Universität Rostock

Traditio et Innovatio

Wintersemester 2015/2016

Hydraulische Strömungsmaschinen

Prof. Dr. Hendrik Wurm

Lehrstuhl für Strömungsmaschinen

Inhalt der Vorlesung
Hydraulische Strömungsmaschinen

Universität Rostock Traditio et Innovatio

- Einführung / industrieller Hintergrund (Vorlesung 1)
- Strömungstechnische Grundlagen (Vorlesung 2)
  Navier-Stokes-Gleichungen, Kontinuitätsgleichung
  Turbulenzmodellierung
  Grenzen der verschiedenen Modellierungsmöglichkeiten
- Kavitation (Vorlesungen 3,4)
- Strömungsmaschinen mit Gehäuse (Entwurf, Kennlinien, Regelung, Betrieb) (Vorlesung 5,6,7,8)
- Strömungsmaschinen ohne Gehäuse (Entwurf, Kennlinien, Regelung) (Vorlesung 9)
- Strömungstechnische Optimierung mit numerischen Methoden (Vorlesung 10)

Inhalt der Vorlesung
Hydraulische Strömungsmaschinen

Universität Rostock Traditio et Innovatio

- Strömungswandler (Vorlesung 11)
- spezielle Bauformen – Seitenkanalpumpen, Schraubenspindelpumpen (Vorl. 12)
- spezielle Bauformen – Voith-Schneider-Propeller (Vorlesung 13)
- Anwendung bionischer Methoden und Herzunterstützungssysteme (Vorl. 14)

- Bionik – Kunstwort aus Zusammensetzung der Worte Biologie und Technik
- Lernen von der Natur
- Selbstadaption an veränderte Bedingungen

- Strömungstechnik
- Werkstofftechnik
- Strukturmechanik
- Regeltechnik
- Sensorik

typische Beispiele aus Strömungs- und Werkstofftechnik

- Strömungstechnik
  - Haifischhaut – durch- und überströmte Bauteile
  - Strömungsbeeinflussung durch Formänderungen am Vogelflügel- Tragflügel
- Werkstofftechnik
  - Lotosblumeneffekt – selbstreinigende Oberflächen

typische Beispiele aus der Mechanik und Regelungstechnik

- Strukturmechnik
  - Spinnennetz – Tragwerke (Münchner Olympiastadion)
  - Baum- und Knochenwachstum (Axiom konstanter Spannung) – Maschinenelemente, Gehäuse
- Regelungstechnik
  - Selbstreparaturmechanismen – aufblasbare Brücken

- es folgen zwei Beispiele

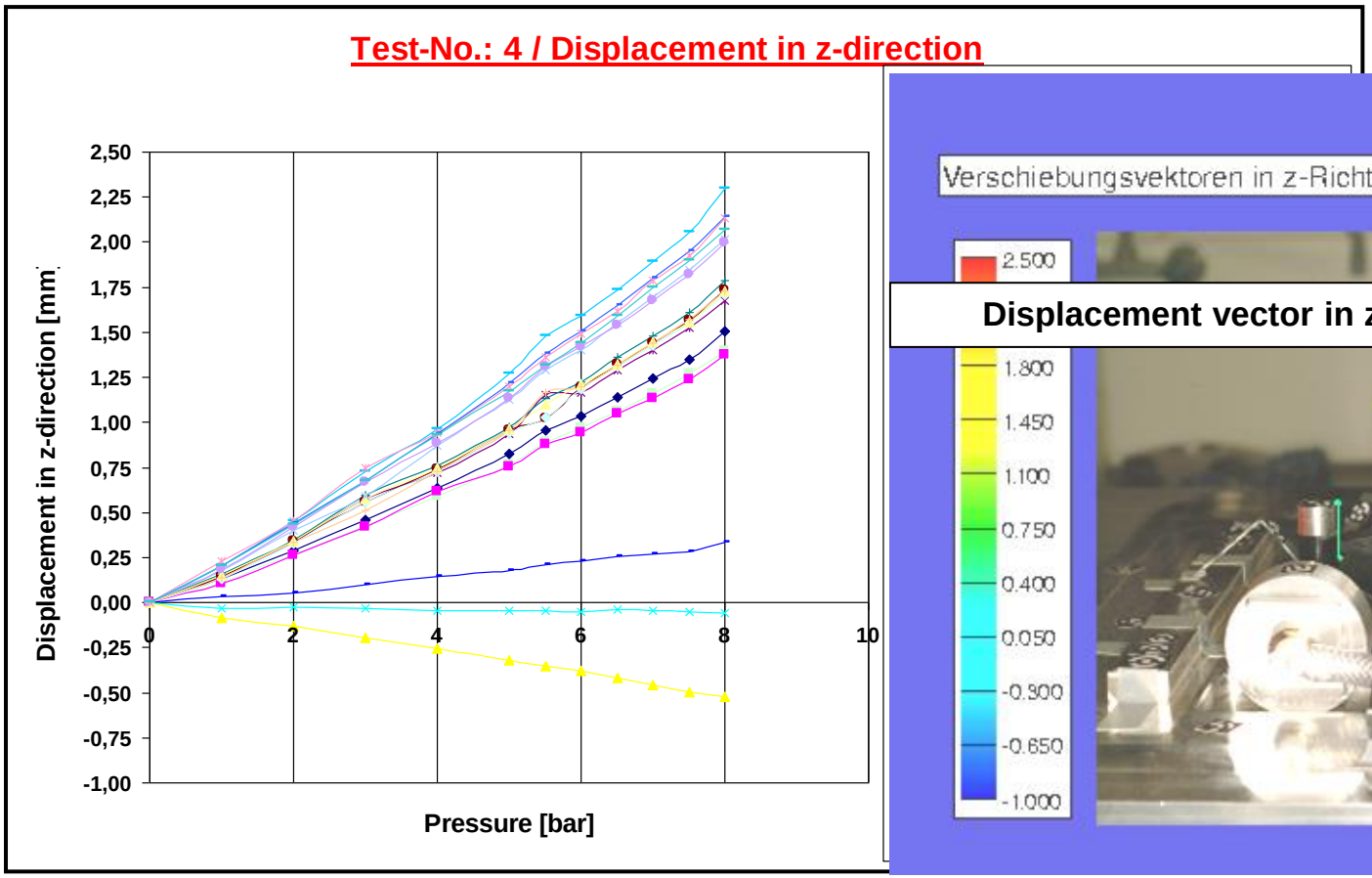
- Im ersten Fall wird das Vorgehen der Natur „kopiert“ und im zweiten Fall ist die technische Lösung eine andere als sie die Natur gefunden hat, aber in die Natur (in diesem Fall der menschliche Körper) integriert.

