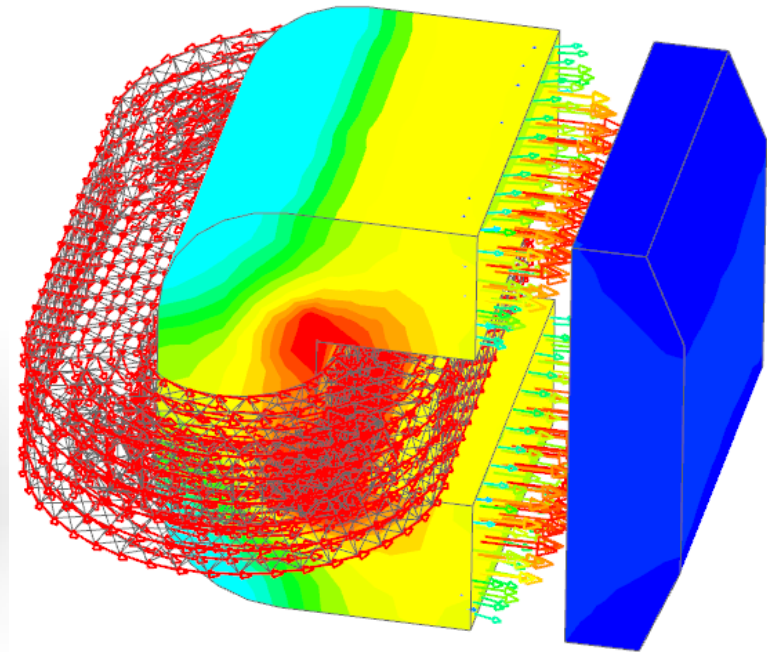
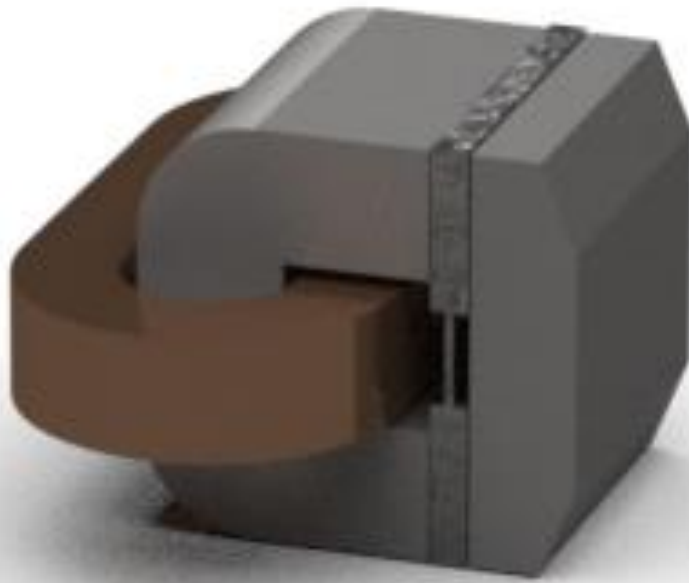


# CAD-integrierte 3D elektromagnetische Feld-Simulation zur Optimierung von Nockenwellenverstellern

Dr.-Ing. Peter Binde (Dr. Binde Ingenieure GmbH)  
Dr.-Ing. Markus Reiff (Daimler AG)

