

**Möglichkeiten und Nutzen der Simulationstechnik**  
**( Grundlagen )**

**Joachim Gundlach, Christoph Honsel und Konrad Weiß**  
**Roetgen 1997**

## **INHALT**

<b>1 PRAKTISCHES ZIEL DER SIMULATION</b>	<b>1–3</b>
<b>2 GRUNDLAGEN DER SIMULATION</b>	<b>2–4</b>
<b>2.1 Finite Elemente Methode FEM, FE - Konstruktion</b>	<b>2–6</b>
2.1.1 Geometrieerstellung (Interfaces)	2–8
<b>2.2 Formfüllsimulation</b>	<b>2–9</b>
<b>2.3 Erstarrungssimulation</b>	<b>2–10</b>
2.3.1 Innere Wärmeübergänge	2–13
2.3.1.1 Validierung	2–13
2.3.2 Latente Wärme	2–14
<b>2.4 Die Berechnung von Eigen- und Lastspannungen</b>	<b>2–15</b>
2.4.1 Plastischer Ansatz	2–16
<b>2.5 Simulation erstarrungsmorphologischer Kriterien</b>	<b>2–19</b>
<b>3 AUFBAU DER PROZESSKETTE</b>	<b>3–21</b>
<b>3.1 Simulation von „fit and function“</b>	<b>3–22</b>
<b>3.2 Formfüllsimulation</b>	<b>3–23</b>
<b>3.3 Erstarrungssimulation</b>	<b>3–24</b>
<b>3.4 Simulation von Eigenspannung und Verzug</b>	<b>3–25</b>
<b>3.5 Thermophysikalische und thermomechanische Daten</b>	<b>3–26</b>
<b>4 GIEß- UND SERIENPROZEß</b>	<b>4–27</b>

## 1 Praktisches Ziel der Simulation

Was heißt eigentlich **Simulation**? Simulation bedeutet nicht die Vortäuschung falscher Tatsachen oder die Darstellung einer unrichtigen Realität.

*„ Unter Simulation versteht man die Darstellung des Verhaltens eines physikalischen oder abstrakten Systems durch das Verhalten eines Ersatzsystems (Modell), mit dessen Hilfe man die Durchführung einer Verhaltensstudie vereinfachen will.“ / Grabowski H./*

**Simulation** bedeutet hier die Schaffung eines physikalisch - mathematischen Modells, welches die reale Einrichtung, also das Gesamtgießsystems möglichst genau im Computer darstellt.

Durch den Einsatz der Prozeßsimulation können die Prozeßabläufe 3 dimensional (3D) am Computer definiert, gesteuert, berechnet und dargestellt werden. Durch Variation der Einzelparameter für die Simulation des Prozesses werden Abhängigkeiten und Wirkungen, Veränderungen in den Abläufen und im Gesamtergebnis deutlich und können bewertet werden.

**Ziel** der numerischen Simulation ist es Konstruktionen und Gießprozesse am Computer funktions- und maßgerecht zu entwickeln und somit praktische Versuche einzusparen. Zum einen können so Ressourcen gespart werden, zum anderen und darüberhinaus werden Entwicklungs- und Prozeßzeiten verkürzt und Qualitätsniveaus gesteigert.

Die rechnergestützte Betrachtung einer gesamten Prozeßkette von der Konstruktion bis hin zum Qualitätsmanagement stellt einen **ganzheitlichen Entwicklungsansatz** dar, der es ermöglicht Dinge nicht nur sequentiell zu begreifen und zu verändern, sondern in seinen Abhängigkeiten und Bedingungen zu verstehen und zu verbessern.

Die Entwicklung z.B. der Anschnitt- und Speisertechnik für ein bestimmtes Gießverfahren, bestimmte Stoffe und für die Einstellung einer höchstmöglichen Qualität sollte in einer Prozeßkette betrachtet werden, um möglichst alle am Entstehungsprozeß beteiligten Parameter und deren Abhängigkeiten bestimmen zu können.

## 2 Grundlagen der Simulation

Zum besseren Verständnis der rechnergestützten Simulation werden im Folgenden einige grundsätzliche Voraussetzungen der Funktionsweise sowie des Gebrauchs des Softwarepackets **SIMTEC** erläutert.

Die Anwendung von **SIMTEC** beruht auf der Methode der finiten Elemente. Die Finite-Elemente-Methode (FEM) wurde zunächst als Lösung von Spannungsberechnungen herangezogen. Sie stand zwar schon Mitte der 20er Jahre als theoretisches Mittel bei der Lösung von bestimmten partiellen Differentialgleichungen zur Verfügung, jedoch war ihre praktische Anwendung erst mit Hilfe moderner Rechner ( um ca. 1960 ) möglich.

Obwohl die Beschreibung dieser Methode mehr mathematisches Verständnis als die meisten anderen Näherungsverfahren erfordert, findet sie immer mehr Anwendung und Anwendungsbereiche. Das beruht nicht zuletzt darauf, daß die FEM auf jede beliebige Geometrie sowohl zur Spannungsberechnung als auch zur Lösung bestimmter partieller Differentialgleichungen (beispielsweise für Wärmeleitungsprobleme) angewendet werden kann.

Durch den Einsatz der Prozeßsimulation können die Prozeßabläufe 3 dimensional (3D) am Computer definiert, gesteuert, berechnet und dargestellt werden. Durch Variation der Einzelparameter für die Simulation des Prozesses werden Abhängigkeiten und Wirkungen, Veränderungen in den Abläufen und im Gesamtergebnis deutlich und können bewertet werden.

Die Arbeit mit einem Finite Elemente System, wie der Gießprozesssimulation findet in 3 Schritten statt:

<p><b>1. PREPROCESSING</b> Modellierung von Gußteil und Gießsystem</p>	<p>leistet die</p>	<p><b>FEM - Konstruktion:</b> - internes 3D Konstruktionsprogramm - CAD- und FE-Schnittstellen</p>
<p><b>2. MAINPROCESSING</b> Definition der Prozeß- und Berechnungsparameter</p>	<p>leistet die</p>	<p><b>Berechnung:</b> - Prozeßsimulation - thermische Spannung - Verzug - Festigkeit - Gefügeausbildung</p>
<p><b>3. POSTPROCESSING</b> Auswertung der Simulationsergebnisse</p>	<p>leistet die</p>	<p><b>Ergebnisdarstellung:</b> - farbige 3D-Darstellung der Ergebnisse - Auswertung spezieller Kriteriumsfunktionen - CAD/CAM, CAE, CAQ, CAP, FE-Schnittstellen</p>

Abb. 2-1: Struktur und Funktion eines Finite Elemente Programms

Die Benutzung des Programms ist nach 5tägiger Schulung für Personen mit unterschiedlichsten Bildungsabschlüssen möglich. In den letzten 10 Jahren wurden cirka 200 Personen mit Berufsabschlüssen vom Former, Gießereimechaniker bis zum promovierten Forscher oder Hochschulprofessor in der Anwendung der Simulation geschult. Die Einarbeitungszeit in der praktischen Softwareanwendung beträgt je nach Fähigkeit und Engagement 2 - 6 Wochen, Hard- oder Softwarekenntnisse sind keine Voraussetzung zur Simulationsschulung.

Die physikalisch - mathematischen Grundlagen entsprechen programmierten Systemen innerhalb der Simulationsberechnungssoftware. Zusätzlich stehen dem Benutzer thermophysikalische und thermomechanische Datenbanken sowie Geometriedatenbanken zur Verfügung. Die Simulationsgrundlagen, -algorithmen und -vorgehensweisen wurden in verschiedenen nationalen und internationalen Forschungsprojekten verifiziert.

Abhängig von der Rechnerleistung können Variationsrechnungen innerhalb von Minuten durchgeführt werden. Die Auswertung der Simulationsergebnisse erfolgt unmittelbar am Simulationssystem. Die Ergebnisse werden in hochauflösender Farbgraphik auf einem Farbmonitor dargestellt. Die Dokumentationen zu den einzelnen Arbeitsstufen und zu den Ergebnissen können direkt farbig ausgedruckt werden, so daß die Ergebnisse als 3D - Farbgrafik genutzt und archiviert werden können.

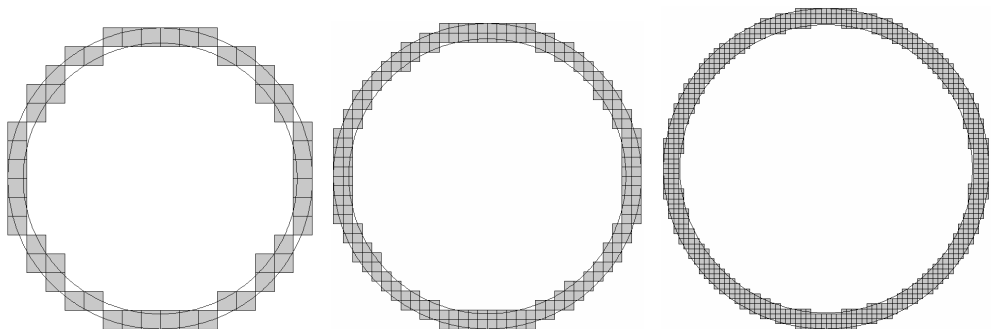
## **2.1 Finite Elemente Methode FEM, FE - Konstruktion**

Die **FEM** ist aufgrund der Tatsache, daß Geometrien konstruktionsgenau vernetzt werden können besonders für die Konstruktion und Entwicklung von Bauteilen geeignet.