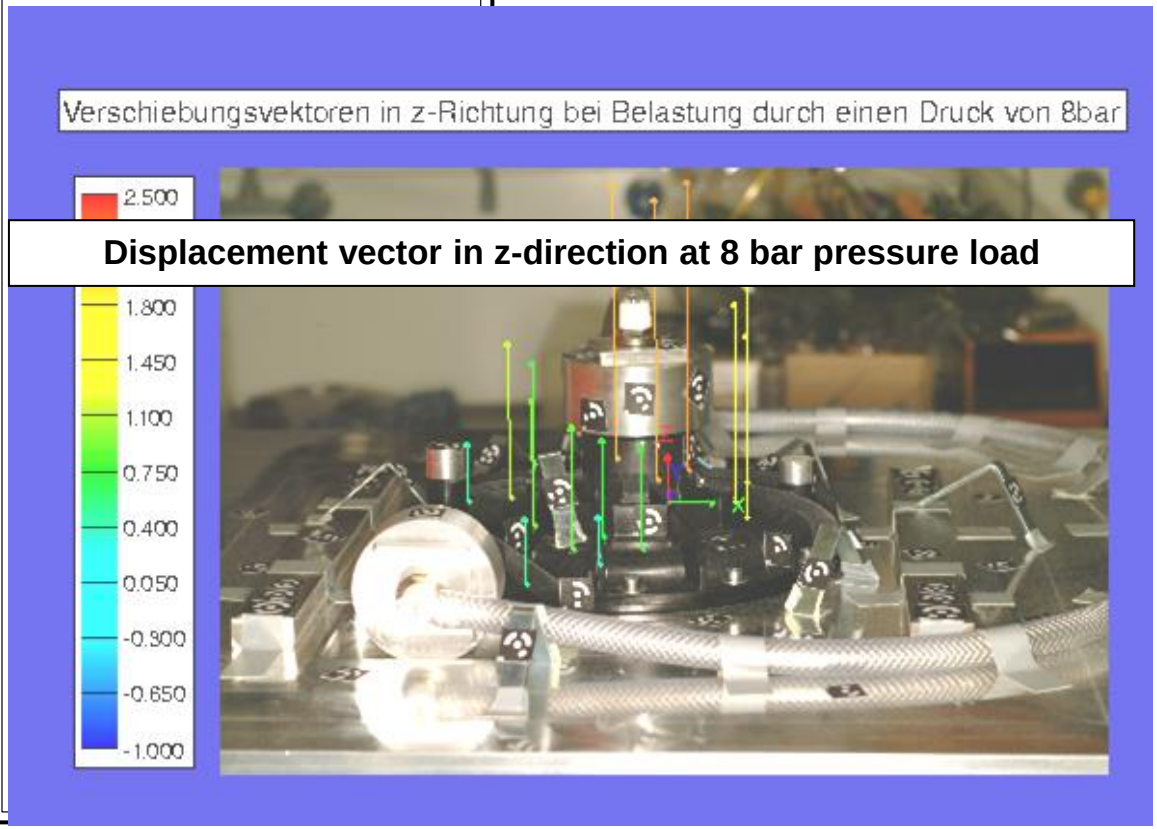
- Erster Fall:

  In technischen Bauteilen treten oft Kerbspannungen an Ecken auf. Diese sind oft für ein Bauteilversagen verantwortlich.
  Im Strömungsmaschinenbau treten solche Kerbspannungen und das daraus resultierende Bauteilversagen oft am Übergang von Rippen zur restlichen Bauteiloberfläche auf.

Verformungsmessungen an einem Pumpen-gehäuse aus Faserverbund-Werkstoff

Universität Rostock
Traditio et Innovatio





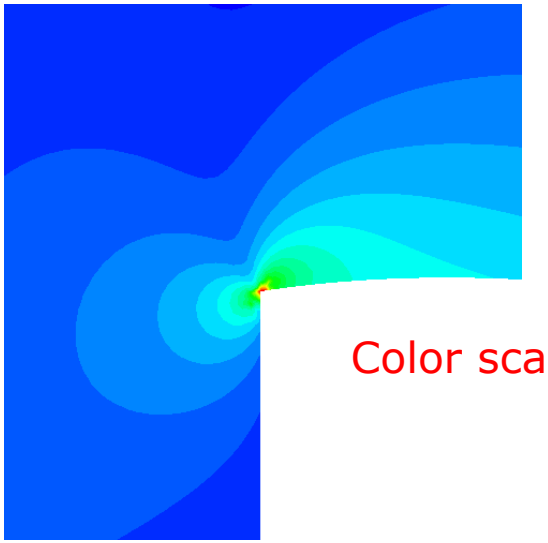
Displacement vector in z-direction at 8 bar pressure load

Motivation: Reduktion von Kerbspannungen

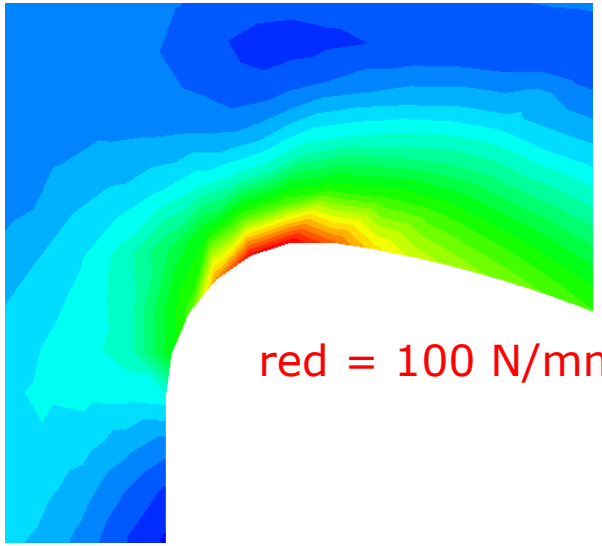
Universität Rostock Traditio et Innovatio

- Avoid failure due to high stress gradients / stress concentrations caused by notch effects
- Especially critical for changing / cyclic loading conditions (p, T)

red -> ∞



Color scales are different!



red = 100 N/mm²

Sharp edge
Stress singularity, stress increases with mesh refinement -> infinity

Fillet (radius)
Stress reduced, but still notch effect

Neuer Ansatz: Lernen, wie die Natur Kerspannungen vermeidet/reduziert

Universität Rostock Traditio et Innovatio

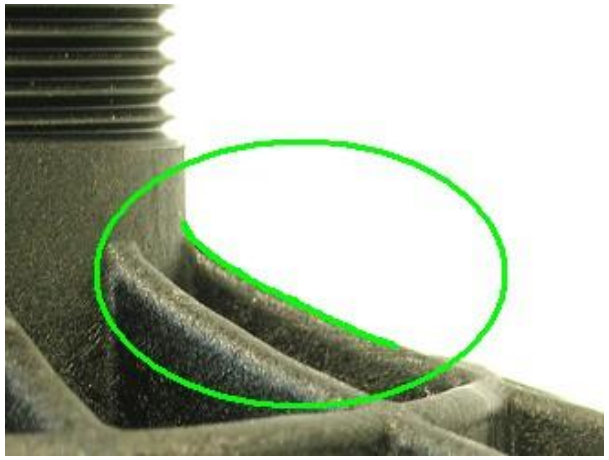
- In hochbelasteten Teilen in der Natur treten nur sehr geringe Kerbspannungen auf.
- Beispiele sind Haifischzähne, Löwen- und Bärenkrallen, Astgabeln von Bäumen.
- Dieses Phänomen wurde sehr intensiv von Herrn Prof. Mattheck im Forschungszentrum Karlsruhe erforscht.
- Ergebnis dieser Forschungen ist eine aus der Natur adaptierte Methode zur Reduktion von Kerbspannungen an technischen Bauteilen.

