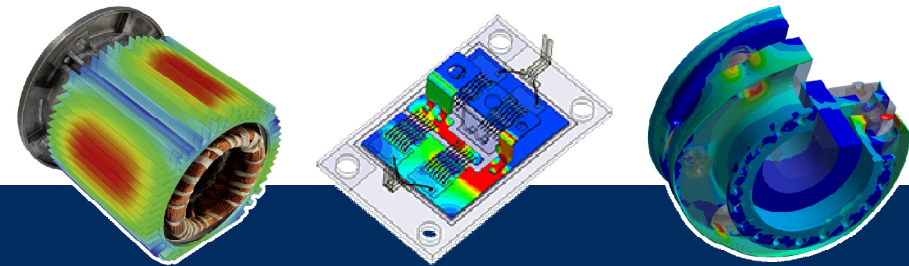


Simulation ist mehr als Software®



Elektrisch-thermisch-mechanisch gekoppelte Simulation

An den Beispielen eines Aktuators und eines Steckers

CADFEM – Simulation ist mehr als Software

PRODUKTE

Software und IT-Lösungen

SERVICE

Beratung, Support, Engineering

WISSEN

Know-How-Transfer

CADFEM in D, A, CH

- 1985 gegründet
- 2.300 Kunden
- 12 Standorte
- 185 Mitarbeiter (weltweit: > 250)



Inhaltsübersicht

- Domänenübergreifende numerische Simulation von Produkten und Prozessen
 - Effekte, Unterschiedliche Perspektiven und Vokabeln
 - Kopplung in der Projektskizzenebene von ANSYS
- Beispiele
 - Aktuator
 - Anwendungsbeispiele, Datenquelle, Effekte, Varianten in Kopplung und Materialeigenschaften
 - (Live Darstellung von Ergebnissen in der Software)
 - Motivation und Erkenntnisgewinn
 - Steckverbindung
 - Anwendungsszenario, Anforderungen und Simulationsmodell, Gründe für Kopplung
 - (Live Darstellung von Ergebnissen in der Software)
 - Möglichkeiten weiterer Ergebnisauswertung durch Sensitivitätsanalyse, Optimierung und Robustheitsanalyse
 - Motivation und Erkenntnisgewinn



Competence Center FEM

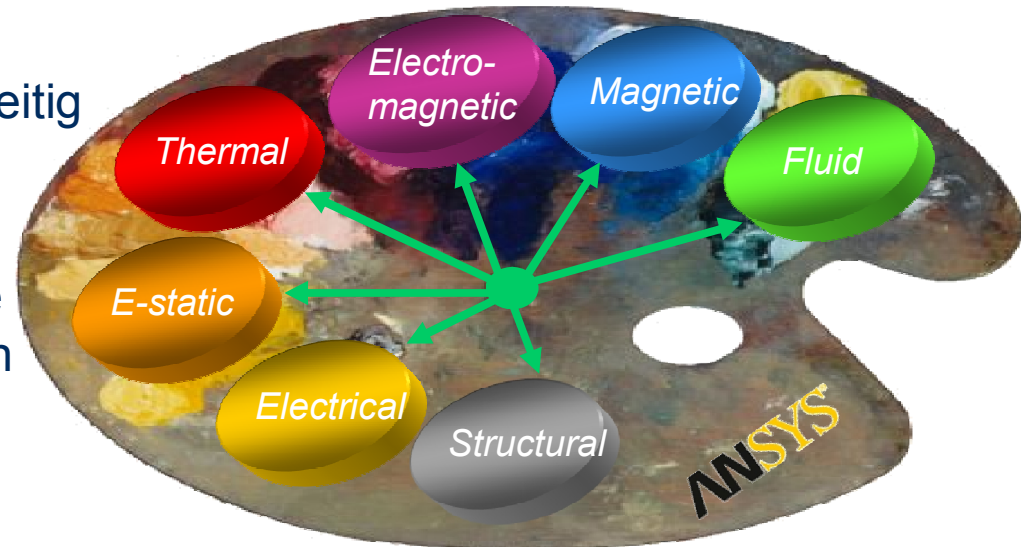
Simulation ist mehr als Software®

Unterschiedliche Perspektiven und Vokabeln

Auf und für die Domänenübergreifende numerische Simulation
von Produkten und Prozessen

Domänenübergreifende Effekte im Ingenieuralltag

- In der „Realität“ finden alle physikalischen Domänen gleichzeitig statt
- Es gibt zum Teil Unterschiedliche Lösungsansätze für die einzelnen Anwendungsfälle in der numerischen Simulation
- ANSYS bietet mehrere Lösungsansätze und Kopplungsmöglichkeiten