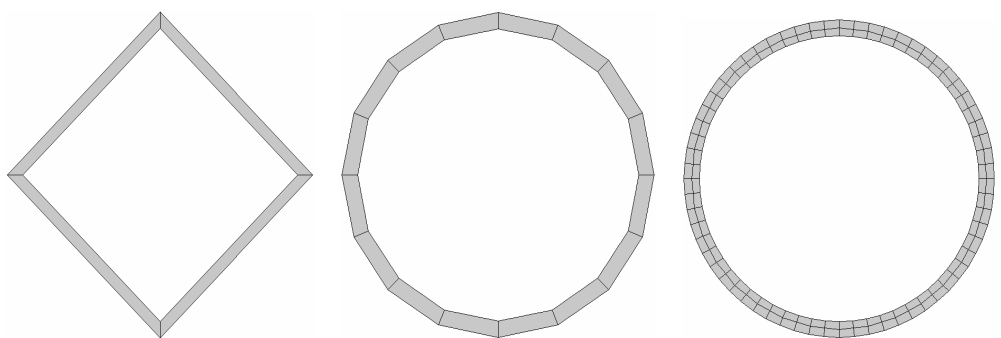
Die **FEM** ist ein numerisches Näherungsverfahren mit denen physikalisch- technische Vorgänge berechenbar werden. Häufig können solche Vorgänge nur durch (partielle) Differentialgleichungen beschrieben werden, die für allgemeine Fälle nicht analytisch gelöst werden können. Verschiedenen Methoden ist gemeinsam, daß eine zu berechnende Geometrie in kleine Grundelemente zerlegt wird. Im Vergleich sind bei-

spielsweise bei der Finiten Differenzen Methode **FDM** grundsätzlich nur Quader als Grundelemente zugelassen, dagegen kann die **FEM** mit fast beliebigen ja sogar mit krummlinigen Elementen arbeiten. Ist man auf Quader als Grundelement angewiesen, so führt das zwangsläufig zu einer relativ schlechten Geometrieapproximation, da technische Bauteile normalerweise nicht ausschließlich in rechten Winkeln angelegt sind.

Zunächst scheint das nur ein optisches Problem zu sein, bei näherer Betrachtungsweise ist es jedoch weit mehr als das. Es ist zum Beispiel nicht möglich einen dünnwandigen Hohlzylinder mit konstanter Wandstärke in Quadern zu vernetzen, was natürlich dazu führen muß, daß eine solche Wand z. B. bei einer Erstarrungsberechnung über den Umfang verteilt nicht die gleiche Temperaturverteilung haben kann, es sei denn sie wäre so ungenau, daß die unterschiedliche Wandstärke sich gar nicht bemerkbar macht.



48 Knoten; 108 Elemente    176 Knoten; 296 Elemente    632 Knoten; 876 Elemente



8 Knoten; 4 Elemente    32 Knoten; 16 Elemente    192 Knoten; 128 Elemente  
(bei der häufig vorgenommen Vernetzung in Dreiecken verdoppelt sich die Anzahl der Elemente)

Abb. 2.1-1: Vergleich der Vernetzungsmöglichkeiten zwischen FEM und FDM

### 2.1.1 Geometrierstellung (Interfaces)

Die Gußteil- und Form- oder Werkzeuggeometrie wird mit dem Preprocessor (Automatischer Netzgenerator) erstellt. Interfaces (Schnittstellen) ermöglichen die Übernahme von Geometriedaten aus CAD- und anderen FEM - Systemen (VDA/FS, STL, IGES, CAEDS, IDEAS, PATRAN Schnittstelle). Die weitere Aufbereitung der Geometrie erfolgt mit entsprechenden CAD-tools innerhalb des FEM - Programms Alle Komponenten des Gießsystems werden am Bildschirm konstruiert.

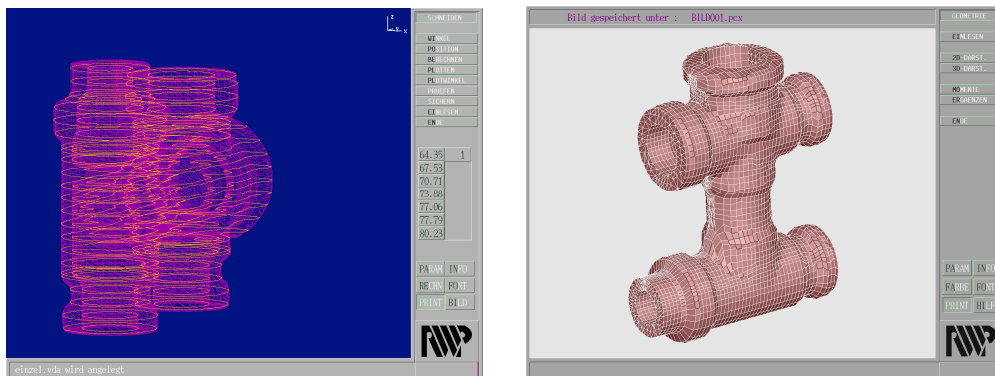


Abb. 2.1.1-1: Automatische FEM Vernetzung eines STL - files

Wie im Vorausgehenden beschrieben basiert **SIMTEC** auf der Finite-Elemente-Methode (FEM). Bei der Eingabe der Geometrie wird das Bauteil in Elemente zerlegt. Für die einzelnen Materialien (z.B. Werkstoff, Formmaterial, Kerne, Isolierung, Speiser, Kühlung und Kokille) werden entsprechende Stoffnummern definiert und farblich zugeordnet. Sämtliche Gießparameter, wie Gießtemperatur, Gießzeit, Wärmeübergänge, Randbedingungen, etc. werden exakt vorgeben. Nach der Konstruktion der Geometrie erfolgt die Berechnung.



## 2.2 Formfüllsimulation

Entsprechend der „klassischen“ Gleichgewichtsbetrachtung für den Knotenpunkt eines finiten Elementes gilt:

$$\mathbf{R} = \sum \mathbf{F}$$

mit  $\mathbf{R}$ : = äußere Kräfte

$\sum \mathbf{F}$ : = Summe der inneren Kräfte

Dabei sollen unter  $\sum \mathbf{F}$  die folgenden physikalischen Einzelkräfte berücksichtigt werden

$$\sum \mathbf{F} = \mathbf{F}_T + \mathbf{F}_V + \mathbf{F}_R + \mathbf{F}_D$$

mit  $\mathbf{F}_T$ : = Trägheitskräfte

$\mathbf{F}_V$ : = Volumenkräfte

$\mathbf{F}_R$ : = Reibungskräfte

$\mathbf{F}_D$ : = Druckkräfte

Die einzelnen Kräfte können berechnet werden aus:

$$\mathbf{F}_T = \mathbf{a} \Delta m$$

$$\mathbf{F}_V = \mathbf{g} \Delta m$$

$$\mathbf{F}_D = p \Delta A$$

Zur Berechnung der Reibungskräfte werden die an einem Fluidelement wirkenden Spannungen

$$\sigma_{ij} = -\delta_{ij} \left( p + \frac{2}{3} \eta \frac{\partial v_k}{\partial x_k} \right) + \eta \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right)$$

zugrundegelegt.

Diese Gleichung entspricht formal dem dreidimensionalen HOOK'schen Gesetz, aus dem die Knotenpunktkräfte bei der linear-elastischen Spannungsberechnung ermittelt werden. Für die Formfüllberechnung können die reibungsbedingten Kräfte aus dem Prinzip der virtuellen Arbeit für linear veränderliche Geschwindigkeiten innerhalb eines Elementes bestimmt werden. Läßt man in einem ersten Schritt die Trägheitskräfte beiseite, so führt dieser Ansatz auf ein lineares

Gleichungssystem, bei dem für jeden Knotenpunkt die drei unbekannt-ten Geschwindigkeitskomponenten aus den drei Gleichgewichtsbedin-gungen ( $\Sigma F_x = 0$ ;  $\Sigma F_y = 0$ ;  $\Sigma F_z = 0$ ) berechnet werden können.