Neuer Ansatz: Lernen, wie die Natur Kerspannungen vermeidet/reduziert

Universität Rostock Traditio et Innovatio

- Idee: technische Bauteile wie Bäume wachsen lassen
- Ergebnis ist das sogenannte "eco-design"
- CAO -> Computer Aided Optimization
- Die Methode basiert auf dem **"axiom of constant stress"**
- Z.B. Bäume besitzen eine nahezu homogene Spannungsverteilung ohne ausgeprägte Spannungsspitzen im inneren Aufbau.
- Die CAO-Methode kann in Verbindung mit FEA zur Optimierung der Form technischer Bauteile genutzt werden.

Wie reduzieren Bäume Kerbspannungen?



Die CAO-Idee: ein technisches Bauteil wie einen Baum wachsen lassen.

CAO - Theory

- Axiom of constant stress -> the aim is to have a homogeneous stress distribution -> high stress regions must geometrically modified
- Originally, CAO used a creep law to realize a growth effect
- Later: stress field converted into temperature field, definition of a layer capable of growing (or shrinking), temperature induced deformation leads to a new shape (nodal displacements are added to nodal coordinates)

$$T_i = A(\sigma_i - \sigma_{ref})$$

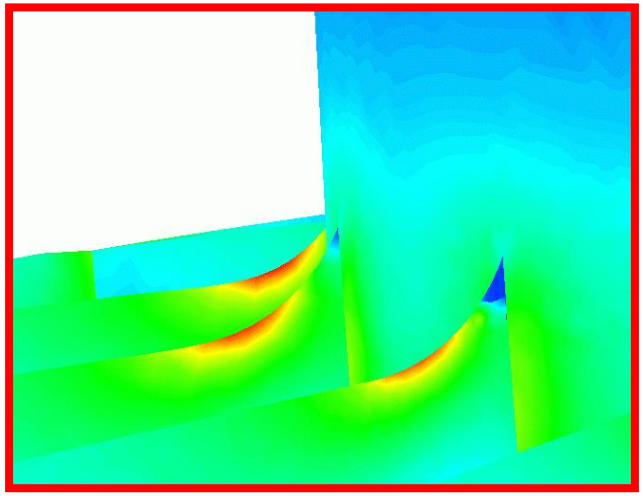
- Today: growth normal to the surface, growth (=nodal displacement) is proportional to stress

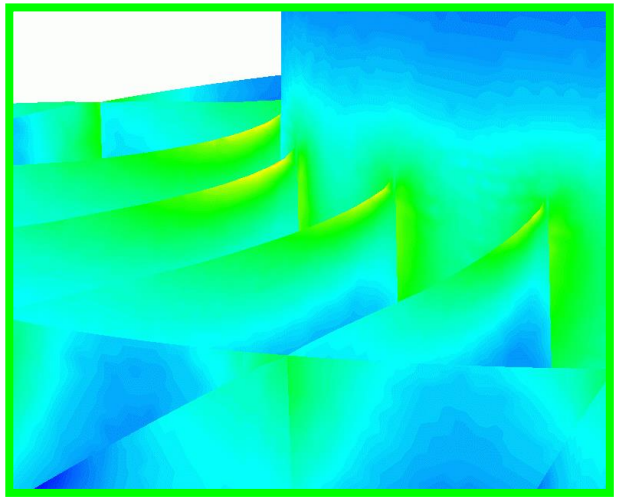
CAO - Implementation

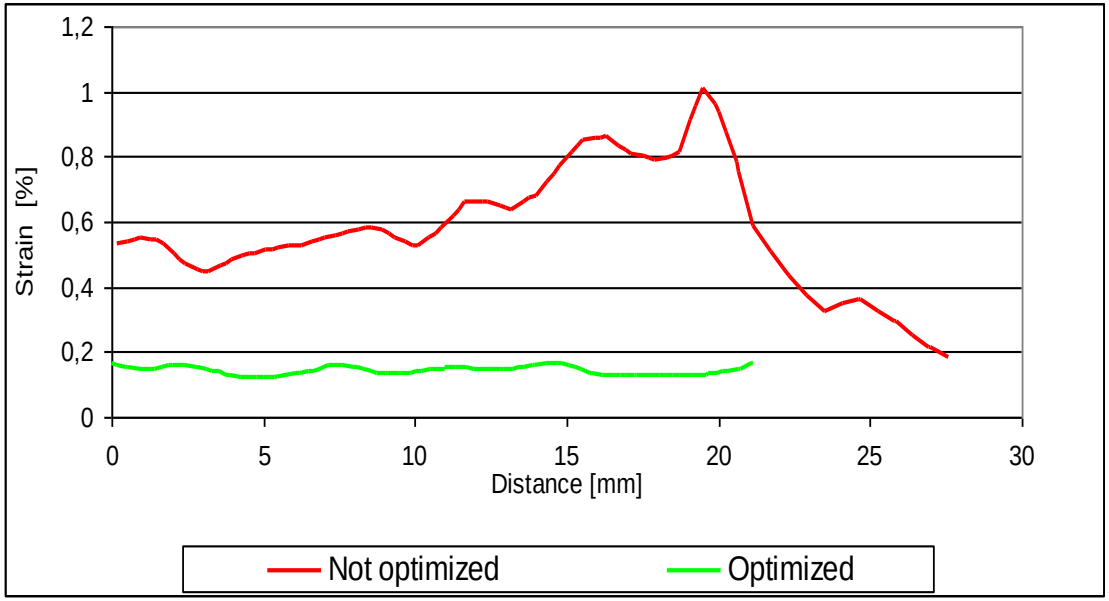
Universität Rostock Traditio et Innovatio

- CAO Standard for 2D problems and CAO Submodel which makes use of the ABAQUS submodeling feature for 3D problems
- CAO comes as an add-in for ABAQUS
- Software carries out iterations until stress criterion (v. Mises,...) is met
- Uses a remeshing feature to keep element quality high
- Input: mesh, boundary conditions
- Output: new nodal coordinates

