



Auswirkung von Porosität auf Festigkeit und Lebensdauer von Gussteilen

– Theoretische Modellierung –

Deutscher Gießereitag 2014

apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Dr.-Ing. E. h. **Rüdiger Bähr**, Dipl.-Wirtsch.-Ing. **Chris Rehse**,
Prof. i.R. Dr. sc. nat. Dr.-Ing. **Heribert Stroppe**

Hamburg, den 16. Mai 2014

Überblick

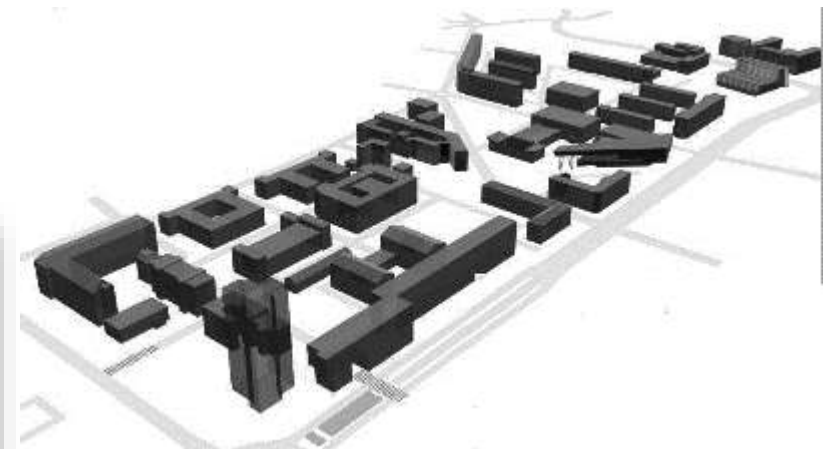
- Lehre und Forschung zur Gießereitechnik an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
- Herausforderungen und Ziele
- Porencharakterisierung mittels Computertomographie
- Einfluss von Porenparametern
- Statische Festigkeit
- Dauerfestigkeit und Lebensdauer
- Zusammenfassung





Arbeiten und studieren an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

(Institut für Fertigungstechnik und
Qualitätssicherung)



... Überblick

Eine der jüngsten Universitäten Deutschlands



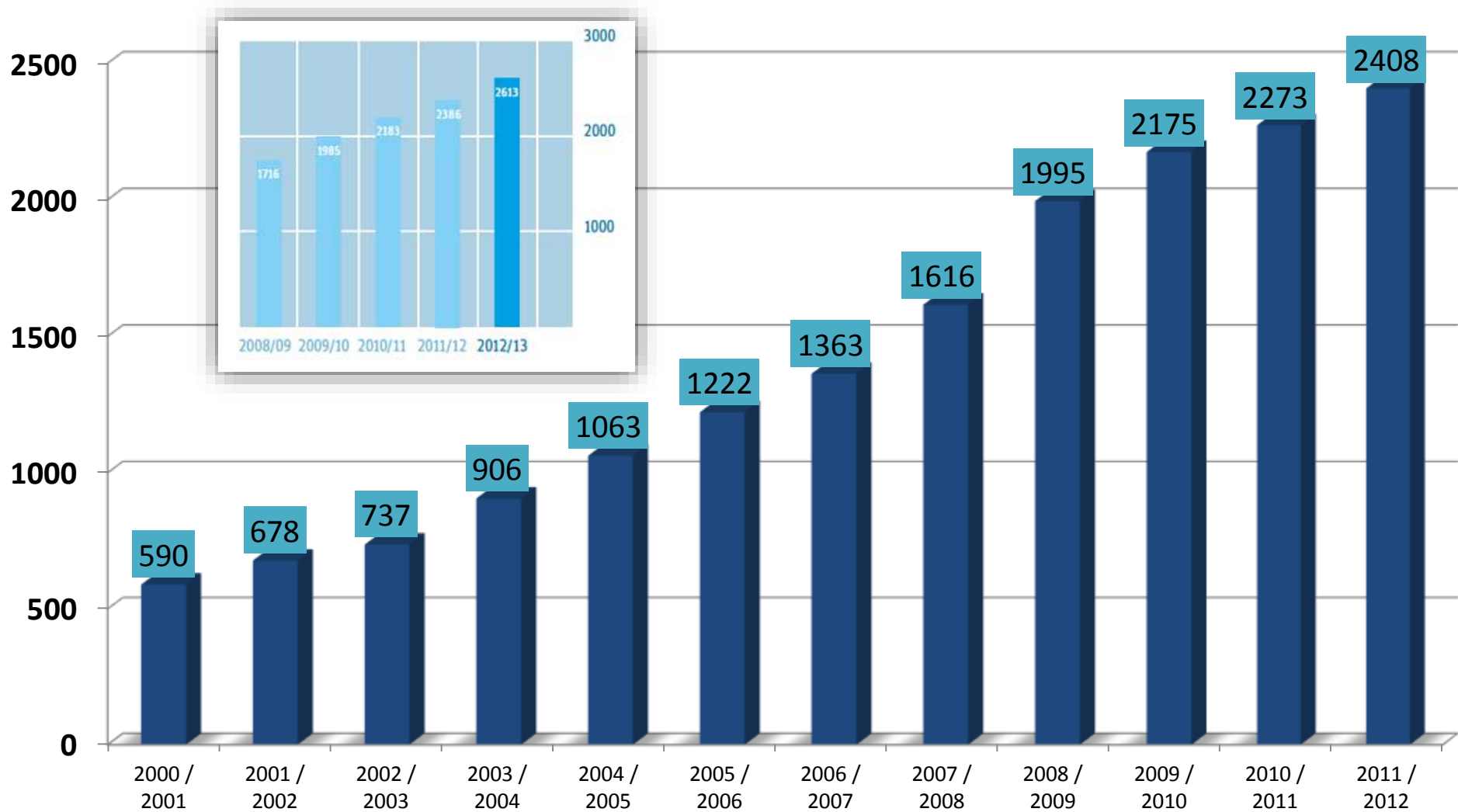
Die Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg (OVGU) ist eine der jüngsten Universitäten Deutschlands. Sie entstand 1993 aus der Fusion der Technischen Universität, der Pädagogischen Hochschule und der Medizinischen Akademie.

→ ww.ovgu.de





Entwicklung der Studierendenzahlen im Maschinenbau an der OVGU



Lehrveranstaltungen Urformen

- Hochtechnologie in der Gießerei
- Anforderungen der Al
- Aluminium
- Werkstoffpotentiale Al (Schmelzebehandlung)
- Wärmebehandlung
- Virtuelle Bauteilentwicklung
- Kernschießsimulation
- Gussfehler
- Pulvermetallurgie
- Urformen nichtmet. Werkstoffe

- WKZ der PT
- WKZ der UR-Modelle
- WKZ der UR-Dauerformen



Werkzeuge der PT M-Semester 3

Hochtechnologie M-Semester 1 und 2

Energieeffiziente Produktion B-Semester 6

Fertigungstechnik-B B-Semester 4

Fertigungslehre B-Semester 3 und 4

- Grundlagen
- Planung
- Energiemanagement
- EE in der Fertigung I
- EE in der Fertigung II