Ausgangspunkt einer Formfüllberechnung ist zum Beispiel ein vollstän-dig gefüllter Anschnitt. Um den Berechnungsaufwand gering zu halten wird die Gleichgewichtsbetrachtung nur an der Fluidfront durchgeführt. Dies führt zu einer erheblichen Verringerung des Aufwandes, eine de-taillierte Betrachtung der Füllverhaltens ist jedoch weiterhin gegeben. An der Füllfront erhält man aus der FEM-Berechnung damit für jeden Knotenpunkt der Front einen Geschwindigkeitsvektor, aus dem die neue Front berechnet werden kann.

### 2.3 Erstarrungssimulation

Im **SIMTEC** Berechnungsmodul wird die *FOURIER*'sche Wärmelei-tungsgleichung unter Einbeziehung entsprechender Anfangs- und Randbedingungen gelöst. Die *DIRICHLET*'sche Randbedingung gibt dabei eine wählbare Temperatur auf dem Rand ( oder Teilen davon ) vor. Durch die *CAUCHY*-Randbedingung läßt sich sowohl die Wärme-isolation auf der Oberfläche als auch der Wärmeverlust durch Konvek-tion einbringen. Durch eine geeignete Modifikation der Gleichung läßt sich auch die Wärmestrahlung berücksichtigen.

Die Lösung der Gleichungen kann praktisch durchgeführt werden, in dem man die Geometrie in einfache geometrische Elemente unterteilt, das Integral über jedes Element berechnet und anschließend die Re-sultate aufsummiert. Zerlegt man z.B. die Struktur in Tetraeder und werden diese auf Einheitstetraeder transformiert, so kann unter An-nahme einer linearen Ansatzfunktion die entsprechende Integration problemlos vorgenommen werden.

Bei der Methode der finiten Elemente wird für jeden Punkt in der Geo-metrie die Temperatur für jeden Zeitpunkt errechnet und in einen Da-tensatz geschrieben. Dieser Datensatz wird an die abschließende Er-gebnisauswertung, das heißt an entsprechende Darstellungsprogram-me übergeben.

Grundlage zur Berechnung eines Wärmeleitungsproblems ist die Wärmeleitungsgleichung von **FOURIER** :

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \mathcal{Q}$$

In dieser partiellen Differentialgleichung wird die Temperatur **T** beschrieben als Funktion der Raumkoordinaten **X, Y, Z** und der Zeit **t**. Die zeitliche Änderung der Temperatur an einem Ort ergibt sich aus den zu- bzw. abfließenden Wärmemengen zuzüglich eines Terms für die Wärmequellen und Senken. Zur eindeutigen Beschreibung eines Temperaturfeldes werden noch Anfangs- und Randbedingungen benötigt. Die Anfangsbedingung

$$T(x, y, z, t=0) = f(x, y, z)$$

liefert eine Beschreibung des Temperaturfeldes zu einem Zeitpunkt  $t=0$ . Die Randbedingungen liefern eine Aussage über die Temperatur auf der Oberfläche des Körpers für die Zeit  $t>0$ . Dazu werden in der Regel zwei verschiedene Funktionen benutzt. Die **Dirichlet**-Bedingung

$$T(u, v, t) = g(u, v, t)$$

enthält eine Angabe einer konkreten Temperatur als Funktion des Ortes und der Zeit, während die **Cauchy**-Bedingung

$$\lambda(u, v) \frac{\partial T}{\partial n} + \alpha(u, v) (T - T^0) = \gamma(u, v, t)$$

die räumliche Ableitung der Temperatur normal zu Oberfläche mit in die Beschreibung einbezieht.

Die Lösung der Differentialgleichung erfolgt über die Lösung eines äquivalenten Variationsproblems [1]

$$I(T) := \iiint_V \left\{ \frac{\lambda}{2} \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \frac{\lambda}{2} \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + \frac{\lambda}{2} \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 - \rho c_p T \frac{\partial T}{\partial t} + \mathcal{Q} T \right\} dx dy dz$$

$$+\iint_{\Omega} \left\{ \frac{1}{2} \alpha(u,v) T^2 - \gamma(u,v) \right\} dudv \quad != \text{ minimal}$$

Zur Lösung dieses Funktionals wird die Geometrie aufgeteilt in kleine (finite) Elemente, in unserem Fall in Prismen. Alle Prismen werden durch eine Transformation abgebildet auf ein Einheitsprisma. Statt die Integration über die ganze Geometrie durchzuführen, erfolgt die Integration über das Standardprisma. Dabei wird eine lineare Ansatzfunktion zur Berechnung der Temperatur innerhalb des Prismas gewählt. Man geht also davon aus, daß sich die Temperaturen innerhalb des Elementes entlang einer Geraden ändert. Je weiter das tatsächliche Temperaturfeld von diesem geraden Verlauf abweicht, desto größer wird der Fehler in der numerischen Berechnung sein. Aber nur mit einer konkreten Annahme über den Verlauf der Temperatur läßt sich die Integration für jedes Prisma durchführen. Die Minimierung wird dadurch gelöst, daß man das Verschwinden der ersten partiellen Ableitung fordert. Damit erhält man ein System gewöhnlicher Differentialgleichungen der Form

$$A \dot{T} = BT + C$$

Die Lösung dieses Gleichungssystems erfolgt durch das rückwärts genommene **Euler**-Verfahren,

$$[A - \Delta t B] T(t + \Delta t) = AT(t) + \Delta t C$$

welches auch bei größeren Zeitschrittweiten zuverlässige Ergebnisse liefert. Auf diese Weise kann die partielle Differentialgleichung zurückgeführt werden auf ein lineares Gleichungssystem welches mit dem **Gauß-Seidel**-Verfahren gelöst wird.

Bei der Aufstellung und Lösung dieses Gleichungssystems, wird darauf geachtet, daß sowohl der benötigte Speicherbedarf, als auch die Anzahl der numerischen Operationen so gering wie möglich gehalten wird. Dabei kann die Tatsache ausgenutzt werden, daß die Matrix  $[A - \Delta t B]$  aus Gleichung symmetrisch, positiv definiert und dünn besetzt ist. Von den möglicherweise 1000000 x 1000000 Elementen (bei einer entsprechenden Anzahl von Knotenpunkten) der Matrix sind immer nur so viele

Elemente einer Zeile ungleich Null, wie der dazugehörige Knotenpunkt direkte, das heißt durch ein Element verbundene Nachbarpunkte hat. Durch eine geschickte Strukturierung der Matrix wird erreicht, daß die Speicherung der Nullen und die dazugehörigen Operationen im wesentlichen vermieden werden.

### 2.3.1 innere Wärmeübergänge

Während **Stafford** et al 1987 vorschlugen Kontaktelemente mit der Dicke 0 zur Berücksichtigung des Wärmeüberganges zu benutzen, wird hier eine andere Methode benutzt.

Zur Berücksichtigung von Wärmeübergängen geht man im allgemeinen davon aus, daß die an einer Phasengrenze übertragene Wärmemenge proportional zur Temperaturdifferenz ist

$$\alpha (T - T^{\circ}) = \dot{Q}$$

Der Proportionalitätsfaktor  $\alpha$  berücksichtigt dabei alle stoff- und verfahrensabhängigen Größen, die Einfluß auf den Wärmefluß haben. Vergleicht man die Gleichungen, so entspricht  $\gamma$  dem Wärmefluß  $\mathcal{Q}$ . Der Term  $\lambda (u,v) \frac{\partial T}{\partial n}$ , das heißt, die Abhängigkeit des Wärmeflusses von (räumlichen) Temperaturgradienten normal zur Oberfläche, wird vernachlässigt. Mit der Einführung eines "inneren" Randes an der Kontaktstelle Gußteil-Form kann die Gleichung behandelt werden, wie eine **Cauchy**-Bedingung mit  $\mathcal{Q}_1 = \mathcal{Q}_2$ .

#### 2.3.1.1 Validierung

Bereits 1959 veröffentlichten **H.S. Carslaw** und **J.C. Jaeger** analytische Lösungen für verschiedene Wärmeleitungsprobleme. Dieser Veröffentlichung ist auch das folgende Beispiel zweier halb-unendlicher Platten entnommen. Die beiden haben zum Zeitpunkt  $t=0$  verschiedene Anfangstemperaturen und sind thermisch durch einen definierten Wärmeübergangskoeffizienten gekoppelt. Abb. 2.3.1.1-1 zeigt den Vergleich zwischen der numerischen und der analytischen Lösung bei verschiedenen Zeitschrittweiten. Für den abgebildeten Fall ist eine gute Konvergenz bereits bei einer Schrittweite von 1 sec gegeben. Selbst bei

größeren Schrittweiten pendelt sich die numerische Lösung auf die Werte der analytischen Lösung ein.

