

# HANSER



Leseprobe

## Handbuch Urformen

Herausgegeben von Günter Spur  
Mitherausgeber Walter Michaeli, Andreas Bührig-Polaczek

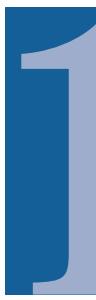
ISBN (Buch): 978-3-446-42035-9

ISBN (E-Book): 978-3-446-43406-6

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-42035-9>

sowie im Buchhandel.



mation (Temperatur/Geschwindigkeit/Druck/Spannung/Verschiebung etc.) vorliegt. Die Auflösung der Vernetzung hängt daher von den Anforderungen der Physik und der gewünschten Informationsdichte ab. So sollten in dem Querschnitt einer Wand mindestens drei Elemente vorliegen, um überhaupt z. B. eine dreidimensionale Strömung rechnen zu können.

Die Auswahl des numerischen Verfahrens beziehungsweise des Netztyps ist immer ein Kompromiss aus den Anforderungen an Berechnungsqualität, Möglichkeit zur automatischen Vernetzung, numerischer Stabilität und den akzeptierten Rechenzeiten.

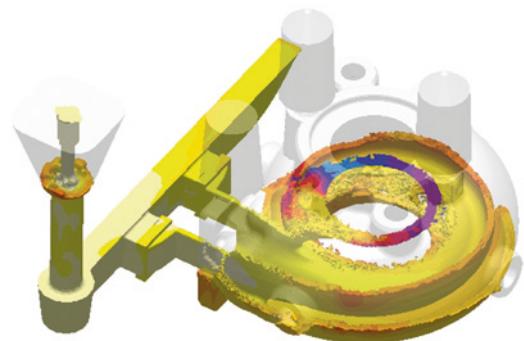
Die Lösung der beschriebenen Gleichungen auf dem jeweiligen Netz führt zu Basisinformationen zu jedem Zeitpunkt und an jedem Ort, die Grundlage für weitere Auswertungen mit Hilfe von Kriteriumsfunktionen oder erweiterten Modellen sind.

## 1.8.3 Prozessbeschreibung

### 1.8.3.1 Die Basis des Verfahrens - Formfüllung und Erstarrung

Ausgangspunkt und auch immer noch vielfach Kern der Gießprozess-Simulation ist die Wärmeflussrechnung für Gussteil und Form, um den Erstarrungsablauf im Teil vorherzusagen. Aus dem Namen des Verfahrens „Gießen“ wird offensichtlich, dass neben der Erstarrung und Abkühlung des Gusseisels die Formfüllung ein entscheidender Teilprozess und daher auch eine unverzichtbare Grundlage für zuverlässige Simulationen ist. Dies betrifft nicht nur die Auslegung von Gießsystemen oder die Ermittlung von formfüllbedingten Gießfehlern. Vielmehr ist die inhomogene Temperaturverteilung, die sich nach der Formfüllung in der Schmelze einstellt, in vielen Fällen entscheidend für den Erstarrungsablauf des Gussteils (Abb. 1.489).

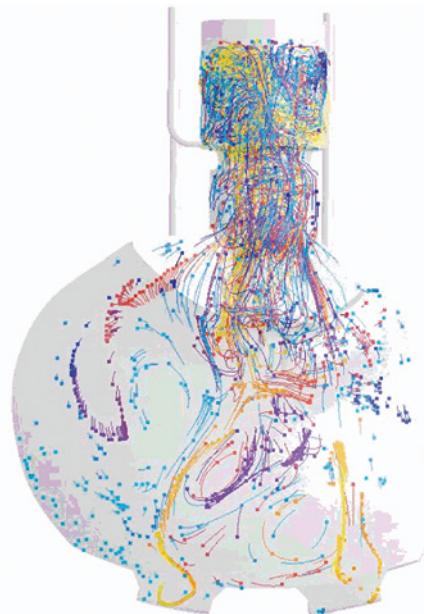
Die Dynamik der Formfüllung wird bis heute von Praktikern unterschätzt. Vielfach wird von „beruhigtem Füllen“ oder „laminarem Strömen“ gesprochen. Physikalisch sind alle Formfüllvorgänge von Sandguss bis hin zum Druckguss hochturbulente Strömungsvorgänge. Dies liegt an den rheologischen Eigenschaften metallischer Schmelzen. Die kinetische Energie, die eine einfließende Schmelze im Gießsystem auch bei Schwerkraftguss durch die Schwerkraft enthält, ist so hoch, dass sie allein durch gießtechnische Maßnahmen nicht umgewandelt werden kann. Die Simulation macht deutlich, dass trotz einer relativ ruhig steigenden Schmelzbadoberfläche im Volumen



**Abb. 1.489:** Vorhersage des Strömungsverlaufs für ein Sandgussteil in Gusseisen mit Kugelgraphit (GJS) verbunden mit der Abkühlung der Schmelze erlaubt die robuste Auslegung des Gießsystems. Neben Temperaturen werden Strömungsgeschwindigkeiten und Druckverhältnisse zu jedem Zeitpunkt quantitativ angezeigt (Quelle: von Roll Castings, Schweiz).

immer starke Turbulenzen und Verwirbelungen auftreten. In Gussteilen mit großen Wandstärken oder langen Erstarrungszeiten können sich darüber hinaus Konvektionsströmungen aus temperaturbedingten Dichteunterschieden in der Schmelze entwickeln, die zu Seigerungen führen (Abb. 1.490).

Strömungssimulation liefert zunächst quantitative Informationen über Geschwindigkeiten und Drücke sowie Temperaturen. So kann die Frage nach drucklosen oder druckgesteuerten Gießsystemen quantitativ beantwortet

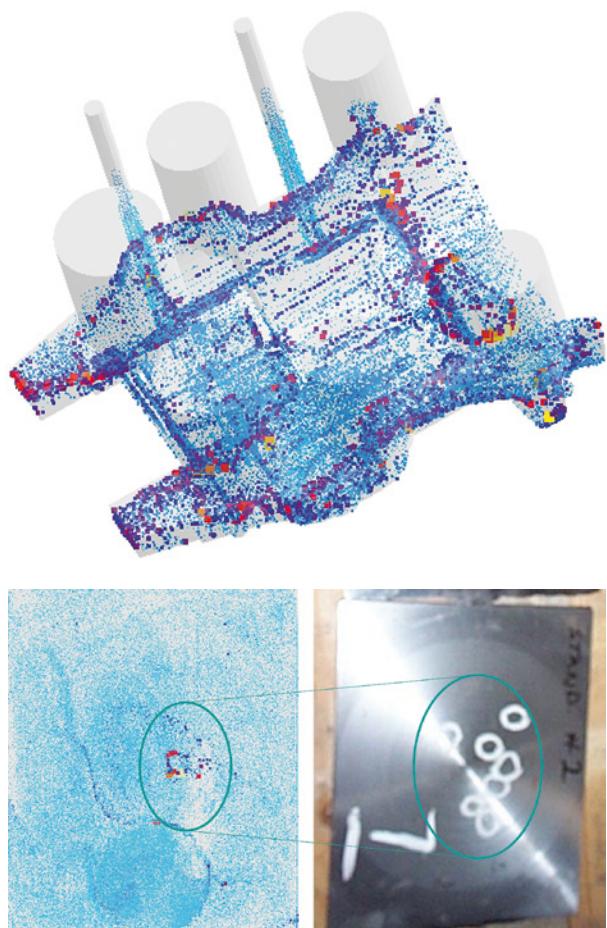


**Abb. 1.490:** Durch die niedrige Viskosität von metallischen Schmelzen und die hohe Dichte hat das strömende Metall eine so hohe Energie, die zu Turbulenzen führt. Diese Effekte können mit Hilfe von kleinen virtuellen Teilchen dargestellt werden. (Quelle: Voith Paper, Brasilien).

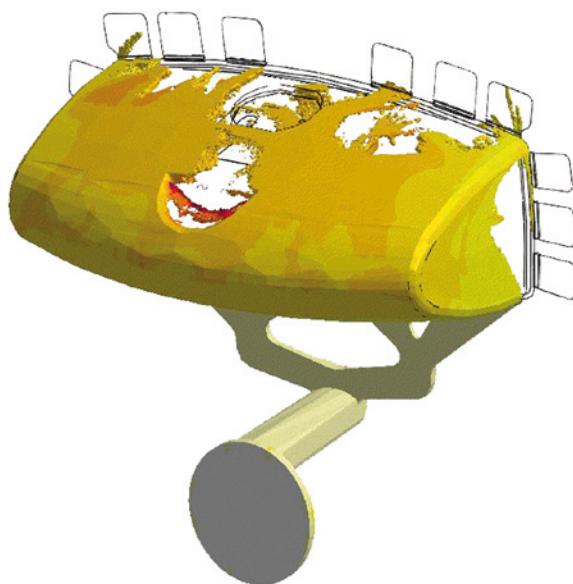
werden. Kritische Geschwindigkeiten (wie z. B. für Aluminium 0,5 m/s) sind sofort sichtbar. Formfüllsimulation zeigt das Abkühlverhalten von Schmelzen bis hin zur Vorerstarrung (Kaltlauf) auf. Darüber hinaus werden die Verdrängung der Luft im Formhohlraum und Lufteinschlüsse in der Schmelze vorhergesagt (Abb. 1.491). Damit stehen quantitative Kriterien für die Auslegung robuster Gießsysteme und zum Erkennen potenzieller Gießfehler frühzeitig zur Verfügung.

Viele Gießfehler resultieren aus Strömungsvorgängen, die unterhalb der Schmelzeoberfläche stattfinden oder aus Reaktionen zwischen Schmelze und Formstoff in Verbindung mit metallurgischen Vorgängen (Formstofffehler, Lufteinschlüsse, Oxyde, Schlacke/Dross), (Abb. 1.492).

Die Erstarrungssimulation hat sich weit über eine reine Wärmeflussrechnung hinaus entwickelt. Kriteriumsfunktionen zur Bewertung des Erstarrungsverhaltens beruhen auf Informationen aus der Erstarrungssimulation und geben dem Gießer erste Hinweise auf die Qualität seines Prozesses. Sobald eine dreidimensionale Geometrie des Gussteils vorliegt, lässt sich das grundsätzliche Erstarrungs- und Abkühlverhalten des Teils in einer Form in Minuten ermitteln. Informationen über Wärmezentren und Resterstarrungsbereiche helfen dem Gießer in der Arbeitsvorbereitung aber auch dem Konstrukteur zur

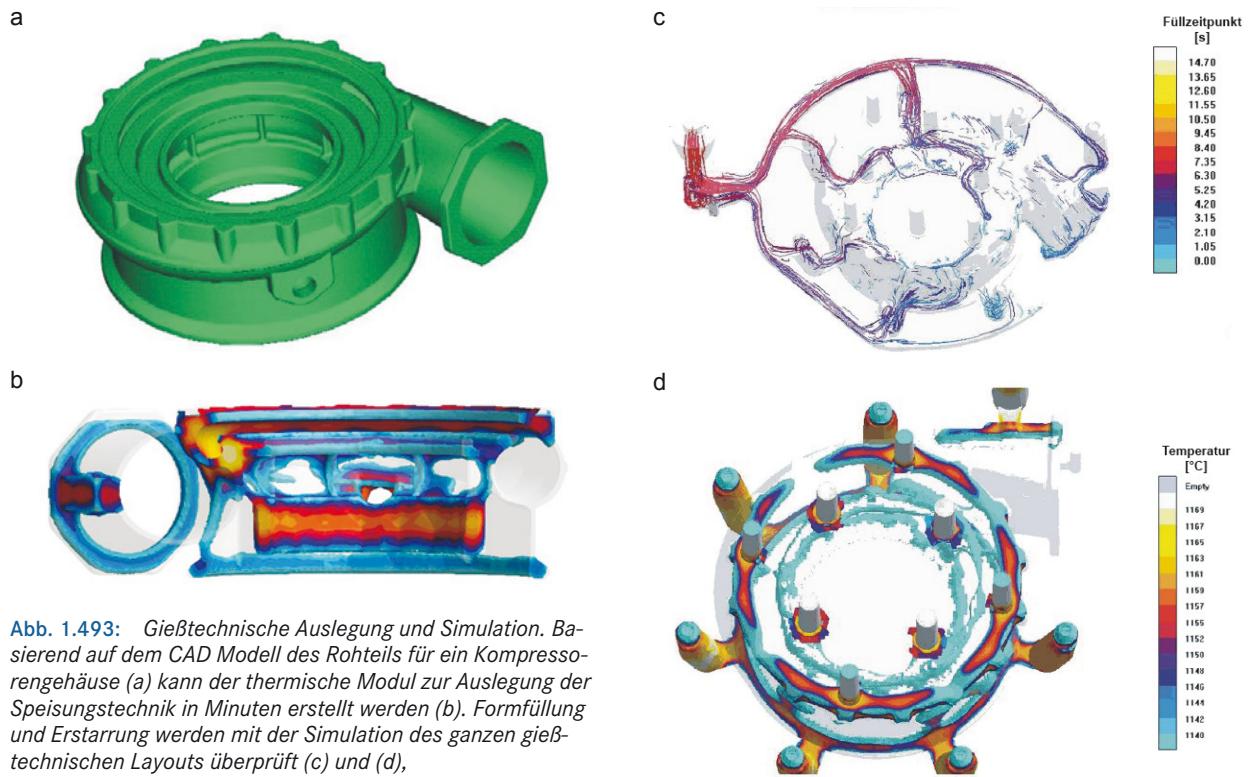


**Abb. 1.492:** Vorhersage der Bildung von oxydischen Einschlüssen oder Formstofffehlern. Hierzu werden virtuelle Teilchen mit Masse und Volumen versehen, können entsprechend des Sauerstoffangebotes wachsen, agglomerieren oder an der Formwand kleben. (unten) Oxydverteilung in einem Stahlguss teil. Die unterschiedlichen Farben kennzeichnen die Größe der Reoxidationseinschlüsse (oben) Vergleich von Simulation und Versuch für ein Stahlgussteil (Carlson 2005).

