

Simulation von Gefüge und mechanischen Eigenschaften von Strukturbauteilen aus Magnesium

VON KONRAD WEISS UND CHRISTOPH HONSEL, ROETGEN

Gewichtsreduktion ist ein zentrales Thema in den Bereichen Automobil-, Luft- und Raumfahrtindustrie. Aufgrund der geringen Dichte von Magnesium bieten sich insbesondere Magnesiumlegierungen zur effizienten Gewichtsreduzierung an. Im Folgenden wird das Potential dieser Legierungsgruppe an einem Beispiel aus der Luftfahrt erläutert.

Die in diesem Artikel beschriebenen Modelle und Anwendungen wurden innerhalb des von der EU unterstützten Forschungsvorhabens Idea entwickelt beziehungsweise durchgeführt. Hauptanliegen des Projektes war die Entwicklung neuer Magnesiumlegierungen für die Luftfahrtindustrie, die die Anforderungen an die mechanischen Bauteileigenschaften insbesondere in den belasteten Bereichen erfüllen. Der Artikel beschreibt ein Modell zur Bestimmung mechanischer Eigenschaften von Gussbauteilen – hergestellt im Sandkokillen- und Feingießverfahren, die Vorgehensweise bei der Verifizierung und erste Anwendungen.

ANZEIGE

55 x 62

Tabelle 1: Eigenschaften von Mg-Legierungen sowie Anforderungen der Luftfahrtindustrie

	Zugfestigkeit R_m in MPa	Dehngrenze $R_{p0,2}$ in MPa	Bruchdehnung A in %
Geforderter Mindestwert	290	220	3,0
AZ91E – Sandguss – T6	287	138	6,3
MRI207S – Sandguss – T6	304	220	4,0

Vor- und Nachteile von Magnesium
Für die Verwendung bestimmter Werkstoffe spielen mechanische und physikalische Materialeigenschaften sowie Verfügbarkeit und Kosten eine dominante Rolle. Die Attraktivität von Magnesium gegenüber anderen Materialien zeichnet sich durch die geringe Dichte, die hervorragende Bearbeitbarkeit, gute Dämpfungseigenschaften und ein gutes Verhältnis von Festigkeit und Dichte aus.

Andererseits besitzen Magnesiumlegierungen aber auch eine Reihe negativer Eigenschaften wie z. B ein schlechtes Verhältnis von Zugfestigkeit und Bruchdehnung, geringe Dauerfestigkeit, Bruchfestigkeit und Zugfestigkeit [1]. Die Anforderungen von Flugzeugbauern an die mechanischen Eigenschaften von Strukturbauteilen erster und zweiter Ordnung aus Magnesium sind in **Tabelle 1** angegeben und werden mit denen der Legierung AZ91E und der in Idea neu entwickelten Legierung MRI207S verglichen.

Das Modell
Die mechanischen Eigenschaften von Gussstücken werden weitgehend durch die Mikrostruktur bestimmt, wobei das Gefüge üblicherweise durch die Korngröße (GS) und/oder den sekundären Dendritenarmabstand (SDAS) beschrieben wird.

Bereits Mitte des zwanzigsten Jahrhunderts wurde der Einfluss dieser Größen auf die mechanischen Eigenschaften formuliert [2, 3]. Einflüsse von sekundären Phasen, eutektischen Strukturen und Phasengrenzen werden im Vergleich zur Mikrostruktur als vernachlässigbar eingestuft [4].

Wie in [4] ausgeführt, nimmt der Einfluss von Korngröße und Dendritenarmabständen auf die Festigkeitseigenschaften mit zunehmendem Aluminiumgehalt ebenfalls zu, wobei der hohe Wert des Hall-Petch-Koeffizienten (4-5-mal so groß wie der von Aluminiumlegierungen) den dominanten Einfluss der Korngröße verdeutlicht [5]. Diese Hypothese sollte jedoch für jede neue Legierung überprüft werden.

Die Abhängigkeit der Korngröße von Magnesiumlegierungen wird durch Gleichung 1 beschrieben:

$$GS = \alpha \cdot t_E^{1/\beta} \tag{1}$$

wobei t_E die lokale Erstarrungszeit und α und β Materialparameter sind.

Sind $R_{p0,2}$ die Dehngrenze und R_m die Zugfestigkeit einer Legierung und ist P der Volumenanteil kugelförmiger Poren, dann reduzieren sich nach [6] die mechanischen Eigenschaften gemäß Gleichung (2) zu $R_{p0,2,p}$ und $R_{m,p}$