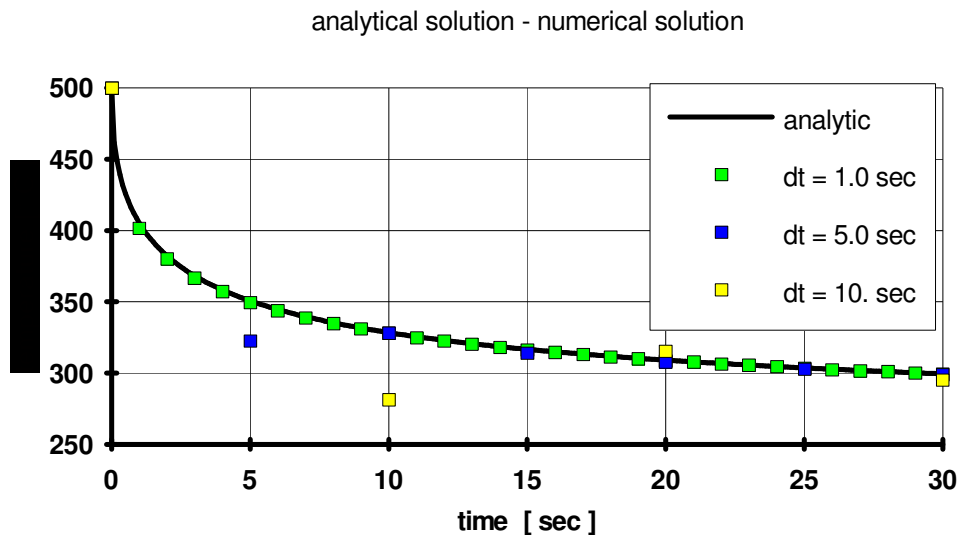


Abb. 2.3.1.1-1: Vergleich zwischen der numerischen und der analytischen Lösung für verschiedene Zeitschrittweiten.

### 2.3.2 Latente Wärme

Bei der Erstarrung von Metallen wird im Zusammenhang mit dem Aufbau des Kristallgitters eine innere Energie frei, die das Temperaturverhalten eines Bauteils entscheidend beeinflusst. Die Berücksichtigung dieser Energie erfolgt mit der Temperaturkorrektur-Methode. Dazu muß die freiwerdende Energiemenge als Funktion der Temperatur bekannt sein. Aus den Temperaturfeldern zu den Zeiten  $t$  und  $t+\Delta t$  kann die zu- bzw. abgeführte Wärmemenge eines Elementes berechnet werden. Diese Wärmemenge wird aufgeteilt in einen Anteil für die Änderung der Temperatur und einen Anteil für die Änderung der latenten Wärme. Die Temperaturen werden dann nachträglich entsprechend dieser Aufteilung korrigiert. Diese Methode gewährleistet die Erhaltung der Gesamtenergiebilanz und kann gegebenenfalls für große innere Wärmemengen durch a-priori Abschätzungen noch weiter verbessert werden.

## 2.4 Die Berechnung von Eigen- und Lastspannungen und Verzerrungsberechnungen

In diesem Fall beruht die Methode der Finiten-Elemente auf der Tatsache, daß in jedem Punkt eines ruhenden Körpers, die Summe aller angreifenden Kräfte gleich Null ist. Man erhält ein Gleichungssystem in dem jedem Knotenpunkt 3 Gleichungen, nämlich das Kräftegleichgewicht in den 3 Koordinatenrichtungen den 3 unbekanntenen Knotenpunktverschiebungen, gegenüberstehen. Zunächst werden die Verzerrungen eines Elements aus den Knotenpunktverschiebungen bestimmt. Dabei wird von der Annahme ausgegangen, daß die Dehnungen innerhalb eines Elementes konstant sind. Dann lassen sich die Dehnungen im Element aus den Knotenpunktverschiebungen berechnen. (Der besseren Übersicht wegen, werden die folgenden Gleichungen für den 2-dimensionalen Fall entwickelt.) Es gilt folgende Gleichung

$$(\varepsilon_i)_{ges} = B_{ij} \cdot u_j.$$

mit:

$$\varepsilon_i^T = (\varepsilon_{11ges}, \varepsilon_{22ges}, \varepsilon_{12ges})$$

$$u_j^T = (u_1, v_1, u_2, v_2, u_3, v_3)$$

$$B_{ij} = \frac{1}{2 \cdot A_{\Delta}} \cdot \begin{pmatrix} b_1 & 0 & b_2 & 0 & b_3 & 0 \\ 0 & c_1 & 0 & c_2 & 0 & c_3 \\ c_1 & b_1 & c_2 & b_2 & c_3 & b_3 \end{pmatrix}$$

wobei gilt

$$b_p = y_q - y_r$$

$$c_p = x_r - x_q$$

Dabei setzen sich die Dehnungen aus den elastischen und den thermisch bedingten Dehnungen zusammen. Die Spannungen lassen sich aus den elastischen Dehnungen nach dem **Hooke**'schen Gesetz berechnen

$$\sigma_k = E_{ki} (B_{ij} u_j - (\varepsilon_i)_{\Theta})$$

Die Knotenpunktkräfte können nach dem Prinzip der virtuellen Arbeit aus den Spannungen bestimmt werden. Die Arbeit, die alle angreifenden äußeren Kräfte an einem Körper, der sich im Gleichgewicht befindet, verrichten, muß bei einer beliebigen (virtuellen) Verschiebung gleich derjenigen Arbeit sein, die die inneren Kräfte leisten:

$$F_l = \int_V B_{kl} E_{ki} (B_{ij} u_j - (\varepsilon_i)_\Theta) dV$$

Da alle Größen in einem Element als konstant angesehen werden können, kann das Integral leicht berechnet werden

$$F_l = B_{kl} E_{ki} (B_{ij} u_j - (\varepsilon_i)_\Theta) V .$$

Auf diese Weise gelingt es, die Kräfte des Elementes in den Knotenpunkten aus den Knotenverschiebungen zu berechnen.

#### 2.4.1 Plastischer Ansatz

Das **Hooke'** sche Gesetz stellt einen linearen Zusammenhang zwischen den Spannungen und den Dehnungen eines Elementes her. Dieser Zusammenhang kann aber insbesondere bei der Abkühlung von Gußstücken nicht immer gelten, da der **Hooke'** sche Bereich insbesondere bei hohen Temperaturen sehr klein werden kann. Zur Beschreibung des elastisch-plastischen Materialverhaltens wird im Allgemeinen von der Fließtheorie ausgegangen. Dabei wird die Spannungs-/ Dehnungsbeziehung durch 3 weitere Materialeigenschaften gekennzeichnet:

- a) Eine Fließbedingung, die den mehrachsigen Spannungszustand festlegt, bei dem das plastische Fließen beginnt.
- b) Ein Fließgesetz, das die plastischen Verzerrungsinkremente mit den augenblicklichen Spannungen und den Spannungsinkrementen infolge des Fließens verknüpft und
- c) Ein Verfestigungsgesetz, das festlegt, auf welche Weise die Fließbedingung während des plastischen Fließens modifiziert wird.



Wird das plastische Materialverhalten in ein Finite-Elemente-Gleichungssystem eingebracht, so enthält man an Stelle von Gleichung ein nicht lineares Gleichungssystem. Bei der Aufstellung des Gleichungssystems ist noch nicht klar ob ein Element elastisches oder plastisches Materialverhalten zeigt. Diese Entscheidung kann erst nachträglich durch prüfen der Fließbedingung getroffen werden. Somit ist bei der Aufstellung der Steifigkeitsmatrix noch nicht bekannt mit welchem Stoffgesetz gearbeitet werden muß. Falls sich herausstellt, daß ein Element plastisches Materialverhalten zeigt, kommen weitere nicht Linearitäten hinzu, da die Spannung als Größe in die Spannungs-/Verzerrungsmatrix mit eingeht. Zur Lösung eines solchen Gleichungssystems wird häufig mit der Inkrementalmethode gearbeitet. Diese Methode geht davon aus, daß die Lösung zu einem Zeitpunkt  $t$  bekannt ist. Dann lautet die Lösung zu einem Zeitpunkt  $t+\Delta t$  aus der Superposition

$${}^{t+\Delta t}R_i = {}^tR_i + \Delta R_i$$

$\Delta R_i$  ist hier der inkrementelle Zuwachs der Kräfte zum Zeitpunkt  $t$  zum Zeitpunkt  $t + \Delta t$ . Dieser Vektor kann näherungsweise durch eine sogenannte Tangenten-Steifigkeitsmatrix  ${}^tK_{ij}$  angenähert werden

$$\Delta R_i = {}^tK_{ij} \cdot \Delta u_j$$

Die Tangenten-Steifigkeitmatrix berechnet man aus den geometrischen und materiellen Bedingungen zum Zeitpunkt  $t$ .  $\Delta u_j$  entspricht den inkrementellen Verschiebungszuwächsen der Knotenpunkte. So erhält man ein Gleichungssystem, aus dem sich die inkrementellen Verschiebungen berechnen lassen. Damit kann eine Verschiebung zur Zeit  $t + \Delta t$  berechnet werden.