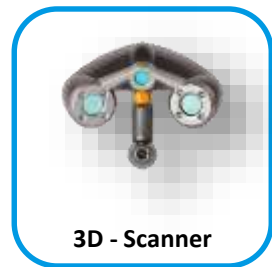
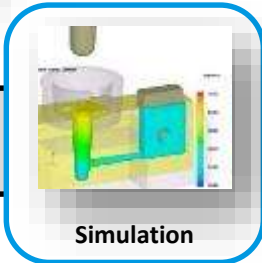
- Einführung
- Werkstoffe, Öfen
- Verlorene Formen
- Dauerformverfahren

- Anschnitt- und Speisertechnik
- Sonderverfahren des Gießens in Dauerformen

FÜR FERTIGUNGSTECHNIK
QUALITÄTSSICHERUNG
UR- UND UMFORMTECHNIK



Innovative GussteilEntwicklung: iGE ego.-Inkubator



- Konstruktion von Modellen und Formen (rechnergestützt)
- 3D-Scan und Geometrie-Import/-Bearbeitung von bestehenden Bauteilen
- Simulation und gießgerechte Gestaltung
- Herstellung von Modell und Form durch Rapid Prototyping und Formstoffdrucker (3DP)
- Feingießen/Schwerkraftgießen vom Prototypen in verschiedenen Legierungen

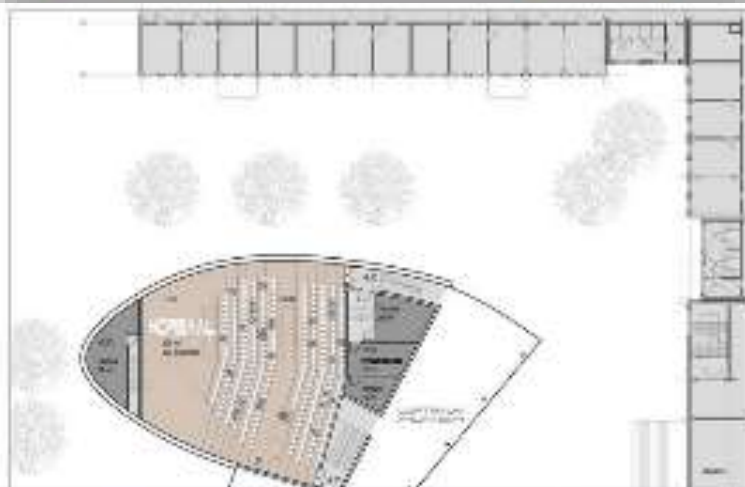
...das Magdeburger FabricationLaboratory

- 3D Konstruktionssystem inklusive Touchpads und Smartboard
- manuell und CNC-gesteuerte Dreh- und Fräsmaschine
- Wasserstrahlschneidanlage und Laser-Cutter
- verschiedene 3D-Drucker (FDM)
 - RepRap
 - Ultimaker
 - Delta Tower
- vollständige Werkzeugausstattung inkl. Elektronikkomponenten





INSTITUT FÜR FERTIGUNGSTECHNIK
UND QUALITÄTSSICHERUNG
BEREICH UR- UND UMFORMTECHNIK



"Jetzt setzt das Land Sachsen-Anhalt sein
Jahres im Hochschulbereich fort. Entgegen
Möllring, die Studentenzahlen halten zu wo
entnehmen, dass allein die Otto-von-Guer
verzichten soll", heißt es in einer Erklärung



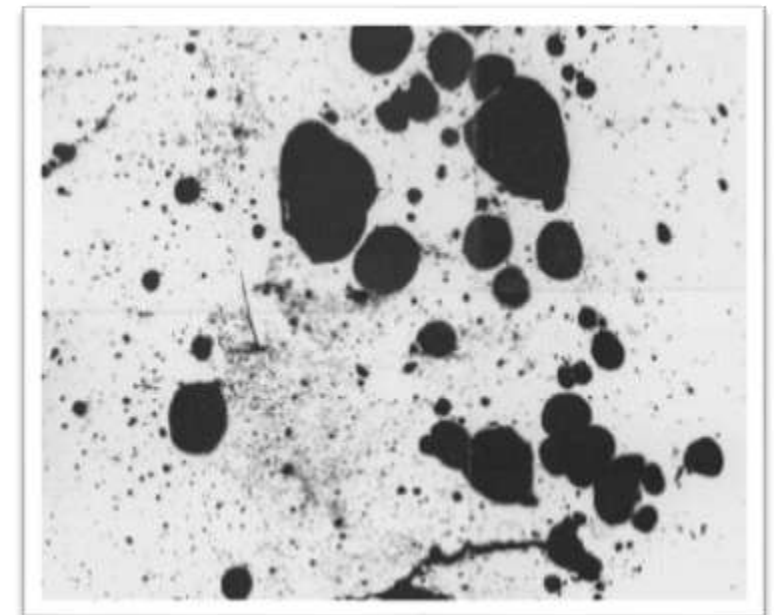


Poren

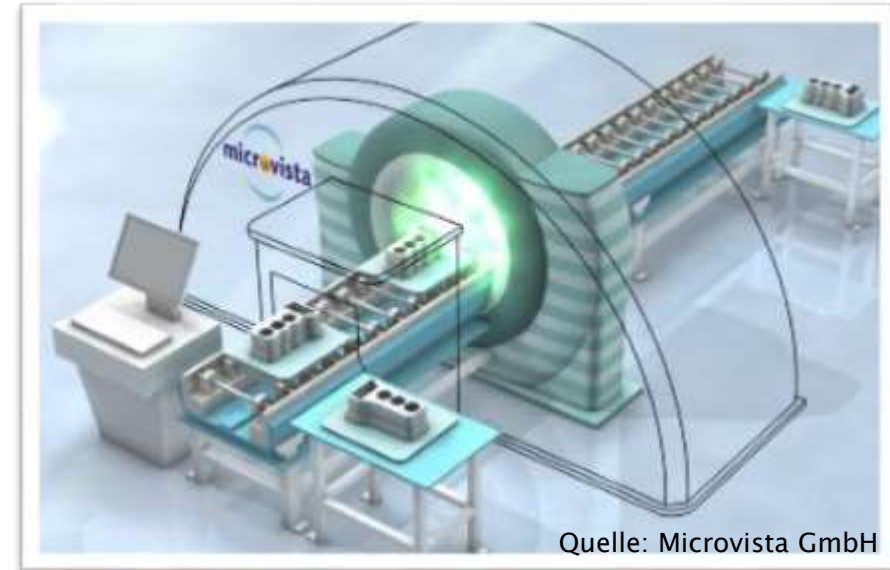
Metallographie

Computertomographie

(zwei- und dreidimensional)

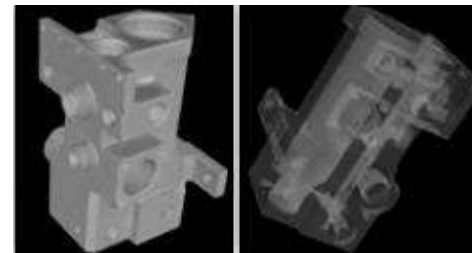


Einsatz der industriellen-Computertomographie

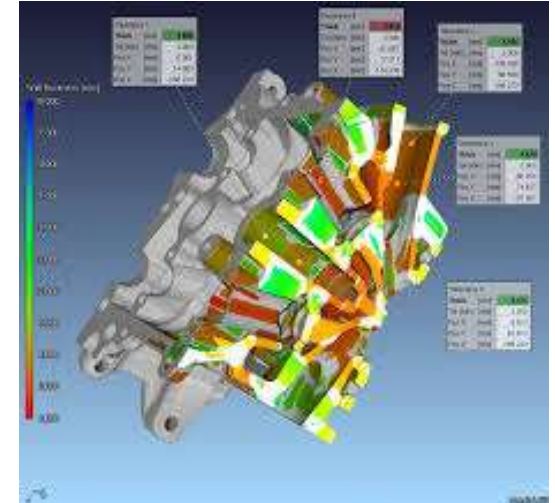


Vorzüge des CT-Einsatzes

- Substitution anderer QS-Maßnahmen (Detektion von Restsand, Erstmusterprüfung, Maßhaltigkeits-, Anbindungsprüfung);