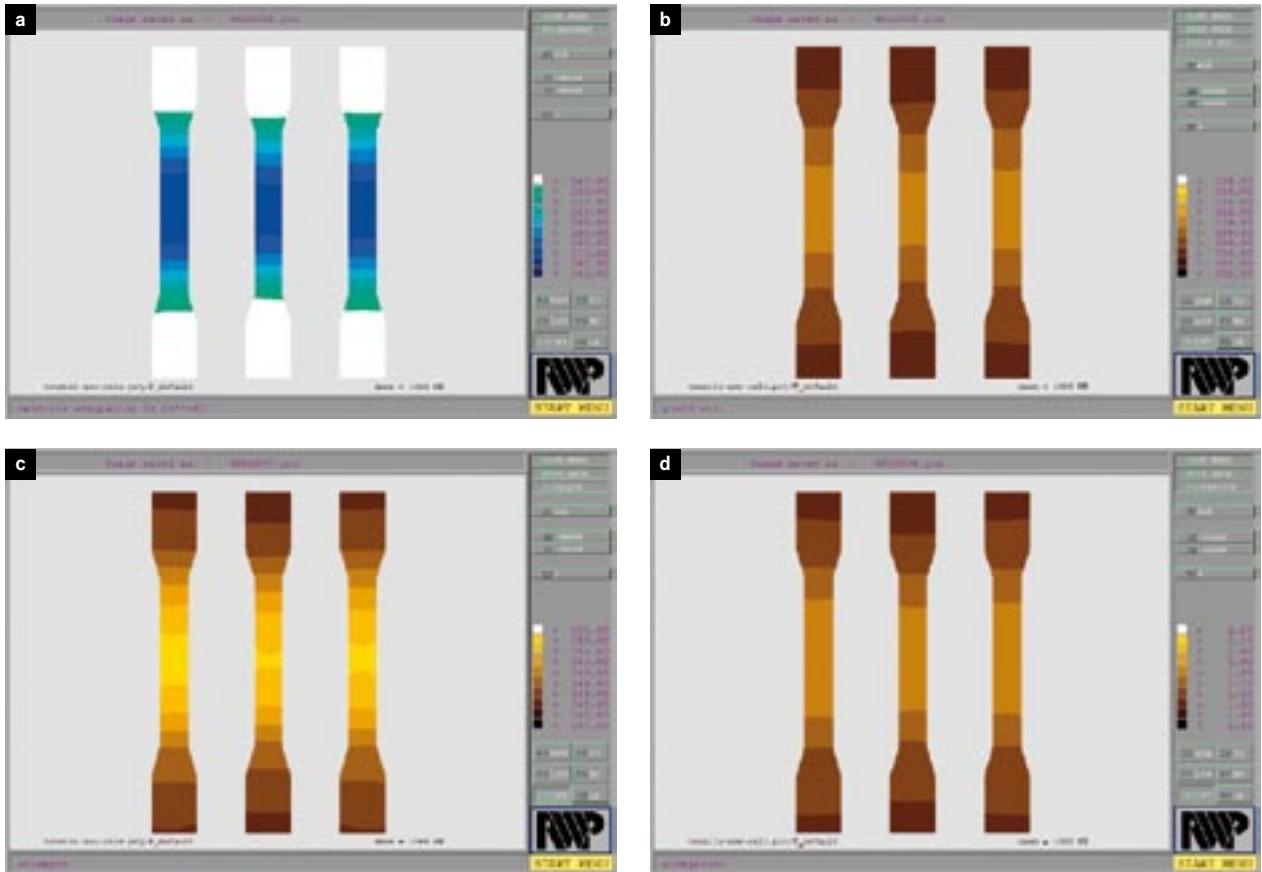


Bild 1: Simulation von drei parallel abgegossenen Zugproben, a: Korngröße mit Werten zwischen 170 and 180 µm, b: $R_{p0,2}$ -Werte von 110 bis 112 MPa, c: R_m -Werte zwischen 148 und 152 MPa, d: Bruchdehnung ca. 1,8 %

$$R_{p0,2} = R_{p0,2}(1-P) \quad R_m = R_m(1-s \cdot P) \quad (2)$$

Da Poren im Allgemeinen nicht kugelförmig sind, wird ihre komplexere Oberfläche und deren Einfluss auf die Zugfestigkeit durch den Rundheitsfaktor $s > 1$ durch Gleichung (3) beschrieben.

$$R_{p0,2} = R_{p0,2}(1-S \cdot P) \quad R_m = R_m(1-S \cdot P) \quad (3)$$

Der Rundheitsfaktor wird z. B. in [6] oder [7] definiert. Oft wird anstelle des Rundheitsfaktors der Formfaktor f , der durch $f = 1 - s$

(4) definiert ist, verwendet. Die Hall-Petch-Beziehung beschreibt die Abhängigkeit der Dehngrenze $R_{p0,2}$ von der durchschnittlichen Korngröße GS mittels der Gleichung

$$R_{p0,2} = R_{p0,2}(GS) = \sigma_k + \frac{K_1}{\sqrt{GS}} \quad (5)$$

wobei σ_k andere Einflüsse in einem Parameter zusammenfasst. Der Proportionalitätsfaktor K_1 heißt Hall-Petch-Koeffizient. Ebenso lässt sich die Zugfestigkeit als Funktion der Korngröße unter Verwendung der Koeffizienten σ_k und K_1 darstellen:

$$R_m = R_m(GS) = \sigma_{k2} + \frac{K_2}{\sqrt{GS}} \quad (6)$$

Die Bruchdehnung A hängt mit dem Elastizitätsmodul E , dem Verfestigungsexponent n , $R_{p0,2}$ und R_m wie folgt zusammen:

$$A = \left(\frac{R_m}{k} \right)^{\frac{1}{n}} = \frac{1}{E} \cdot \left(\frac{R_m}{R_{p0,2}^{1-n}} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (7)$$

Unter Verwendung der Gleichungen (1) bis (7) ist es möglich, die lokale Verteilung von Dehngrenze, Zugfestigkeit und Bruchdehnung von Gussstücken in Abhängigkeit von den Erstarrungsbedingungen zu simulieren.

