



EMod: Simulationsframework für Werkzeugmaschinen

Energieflüsse, Massenströme und Wärmequellen in Werkzeugmaschinen
Druckverlust und Wärmeübertragung in Kühlkanälen

S. Züst, L. Weiss

Inhalt

1. Werkzeugmaschinen
2. EMod / DuctDesigner
3. Anwendungsbeispiel

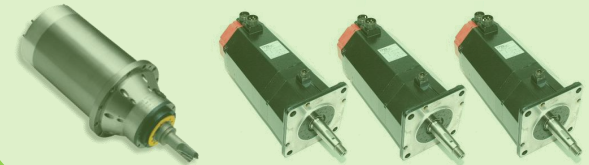
Werkzeugmaschinen: Ein Komponentenverbund



HMI



Antriebsstrang / NC



Hydraulik



Prozesskühlung



Maschinenkühlung



Werkzeugmaschinen: Energetische und thermische Dynamiken

Werkzeugmaschinen: Mechatronisches System, bestehend aus mehreren Subsystemen

Sensitiv auf Wärmeeintrag: Thermisch bedingte Verformungen der Struktur durch nicht homogene und nicht nominale Temperaturfelder

Simulation des thermischen Verhaltens (Temperaturfeld und Verlagerungen) benötigt Randbedingungen:

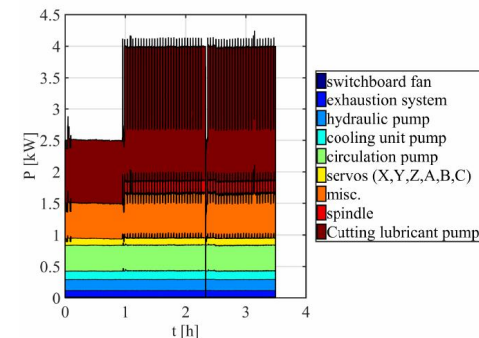
Quellterme (Neumann)

Kontakttemperatur (Robin)

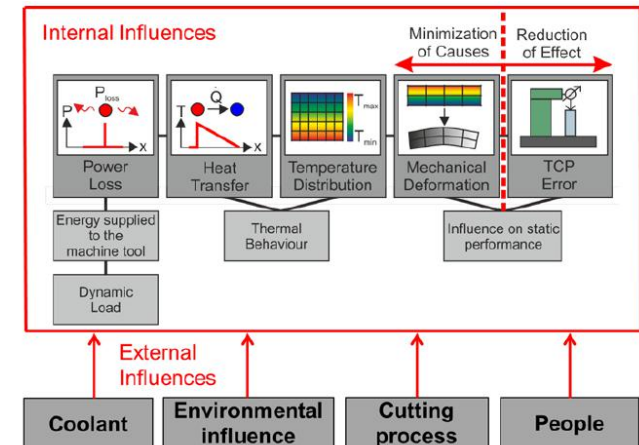
Randbedingungen sind ein Resultat des energetischen Verhaltens:

Energiekonversion mit $\eta < 1$: Quellterme

Hydraulische Netzwerke: Fluidtemperatur, Wärmeübergang



Rollomatic 628XS, Züst / Frick



J. Mayr, W. Knapp, and K. Wegener. Reduction of thermal errors of 5-axis machine tools. In The Proceedings of MTTRF 2015 Annual Meeting, 2015.

EMod: Modellierung, Simulation und Analyse von Energieflüssen

Ziel: Prädiktion von Wärmequellen und fluidgebundene Wärmeübergänge auf Komponentenebene

Methode: Rekonfigurierbare Makromodelle

Physikalische Modelle generischer Maschinenkomponenten (z.B. Kreislpumpe

Parametrisierung nach Typ (z.B. Grundfos MTR 5)

Vorgabe der Komponenteninteraktion (z.B. Durchfluss Spindelkühlung = Durchfluss Pumpe)

Maschine hat i.A. mindestens zwei Netzwerke:

Elektrisches Netzwerk

Kleine Zeitkonstanten: Quasi-statische Simulation

Kann für jede Komponente individuell gelöst werden

Hydraulisches Netzwerk

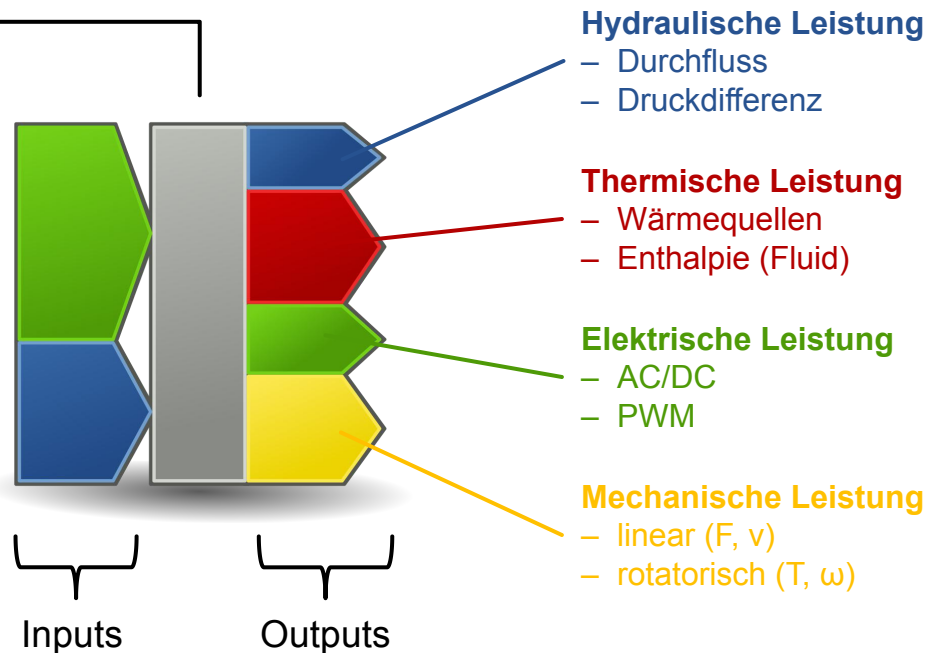
Wärmetransport (Kühlung)

Komponenten können nicht einzeln betrachtet werden (Durchfluss durch einzelne Stränge wird durch die hydraulischen Widerstände aller beteiligter Komponenten bestimmt)

EMod: Generische Maschinenkomponente

Maschinenkomponente:

- Inputs (von vorgelagerten Komponenten)
- Outputs (von nachgelagerten Komponenten)
- Transformation zwischen verschiedenen Formen von Leistung
- Speichern von Energie und Masse
- Zustand (z.B. off, stand-by, on)
- Physikalische Modelle zur Beschreibung des Input-Output-Verhaltens



EMod: Modellierungsphilosophie

Maschinenmodell = logische
Verknüpfung einzelner
Komponentenmodelle

Knoten: Komponenten

Kanten: Interaktion
(Leistungsaustausch,
Massenfluss, Information)

Parametrisierung:

Datenblätter

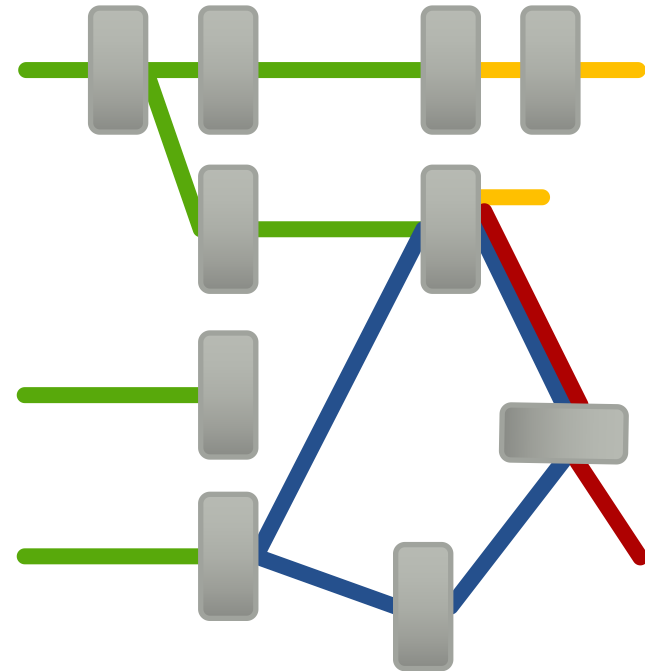
Erfahrungswerte

Empirische Korrelationen

Herausforderung

Druckverlustbeiwert

Wärmeübergangskoeffizient



Hydraulische Netzwerke: Druckverlust und Wärmeübergang

Druckverlust

$$\Delta p = \zeta \cdot \frac{l}{d} \cdot \rho \cdot \frac{v^2}{2}$$

ζ : Druckverlustbeiwert [-]

l : Länge[m]

d : Hydraulischer Durchmesser [m]