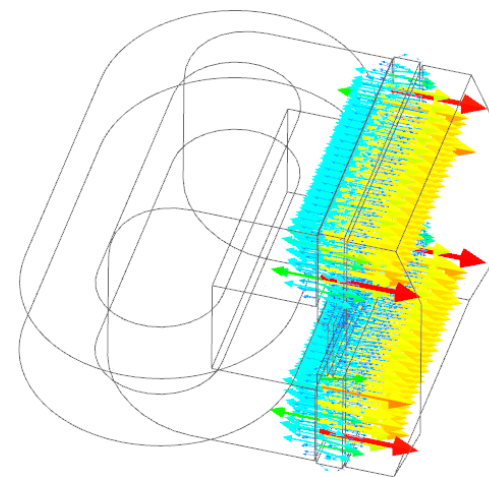
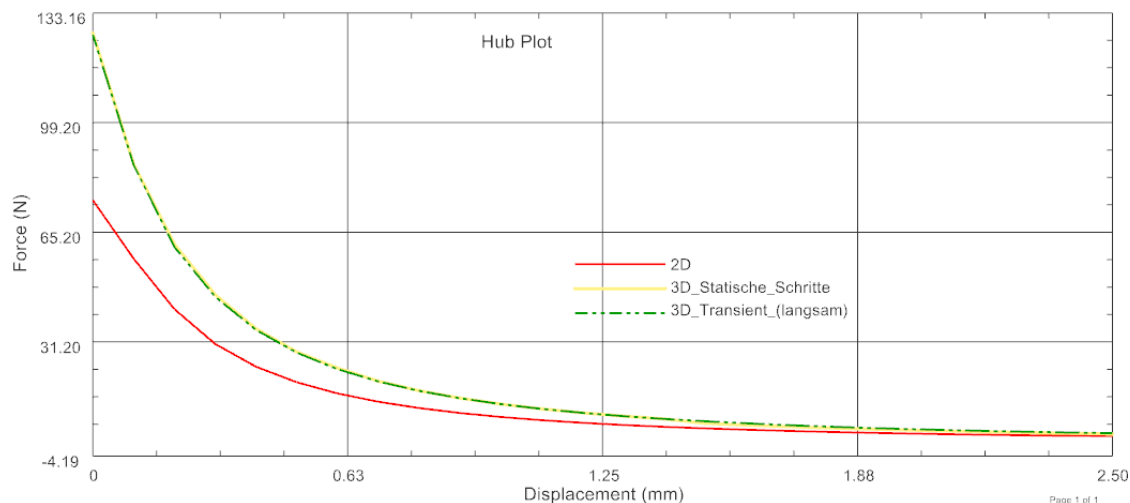


# Kurzfassung

Am Beispiel einer automotive typischen Anwendung wird gezeigt, wie CAD-integrierte 3D elektromagnetische Feld-Simulation genutzt werden kann und dass diese zu hoher Effizienz führt.

Konkret erfolgt dies auf Basis eines realen Anwendungsfalls aus der Forschungsvorentwicklung der Daimler AG. Mit Hilfe des NX CAD-Systems wird der Solver NX Magnetics betrieben. Es wird ein Beispiel eines Aktuators zur Nockenwellensteuerung gezeigt, welcher dynamisch durch Elektromagnete und Luftspulen gesteuert wird.

Ergebnisse sind, neben den elektromagnetischen Feldern, mechanische Größen, wie Kraft, Beschleunigung, Geschwindigkeit und Weg. Schnelle Veränderungen der CAD-Geometrie und Aktualisierungen der Ergebnisse erlauben effiziente Entwicklungsfortschritte.



# Nockenwellenverstellung

## Herausforderung:

Um Potenziale außerhalb der bisherigen Kennfeldbereiche zu nutzen, bedarf es einer Umsetzung größerer Verstellbereiche, hoher Verstellgeschwindigkeiten und hoher Genauigkeiten unter allen Rahmenbedingungen.

## Lösungsvorschlag:

Entwicklung einer elektromechanischen Nockenwellenverstellung. Eine Analyse bestehender Verstellsysteme zeigt das Spannungsfeld auf:

	hydraulisch	Elektro- motorisch	Elektro- mechanisch
Stellbereich	-	+	+
Stellgeschwindigkeit	0	++	+
Regelgüte	0	0	0
Stellbereitschaft bei Kaltstart	-	+	+
Fail-Safe	0	--	0
Zusatzaufwand Ansteuerung	0	--	-
Bauraum / Masse	0	-	0
Kosten	+	--	-

Tabelle 1: Vergleich unterschiedlicher Nockenwellensteller [E.Rau, Zukunftspotenziale durch Variabilitäten am Ottomotor, 35. Wiener Motorensymposium, 2014]

# Nockenwellenverstellung

Im Rahmen des 35. Wiener Motorsymposiums wurde hier ein elektromechanisches System vorgestellt, das versuchstechnisch umgesetzt wurde.