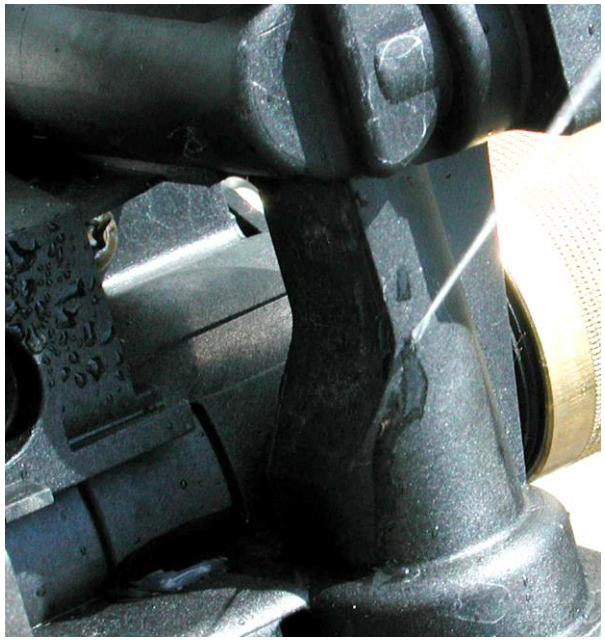
Ergebnis der CAO



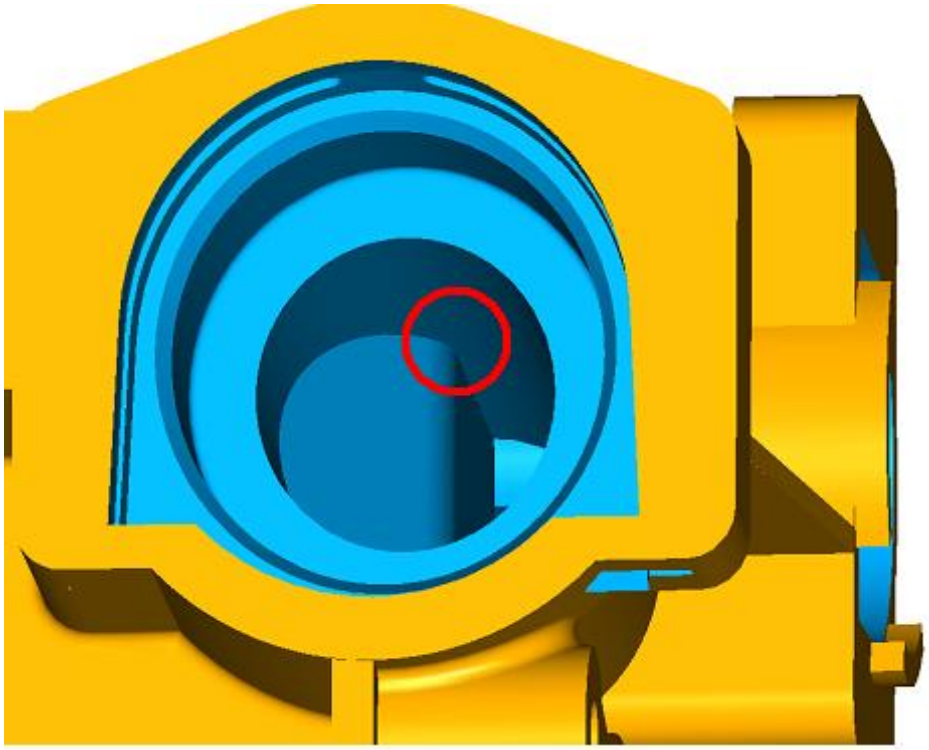




2. Beispiel: Gehäuse einer Sonderpumpe



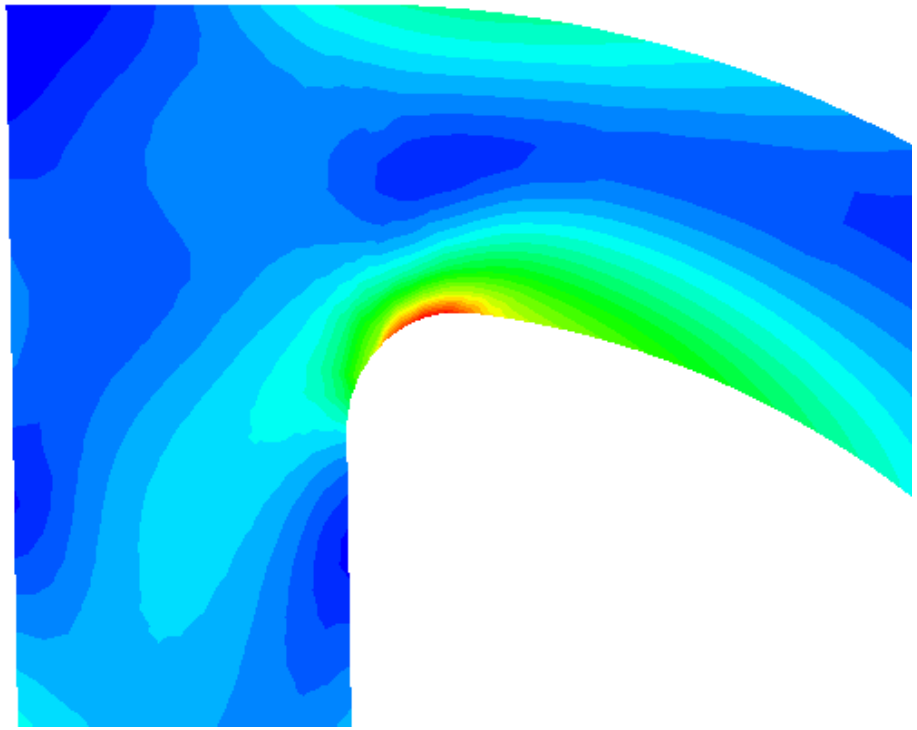
Bruchgebiet



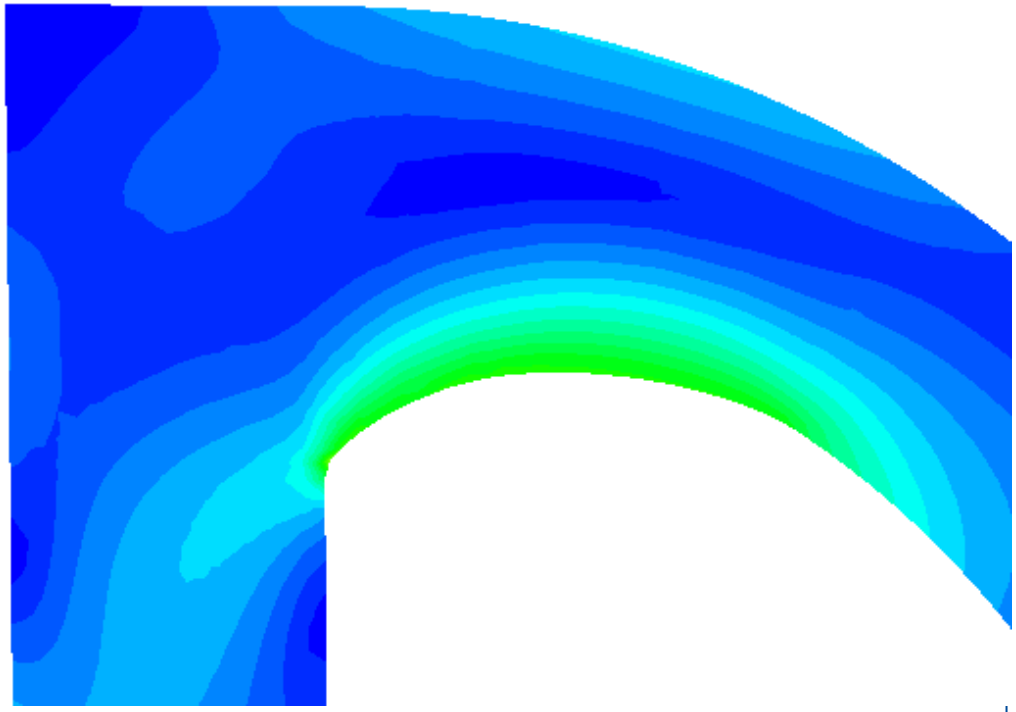
scharfe Kante im Inneren

2. Beispiel: Gehäuse einer Sonderpumpe

Universität Rostock
Traditio et Innovatio



scharfe Kante mit Radius abgerundet
Spannungslevel reduziert, aber Kerbspannungseffekt noch deutlich vorhanden.