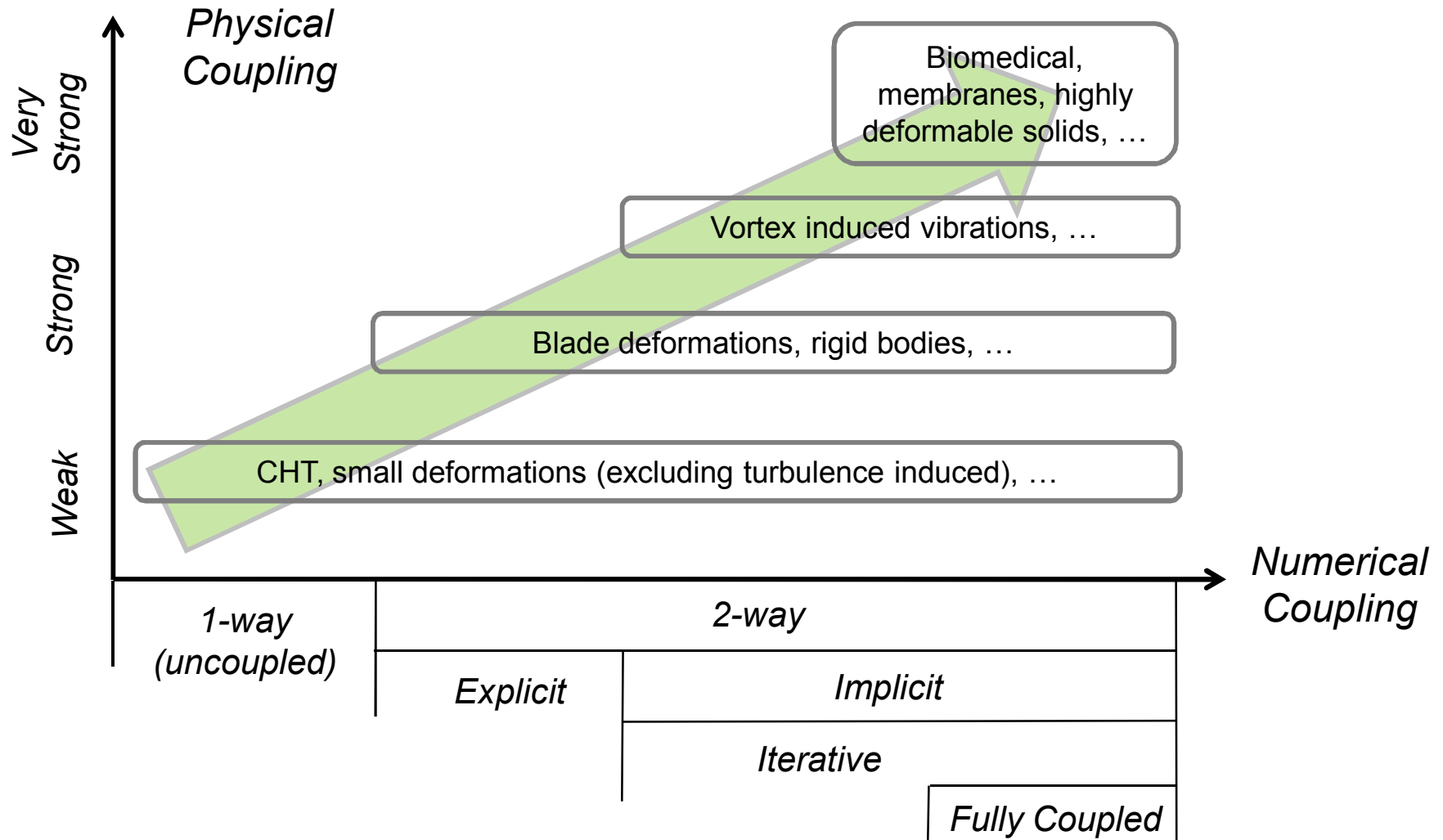


Source: CADFEM GmbH

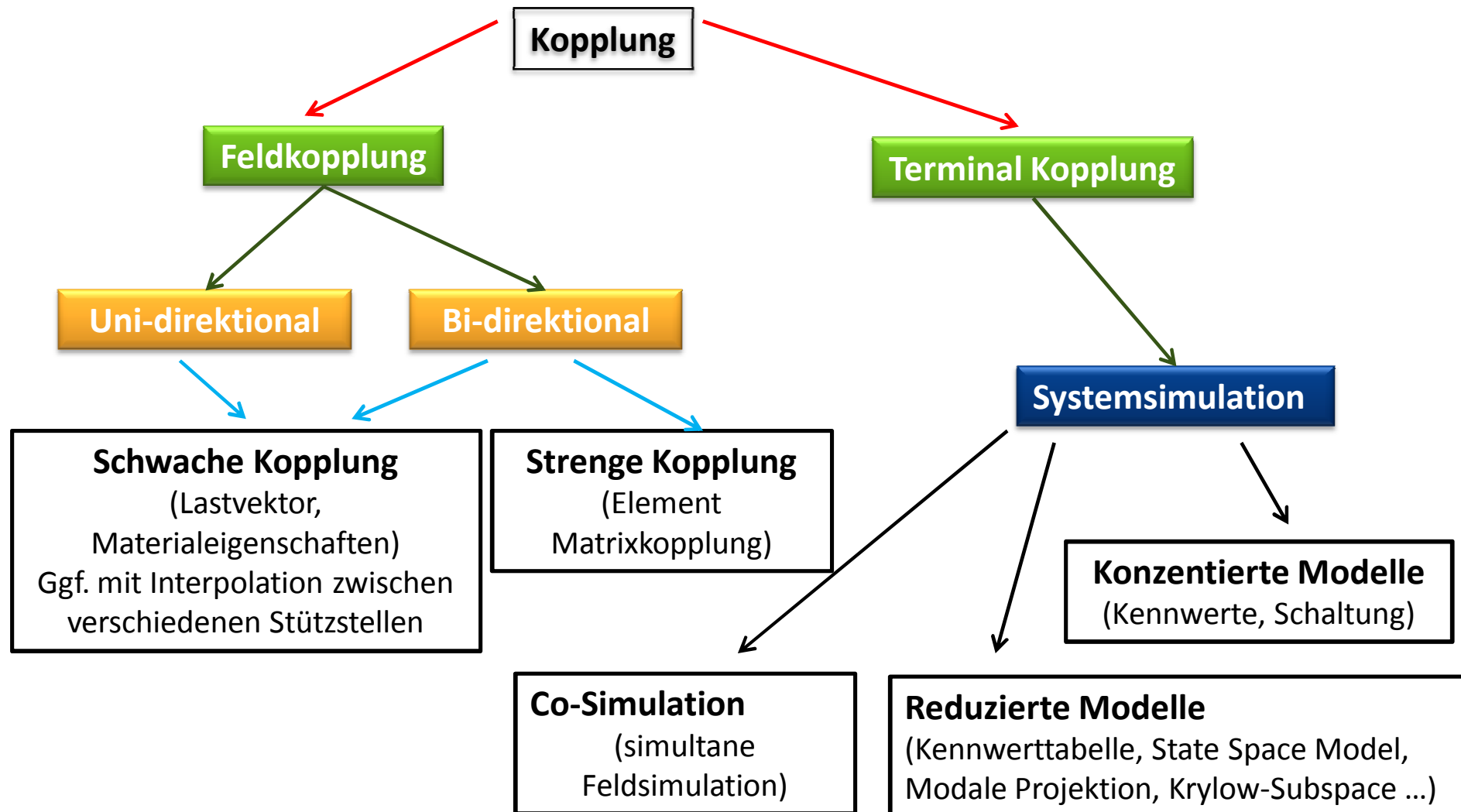
Einige Effekte mit wechselseitiger Abhängigkeit

	Strukturmechanik	Temperatur	Elektro-Magnetismus	Fluid
Struktur-Mechanik	Steifigkeit Festigkeit Bewegung Schwingung	Kontaktstatus Energiedissipation	Kontaktstatus Spaltmaße	Strömungsquerschnitt
Temperatur	Materialeigenschaften Dehnung	Temperatur Wärmestrom	Materialeigenschaften	Materialeigenschaften Dichte
Elektro-Magnetismus	Magnetkräfte Elektrostatische Kräfte	Energiedissipation Seebeck und Peltier	Elektrisches Potential Magnetfeldstärke Flußdichten	Kräfte auf Partikel
Fluid	Druck	Reaktionsenergie Energietransport	Ladungstransport	Massenstrom Druck Chem. Reaktion Konzentration

Vokabeln zur numerischen Kopplung: Variante 1



Vokabeln zur numerischen Kopplung: Variante 2



Vokabeln innerhalb einzelner Berechnungsdisziplinen

Analysis	Structural	Thermal	Electric current	Electric charge	Magnetic	Diffusion
Structural	Elasticity, structural nonlinearities , pressure, structural damping, Coriolis effect					
Thermal		Thermal conduction, specific heat				
Electric current			Electrical resistivity			
Electric charge				Electrical permittivity, charge density load		
Magnetic					Magnetic permeability, B-H curve, coercive force	
Diffusion						Diffusivity

Vokabeln bei gekoppelten Berechnungsdisziplinen

Analysis	Structural	Thermal	Electric current	Electric charge	Magnetic	Diffusion
Structural		Thermal expansion		Converse piezoelectric Electric force	Magnetic force	Hygroscopic swelling
Thermal	Piezocaloric		Seebeck	Electrocaloric		
Electric current	Piezoresistive	Peltier Joule heat		Displ. current	Eddy current Hall effect	
Electric charge	Direct piezoelectric	Pyroelectric				
Magnetic			DC, eddy, displ. currents			
Diffusion	Stress-migration	Thermo-migration (Soret effect)	Electro-migration			

Vergleich von Matrix- und Lastvektorkopplung

Basis Elemente

Structural K_{11} , F_1

Thermal K_{22} , F_2

Electrical

Electrostatic

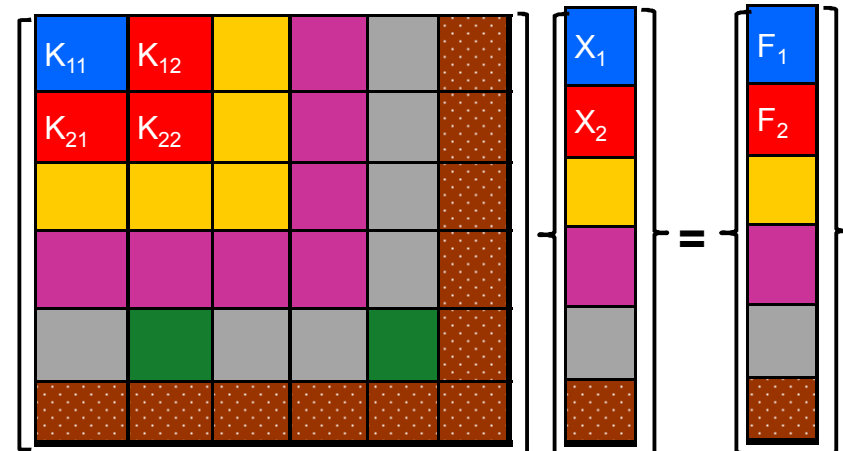
Magnetic

Diffusion

+

Koppeltherme
(e.g. K_{12})

Feldkopplung auf Elementebene



- Enthält primäre Größen aller beteiligten Bereiche gleichzeitig (X_1 , X_2 ,...)
- Kopplungseffekte sind ggf. Durch Koppeltherme abgebildet
- Matrix (K_{12} , K_{31} ,...) und Lastvektor (F_1 , F_2 ,...) sind auf Elementebene gekoppelt
- Es gibt nur ein Berechnungsnetz für alle physikalischen Domänen

Vergleich von Matrix- und Lastvektorkopplung

• Matrixkopplung

1 – erste Berechnungsdisziplin
2 – zweite Berechnungsdisziplin

$$\begin{bmatrix} [K_{11}] & [K_{12}] \\ [K_{21}] & [K_{22}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} [u_1] \\ [u_2] \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} [F_1] \\ [F_2] \end{Bmatrix}$$

- Nebendiagonalelemente enthalten Koppeltherme (k12,k21)
- Für lineare Anwendungen findet man die Lösung in einem Lösungsschritt

• Lastvektorkopplung (Sequentielle Kopplung)

$$\begin{bmatrix} [K_{11}] & 0 \\ 0 & [K_{22}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} [u_1] \\ [u_2] \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} [F_1] \\ [F_2] \end{Bmatrix}$$

- Effekte der Kopplung werden nur in den Lastvektoren abgebildet
- Um gekoppelte Effekte abzubilden werden mindestens zwei Lösungsschritte benötigt

Vergleich von Matrix- und Lastvektorkopplung

- **Matrixkopplung**

ist vorteilhaft, wenn bei nichtlinearen Wechselwirkungen zwischen den einzelnen berechnungsdisziplinen. In der Berechnungsmethode – im Element – muss diese Wechselwirkung abgebildet sein.

- **Lastvektorkopplung**

ist vorteilhaft, wenn die Ergebnisse einer Domäne nicht oder nur vernachlässigbar von den Ergebnissen einer weiteren Domäne abhängen. Wechselwirkungen werden ggf. durch wechselseitiges Übertragen von Lastvektoren berücksichtigt.

In vielen Fällen kann durch die Simulationsfolge eine Iteration zwischen den Berechnungsdisziplinen umgangen werden.

