil Schachtel, Material Durethan AKV 35 H2.0

Versuchsreihe	Schwindung (min., max.) <small>Hilfe</small>	Massetemp.	Werkzeugtemp. düsenseitig	Werkzeugtemp. auswerferseitig	Nachdruckhöhe	Details
	[%]	[°C]	[°C]	[°C]	[bar]	
Datensatz 1	0.42 - 0.9	291.7	80	60	306	mehr
Datensatz 2	0.47 - 0.70	291.7	80	60	204	mehr
Datensatz 3	0.29 - 0.93	291.7	60	40	448	mehr
Datensatz 4	0.34 - 1.01	291.7	60	40	336	mehr
Datensatz 5	0.43 - 0.85	291.7	60	40	224	mehr
Datensatz 6	0.20 - 0.49	283.5	80	60	664	mehr
Datensatz 7	0.33 - 0.67	283.5	80	60	498	mehr
Datensatz 8	0.37 - 0.68	283.5	80	60	332	mehr
Datensatz 9	0.3 - 0.65	283.5	60	40	680	mehr
Datensatz 10	0.35 - 0.71	283.5	60	40	510	mehr
Datensatz 11	0.4 - 0.85	283.5	60	40	340	mehr
Datensatz 12	0.37 - 0.93	291.7	80	60	408	mehr

Plone Copyright © 2000-2006 by Alexander Limi, Alan Runyan, Vidar Andersen.
Installed using the Plone Windows installer by Enfold.

Bild 120: Anzeige der vorhandenen Schwindungsdatensätze für ein gesuchtes Material

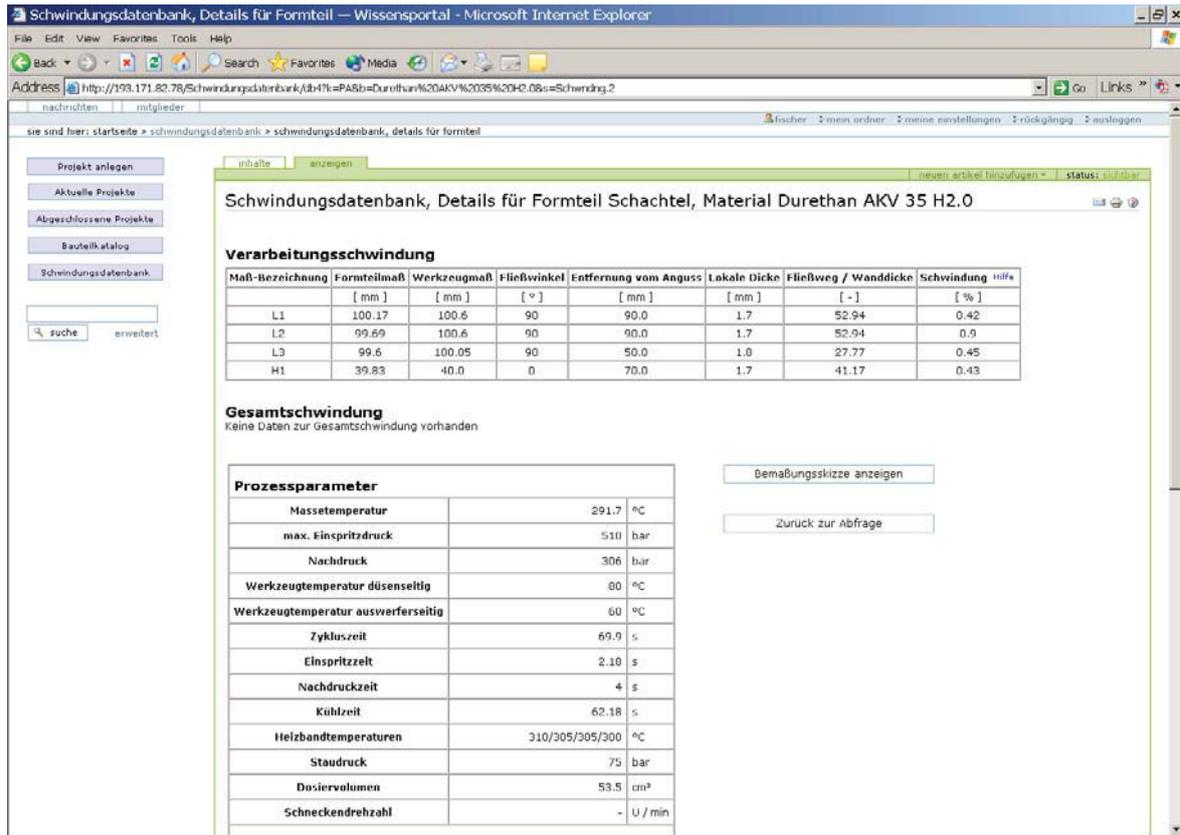


Bild 121: Anzeige der Details zu einem gesuchten Datensatz

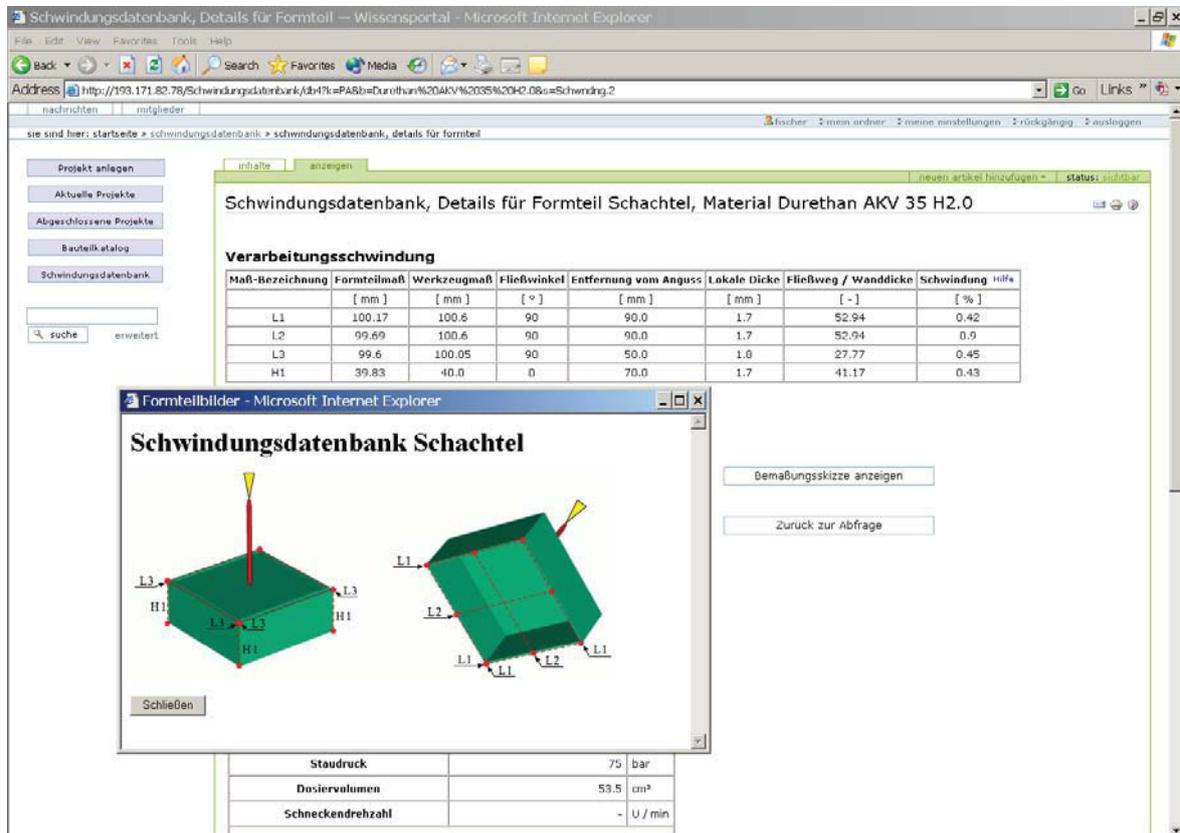


Bild 122: Anzeige der Bemaßungsskizze zu einem Datensatz

Ergänzung der Schwindungsdatenbank mit neuen Daten

Über die Hauptseite der Schwindungsdatenbank können durch den Benutzer neue Schwindungsdatensätze hinzugefügt oder bestehende Datensätze ergänzt werden. Dabei erfolgt zunächst eine Weiterleitung zu dem Formular, in welchem die Materialangaben gemacht werden (Bild 123).

In weiterer Folge führt das System den Benutzer durch alle notwendigen Eingabeschritte bis hin zur Eingabe der Schwindungsdaten (Bild 124). Den letzten Schritt stellt das Speichern von Bemaßungsskizzen dar (Bild 125). Alle Einträge werden über Formulare durchgeführt, die mit Eingabehilfen ausgestattet sind.

