vipo
SIMULATION DRIVEN
PRODUCT AND PROCESS OPTIMIZATION

Ein Digitaler Zwilling für Prüfmaschinen
Visionen, Konzepte & Herausforderungen

Heiko Beinersdorf, Daniel Haag, Prof. Dr.-Ing. Carsten Könke

MPA
Materialforschungs- und -prüfanstalt
an der Bauhaus-Universität Weimar

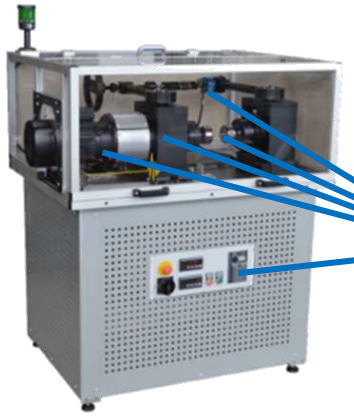
UNTERNEHMEN REGION
Die BMBF-Innovationsinitiative Neue Länder

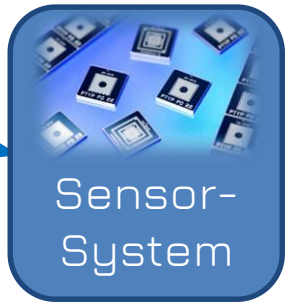
GEFÖRDERT VOM
Bundesministerium für Bildung und Forschung

Inhalt

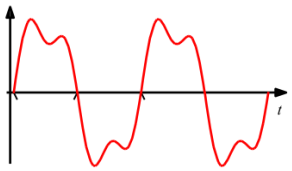
- Digitaler Zwilling im Sinne des Wachstumskerns
- Digitaler Zwilling für Prüfmaschine?
- Beispiel – Demonstrator
- Digitaler Zwilling im Entwicklungsprozess
- Konzept Digitaler Zwilling zur Prädiktiven Wartung
- Schadensmodelle & Sensorkonzepte
- Datenbasierte Zustandsüberwachung
- Herausforderungen - Rotierende Systeme
- Herausforderungen - Datenerfassung

VIPO - Digitaler Zwilling

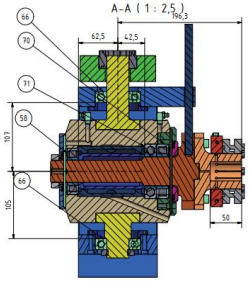


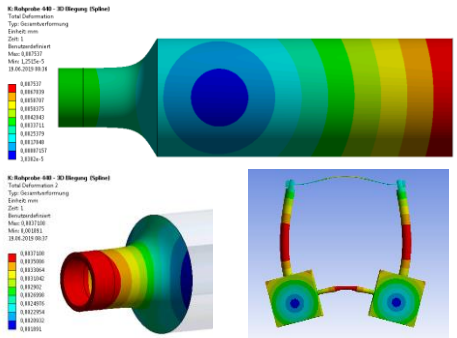


Reales System

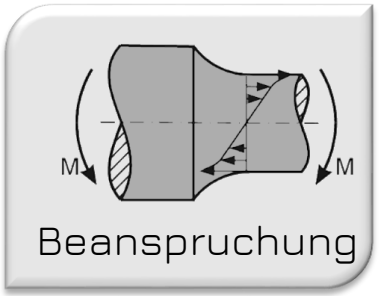


Belastung

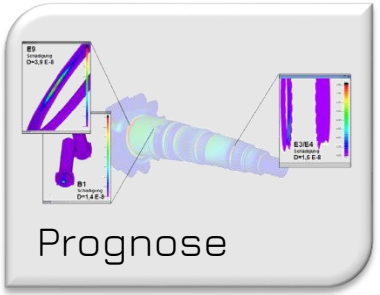




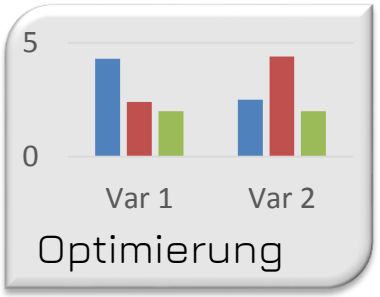
Digitaler Zwilling



Beanspruchung

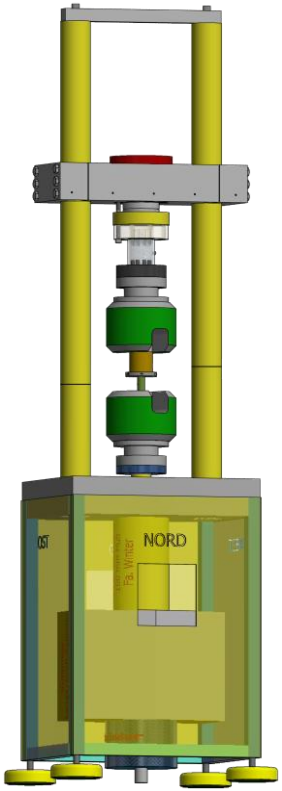


Prognose



Optimierung

Vision eines Digitalen Zwilling für Prüfmaschinen?



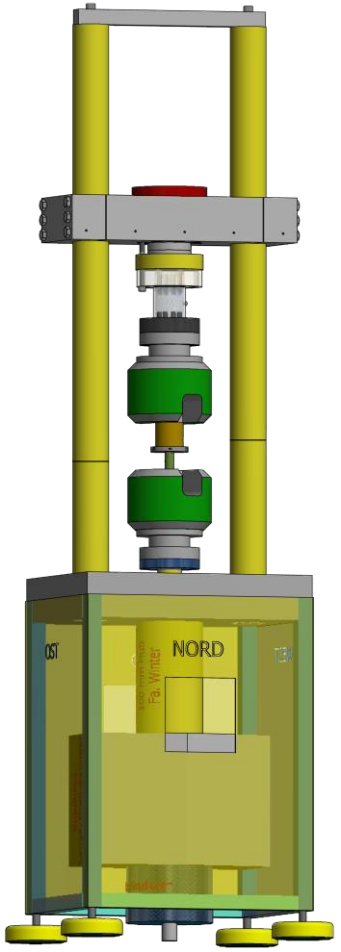
Digitalen Zwilling für Prüfmaschinen - Ziel