Das obige Modell wurde in dem Projekt Idea für die kommerzielle Legierung AZ91E angepasst. Hierzu wurden die Parameter σ_{YS} , σ_{ts} , K_1 und K_2 mittels zahlreicher Experimente und inverser Berechnungen bestimmt. Für den Hall-Petch-Koeffizienten K_1 findet man in der Literatur Werte von 210 bis 600 MPa (μm)^{1/2}, und für σ_{YS} variieren die Werte von 53 bis 84 MPa [8]. Typische Werte des Verfestigungskoeffizienten liegen zwischen 0,1 und 0,3.

Für eine Serie von abgegossenen Zugstäben wurden sowohl die mechanischen Eigenschaften als auch die Korngrößen bestimmt. Dabei lagen die ermittelten Werte typischerweise bei einer Korngröße von 176 µm, einer Zugfestigkeit von 150 MPa und 111 MPa Dehngrenze sowie

einer Bruchdehnung A von 2,2 %. Alle Werte wurden im Gusszustand gemessen. Es ist klar, dass diese Werte durch eine Wärmebehandlung erheblich verbessert werden können. Allerdings sind diese für die Validierung des numerischen Modells nicht relevant.

Die Erstarrung der Proben wurde mit dem FE-Softwarepaket WinCast berechnet. Mit inversen Simulationen wurden die oben erwähnten Koeffizienten bestimmt. Die **Bilder 1a-d** zeigen die hiermit erzielten Berechnungsergebnisse.

ANZEIGE
55 x 62

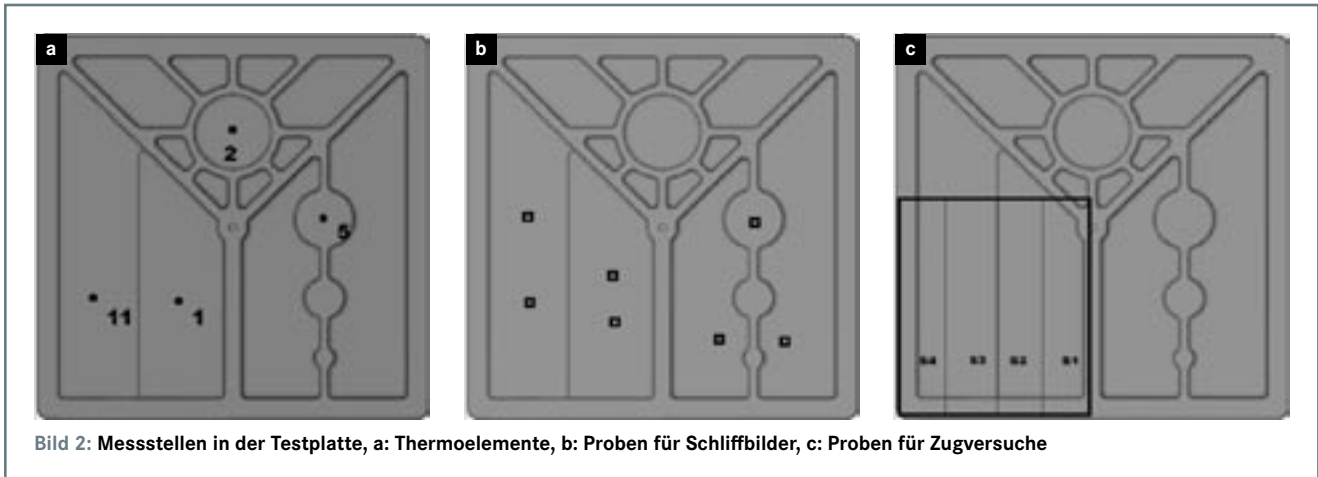


Bild 2: Messstellen in der Testplatte, a: Thermoelemente, b: Proben für Schlifffbilder, c: Proben für Zugversuche

Modell-Verifizierung

Das Modell wurde mit einer Testplatte (Bild 2) verifiziert. Die Platte – ursprünglich von der Volkswagen AG entwickelt – enthält dick- und dünnwandige sowie

massive Bereiche und mehrere Wanddickenübergänge. Die Platte wird einerseits zur Bewertung von Legierungen verwendet, andererseits lassen sich mit ihrer Hilfe Stärken und Schwächen unterschied-

licher Gießverfahren demonstrieren. In dem Projekt Idea dienten sie zusätzlich als komplexes Gussteil zur Verifizierung der verwendeten numerischen Simulationsmodelle.

Eine Serie von Platten wurde gegossen. Die Temperaturen wurden an den in Bild 2a dargestellten Positionen gemessen. An diesen und weiteren Stellen wurden Proben für Analysen von Gefüge und Porosität entnommen (Bild 2b). Bild 2c zeigt schließlich die Stellen, an denen Zugproben entnommen wurden.

Simulationen vom Formfüllen und der Erstarrung mit dem Softwarepaket WinCast zeigten eine gute Übereinstimmung gemessener und simulierter Temperaturen (Bild 3). Des Weiteren wurden Gefüge und mechanische Eigenschaften (beides im Gusszustand) simuliert wie in Bild 4 dargestellt.

Für lokale Erstarrungszeiten bis zu 100 s werden auch Korngrößen mit hoher Genauigkeit vorhergesagt. Bei längeren Erstarrungszeiten wird die Korngröße hingegen überschätzt. Da das Modell für mechanische Eigenschaften auf der Vorhersage der Korngrößen beruht, werden auch die mechanischen Eigenschaften in demselben Bereich bis zu 100 s lokaler Erstarrungszeit mit guter Genauigkeit vorhergesagt. Für die betrachteten Gießverfahren dünnwandiger Gussteile ist dieser Bereich absolut ausreichend.