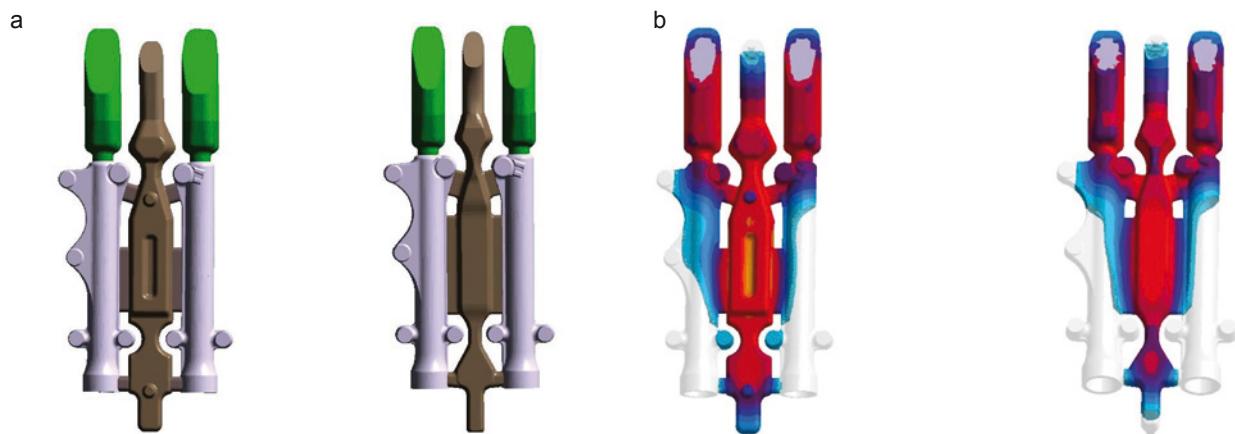


**Abb. 1.491:** Hohe Anschnittsgeschwindigkeiten in Druckguss (bis zu 100 m/s) führen zur Auflösung der Schmelzeoberfläche und damit zu Lufteinschlüssen. Die Formfüllsimulation berücksichtigt sowohl das Strömungsverhalten der Schmelze und auch das der Luft oder von Gasen im Formhohlraum (Quelle: United Technology, China).

frühzeitigen Bewertung seiner Konstruktion (Abb. 1.493). Wärmeflussrechnungen sind insbesondere für die Auslegung von Dauerformen von großem Interesse. Der Wärmehaushalt der Form, der Einfluss von äußeren Randbedingungen wie Temperierung, Schlichten, Heizen oder Kühlen lässt sich in kurzer Zeit quantitativ ermitteln. Darüber hinaus können aus den Temperaturen und dem Erstarrungsverhalten quantitative Informationen über den tatsächlichen lokalen thermischen Modul im Gussteil bis hin zu Erstarrungszeiten, Abkühlgeschwindigkeiten und Temperaturgradienten ermittelt werden, die Qualitätsvergleiche ermöglichen (Abb. 1.494).



**Abb. 1.493:** Gießtechnische Auslegung und Simulation. Basierend auf dem CAD Modell des Rohteils für ein Kompressorengehäuse (a) kann der thermische Modul zur Auslegung der Speisungstechnik in Minuten erstellt werden (b). Formfüllung und Erstarrung werden mit der Simulation des ganzen gießtechnischen Layouts überprüft (c) und (d), (Quelle: von Roll Castings, Schweiz).

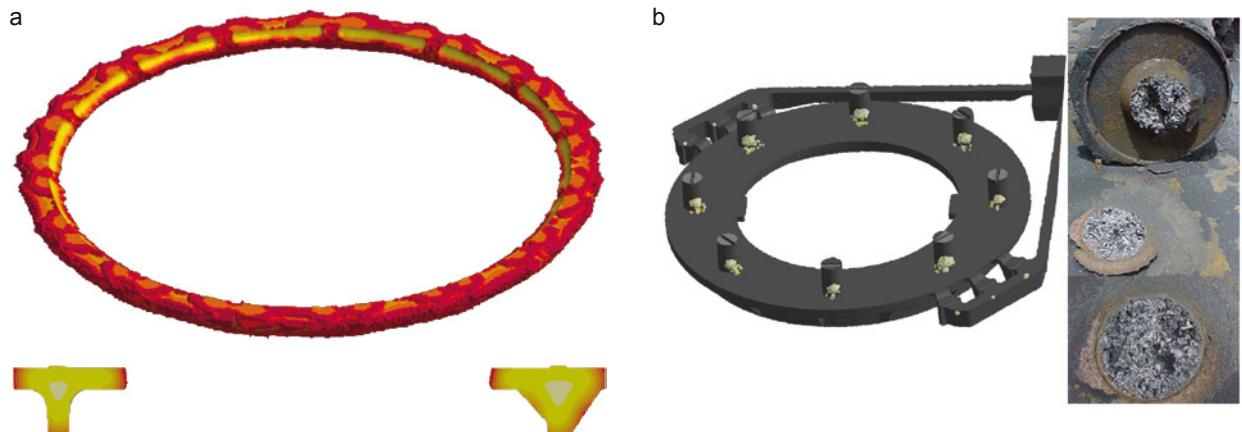


**Abb. 1.494:** Vergleich des Erstarringsverhaltens. Zwei unterschiedliche gießtechnische Lösungen für eine Vorderradgabel aus Aluminium-Kokillenguss (a) führen zu unterschiedlichen Erstarringsabläufen (b) (Quelle: PT Kabaya, Indonesien).

### 1.8.3.2 Simulation in der Arbeitsvorbereitung – Speisung und Porositäten

Die Unterstützung bei der speisungstechnischen Auslegung von Gussteilen zählt in der Praxis zu den wichtigsten Aufgaben für die Gießprozess-Simulation. Je nach vergossenem Werkstoff muss der Speisungsbedarf berücksichtigt werden, um ein fehlerfreies Gussstück zu erhalten. Die Vorhersage von Wärmezentren auf Grund der thermischen Berechnung ist oft nicht ausreichend,

um mögliche Porositäten oder Lunker quantitativ vorhersagen zu können (Abb. 1.495). Die Wärmeflussrechnung wird daher mit Dichte- und Massetransportberechnungen verknüpft, um den Einfluss von Erstarrungsmorphologie auf Speisungsverhalten oder auch werkstoffspezifische Sättigungsweiten berücksichtigen zu können. Hierzu sind entsprechende thermophysikalische Eigenschaften erforderlich. Neueste Entwicklungen nutzen Wachstumsmodelle für einzelne Phasen und Porenbildung unter



**Abb. 1.495:** Vorhersage der Sekundärlunkierung unter den Speisern für einen gegossenen Ring. Eine rein thermische Wärmeflussrechnung ist durch die komplexe Metallurgie von Gusseisenwerkstoffen nicht ausreichend, um speisungsbedingte Fehler sicher vorhersagen zu können. Die Temperaturverteilung zeigt für den gesamten Ring Bereiche der letzten Erstarrung im Zentrum an (a). Durch die Verknüpfung mit der Gefügesimulation zur Vorhersage von lokalen Schwindungen und/oder Expansion können Fehler quantitativ vorhergesagt werden (b).

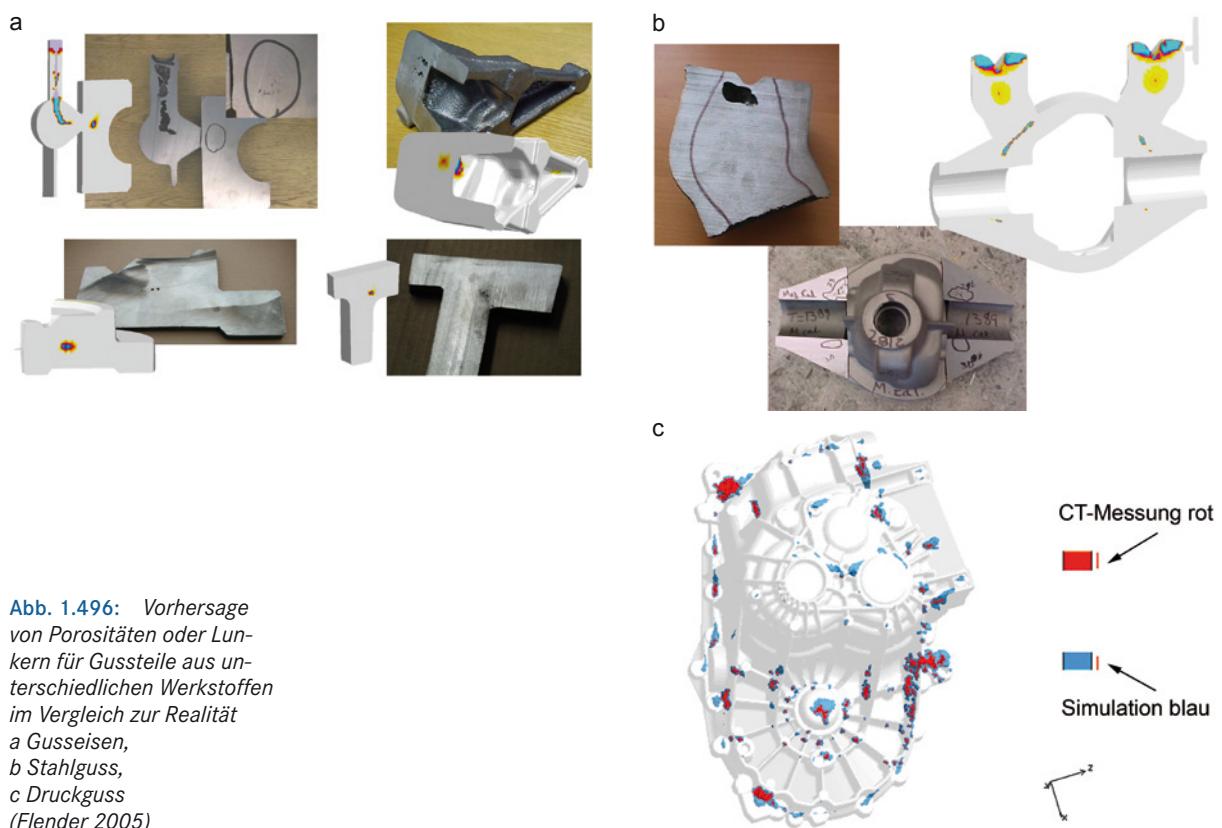
Berücksichtigung von lokalen Drücken und Gasgehalten (Abb. 1.496), die quantitative Aussagen über Porenverteilung und Porengrößen ermöglichen.

### 1.8.3.3 Spannungen und Verzug

Spannungsbedingte Gießfehler sind so alt wie das Gießen selbst (siehe die Risse in der Freiheitsglocke in Phi-

ladelphia oder die auseinander gebrochene Zarenglocke auf dem Kreml in Moskau). Anders als beim „vorhersagbaren“ Verhalten bei Formfüllung und Abkühlung sind Spannungen zunächst nicht direkt sichtbar, sondern lassen sich nur indirekt aus Verzug oder Rissen im Gussteil ableiten (Abb. 1.497) und (Abb. 1.498).

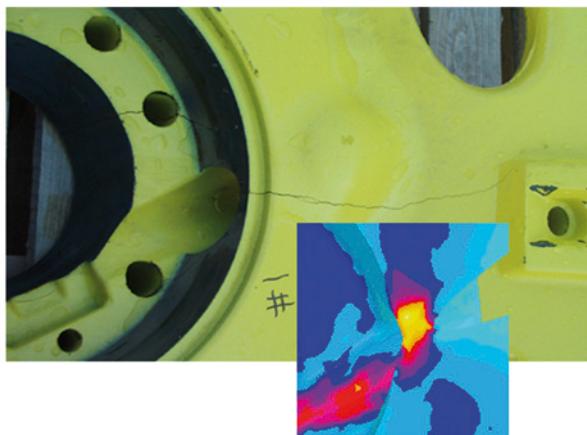
Auf Grundlage der umfangreichen Erfahrungen und Vorarbeiten im Maschinenbau im Bereich der Belastungssi-



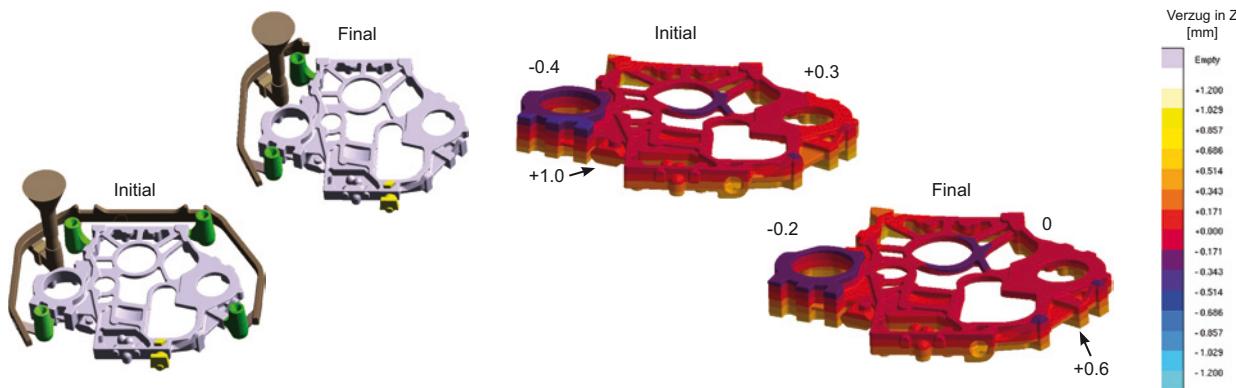
**Abb. 1.496:** Vorhersage von Porositäten oder Lunkern für Gussteile aus unterschiedlichen Werkstoffen im Vergleich zur Realität  
a Gusseisen,  
b Stahlguss,  
c Druckguss  
(Flender 2005)



**Abb. 1.497:** Verzug eines Strukturbauenteils in einer Druckgussform. Abhängig von dem Schwindungsverhalten entstehen im erstarrenden und abkühlenden Gussteil plastische (bleibende) Dehnungen, die bei Raumtemperatur zu Verformungen führen (mehrfach überhöhte Darstellung (Flender 2008)).



**Abb. 1.498:** Vorhersage von Rissen im Gussteil. Die Schwindung bzw. die Schwindungsbehinderung des Gussteils kann bei hohen Temperaturen zu lokal sehr hohen Dehnraten führen. Gleichzeitig ist der Werkstoff bei hohen Temperaturen häufig noch sehr spröde und kann kaum Kräfte ertragen. Daher treten Risse in Gussteilen unter Zugspannung häufig bei hohen Temperaturen auf.