Ziele

- Wirtschaftliche
  - Genauere Ergebnisse
  - Reduzierung Probenumfang
  - Messfehler reduzieren

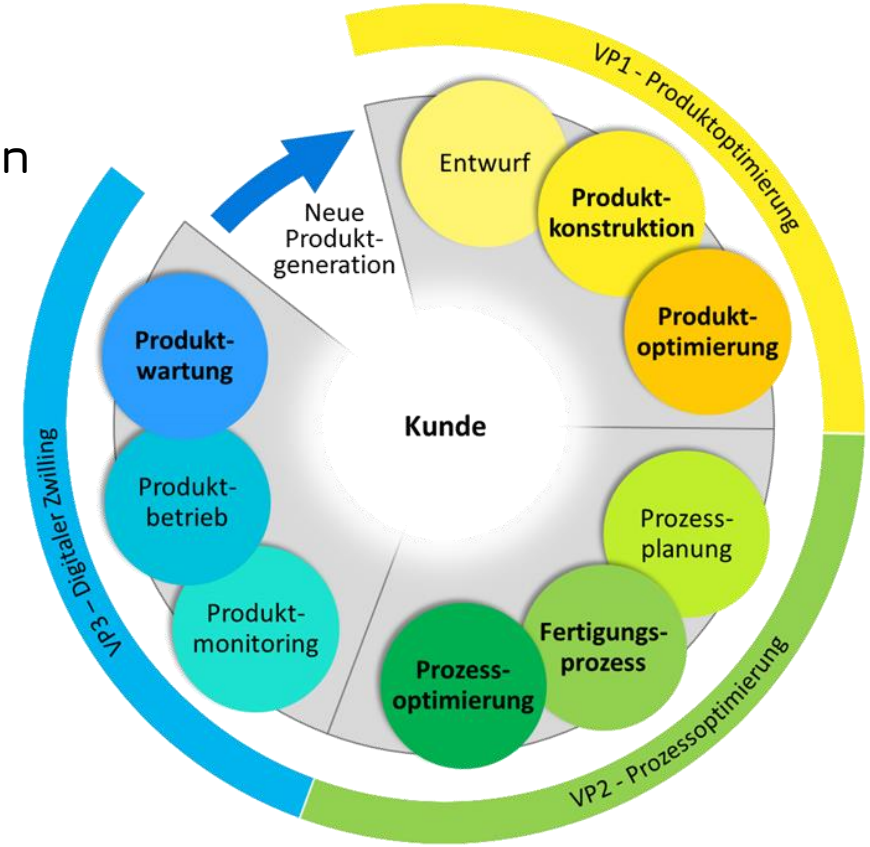
- Prädiktive Instandhaltung (Predictive maintenance)
  - Kalibrierung

- Redundanz in Messgrößen schaffen
- Rückwirkungsabweichungen verhindern
- Hypothesen Test (stationäre Zustände)
- Modellparameter bestimmen (updaten)
- Erweiterte Regelung



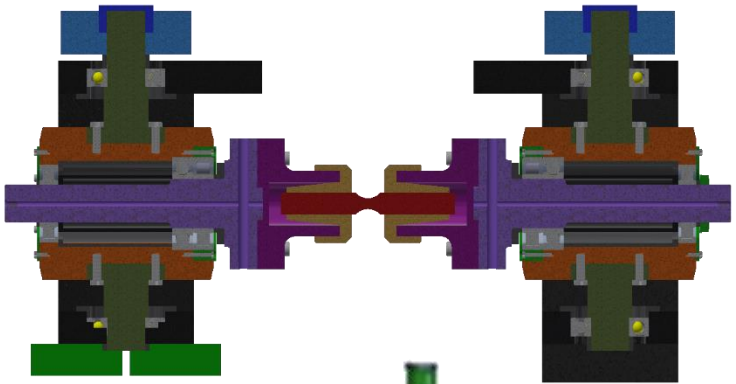
vipo - Digitaler Zwilling

- Verbundprojekt 3
  „Digitaler Zwilling – Produktlebenszyklus auf Basis von Sensornetzen und Zusammenhangsmodellen“



- Teilprojekt 3.2
  „Multiphysiksensorik zur Lebensdaueranalyse von rotierenden Maschinen“