The screenshot shows a web browser window with the address bar displaying the URL: http://193.171.82.78/Schwindungsdatenbank/Material_Update. The browser title is "Materialangaben — Wissensportal - Microsoft Internet Explorer". The page content includes a navigation menu on the left with buttons for "Projekt anlegen", "Aktuelle Projekte", "Abgeschlossene Projekte", "Bauteilkatalog", and "Schwindungsdatenbank". The main content area is titled "Materialangaben" and contains the following fields and controls:

- Vorhandenes Material auswählen:** A dropdown menu showing "Durethan AKV 35 H2 0" and an "Auswählen" button.
- Werkstoff Kurzzeichen:** A dropdown menu showing "unbekannt".
- Sonstiges Kurzzeichen:** An empty text input field.
- Handelsname:** An empty text input field.
- Hersteller:** An empty text input field.
- Füllstoff:** A dropdown menu showing "Keine".
- Sonstiger Füllstoff:** An empty text input field.
- Füllstoffgehalt (bezogen auf das Gewicht):** An empty text input field followed by a percentage sign (%).
- Verarbeitungszustand:** Radio buttons for "Unbehandelt" (selected) and "Vorgetrocknet".
- Vortrocknung:** Two empty text input fields, one followed by "h" and the other by "°C".
- Schwindungsangabe des Herstellers:** Two empty text input fields, one followed by a percentage sign (%).
- Bemerkungen:** A large empty text area with a scroll bar.
- Buttons:** "Hinzufügen" and "Abbrechen" at the bottom.

Bild 123: Formular zur Eingabe der Materialangaben

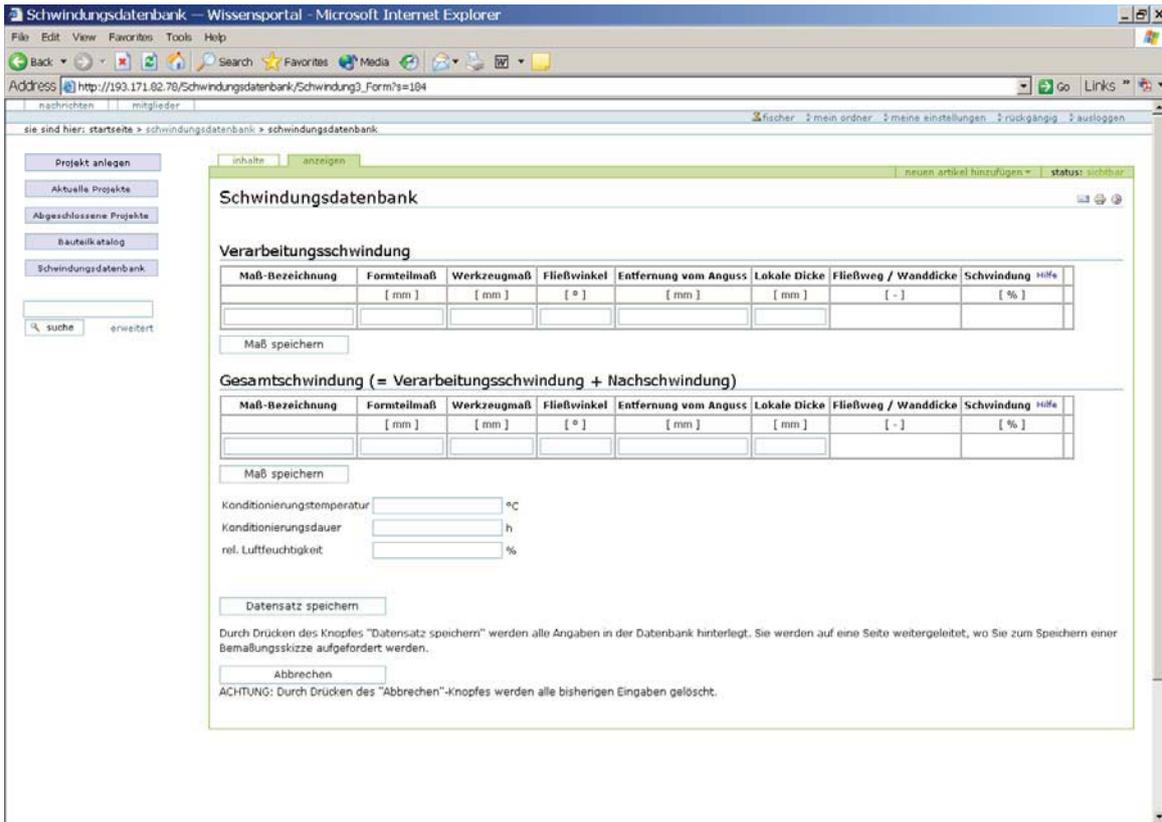


Bild 124: Formular zur Eingabe der Schwindungen

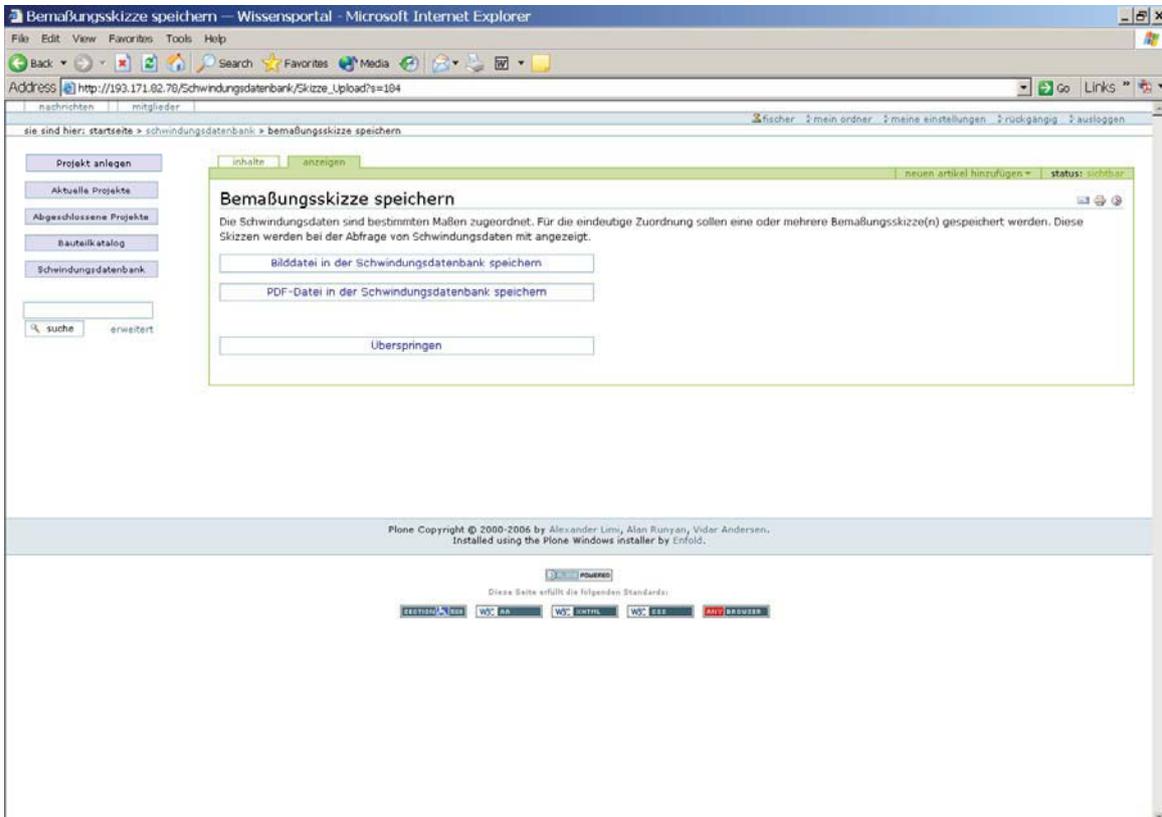


Bild 125: Abspeichern einer Bemaßungsskizze für die eindeutige Zuordnung von Schwindungsmaßen

3D-Werkzeugkonstruktion

Dieser Bereich von EXINMOLD dient dem Werkzeugkonstrukteur zur Entscheidungsunterstützung bei allen Fragestellungen rund um den Werkzeugaufbau (Bild 126).