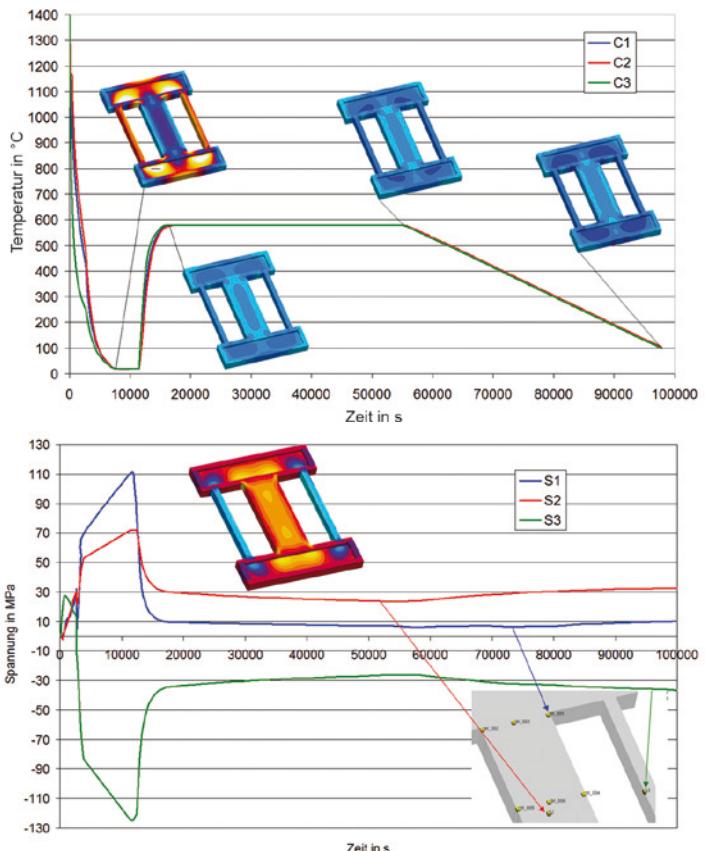


**Abb. 1.499:** Reduzierung des Gussteilverzugs durch Optimierung des Gießsystems. Das Beispiel zeigt an einem Gehäuse aus GJL wie eng die verschiedenen Prozessschritte mit einander verbunden sind. Durch die Neukonstruktion des Anschnittsystems (Original und neue Variante rechts) reduziert sich der Bauteilverzug (links) substanzell (Quelle: MWM International, Brasilien).

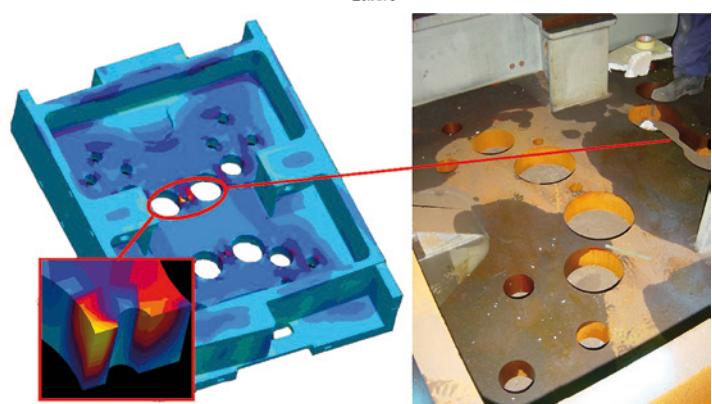
mulation ist heute die Simulation von Gusseigenspannungen und Verzug Standardfunktionalität (Abb. 1.499). Die quantitative Vorhersage von Spannungen in Gussteilen kann je nach Fragestellung deutlich höhere Anforderungen an das Materialmodell stellen, da neben dem temperaturabhängigen elastisch-plastischem Werkstoffverhalten gegebenenfalls auch zeitabhängige visko-elastische Eigenschaften berücksichtigt werden müssen und sich der Prozess über einen großen Temperaturbereich erstreckt. Zusätzlich sind Festigkeit und Steifigkeit von Form und Kernen häufig entscheidend für spannungsbedingte Fehler (Abb. 1.500).

Die mechanische Bearbeitung des Gussteils legt, wie der Praktiker sagt, Spannungen frei. Tatsächlich bildet sich durch Entfernen von Volumen im Gussteil ein neues Spannungsgleichgewicht. Nur wenn auch dieser Aspekt in der Simulation berücksichtigt wird, können Informationen aus der Simulation für den Endanwender, der das Verhalten für das bearbeitete Fertigteile benötigt, nützen (Abb. 1.501).

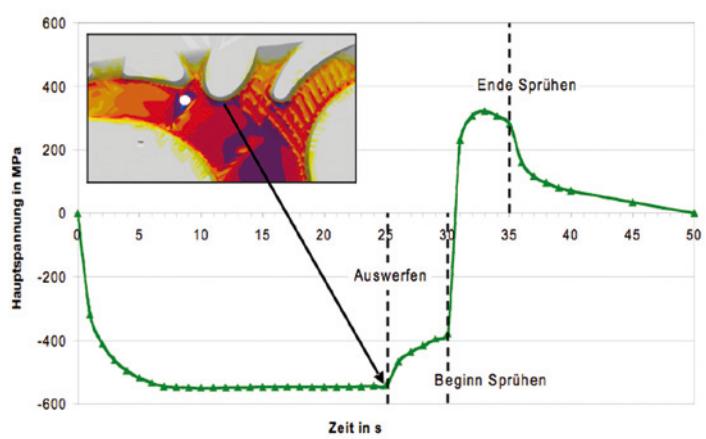
Über Eigenspannungen, Rissproblematiken, Schwindung und Verzug des Gussteils hinaus treten Spannungen im Werkzeug immer stärker in den Mittelpunkt des Interesses. Bedingt durch die hohen Kosten für Dauerformen sind Reparaturaufwand und Lebensdauer von Formen häufig entscheidend für die Profitabilität des Prozesses. Da das zyklische Temperaturverhalten und die entsprechenden Spannungsänderungen im Werkzeug einfach berechnet werden können, bietet sich hier ein neues Feld zur Kostensenkung und Wertschöpfung durch Simulation (Abb. 1.502).



**Abb. 1.500:** Vorhersage des Spannungsabbaus von Gusseisen während der Wärmebehandlung. Der Temperatur- (oben) und Spannungsverlauf (unten) im Bauteil wird während des Gießens und der Wärmebehandlung simuliert. Hierzu werden viskoelastisch-plastische Materialmodelle genutzt, die sowohl Temperatur- als auch Zeiteinfluss auf das Materialverhalten berücksichtigen. Das Ergebnis zeigt, dass der Spannungsabbau nie vollständig sein kann, da sich bei der Abkühlung zumindest elastische Spannungen erneut aufzubauen (Sturm 2010 und modifiziert).



**Abb. 1.501:** Vorhersage von rissgefährdeten Bereichen nach der Bearbeitung. Die Simulation der Gussspannungen berücksichtigt den Einfluss der Bearbeitung. Durch die Spannungsumlagerung können Spannungskonzentrationen entstehen, die zu Bauteilversagen nach der Bearbeitung führen (Quelle: Coupe, Preston, Großbritannien 2003).



**Abb. 1.502:** Lebensdauervorhersage von Dauerformen. Frühzeitige Brandrisse an der Oberfläche oder Risse rund um Kühlungen sind vielfach Grund für vorzeitiges Versagen von Werkzeugen oder führen zumindest zu kostenintensiven Reparaturen. Hierbei spielt der Spannungswchsel während eines Gießzyklus eine maßgebliche Rolle. Während des Abgusses oder der Erstarrung heizt sich die Formoberfläche zunächst auf und dehnt sich damit aus. Dadurch entstehen Druckspannungen. Mit der Abkühlung während des Sprühens zieht sich die Oberfläche zusammen und Zugspannungen entstehen. Über viele Gießzyklen entsteht eine Spannungshysterese. Die Simulation ermöglicht Aussagen über die Risseinleitung und damit die Lebensdauer der Form (Hansen 2009).

### 1.8.3.4 Die Vielfalt von Gusswerkstoffen

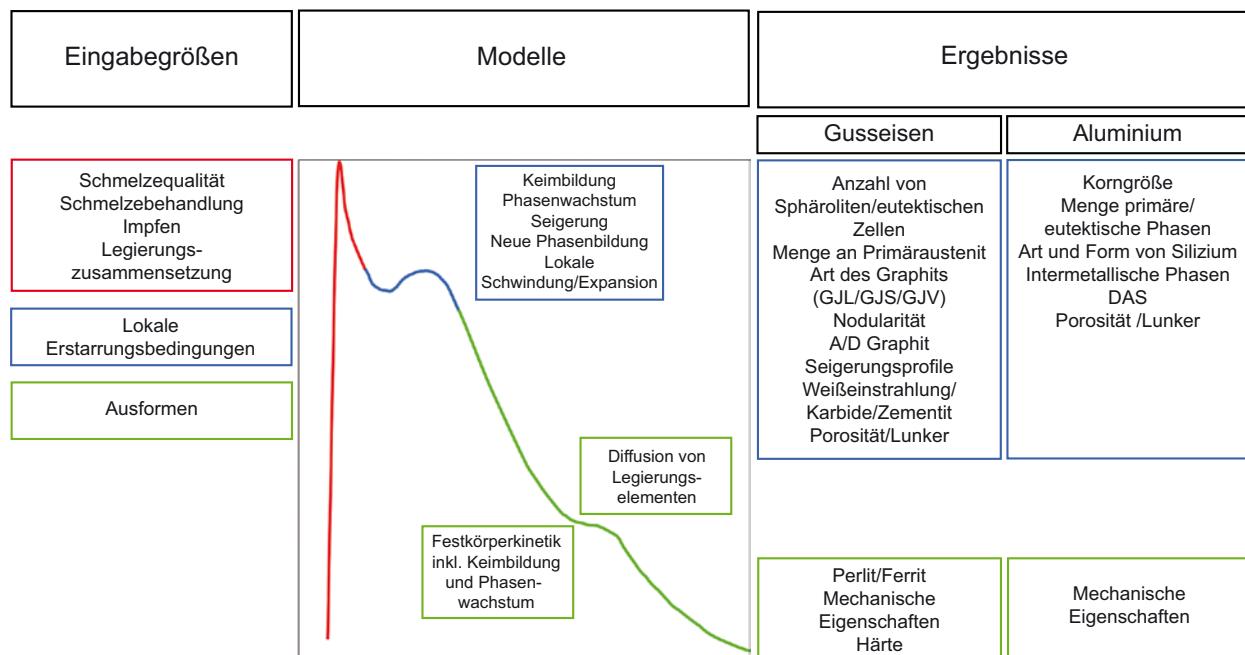
Das unterschiedliche Werkstoffverhalten von Gusswerkstoffen führt trotz gleicher physikalischen Grundlagen von Formfüllung, Erstarrung, Spannungen und Abkühlverlauf zu großen Unterschieden im Prozessablauf und den resultierenden Eigenschaften.

Die Entwicklung von werkstoffspezifischen Modellen resultierte ursprünglich aus dem speziellen Speisungsverhalten von Gusseisenwerkstoffen und der starken Abhängigkeit ihres Erstarrungsverhaltens von der gewählten Metallurgie. In großen Wärmezentren kann die Expansion des Graphits zu vollständiger Speisung führen, während in kleinen Wärmezentren Lunker auftreten. Daher ist quantitative Fehlervorhersage für Gusseisen nur bei Kenntnis der lokal auftretenden Gefüge (Graphit, Austenit, Zementit) und ihres Beitrags zu Schwindung und Expansion möglich (Abb. 1.503).

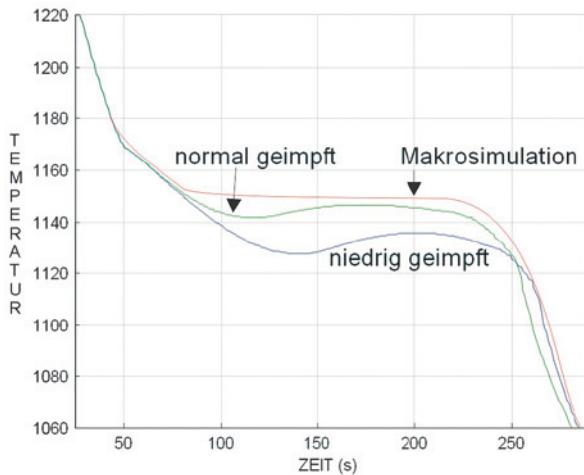
Hierfür wird heute für viele Werkstoffe die sogenannte Gefügesimulation (oder auch micro-modelling) eingesetzt, die zu jedem Zeitpunkt die Menge an neuen Phasen in jedem Punkt des Gussteils auf Grund der oben beschriebenen Zusammenhänge ermittelt. Beispielhaft für

Gusseisen wird neben dem dominanten Legierungseinfluss der Impfzustand aber auch die Schmelzequalität berücksichtigt (Abb. 1.504). Der Einfluss unterschiedlicher Impfung oder Variation von Legierungselementen auf die Ausbildung bzw. Vermeidung von einzelnen Phasen kann in Kombination mit den lokalen Abkühlbedingungen im Gussteil vorhergesagt werden (Abb. 1.505).

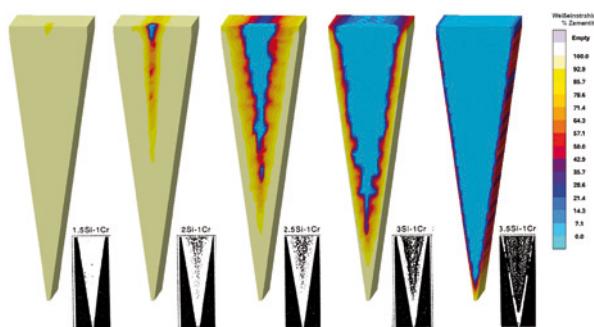
Simulationsergebnisse zum Formfüll-, Erstarrungs- und Spannungsverhalten von Gussteilen sind wichtige Informationsquellen, um sichere Prozesse zu entwickeln. Letztendlich will der Gießer aber definierte Eigenschaften des Gussteils liefern und der Kunde reproduzierbare Eigenschaften erhalten. Das Pflichtenheft von Eigenschaften eines Gussteils ist lang. Neben Fragen zur Maßhaltigkeit stehen zahlreiche mechanische Eigenschaften im Mittelpunkt des Interesses. Daher ist es das Ziel der Gießprozess-Simulation, Eigenschaften gegossener Bauteile vorherzusagen. Grundlage hierfür ist die Berechnung von Gefügen und möglicher Gussfehler. Beide Informationen müssen lokal quantitativ ermittelt werden, um daraus virtuell Eigenschaften des Gussteils ableiten zu können. Dies ist heute für viele Werkstoffe möglich (Abb. 1.506), (Abb. 1.507) und (Abb. 1.508).