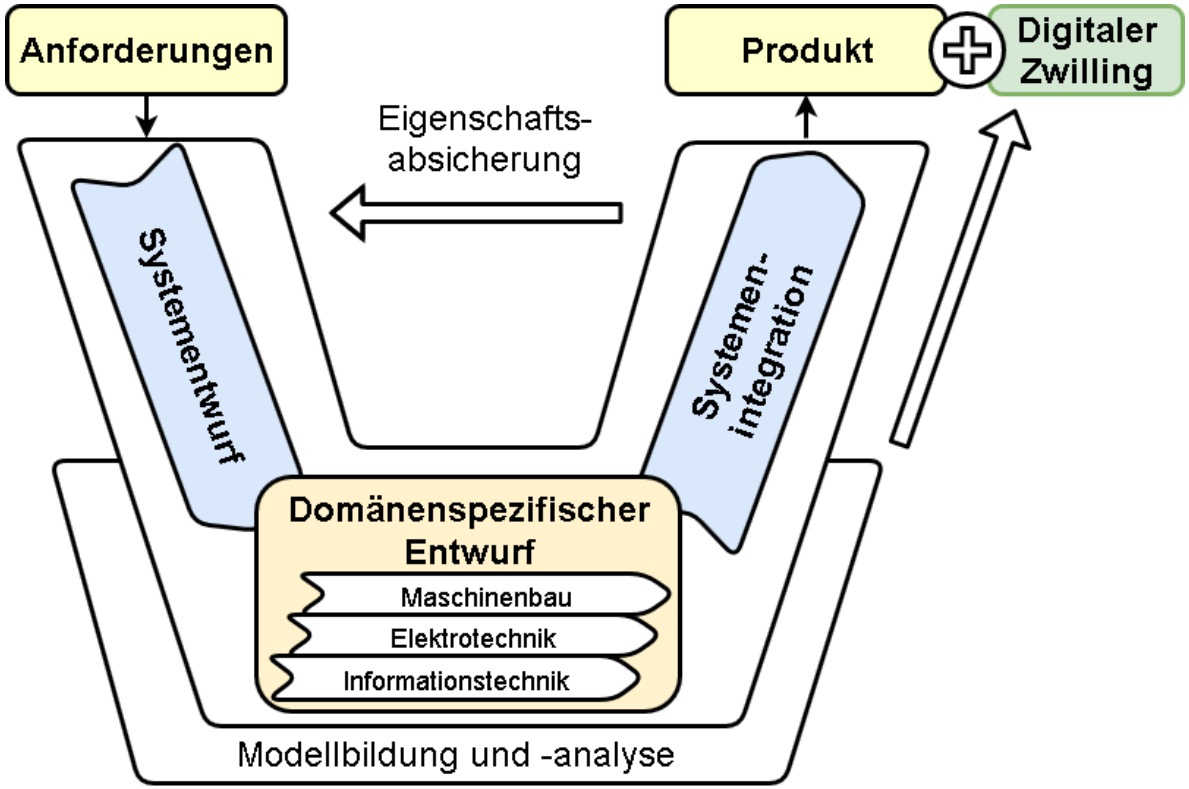
Demonstrator - Umlaufbiegeprüfmaschiene



Produktentwicklung – Digitaler Zwilling

- V-Modell
- Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme
- Komponenten:
  - mechanische
  - elektrische
  - informationstechnische
- **Teilsysteme**
- Systemintegration
- **Modellbildung + Simulation**

- Erweiterte Modelle (W-Modell, ...)



V-Modell nach VDI 2206

Zustandsüberwachung – Diagnose – Digitaler Zwilling

- **FMEA** – Failure Mode and Effects Analysis (Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse)
- FMSA - Failure Mechanisms and Symptoms Analysis (FMSA)
- FMECA - Failure Mode and Effects and Criticality Analysis

Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse

System-FMEA ☐ Konstruktions-FMEA ☒ Prozess-FMEA ☐

Bestätigung durch betroffene Abteilung und/oder Lieferant	Name / Abteilung / Lieferant: *Firma S. Friedrich & Co.*	Name / Abteilung / Lieferant: *D. Meyer, Labor 46*	Teil-Benennung: *Fahrzeugtür, Fahrerseite*
			Teil-Nummer: *95DJ-2345-4AA*
			Modell / System / Fertigung (1): *Auto 2000 - XYZ*
			Datum: *23.01.95*
			Erstellt durch (Name / Abt.): *A. Schmidt, Konstruktion 234-fg*
			Überarbeitet Datum: *05.08.95*

System-/ Konstruktions-komponente, Prozessablauf	Mögliche Fehler: Art	Folgen	Ursachen	Derzeitiger Zustand: Kontroll-maßnahmen	Auftreten	Bedeutung	Entdeckung	RPZ	empfohlene Abstellmaß-nahmen	Verant-wortlich-keit	Verbesserter Zustand: Kontroll-maßnahmen	Auftreten	Bedeutung	Entdeckung	RPZ
Fahrzeugtür (2)	*Korrosion im unteren Teil des Tür-außenblechs (innen)* (3)	*Verkürzte Lebens-dauer der Tür führt zu* (4)	*Nicht aus-reichend dicke Wachs-schicht spezifiziert* (5)	*Fahrzeug-Dauerhaltbar-keitsprüfung T-118 T-109 T-301* (6)	4 (7)	7	7 (9)	196	*zusätzlicher verschärfter Korrosionstest* (11)	*A. Schmidt Abt. Konst. 234-fg* (12)	*Testergebnisse (Test Nr. 1358) bestätigen bis-herige Wachs-dicke* (13)	2	7	2 (14)	28
Ein- und Aus-stieg für Fahr-zeug		*schlechtem Aussehen durch Rost*	*Nicht geeig-nete Wachs-art spezifi-ziert*	*physikalischer und chemischer Labortest Bericht Nr. 23G*	2	7	2	28	*keine*	—	—				
schützt Fahrer gegen Wetter-einfluss, Geräu-sche und seit-lichen Aufprall		*Wasser-eintritt*	*Wachs er-reicht nicht die vorge-sehene Stelle*	*Untersuchung an der Konstruktion*	8	7 (8)	6	336 (10)	*Prozess des Wachsein-bringens mit Prozess-FMEA untersuchen*	*FMEA-Team Leitung: Fertigung*	*Prozess-FMEA durchgeführt (Blatt Nr. 23 Pr)*	3	7	2	42
dient als Be-festigung für Türbeschlag-teile		*Beeinträch-tigung der Funktion der Tür-innenteile*													

Quelle:
Philipp Theden,
Hubertus Colsman
Qualitätstechniken

Condition Monitoring & Prädiktive Instandhaltung

Datengetriebene Ansätze

- Auswertung von Messdaten
- Erfassung von Abweichungen vom Sollzustand
- Trend-, Mustererkennung
- Statistische Verfahren, Maschine-learning

Wissensgetriebene Ansätze

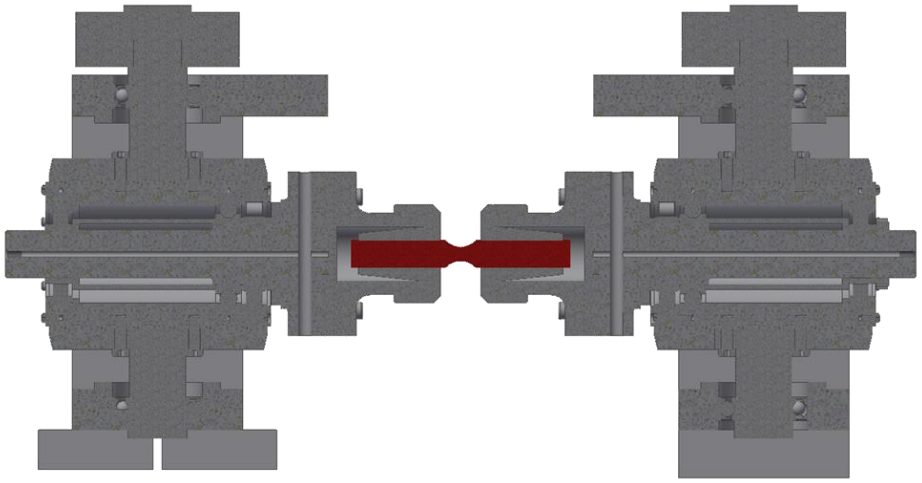
- Modellbildung erlaubt Rückschlüsse auf relevante Messgrößen, Messverfahren und Maßnahmen
- Erfahrungen von Entwicklern, Betreibern, Service-Mitarbeitern bilden Basis