The screenshot shows a web browser window titled 'Projekt Musterprojekt, Werkzeugkonstruktion - Wissensportal - Microsoft Internet Explorer'. The address bar shows a URL ending in 'werkzeug_konstruktion.html?PO=40'. The page content includes a navigation sidebar on the left with a tree view under 'durchgeführt' and '3D-Werkzeugkonstruktion'. The main area contains a flowchart for '3D-Werkzeugkonstruktion'. The flowchart starts with a box '3D-Werkzeugkonstruktion' leading to a decision diamond 'Zuordnung zu einer Werkzeugfamilie'. From the 'Ja' path, it goes to a box 'Variantenkonstruktion' (with a yellow note 'Mit Hilfe des Formteilkatalogs (35 Formteile)'), then to 'Freie Konstruktion' (with a yellow note 'Konstruktiver Werkzeugaufbau mit Hilfe von Erfahrungswissen und dem hinterlegten Wissens aus dem Expertensystem'). From the 'Nein' path, it goes directly to 'Freie Konstruktion'. Both paths lead to a vertical sequence of process boxes: 'mögliche Entformungslage(n)', 'Schwindungs- und Verzugsberücksichtigung', 'Formnestabmessungen', 'Fachzahl', 'Formnestanordnung', 'Angussystem', 'Entformungssystem', 'Temperiersystem', 'max. Werkzeugabmessungen', 'Werkstoffauswahl', 'Mechanische Auslegung', 'Führung und Zentrierung', 'Entlüftung', 'Maschinenaufspannmöglichkeiten', and 'Weitere Konstruktionskriterien'. At the bottom right, there is a footer: 'Erstellt von: admin, Zuletzt verändert: 2006-04-05 13:35'. At the bottom of the page, there are buttons for 'Abschließen' and 'Irrelevant'.

Bild 126: Programmmodul „3D-Werkzeugkonstruktion“

Hierzu wird umfangreiches Literatur- und Expertenwissen aus den Partnerunternehmen zum Thema Werkzeug zur Verfügung gestellt. Dieses Wissen kann jederzeit vom Benutzer geändert und ergänzt und so am aktuellen Stand der Technik gehalten werden. Die Konstruktionsschritte mit den zugehörigen Informationen sind in einer sinnvollen Reihenfolge angeordnet, die Bild 126 zu entnehmen ist. Die Methoden der Variantenkonstruktion und freien Konstruktion wurden bereits in Kapitel 6 erläutert. Auf die einzelnen Unterpunkte wird hier nicht weiter eingegangen.

Analyse der Werkzeugkonstruktion

In diesem Modul erfolgt die „virtuelle Analyse“ des Werkzeugs bzw. der Werkzeugkonstruktion (Bild 127). In diesem Zusammenhang wird die Werkzeugkonstruktion mit Hilfe unterschiedlicher Methoden, in Hinblick auf die Qualität des zu fertigenden Bauteils, überprüft.

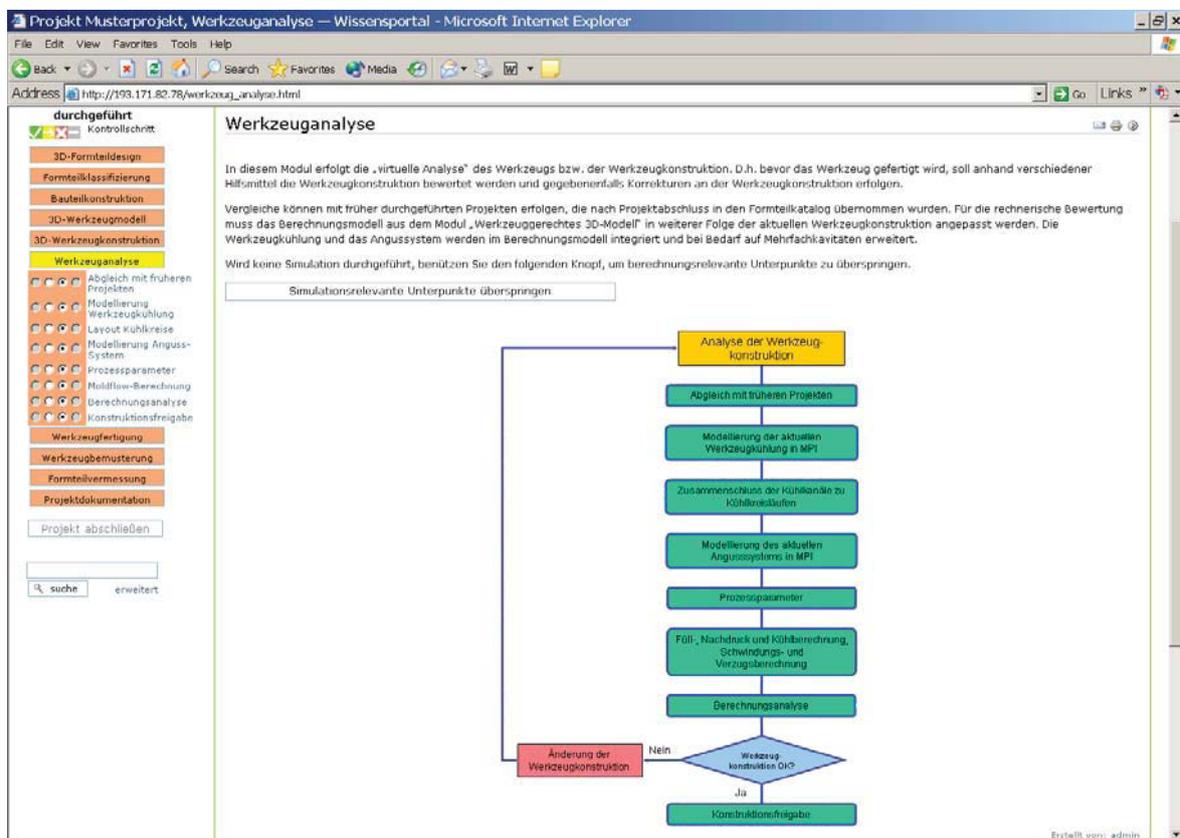


Bild 127: Programmmodul „Analyse der Werkzeugkonstruktion“

Erste Vergleiche können mit früher durchgeführten Projekten erfolgen, die nach Projektabschluss in den Formteilkatalog übernommen wurden. Des Weiteren stützt sich dieses Modul auf die Simulation. Wird keine Simulation durchgeführt, können die zugehörigen Checklistenunterpunkte mit der Schaltfläche „**Simulationsrelevante Unterpunkte überspringen**“ als für das Projekt nicht relevant gekennzeichnet werden.

Wird die Simulation verwendet, so muss das Berechnungsmodell aus dem Modul „Werkzeuggerechtes 3D-Modell“ in weiterer Folge der aktuellen Werkzeugkonstruktion angepasst werden. Alle notwendigen Schritte und Entscheidungshilfen können direkt aus EXINMOLD entnommen werden.

Werkzeugfertigung

Auch die Werkzeugfertigung ist im Expertensystem berücksichtigt (Bild 128). Es wurde die Möglichkeit vorgesehen, Fertigungsdaten über diesen Bereich auf das System zu speichern und zu verwalten. Das Flussdiagramm in Bild 128 zeigt auch die nach der Werkzeugfertigung folgenden Schritte in einem Überblick.