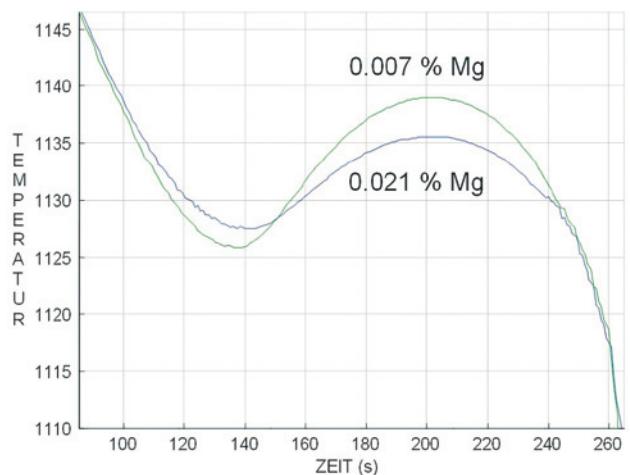
**Abb. 1.503:** Prinzipschaubild von Eingangsgrößen, Berechnungsmodellen und Ergebnissen für die Gefügesimulation von Gusseisen- und Aluminiumlegierungen. Neben Prozessbedingungen und Gussteilgeometrie werden die nominelle Zusammensetzung und metallurgischen Parameter (Impfung, Art der Veredelung) vorab definiert. Aus diesen Informationen berechnet das Programm die möglichen Gleichgewichtsphasen, die aber durch die beschleunigte Abkühlung verschoben werden (Kinetik der Phasen). Die ungleichmäßige Löslichkeit von Legierungselementen im Festen und Flüssigen führt zu Seigerungen und ermöglicht damit die Bildung von neuen (ggf. unerwünschten Phasen). Erst im letzten Schritt wird aus diesen Informationen der Erstarrungsfortschritt und damit die Temperaturverteilung im Zeitschritt berechnet. Diese Schritte wiederholen sich in an jedem Ort und zu jedem Zeitpunkt. Zur Vorhersage von Gefüge und Eigenschaften von Gusseisen muss die Bildung von Ferrit und Perlit während der eutektoiden Umwandlung vorhergesagt werden können.



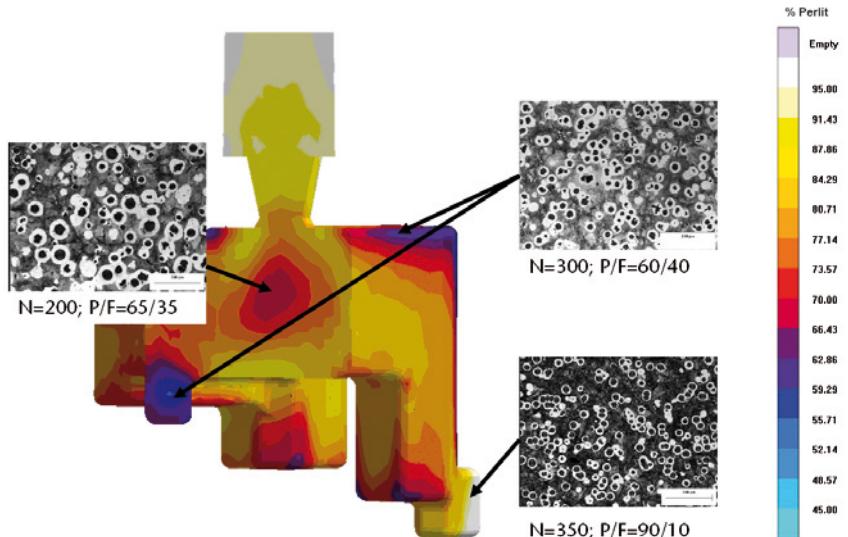
**Abb. 1.504:** Makroskopische und mikroskopische Simulation am Beispiel von simulierten Abkühlkurven. Bei der Nutzung der Wärmeleitungsgleichung ändert sich die Abkühlkurve nur durch die freiwerdende Menge an latenter Wärme. Bei der mikroskopischen Gefügesimulation, wird das Abkühlverhalten durch unterschiedliche Impfzustände beeinflusst (a). Auch durch die Änderung der Legierung (hier der effektive Mg-Gehalt) werden in der Mikrosimulation Unterkühlung, Rekaleszenz und Wachstumstemperatur beeinflusst (b).



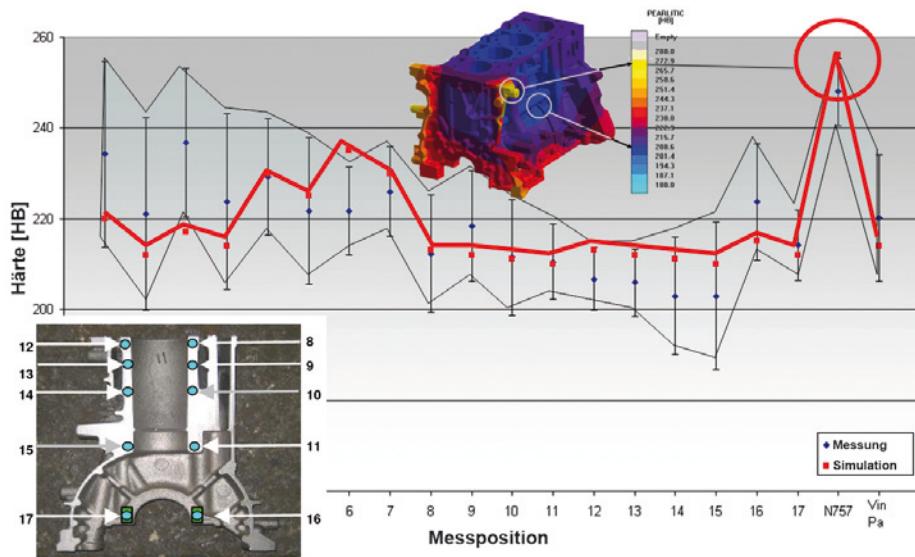
**Abb. 1.505:** Simulation des Legierungseinflusses auf die Gefügebildung von GJL im Vergleich zu realen Schliffbildern. Der Übergang von grauem zu weißem Gusseisen in Keilproben ist ein erprobter Test für den Impfzustand oder die Kontrolle der Legierung. Mit simuliertem zunehmendem Si-Gehalt sinkt die vorhergesagte Weißbeinstrahlung (Sturm 2010).



**Abb. 1.506:** Porenverteilung in einem Aluminiumzylinderkopf. Die Simulation der Gefüge- und Porenbildung unter Berücksichtigung des H-Gehaltes und Legierungszusammensetzung erlaubt die quantitative Vorhersage der Porenbildung und eine lokale Vorhersage von Porenverteilungen und -größen.



**Abb. 1.507:** Die Gefügesimulation von Gusseisenwerkstoffen bietet eine Vielzahl von quantitativen Informationen über die lokal entstehenden Gefüge, hier Ferrit-/Perlitverteilung (Sturm 2004).



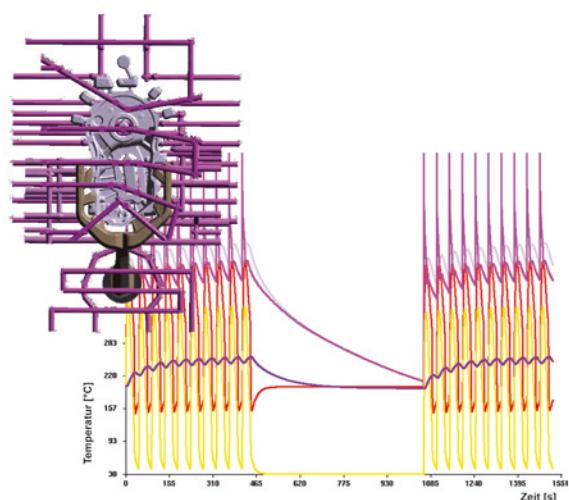
**Abb. 1.508:** Vorhersage der lokalen Härte (in HB) für einen Motorblock aus Gusseisen mit Lamellengraphit (GJL) im Vergleich zu Messungen. Die Gefügesimulation macht Vorhersagen über lokale mechanische Eigenschaften. Wenn die metallurgischen Qualitäten der Schmelze bekannt ist, sind Vorhersagen im Streuband der Messwerte möglich und zeigen kritische Bereiche für die Bearbeitbarkeit auf (Quelle: Hartmann 2005 und Ford Forschungszentrum).

## 1.8.4 Anforderungen des Prozesses

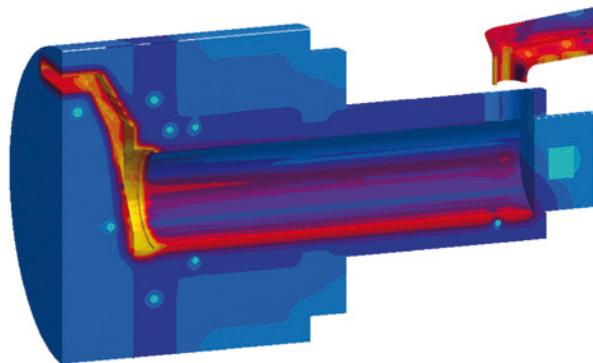
### 1.8.4.1 Beispiel Dauerformverfahren

Nach der Entwicklung der grundsätzlichen physikalischen Möglichkeiten zur Simulation des Gießens und Erstarrens entwickelte sich schnell Bedarf für die Berücksichtigung spezifischer Anforderungen unterschiedlicher Gießverfahren. So wurde für Dauerformverfahren die Möglichkeit geschaffen, mehrere Gießzyklen hintereinander zu rechnen, um so das Aufheizverhalten der Form bzw. den Einfluss von Betriebsunterbrechungen berück-

sichtigen zu können. Heute werden selbst kleinste Teilschritte wie das Öffnen unterschiedlicher Schieber zu unterschiedlichen Zeiten oder Sprühabläufe in Druckguss in Simulationsprogrammen im Detail berücksichtigt und quantitativ mit prozessspezifischen Fehlern korreliert (Parona 2010). Heiz-/Kühlkreisläufe können nicht nur zeitlich festgelegt, sondern mit Hilfe von virtuellen Thermoelementen „in-situ“ gesteuert werden (Flender 2005). Für den Niederdruckgussprozess stehen Möglichkeiten zur genauen Eingabe der Druckkurve während der Formfüllung oder zur Berücksichtigung von Luftkühlungen zur Verfügung (Abb. 1.509).

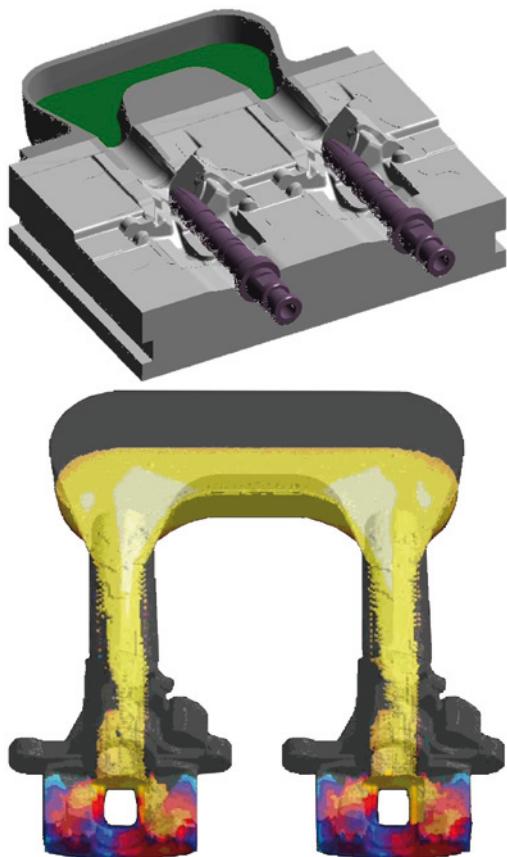


**Abb. 1.509:** Dauerformverfahren sind nur im quasi-stationären Zustand prozesssicher. Die Simulation berücksichtigt alle wesentlichen Einflussgrößen auf den Wärmeaushalt der Form, wie Kühl- und Heizkreisläufe oder Schlitten. Der Einfluss von Prozessstörungen auf die Temperaturen der Form (a) und die Anzahl von Zyklen bis zum Temperaturliegengewicht (b) kann ganz einfach untersucht werden (Hartmann 2004).



**Abb. 1.510:** Berechnete Temperaturverteilung in der Schusskammer. Die Temperatur der Schmelze im Vergießofen kann sich nach dem Füllen der Schusskammer innerhalb von Sekunden so weit reduzieren, dass bereits vor dem Schuss Vorerstarrung vorliegt (Hartmann 2004).

Zur Simulation der Formfüllung in Druckguss ist es hilfreich, die Strömung durch das Eingießen und das Abkühlverhalten der Schmelze in der Schusskammer zu berücksichtigen, was ggf. in einer separaten Simulation erfolgen kann (Abb. 1.510).



**Abb. 1.511:** Simulation des Kippkokillengussverfahrens durch zeitgesteuerte Rotation des Werkzeugs (Quelle: EBCC, Polen)

Viele Kokillengießverfahren werden heute mit dem Kippen des Werkzeugs verbunden, um so eine kontrollierte Formfüllung zu realisieren. Hierbei fließt die Schmelze von einem Löffel oder Bassin schwerkraftgetrieben in den Formhohlraum. Für die Simulation dieses Prozesses müssen zeitlich veränderliche Drehrichtung und Geschwindigkeit definiert werden.

Ein Schwerpunkt neuer Entwicklungen ist die Nutzung der Simulationsergebnisse zur Optimierung von Prozessabläufen bzw. zur Ermittlung von Steuerungsparametern für Gießmaschinen oder Formanlagen. Bei bekannter Kühlstrecke und gewünschter Auspacktemperatur des Gussteils kann so z. B. die maximale Produktivität der Maschine vorhergesagt werden. Ziel ist die Kopplung dieser Daten direkt mit der Maschinensteuerung.

#### 1.8.4.2 Kein Gussteil ohne Form – Sandsimulation

In den letzten 30 Jahren lag der Fokus der Entwicklungen zur Gießprozess-Simulation auf dem Gussteil und seiner Herstellung. Viele fertigungsbedingte Fragen von Formen oder Kernen werden heute mit viel größerem experimentellem Aufwand angegangen, als es bei der Auslegung der Gießtechnik je notwendig war. Die typische Vorgehensweise für die Auslegung einer Kernbüchse ist es, eine maximale Anzahl von Entlüftungsdüsen vorzusehen und diese von Versuch zu Versuch ergebnisabhängig zu schließen oder wieder zu öffnen. Diese Unsicherheit bei der Auslegung von Form- oder Kernherstellungsverfahren liegt an der Komplexität der Physik, die beim Befüllen, Schießen und Verdichten von Form- oder Kernwerkstoffen berücksichtigt werden muss.

Kernschießen ist ein Mehrphasenströmungsproblem. Sand wird nach dem Öffnen des Ventils von Luft durchdrungen und damit beschleunigt. Luft ist praktisch der Träger für die Formfüllung des Sandes in die Kernbüchse. Nach Ende der Füllung muss aber die Luft weitestgehend vom Sand wieder getrennt, sprich entlüftet werden. Dies ist ein Schritt in eine neue und komplexe Welt mit anspruchsvoller Physik. Dabei ist die eine Herausforderung die Beschreibung der Physik der Strömung von zwei so unterschiedlichen Medien. Noch anspruchsvoller ist jedoch die Vielfalt der inneren und äußeren Randbedingungen (z. B. Vielzahl von unterschiedlichen Schieß- und Entlüftungsdüsen). Erste Erfolge motivieren, die Simulation auch für die Kernmacherei kontinuierlich weiterzuentwickeln. Ziel der aktuellen Entwicklungen ist die Simulation der gesamten Prozesskette „Sand“, mit Kernschießen, Begasen, Entlüften, und Zersetzung des Binders beim Gießen (Abb. 1.512).