Bionische Form
Nahezu homogene Spannungs-verteilung an der Abrundung

- Zweiter Fall:

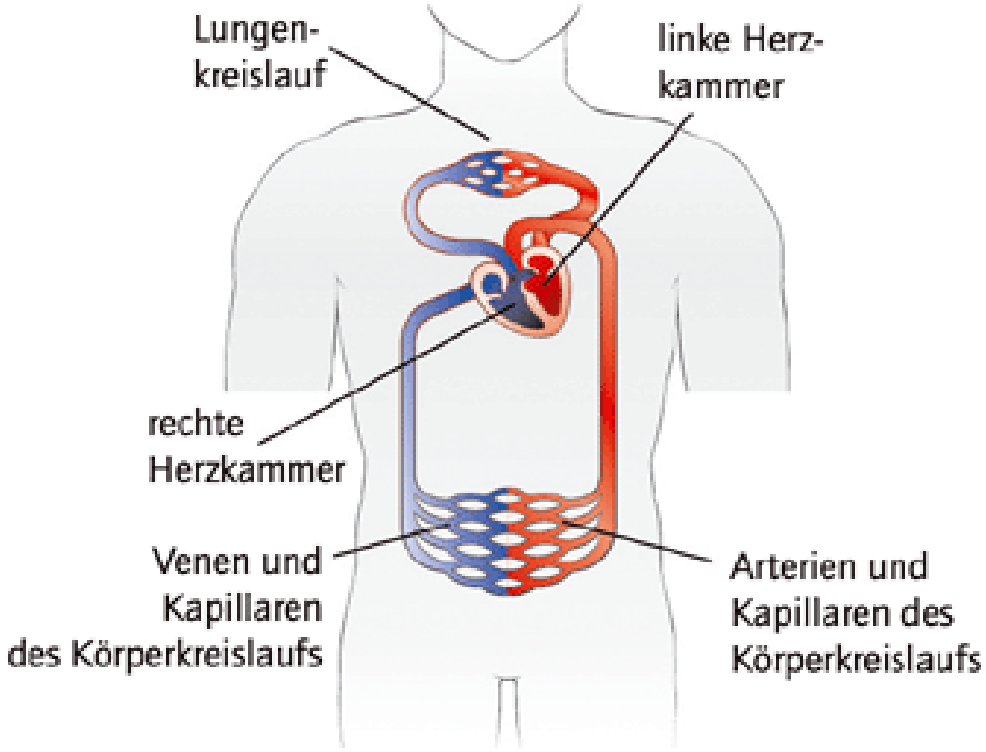
  Das menschliche Herz kann aus verschiedenen Ursachen massiv geschädigt sein. In diesem Fall kann eine Herztransplantation der einzige Weg sein, um das Überleben des Erkrankten zu sichern. Leider stehen nicht ausreichend Spenderherzen zur Verfügung, um zeitnah transplantieren zu können. Um das Problem abzumildern, wurden sogenannte Kunstherzen entwickelt.

Zahlen

Universität Rostock Traditio et Innovatio

- weltweit leiden etwa 20 Mio. Menschen an Herzinsuffizienz
- davon befinden sich ca. 1 Mio. Menschen in einem Stadium, in dem nur noch durch einen Herzersatz therapiert werden kann
- weltweit stehen etwa 3.000 Spenderherzen pro Jahr zur Verfügung
- Das Marktvolumen für Kunstherzen wird auf 500 Mio. bis 1,2 Mrd. US$ geschätzt.

Das Herz-Kreislaufsystem



- in zwei separate Kreisläufe: Körperkreislauf und Lungenkreislauf
- Volumenstrom etwa 4-5 l/min bei 120/80mmHg Blutdruck (diastolisch/systolisch)
- Sauerstoffanreicherung im Lungenkreislauf
- Versorgung des Körpergewebes im Körperkreislauf

prinzipieller Herzaufbau

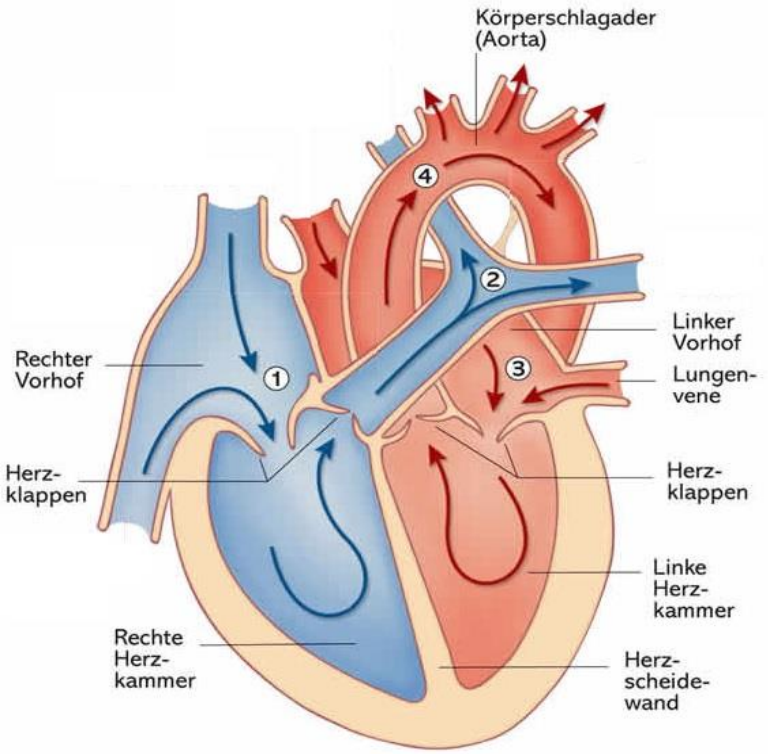


Bild entnommen aus: xxx

- faustgroßer Hohlmuskel
- linker Ventrikel versorgt den Körperkreislauf und rechter den Lungenkreislauf
- 60-80 Schläge/min
- Funktionsprinzip einer Verdrängerpumpe

prinzipielle Lösungen bei schwerer Herzinsuffizienz

Universität Rostock Traditio et Innovatio

- Herztransplantation
- Totalersatz des Herzens (Total Artificial Heart)
- Unterstützung des Herzens (Ventricular Assist Devices)

  extracorporal
  intracorporal

- Ziele der technischen Lösungen:
  bridge to bridge – Überbrückung zu einer weiteren Therapie
  bridge to recoverry – Überbrückung bis zur Herzerholung
  bridge to transplant – Überbrückung bis zur Herztransplantation
  destination therapy - Langzeittherapie

technische Lösungen

- erste Implantation eines technischen TAH 1969 in den USA
- bis heute etwa 1250 Kunstherzen implantiert
- 2004 FDA-Zulassung einer Lösung als bridge to transplant
- 2012 FDA-Zulassung einer Lösung als destination therapy
- längste Einsatzdauer bisher ca. 4 Jahre , Preis ca. 100 T€

„biologische Lösungen“

- umfangreiche Forschungsarbeiten, aber keine Lösungen in Sicht

- meist Einsatz zur Unterstützung der linken Ventrikel
- auch Unterstützung beider Ventrikel denkbar
- unterschiedliche Lösungen für
  - bridge to bridge
  - bridge to recoverry
  - bridge to transplant
  - destination therapy