ρ : Dichte [kg/m³]

v : Fließgeschwindigkeit [m/s]

ζ bekannt für bestimmte Geometrien

Wärmeübergang

$$\alpha = Nu \cdot \frac{\lambda}{d}$$

■ α : Wärmeübergangskoeff. [W/m²/K]

■ Nu : Nusselt-Zahl [-]

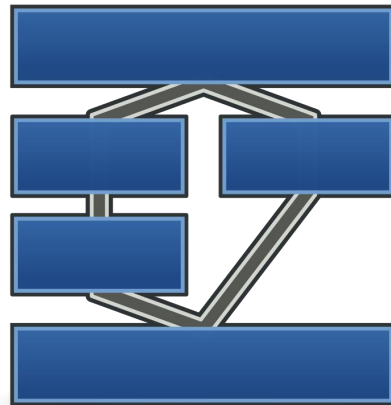
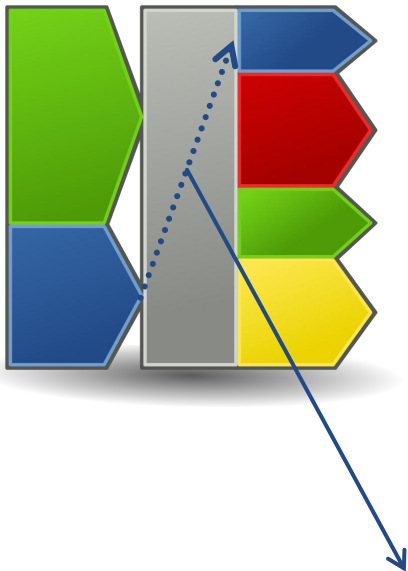
■ d : Hydraulischer Durchmesser [m]

■ λ : Wärmeleitfähigkeit [W/m/K]

Nu bekannt für bestimmte Geometrien

Unterteilen des Kanals in Elemente mit bestimmten geom. Eigenschaften und damit bekanntem ζ und Nu

DuctDesigner: Druckverlust und Wärmeübergang in Kühlkanälen



1. Unterteilung in einzelne Abschnitte

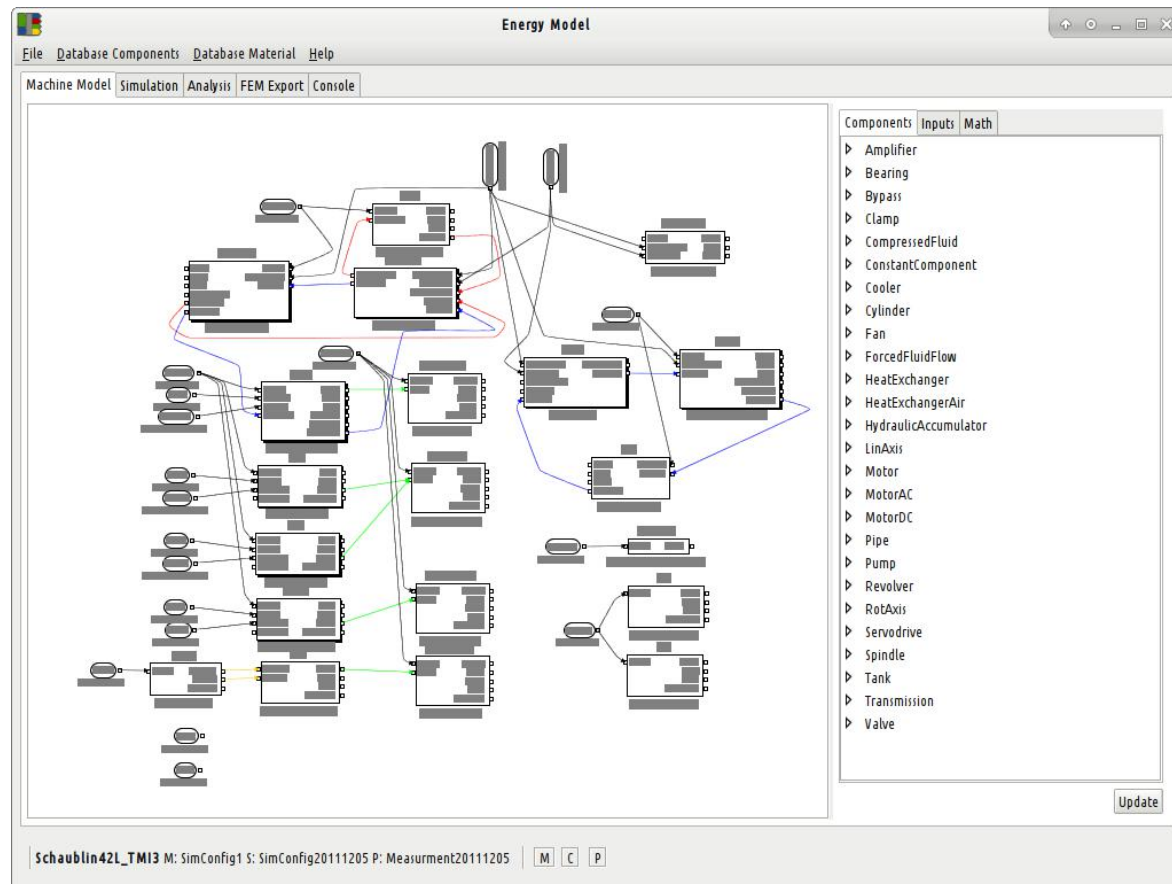
- Bohrungen
- Leitungen
- Bögen
- Knicke
- Wendel
- ...