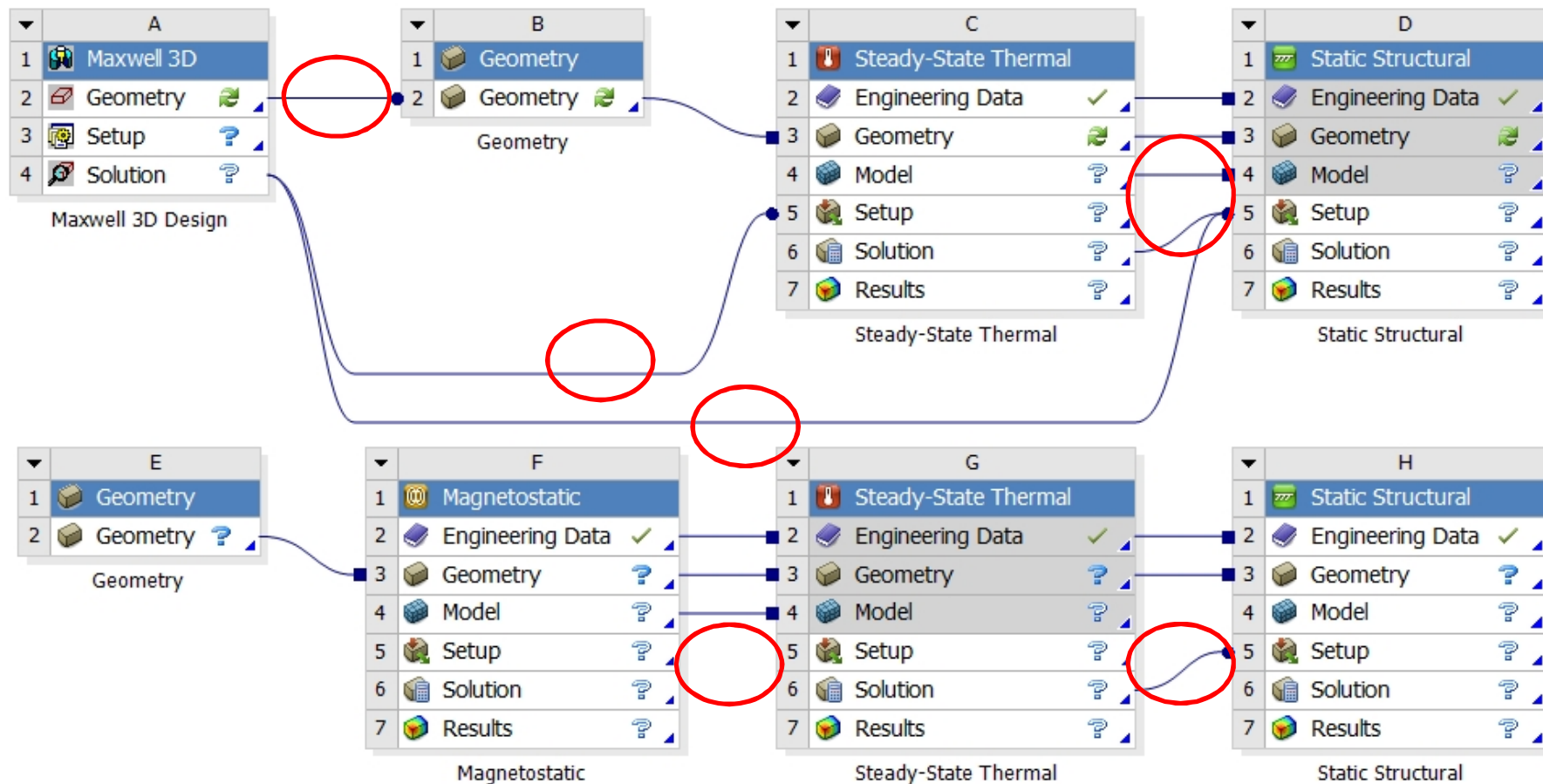


Competence Center FEM

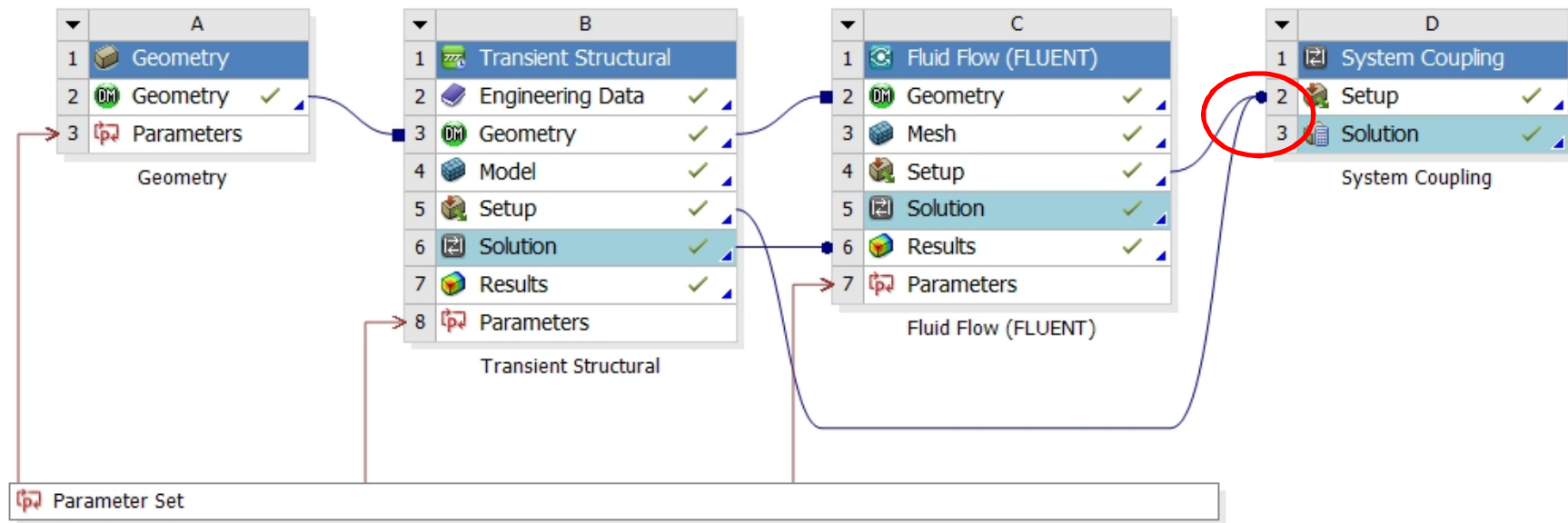
Simulation ist mehr als Software®

Kopplung in der Projektskizzenebene von ANSYS

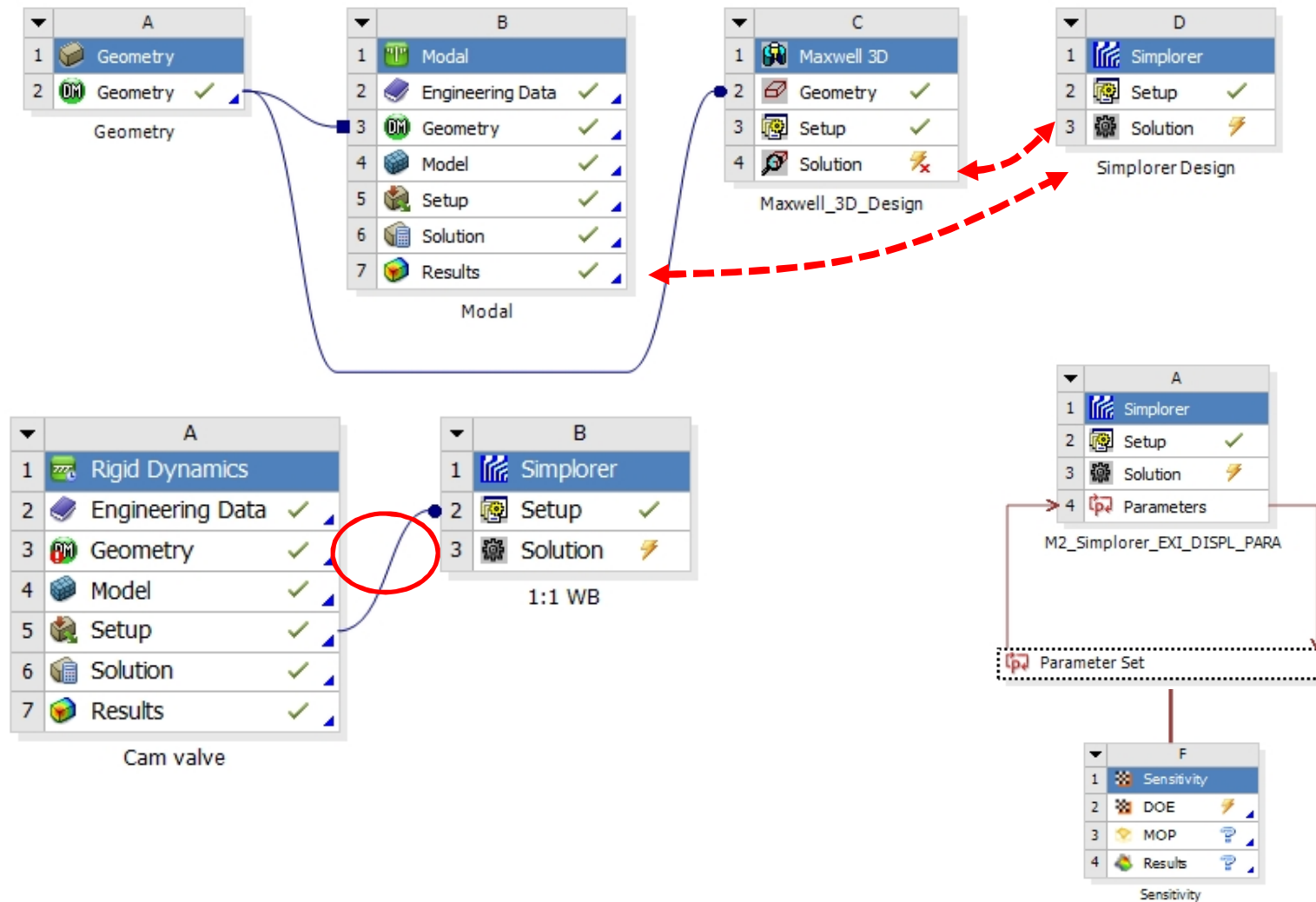
Sequentielle Lastvektorkopplung in ANSYS Workbench