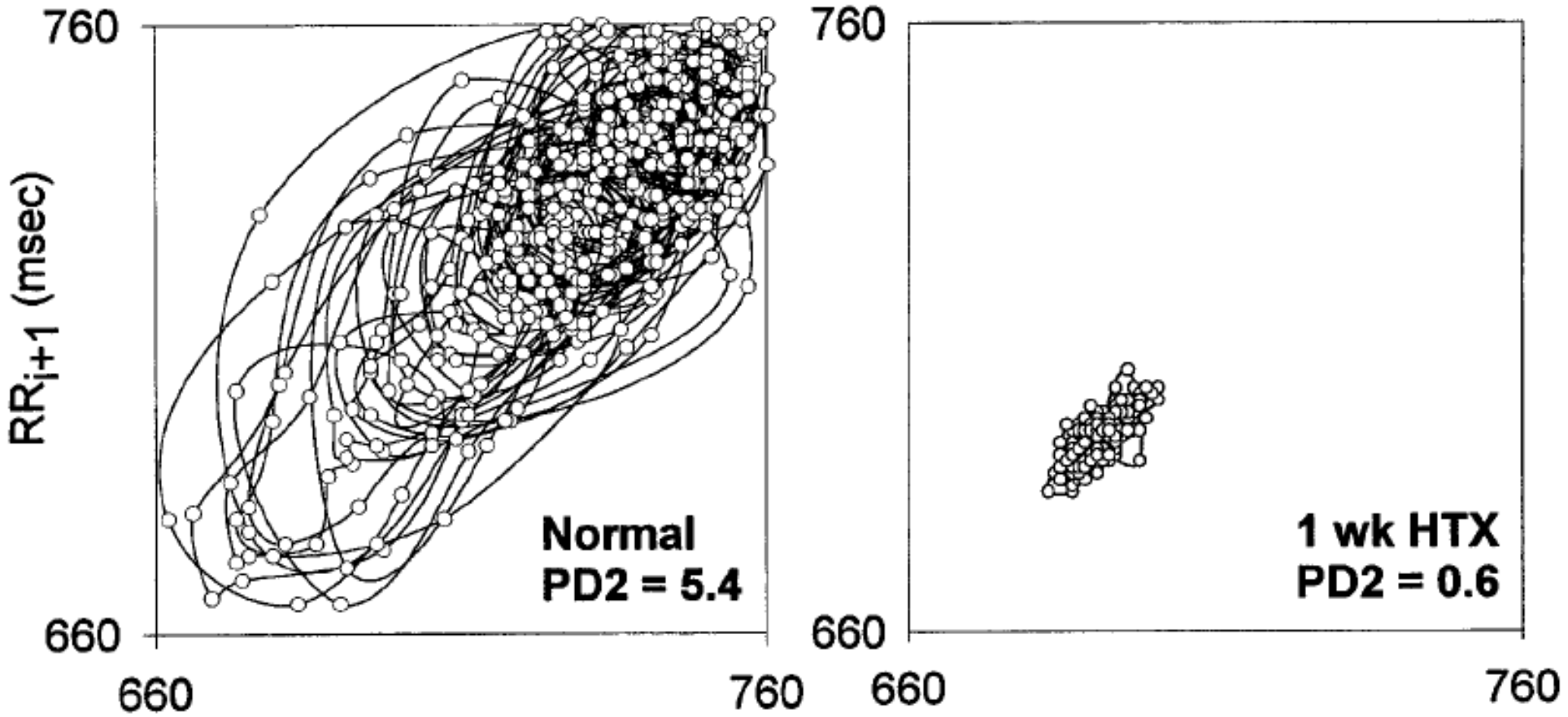
  Anwendungen.
- Wir forschen an Lösungen für btr , btt und dt.

Spezifikation / Fragen zu den Anforderungen für intracorporale Lösungen aus Ingenieursicht

Universität Rostock Traditio et Innovatio

- Betriebsbereich - Erwachsene 4 l/Min bis 15 l/Min ; 15 mmHG bis 80 mmHg)
- Lebensdauer – lange ???
- Zuverlässigkeit – hoch ??? / Kosten???
- Dimensionen – maximale Größe so ungefähr bekannt
- thermische Abstrahlung bzw. Wirkungsgrad - bekannt
- Schallabstrahlung - bekannt
- Herzschlagfrequenz und Pulsatilität – ziemlich unklar
- **Blutschädigung – bekannt, aber ....**

Beispiel Herzschlagfrequenz

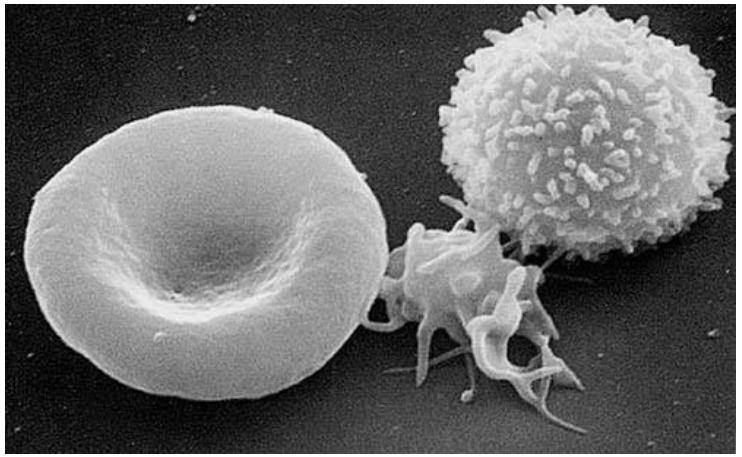


entnommen aus: Izrailtyan et al:EARLY DETECTION OF ACUTE ALLOGRAFT REJECTION BY LINEAR AND NONLINEAR ANALYSIS OF HEART RATE VARIABILITY. The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery, October 2000

Universität Rostock Traditio et Innovatio

Zusammensetzung und Funktion

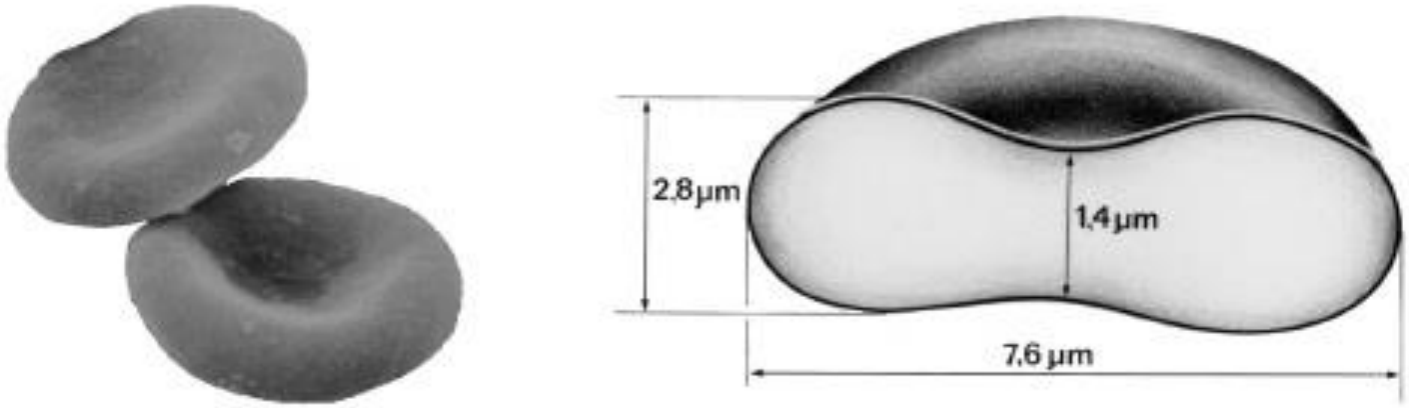
- Versorgung des Körpergewebes mit Sauerstoff und Nährstoffen
- Blutvolumen bei 70kg schweren Menschen: 5-6Liter
- Zusammensetzung: 55% Blutplasma und 45% gelöste Zellkörper
- Zellkörper: rote Blutzellen (Sauerstoffversorgung), weiße Blutzellen (Immunzellen), Thrombozyten (Stillung von Blutungen)