Beispielhaft zeigt Bild 4 b die lokale Verteilung der Zugfestigkeit. In der Darstellung ist die errechnete Porositätsverteilung mit einem Formfaktor von 0,6 berücksichtigt. Die simulierten Werte liegen bei 165 MPa und liegen somit etwas unterhalb der gemessenen 172 MPa.

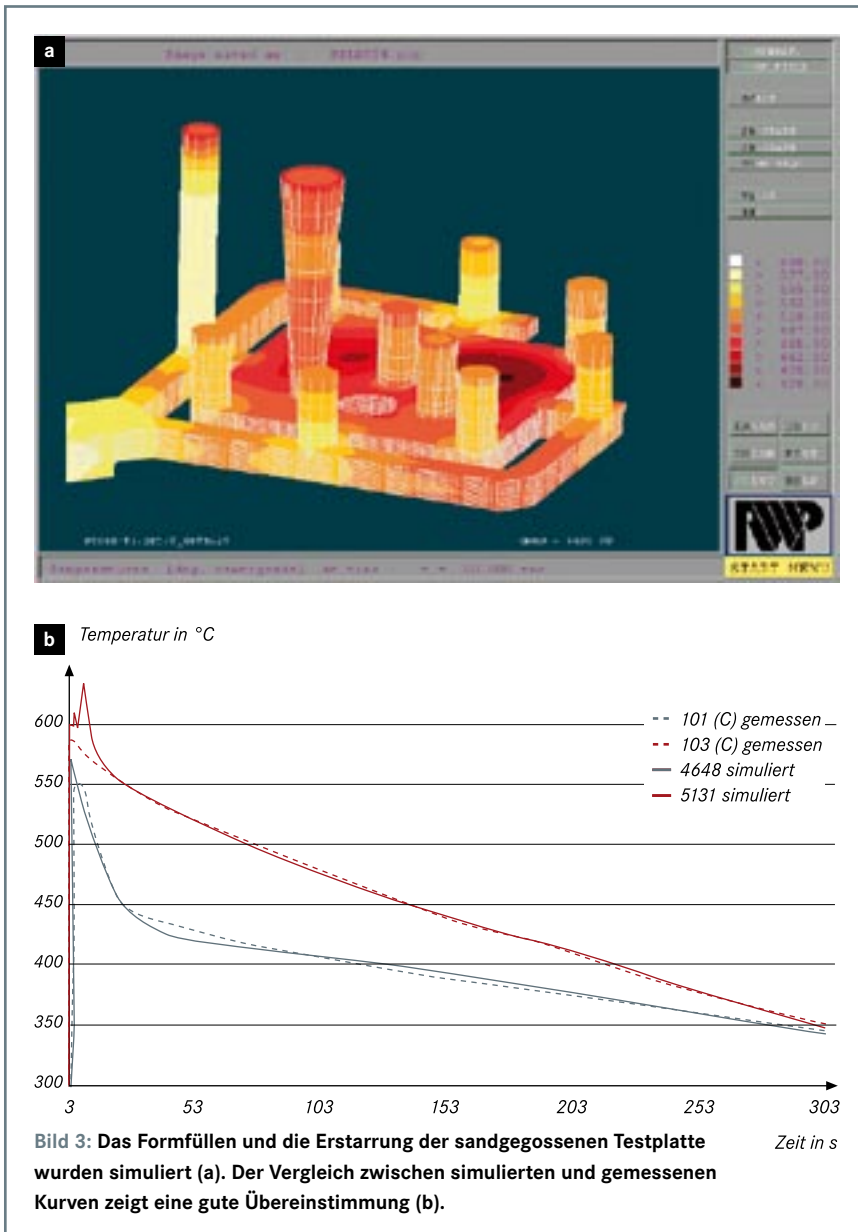


Bild 3: Das Formfüllen und die Erstarrung der sandgegossenen Testplatte wurden simuliert (a). Der Vergleich zwischen simulierten und gemessenen Kurven zeigt eine gute Übereinstimmung (b).

Erste Anwendungen auf dünnwandige Mg-Gussteile

Nach erfolgreicher Verifizierung wurde das Modell auf die im Projekt ausgewählten Prototypen angewandt. Das in den Bildern 5a-c dargestellte Gehäuse im Busi-