$${}^tK_{ij} \Delta u_j = {}^{t+\Delta t}F_i - {}^tR_i$$

Hiermit wiederum können die Spannungen zur Zeit  $t + \Delta t$  berechnet werden, und man kann mit dem nächsten Zeitinkrement fortfahren. Zur Berechnung der Tangenten-Steifigkeitsmatrix werden Spannungs-/Dehnungsbeziehungen herangezogen, die sich je nach Belastungsfall stark unterscheiden. Im elastischen Fall gehen lediglich der E-Modul

und die Querkontraktionszahl als Materialkennwerte ein. Wenn jedoch plastisches Fließen eingeleitet wird, muß eine Spannungs-/Dehnungsmatrix benutzt werden. Hier führt jedoch die Ermittlung der notwendigen Daten in der Praxis zu Schwierigkeiten, da sowohl der Spannungsdeviator als auch der Verzerrungs-/Verfestigungsmodul besonders bei nichtisothermen Bedingungen nicht im voraus bekannt sind. So beschränkt **Bathe** die Gültigkeit der Spannungs-/Dehnungsmatrix auch ausdrücklich auf isotherme Bedingungen. Bei der Berechnung der Eigenspannungen wird in dem **SIMTEC** Programm deshalb ein modifiziertes Modell der Tangenten-/Steifigkeitsmethode benutzt, welches diese Schwierigkeit umgeht. Wenn die Belastungs- bzw. Zeitinkremente genügend klein sind, kann die Spannungs-/ Dehnungsbeziehung schrittweise dadurch linearisiert werden, daß innerhalb dieses Inkrements, der Tangenten-Modul statt des E-Moduls eingesetzt wird. Für das Zeitinkrement  $t + \Delta t$  kann der Tangenten-Modul aus der Vergleichsspannung nach **von Mises** und der Temperatur T aus den Daten eines Zugversuches ermittelt werden (Abb. 2.4.1-1).

Auch bei dieser Methode ist jedoch eine Fehlerbetrachtung wichtig. Insbesondere die Entlastung eines Elementes erfolgt ja bekanntlich parallel zum Ursprungsmodul des Spannungs-Dehnungs-Diagrammes, so daß in diesem Fall statt des Tangenten-Moduls der Ursprungs-Modul zur Berechnung der Spannungen eingesetzt werden muß, und weitere Iterationen notwendig werden können. Es hat

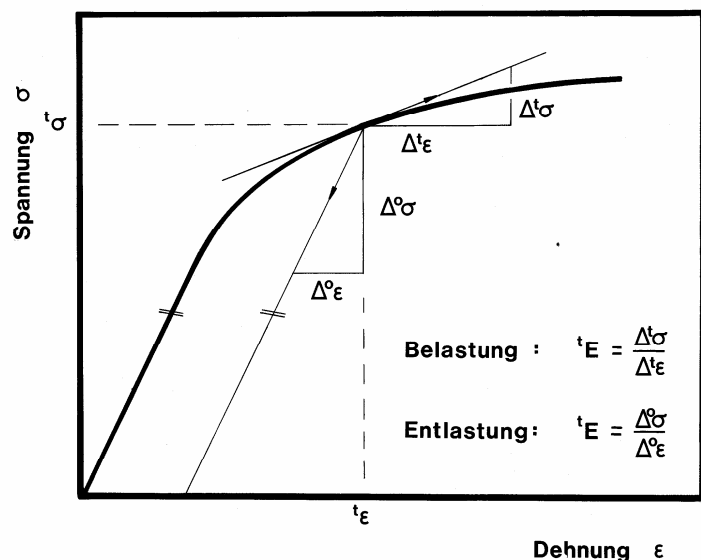


Abb. 2.4.1-1: Zur Berücksichtigung plastischen Materialverhaltens wird die Spannungs- Dehnungskurve schrittweise linearisiert.

sich jedoch beim Berechnen verschiedener Abkühlprozesse gezeigt, daß diese Spannungsumkehr in der Regel nur 1 bis 2 x pro Element erfolgt, und das fast gleichzeitig in allen Elementen eines Körpers.

## **2.5 Simulation erstarrungsmorphologischer Kriterien**

Abhängig von der Legierungszusammensetzung kann der Anteil der freiwerdenden Menge latenter Wärme innerhalb des Liquid- Solidintervalls erheblich von dem linearen Verlauf abweichen. Eine solche Verteilungsfunktion kann als stoffabhängige Größe eingelesen und berücksichtigt werden. Ist die Verteilungsfunktion nicht bekannt, so wird eine Standard-Verteilungsfunktion ausgewählt. Ein weiterer den Erstarrungsablauf beeinflussenden Einflußfaktor ist der Keimzustand einer Legierung. Je nach dem mit welchem Gradienten der Eintritt in das Liquid-Solidintervall erfolgt, kann sowohl bei der Vorerstarrung als auch bei der eutektischen Erstarrung eine deutliche Unterkühlung eintreten, die ebenfalls berechnet werden kann.

Zur Berechnung der Gefügeausbildung ist nicht nur der Temperaturverlauf bis zur Solidustemperatur zu berücksichtigen, unter Umständen können auch bei deutlich tieferen Temperaturen noch Gitterumwandlungen stattfinden. Zur Berechnung der Gefügeausbildung werden die Abkühlkurven mit Zeit-Temperatur-Umwandlungsschaubildern überlagert. Aus den Schnittpunkten zwischen den Gefügekennlinien und den Abkühlkurven ergibt sich für jeden Punkt eine spezifische Gefügezusammensetzung.

Die bei Gitterumwandlungen freigesetzte Energie kann dabei wie oben für die latente Wärme bereits beschrieben, mit der Temperaturkorrektur-Methode berücksichtigt werden.

Weitere Möglichkeiten des Postprocessings, die Berechnung sogenannter legierungsabhängiger Kriteriumsfunktionen stehen zur Verfügung:

- *Isothermen 2D/3D*
- *Temperaturfelder 2D/3D*
- *Temperaturgradienten*
- *Liquidus/Solidusverläufe*
- *Abkühlgeschwindigkeiten*
- *Poren und Lunckerkriterium*
- *Restflüssigkeitsgebiete*
- *Abkühlkurven*
- *Min./Max. - Kurven*

### 3 Aufbau der Prozeßkette

Wie in Kapitel 1 dargelegt sollte die Entwicklung der Gieß- z.B. der Anschnitt- und Speisertechnik für die verschiedenen Gießverfahren in einer Prozeßkette betrachtet und in einem Datenmodell gehandhabt werden, um möglichst alle am Entstehungsprozeß beteiligten Parameter und deren Abhängigkeiten bestimmen und verändern zu können.

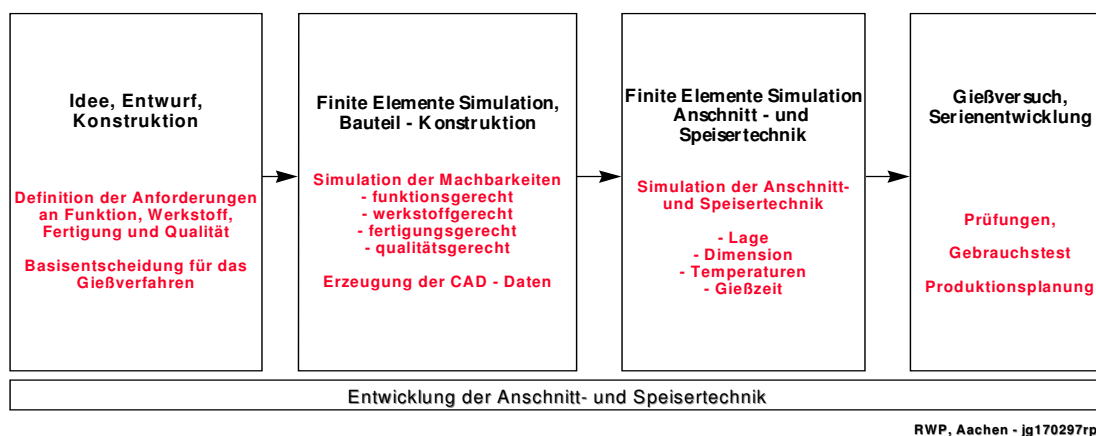


Abb. 3-1: Prozeßkette zur Entwicklung der Anschnitt- und Speisertechnik

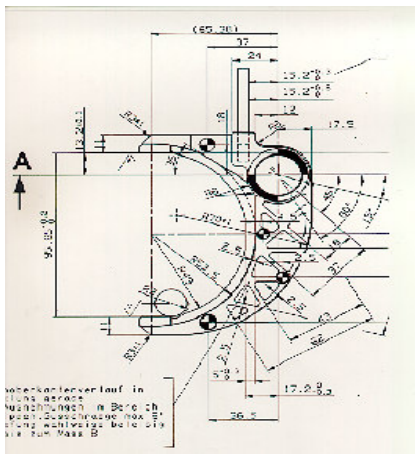
Für die Herstellung des Gußteils ist es wichtig alle Serienbedingungen und Erfordernisse zu kennen. Durch die Analyse der Simulationsergebnisse von Formfüllung und Erstarrung werden mit Optimierungsrechnungen alle für den Gießprozeß benötigten Prozeßparameter errechnet und es findet eine weitere Prüfung der Eignung von Bauteil- und Gießkonstruktion statt.