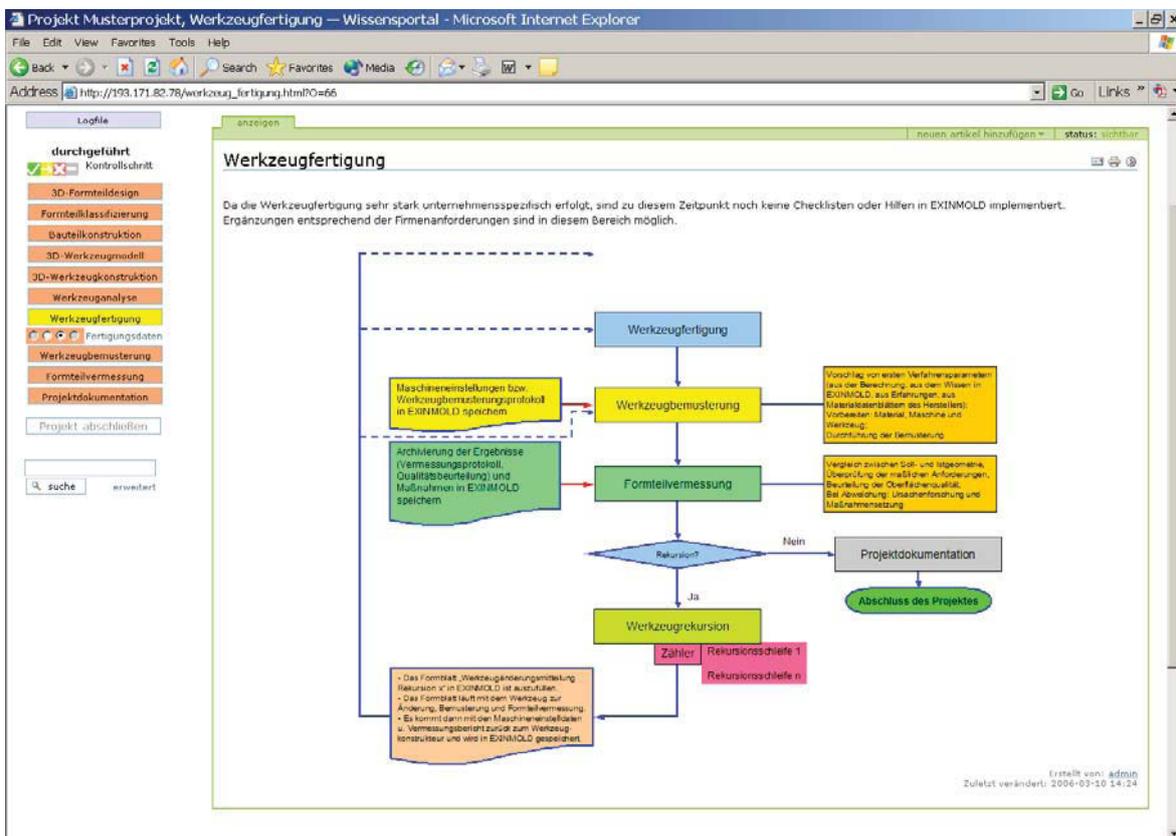


Bild 128: Programmmodul „Werkzeugfertigung“ mit Darstellung von „Werkzeugbemusterung“, „Formteilvermessung“ und „Werkzeugrekursion“

Werkzeugbemusterung

In diesem Modul werden Checklisten und Anhaltswerte für den Maschineneinrichter bereit gestellt (Bild 129). Ein entsprechender Vorschlag für die Maschineneinstellgrößen kann ausgedruckt werden. Um bei der Abmusterung eine strukturierte Vorgehensweise zu ermöglichen, wurden zusätzlich wichtige Schritte in einer Bemusterungscheckliste dokumentiert. Diese Checkliste steht ebenfalls zum

Ausdrucken zur Verfügung und kann an den Maschineneinrichter weitergeleitet werden.

Die letztlich aktuellen Maschinendaten nach dem Erzielen von Gutteilen sind in Form eines Spritzgießprotokolls wieder in das Expertensystem zurückzuführen.

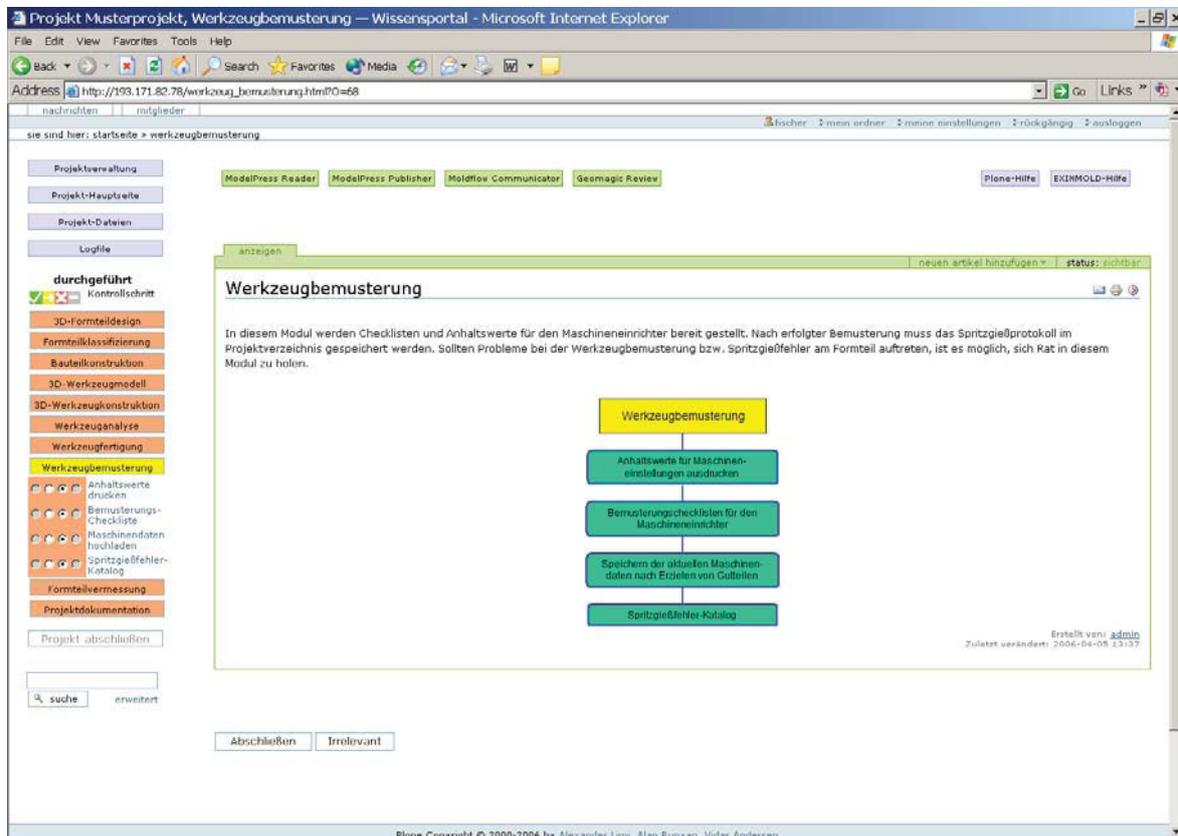


Bild 129: Programmmodul „Werkzeugbemusterung“

Ein Spritzgießfehler-Katalog bietet Lösungsvorschläge zu verschiedenen Problemen beim Spritzgießen an. Über den entsprechenden Checklistenunterpunkt kann das Inhaltsverzeichnis des Kataloges aufgerufen werden (Bild 130).

Mögliche Spritzgießfehler und deren Behebungsmöglichkeiten sind im Expertensystem als pdf-Files abgespeichert. Das Inhaltsverzeichnis ist wie folgt gegliedert:

- Dimension
- Entformungsverhalten
- Farbe
- Glanz
- Mechanische Eigenschaften
- Oberflächenfehler
- Schlieren oder Streifen
- Stippen oder Punkte
- Unebenheiten
- Verarbeitung

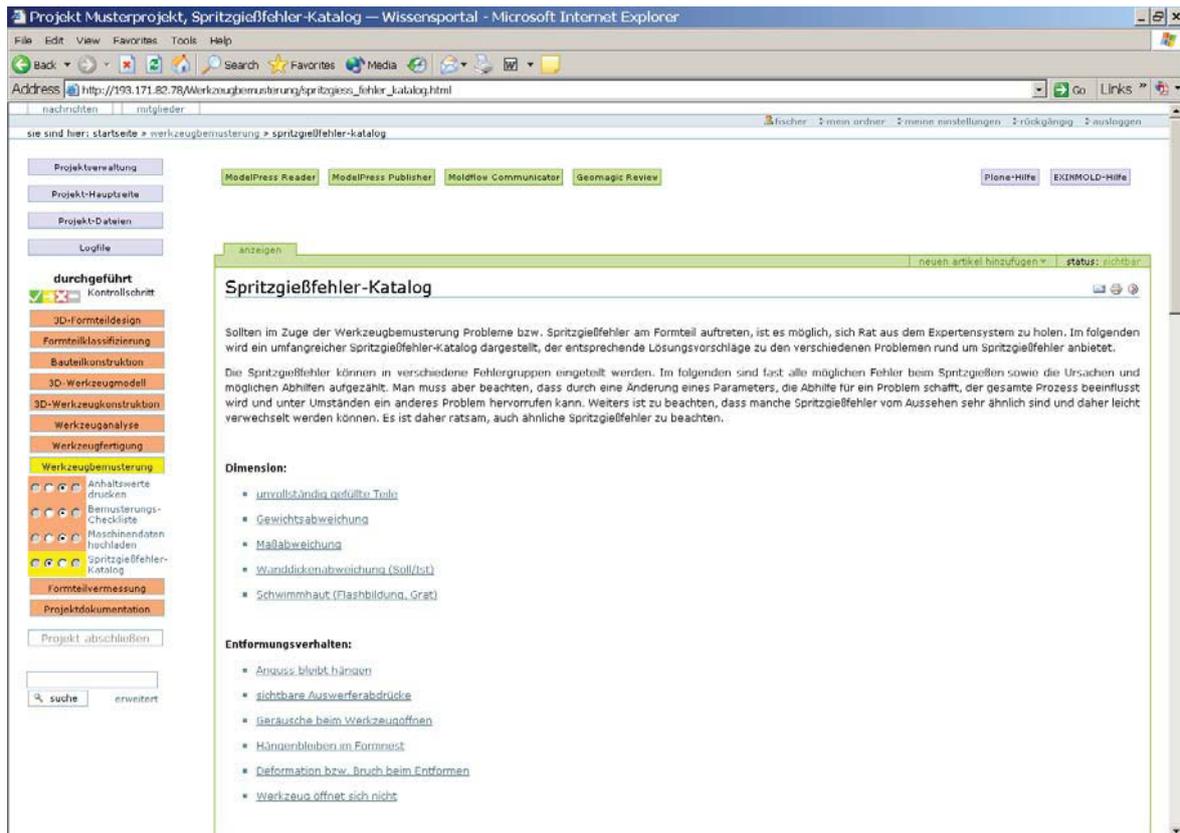


Bild 130: Checklistenunterpunkt „Spritzgießfehler-Katalog“

Formteilvermessung

Die Qualitätsüberprüfung der Formteile ist der nächste Schritt, der durch das Expertensystem unterstützt wird. Die Ergebnisse der Formteilvermessung werden über den Checklistenunterpunkt „Vermessungsprotokoll speichern“ in EXINMOLD eingegeben (Bild 131).