Digitaler Zwilling

Beispiel FMEA für eine Welle

Funktionen der Welle:

Überträgt Torsions- und Biegemoment sowie axiale und radiale Kräfte



Fehlerarten:

Ermüdung, **Bruch**, **Vibration**, lose, klemmt, **Fluchtungsfehler**, **Unwucht**, Vertauscht, **Oberfläche**

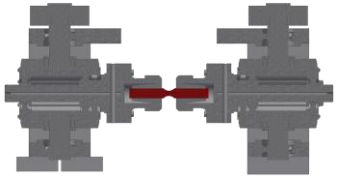
Fehlerursachen:

Materialwahl, Form, **unvorhergesehene Belastung**, **Materialfehler**, Auslegungsfehler, Härte, **Temperatur**, Toleranzwahl, Falscher Einbau, Verschmutzung, Undicht, **Schmierung**, Korrosion

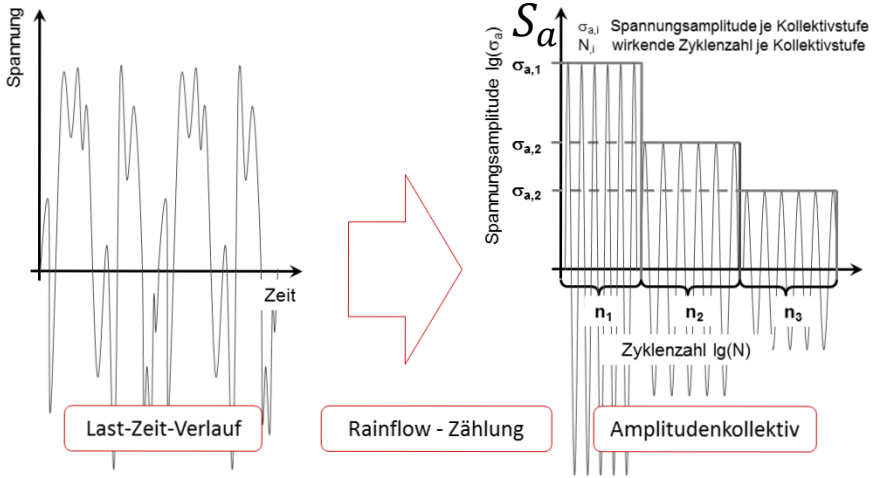
Fehlerfolgen:

Welle bricht, plastische Verformung, **ungenügender Rundlauf**, **Vibration/Geräusche**, Beschädigung angrenzender Bauteile, Verletzungsgefahr

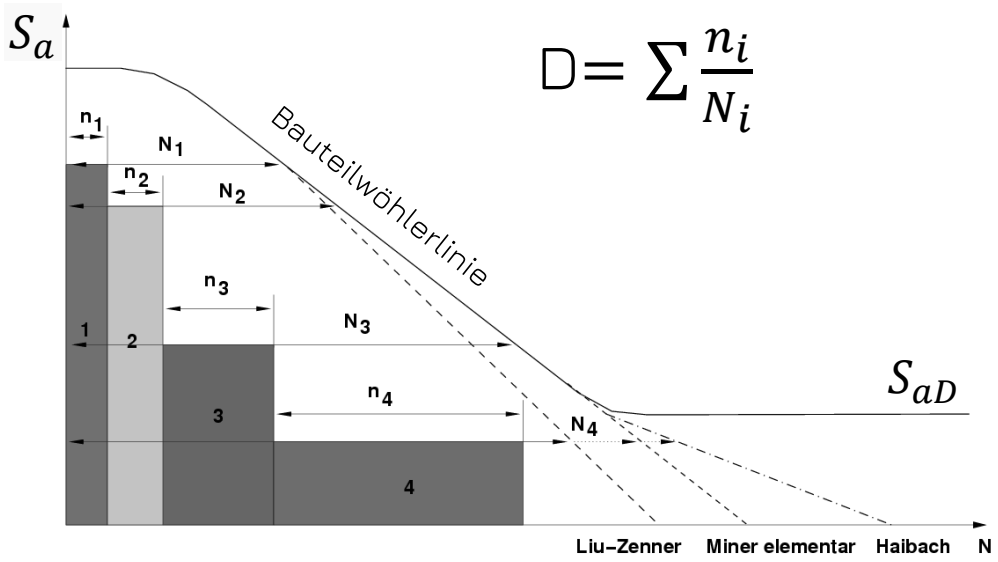
Schadensmodell, Versagensmodell - Welle



- Vorrangiger Schadensmechanismus: **Werkstoffermüdung aufgrund Wechsellast**
- Versagensart: **Bruch infolge Ermüdung**
- Schadensmodell: **Bauteilwöhlerlinien, Lastkollektive, Lineare Schadensakkumulation**

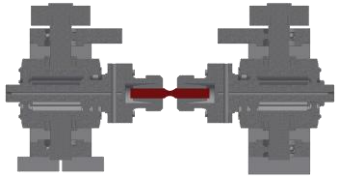


Quelle: Einbock Akademie



Quelle: Sebastian Fischer, wikipedia

Schadensmodell, Versagensmodell - Welle



- Vorrangiger Schadensmechanismus: **Werkstoffermüdung aufgrund Wechsellast**
- Versagensart: **Bruch infolge Ermüdung**
- Schadensmodell: **Bauteilwöhlerlinien, Lastkollektive, Lineare Schadensakkumulation**

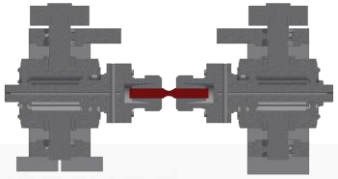
notwendig:

- Beanspruchungsgeschichte (Biegemoment, Spannung) ausgewertet als Lastkollektive

notwendig:

- Bauteilwöhlerlinie (Anrisswöhlerlinie, Bruchwöhlerlinie)
- Synthetische Wöhlerlinien in Abhängigkeit von:
  - Mittelspannungen
  - Vorbelastungen
  - Oberflächengüte
  - Temperatur
  - Bauteilgröße

Schadensmodell, Versagensmodell - Welle



Sensorik:

- Kraft (Kraftmessdose)
- Dehnungen (DMS)
- Kinematik (LDV)
- Temperatur (PT100)
- Drehzahlmesser (Hall-Sensor)
- Rissdetektion (Potentialmethode)
- Acoustic Emission, Vibroakustik

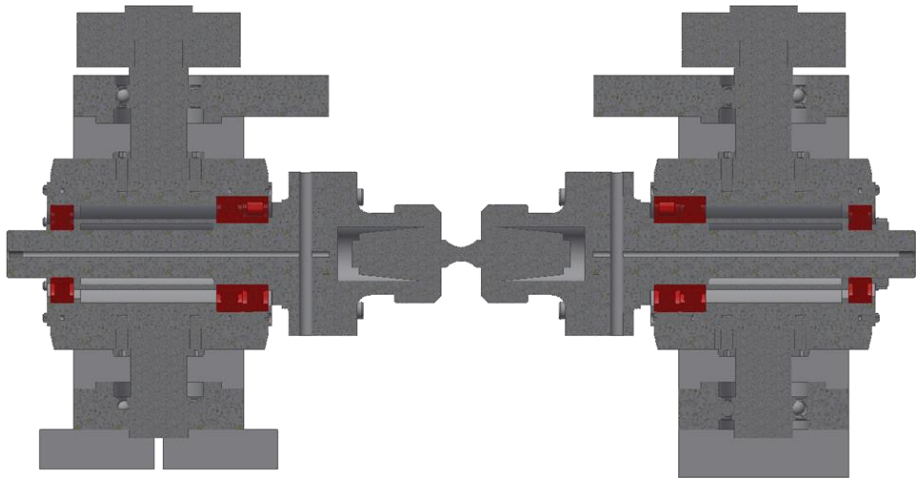
Modelle:

- Spannungsberechnungen aus Modellannahmen (Analytische, FEM, Feldzusammenhangsmodell)

Beispiel FMEA für ein Wälzlager

Funktionen eines Wälzlagers:

- Führung einer umlaufenden Welle in Bezug auf das ruhende Gestell
- Übertragung von Kräften zwischen ruhenden und bewegten Maschinenkomponenten



Fehlerarten:

Ermüdung, **Bruch**, **Vibration**, **Überhitzung**, lose, klemmt, Fluchtungsfehler, Unwucht, Vertauscht

Fehlerursachen:

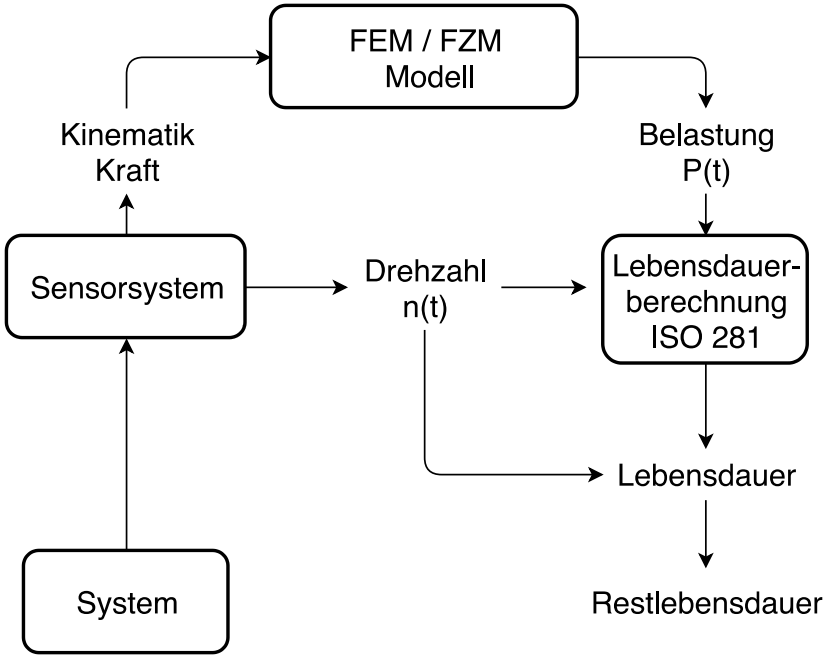
Lagerauswahl, **unvorhergesehene Belastung**, **Temperatur**, **Toleranzwahl**, Falscher Einbau, **Verschmutzung**, Undicht, **Schmierung**, Korrosion, Lagerluft, Last ohne Rotation

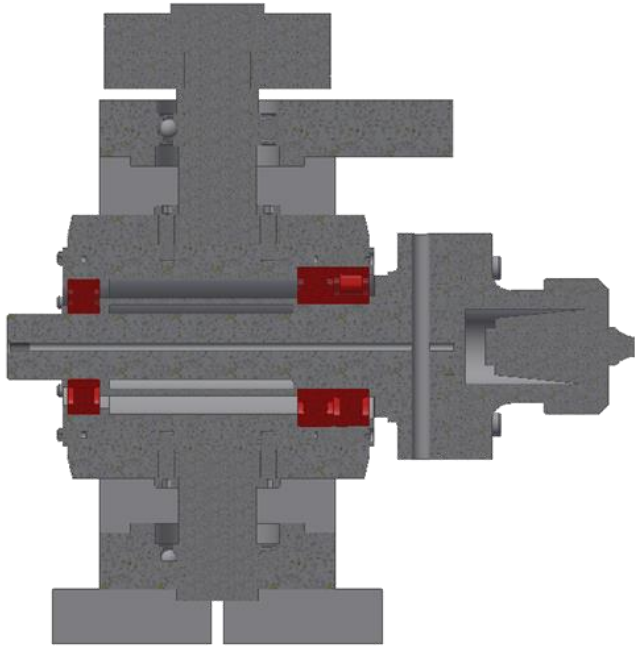
Fehlerfolgen:

Lager bricht, **Grübchenbildung** („pitting“), **ungenügender Rundlauf**, **Vibration/Geräusche**, Verkippung, **Fluchtungsfehler**, erhöhter Energiebedarf, Beschädigung angrenzender Bauteile

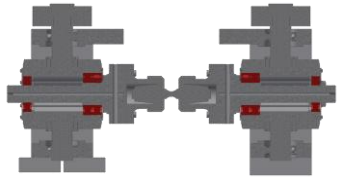
Schadensmodell und Sensorkonzept (Wälzlager)

- Vorrangiger Schadensmechanismus: **Werkstoffermüdung aufgrund Wechsellast**
- Versagensart: Grübchenbildung infolge Ermüdung, Aufrauen/Verformung der Lauffläche, **Verlust Funktionsfähigkeit**
- Schadensmodell: **Lebensdauerberechnung nach ISO 281**





Lebensdauerberechnung von Wälzlagern



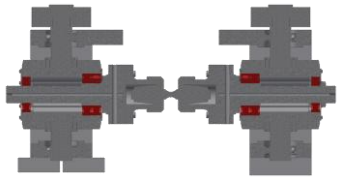
$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^p$$

L_{10}: nominelle Lebensdauer in Millionen Umdrehungen
(10% Ausfallwahrscheinlichkeit)
C: Dynamische Tragzahl, Produkttabellen
P: Dynamische äquivalente Lagerbelastung
p: Lebensdauerexponent, Bauform

$$P = \sqrt[p]{\frac{\int_0^T \frac{1}{a_{ISO}(t)} \cdot n(t) \cdot F^p(t)\, dt}{\int_0^T n(t)\, dt}}$$

a_{ISO}: Lebensdauerbeiwert
(Bauart, Verschmutzung, Belastung, Schmierung)
$n(t)$: Drehzahlverlauf
$F(t)$: Belastungsverlauf

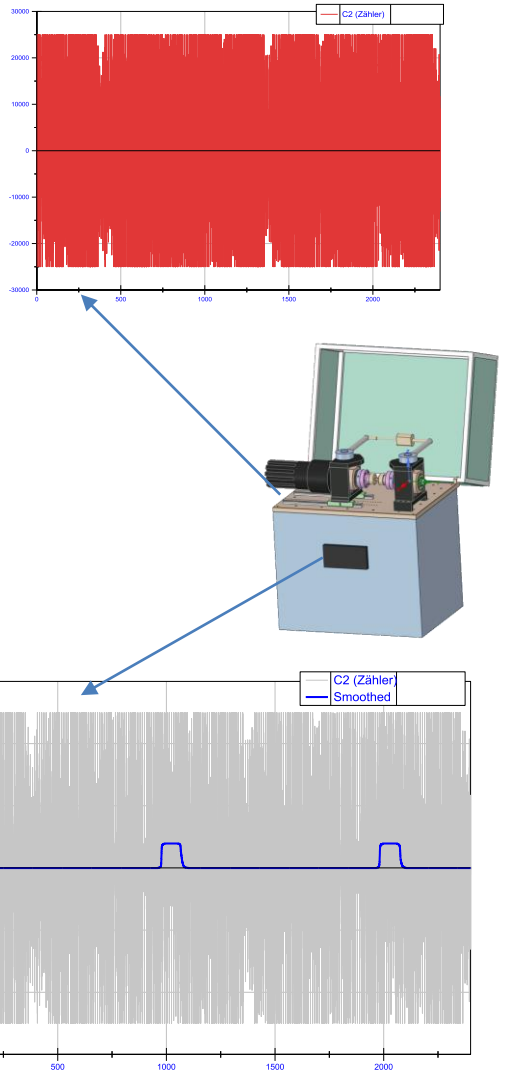
Schadensmodell und Sensorkonzept (Wälzlager)



- Schadensmodell: Lebensdauerberechnung nach ISO 281
  - **Lagerbelastung** (Drehzahl, axiale und radiale Lasten)
  - Lagerbauart
  - Erweitert: **Verunreinigung, Betriebsbedingungen, Schmierungszustand, Temperatur**
- Sensorkonzept:
  - Kraftmessdosen erfassen Lagerkräfte, Berechnung mit FEM/FZM
  - Induktiver Näherungsschalter misst Umdrehungen
  - PT100 misst Lagertemperatur
  - Schmierstoffüberwachung (optisch)
  - LDV misst Rundlauf

Datenbasierte Zustandsüberwachung

- Motorüberwachung (frühzeitige Fehlererkennung)
  - Drehzahl (Solldrehzahl, Soll - Ist -Vergleich)
  - Stromaufnahme
  - Phasensymmetrie
  - Frequenzumrichter
  - Motortemperatur
- Systemänderung detektieren
  - Schallemissionsanalyse (Acoustic Emission Monitoring)
  - Indirekte Erfassung der Kinematik (Welle)
- Überwachung Biegemoment
  - Kraftmessdose (Soll-Ist-Vergleich)
  - Dehnungen Probe



Datenbasierte Zustandsüberwachung - Sensorik

Motor:
Stromaufnahme
Spannung
Frequenz(umrichter)
Phasen(symmetrie)
Drehzahl

Belastung:
Drehzahl
Moment (Kraft)
Weg (Stellmotor)

Lager (direkt):
Temperatur

Lager (indirekt):
Temperatur
Schwingungen

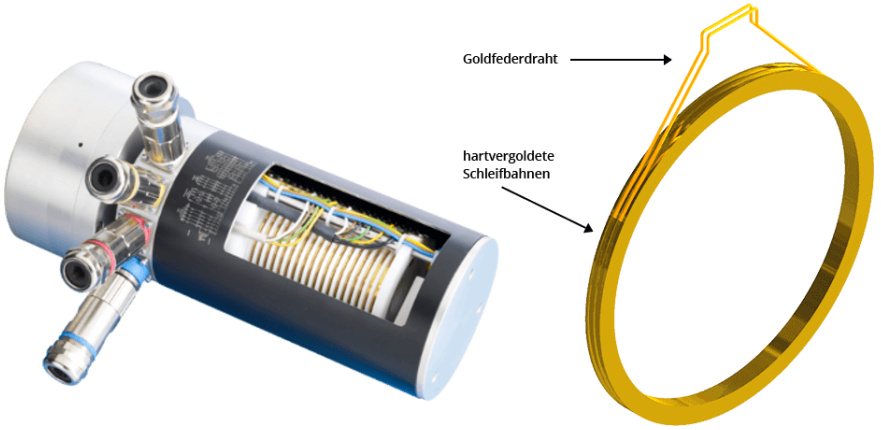
Welle (direkt):
Dehnung (DMS, FBG)
Temperatur (FBG)
Potentialmethode