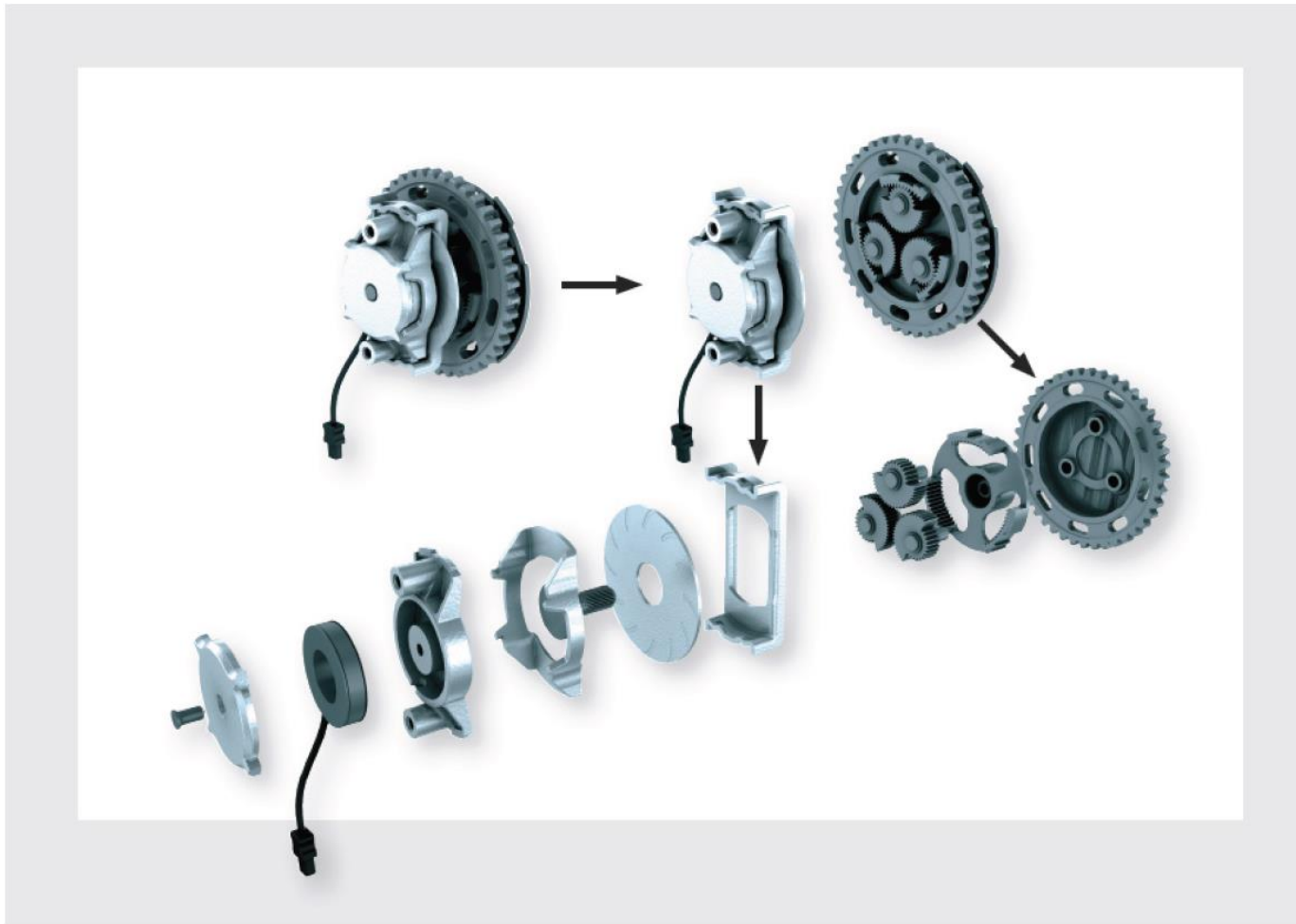
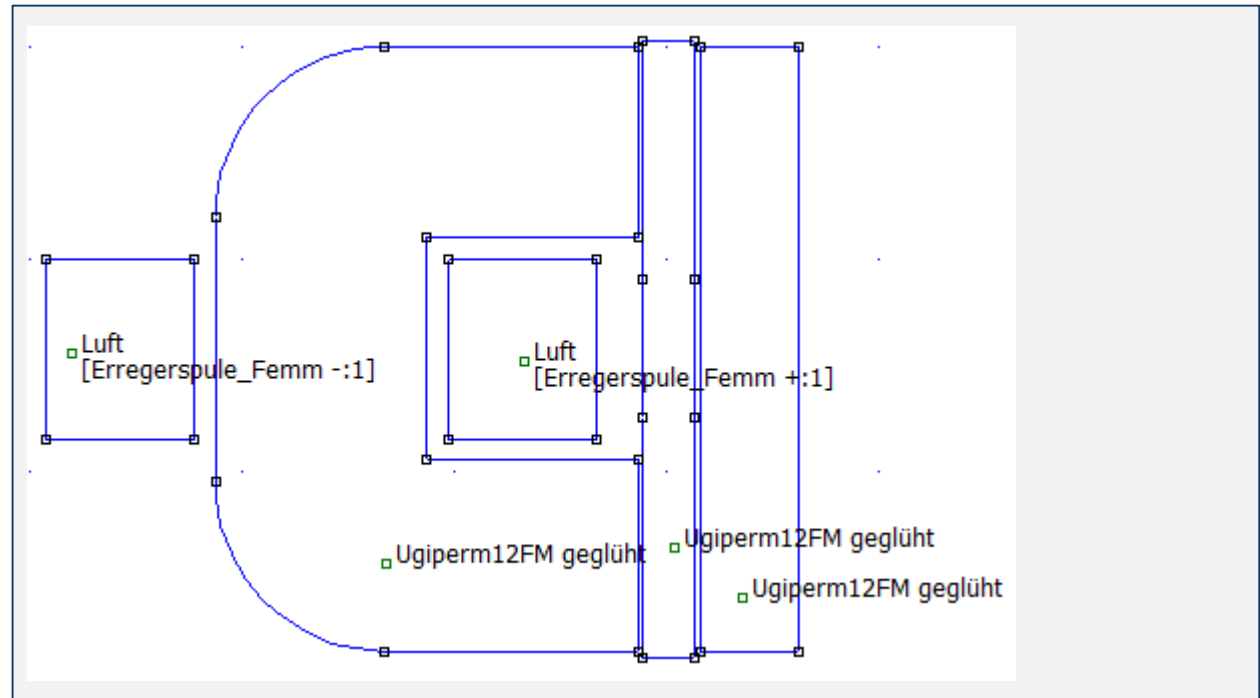
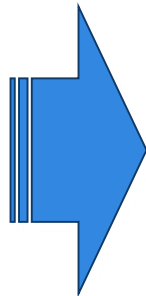