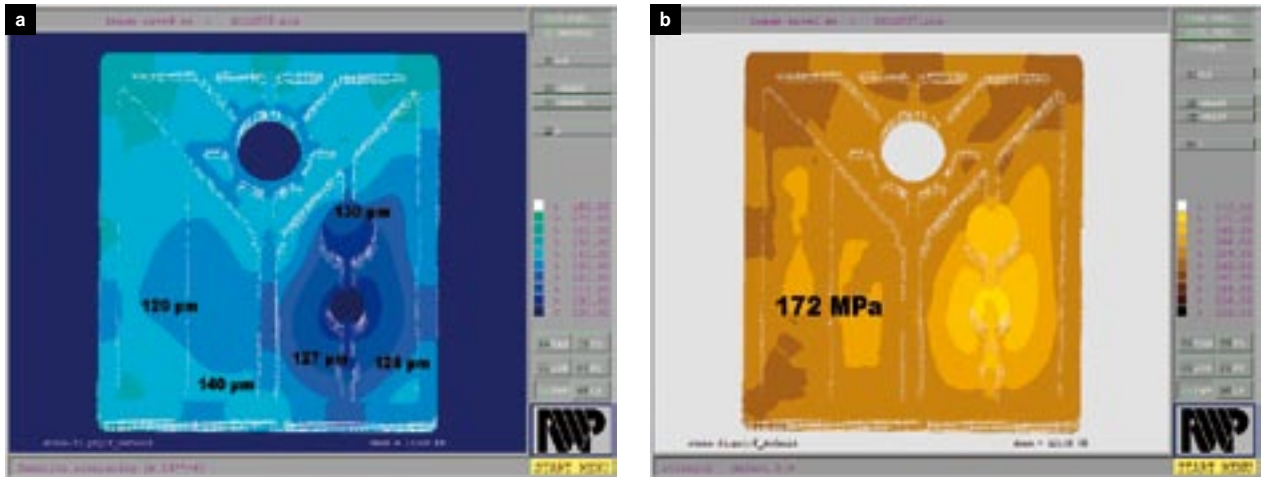


Bild 4: Korngößen und Zugfestigkeiten in der Testplatte, simulierte Werte sind farbig, gemessene Werte numerisch dargestellt, a: Korngrößen, b: Zugfestigkeit; in allen Fällen wurde eine gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung erreicht.

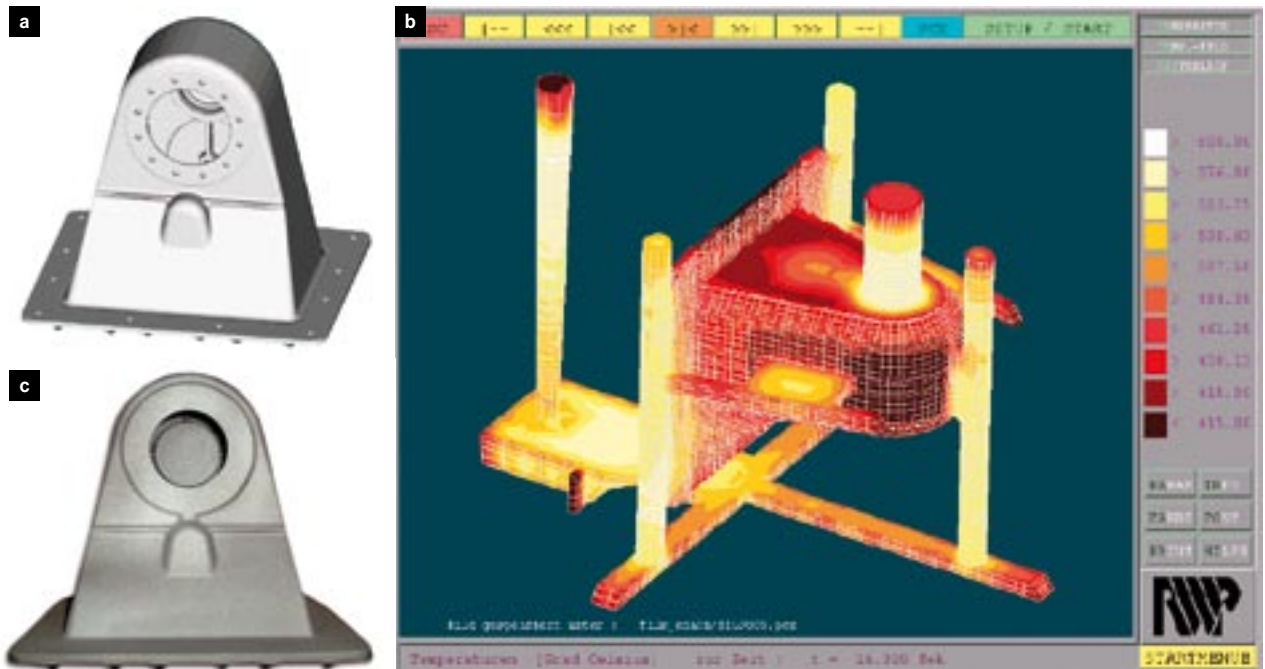


Bild 5: Prototyp Gehäuse im Business Jet G150, a: CAD-Modell, b: Formfüllsimulation: die Schmelze erstarrt noch während des Formfüllens. Änderungen des Gieß- und Anschnittsystems sind erforderlich; simuliert mit WinCast, c: optimiertes fehlerfreies Gehäuse aus AZ91E

ness Jet G150, der von Israel Aircraft Industries Ltd. hergestellt wird, dient der Bewegungsübertragung vom Cockpit zum Leitwerk. Zurzeit wird das Gehäuse als Aluminiumfeinsgussteil hergestellt. Im beschriebenen Forschungsvorhaben Idea wurde das Gehäuse zunächst als Sandgussteil aus der kommerziellen Legierung AZ91E und im Laufe der weiteren Entwicklung mit der neu entwickelten Legierung MRI207S hergestellt.

Die größte Herausforderung lag darin, die geforderte minimale Wanddicke von 2 mm einzuhalten. Verschiedene Varianten des Gießsystems wurden untersucht, bevor schließlich die Wanddicke von

2 mm erreicht wurde. Die Entwicklung des Anschnittsystems wurde weitestgehend durch numerische Simulation unterstützt. Bild 5 b zeigt ein frühes Stadium während der Entwicklung. Das Erstarren der Schmelze während der Füllphase führt hier noch zu Gussfehlern. Entsprechende Modifikationen des Gießsystems ermöglichten schließlich die fehlerfreie Herstellung des Gehäuses.