Welle (berührungsfrei):
Schwingung (LDV)
Temperatur (Infrarot)
Dehnungen (DIC)
Wegmessung (Konfokal)

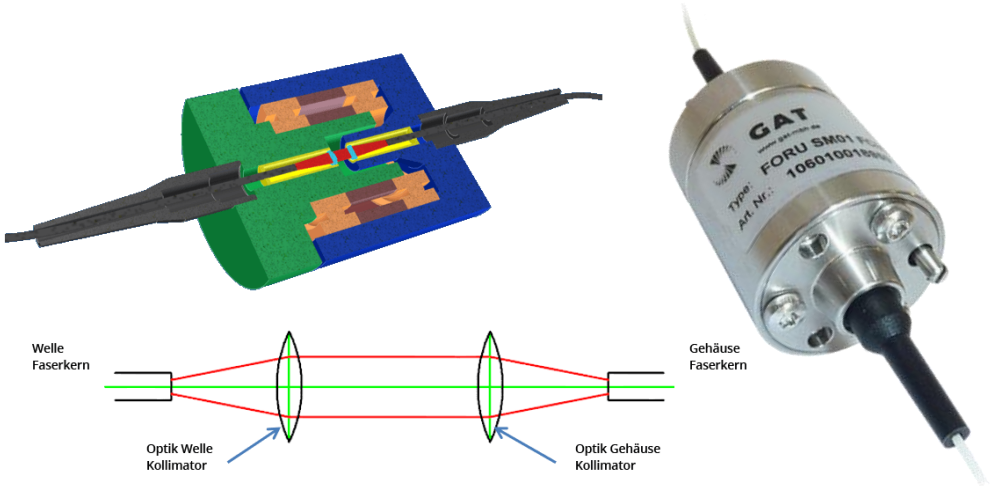
Schwingungen:
Körperschall
Beschleunigungs-
aufnehmer
Acoustic Emission
Mikrophone

Sensorik direkt an rotierendes Bauteil (Welle)

- Herausforderung:
  - Befestigen
  - Energieversorgung
  - Signalübertragung
  - Umgebung
  - Unwucht