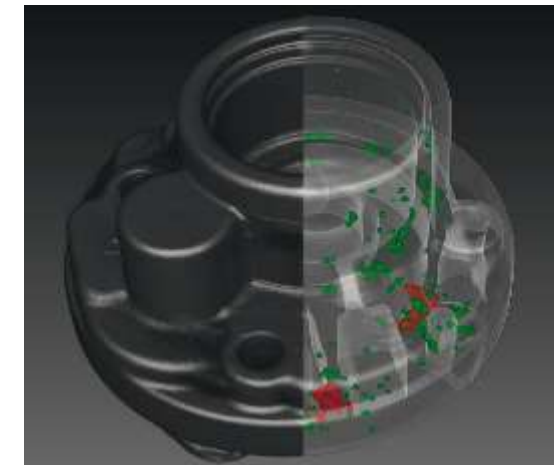
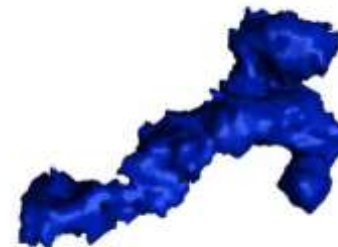


Uni Leuven; Belgien



Phoenix|x-ray CT; EuroMould 2008

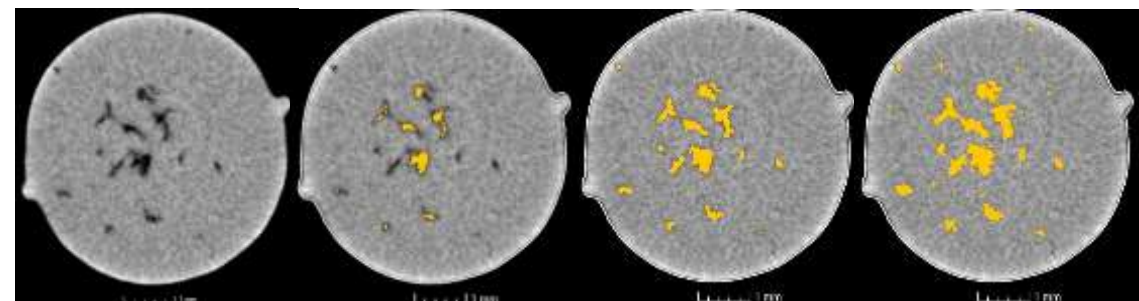
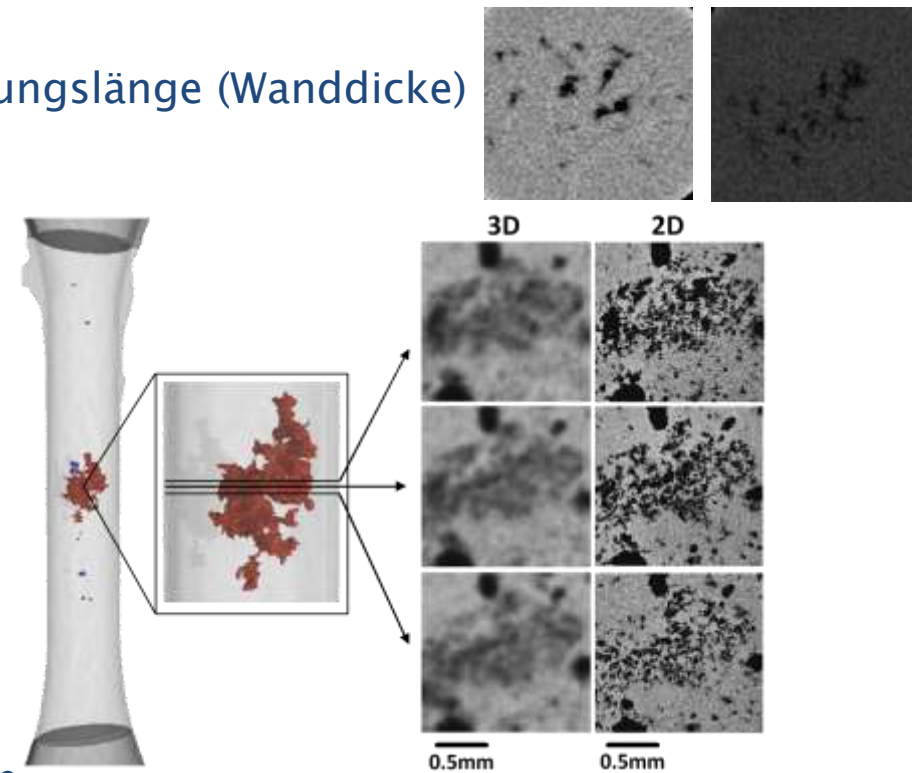
- Serienprozessreife Taktzeiten (Inline-CT);
- Informationsgewinn in der dritten Dimension:
 - Abbildungsmöglichkeit der Gesamtheit an Ungängen im Bauteil;
 - vollständige Morphologieerfassung



Fraunhofer IIS

Fragestellungen zum CT Einsatz im Serienprozess

- Erzielte Bildgüte/-qualität abhängig von Durchstrahlungslänge (Wanddicke) und Werkstoffeigenschaften sowie Scan-Parametern;
- Bisher keine Verifikation der Messmittelsicherheit des kompletten CT-Leistungsspektrums;
- Bisher keine allgemeingültigen Analysebestimmungen der erhaltenen CT-Daten



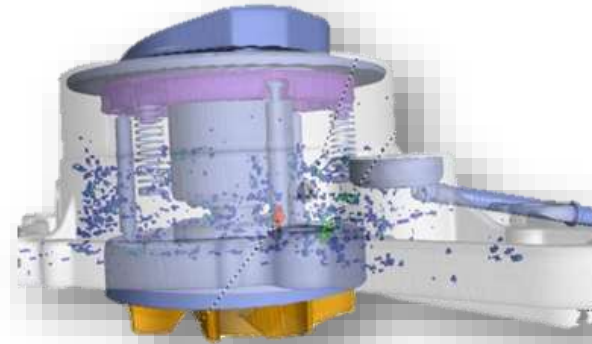
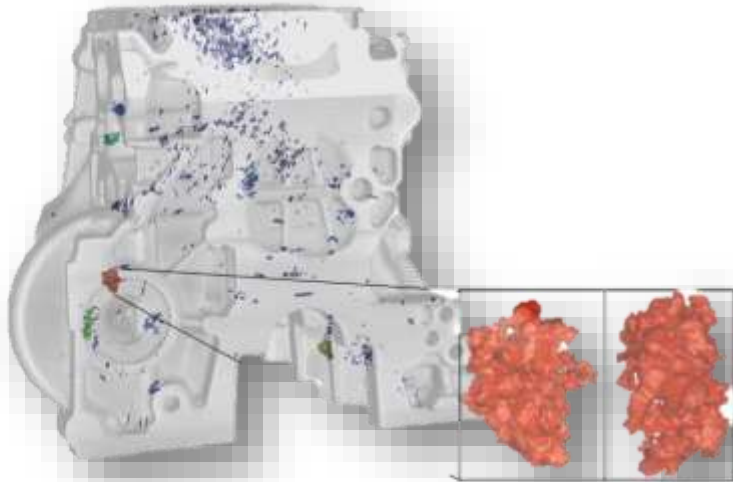
CT-Aufnahme
Schnittebene