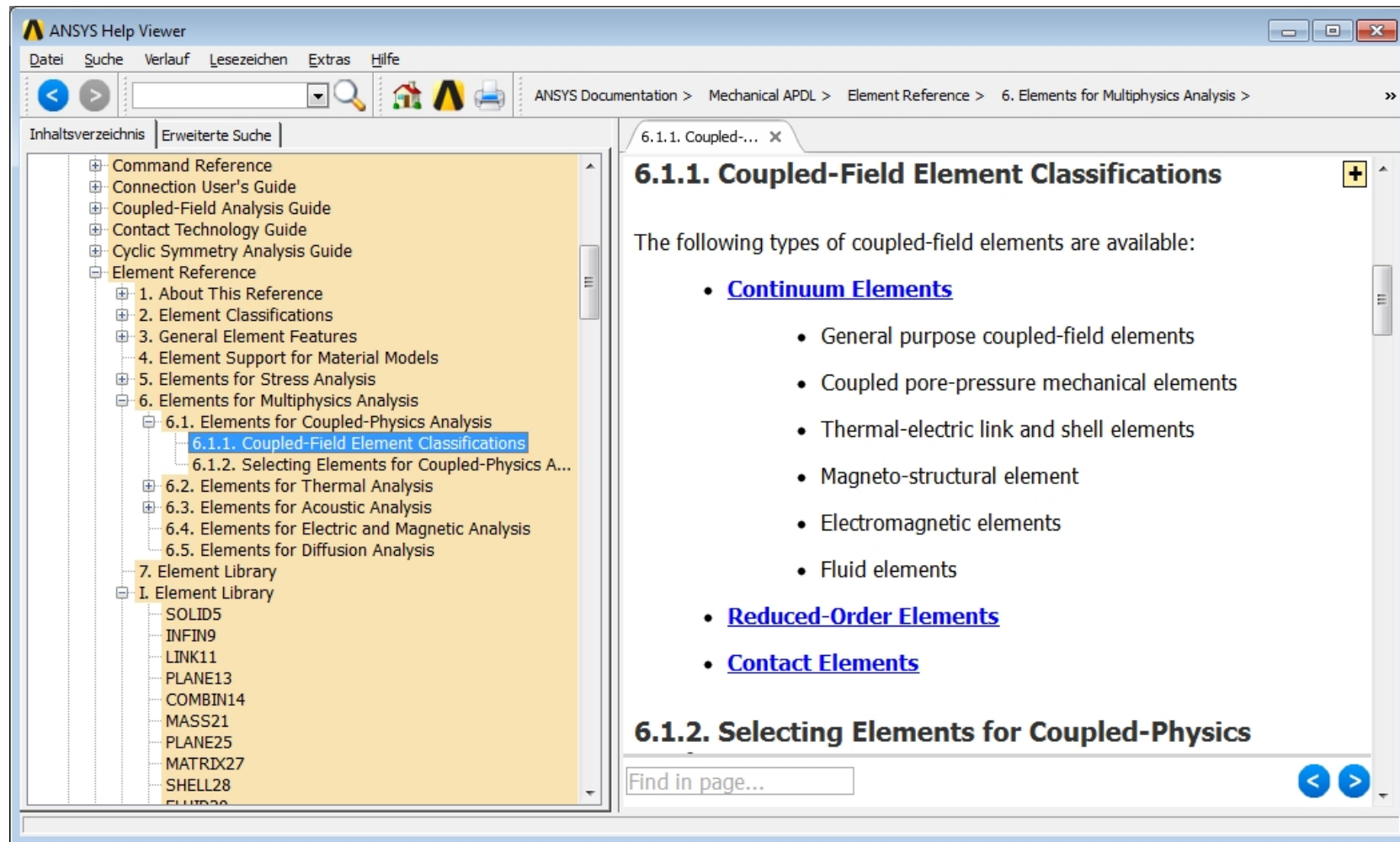
Iterative Lastvektorkopplung in ANSYS Workbench



Kopplung über reduzierte Modelle in der Systemsimulation



Matrix Kopplung



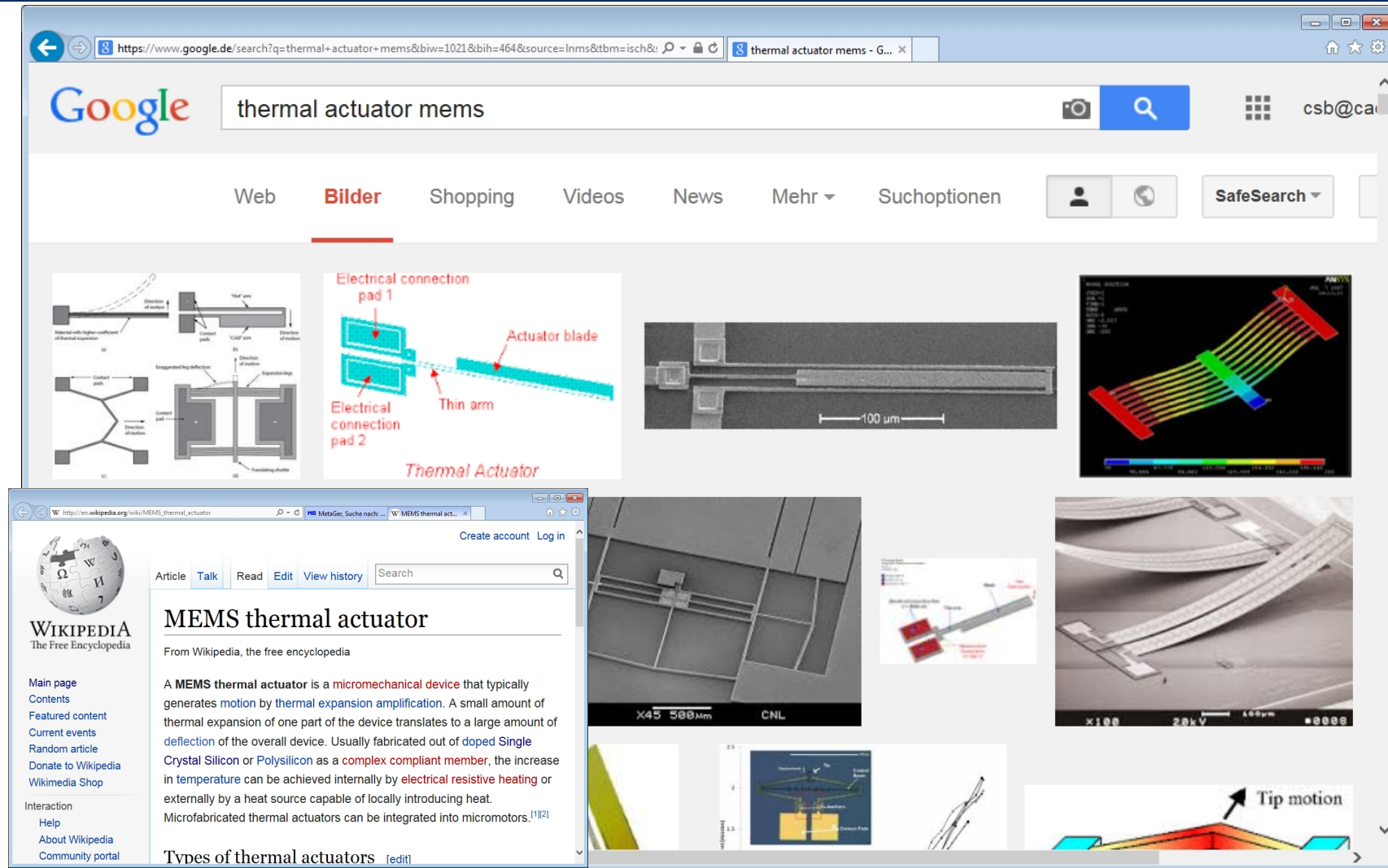


Competence Center FEM

Simulation ist mehr als Software®

Beispiel Aktuator

Anwendungsbeispiele



Datenquelle

ANSYS Help Viewer

Datei Suche Verlauf Lesezeichen Erweitert Hilfe

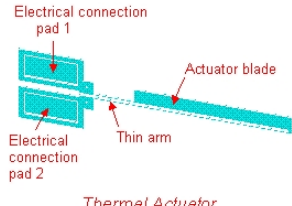
ANSYS Documentation > Mechanical APDL > Introductory Tutorials > 5. Micro-Electromechanical System (MEMS) Tutorial > 5.1. Multiphysics Analysis of a Thermal Actuator

Inhalt:

- PIPE289
- ELBOW290
- USER300
- Bibliography
- Feature Archive
- Fluids Analysis Guide
- Low-Frequency Electromagnetic Analysis Guide
- Material Reference
- Modeling and Meshing Guide
- Multibody Analysis Guide
- Operations Guide
- Parallel Processing Guide
- Performance Guide
- Programmer's Reference
- Rotordynamic Analysis Guide
- Structural Analysis Guide
- Technology Demonstration Guide
- Theory Reference
- Thermal Analysis Guide
- Introductory Tutorials
 - Welcome to the Mechanical APDL Introductory Tutorials
 - 1. Start Here
 - 2. Structural Tutorial
 - 3. Thermal Tutorial
 - 4. Electromagnetics Tutorial
 - 5. Micro-Electromechanical System (MEMS) Tutorial
 - 5.1. Multiphysics Analysis of a Thermal Actuator
 - 5.1.1. Problem Specification
 - 5.1.2. Problem Description
 - 5.1.3. Import Geometry
 - 5.1.4. Define Materials
 - 5.1.5. Generate Mesh
 - 5.1.6. Apply Loads
 - 5.1.7. Obtain Solution
 - 5.1.8. Review Results
 - 6. Explicit Dynamics Tutorial
 - 7. Contact Tutorial
 - 8. Modal Tutorial
 - 9. Probabilistic Design System (PDS) Tutorial
 - 10. ANIMATE Program
 - Context Sensitive Help
- Meshing User's Guide
- Polyflow
- Remote Solve Manager (RSM)
- TurboGrid
- TurboSystem
- Verification Manuals
- Installation and Licensing Documentation

5.1.2. Problem Description

This tutorial demonstrates how to analyze an electrical-thermal actuator used in a micro-electromechanical system (MEMS). The thermal actuator is fabricated from polysilicon and is shown below.