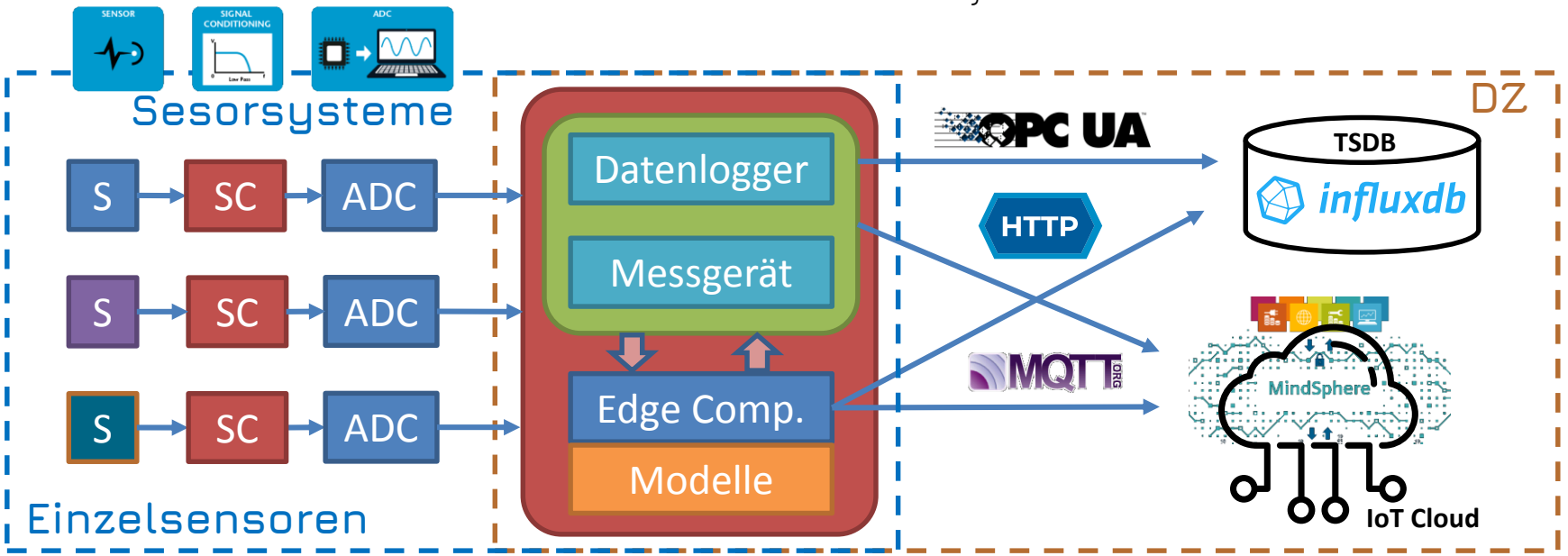


- Übertagungstechnik
  - Schleifringe
  - Optische Drehüberträger
  - Telemetrie

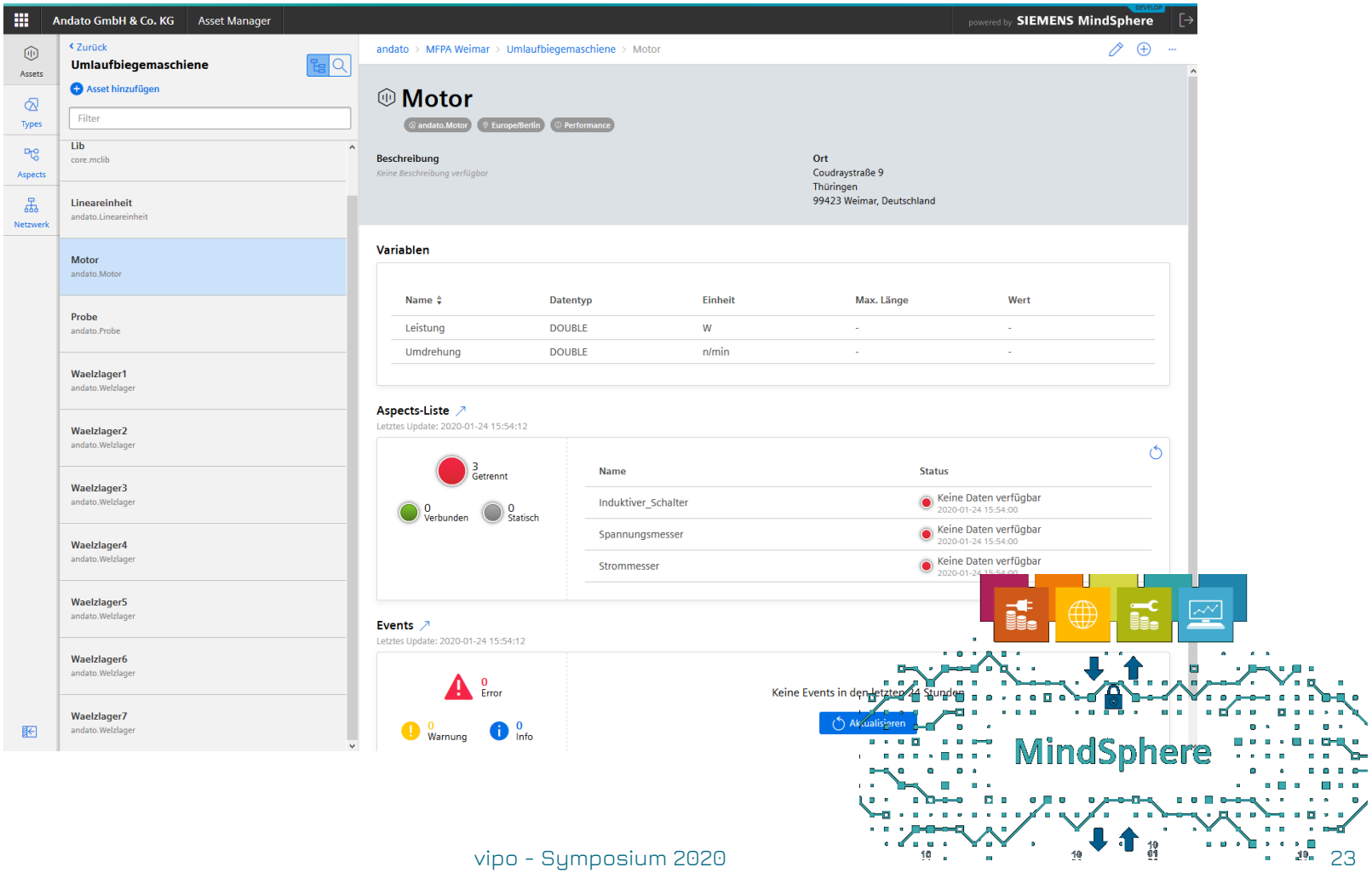


Herausforderung - Datenerfassung

- Welche Daten sind vorhanden?
  - Signale im Zeitbereich (S)
  - Signale im Frequenzbereich (S)
  - Bilddaten (S)
  - Digitale Signale
  - Datenstruktur: 1 Bit bis n-Byte Integer, Gleitkommazahl
- Wie erfolgt die Datenerfassung?
  - Signalverarbeitung
  - Digitale Messdaten (ADC)
  - Signalkonditionierung (SC)
  - Datenspeicherung
  - Datenübertragung (Protokolle)
  - Datenspeicherung (Time Series DB, IoT Cloud)



IoT Platform - Andato

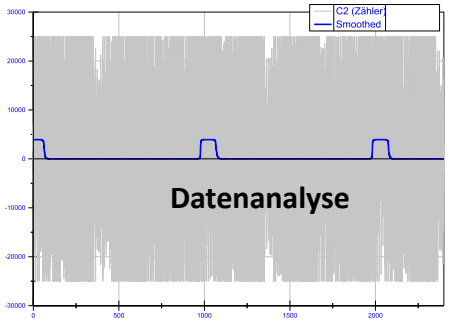


Aktuelle Schnittstellen im WK-Verbund

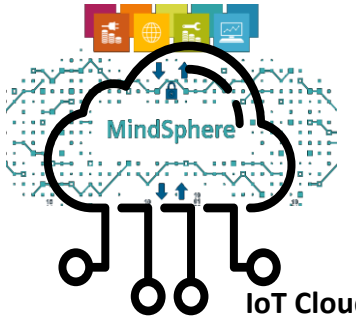
CiS Forschungsinstitut für Mikrosensorik GmbH

DMS
Telemetrie

Alpha Analytics

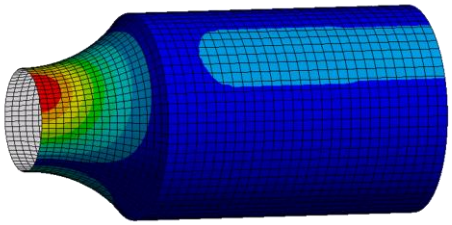


andato
HIGH PERFORMANCE SIMULATION



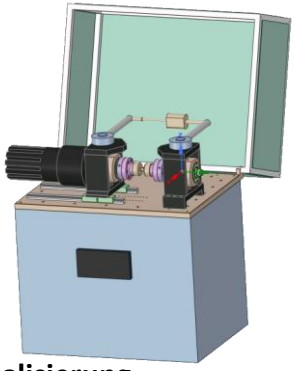
IoT Cloud

dynardo



FZM

ORISA
INNOVATION BY CONFIGURATION



Visualisierung

vipo
SIMULATION DRIVEN
PRODUCT AND PROCESS OPTIMIZATION

Vielen Danke

an die Projektpartner, den Projektträger und dem BMBF.

UNTERNEHMEN REGION
Die BMBF-Innovationsinitiative Neue Länder

GEFÖRDERT VOM
Bundesministerium für Bildung und Forschung