Schwellwert
zu gering

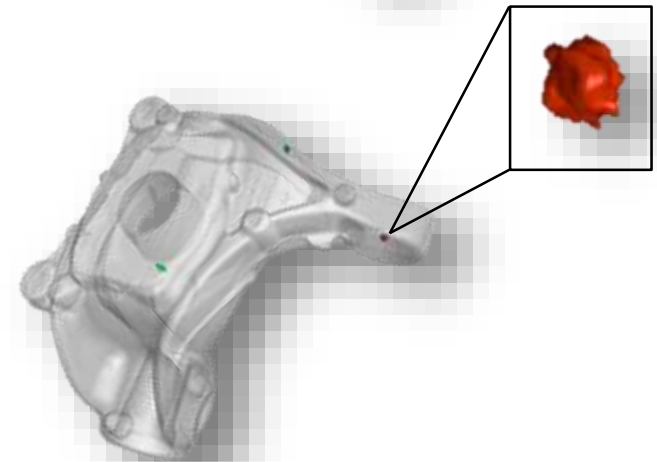
Schwellwert
optimal

Schwellwert
zu groß

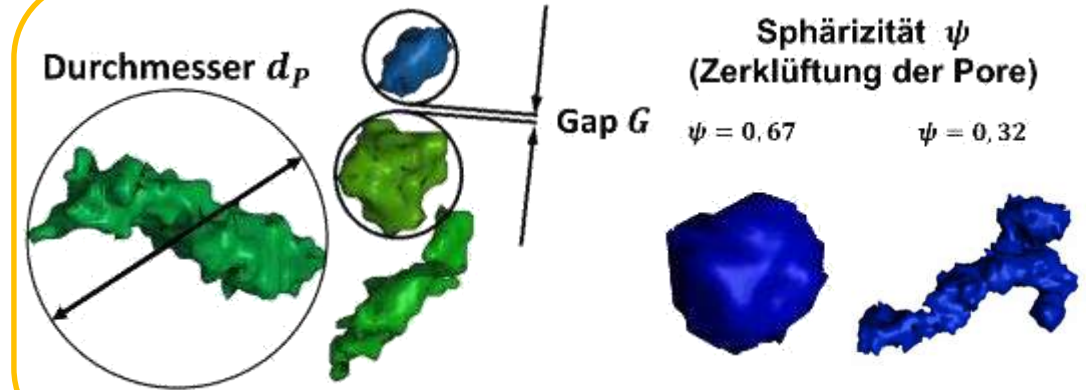
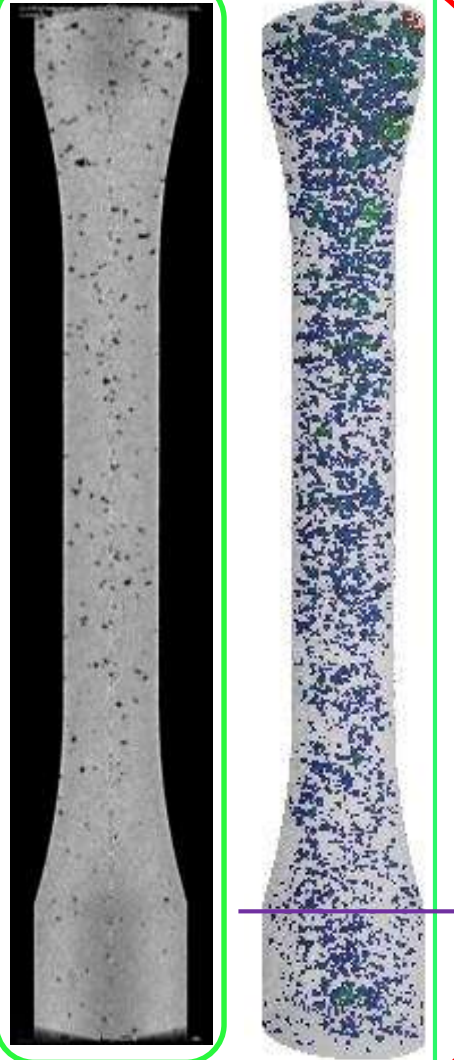
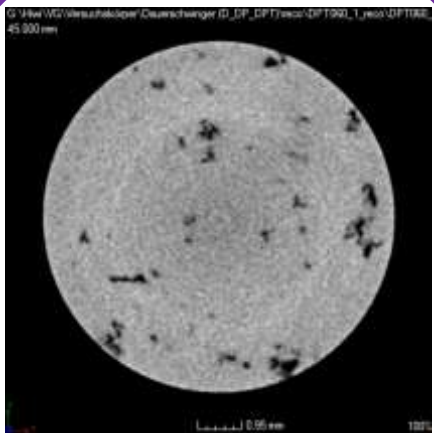
Motivation



- Der Einfluss der Porosität auf die Festigkeitseigenschaften ist wissenschaftlich bekannt.
- Derzeitige 3-dimensionale Qualitätsprüfungen vergleichen Qualitäten mittels bildhafter Darstellungen in Referenzkatalogen oder vordefinierten Grenzwerten.
- Nach wie vor fehlt es an einem quantitativen Bewertungskriterium zur Bauteilbeurteilung hinsichtlich der Festigkeitskennwerte.