Die Bilder 6 a-d zeigen die erwarteten Korngrößen und die erwarteten Werte für die mechanischen Eigenschaften. Die Korngrößen liegen zwischen 55 und 140 µm; die Zugfestigkeit erreichte Werte von circa 160 MPa, für die Dehngrenze wurden Wer-

te zwischen 110 bis 120 MPa gemessen und die Bruchdehnung betrug 2,2 %.

Die Eigenschaften wurden unter Berücksichtigung der simulierten Porosität mit einem durchschnittlichen Formfaktor von 0,8 berechnet.

Im weiteren Verlauf des Idea-Projekts wurde das vorgestellte Modell für die neue Legierung MRI207 weiterentwickelt. Die Ergebnisse zeigen erheblich verbesserte Festigkeitswerte des Gehäuses gegenüber dem in der kommerziellen Legierung AZ91E abgegossenen. Einige Ergebnisse, die durch die ersten experimentellen Überprüfungen betätigt wurden, sind in den Bildern 7 a und b dargestellt.

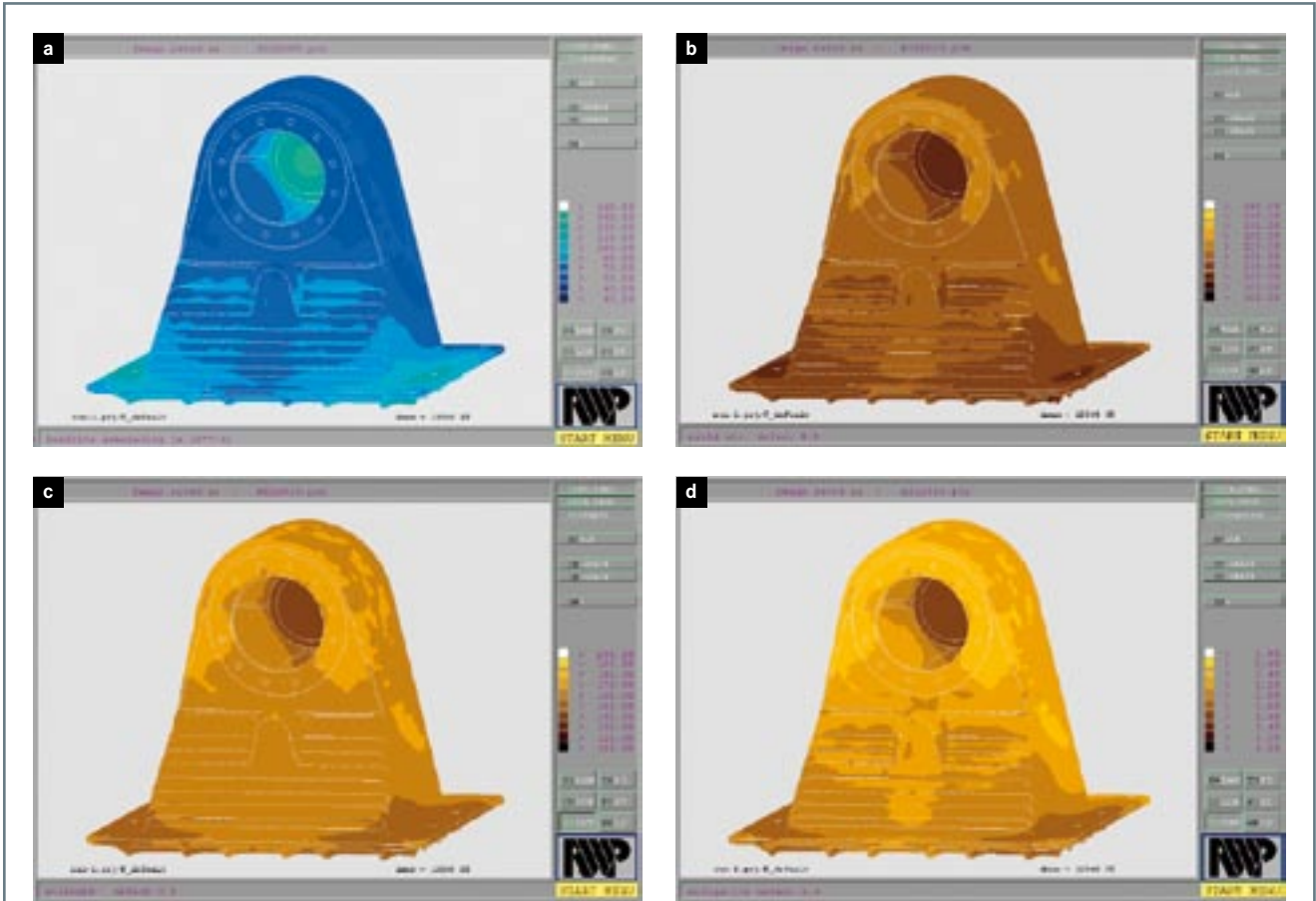


Bild 6: Simulation des Gehäuses aus AZ91E, a: Korngrößenverteilung (55-140 µm), b: Dehngrenze (ca. 120 MPa), c: Zugfestigkeit (ca. 160 MPa), d: Bruchdehnung (ungefähr 2,2 %). Die Simulationen wurden mit der FE-Simulationssoftware WinCast durchgeführt.