Wesentliche Parameter sind hierbei:

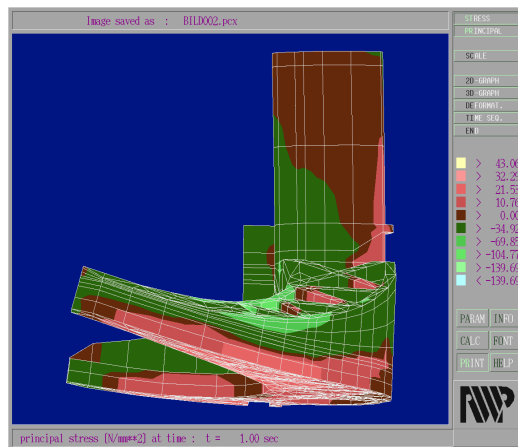
- *gießgerechte Konstruktion von Bauteil und Werkzeug*
- *Anschnitt- und Heiz / Kühlsystemauslegung (Wärmehaushalt)*
- *Positionierung und Dimensionierung der Speiser*
- *Festlegung der Prozeßzeiten*
- *Definition der Temperaturführung*

### 3.1 Simulation von „fit and function“

Zunächst wird die Bauteilkonstruktion auf Passung und Funktion überprüft. Die Maßhaltigkeit und die Festigkeitseigenschaften werden simuliert. Gegebenenfalls und den Erfordernissen entsprechend wird mittels Simulation eine Umkonstruktion, bzw. Optimierung erarbeitet. Praktische Versuche werden nicht mehr benötigt.



Version 1: Original Konstruktion



Version 2: max. Druckspannung 43 N/mm<sup>2</sup>,  
max. Zugspannung - 50 N/mm<sup>2</sup>  
Verzug beider Arme unter Last,  
die max. Differenz ist 0,11 mm

Abb. 3.1-1: Die veränderte Rippenkonstruktion in der FEM zeigte die geforderte Minimierung des Verzuges (die Darstellung des Verzuges im rechten Bild ist 50fach vergrößert).

## 3.2 Formfüllsimulation

Die Formfüllsimulation ist der erste Schritt der thermischen Berechnungen. Sie ermöglicht zum einen die genaue Analyse der Fließwege, daß heißt der Verteilung und Füllung der Schmelze in der vorgegebenen Anschnitt- und Formgeometrie. Darüberhinaus werden zu jedem Zeitpunkt der Füllung, an jedem Ort die Temperaturdifferenzen errechnet und visualisiert.

Somit können mit der Simulation die Füllgeometrie, die Bauteillage und die Prozeßparameter Zeit, Geschwindigkeit und Temperatur geändert und optimiert werden. Der Optimierungsprozeß wird vom Benutzer der Simulation gesteuert und bewertet. An dieser Stelle ist es von Bedeutung empirisches Wissen und Erfahrungen in das Simulationsmodell mit einzubringen.

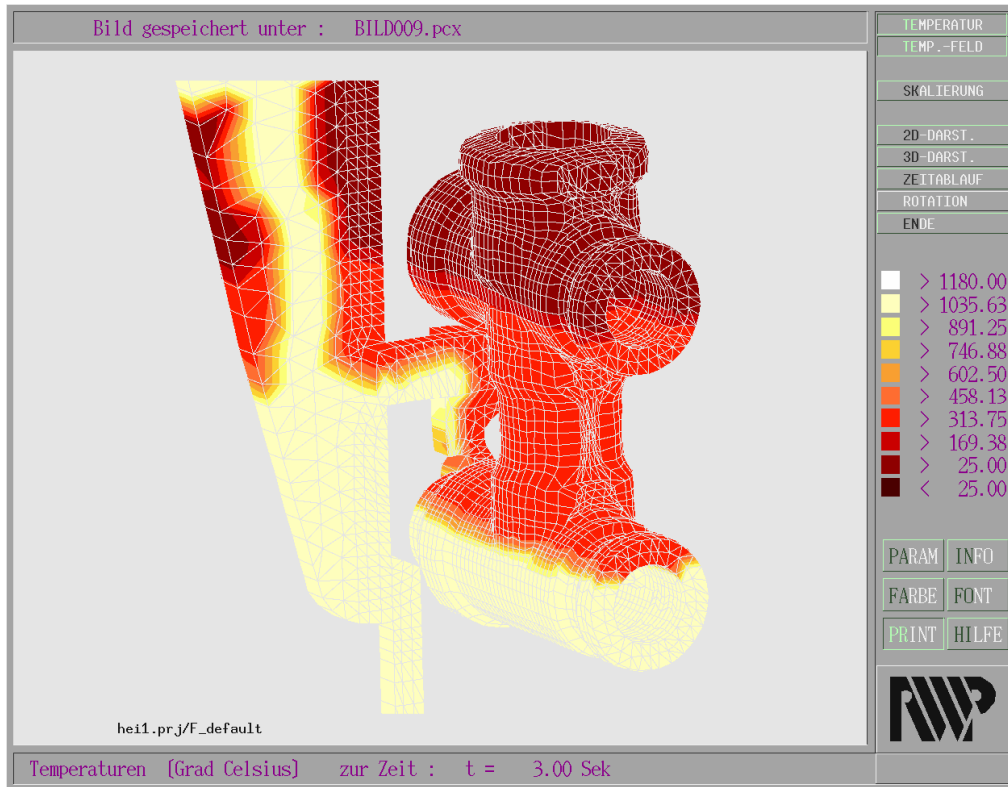


Abb. 3.2-1: Ausschnitt Füllsimulation einer Gießtraube

### 3.3 Erstarrungssimulation

Die Erstarrungssimulation zeigt die Erstarrung des Gießsystems in seiner Form. Wärmezentren, Sandkanten- oder Kern- und Formaufheizungen werden am Bildschirm visualisiert. Die Berechnung der Restflüssigkeitsgebiete gibt die entstehenden Volumendefizite legierungsabhängig aus.

Die Kriteriumsfunktionen ermöglichen es spezielle Erstarrungsstrukturen zu analysieren. Beispielsweise werden in einer Kopplung zwischen Simulation und gemessenen Daten durch die Berechnung der Erstarrungsgeschwindigkeiten und -zeiten Dendritenarmabstände ermittelt.

Weitere erstarrungsmorphologische Eigenschaften können mittels spezieller werkstoffabhängiger Funktionen und der Gradientenfunktionen sowie der Überlagerung von Umwandlungsdiagrammen mit Temperatur- / Zeitverläufen errechnet werden.

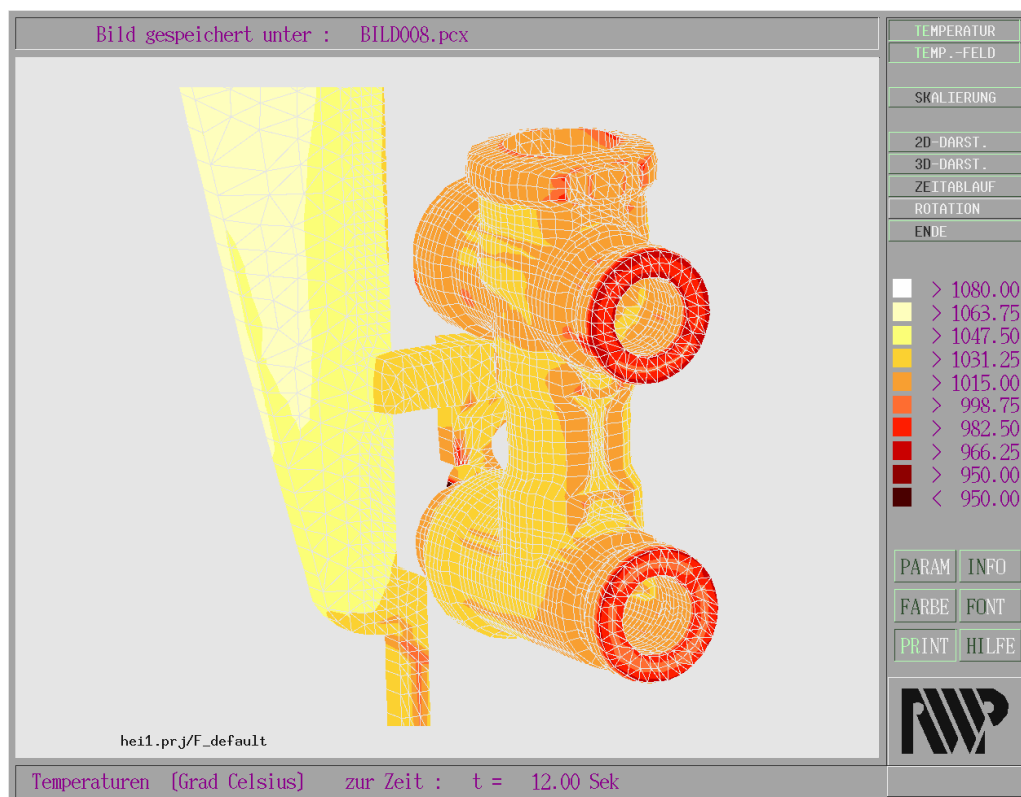


Abb. 3.3-1: 3D - Temperaturfeld



### 3.4 Simulation von Eigenspannung und Verzug

Die Simulation von Eigenspannung und Verzug berechnet die thermischen Spannungen, Schrumpfung plus Verzug des Gußteils in und nach der Entnahme des Gießsystems aus der Form.