von links nach rechts: rote und weiße Blutkörperchen, Thrombozyten

Bild entnommen aus: XXX

Problem Hämolyse



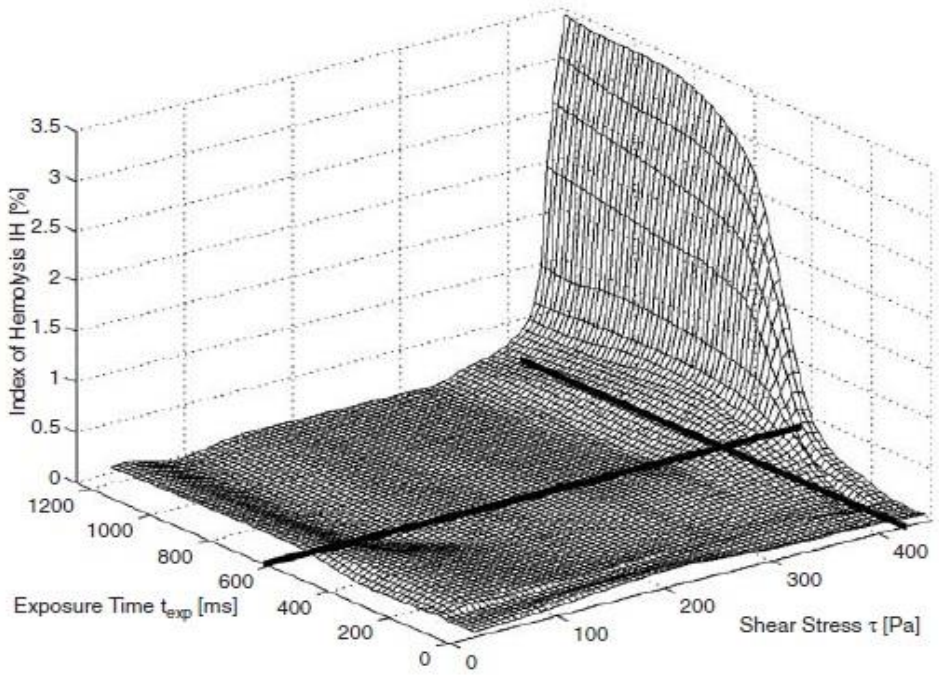
links: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme einzelner Erythrozyten

rechts: Schnitt durch einen Erythrozyten in Ruheform (Diskozyt)

- Auflösung roter Blutkörperchen durch Zerstörung der Zellmembran
- Austreten von Hämoglobin -> Blut verliert Fähigkeit zum Sauerstofftransport
- Ursachen: strömungsinduziert (Scherung, Dehnung), chemisch, thermisch, physiologisch (natürliche Alterung)

Bild entnommen aus: xxx

Hämolyse - Quantifizierung



Darstellung des Hämolyseindex IH in Abhängigkeit von Schubspannung und Belastungszeit

Bild entnommen aus: xxx

- Hämolyseindex IH abhängig von Belastungszeit und Schubspannungen

$$IH(\%) = 3{,}62 \cdot 10^5 \cdot \tau^{2{,}416} \cdot t_B^{0{,}785}$$

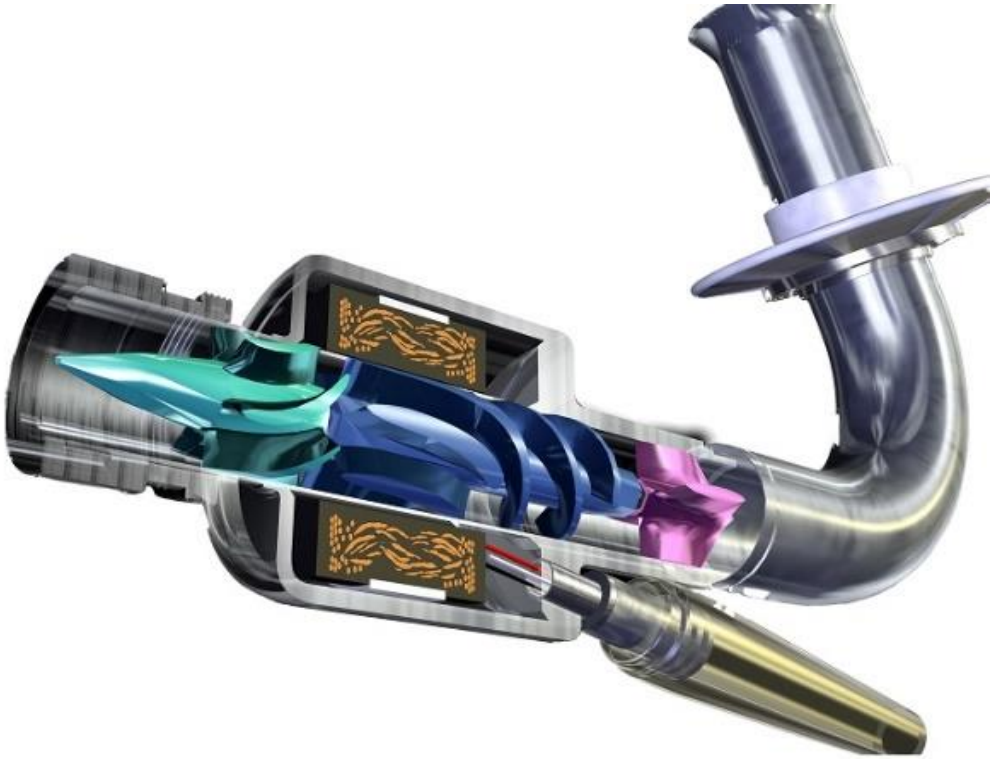
- experimentelle Untersuchungen zeigen, dass kritische Werte für Schubspannungen (425 Pa) und Belastungszeit (600ms) gibt, unterhalb derer keine Schädigung auftritt

Blutpumpe als VAD

- VADs (Ventricular Assist Devices) sind Herzunterstützungssysteme und übernehmen die Herzfunktion nach einem Herzversagen ganz oder teilweise
- Im Gegensatz zum Kunstherz wird lediglich die Funktion einer Herzkammer unterstützt.
- Einsatz als langfristige Unterstützung oder als Übergangslösung bis zur Erholung des Herzens bzw. bis zur Transplantation