Das Projektteam muss sich im Falle von Abweichungen für adaptierende Änderungsmaßnahmen entscheiden und im Sinne des Expertensystems eine Rekursionsschleife einleiten. In EXINMOLD wird eine Rekursionsschleife anhand des Checklistenunterpunktes „Rekursion notwendig“ eingeleitet (Bild 132). Wenn in diesem Checklistenunterpunkt auf den Knopf „Ja“ geklickt wird, wird das Modul „Rekursion“ am Bildschirm hinzugefügt (Bild 133).

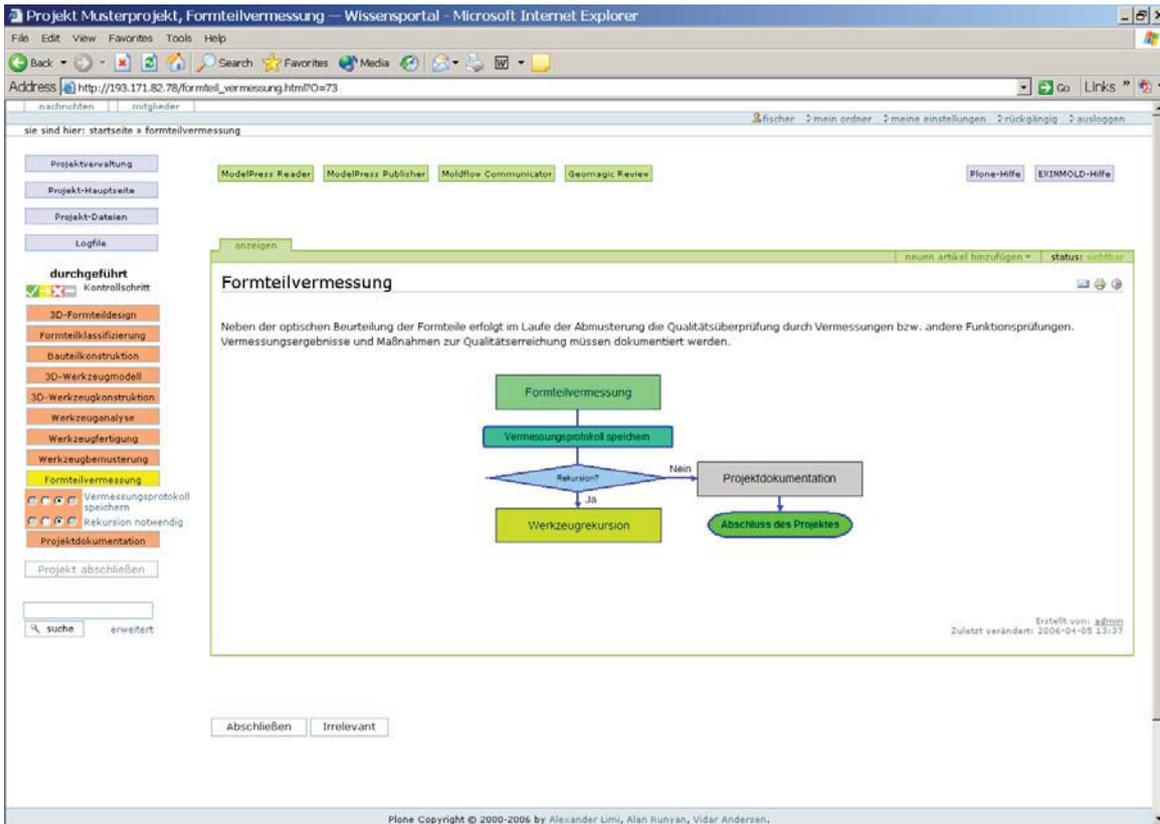


Bild 131: Programmmodul „Formteilvermessung“ mit Darstellung von „Werkzeugrekursion“ und „Projektdokumentation“

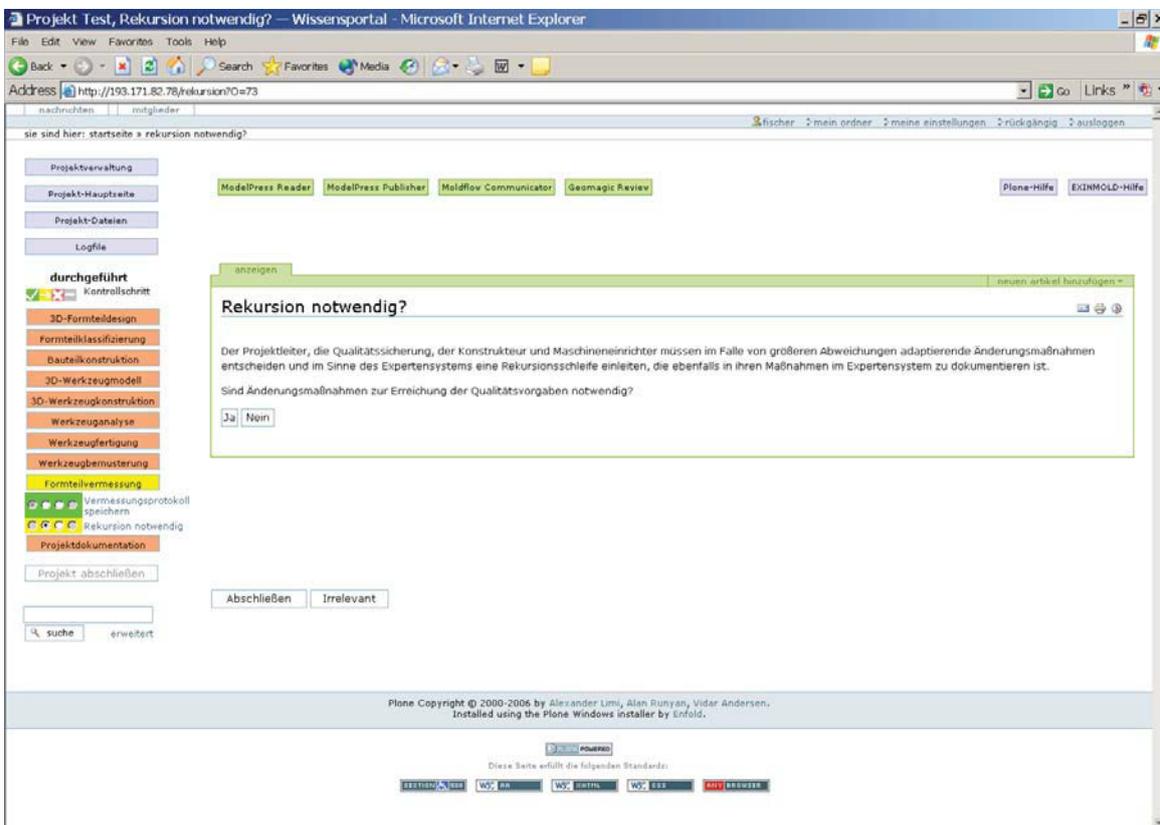


Bild 132: Einleiten einer Rekursionschleife in EXINMOLD

Werkzeugrekursion

Die Werkzeugrekursion muss in ihren Maßnahmen im Expertensystem dokumentiert werden (Bild 133). Änderungen können dabei unterschiedlicher Natur sein. Im einfachsten Fall werden erneut Abmusterungen mit veränderten Prozessparametern oder einem anderen Material durchgeführt. Die weitaus komplizierteren Änderungen sind Adaptierungen am Werkzeug oder sogar am Formteildesign. Die notwendigen Änderungen werden in einem Formblatt eingetragen (Bild 134). Für jede Rekursionsschleife wird von EXINMOLD ein separates Formblatt mit den vorhergehenden Änderungen ausgegeben. Gleichzeitig erfolgt eine automatische Nummerierung der Änderungsschleifen.