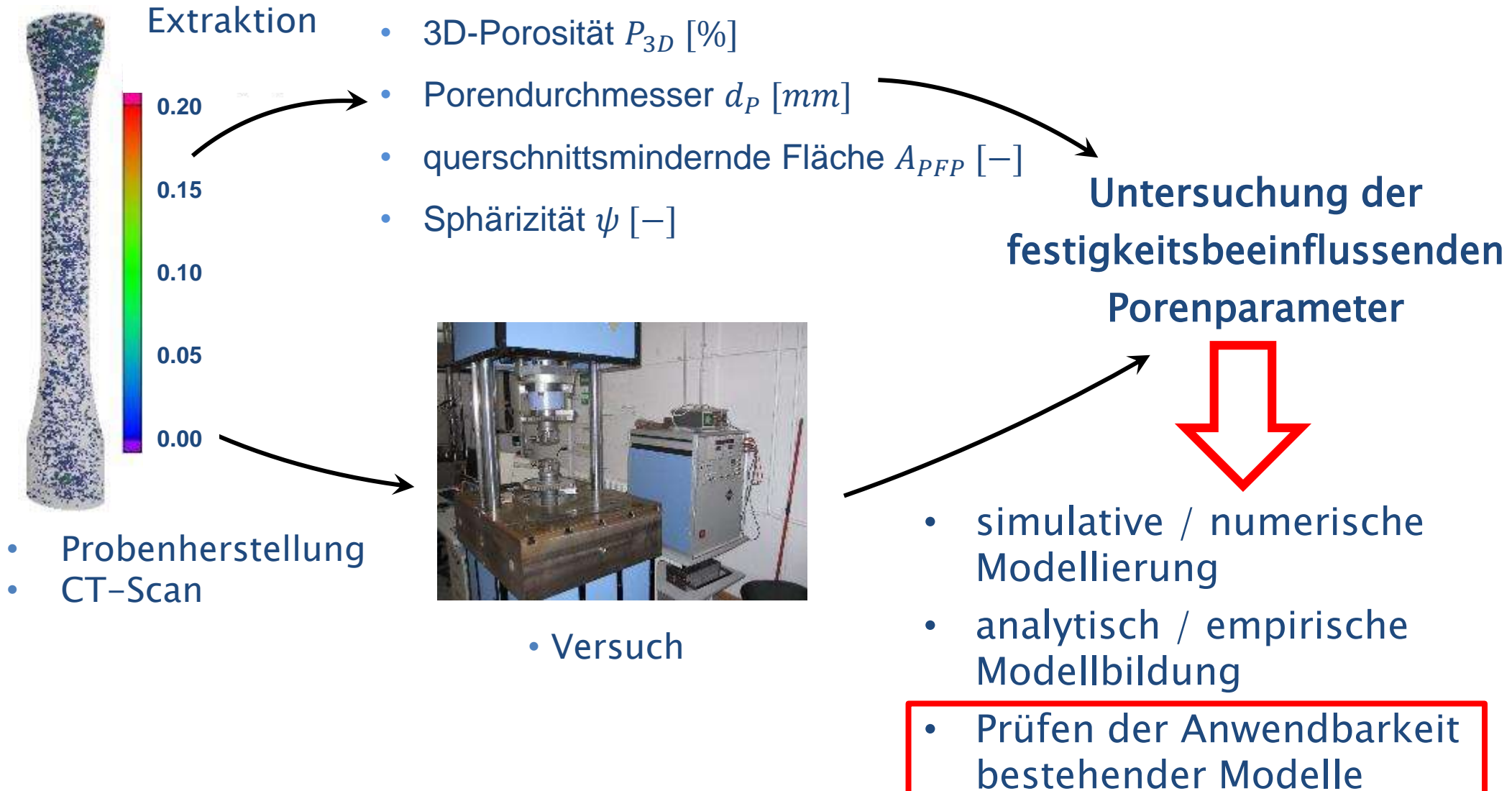
Porencharakterisierung mittels Computertomographie



Dreidimensional: Porenparameter/-kennwerte:

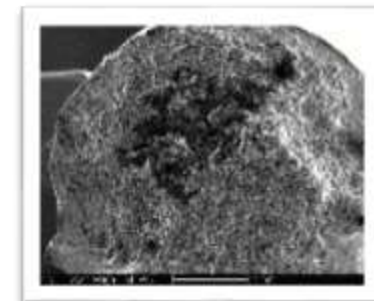
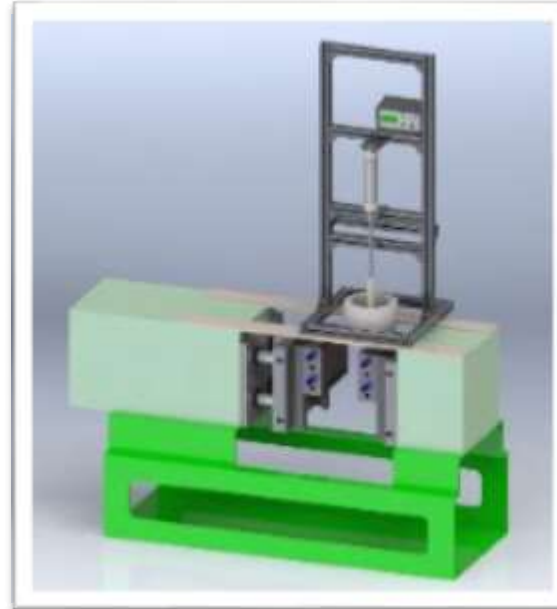
- 3D-Porosität P_{3D} [%]
- Porenvolumen V_P [mm^3]
- Porendurchmesser d_p [mm]
- Abstand zum Rand d_a [mm]
- Gap G [mm]
- Sphärizität ψ [-]
- Querschnittsminderung A_{PFP} [-]

Vorgehen experimentelle Untersuchungen



Experimentelle Untersuchungen

Legierung: Al Si7Mg0,3
Verfahren: Kokillengießen
Zustand: Gusszustand
Wärmebehandelt
Oberfläche: Gusshaut
Bearbeitet
Schmelze-
qualität: Dichteindex (0,5 – 10)
sonstiges: Luft- oder Wasserkühlung
Thermoanalyse





Modell (Stroppe, 2000)

Durch Porosität hervorgerufenen Änderung der statischen Festigkeitskenngrößen von Metallen

$$R_{p0,2} = R_{p0,2}^{P=0} \cdot (1 - P); \quad R_m = R_m^{P=0} \cdot (1 - sP); \quad A = (R_{p0,2} / E)(R_m / R_{p0,2})^{1/n}$$

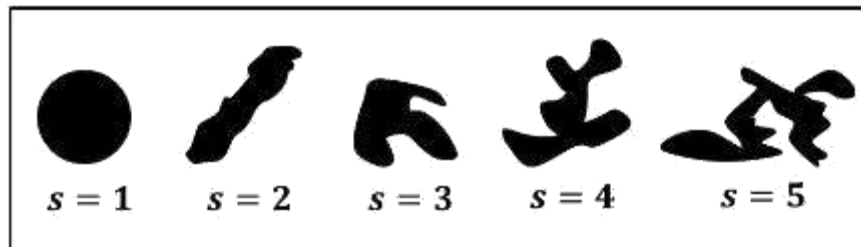
$R_{p0,2}$ 0,2%-Dehngrenze, R_m Zugfestigkeit, A Bruchdehnung

P Porosität ($P\%/100$)

n Verfestigungsexponent in der Gleichung der Fließkurve

E Elastizitätsmodul

$s \geq 1$ 2D-shape factor der Poren (aus dem metallographischen Schlibfbild ermittelt)



3D-Auswertung (CT):

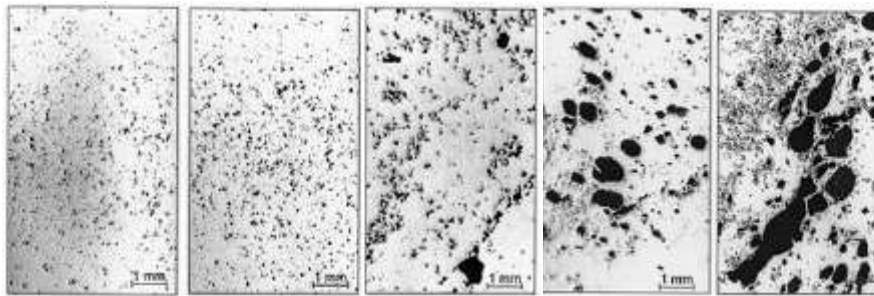
Substitution von s durch $1 / \psi$, wobei $\psi = S_K / S_P$ (Sphärizität der Poren)

S_K Oberfläche einer idealen Kugel mit Volumen der Pore, S_P reale Oberfläche des Defekts

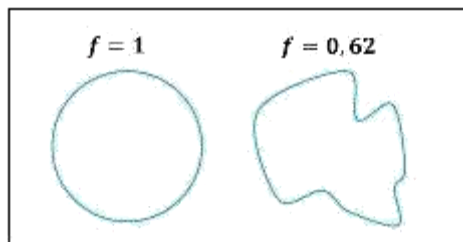
3D-Auswertung „Stroppe-Formeln“

- 2D- vs. 3D-Eingangsgrößen:

– Flächenporosität P [%] →



– Formfaktor $f = \frac{4\pi A_P}{U^2}$ →

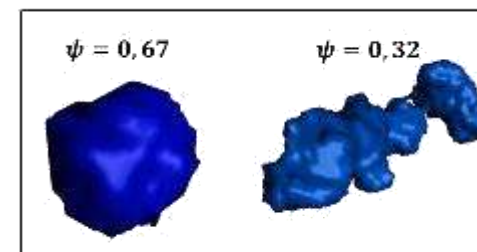


– Shapefaktor $s = \frac{1}{f}$ ≙

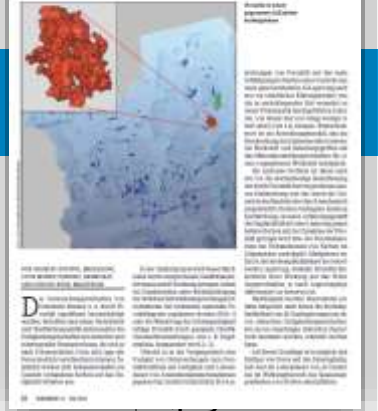
Volumenporosität P_{3D} [%]



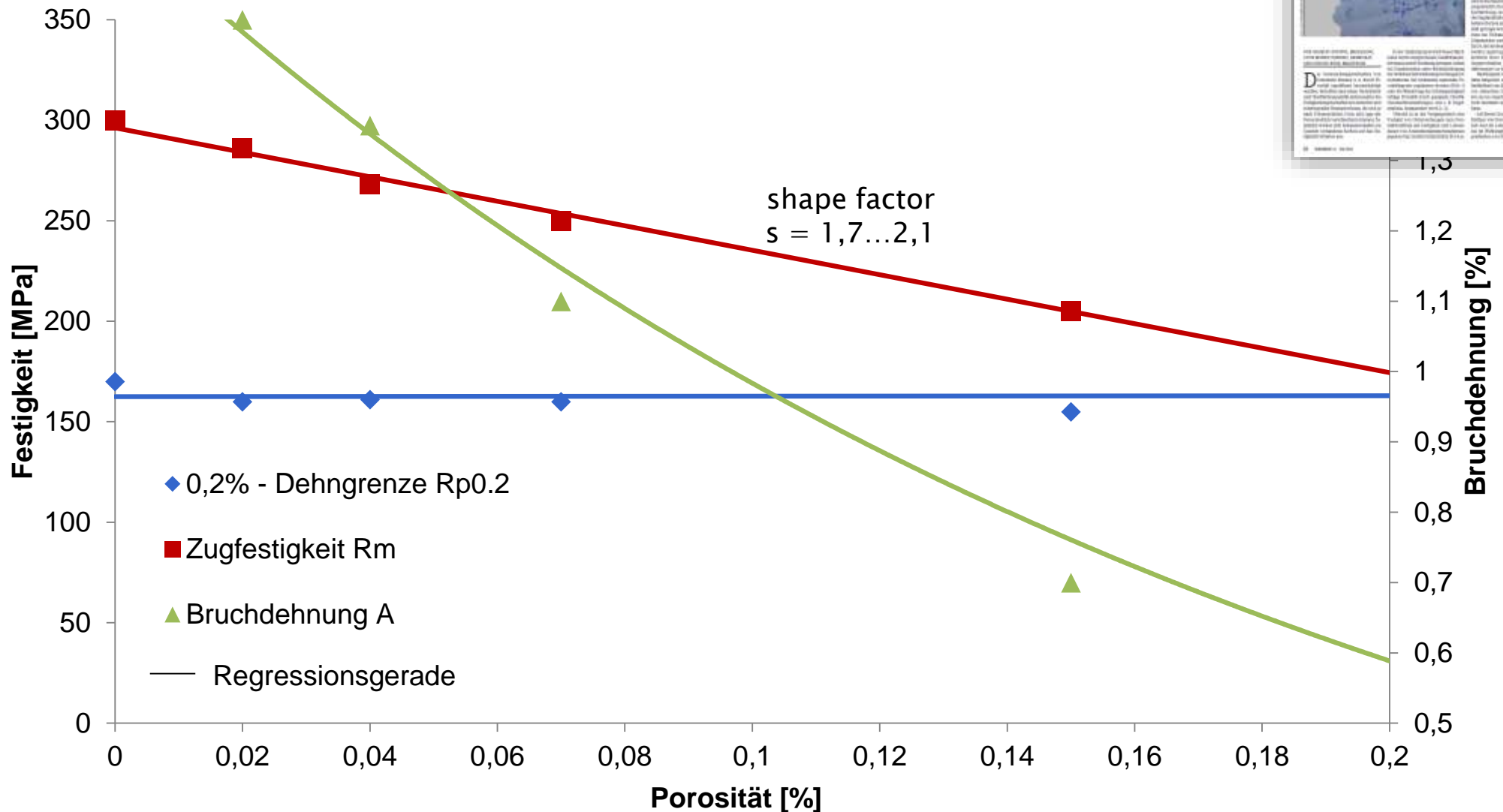
Sphärizität $\psi = \frac{S_K}{S_P} = \frac{\pi^{1/3}(6V_P)^{2/3}}{S_P}$