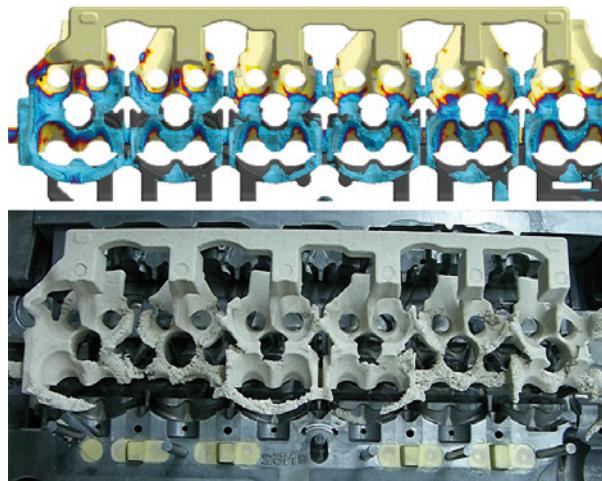


Abb. 1.512: Simulation des Kernschießens und Vergleich mit Experimenten (Schneider 2008).

#### 1.8.4.3 Die Prozesskette

Die meisten Gussteile erhalten ihre letztendlichen Eigenschaften durch den Gießprozess nachgelagerten Prozessschritte, wie z. B. aus der Wärmebehandlung oder durch mechanische Bearbeitung. Daher ist es für die Gießprozess-Simulation unverzichtbar, sich auch mit diesen Prozessschritten zu beschäftigen, um so aussagefähig bezüglich der tatsächlichen Eigenschaften eines Gussteils im Lieferzustand zu werden.

Exemplarisch wird diese erweiterte Prozesskette an der Spannungsverteilung eines Gussteils im Fertigteil deutlich. Die Eigenspannungen aus dem Gusszustand können durch Erwärmung während einer Wärmebehandlung (Austenitieren/Lösungsglühen) überwiegend abgebaut werden. Durch das Abtrennen des Gießsystems erfolgt eine Spannungsumlagerung, die oft in einer messbaren Verformung des Gussteils resultiert. Schnelles Abkühlen oder Abschrecken induziert wieder hohe Eigenspannun-

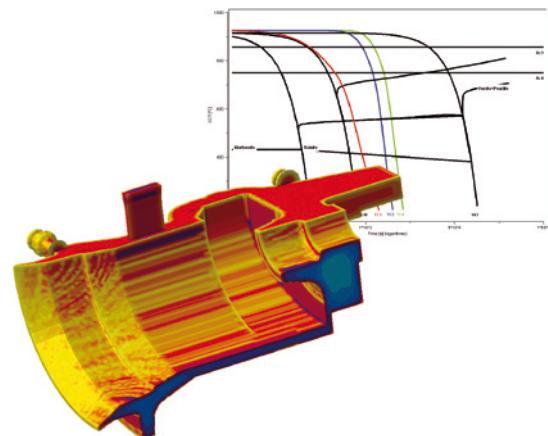


Abb. 1.514: Vorhersage von Gefüge aus der Wärmebehandlung. Die Kopplung von Diffusionsrechnung und ZTU Diagrammen ermöglicht heute die lokale Vorhersage von Gefügen aus der Wärmebehandlung, hier Martensitverteilung (Hansen 2009).

gen, die durch Auslagern oder Anlassen zeit- und temperaturabhängig teilweise abgebaut werden (Abb. 1.513). Die geforderten Eigenschaften des Gefüges und des Gussteils werden primär durch nachgelagerte Prozessschritte eingestellt. Mit einer Simulation des Wärmebehandlungsablaufs werden durch Kopplung von Diffusionsrechnungen und Phasenumwandlungen bei der Abkühlung Gefüge und Eigenschaften nach der Wärmebehandlung vorhergesagt. Dies hilft z. B. dem Stahlgießer, mögliche Durchhärtungsprobleme frühzeitig zu erkennen (Abb. 1.514) oder dem Aluminiumgießer, die Parameter für eine optimale Auslagerung bezüglich Festigkeit oder Dehnung festzulegen. Durch Kopplung von Gefügesimulation für den Gusszustand mit der Wärmebehandlung kann der Einfluss von Gussgefügen auf die Prozesszeiten in der Wärmebehandlung systematisch untersucht werden (Abb. 1.515).

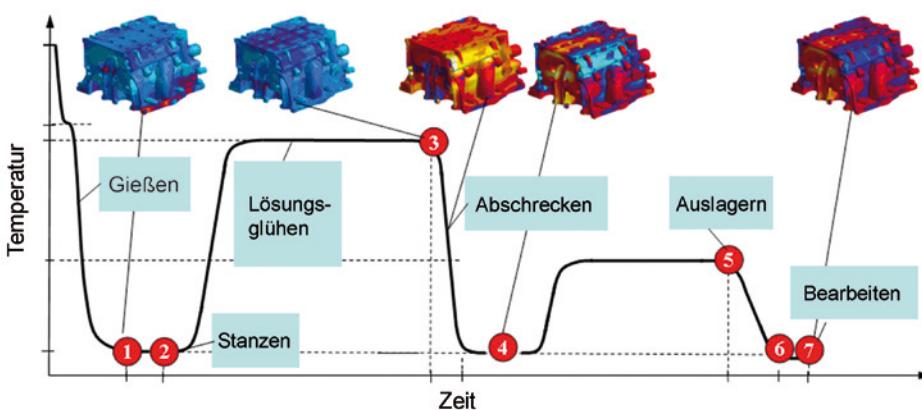
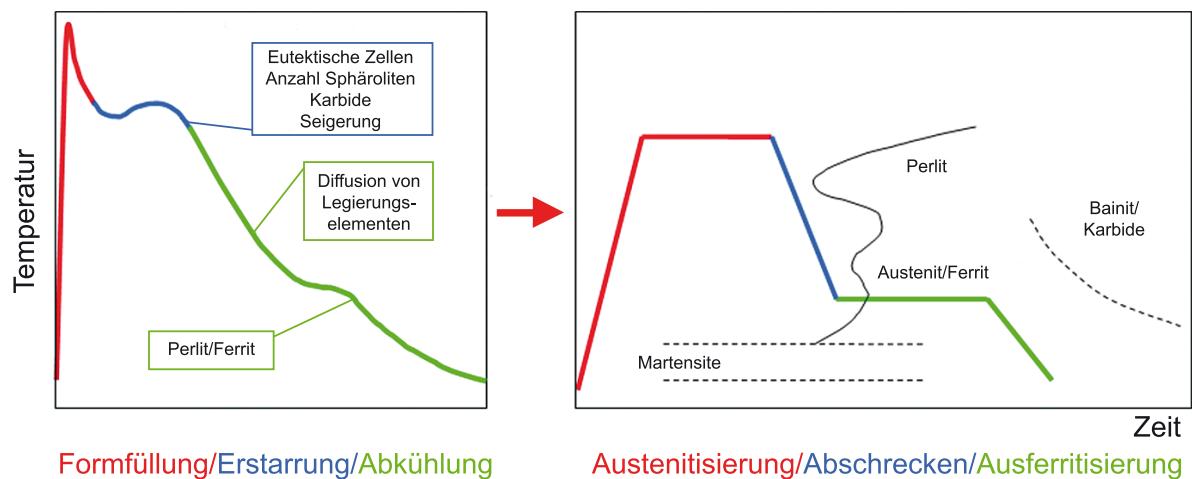


Abb. 1.513: Spannungsverlauf in einem Zylinderkopf über den gesamten Fertigungsablauf. Die Prozess-Simulation kann heute alle wesentlichen Teilschritte unterstützen und damit die Eigenspannungen nach der Bearbeitung für das Fertigteil vorhersagen (Egner-Walter 2007).

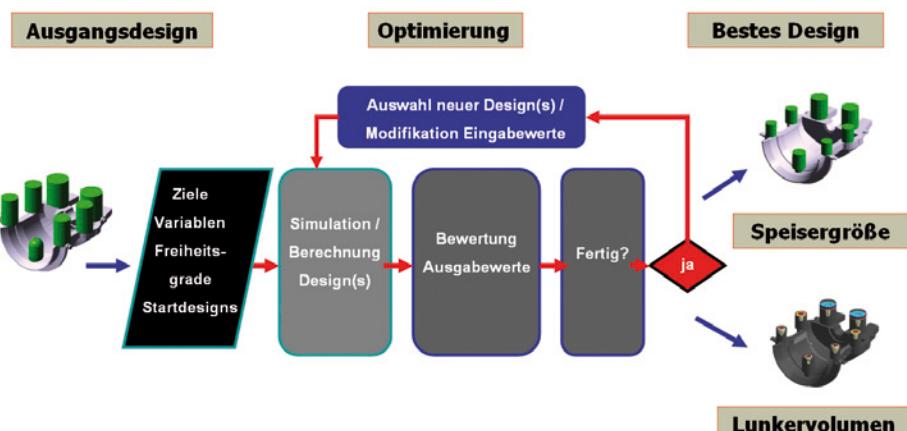


**Abb. 1.515:** Vorhersage von Eigenschaften von ADI durch Integration der Gießprozess-Simulation mit der Simulation der Wärmebehandlung. Die Gefügesimulation von GJS bietet quantitative Information über lokale Gefüge, die mit einer nach gelagerten Gefügesimulation während der Wärmebehandlung verknüpft werden können. Die Anzahl von Sphäroliten und lokale Seigerungsprofile werden als Eingangsgrößen für die Simulation der Austenitisierung, des Abschreckens und der Ausferritisierung von ADI genutzt (Sturm 2010).

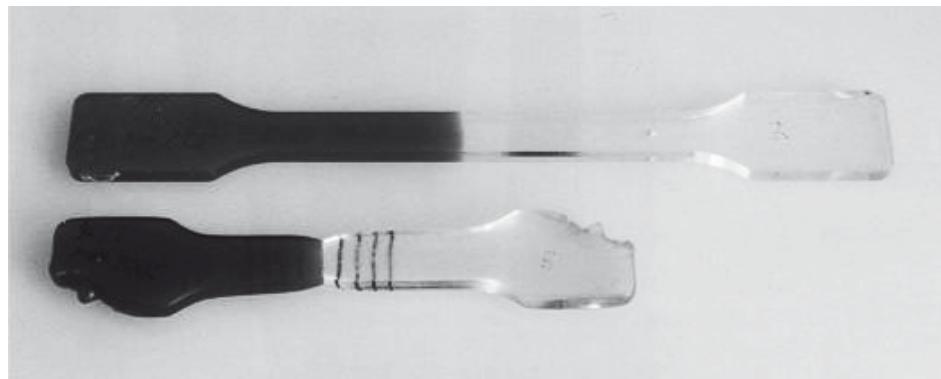
## 1.8.5 Gießtechnische Optimierung

Gießprozess-Simulation bildet jeweils den definierten Status Quo ab. Die Bewertung, ob das Gießsystem oder die Prozessbedingungen zu guten Ergebnissen führen, erfordert den Fachmann. Darüber hinaus muss die Lösung für eine Optimierung vom Gießer kommen. Der Vorteil des Gießens ist aber auch sein größter Nachteil: Alles passiert gleichzeitig und ist miteinander gekoppelt. Änderungen einzelner Parameter beeinflussen gleichzeitig viele Qualitätsmerkmale während des Prozesses (z. B. hat die Änderung der Gießtemperatur nicht nur einen Einfluss auf das Formfüllverhalten (Fließfähigkeit, Kaltlauf). Sie verändert

das Erstarrungsverhalten, die Erstarrungszeiten, die metallurgische Konstitution der Schmelze wird beeinflusst, und der Wärmehaushalt der Form verändert sich mit Auswirkungen auf Überhitzung oder Erosion. Hier bietet sich die autonome Optimierung als Ausweg an. Sie nutzt das Simulationsprogramm als virtuelles Versuchsfeld und ändert Gießbedingungen oder Gießtechnik und versucht auf diesem Weg, das vorgegebene Ziel möglichst optimal zu erreichen. Dabei werden einzelne Größen unabhängig voneinander geändert und können entsprechend bewertet werden. Autonome Optimierungswerzeuge bilden die klassische Vorgehensweise des Gießers, nämlich den besten Kompromiss zu finden, auf Basis physikalischer Berechnungen ab (Abb. 1.516).



**Abb. 1.516:** Prinzipieller Ablauf der Optimierung. Auf Basis eines Ausgangsdesigns werden die Variablen, die optimiert werden sollen, definiert. Typische Variablen sind geometrische Veränderungen wie Speisergrößen, Positionen oder Gießläufe. Gleichzeitig wird ein kombiniertes Optimierungsziel definiert, hier maximales Ausbringen bei minimaler Porosität. Das Optimierungsprogramm nutzt zahlreiche Simulationen als Versuchsfeld und sucht nach dem besten Kompromiss (Hahn 2008) und modifiziert.



**Abb. 4.113:** Orientierungsrückstellung am Beispiel eines 2K-Zugstabs an der Bindenahrt (Nguyen-Chung 2001)

### Wie kann man Orientierungen mit der Prozessführung beeinflussen?

Wie zuvor erwähnt werden Orientierungen durch die Schmelzeströmung eingebracht und stellen sich, dann wenn die Strömungs Kräfte abnehmen, wieder zurück. Die Geschwindigkeit der Rückstellung hängt weitestgehend von der inneren Struktur der Molekülketten ab, findet aber grundsätzlich sehr schnell statt. Da diese Rückstellung allerdings ausschließlich bei Temperaturen oberhalb der Einfriertemperatur stattfinden kann, muss zum ausreichend großen Abbau der Orientierungen nach der Druckentlastung die Schmelztemperatur noch ausreichend hoch sein.

Die wesentlichen Einflussparameter auf die Orientierungen sind:

- Einspritzgeschwindigkeit (erhöhen)
  - Orientierungen im Rand höher durch höhere Scherbelastung
  - Orientierungen im Kern geringer, durch weitergehende Rückstellung nach der Entlastung
- Massetemperatur (erhöhen)
  - Orientierungen im Rand geringer, durch geringere Scherbelastung
  - Orientierungen im Kern geringer, durch längere Relaxationszeit
- Nachdruckhöhe (reduzieren)
  - Orientierungen im Kern (vor allem angussnah) geringer, wegen niedrigerer Scherung im Kernbereich beim Abkühlen
- Nachdruckzeit und Werkzeugtemperatur haben nur geringen Einfluss auf die Ausbildung von Orientierungen.

### Fazit

Orientierungen treten beim Spritzgießen je nach Prozeseinstellung unterschiedlich stark in den verschiedenen

Ebenen des Formteils auf. Sie sind grundsätzlich nicht zu vermeiden, aber die Art der Prozessführung hat Einfluss auf das verbleibende Niveau der Orientierungen.