Abbildung 1: Aufbau eines elektromechanischen Stellens [E.Rau, Zukunftspotenziale durch Variabilitäten am Ottomotor, 35. Wiener Motorsymposium, 2014]

# Nockenwellenverstellung

Zur Entwicklung der Aktuatorik wurden in der Vergangenheit zunächst 2D-Berechnungen durchgeführt.

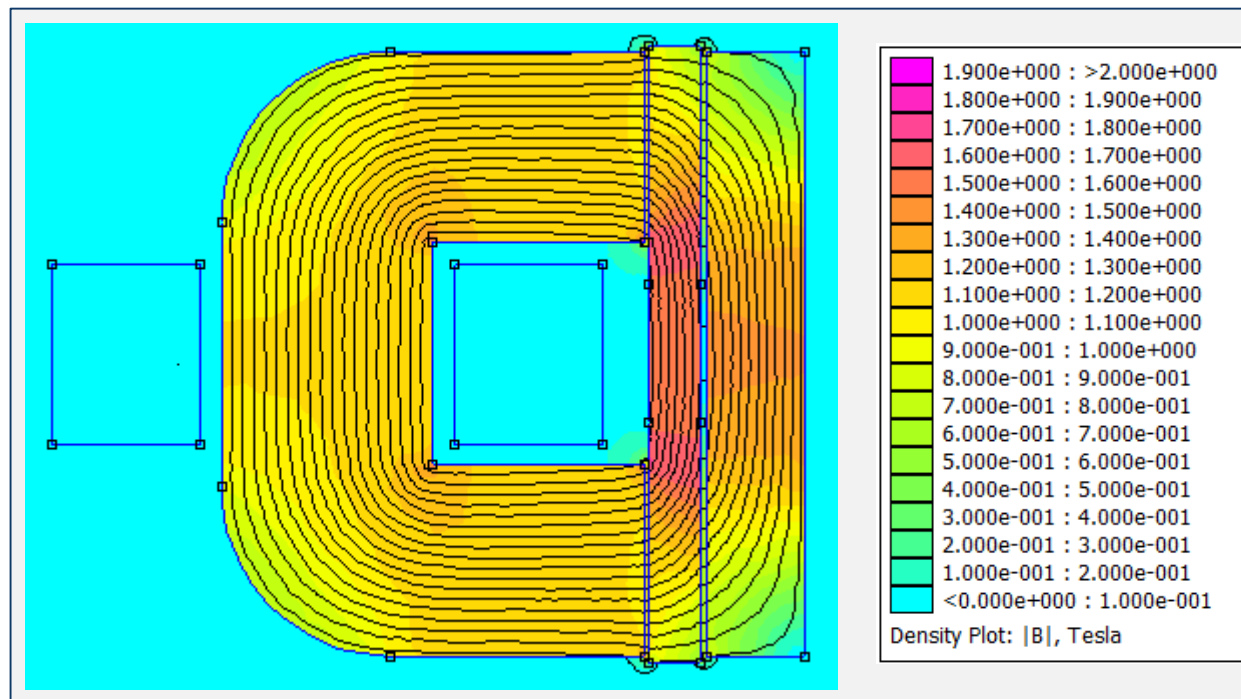


Herausforderungen:

Hohe Magnetkraft über gesamten Luftspalt innerhalb der restriktiven Bauraumgrenzen.  
Maximale Dynamik des Systems.

# Nockenwellenverstellung

Die Geometrie wurde anschließend statisch für diskrete Stützstellen angepasst und optimiert. Dabei wurden zunächst dynamische Effekte, basierend auf Magnetisierungen und Trägheiten vernachlässigt.

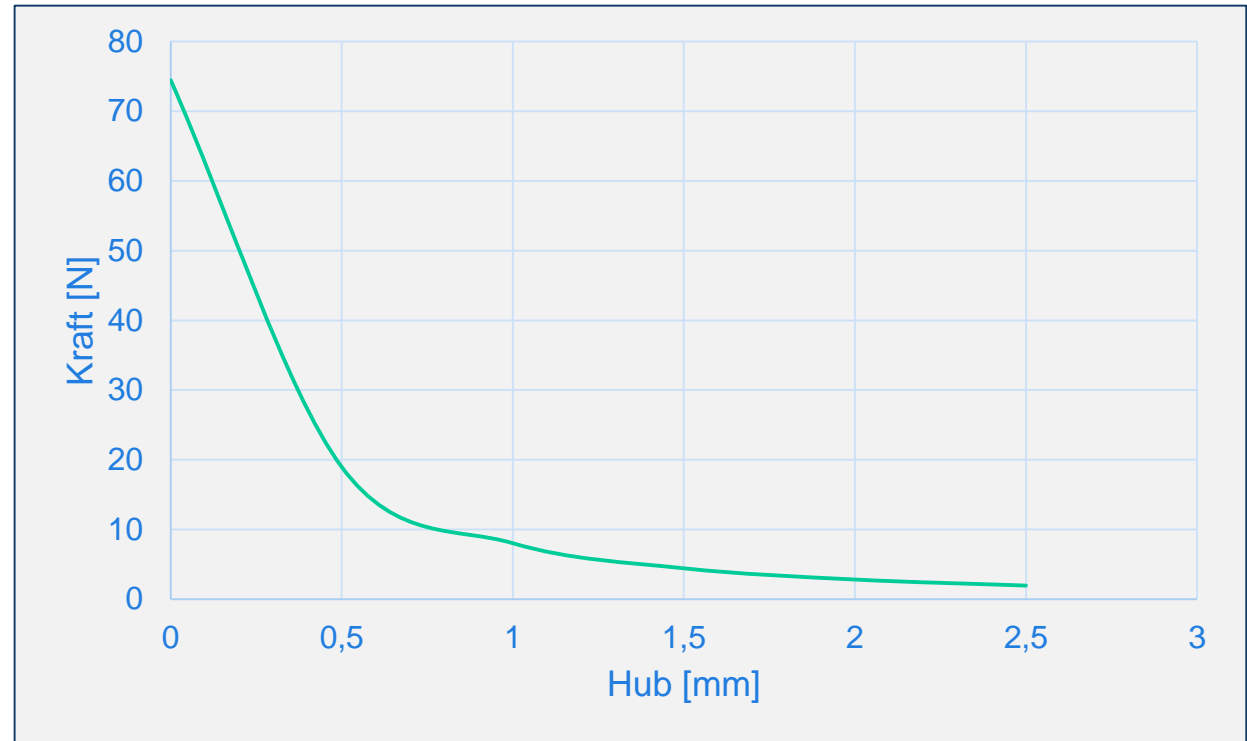
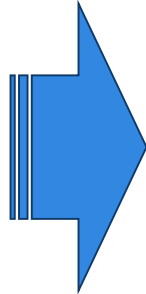