The diagram illustrates a thermal actuator. It consists of two rectangular electrical connection pads, labeled 'Electrical connection pad 1' and 'Electrical connection pad 2'. A thin arm connects these pads, and a larger actuator blade is attached to the end of the thin arm. The entire assembly is labeled 'Thermal Actuator'.

The thermal actuator works on the basis of a differential thermal expansion between the thin arm and blade.

The required analysis is a coupled-field multiphysics analysis that accounts for the interaction (coupling) between thermal, electric, and structural fields.

A potential difference applied across the electrical connection pads induces a current to flow through the arm and blade. The current flow and the resistivity of the polysilicon produce Joule heating (I^2R) in the arm blade. The Joule heating causes the arm and the blade to heat up. Temperatures in the range of 700 -1300 °K are generated. These temperatures produce thermal strain and thermally induced deflections.

The resistance in the thin arm is greater than the resistance in the blade. Therefore, the thin arm heats up more than the blade, which causes the actuator to bend towards the blade. The maximum deformation occurs at the actuator tip. The amount of tip deflection (or force applied if the tip is restrained) is a direct function of the applied potential difference. Therefore, the amount of tip deflection (or applied force) can be accurately calibrated as a function of applied voltage.

These thermal actuators are used to move micro devices, such as ratchets and gear trains. Arrays of thermal actuators can be connected together at their blade tips to multiply the effective force.

The main objective of the analysis is to compute the blade tip deflection for an applied potential difference across the electrical connection pads. Additional objectives are to:

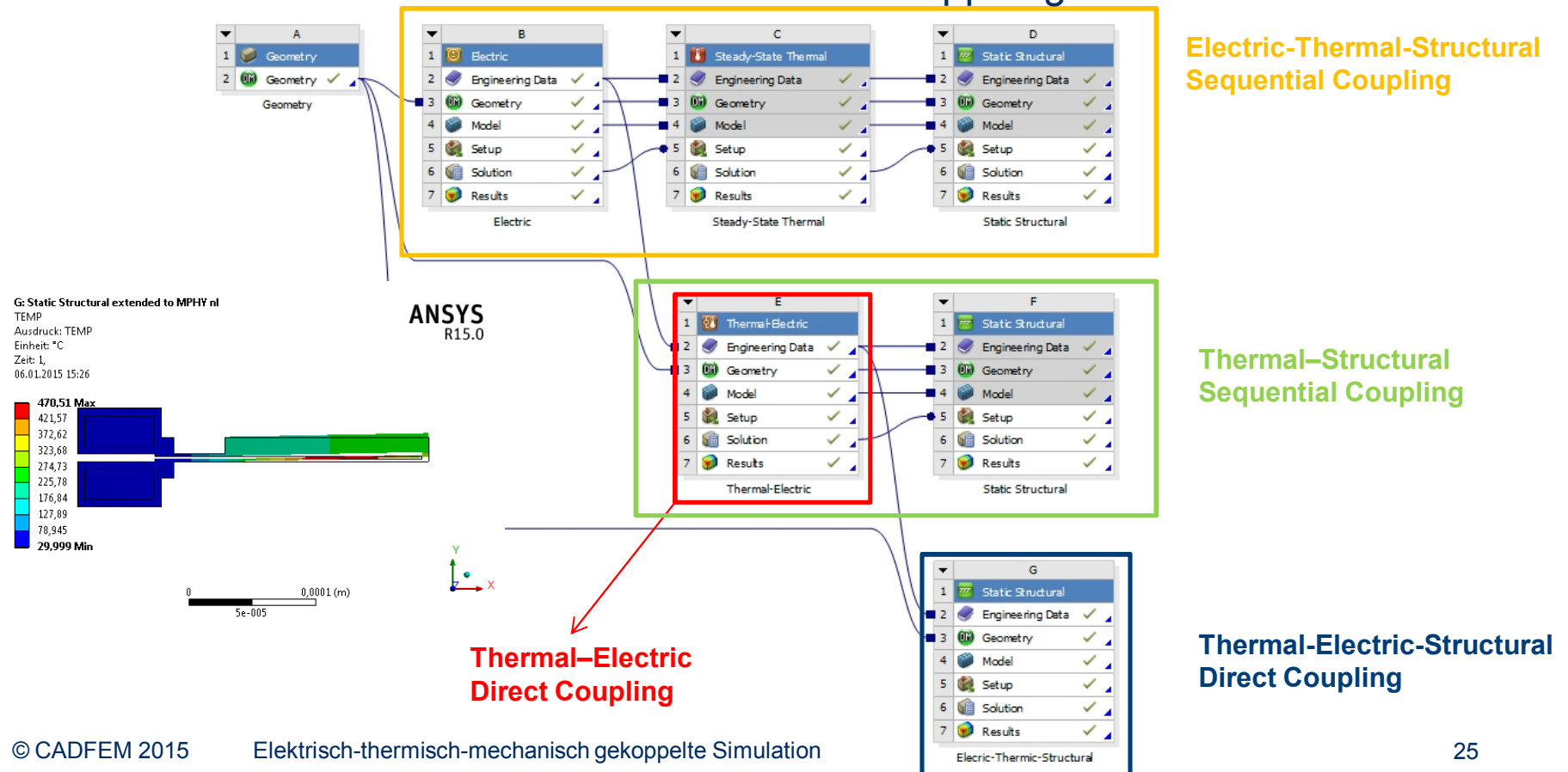
In Seite suchen...

Effekte

- Stromfluss durch miteinander verbundene Bereiche unterschiedlichen Querschnitts
- Elektrische Last durch Spannungsdifferenz (oder Stromstärke)
- Unterschiedliche Widerstände/Leitfähigkeiten aufgrund der unterschiedlichen Querschnitte
- Mit unterschiedlichem Spannungsabfall in den Bereichen
- Stromfluss und Spannungsabfall sind Ursache für eine Wärmequelle (Jule Heating)
- Höhere Wärmegeneration und schlechterer Wärmetransport in dünnen Bereichen sind Ursache für höhere Temperaturen
- Temperaturen sind Ursache für thermische Dehnungen

Varianten der Kopplung in der Ansicht auf der ANSYS Projektebene

- Elektrostatisches Feld
- Elektrische Leitfähigkeit
- Temperaturabhängige Materialdaten
- Vergleich von Lastvektorkopplung zu Matrixkopplung



Varianten in den Materialeigenschaften

- Konstante Materialeigenschaften
- Temperaturabhängige Materialeigenschaften

Temperature (°C)	Thermal Conductivity (W m ⁻¹ K ⁻¹)
	146,4

Temperature (K)	Electrical Resistivity [Ohm-m]
	2,30E-05

Temperature (K)	Coefficient of Thermal Expansion (K ⁻¹)
	2,57E-06

Temperature (°C)	Thermal Conductivity (W m ⁻¹ K ⁻¹)
30	146,4
130	98,3
230	73,2
330	57,5
430	49,2
530	41,8
630	37,6
730	34,5
830	31,4
930	28,2
1030	27,2
1130	26,1
1230	25,1

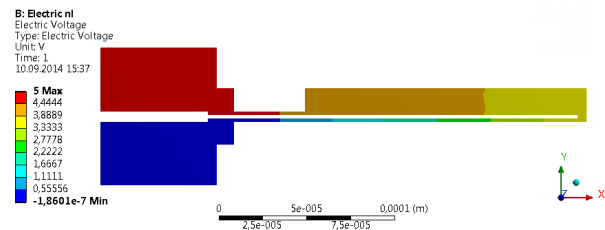
Temperature (K)	Electrical Resistivity [Ohm-m]
25	2,30E-05
225	8,30E-05
425	1,93E-04
625	3,63E-04
827	5,99E-04
1027	9,11E-04

Temperature (K)	Coefficient of Thermal Expansion (K ⁻¹)
30	2,57E-06
130	3,21E-06
230	3,59E-06
330	3,83E-06
430	3,99E-06
530	4,10E-06
630	4,19E-06
730	4,26E-06
830	4,32E-06
930	4,38E-06
1030	4,44E-06
1130	4,50E-06
1230	4,56E-06