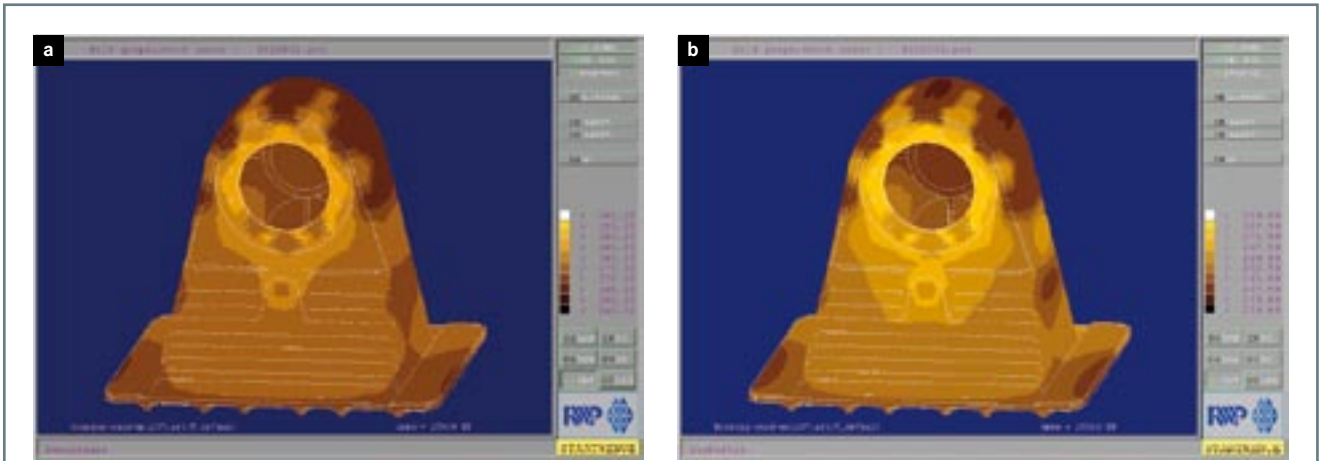


Bild 7: Mechanische Eigenschaften des Gehäuses aus MRI207, a: Dehnung bis zu 190 MPa im Vergleich zu MPa bei AZ91E, b: Zugfestigkeit mit Werten bis zu 280 MPa im Vergleich zu 160 MPa bei AZ91E.

Als zweites Gussteil wurde ein Flugzeugpedal (Bild 8) – ebenfalls für das Business Jet G150 – untersucht. Auch bei

diesem Gussteil erfolgte zunächst die rechnerische Auslegung des Gießsystems sowie die Verifizierung der mechanischen Eigen-

schaften (Bilder 9 a-d) am Computer. Die anschließende Röntgenprüfung bestätigte die Simulationen durch ein fehlerfreies Bauteil (hier Kokillenguss) (Bild 10).



Bild 8: Das Pedal in den Versionen Kokillenguss, Druckguss und Feinguss

Flugtauglichkeit

Ein weiterer Schwerpunkt der Untersuchungen war das Korrosionsverhalten der Mg-Gussbauteile in Abhängigkeit von den verschiedenen Gießverfahren. Während die Kokillen-, Druck- und Feingussteile nach einem Salzsprühtest relativ geringe Korro-