Bild entnommen aus: XXX

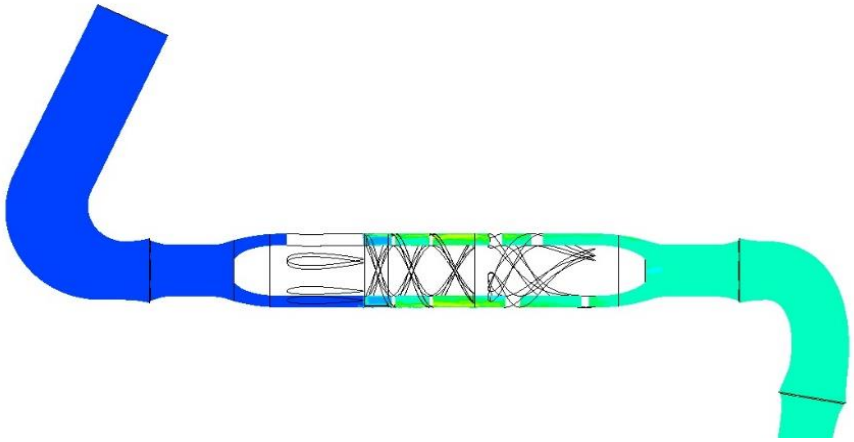
VAD als Kreiselpumpe ausgeführt

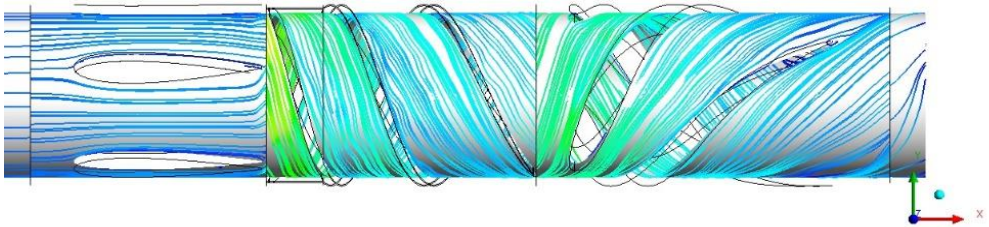


- VAD als Kreiselpumpe i.d.R. kleiner und langlebiger als pulsatile Pumpe
- Ausführungen mit axialem oder radialem Rotor, mechanischer oder magnetischer Lagerung

Bild: Berlin Heart

Beispiel eines VAD als Axialpumpe





Stromlinien

Inhalt der Vorlesung
Hydraulische Strömungsmaschinen

Universität Rostock Traditio et Innovatio

- Einführung / industrieller Hintergrund

Grundlagen

- Strömungstechnische Grundlagen
  Impulssatz
  Navier-Stokes-Gleichungen, gemittelte NSG, Kontinuitätsgleichung

- Kavitation

Strömungsmaschinen

- Eulergleichung
- Entwurf von Radialmaschinen
- Kennlinien
- Regelung

spezielle Bauarten – nicht prüfungsrelevant

- Schraubenspindelpumpen
- Flüssigkeitsring-Vakuumpumpen
- Voith-Schneider-Propeller

Prüfungsablauf und -zeitraum

Universität Rostock Traditio et Innovatio

- 1 Frage aus dem Themengebiet **Grundlagen**
- 2 Fragen aus dem Themengebiet **Strömungsmaschinen**
- mündliche Prüfung am: Listen bei Frau Merian-Sieblist

Forschung

- numerische und experimentelle Optimierung von Strömungsmaschinen
- Fluid-Struktur-Wechselwirkungen und Akustik
- Systemoptimierung

Lehre in der Masterausbildung

- Hydraulische Strömungsmaschinen (Förderung inkompressibler Fluide)
- Thermische Strömungsmaschinen (Flugtriebwerke, Förderung kompressibler Fluide)
- Windturbinen und alternative Energiequellen
- Management von Entwicklungsteams und –projekten
- Technische Akustik

Hochauflösende CFD für Strukturuntersuchungen in Strömungen

- LES in rotierenden Systemen
- Analyse von verschiedenen Testfällen mittels LES
- Identifikation von kohärenten Strukturen in turbulenten Strömungen
- Partikelverfolgung in numerischen Strömungssimulationen
- Aerodynamische Optimierung eines Rennboliden des Shell-Eco-Marathons

➢ Ansprechpartner :Herr Torner

Tel.: 0381/498-9043 , benjamin.torner@uni-rostock.de

Arbeitsgebiet Mehrphasenströmung

- Numerische Untersuchungen bezüglich der Verteilung von Gas und Flüssigkeit (CFD einer Mehrphasenströmung)

- experimentelle Untersuchungen der Verteilung von Gas und Flüssigkeit im Kühlkreislauf von Fahrzeugen

➢ Ansprechpartner :Frau Hoch
Tel.: 0381/498-9034 , ronja.hoch@uni-rostock.de

Rotordynamik und Fluidstrukturinteraktion (FSI)

- Numerische Berechnung der
  - Strömung (CFD)
  - Festkörperstruktur (FEM)
  - Kopplung der Teilsimulationen

- Modellierung und Berechnung des dynamischen Verhaltens von Rotoren z.B. Windkraftanlagen

➢ Ansprechpartner :Herr Laß
Tel.: 0381/498-9045 , andre.lass@uni-rostock.de
Herr Kumar
Tel.: 0381/498-9042 , jitendra.kumar@uni-rostock.de

Arbeitsgebiet Herzpumpen

- Zuarbeit für Miniaturisierung
  - Numerische Untersuchungen (CFD)
  - Auswertung der Strömungssituation
  - Bewertung des Einflusses auf die Blutschädigung

➢ Ansprechpartner :Herr Hallier
Tel.: 0381/498-9038 , sebastian.hallier@uni-rostock.de

Arbeitsgebiet Akustik

experimentelle Untersuchungen

- Quantifizierung der Luftschallemission an einer Radialpumpe (Schalldruck- und Schallintensitätsmessungen sowie Druck- und Intensitätsmapping)
- Evaluierung der Einsatzmöglichkeiten akustischer Arrays (akustische Kamera) zur Schallquellenortung an einer Radialpumpe
- Akustische Nahfeldholographie zur Bestimmung der Oberflächenschwingschnelle von 3D Bauteilen
- Messung der Hydroschallintensität mit Hydrophen und dynamischen Drucksensoren – Vergleich und Fehleranalyse
- Betriebsschwingungsanalysen an einer Radialpumpe
- Experimentelle Modalanalyse an einer Radialpumpe zur Bestimmung von Eigenfrequenzen und Eigenschwingformen
- Impedanzrohr (Bestimmung Materialkennwerte, Grundlagenforschung)
- Evaluierung des Phasenfehlers für Schallintensitätssonden

➢ Ansprechpartner : Herr Dr. Witte
Tel.: 0381/498-9046 , matthias.witte@uni-rostock.de
Herr Bleeck
Tel.: 0381/498-9035 , stefan.bleeck@uni-rostock.de

Arbeitsgebiet Akustik

Numerische Untersuchungen

- CFD Analysen der instationären Strömung in Radialpumpen oder eines Ringthrusters (nabenlose Propeller)
- POD Analysen zur Identifikation kohärenter Strömungsstrukturen in einer Radialpumpe oder im Freistrahl eines Ringthrusters
- Berechnung des Freistrahlärms mittels akustischer Analogieverfahren in VirtualLab (alternativ auch akademische Testfälle)
- FEM gestützte Modalanalyse einer Radialpumpe
- Entwicklung eines Verfahrens zur Kopplung von Druckfeldern aus CFD Simulationen und FEM-Strukturmodellen für numerische Betriebsschwingungsanalyse einer Radialpumpe
- Berechnung Körperschallabstrahlung mittels BEM-Verfahren eines Radialpumpengehäuses
- Evaluierung von Verfahren zum FEM „Model Updating“

➢ Ansprechpartner : Herr Dr. Witte
Tel.: 0381/498-9046 , matthias.witte@uni-rostock.de
Herr Bleeck
Tel.: 0381/498-9035 , stefan.bleeck@uni-rostock.de