2. Emp. Korr. für jeden Abschnitt

- Nusseltkorrelation
- Druckverlustbeiwert

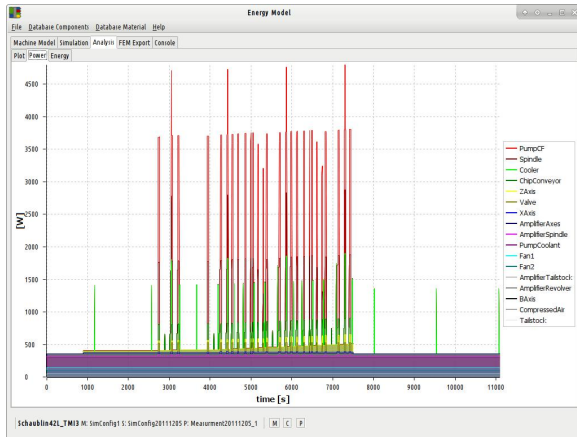
3. Aggregation der einzelnen Werte

EMod GUI: Modellierung einer Maschine

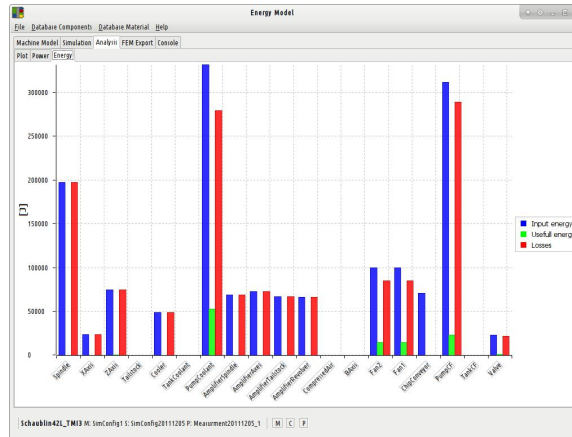


EMod GUI:

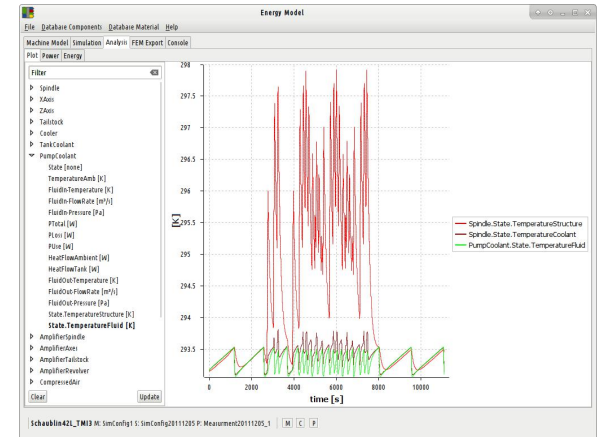
Analyse einer Maschine (Beispiele)