So ist es möglich für jeden Punkt der 3D - Gußteilgeometrie oder auch des Werkzeugs die auftretenden Spannungen und Verzüge zu quantifizieren. Die neuen Geometriemaße können gespeichert und dem Modell- und Formenbau als 3D - Datensatz rückgeführt werden. Die errechneten Geometrieänderungen werden gegebenenfalls im CAD - System automatisch angepaßt.

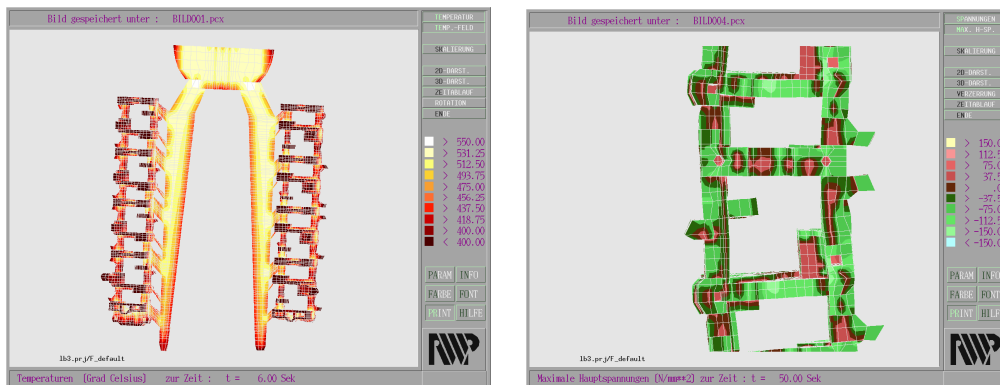


Abb. 3.4-1: 3D Temperaturfeld von Bauteil und Gießsystem (links), 3D Druck- und Zugspannungen, Schrumpfung und Verzug (rechts, Schrumpfung und Verzug sind vergrößert dargestellt)

### 3.5 Thermophysikalische und thermomechanische Daten

Dem Simulationssystem ist eine thermophysikalische und thermomechanische Datenbank hinterlegt, in der alle gängigen und darüberhinaus auch viele spezielle Werk- und Formstoffdaten gespeichert sind. Eigene Stoffdaten können benutzerdefiniert hinzugefügt werden. Der Benutzer kann aus dem Simulationssystem auf jeden beliebigen Stoffdatenfile zugreifen und diesen entsprechenden Stoffnummern zuordnen. Alle Daten sind temperaturabhängig aufgebaut. Die wesentlichen Datensätze sind:

- *Wärmeleitfähigkeit*
- *innere Wärme*
- *Dichte*
- *spezifische Wärmekapazität*
- *Latente Wärme*
- *Wärmeübergangskoeffizienten*
- *Konvektion*
- *Wärmeausdehnungskoeffizient*
- *Tangentenmodul*
- *Querkontraktionszahl*
- *Zeit - Temperatur - Umwandlungsdaten*
- *spezielle Funktionen*

11	1080.0	623.0	570.0
	570.0	0.000	
	575.3	0.038	
	580.6	0.067	
	585.9	0.096	
	591.2	0.154	
	596.5	0.210	
	601.8	0.375	
	607.1	0.750	
	612.4	0.837	
	617.7	0.923	
	623.0	1.000	
	Temperatur : Grad C		
	Fraktion Liq. :		
	Schmelzwaerme : J/cm*cm*cm		
	Stoff : Leg. 226 <AlSi8Cu3>		
	Quelle : MET-DSC		

Abb. 3.5-1: Latente Wärme Stoffdatei für AlSi8Cu3

## 4 Gieß- und Serienprozeß

In der folgenden Tabelle werden die Möglichkeiten der Simulation und deren Umsetzungsrelevanzen zugeordnet:

<b>Simulation</b>	<b>Umsetzung</b>
<i>Konstruktion von Gußteil und Werkzeug:</i> die Finite Elemente Konstruktion muß eine hohe, fertigungsgerechte geometrische Genauigkeit aufweisen (Datenschnittstellen)	<i>Formenkonstruktion:</i> Konstruktion, Formteilung, Dimension, Anschnitt- und Speisertechnik
<i>Festigkeit:</i> thermische Spannungen als Zug- und Druckspannungen, Verzug	<i>Bauteilstruktur- und genauigkeit:</i> Rückführung der errechneten Bauteilmaße, 3D - Messungen
<i>Formfüllung:</i> Füllfront, Füllverhalten, Temperaturänderungen	<i>Gießtechnik:</i> Anschnitt- und Speisertechnik
<i>Erstarrung:</i> Erstarrungszeit- und geschwindigkeit, 3D-Temperaturfelder, Isothermen, Temperatur- und Raumgradienten, Lunker- und Porositätskriterien, Gefüge	<i>Gießtechnik, Erstarrunglenkung:</i> (Einstellen der Gußteileigenschaften) Form- und Speisertechnik, Einbringung von Kühlungen, Heizungen, Kockillen, etc.
<i>Eigenspannung und Verzug:</i> thermische Spannungen als Zug- und Druckspannungen, Verzug	<i>Bauteil- und Formengenauigkeit:</i> Rückführung der errechneten Formmaße, 3D - Messungen
<i>Gießprozeßführung:</i>  Volumen, Gewichte, thermophysikalische und thermomechanische Daten, Prozeßtemperaturen, Prozesszeiten, Qualitätsmerkmale	<i>Gießprozeßführung:</i> <i>die verschiedenen Simulationen liefern Daten zur Prozeß- und Qualitätskontrolle,</i> Volumen, Gewichte, thermophysikalische und thermomechanische Daten, Prozeßtemperaturen, Prozesszeiten, Qualitätsmerkmale
<i>Datenübertragung):</i> VDA-fs, IGES, STL, FEM, ASCII	<i>Datenübertragung:</i> Aufbereitung der STL - Daten

Abb. 4.-1: Umsetzung und Nutzen der FE - Simulation in die Praxis

Die durch die Simulation des Seriengießprozesses errechneten Parameter werden für die Umsetzung genutzt. Die Prozeß- und Produktdaten werden dem Qualitätsmanagement als Soll - Daten direkt zur Verfügung gestellt:

- Geometrie von Bauteil und Werkzeug / Form
- Anschnitt- und Speisergeometrie
- Heiz / Kühlsystemauslegung
- Temperatur- und Zeitsteuerung (Wärmehaushalt)
- Speiserposition und -dimension
- Prozeßzeiten
- Temperaturführung