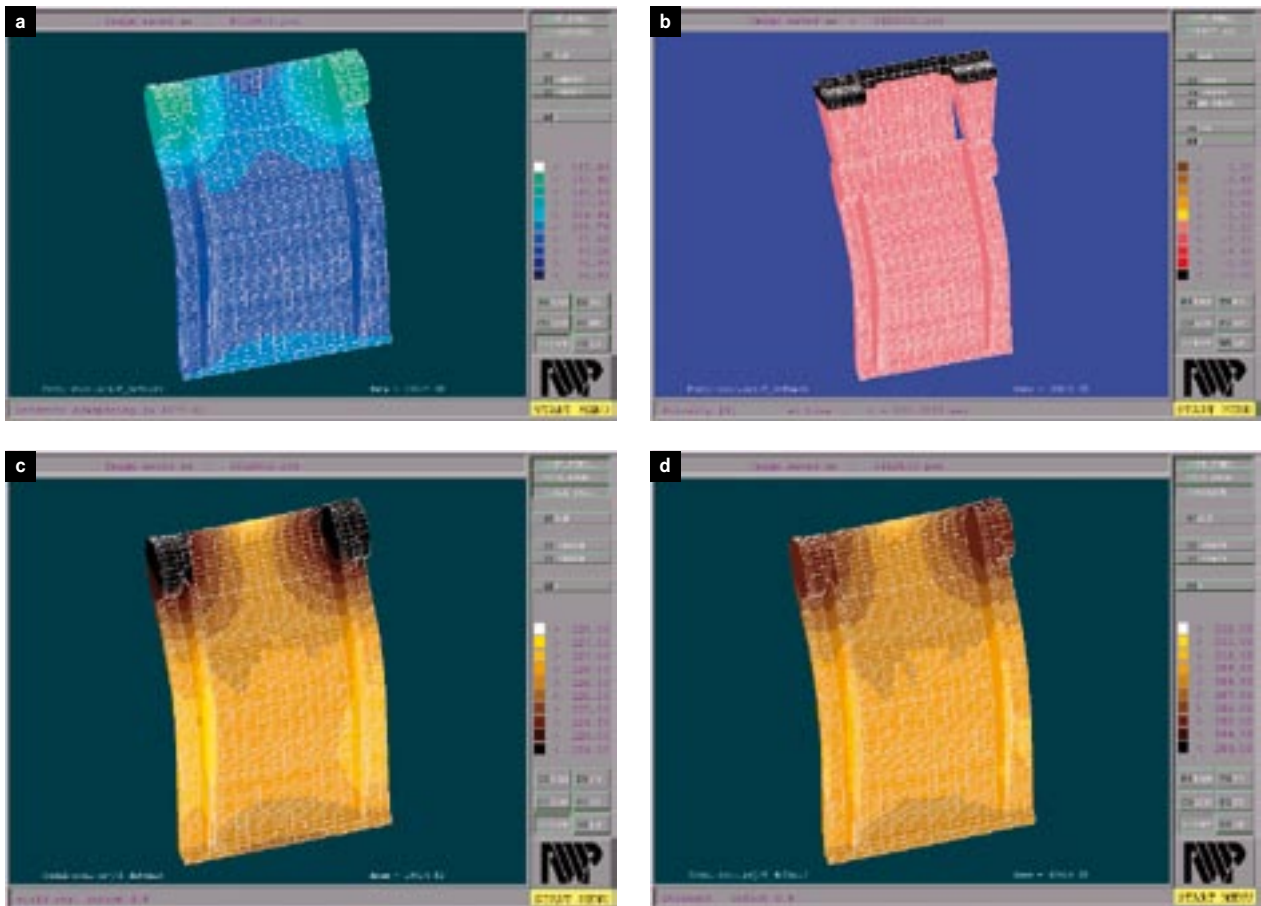


Bild 9: Simulationsergebnisse des Pedals, a: Erstarrungszeiten, b: Porenverteilung, c: Dehngrenze, d: Zugfestigkeit

sionen aufwiesen, zeigten die Sandgussteile größere Korrosionsschäden, vermutlich durch ihre erhöhte Oberflächenrauigkeit.

Zusammenfassung und Ausblick

Ein Modell für die Simulation lokaler mechanischer Eigenschaften von Magnesium-Gussbauteilen wurde vorgestellt und an Testplatten für die kommerzielle Legierung AZ91E verifiziert. Weiterhin wurde das Modell auf die neu entwickelte hoch feste Legierung MRI207 erweitert. Für beide Legierungen wurde das Modell auf zwei typische Gehäusebauteile des Business Jets G150 - produziert von I.A.I. Ltd. in Tel Aviv, Israel - angewendet. Beide Bauteile wurden den strengen Richtlinien der Luftfahrttechnik unterzogen und für flugtauglich befunden.

Mit dieser Entwicklung wurde ein erster Schritt zur Verwendung von Magnesiumbauteilen in der Flugzeugindustrie getan. Die Berechenbarkeit der lokalen Eigenschaften wird die Möglichkeiten der virtuellen Produktentwicklung weiter voranbringen. Das wird auch die Akzeptanz der Industrie, Magnesiumbauteile in Flugzeugen einzusetzen, weiter erhöhen.

Die Arbeiten wurden von der EU unter der Vertragsnummer FP6-503826 und unter Be-

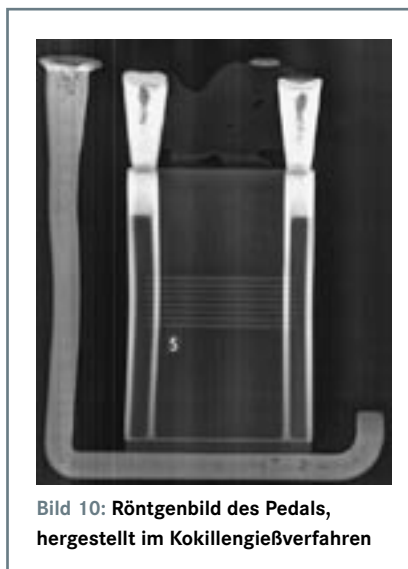


Bild 10: Röntgenbild des Pedals, hergestellt im Kokillengießverfahren

teiligung der folgenden Partner durchgeführt: RWP GmbH (D), Technion Israel Institute of Technology (IL), MRI Magnesium Research Institute (IL), I.A.I. Israel Aircraft Industries Ltd., SpecialValimo Oy (FI), VTT Technical Research Centre of Finland (FI), Inferta GmbH (D), Tecos (SI), UHP University Henri Poncaré (F), MGEP Mondragon University (E), FhG Fraunhofer Gesellschaft IST (D), Stone Foundries Ltd. (UK).

Dr.-Ing. Konrad Weiß, Geschäftsführer, und Dr.-Ing. Christoph Honsel, Leiter der Entwicklungsabteilung, RWP GmbH, Roetgen

Literatur:

- [1] Froes, F. H. u. a.: *Proceedings of the Annual World Magnesium Conference - IMA 2000, 2000, Vancouver, Canada*. S. 56-63.
- [2] Emley, E. F.: *Principles of Magnesium Technology*, Pergamon Press, Oxford, London, Edinburgh, New York, Paris, Frankfurt, 1966. S. 365-377.
- [3] *Journal Light Metall* (2001) Nr. 1, S. 151-156.
- [4] *Metallurgical and Materials Transactions A* (2004) 35 A, S. 309-319.
- [5] Aghion, E.; Bronfin, B.: *Magnesium alloys - Science, Technology and Applications*, (ed.: A. Aghion and D. Eliezer), ISRAELI Consortium for the Development of Magnesium Technologies) Haifa, Israel, 2004. S. 1-44.
- [6] Todte, M.; Thesis, Ph. D.: *Otto-von-Guericke-University, Magdeburg, Germany*, 2002. S. 45-49.
- [7] Simmons, P.; Thesis, Ph.D.: *St. Anne's College, Oxford, UK*, 2004. S. 52.
- [8] *Materials Science and Engineering* (2002) A325, S. 344-355.