Die konstruktiven Änderungen werden im Checklistenunterpunkt „Änderungen speichern“ dokumentiert. Diese Dokumentation stellt wichtige Hinweise für die Kostenkontrolle zur Verfügung. Des Weiteren stellen diese Informationen eine wertvolle Unterstützung für die Entwicklung weiterer Werkzeuge dar.

Durch das Einleiten einer Werkzeugrekursionsschleife werden mehrere zuvor bereits abgeschlossene Checklistenunterpunkte in ihrem Bearbeitungsstatus zurückgesetzt (Checklistenunterpunkte werden von grün oder grau auf rot zurückgesetzt). Auf diesem Wege wird signalisiert, dass zum Beispiel ein neues Spritzgießprotokoll oder ein Vermessungsbericht für die entsprechende Rekursionsschleife gespeichert werden muss.

Bild 133: Programmmodul „Werkzeugrekursion“

Projekt Musterprojekt, Formblatt Werkzeugänderungen — Wissensportal - Microsoft Internet Explorer

File Edit View Favorites Tools Help

Address http://193.171.82.78/formblatt_werkzeug_aenderungen?O=76

sie sind hier: startseite > formblatt_werkzeug_aenderungen

Projektverwaltung
Projekt-Hauptseite
Projekt-Dateien
Logfile

durchgeführt
Kontrollschritt

3D-Formteildesign
Formteilklassifizierung
Bauteilkonstruktion
3D-Werkzeugmodell
3D-Werkzeugkonstruktion
Werkzeuganalyse
Werkzeugfertigung
Werkzeugbemusterung
Formteilvermessung
Rekursion
Projektdokumentation

Projekt abschließen

suche erweitert

ModelPress Reader ModelPress Publisher Moldflow Communicator Geomagic Review Plone-Hilfe EXINMOLD-Hilfe

anzeigen neuen artikel hinzufügen

Formblatt Werkzeugänderungen

Projektbezeichnung: Musterprojekt

Werkzeug: Änderungsindex: 1

Bauteilbezeichnung:

Änderungsauslöser (Person):

Änderungsgrund:

Die Bemusterung wurde unter nicht optimierten Bedingungen durchgeführt.

Einzelheiten der durchzuführenden Änderungen:

Werkzeugtemperatur auf 55°C reduzieren. Einspritzgeschwindigkeitsprofil optimieren

	Name	Abteilung	Datum
Werkzeugänderung ausgefüllt von:	<input type="text" value="Mustermann"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Werkzeugänderung genehmigt von:	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Werkzeugänderung durchgeführt von:	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Werkzeugänderung überprüft von:	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Werkzeugfreigabe von:	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

Plone Copyright © 2000-2006 by Alexander Limj, Alan Runyan, Vidar Andersen.
Installed using the Plone Windows installer by Enfold.

Bild 134: Beispiel eines Werkzeugänderungs-Mitteilungsblattes

Projektdokumentation

In der Projektdokumentation (Bild 135) werden alle bisher noch nicht erfassten Daten gespeichert. Im Checklistenunterpunkt „Werkzeugdokumentation“ sollen die Konstruktionsdaten des Werkzeugs gespeichert werden. Daneben sollen auch das Heizungsschema (Heißkanalanguss), der Kühlplan sowie der Instandhaltungs- bzw. Wartungsplan gespeichert werden.

Die letztendliche Werkzeugfreigabe erfolgt durch die Qualitätssicherung und ist ebenfalls im System zu dokumentieren. Durch die strikte Dokumentation an den entsprechenden Platzhaltern kann mit der Werkzeugfreigabe aus den LOG-Files ein Projektbericht ausgegeben werden (Bild 137). Bevor der Projektbericht erstellt wird, sollen alle vorhergehenden Checklistenunterpunkte bearbeitet worden sein und die Module den Status „abgeschlossen“ (grün) haben (Bild 136).

Projekt Musterprojekt, Projektdokumentation — Wissensportal - Microsoft Internet Explorer

Address: http://193.171.82.78/projekt_dokumentation.html?ID=79

sie sind hier: startseite > projektdokumentation

Projektverwaltung
Projekt-Hauptseite
Projekt-Dateien
Logfile

durchgeführt
Kontrollschritt
3D-Formteildesign
Formteilklassifizierung
Bauteilkonstruktion
3D-Werkzeugmodell
3D-Werkzeugkonstruktion
Werkzeuganalyse
Werkzeugfertigung
Werkzeugmusterung
Formteilvermessung
Rekursion
Projektdokumentation
Werkzeugdokumentation
Werkzeugfreigabe
Projektbericht

Projekt abschließen

suche erweitert

Abschließen Irrelevant

Projektdokumentation

Wird die Qualität der Musterbauteile, die unter Serienbedingungen produziert werden sollen, vom Auftraggeber akzeptiert, so kann das Projekt in EXINMOLD dokumentiert und abgeschlossen werden.

Projektdokumentation
↓
Werkzeugdokumentation
↓
Werkzeugfreigabe
↓
Projektbericht
↓
Abschluss des Projektes

Erstellt von: admin
Zuletzt verändert: 2006-04-05 13:30

Plone Copyright © 2000-2006 by Alexander Limi, Alan Runyan, Vidar Andersen.
Installed using the Plone Windows installer by Enfold.