P-t Diagram der Leistungsaufnahme einzelner Komponenten



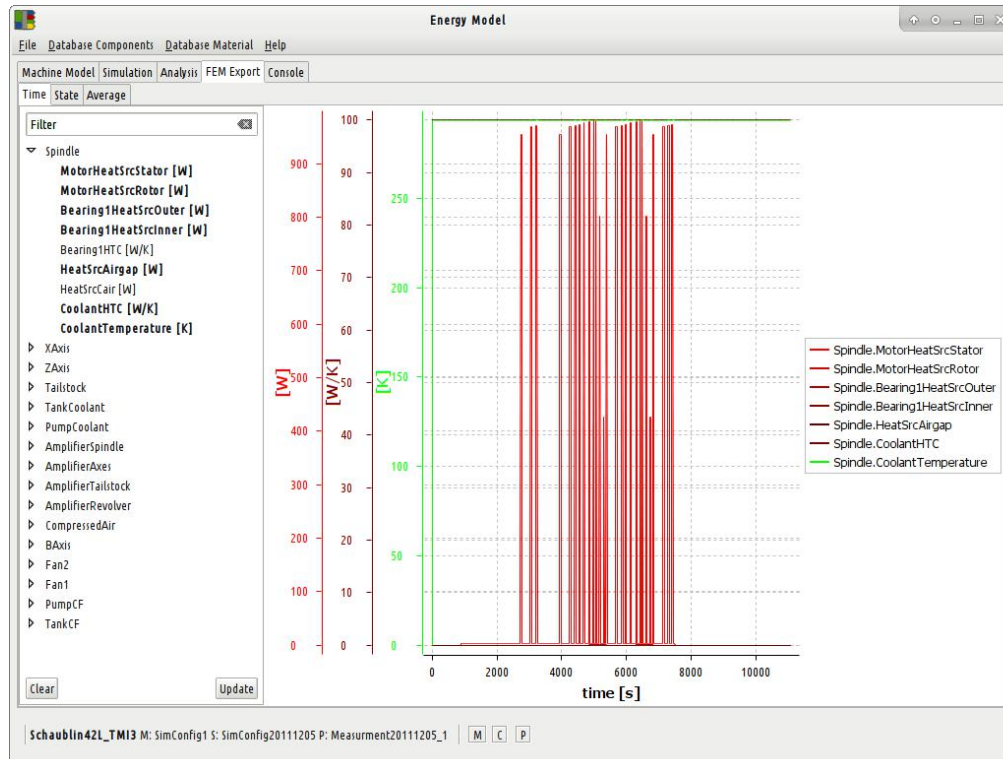
Eingangsleistung, Ausgangsleistung und Wärmequellen je Komponenten



Temperaturverlauf im Kühlkreislauf der Spindel

EMod GUI:

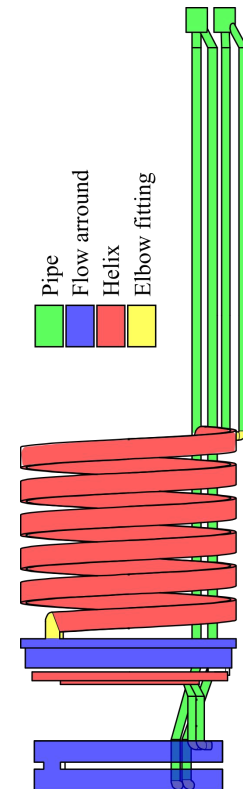
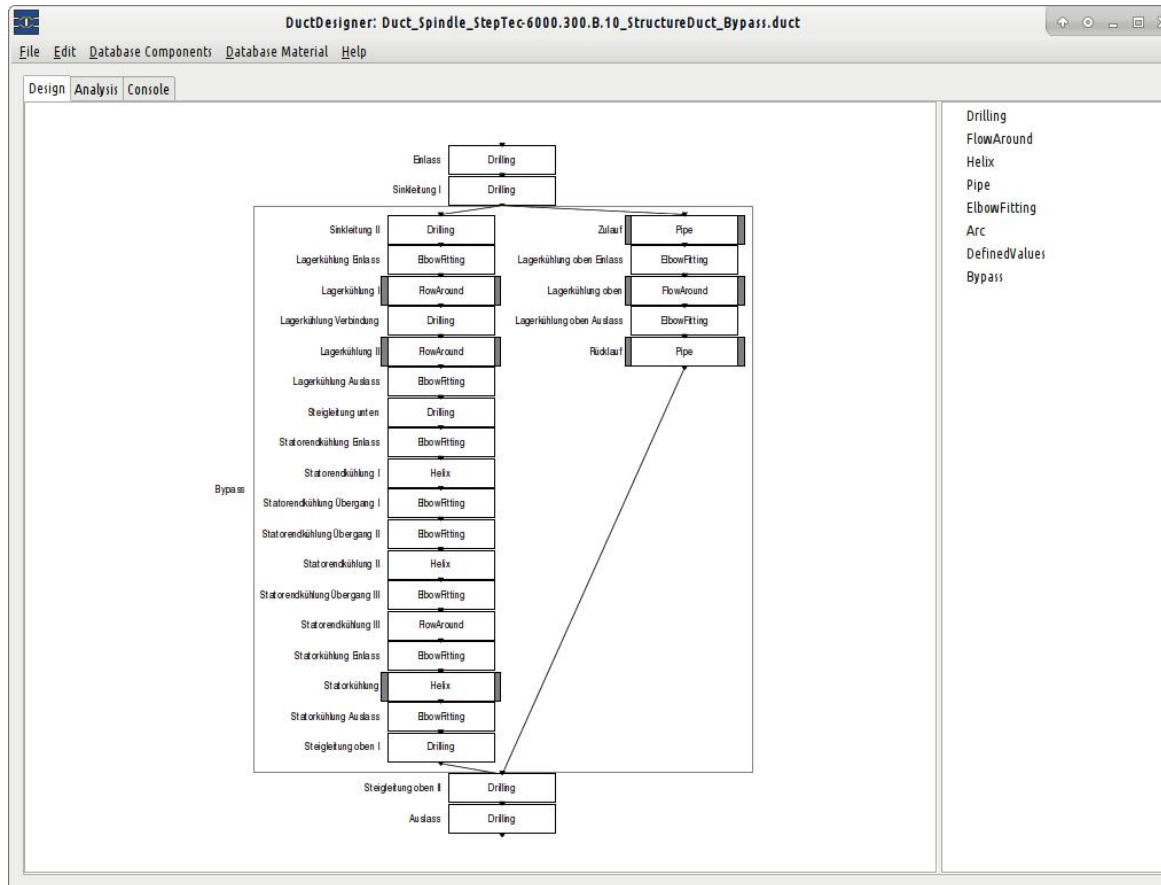
Export von FEM Randbedingungen



Die Komponentenmodelle schreiben während jedem Zeitschritt der Simulation drei Arten von FEM-Randbedingungen:

- Dirichlet (Wandtemperatur)
- Neumann (Wärmefluss)
- Robin (Fluidtemperatur und Wärmeübergangskoeffizient)

DuctDesigner GUI: Modellierung eines Kühlkanals



DuctDesigner: Verifikation (I)

Zwei Testfälle:

Q=6.97 l/min, p_{in} = 3 bar

Q=5.6 l/min, p_{in} = 1.8 bar

Abweichung von CFD:

Druckverlust: -5% – 3%

Wärmeübergang: 0% – 2%

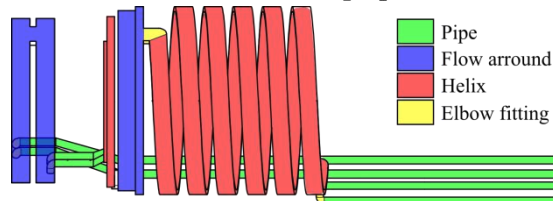
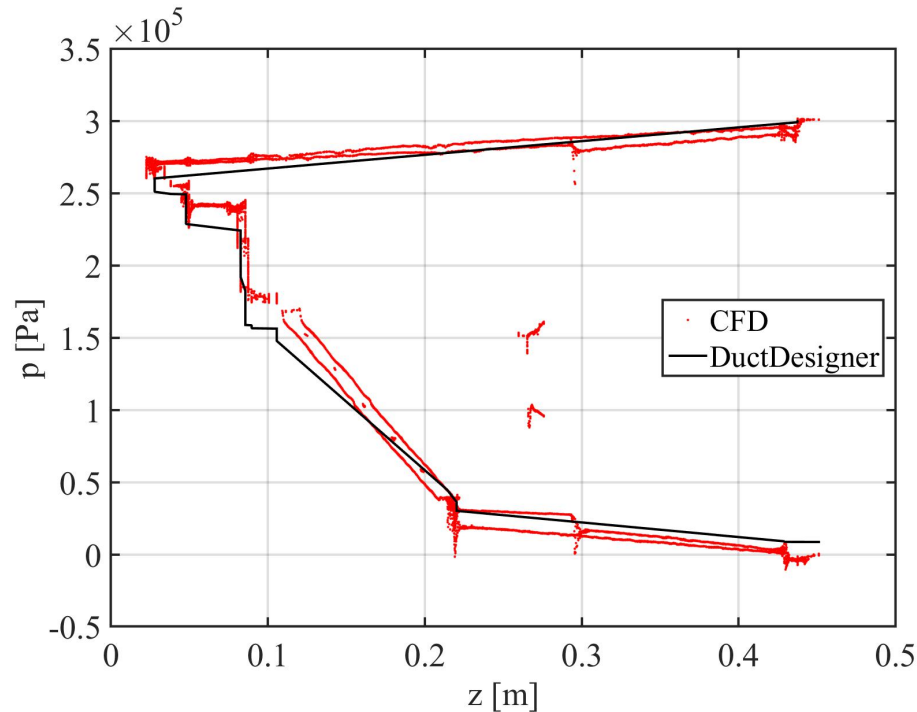
Fazit:

Sowohl Druckverlust wie auch Wärmeübergang können reproduziert werden

Konfigurations- und Simulationszeit signifikant reduziert

Allgemein	CFD	DD
Fläche [m ²]	0.13	0.12
Volumen [m ³]	$0.15 \cdot 10^{-3}$	$0.14 \cdot 10^{-3}$
t-Konfig [d]	3	0.25
t-Sim [s]	3600	<1
Q=6.97 l/min	CFD	DD
Druckverl. [bar]	3.0	2.9
HTC [W/K]	574	562
Q=5.6 l/min	CFD	DD
Druckverl. [bar]	1.8	1.9
HTC [W/K]	450	451

DuctDesigner: Verifikation (II)

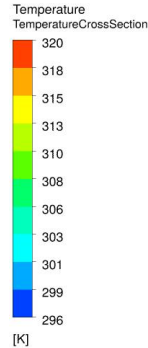
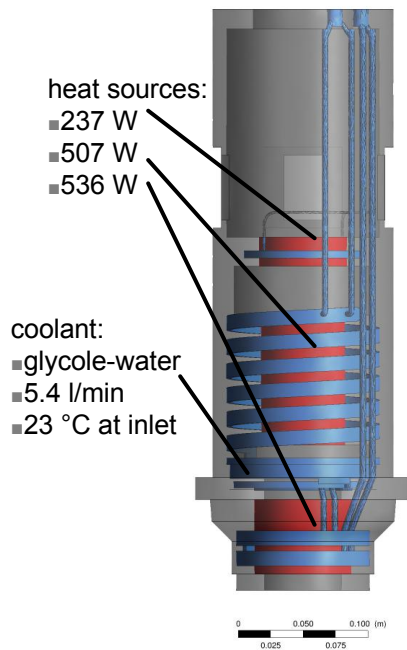


Fazit:

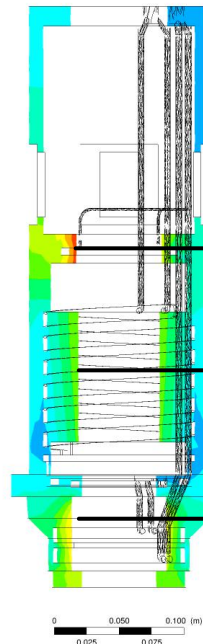
- Berechnung des Druckverlustes und des Wärmeübergangs innerhalb der notwendigen Genauigkeit
- Signifikante Reduktion der Konfigurations- und Rechenzeit

DuctDesigner: Verifikation (III)