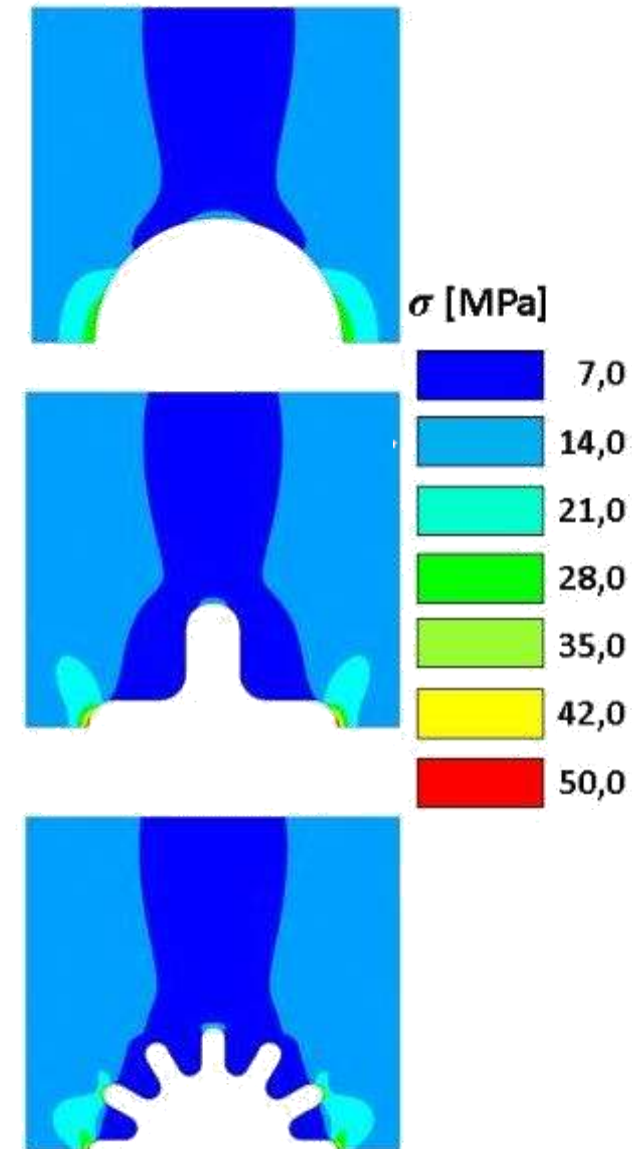
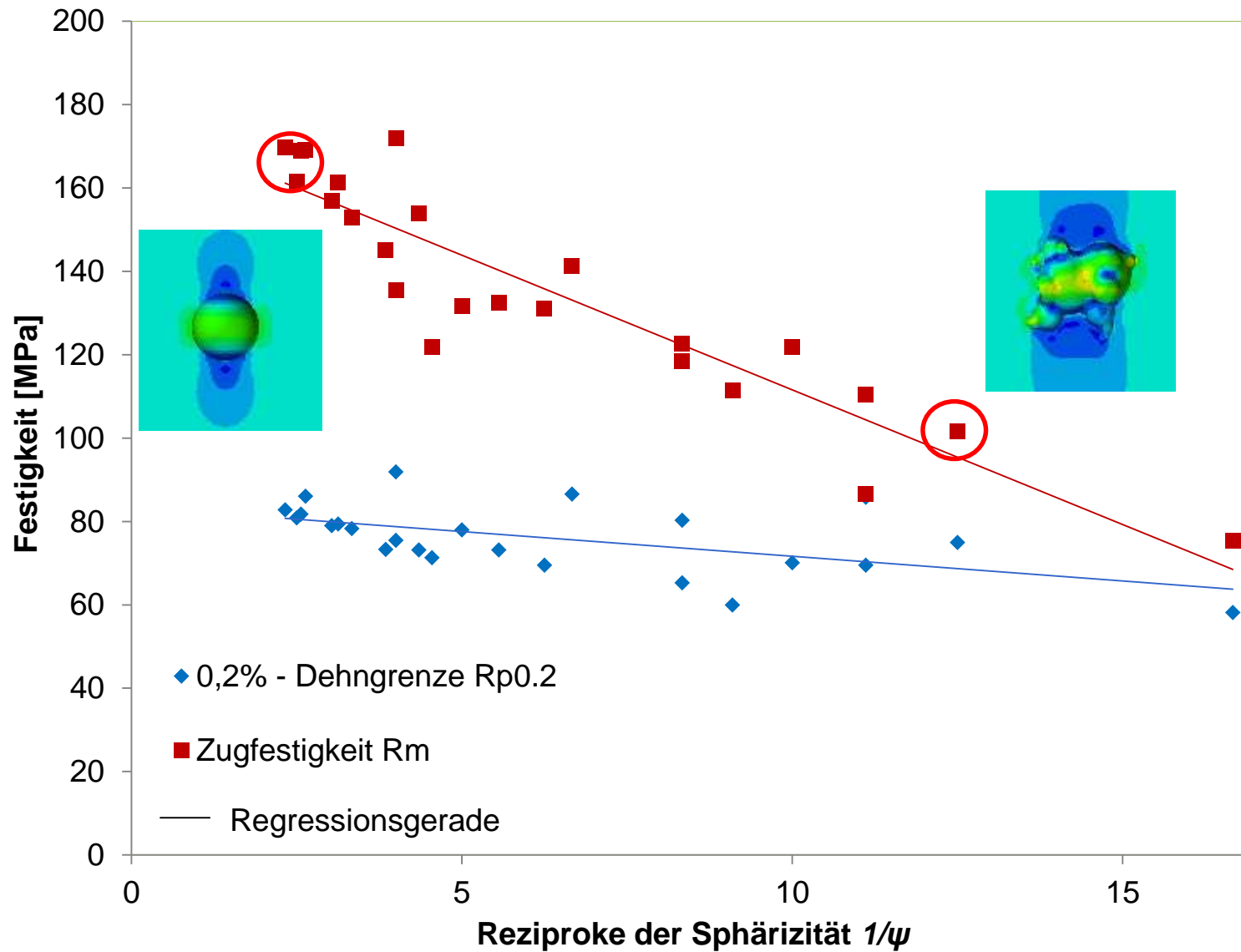
Reziproke der Sphärizität $\frac{1}{\psi}$



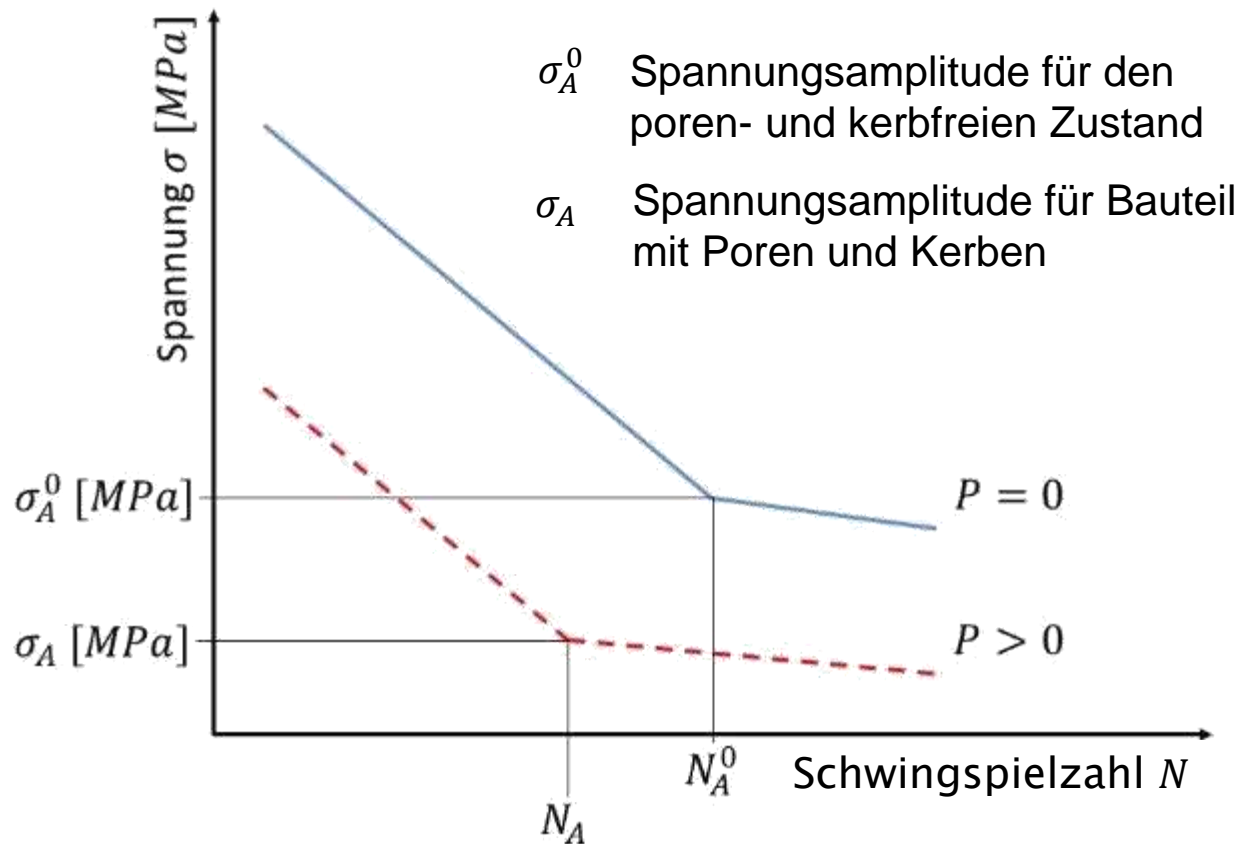
Einfluss der Porosität (nach Stroppe)