Bild 135: Programmmodul „Projektdokumentation“

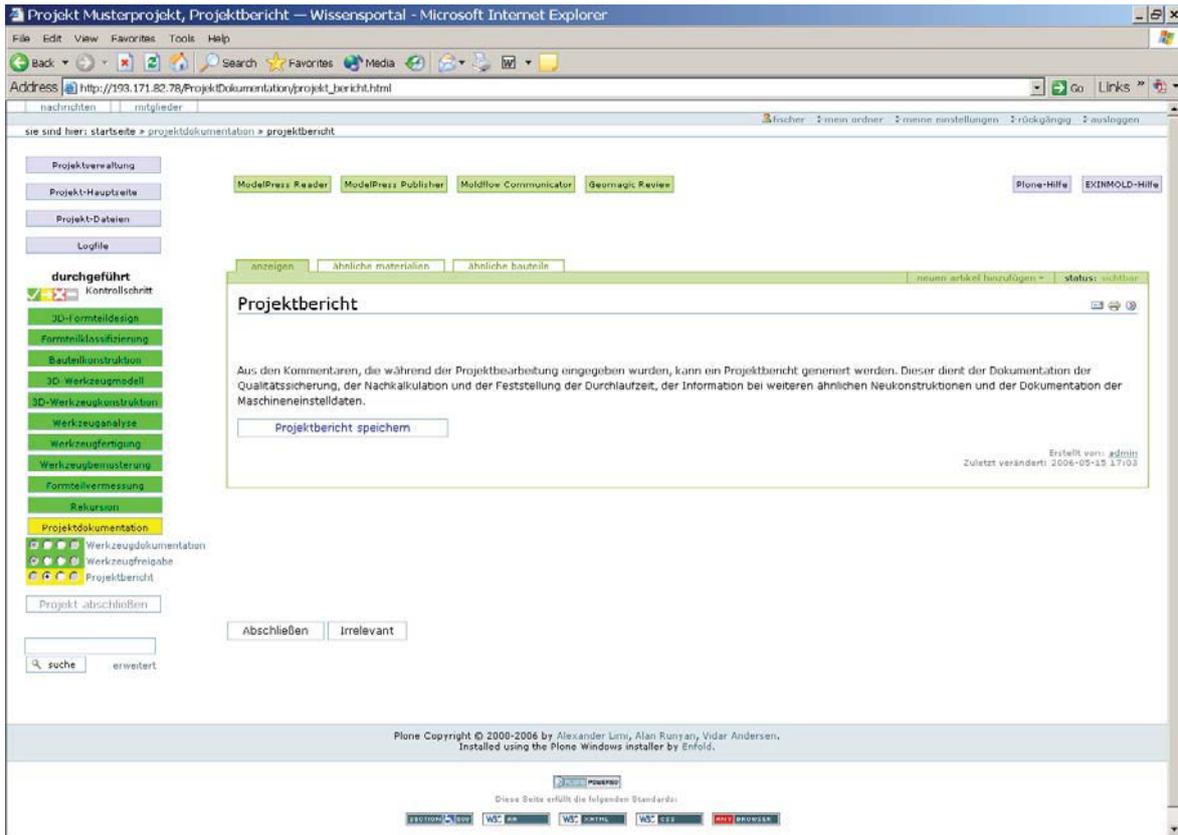


Bild 136: Checklisten-Unterpunkt „Projektbericht“

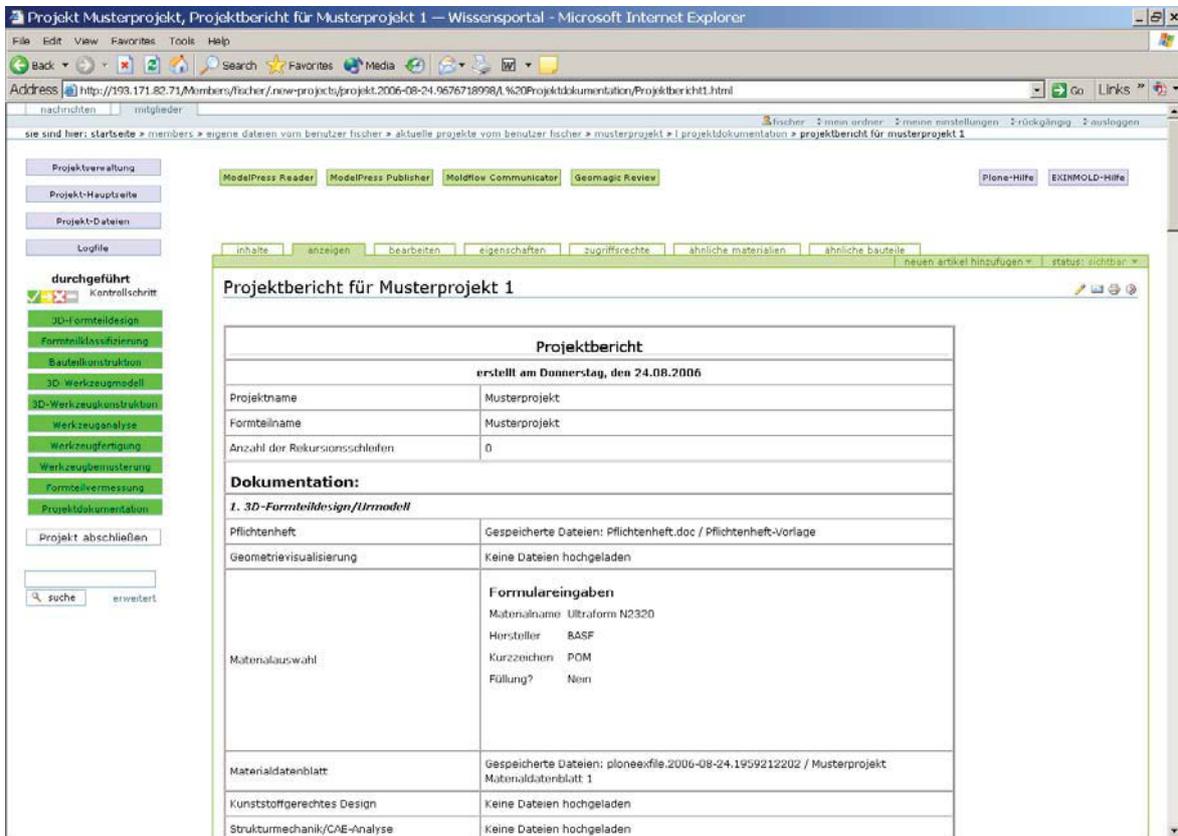


Bild 137: Beispiel eines Projektberichtes

Projektabschluss

Ein Projekt kann abgeschlossen werden, wenn alle Checklistenunterpunkte in allen Modulen entweder abgeschlossen (grün) oder auf irrelevant (grau) gesetzt wurden. Wenn dies zutrifft, wird die Schaltfläche „Projekt abschließen“ vom Programm freigegeben (Bild 138).

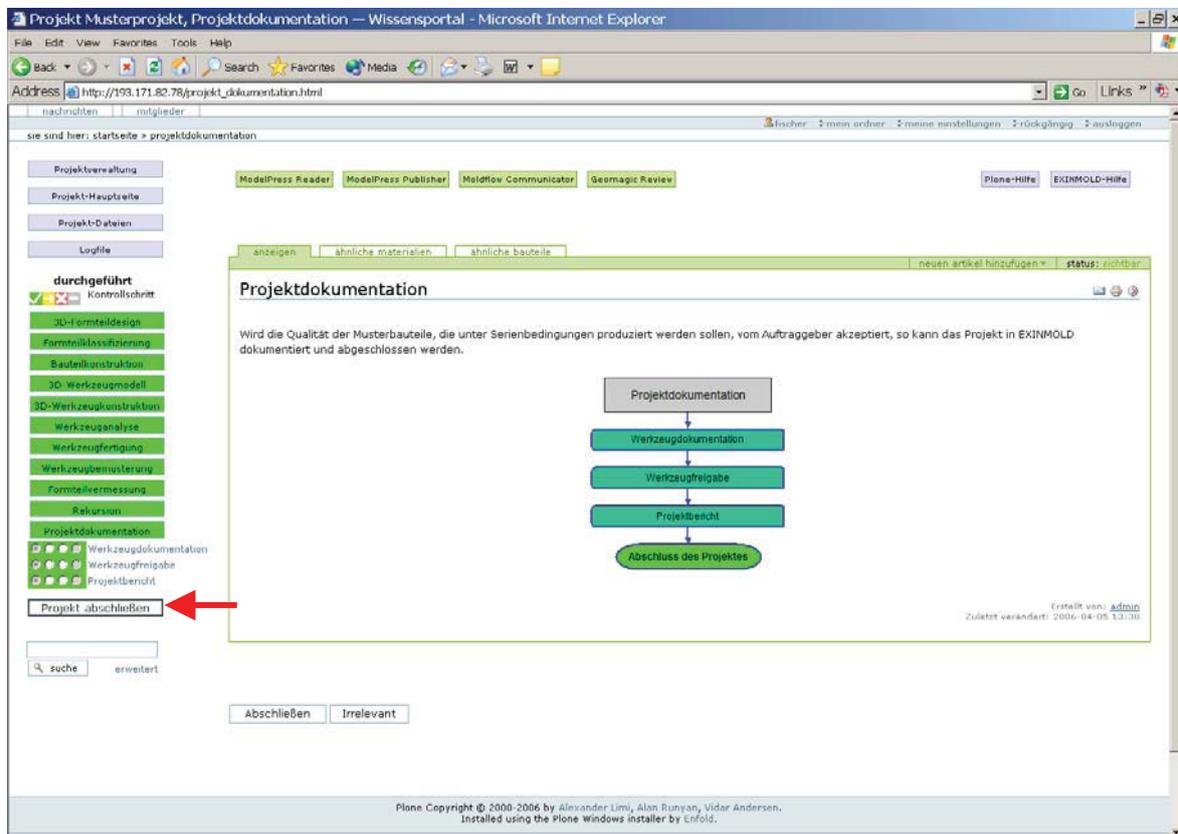


Bild 138: Abschließen eines Projektes

Nach dem Abschließen werden alle Projektdaten dauerhaft in die Datenbank von EXINMOLD übergeben. Ab diesem Zeitpunkt steht das Projekt im Verzeichnis „Abgeschlossene Projekte“ (siehe Bild 100) zur Verfügung. Bei der Bearbeitung der folgenden Projekte wird dieses automatisch in die Projektbearbeitung mit einbezogen und steht programmintern als Erfahrungswissen zur Verfügung.

Ergänzung der Wissensbasis von EXINMOLD

Benutzer des Programms haben die Möglichkeit, Erfahrungen bzw. Firmenwissen in bestimmten Modulen bzw. Unterpunkten von Checklisten einzubinden. Diese Module sind:

- Überprüfung der Bauteilkonstruktion
- 3D-Werkzeugkonstruktion
- Werkzeugbemusterung (Unterpunkt „Spritzgießfehler-Katalog“)

In den Unterpunkten der genannten Module ist Literatur- und Erfahrungswissen hinterlegt. Auf den entsprechenden Seiten befindet sich im unteren Bildschirmbereich jeweils ein Link mit der Bezeichnung „Firmen-Inhalte“ (z.B. Unterpunkt Fachzahl, Bild 139). Bei einem Klick auf diesen Link wird der Benutzer auf die entsprechende Seite weitergeleitet, in der der jeweilige Inhalt von EXINMOLD ergänzt werden kann (z.B. Seite „fachzahl.html“, Bild 140). Für die Bearbeitung, Einbindung und Formatierung der Inhalte ist ein eigener Editor vorhanden (Bild 141).