Setup



Lösung

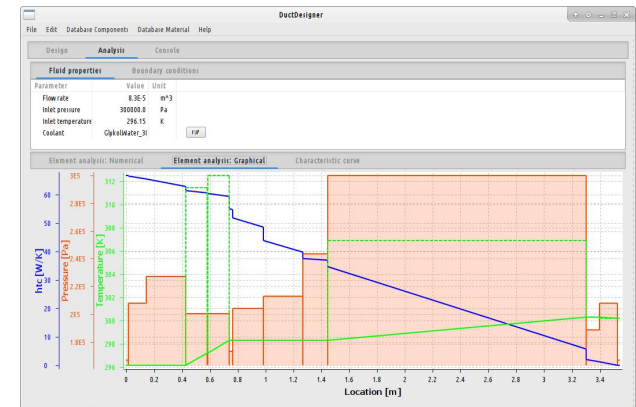


ANSYS
R17.0
Academic

42 °C

36 °C

38 °C



	CFX	DD
Bearing back	42 °C	42 °C
Coil	36 °C	34 °C
Bearing front	38 °C	37 °C

Anwendungsbeispiel: Bearbeitungsspindel

Identification of heat sources

- Electric drive, air gap friction, bearings
- macro models
- cooling demand, boundary conditions



Design concept and optimization

- evaluation of cooling concepts and duct routings
- based on the developed software *DuctDesigner*.



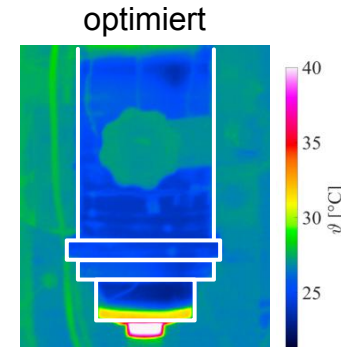
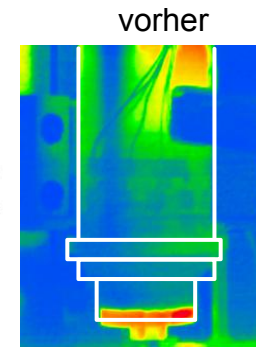
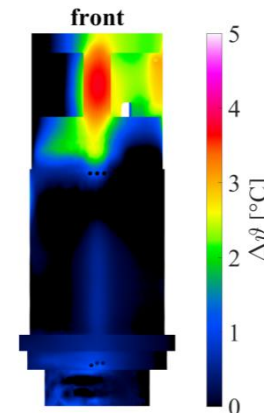
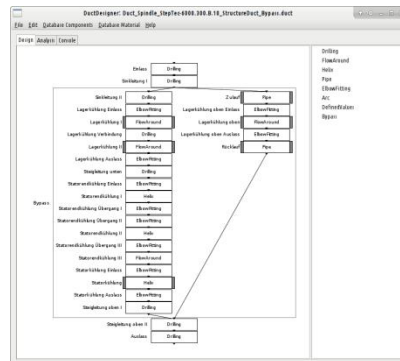
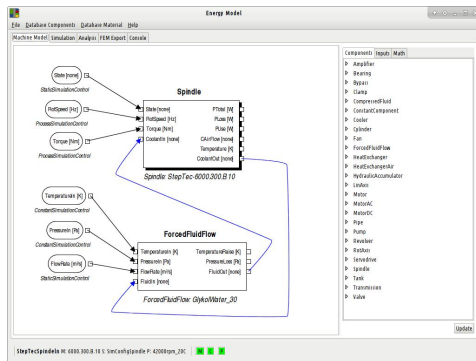
Virtual prototype

- CFD Simulation
- Verification of the concept
- based on the identified boundary conditions



Physical Prototype

- Test field
- Verification of the performance
- Thermo-couples, thermographic imaging



S. Züst, F. Pavliček, L. Fischer, L. Weiss, K. Wegener, Thermo-Energetic Modelling of Machine Tool Spindles with Active Cooling based on Macro Models, International Journal for Mechatronics and Manufacturing Systems, 9(3): 197-21.

S. Züst, F. Pavliček, L. Fischer, L. Weiss, K. Wegener, Macro-Models for Modelling and Simulation of Cooled Spindles, Special Interest Group Meeting: Thermal Issues, 17 - 18 March 2016, 2016, Prague, CZ.