Beim Spritzgießen sollte man verbleibende Orientierungen weitestgehend vermeiden, da diese stark axial positioniert sind. Die eingefrorenen Orientierungen führen bei erhöhten Temperaturen im Einsatzfall zu nachträglichen lokalen Maßänderungen und damit zu Formänderungen (Verzug).

### 4.6.2.2 Schwindung und Verzug

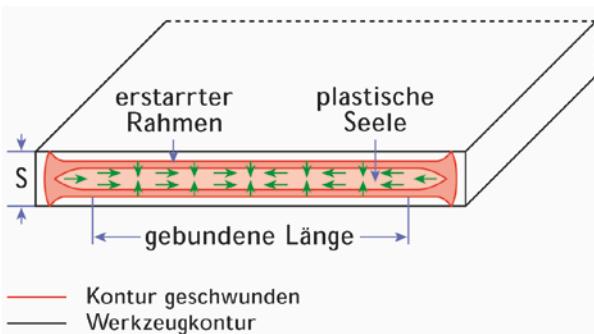
#### Was ist Schwindung?

Die Schwindung eines Bauteils ist die Abweichung der endgültigen Bauteilabmessungen gegenüber den Maßen im Werkzeug. Die Schwindung erfolgt in drei Dimensionen und wird daher in Volumenschwindung und Maßschwindung unterschieden. Die Schwindung wird in % auf das Werkzeugmaß bei 23 °C bezogen angegeben:

$$S_{\text{vol}} = \frac{V_{\text{Werkzeug}} - V_{\text{Formteil}}}{V_{\text{Werkzeug}}} \cdot 100\% \quad (4.26).$$

Die Verarbeitungsschwindung ist in der DIN 16901 als die Volumen- und Maßabweichung definiert, die im Spritzgießprozess 16 Stunden nach der Entformung vorliegt. Die Gesamtschwindung ergibt sich aus Verarbeitungsschwindung und Nachschwindung.

Die Schwindung ist eine Folge der thermischen Volumenabnahme, Orientierungsrückstellungen und dem Abbau von Eigenspannungen. Sie erfolgt in alle drei Raumrichtungen, jedoch nicht in alle Richtungen gleich. Das Erstarrungsmodell (Abb. 4.114) zeigt die Schwindungsbehinderung in Längsrichtung durch die erstarrte Randschicht. Nur die Schwindung in Wanddickenrichtung kann nahezu frei stattfinden und ist daher auch deutlich größer.



**Abb. 4.114:** Typische Verteilung der Volumenschwindung auf die Achsen des Formteils nach Erstarrungsmodell (Stitz, Keller 2004)

### Was ist Verzug?

Verursacht durch Volumen- und Maßveränderungen treten in deren Folge außerhalb des Werkzeugs auch Geometrieabweichungen auf, die mit Verzug bezeichnet werden. Wie bereits beschrieben erfolgt die Schwindung in alle drei Dimensionen des Formteils. Da es beim Spritzgießen nicht gelingt über das gesamte Formteil völlig gleichmäßige Druck- und Temperaturbedingungen zu realisieren, kommt es lokal zu unterschiedlicher, anisotroper Schwindung. Insbesondere außerhalb des Werkzeugs führt dies über den gesamten Abkühlvorgang zu ebenso unterschiedlichen Volumen- und Maßänderungen am Formteil. Diese anisotrope Schwindung führt zu Verzug.

### Wie entsteht Schwindung und Verzug?

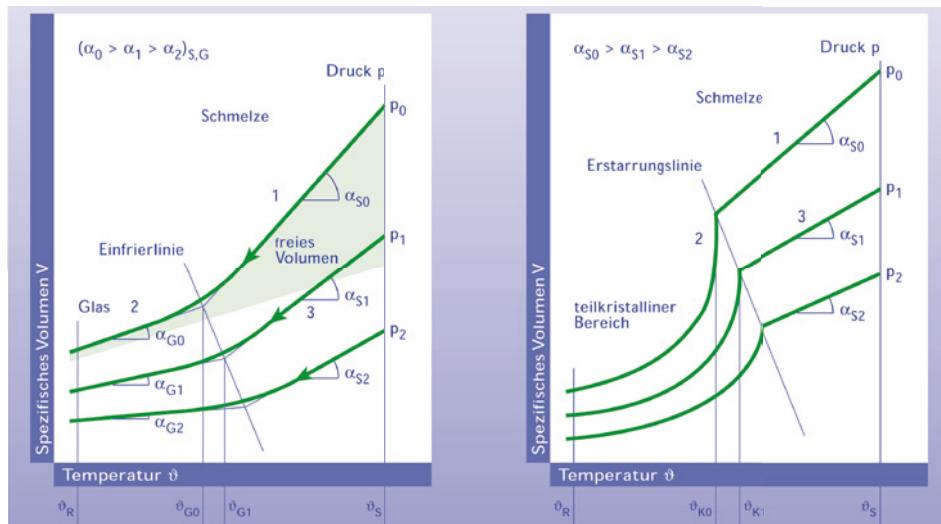
Kunststoffbauteile nehmen im Gegensatz zu Bauteilen aus anderen Werkstoffen, während sie von Verarbeitungstemperatur auf Raumtemperatur abkühlen sehr deutlich an Volumen ab. Diese Volumenabnahme ist zu-



**Abb. 4.115:** Typisches Formteil mit Verzug entlang der Außenkanten und Korrekturmaßnahmen in den Ecken (oben) (Görich 2007)

dem überlagert von den dabei wirkenden Drücken in der Schmelze. Die Volumenabnahme geschieht im Werkzeug zunächst unter Formzwang (schwindungsbehindert) und nach Entformung ungebunden. Die Größenordnung der zu erwartenden Volumenabnahme ist anhand der pVT-Diagramme zu erkennen (Abb. 4.116). Die Schwindung beginnt im pVT-Diagramm grundsätzlich dann, wenn die 1-bar-Linie erreicht ist, was im Werkzeug der Wandablösung des Formteils entspricht. Je nach Thermoplast bewegt sich diese Volumenabnahme zwischen Verarbeitungstemperatur und Raumtemperatur bei bis zu 20 %. Durch die Nachdruckphase kann ein großer Teil noch ausgeglichen werden, sodass die verbleibende Volumenschwindung noch bei 2 bis 5 % liegt.

Da es beim Spritzgießen nicht gelingt die thermischen Bedingungen über die gesamte Formteilfläche gleichmäßig zu halten und auch nicht die Nachdruckwirkung gleich-



**Abb. 4.116:** pVT-Diagramm für einen amorphen und einen teilkristallinen Thermoplasten (Bayer Material Science 2008)

mäßig ins Formteil einzubringen wird das pvT-Diagramm eines Thermoplasten je nach Position im Werkzeug lokal sehr unterschiedlich durchlaufen. Außerdem liegen häufig bei Formteilen lokal unterschiedliche Wanddicken vor. Der Prozess trifft demnach je nach Formteilort an unterschiedlichen Stellen auf die 1bar-Linie im pvT-Diagramm, was lokal unterschiedliche Schwindung zur Folge hat.

Wie bereits zuvor erwähnt erfolgt die Schwindung zunächst im Werkzeug und wird durch die Einspannung wesentlich behindert. Dadurch entstehen Spannungen im Formteil, aber die Maße bleiben zunächst in der Werkzeugdimension. Erst wenn die Abkühlung außerhalb des Werkzeugs fortgesetzt wird, kann das Formteil je nach Schwindungspotenzial unterschiedlich schwinden, und sich folglich verzieren. Die Konsequenz sind je nach Prozessführung Maßabweichungen, Verformungen oder auch Spannungen, die sich möglicherweise erst im Einsatz unter Wärme wieder zurückstellen.

Die Schwindung ist außerdem eine Konsequenz aus Orientierungsrückstellungen und Spannungsabbau. Die Volumenabnahme durch die Abkühlung überwiegt die anderen Effekte allerdings deutlich.

Bei teilkristallinen Werkstoffen kann es auch bis zu zwei Wochen nach der Verarbeitung noch zu Schwindung kommen, da insbesondere die Randschichten unter Wärmeeinwirkung noch nachkristallisieren. Die Nachkristallisation führt dann zu weiterer Volumenabnahme, Maßänderungen und Verzug.

Zu beachten ist, dass faserverstärkte Thermoplaste sich bei ihrem Schwindungsverhalten völlig anders verhalten, als unverstärkte Werkstoffe. Die Fasern reduzieren generell die Schwindung, da die Volumenabnahme auf den Thermoplastanteil reduziert wird. Darüber hinaus kommt es je nach Ausrichtung der Faser zu sehr anisotropem Verhalten. In Richtung der Faser ist die Schwindung erheblich eingeschränkt und nimmt damit deutlich ab, während die Schwindung des Kunststoffs quer zur Faserrichtung nahezu uneingeschränkt stattfinden kann. Die Auslegung von Werkzeugen für faserverstärkte Kunststoffe unterliegt daher völlig anderen Regeln in Hinblick auf die Lage des Anspritzenpunktes und der Wanddickenverteilung.

#### Wie wirkt sich Schwindung und Verzug aus?

Die Schwindung erfolgt über das Volumen unterschiedlich. Die überwiegend flächigen Formteile beim Spritzgießen erstarren unmittelbar an der Außenseite und bilden damit einen starren Rahmen. Bei der weiteren Abkühlung können sie dann weitaus weniger in Richtung der Längsachsen schwinden, als das in Wanddickenrichtung möglich ist. Abbildung 4.114 zeigt die Schwindungsbehinde-

rung in Längenrichtung. Besonders in Wanddickenrichtung ist die Schwindung frei und daher verhältnismäßig groß. Die verbleibende Schwindung in Längenrichtung ist bei ausreichender Nachdruckwirkung oft nur bei

- 0,5 bis 0,8 % (amorphe Thermoplaste) bzw.
- 1,2 bis 2,0 % (teilkristalline Thermoplaste).

Sehr unterschiedlich ist die Längenschwindung bei faserverstärkten Thermoplasten. In Richtung der Fasern wird die Schwindung bis zu 80 % reduziert. Quer zur Faserrichtung ist die Schwindung jedoch ähnlich der Schwindung des reinen Thermoplasten und nur durch den Faseranteil reduziert (Abb. 4.117).

Wie bereits zuvor erwähnt erfolgt die Schwindung zunächst im Werkzeug und wird durch den Formzwang wesentlich behindert. Dadurch entstehen Spannungen im Formteil, aber die Maße bleiben zunächst in der Werkzeugdimension. Erst wenn die Abkühlung außerhalb des Werkzeugs fortgesetzt wird, kann das Formteil je nach Schwindungspotenzial unterschiedlich schwinden (siehe Verzug). Die Konsequenz sind je nach Prozessführung Maßabweichungen, Verformungen oder auch eingefrorene Spannungen, die sich möglicherweise erst im Einsatz unter Wärme wieder zurückstellen.

Da es bei Spritzgießwerkzeugen nicht möglich ist zu allen Stellen im Formteil die gleiche Druckübertragung zu realisieren (Abb. 4.118) und auch nicht über die gesamte

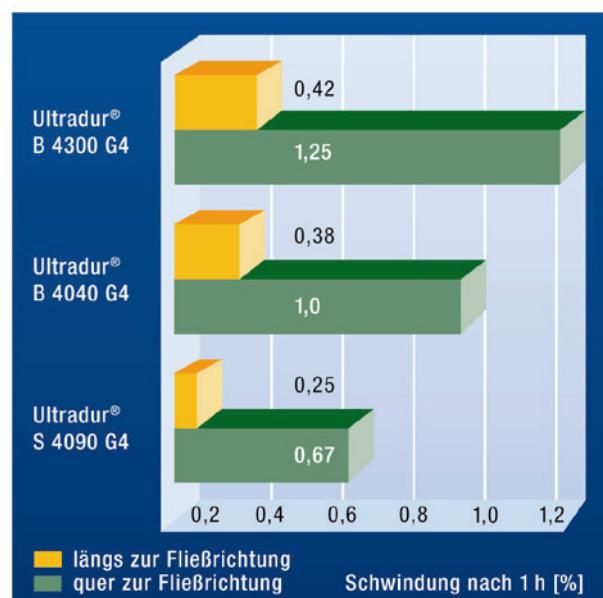
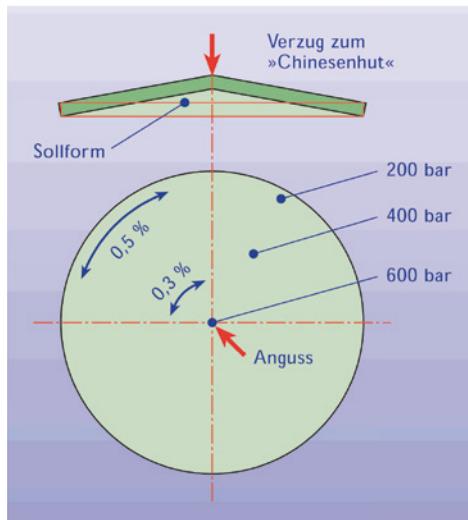


Abb. 4.117: Schwindungsunterschied von glasfaserverstärktem PBT (Testkästchen: 1,5 mm Wanddicke, Massestemperatur = 260 °C, Werkzeugoberflächentemperatur = 80 °C) (BASF SE 2012)



**Abb. 4.118:** Auswirkung von unterschiedlicher Druckwirkung über den Fließweg (Görich 2007)

Werkzeugoberfläche gleichmäßige Oberflächentemperaturen zu erzeugen, müssen Schwindungsunterschiede in gewissem Rahmen akzeptiert werden. Sollten die Formteile diese Abweichungen von der Werkzeuggestalt nicht zulassen, muss man die lokale Schwindung soweit, wie möglich im Vorfeld ermitteln und in der Werkzeuggestalt berücksichtigen.

Oft ist es allerdings, besonders bei komplexeren Geometrien nicht möglich die dafür erforderlichen Vorhersagen sicher treffen zu können, da die Einflussgrößen ziemlich komplex sind. Moderne Simulationsprogramme können heute bei 3D-Berechnung schon recht gut die Schwindung ermitteln, kommen aber bei komplexen Geometrien auch noch an ihre Grenzen. Das liegt weniger an den genutzten Berechnungsalgorithmen, als an der Möglichkeit zur exakten Vorgabe der Randbedingungen. Nicht zuletzt deshalb ist es durchaus üblich, dass die Inbetriebnahme von Spritzgießwerkzeugen mehrere Iterationsschritte in Anspruch nimmt.