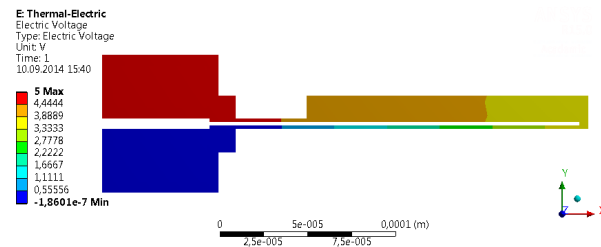
Young's Modulus Pa
1,69E+11

Poisson's Ratio
2,20E-01

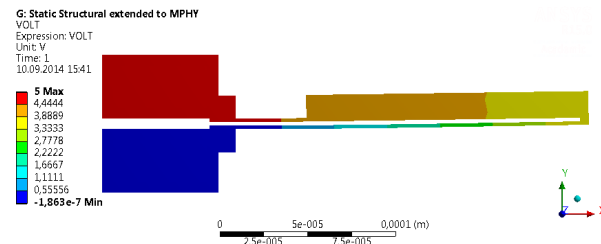
Ergebnisse für elektrische Spannung



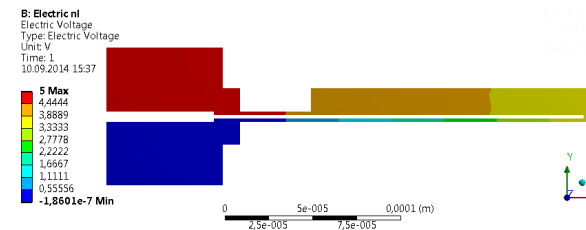
- Linear sequentiell



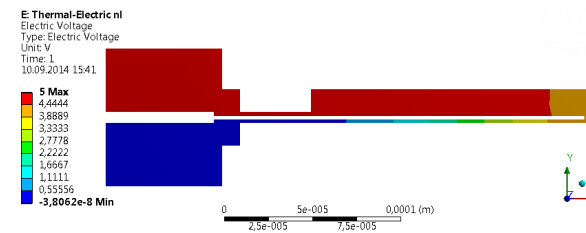
- Linear elektrisch thermisch



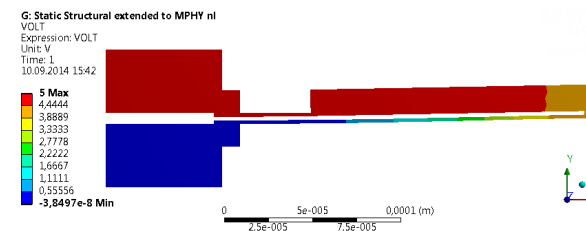
- Linear voll gekoppelt



- NL sequentiell

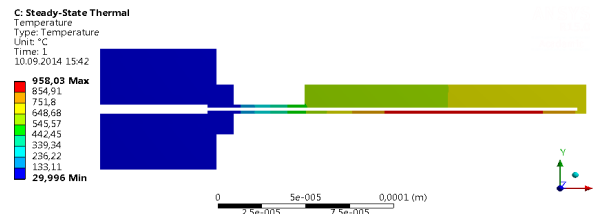


- NL elektrisch thermisch

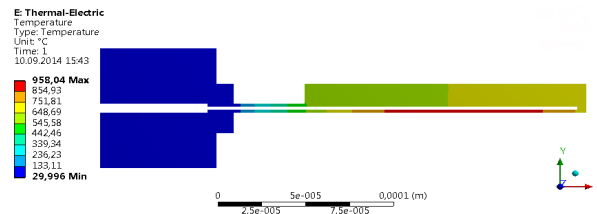


- NL voll gekoppelt

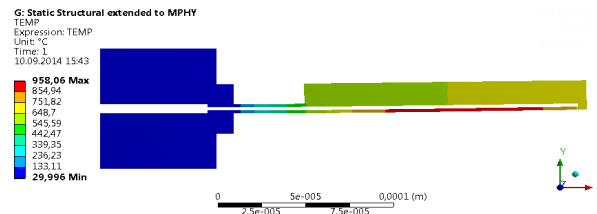
Ergebnisse für Temperatur



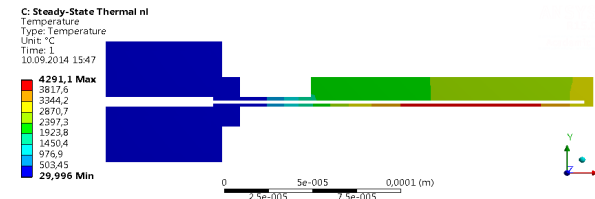
- Linear sequentiell



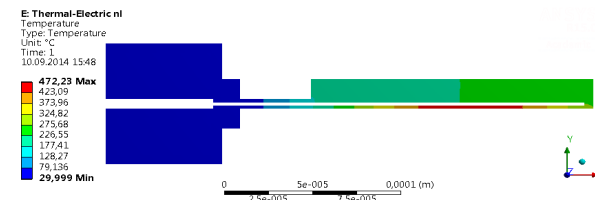
- Linear elektrisch thermisch



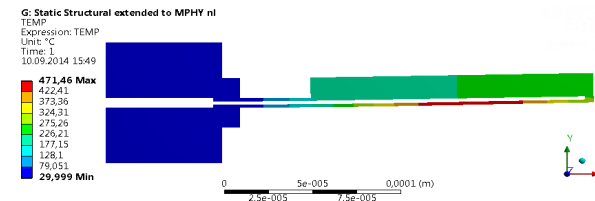
- Linear voll gekoppelt



- NL sequentiell

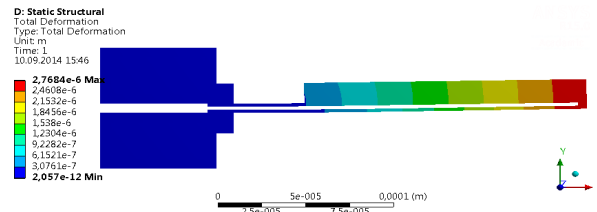


- NL elektrisch thermisch

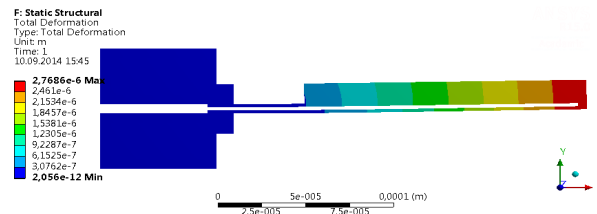


- NL voll gekoppelt

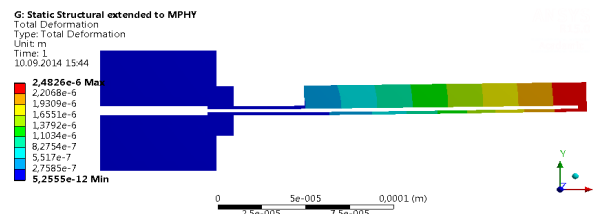
Ergebnisse für Verformung



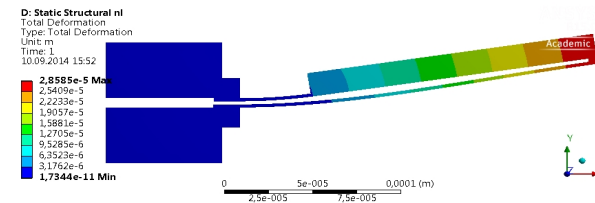
- Linear sequentiell



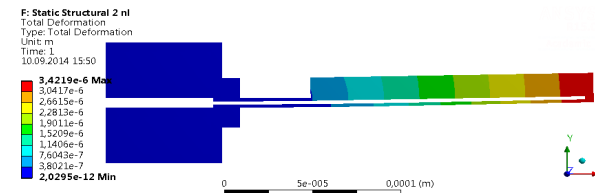
- Linear elektrisch thermisch



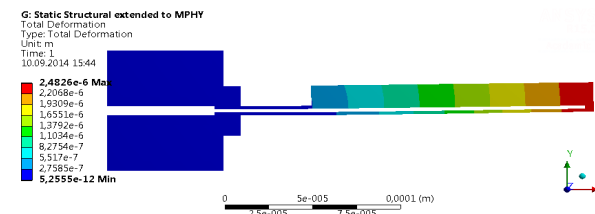
- Linear voll gekoppelt



- NL sequentiell



- NL elektrisch thermisch



- NL voll gekoppelt

Motivation und Erkenntnisgewinn für dieses Beispiel

- Im Rahmen der Ausbildung: Methodenkompetenz erarbeiten
- Effekte aufzeigen
- Erkenntnisgewinn
 - Welche Kopplungen sind hier wichtig?
 - Effekt von Querschnittänderung auf thermische- und elektrische Leitfähigkeit ist hier gering, könnte daher in diesem Beispiel vernachlässigt werden.
 - Mit Temperatur zunehmender elektrischer Widerstand und mit Temperatur abnehmende Wärmeleitfähigkeit haben bezüglich Maximaltemperatur im Bauteil gegenläufige Effekte.
 - In diesem Anwendungsfall wird man nur unter Berücksichtigung elektrisch-thermischer Kopplung quantitativ belastbare Simulationsergebnisse bekommen.