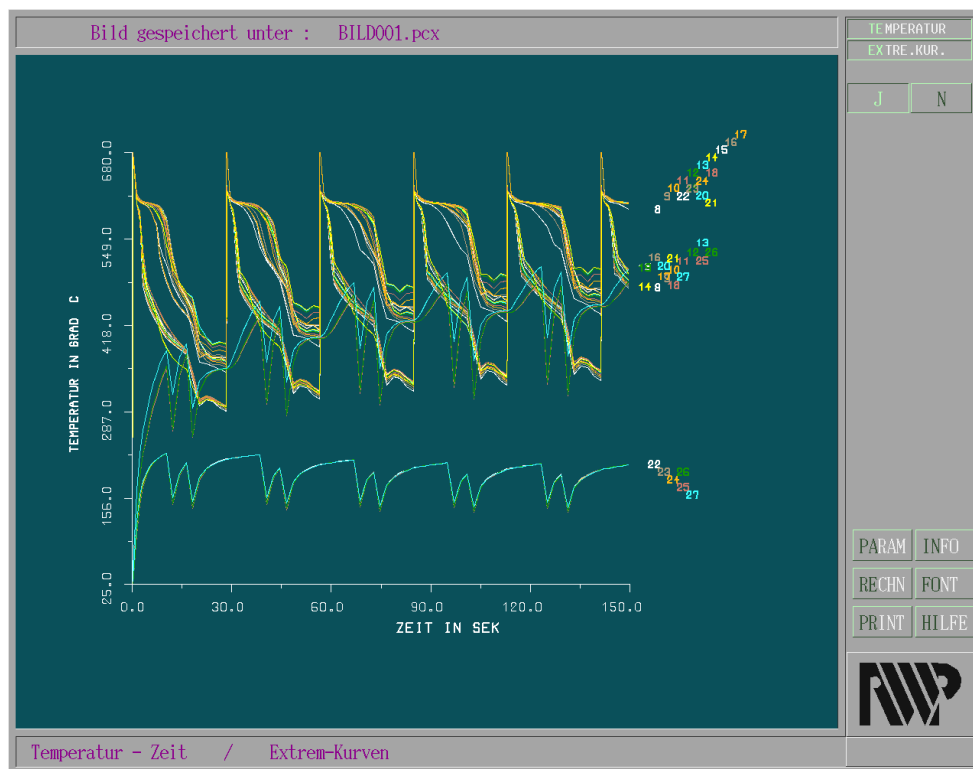


Abb. 4-2: Simulation des Gießzyklus und Auslegung des Wärmehaushalts einer Form

## LITERATUR

- Abels, H., und J. Suderkamp  
Praxisgerechte Kenngrößen zur Wirtschaftlichkeitsbeurteilung integrierter Rechner-  
programmpakete für Gießereien  
Gießerei 80 (1993), S. 4-8
- Bathe, K. J.  
Finite-Elemente-Methoden  
Berlin (1986)
- Bubeck, H. P.  
Erfahrungen eines Modellbaubetriebes mit Rapid Prototyping  
Giesserei 82 (1995), Nr. 15, S. 539
- Butz F., Weiß K., Gundlach J.  
Gußteilentwicklung mit Hilfe rechnergestützter Technologien (Simulation und  
CAD/CAM) als integrativer Bestandteil der Qualitätssicherung  
Vortrag anlässlich der DGV-Tagung EDV-Unterstützung der Qualitätssicherung in Gie-  
ßereien, Pforzheim 1994
- Weiß K., Gundlach J., Honsel Chr.  
Development of new calculation processes for computerized casting simulation and  
model verification under manufacturing conditions,  
Vortrag Brite/Euram Workshop, in Jahresbericht 1991, Louvain-la-Neuve 1991
- Dötsch, E., Dougherty, J. V.  
Fortschritte bei Rapid-Prototyping-Verfahren  
Giesserei 82 (1995), Nr. 17, S. 626
- E. Ambos, M. Soethe  
Fertigungsgerechtes Gestalten von Gußstücken - ein neues Konzept als  
Grundlage für ein Expertensystem  
Konstruieren und Gießen 15 (1990) 4, S. 16-20  
R. Stermsek, K. Weiß, J. Gundlach
- Fili, Wolfgang  
Schnell zum Modell, Muster aus CAD-Daten  
Industrie Anzeiger 4/95 S. 28-29
- Grigorieff, R. D.  
Numerik gewöhnlicher Differentialgleichungen Band 1  
Teubner (1972)
- Hahn, H. G.  
Einführung in die Methode der finiten Elemente in der Festigkeitslehre  
Frankfurt (1975)
- Hoffmann, P., Bergmann, H. W.  
Lasergestütztes Rapid Tooling  
Vortrag anlässlich des Fachkongreß Fertigungstechnik Schlüsseltechnologie Laser:  
Herausforderung an die Fabrik 2000 (1995), Tagungsband s. 135-149

- Honsel, Ch  
Die Berechnung von Wärme- und Eigenspannungen infolge von Abkühlprozessen mit der Methode der tangentialen Steifigkeiten  
Dissertation Aachen (1992)
- König, W.  
Optimierung der Fräsbearbeitung von Druckgießformen mit schlanken Schaftfräsern  
Schlußbericht AIF Forschungsvorhaben, 1991
- König, W., Eversheim, W., Celi, I., u.a.  
Rapid Prototyping - Bedarf und Potentiale  
VDI-Z 135 (1993); Nr. 8, S.92-97
- Krätzschar, J.  
Laser Skulpturen, Vom CAD-Modell zum realen Gegenstand  
c't 1995, Heft 8, S. 190-192
- Krause, F.-L., und B. Ochs  
Potentiale der CAD-Technologie zur Gestaltung simultaner Vorgehensweisen in der Produktentwicklung  
VDI-Berichte Nr. 865 (1991), S. 87-102
- Krause, F.-L., und W. Beits  
Produktentwicklung mit Simultaneous Engineering. Facts (1993) Mai, S. 4-11  
Arbeitsgruppe: Qualitätssicherungsvereinbarungen zwischen Volkswagen und seinen Lieferanten.  
VW-AG, Wolfsburg, Februar 1993
- Langer, H. J., Reichle, J., Shellabear, M.  
Rapid prototyping with the layer manufacturing techniques laser stereolithography and laser sintering  
Vortrag anläßlich des Fachkongreß Fertigungstechnik Schlüsseltechnologie Laser: Herausforderung an die Fabrik 2000 (1995), Tagungsband S. 123-134
- N. N.  
Stereolithographie ermöglicht Bauteil-Kontrolle vor der Serienfertigung  
Maschinenmarkt 101 (1995), Nr. 40, S. 32
- N. N.  
Zeit ist Geld; schneller Weg zum Prototypen  
maschine + werkzeug 11/95, S. 26-28
- Nakagawa, T.  
Present status of rapid prototyping in Japan  
Vortrag anläßlich des Fachkongreß Fertigungstechnik Schlüsseltechnologie Laser: Herausforderung an die Fabrik 2000 (1995), Tagungsband S. 89-103
- Pfeiffer, H.-J.  
Ein integriertes CAD/CAM-System  
VDI-Z Spezial (1992) II, S. 6-17

- Richter, W.  
Numerische Lösung partieller Differentialgleichungen mit der Finite-Elemente-Methode  
Vieweg Braunschweig (1986)
- Roller, R.  
Rechnerunterstützte Techniken (CAD/CAM) im Modell- und Formenbau  
Giesserei 81 (1994), Nr. 17, S. 576-578
- Schädlich-Stubenrauch, J.  
Rapid Prototyping in der Gießerei  
Giesserei 81 (1994), Nr. 17, S. 567-570
- Schwartz, H. R.  
Numerische Mathematik  
Stuttgart (1986)
- Stafford, R. O.; Rice, A. B.; Pinella D. F.  
Investment Casting Process Design - Part 2: Solidification Simulation  
Proc. ASME Intl. Computers in Engng. Conf. (1987), 435-445
- Steger, W., Geiger, M.  
Schnelle Wege zu innovativen Produkten  
VDI-Z 136 (1994) Nr. 4, S. 38-45
- Truckenbrodt E.  
Fluidmechanik Band 1  
Springer-Verlag Berlin 1980
- Tümis, S.  
Entwicklung eines kostenorientierten Planungssystems für den rechnerintegrierten  
Werkzeug- und Formenbau  
Carl Hanser Verlag, München Wien, 1988
- Vail, N. K., Jünemann, G., Pollmann, W.  
New directions/applications for rapid prototyping  
Vortrag anlässlich des Fachkongreß Fertigungstechnik Schlüsseltechnologie Laser:  
Herausforderung an die Fabrik (1995), 2000, Tagungsband S. 105-113
- Weck, M., und H. Vonderhagen  
Optimierung von Gußbauteilen hinsichtlich Festigkeit und Steifigkeit.  
VDG-Fachbericht Nr. 58 (1991), Verein Deutscher Gießereifachleute, Düsseldorf
- Weiß K.  
CAD/CAM - Einsatz in der Gießerei  
CAD/CAM Report, 1988, Nr.10, S.70
- Weiß K., Ch. Honsel, J. Gundlach  
Die rechnerische Simulation von Gießprozessen - Werkzeug für ausgereifte Kon-  
struktionen  
Konstruieren & Gießen, 2, 1991, S.18
- Weiß K., Honsel Chr., Gundlach J.  
Das Programmpaket SIMTEC, Anwendung der Gießsimulation  
Gußprodukte, Hoppenstedt Verlag, 1994
- Weiß K., J. Gundlach, Chr. Honsel  
Simulation Calculee a L'aide de L'ordinateur. Une aide pour la realisation des  
Moules et L'amelioration de la coulee, Perfectionnement en Fonderie

Institut Provincial d'Enseignement de Promotion Sociale de Seraing, Université de Liège, Liège (Belgien), 1990

Weiß, K.:

Temperaturfeldberechnung bei Erstarrungsvorgängen unter Berücksichtigung des Einfüllvorganges

Dissertation Aachen (1986)

Wieneke B.P., Gundlach J.

Schnittstellen technisch-wissenschaftlicher Software und technische Prozessdatenaufbereitung für rechnergestützte Qualitätssicherung in Gießereien

Vortrag anlässlich des Kongresses EDV-Unterstützung der QS in Giessereien, Bad Sassendorf 1994