#### Wie kann man Schwindung und Verzug nachweisen?

Der Nachweis von Schwindung erfolgt durch händische oder maschinelle Vermessung der Formteile. Die händische Messung erfolgt z.B. durch Vergrößerung im Auflichtprojektor und wird überwiegend bei flächigen Formteilen, Längsmessungen und in der Optimierungsphase eingesetzt. Für die Produktionsüberwachung sind hier auch das Scannen der Formteile und automatische Vermessung mit einem optischen Auswerteprogramm denkbar. Maschinelle Vermessung kann z.B. in klimatisierten Räumen mit Koordinatenmessmaschinen erfolgen. Dies ist v.a. dann erforderlich, wenn Verzug exakt erfasst werden soll. Heutige Messmaschinen erzeugen unmittelbar

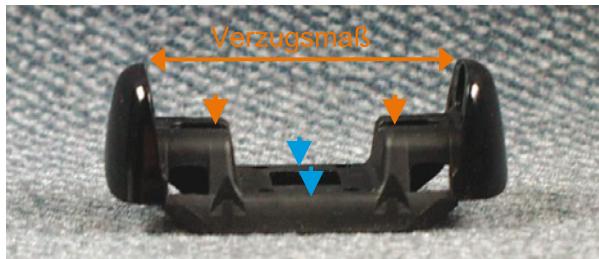
aus der Messung Protokolle für die Dokumentation der Ergebnisse.

#### Wie kann man Schwindung und Verzug mit der Prozessführung beeinflussen?

Die Beeinflussung der Schwindung im Formteilbildungsprozess ist sehr komplex, da hier die Abkühlung und damit die molekulare Beweglichkeit, die Druckübertragung aber auch die Orientierungen und die Kristallisation einen Einfluss haben. Da sich diese Effekte grundsätzlich überlagern, ist eine exakte Vorhersage oft nur schwer möglich.

Die Einflussgrößen auf die obigen physikalischen Vorgänge und damit auf die Schwindung sind im Wesentlichen die Einstellparameter mit Einfluss auf die Wirksamkeit des Volumenausgleichs in der Nachdruckphase, sowie die zur Beeinflussung der thermischen Verhältnisse. Ganz besonders sind das die Nachdruckhöhe, die Nachdruckzeit, die Verarbeitungstemperatur und die Entformungstemperatur. Diese wirken sich in Hinblick auf die Kristallinität aus, aber eben auch auf die Volumenabnahme selber und die Möglichkeit zum Volumenausgleich. Hoher Nachdruck führt zu geringerer Schwindung, aber auf Grund der Druckverluste über den Fließweg zu größeren Inhomogenitäten bei der Druckwirkung und damit auch bei der Schwindung. Ganz besondere Bedeutung kommt hier aber auch der Entformungstemperatur zu. Hohe Entformungstemperaturen erhöhen die Schwindungsanteile außerhalb des Werkzeugs, was in aller Regel zu mehr Verzug führt.

Die Beeinflussung des Verzugs ist weitaus komplizierter. Zunächst ist festzuhalten, dass der Verzug eine Konsequenz aus der Schwindung ist. Tritt auf Grund der Prozes-



**Abb. 4.119:** Unterschiedlicher Verzug durch unterschiedliche Anspritzpunktlagen bei faserverstärkten Werkstoffen:  
Anschnittlage (blau) - Verzug = -0,5 mm,  
Anschnittlage (orange) - Verzug = -0,8 mm  
(Görich 2007)

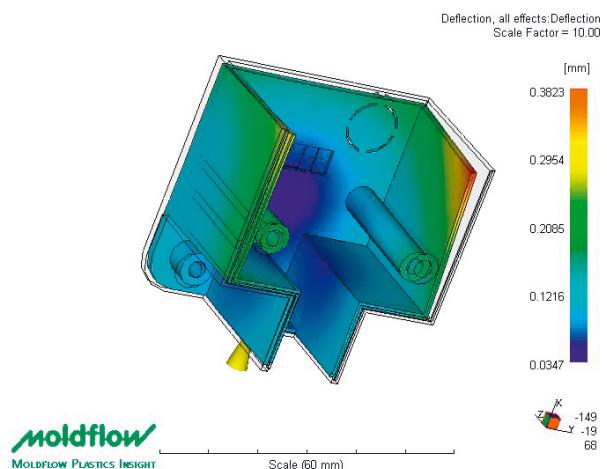
seinstellung oder der Werkzeugkonstruktion, mit Formteilgestalt, Gestalt der Anbindung und der Werkzeugtemperierung eine inhomogene Schwindung im Formteil auf, so kommt es in der Konsequenz zu Verzug.

Neben der Maschineneinstellung selber, spielt hier auch die Werkzeugkonstruktion eine große Rolle. Die Konstruktion beeinflusst durch die Auslegung und Anordnung der Temperierung und die Gestaltung der Anschnitte und deren Anzahl und Lage das Füllbild und damit die Druckübertragung. Abbildung 4.119 zeigt ein Formteil mit unterschiedlichen Anspritzpositionen. Die orange dargestellte Situation führt in der Mitte des Formteils zu einem Zusammenfluss und damit zu einem anderen Orientierungsbild und anderer Druckübertragung. Größere Schwindung/Verzug in der Formteilmittbe ist die Folge. Grundsätzlich muss beim Werkzeug die Abmessung des Anspritzpunkt durchmessers ausreichend groß für eine lange Druckübertragung gewählt sein.

Nicht zuletzt ist der Thermoplast selber mit seinem dazu gehörenden pVT-Verhalten entscheidend für das Schwindungsverhalten. Dazu gehört auch die Berücksichtigung von Füllstoffen, Verarbeitungshilfen und Farben. Alleine unterschiedliche Farben, die oft auch im selben Werkzeug verarbeitet werden, können die Schwindung deutlich beeinflussen. Zuletzt ist auch im Vorfeld eine mögliche Weiterbearbeitung zu prüfen. Wenn dabei höhere Temperaturen zum Einsatz kommen, wie z.B. beim Lackieren oder Galvanisieren, kommt es zu Nachschwindung und damit zu weiterer Formveränderung.

Die wesentlichen Einflussparameter zur Reduktion von Schwindung und Verzug sind:

- Nachdruckhöhe (erhöhen)
- Nachdruckzeit ausreichend lang
  - Schwindungsausgleich durch nachgeführte Schmelze
- Entformungstemperatur (reduzieren)
  - geringere Schwindung außerhalb des Werkzeugs (Schwindung, Verzug)



**Abb. 4.120:** Moldflow-Simulation für die Schwindungs-/Verzugsanalyse mit einem 10-fach Verstärkungsfaktor (Moldflow 2007)

- Werkzeugtemperatur (erhöhen)
  - leicht höhere aber homogenere Schwindung, längere Druckwirkung möglich

## Fazit

Thermoplaste nehmen gegenüber anderen Konstruktionswerkstoffen bei der Verarbeitung deutlich an Volumen und damit auch in ihren Abmessungen ab. Tritt diese Schwindung durch thermische Inhomogenitäten oder Druckinhomogenitäten über das Formteil unterschiedlich auf, so kommt es zu Verzug und damit zu Formabweichungen gegenüber der Werkzeuggeometrie.

Beides ist bei Spritzgießteilen im Prozess nicht gänzlich zu vermeiden und muss daher im Vorfeld in der Werkzeugkonstruktion berücksichtigt werden. Es kann dabei durch vielfältige gestalterische Maßnahmen der Formteilkonstruktion sowie der thermischen Auslegung korrigiert werden.

Eine exakte Voraussage von Schwindung und Verzug ist noch immer kritisch. Die Komplexität der Einflussgrößen und die Schwierigkeit der Voraussage der Randgrößen für eine Simulation lassen oft nur tendenzielle Aussage zu, die aber schon eine große Hilfestellung darstellen.

### 4.6.2.3 Kristallisation

#### Was ist Kristallisation?

Bei einer Teilgruppe der Thermoplaste kommt es im Verlaufe der Abkühlung zum kristallisieren der Moleküle. Dabei erreichen die Molekülketten eine Ordnungsstruktur, die den Thermoplasten in diesen Bereichen hochfest

macht und das Volumen deutlich abnehmen lässt. Die Moleküle sind dabei weitestgehend parallel zueinander angeordnet und bilden in Summe kristalline Überstrukturen, so genannte Sphärolithe. Die Größe der während der Kristallisation entstehenden Kristallite hängt davon ab, wie leicht sich die Polymerketten in die Kristallstruktur einordnen. Dies liegt zum einen an der Molekülstruktur selber, aber auch an der Kristallisationskinetik.

Die Kristallisation im Thermoplasten findet nicht vollständig statt. Deshalb heißen diese Materialien auch teilkristalline Thermoplaste. Je nach Molekülstruktur und Prozessführung kristallisieren die teilkristallinen Thermoplaste beim Spritzgießprozess bis zu 80 %. Der verbleibende Anteil bleibt amorph.

Der Thermoplast gibt während der Kristallisation Wärme ab, die zusätzlich aus dem Werkzeug abgeführt werden muss. Die Kristallisation führt beim Abkühlen zu einer deutlich stärkeren Schwindung, als bei amorphen Thermoplasten (siehe Schwindung). Teilkristalline Werkstoffe zeigen bis auf wenige Ausnahmen eine eher milchige Struktur, die im Wesentlichen durch die enge Molekülpackung in den kristallinen Bereichen entsteht. Amorphe Werkstoffe dagegen können hochtransparent sein.

#### Wie entsteht Kristallinität?

Die Kristallisation findet im Verlaufe der Abkühlung bei der Phasenumwandlung von „flüssig“ zu „fest“ statt. Sowohl die Keimbildungs- als auch die Wachstums geschwindigkeit der Kristallite sind dabei deutlich temperatur- und zeitabhängig.

Genau genommen durchläuft der Thermoplast bei der Abkühlung einen Keimbildungsprozess und erst dann können Kristallite wachsen, welche dann in sphärolithische Überstrukturen eingebunden werden. Dieser Temperaturbereich ist sehr eng und bei teilkristallinen Thermo-

plasten deutlich unterschiedlich, was die innere Struktur erheblich von den Abkühlbedingungen abhängig macht. Bei Erwärmung über die Kristallitschmelztemperatur lösen sich diese Überstrukturen wieder vollständig auf und bilden sich beim Abkühlen erneut. Der Vorgang der Kristallisation ist temperatur-, druck- und zeitabhängig und lässt sich daher auch durch die Wahl der Prozessführung erheblich beeinflussen. So kann z.B. bei sehr träge kristallisierenden Polyestern, wie PET, die Kristallisation weitestgehend vermieden werden, wenn die Kristallisationstemperaturbereich schnell durchlaufen wird. PET-Flaschen, die weitestgehend transparent (amorph) bleiben sollen, nutzen dieses Verhalten. PBT-Steckverbinder fordern dagegen genau deshalb hohe Werkzeugtemperaturen, um einen ausreichend hohen Kristallisationsgrad trotz der ähnlich langsamen Kristallisation zu erreichen. Bei der Kristallinität muss man je nach Kristallisationsverlauf unterscheiden, welche innere Struktur sich einstellt. Findet die Kristallisation bei langsamem Abkühlgeschwindigkeiten statt, wie z. B. im Formteilkern, so bilden sich wenige, große Sphärolithe aus. Demgegenüber sind die Kristallitsstrukturen bei schneller Abkühlung gar nicht vorhanden, oder zumindest sehr klein. Dies findet man in der Formteilwand und den Scherschichten. Auch große Sphärolithe sind aber nicht größer als 1/10 mm. Abbildung 4.121 zeigt eine typische Kristallitstrukturverteilung über der Wanddicke.

In den Schichten hoher Scherströmung und damit auch hoher Orientierung bilden sich meist höhere Kristallisationsgrade aus. Die Ausrichtung der Moleküle vereinfacht die Anordnung zu Kristallitstrukturen erheblich und führt damit trotz höherer Abkühlgeschwindigkeiten in dieser Schicht zu höheren Kristallisationsgraden (scherinduzierte Kristallisation). Besonders bei Polyolefinen ist dieses Verhalten zu beobachten.

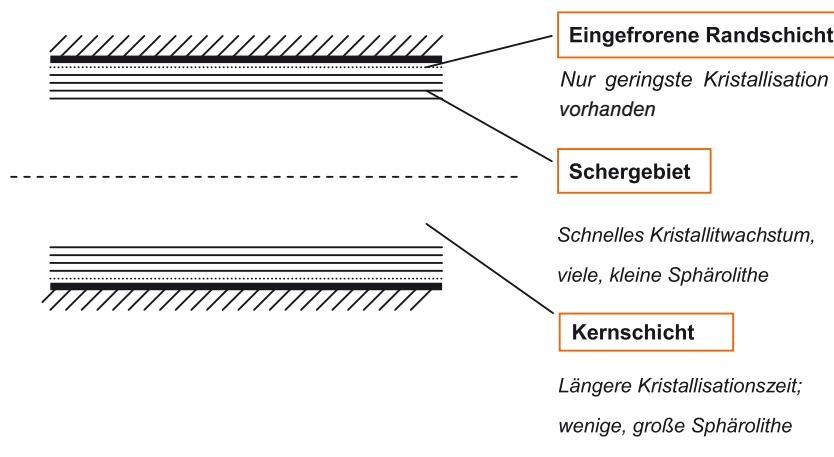


Abb. 4.121: Kristallitstruktur über die Wanddicke bei einem Thermoplasten (Jae ger 2007)

Die Kristallitstruktur ist zudem maßgeblich von den Thermoplasten und seinen Füllstoffen abhängig. So können spezielle Nukleierungsstoffe die Kristallisation derart beschleunigen, dass höhere Kristallisationsgrade entstehen, aber auch die Sphärolithe selber wegen der hohen Kristallisationsgeschwindigkeit deutlich kleiner sind.

#### Wie wirkt sich Kristallinität aus?

Kristallisation wirkt sich durch eine deutliche Volumenabnahme bei der Abkühlung aus. Die Volumenabnahme von teilkristallinen Materialien ist bis zu 2,5 mal größer, als die amorpher Thermoplaste. Die Vorausbestimmung von Schwindung und Verzug wird durch dieses zusätzliche Phänomen nochmals schwieriger aber auch wichtiger, um zu große Maßabweichungen vermeiden zu können. Viele technische Teile wie Steckverbinder oder Zahnräder, die hohe Anforderungen an die Maßhaltigkeit haben, sind wegen ihrer Produktanforderungen aus teilkristallinen Materialien, wie PA, POM oder PBT.

Wie später noch erläutert, ist die Kristallinität in der Randschicht deutlich von der Werkzeugtemperatur abhängig. Niedrige Werkzeugtemperaturen verhindern in der Randschicht die Kristallisation weitestgehend. Bei anschließender Wärmeeinbringung, oder auch durch die Wärmeenergie im Formteilkern nach der Entformung kommt es zu Nachkristallisation und damit zu starker Schwindung und Verzug außerhalb des Werkzeugs. Abbildung 4.122 zeigt das Phänomen am Beispiel des PBT mit 30 % GF.