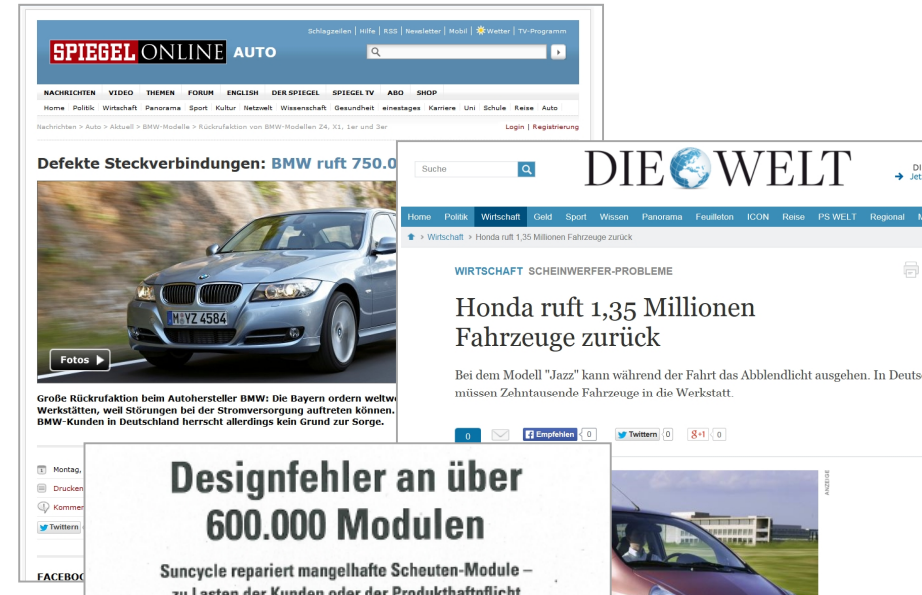
Competence Center FEM

Simulation ist mehr als Software®

Beispiel Steckverbindung

Anwendungsszenario

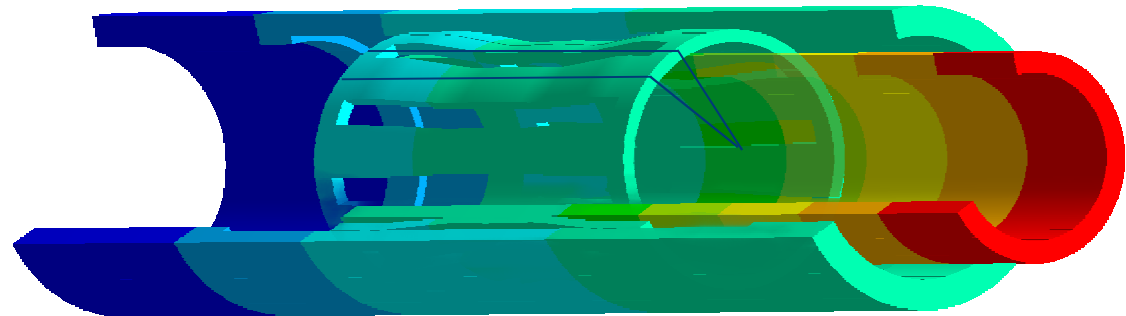
- Produkt
 - Hochstrom-Steckverbinder
- Anforderungen
 - Kostengünstiger Fertigungsprozess
 - Anspruchsvolle elektrisch-thermisch-mechanische Eigenschaften
 - Robustes Design für hohe Zuverlässigkeit
- Simulationsaufgabe
 - Designfindung unter Berücksichtigung von Temperatur, Spannungsabfall und Steckkraft



Quellen:
 Spiegel Online Auto, Montag, 18.2.2013, cst/Reuters
 WeltOnline, Wirtschaft, 16.12.2010, AFP/dma
 Photon, Januar 2013, Ines Rutschmann,
 Foto: Wikipedia nachbearbeitet von CADFEM

Anforderungen + Simulationsmodell

- Elektrisch
 - Stromfluss von 5 A
 - Minimaler Spannungsabfall
- Steckkraft
 - Minimale Steckkraft
- Thermisch
 - Temperatur von max 115 °C
- 10 Federzungen
 - Symmetrische Last
 - Symmetrische Geometrie innerhalb einer Zunge
 - Analyse mit ½ Federzunge = 1/20 des Gesamtmodells



Gründe für die Kopplung von Domänen beim Steckverbinder

Mechanisch

Zustandsgrößen

- Kraft
- Deformation

Geometrie

Material

- Elastisch
- Plastisch
- Thermische Dehnung

Kontakt

- Reibung
- Steifigkeit

Elektrisch

Zustandsgrößen

- Strom
- Spannung

Geometrie

Material

- Elektrische Leitfähigkeit

Verluste

- Material
- Kontakt

Kontakt

- Elektrische Leitfähigkeit

Thermisch

Zustandsgrößen

- Energie
- Temperatur

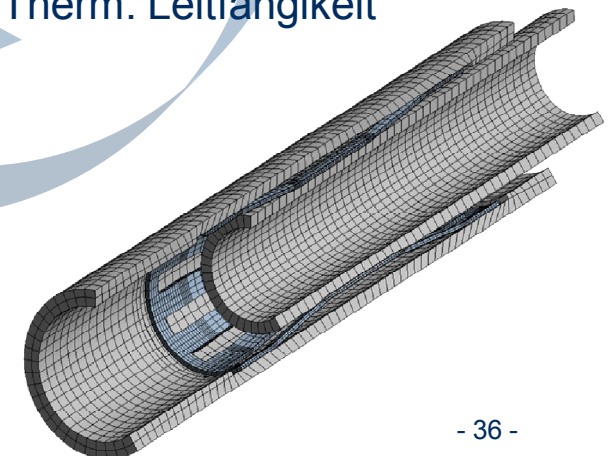
Geometrie

Material

- Thermische Leitfähigkeit

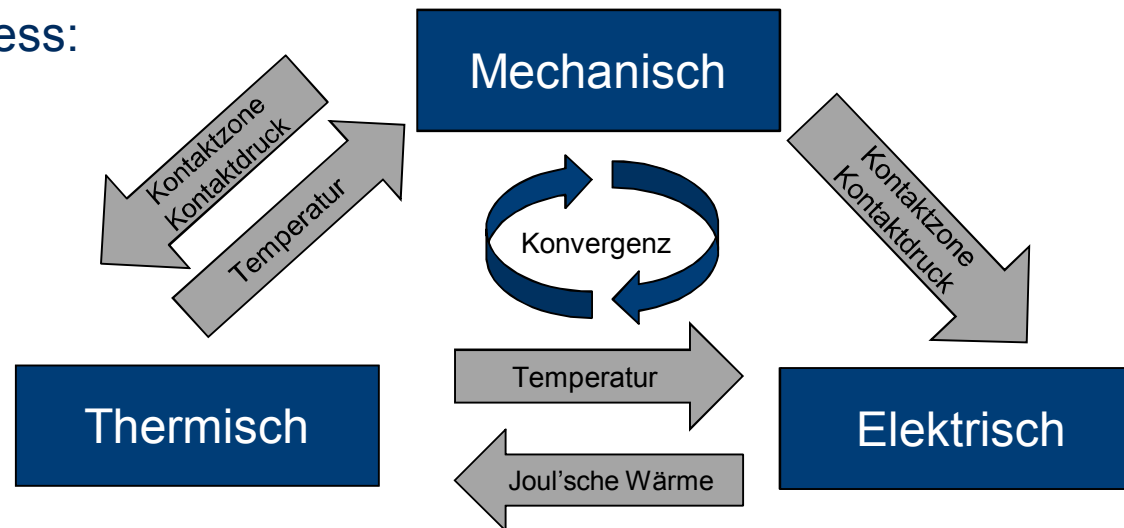
Kontakt

- Therm. Leitfähigkeit



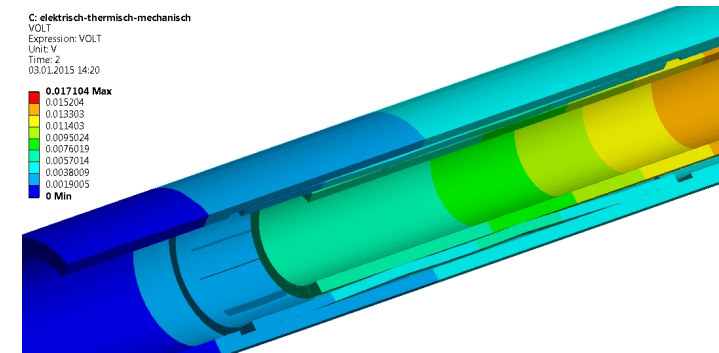
Vorgehen zur Multiphysics-Simulation

- 3D Volumenmodell mit coupled field elements
 - Ein gemeinsames Netz für alle Domänen
 - Jedes Element mit den erforderlichen Freiheitsgraden
- 3D Kontakte für gekoppelte Felder
 - Mechanische Steifigkeit inkl. Reibung
 - Thermische Leitfähigkeit als Funktion des Kontaktdrucks
 - Elektrische Leitfähigkeit als Funktion des Kontaktdrucks
- Analyseprozess:

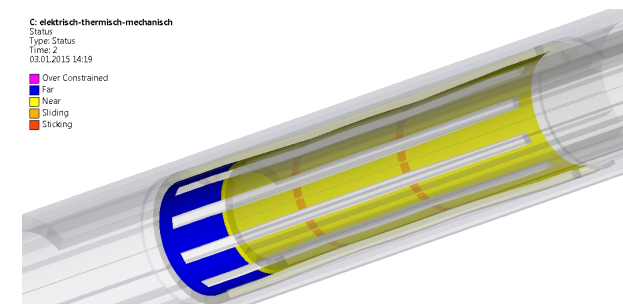


Ergebnisse: Vergleich von Berechnungsmethoden

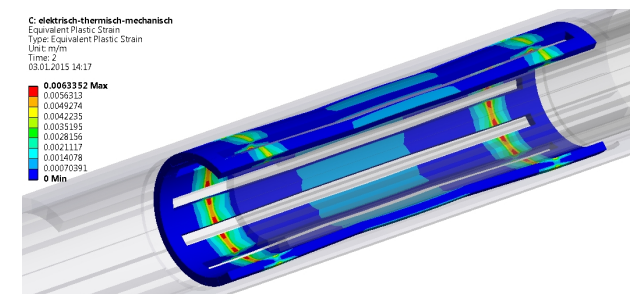
- Variante 1:
Elektrisch-thermische Analyse
 - Erwärmung von 22 auf 83°C
→ $\Delta T = 61^\circ\text{C}$
- Variante 2:
Elektrisch-thermisch-mechanische Analyse
 - Erwärmung von 22 auf 110°C
→ $\Delta T = 88^\circ\text{C}$
- Berücksichtigung der realen Kontakt- und Materialsituation führt zu einer um 44% stärkeren Erwärmung