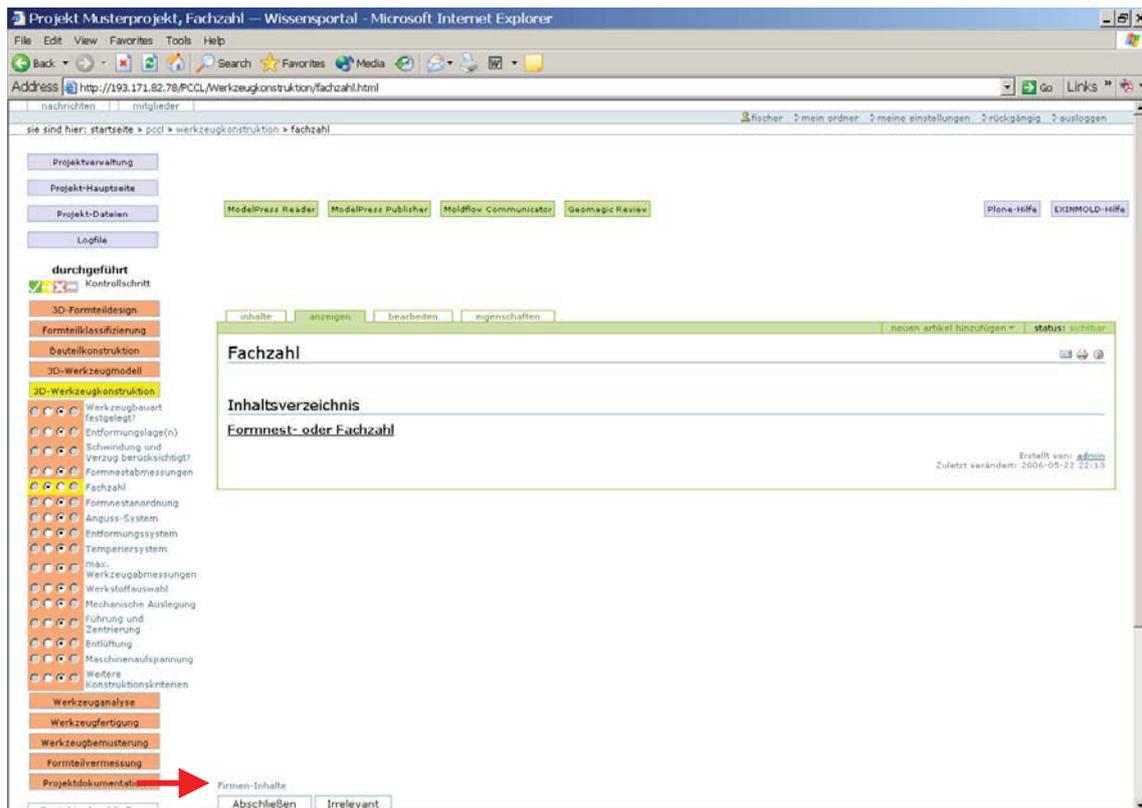


Bild 139: Unterpunkt „Fachzahl“ mit dem Link zu den Firmeninhalten

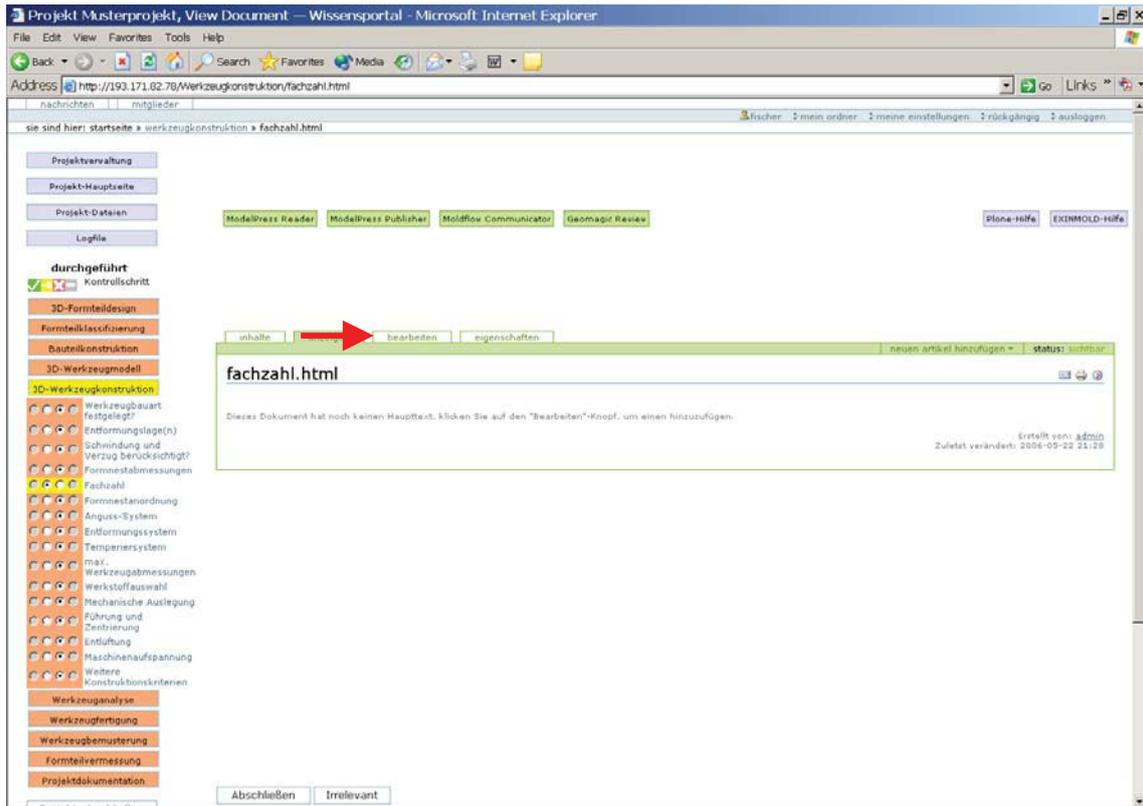


Bild 140: Seite „fachzahl.html“ zur Ergänzung von EXINMOLD mit Firmenwissen

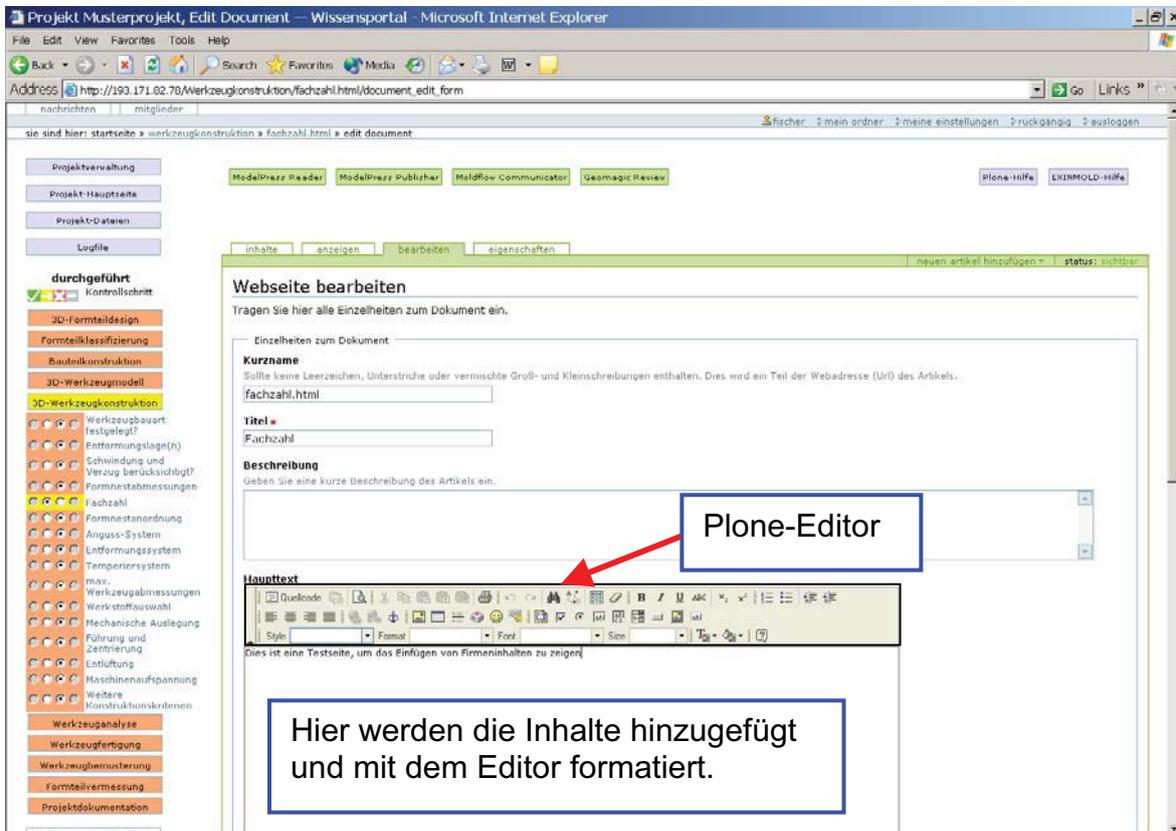


Bild 141: Plone-Editor für das Bearbeiten und Hinzufügen von Inhalten