Einfluss der Sphärizität einer Pore



Dauerfestigkeit und Lebensdauer



Modell (Stroppe, Sonsino, Bähr, 2011)

Durch Porosität und Kerben hervorgerufene Änderung von Dauerfestigkeit und Lebensdauer von Al-Gusslegierungen

Kerbempfindlichkeitszahl der Al-Legierung: $\eta = K_t / [1 + K_t M^2 S / n]$

K_t (statische) Formzahl der Bauteilkerbe

M Mittelspannungsempfindlichkeit der Legierung

n Verfestigungsexponent der Legierung, S Streckgrenzenverhältnis $R_{p0,2} / R_m$,

Abfall der Dauerfestigkeit von σ_A^0 (porenfreier, ungekerbter Zustand) auf σ_A :

$$\frac{\Delta \sigma_A}{\sigma_A^0} = -[1 - 2\eta \cdot (1 - \eta)] \cdot (s + 1) \cdot P \cdot 100\% \quad (\text{ohne Bauteilkerben: } \eta = 0)$$

P Porosität ($P\% / 100$)

$s \geq 1$ Rundheitsfaktor der Poren (aus dem metallographischen Schliffbild ermittelt)

$1/\psi$ anstelle von s bei 3D-Auswertung (CT) mit der Sphärizität der Poren ψ

Abfall der Lebensdauer von N_A^0 auf N_A : $N_A = N_A^0 \cdot (\sigma_A / \sigma_A^0)^k$

k Neigungsexponent der Wöhler-Linie (doppelt-logarithmische Darstellung)

Durch Porosität und Kerben hervorgerufene Änderung der Dauerfestigkeit und Lebensdauer – Modellrechnung

Legierung:	AlSi7Mg0,6 - T6	AlSi11MgSr
Zugfestigkeit:	$R_m = 288 \text{ MPa}$	$R_m = 131 \text{ MPa}$
Dauerfestigkeits-Knickpunkt bei	$\sigma_A^0 = 80 \text{ MPa}; N_A^0 = 10^6$	$\sigma_A^0 = 65 \text{ MPa}; N_A^0 = 10^6$
Porosität (Gasporen, $s = 1$):	8 %	8 %
ungekerbter Zustand	$K_t = 0; \eta = 0$	$K_t = 0; \eta = 0$
Abfall der Dauerfestigkeit	16 % (80 → 67 MPa)	16 % (65 → 55 MPa)
Abfall der Lebensdauer	$1,1 \cdot 10^6 \rightarrow 5 \cdot 10^5$	$1,0 \cdot 10^6 \rightarrow 7 \cdot 10^4$

Durch Porosität und Kerben hervorgerufene Änderung der Dauerfestigkeit und Lebensdauer – Modellrechnung

Legierung:	AlSi7Mg0,6 - T6	AlSi11MgSr
Zugfestigkeit:	$R_m = 288 \text{ MPa}$	$R_m = 131 \text{ MPa}$
Dauerfestigkeits-Knickpunkt bei	$\sigma_A^0 = 80 \text{ MPa}; N_A^0 = 10^6$	$\sigma_A^0 = 65 \text{ MPa}; N_A^0 = 10^6$
Porosität (Gasporen, $s = 1$):	8 %	8 %
ungekerbter Zustand	$K_t = 0; \eta = 0$	$K_t = 0; \eta = 0$
Abfall der Dauerfestigkeit	16 % (80 → 67 MPa)	16 % (65 → 55 MPa)
Abfall der Lebensdauer	$1,1 \cdot 10^6 \rightarrow 5 \cdot 10^5$	$1,0 \cdot 10^6 \rightarrow 7 \cdot 10^4$
gekerbter Zustand	$K_t = 2,5; \eta = 0,40$	$K_t = 2,5; \eta \approx 1 \text{ (Max)}$
Abfall der Dauerfestigkeit (gesamt):	21 % (80 → 63 MPa)	49 % (65 → 39 MPa)
davon		
– infolge Porosität:	8 %	16 % (Maximum)
– infolge Kerbung:	13 %	33 %

Durch Porosität und Kerben hervorgerufene Änderung der Dauerfestigkeit und Lebensdauer – Modellrechnung

Legierung:	AlSi7Mg0,6 - T6	AlSi11MgSr
Zugfestigkeit:	$R_m = 288 \text{ MPa}$	$R_m = 131 \text{ MPa}$
Dauerfestigkeits-Knickpunkt bei	$\sigma_A^0 = 80 \text{ MPa}; N_A^0 = 10^6$	$\sigma_A^0 = 65 \text{ MPa}; N_A^0 = 10^6$
Porosität (Gasporen, $s = 1$):	8 %	8 %
ungekerbter Zustand	$K_t = 0; \eta = 0$	$K_t = 0; \eta = 0$
Abfall der Dauerfestigkeit	16 % (80 → 67 MPa)	16 % (65 → 55 MPa)
Abfall der Lebensdauer	$1,1 \cdot 10^6 \rightarrow 5 \cdot 10^5$	$1,0 \cdot 10^6 \rightarrow 7 \cdot 10^4$
gekerbter Zustand	$K_t = 2,5; \eta = 0,40$	$K_t = 2,5; \eta \approx 1 \text{ (Max)}$
Abfall der Dauerfestigkeit (gesamt):	21 % (80 → 63 MPa)	49 % (65 → 39 MPa)
davon		
– infolge Porosität:	8 %	16 % (Maximum)
– infolge Kerbung:	13 %	33 %
Gesamtabfall der Lebensdauer:	$1,0 \cdot 10^6 \rightarrow 3,8 \cdot 10^5$	$1,0 \cdot 10^6 \rightarrow 2,8 \cdot 10^4$
Neigungsexponent der Wöhler-Linie	$k = 4$	$k = 7$

Zusammenfassung

- Mit den angegebenen mathematischen Beziehungen kann der Einfluss von Porosität (Volumenanteil und Porenform) sowohl auf die statischen als auch die zyklischen Festigkeitseigenschaften von Al-Legierungen zutreffend beschrieben werden.
- Die für die 2D-Bewertung entwickelten Auswerteformeln können auch für die 3D-Bewertung angewendet werden, wenn darin anstelle des reziproken 2D-Formfaktors der Poren die mit dem CT ermittelte reziproke 3D-Sphärizität gesetzt wird.
- Für die Bewertung des Porositätseinflusses auf die Dauerfestigkeit und Lebensdauer werden Auswerteformeln angegeben, die zugleich den Einfluss von Bauteilkerben in Abhängigkeit von der Kerbempfindlichkeit der Legierung berücksichtigen.

Ausblick

- Betrachtung weiterer Gießverfahren und die Anwendbarkeit der modifizierten Modelle
- Untersuchungen weiterer signifikanter Porenparameter
- Verfolgung simulationstechnischer Ansätze zur Modellierung der Problemstellung (Masterarbeit Hr. Voß)
- Adaption in einer serientauglichen Bewertungsroutine unter Einbezug bauteilspezifischer Belastungskollektive (Diss. Hr. Rehse)
- Betrachtung von Grenzwerten und Wechselwirkungen (Masterarbeit Hr. Michaelis)
- Anwendung der Erkenntnisse am Realbauteil (Masterarbeit Hr. Kohla)



FAKULTÄT FÜR
MASCHINENBAU



Vielen Dank für Ihr Interesse
und Ihre Aufmerksamkeit.