Elektrisches Potential



Kontaktstatus



Plastische Dehnung

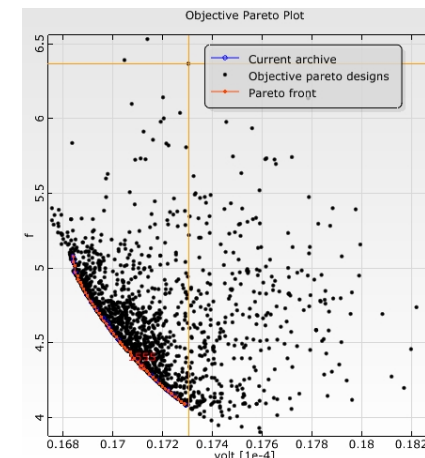
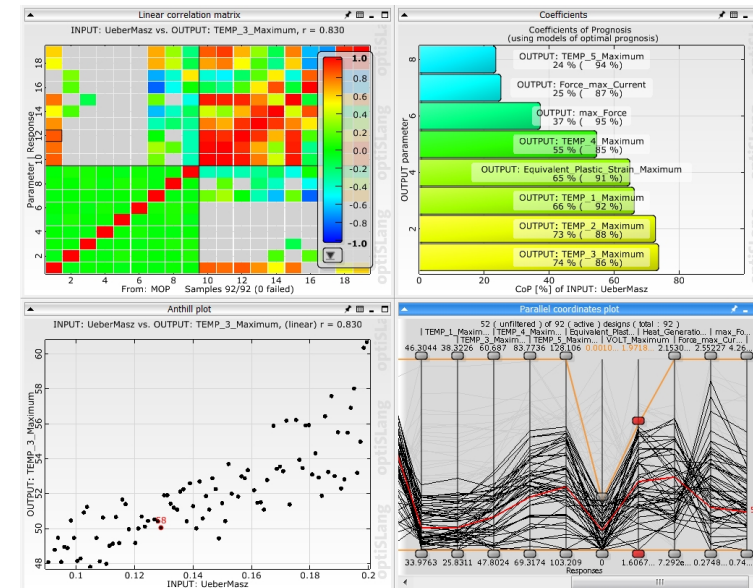
Ergebnisse: Designstudie

- Abmindern der Federdicke führt zu einer Temperaturerhöhung von 4 °C
- Reduzieren des Übermaßes führt zu einer weiteren Temperaturerhöhung um 3 °C

Table of Design Points										
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	
1	Name ▾	P42 - Halbw... ▾	P41 - Dicke ▾	P40 - UeberMasz ▾	P43 - Laenge ▾	P63 - Laenge ▾	P62 - Halbwinkel ▾	P61 - Dicke ▾	P60 - UeberMasz ▾	P44 - BFE
2	Units									
3	Current	12	0.4	0.2	10	10	12	0.4	0.2	110.33
4	DP 1	12	0.35	0.2	10	10	12	0.4	0.2	114.46
5	DP 2	12	0.35	0.1	10	10	12	0.4	0.2	117.6
*										

Ergebnisse: Sensitivitätsstudie + Optimierung

- Wichtige Größen & Trends erkennen
- Absicherung der Aussagen
- Idee für Optimierung 1:
 - Ziel: Minimaler Spannungsabfall
 - Restriktion: Max. Temp von 115 °C
- Idee für Optimierung 2
 - Ziele:
 - Minimaler Spannungsabfall
 - minimale „max Kraft“
 - Restriktion: Max. Temp von 115 °C



Ergebnisse: Robustheitsanalyse

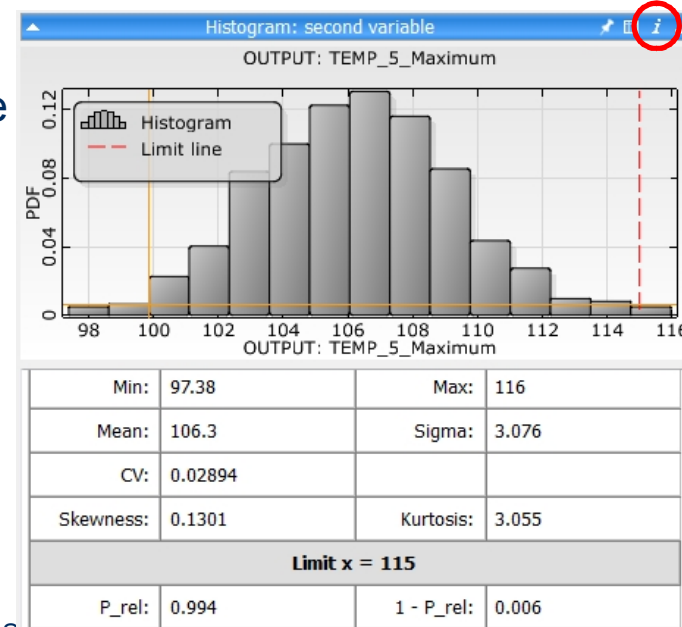
- Streuende Einflussgrößen

- Geometrie
- Material
- Lasten
- ...

	Name	Reference value	Unit	Range	Range plot	PDF	Type	Mean	Std. Dev.	CoV	
1	UeberMasz	... 0.11525		0.098 0.135			NORMAL	0.11525	0.0057625	5 %	0
2	Resistivity_Scale	... 1		0.9 1.1			NORMAL	1	0.1	10 %	1
3	Yield_Strength_Scale	... 1		0.9 1.1			NORMAL	1	0.1	10 %	1
4	Thermal_Conductivity	... 401		360.9 441.1			NORMAL	401	0.000401	0.0001 %	4
5	Copper_Young_s_Modulus	... 1.1e+11		9.9e+10 1.21e+11			NORMAL	1.1e+11	1.1e+10	10 %	1
6	Alu_Young_s_Modulus	... 7.1e+10		6.39e+10 7.81e+10			NORMAL	7.1e+10	7.1e+09	10 %	7
7	Dicke	... 0.29315		0.278 0.308			NORMAL	0.29315	0.023452	8 %	0
8	Halbwinkel	... 11.327		10.76 11.923			NORMAL	11.327	0.56635	5 %	1
9	Laenge	... 10		9.8 10.2			NORMAL	10	1	10 %	1

- Auswertung der Statistik

- MOP zeigt: Dicke der Feder und spezifischer Widerstand dominieren die Temperatur
- Korrelationsmatrixfeld 3,16 zeigt Histogramm Dicke-Temperatur5
- Grenzwert im Histogramm zeigt: 0.6% der Designs liegen oberhalb des Grenzwertes von 115 °C



Motivation und Erkenntnisgewinn für dieses Beispiel

- Effekt von Rückkopplung von Mechanik auf Temperatur und Elektrik ist zu sehen
- Erkenntnisgewinn
 - Mehrere Optimierungskriterien sind möglich und können zu unterschiedlichen Designs führen.
 - Das Design kann auf seine Robustheit gegenüber Fertigungstoleranzen oder Werkstoffeigenschaften bewertet werden.
 - Welche Kopplungen sind hier wichtig?
 - Nichtlinearität in diesem Beispiel – Kontaktdruckabhängige Leitfähigkeiten – haben eine Wechselwirkung mit der Strukturmechanik.
 - Bei einem Einfluss von gegenläufigen Effekten wie größere Kontaktfläche mit kleinem Kontaktdruck vs. kleinere Kontaktfläche mit höherem Kontaktdruck kann durch die Simulation ermittelt werden, welcher Einfluss unter welchen Bedingungen dominiert.



Competence Center FEM

Simulation ist mehr als Software®

Simulation macht vieles möglich.

Wegweisende Innovationen entwickeln.

Maßstäbe in der Produktqualität setzen.

Kosten und Entwicklungszeiten reduzieren.

Deutschland

CADFEM GmbH
Zentrale Grafting
Marktplatz 2
85567 Grafting b. München
T +49 (0) 8092 7005-0
info@cadfem.de

Geschäftsstelle Berlin
Breite Straße 2a
13187 Berlin
T +49 (0) 30 4759666-0

Geschäftsstelle Chemnitz
Cervantesstraße 89
09127 Chemnitz
T +49 (0) 371 334262-0

Geschäftsstelle Dortmund
Hafenpromenade 1
44263 Dortmund
T +49 (0) 231 99325550

Geschäftsstelle Frankfurt
Im Kohlruß 5-7
65835 Liederbach am Taunus
T +49 (0) 6196 76708-0

Geschäftsstelle Hannover
Pelikanstraße 13
30177 Hannover
T +49 (0) 511 390603-0

Geschäftsstelle Stuttgart
Leinfelder Straße 60
70771 Leinfelden-Echterdingen
T +49 (0) 711 990745-0

Österreich

CADFEM (Austria) GmbH
Zentrale Wien
Wagenseilgasse 14
1120 Wien
T +43 (0) 1 5877073
info@cadfem.at

Geschäftsstelle Innsbruck
Grabenweg 68 (SOHO 2.0)
6020 Innsbruck
T +43 (0) 512 319056

Schweiz

CADFEM (Suisse) AG
Zentrale Aadorf
Wittenwilerstrasse 25
8355 Aadorf
T +41 (0) 52 36801-01
info@cadfem.ch

Geschäftsstelle Gerlafingen
Privatstrasse 8
4563 Gerlafingen
T +41 (0) 32 67580-70

Bureau Lausanne
Avenue de la Poste 3
1020 Renens
T +41 (0) 21 61480-40