Kristallinität wirkt sich auch bei den mechanischen Eigenschaften aus. Höhere Kristallinität führt zu höherer Festigkeit, aber auch Sprödigkeit, während geringere Kristallinität durch die verbleibenden amorphen Anteile zu höherer Schlagzähigkeit bei Einsatztemperatur führt, da diese üblicherweise über der Erweichungstemperatur liegt (Abb. 4.123).

Im Spritzgießformteil findet man häufig beide Zustände. Im Rand liegt nur sehr geringe Kristallinität vor, während im Formteilkern, durch die langsamere Abkühlung höhere Kristallisationsgrade und größere Sphärolithe erreicht werden können. Werden auch im Formteilkern eher feinere Gefüge gewünscht, z.B. um auch hier die Zähigkeit zu verbessern, kommen Nukleierungsmittel zum Einsatz, die die Kristallisationstemperatur nach oben verschieben und damit eine frühzeitigere und schnellere Kristallisation ermöglichen.

Kristallisation bringt zusätzlich Wärmeenergie in den Prozess, die aus dem Werkzeug abgeführt werden muss. Häufig führt dies zu verlängerten Zykluszeiten. Man muss jedoch auch beachten, dass durch die engere Packung der Moleküle nach der Kristallisation die Wärmeübertragung

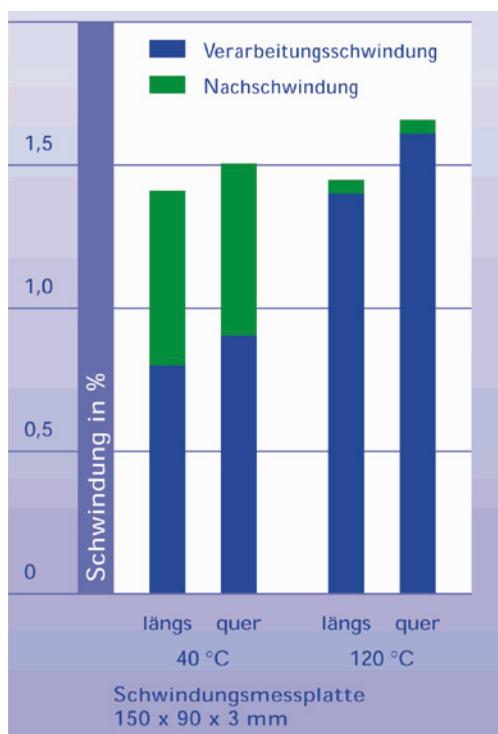


Abb. 4.122: Schwindung bei PA, unverstärkt bei unterschiedlichen Werkzeugtemperaturen (Bayer Material Science 2005)

für die verbleibende Abkühlzeit deutlich besser wird. Insbesondere bei den Thermoplasten mit hohem Kristallisationsgrad, wie PE und POM sind die Gesamtkühlzeiten daher meist nicht länger als für amorphe Thermoplaste.

#### Wie kann man Kristallisation nachweisen?

Aus technischer Sicht interessant ist es eine Aussage über den Grad und die Struktur der Kristallisation zu erhalten. Damit verbunden sind oft mechanische Kennwerte, wie Festigkeit, Zähigkeit und z.B. auch Abriebsfestigkeit bei Zahnrädern.

Eine mögliche Messmethode für die Kristallinität, d.h. für den Kristallisationsgrad ist die DSC-Analyse. Die Kristallinität kann dabei durch das Messen der Schmelzwärme bestimmt werden. Sie zeigt einerseits den Temperaturbereich der Kristallisation und ebenso den speziellen Kristallisationsgrad der Thermoplaste nach der Verarbeitung. Alternativ stehen mikroskopische Methoden zur Verfügung, die eine Aussage über Kristallitstruktur über den Querschnitt ermöglichen.

Über das gesamte Formteil kann auch die Dichtemessung eine erste Aussage liefern. Möglichkeiten der Dichtemesung mittels Ultraschall erlauben auch über den Querschnitt unterschiedliche Kristallisationsgrade anhand der Dichte zu erfassen.

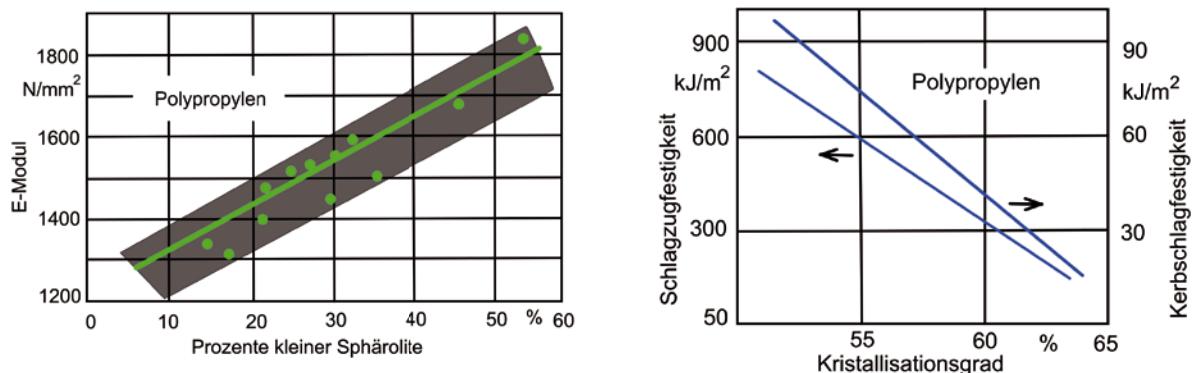


Abb. 4.123: Mechanische Kennwerte in Abhängigkeit des Kristallisationsgrads (Stitz, Keller 2004)

#### Wie kann man Kristallinität mit der Prozessführung beeinflussen?

Kristallinität wird im Wesentlichen durch die Temperaturführung bestimmt. Hier spielt es eine Rolle wie schnell der Kristallisationstemperaturbereich durchlaufen wird. Da die Kristallisation bei den meisten Thermoplasten aber sehr schnell stattfinden kann, erfolgt zwar eine Kristallisation, aber diese führt je nach Abkühlgeschwindigkeit zu unterschiedlichen Kristallisationsgraden und zu anderen Kristallitstrukturen. Die Werkzeugtemperatur hat hier einen besonderen Einfluss, da damit die Ausbildung der Kristallisation in der Randschicht beeinflusst wird. Finden sich hier keine oder nur geringe kristalline Strukturen, so kommt es im Anschluss unter Wärme zu mehr oder weniger ausgeprägter Nachkristallisation mit entsprechender Gestaltveränderung am Formteil (Abb. 4.122).

Die Kristallisation wird allerdings auch durch die Einspritzgeschwindigkeit beeinflusst, da eine hohe Orientierung der Moleküle durch eine ausgeprägte Scherströmung das Bilden von Kristallitstrukturen deutlich vereinfacht. Auch die Nachdruckphase, die die Orientierung im Kern beeinflusst, hat damit einen Einfluss auf den erreichbaren Kristallisationsgrad. Hohe Einspritzgeschwindigkeiten führen außerdem zu gleichmäßigerer Temperaturverteilung nach dem Einspritzen und damit zu einer gleichmäßigeren Kristallisation über den Fließweg.

Daneben spielt es eine Rolle die Auswirkung der Kristallinität auf die Formteildimensionen zu betrachten. Wie bereits diskutiert nimmt das Volumen beim Abkühlen deutlich stärker ab und muss mit Materialnachführung während der Nachdruckphase ausgeglichen werden. In der Nachdruckphase muss also mehr Material nachgeführt werden, als bei amorphen Thermoplasten, was eine ausreichend lange Druckübertragung erfordert. Dies muss bei der Gestaltung der Angussgeometrie beachtet werden.

Auch muss die Temperaturführung im Werkzeug engeren Grenzen folgen, damit die stärkere Schwindung nicht zu größeren Schwankungen bei den Maßabweichungen oder Verzug führen kann. Besondere Bedeutung hat hier die Schmelztemperatur und die Werkzeugtemperatur. Der Einfluss der Werkzeugtemperatur beschränkt sich v.a. auf den wandnahen Bereich. Abbildung 4.122, rechts zeigt, welche Konsequenz die Werkzeugtemperatur auf das Kristallisationsverhalten hat.

Hier ist auch zu beachten, dass dieses Phänomen der Nachkristallisation nicht nur erst im Einsatz erfolgen kann, sondern bei zu hohen Entformungstemperaturen (kurze Kühlzeiten) auch unmittelbar nach dem Entformen. Dann wärmt der noch schmelzflüssige, warme Kern den Randbereich wieder auf und kann die Nachkristallisation so fördern. Die Konsequenz wären signifikante Schwindung und Verzug. Die Nachkristallisation kann auch durch anschließendes Tempern beschleunigt werden, um frühzeitig die Endmaße zu erreichen.

#### 4.6.2.4 Eigenspannungen

##### Was sind Eigenspannungen?

Eigenspannungen sind mechanische Spannungen im Bauteil, die insbesondere durch die über die Wanddicke unterschiedliche Schwindung entstehen. Diese Spannungen liegen im lastfreien Zustand an und werden im Einsatz mit den funktionsbedingten äußeren Spannungen überlagert.

##### Wie entstehen Eigenspannungen?

Im Verlauf der Abkühlung besteht über den Formteilquerschnitt ein ausgeprägtes Temperaturgefälle von der Formteilwand zum Kern. Dies führt über den Querschnitt zu enormen Unterschieden bei der Schwindung, dem Be-

streben zur Orientierungsrückstellung und ebenso der Kristallisation.

Über die Wanddicke kommt es z.B. im Wandbereich unmittelbar nach dem Einspritzen zum Erstarren der Randschicht. Hohe Orientierungen und geringe Kristallinität sind die Folge. Eine weitere Volumenabnahme findet dort nicht statt. Im Formteilkern dagegen können das Volumen weiter abnehmen, die Orientierungen sich zurückstellen und die Kristallisation weiter voranschreiten. Alle diese physikalischen Prozesse im Kern führen dazu, dass der Kernbereich an der erstarrten Außenhaut in alle Dimensionen ziehen wird. Alles zusammen führt daher in Abhängigkeit von den Prozessbedingungen bis zum abgekühlten Bauteil zu inneren Spannungen.

Je stärker diese Phänomene über den Fließweg und die Wanddicke unterschiedliche ablaufen, je deutlicher sind die Eigenspannungen im Formteil. Eine typische Verteilung der Schwindung und der resultierenden Spannungen über die Wanddicke zeigt Abbildung 4.124 am Modell der entkoppelten Schichten.

Ganz besonders stark ist dieses Phänomen an Kanten und Ecken festzustellen. Hier treten die beschriebenen Eigen-

spannung dreidimensional auf und führen zu einer Verstärkung des Effekts.

Daneben kommt es während der Abkühlung des gesamten Formteils im Werkzeug ebenso zu Spannungen, da die Volumenabnahme der Thermoplaste im Werkzeug vom Formteil nicht völlig zwanglos mitgeführt werden können. Je nach Formteilgestalt kommt es durch die Einspannung im Werkzeug zu lokal weiteren Spannungen im Teil durch die behinderte Schwindung.

#### Wie wirken sich Eigenspannungen aus?

Die über den Querschnitt unterschiedliche Abkühlung führt zu Zugspannungen im Kern und zu Druckspannungen im Randbereich des Formteils. Da diese Eigenspannungen im Einsatzfall durch die Lastspannungen überlagert werden, kann es im Einsatz zu frühzeitigen Versagen kommen. Bei Biegebelastungen kann das Verhalten positiv sein, während es in den meisten Fällen eher lasteinschränkende Wirkung hat.

Häufiger tritt ein lokales Versagen auf, was sich in Form einer Spannungsrissbildung zeigt. Kleinste Spannungsrisse führen zu Kerbwirkung und sind insbesondere bei stoßartigen Belastungen kritisch. Bei teilkristallinen Thermoplasten ist die Spannungsrissempfindlichkeit geringer, als bei den amorphen, spröden Werkstoffen.

Nach dem Entformen können sich die Spannungen zurückstellen und streben den Gleichgewichtszustand an. Die Folge sind weitere Verformungen des Formteils (Verzug). Nicht zu unterschätzen sind die Spannungen bei der Weiterbearbeitung der Formteile nach dem Spritzgießen, durch mechanische Bearbeitung oder auch Schweißen oder Galvanisieren. Die Erwärmung der Oberflächen führt fast immer auch zu lokalen Formänderungen.

#### Wie lassen sich Eigenspannungen nachweisen?

Der Nachweis von inneren Spannungen erfolgt durch die Lagerung in spannungsrissauslösenden, korrosiven Medien. Nach einer vorgegebenen Lagerzeit in definierten Medien treten ausgelöst durch die Zugspannungen im Formteil leicht Spannungsrisse an den kritischen Stellen auf und zeigen damit die Orte von zu hohen Spannungen im Formteil deutlich auf. Das Verfahren führt zur bleibenden Schädigung des Formteils.

#### Wie kann man Eigenspannungen mit der Prozessführung beeinflussen?

Eigenspannungen sind weitestgehend durch die Temperaturführung zu beeinflussen. Schnelle Abkühlung in der Randschicht und langsamere Abkühlung im Formteilkern lassen sich insbesondere durch die Werkzeug- und Schmelzetemperatur beeinflussen. Die Werkzeugtempe-

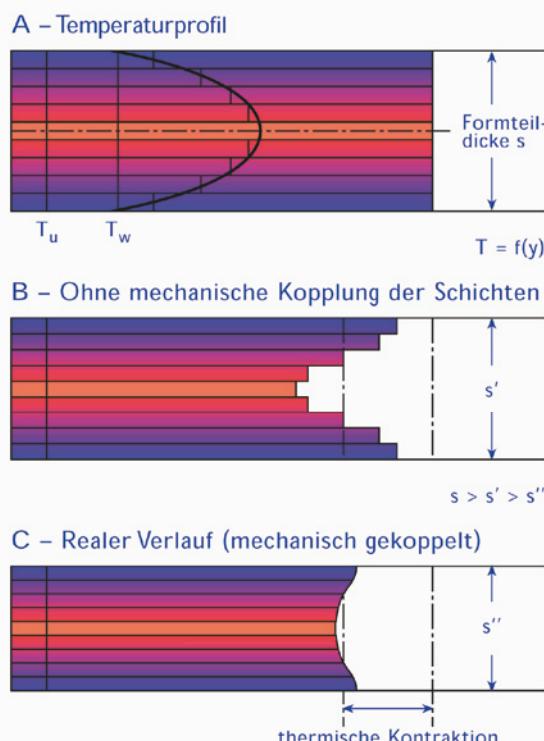


Abb. 4.124: Temperaturprofil und die Entstehung von Eigenspannungen durch unterschiedliche Schwindung über den Querschnitt (Bayer Material Science 2005)