Flussdichte:

Ein weiteres Ziel ist es das Verhältnis aus Materialeinsatz und Magnetkraft optimal auszugestalten. Hier gilt es die magnetische Feldstärke nahe der Sättigungsgrenze zu führen.

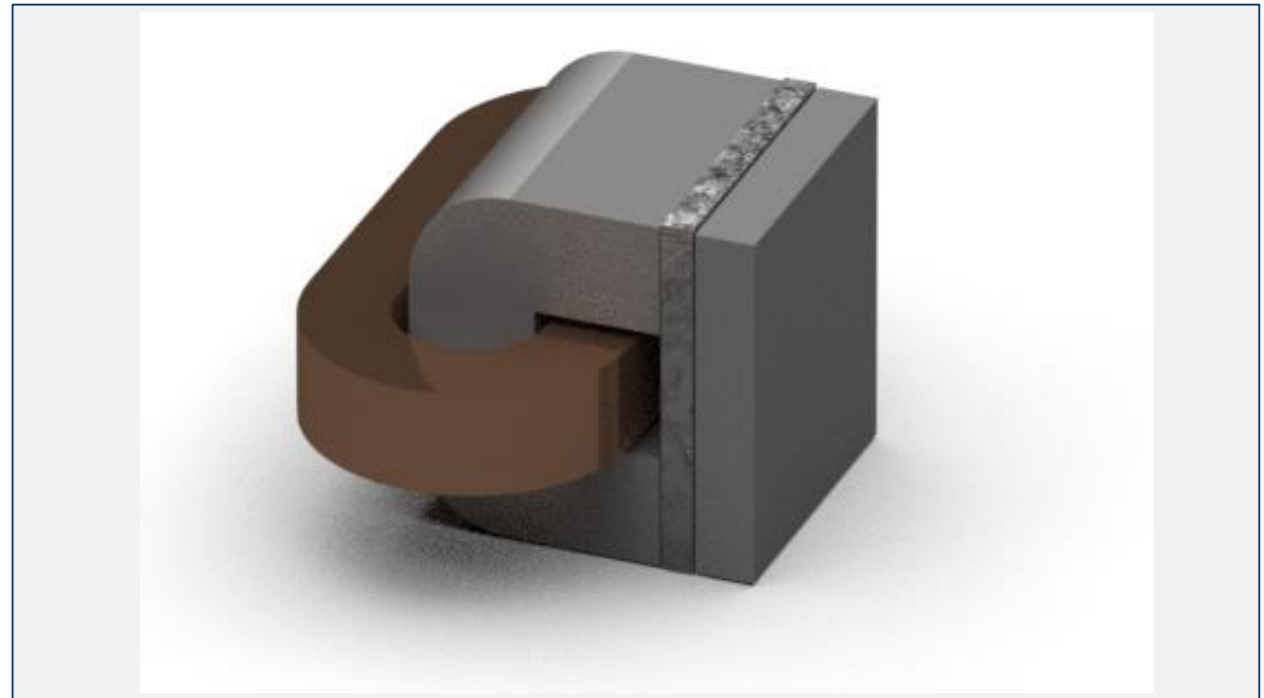
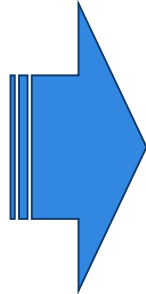
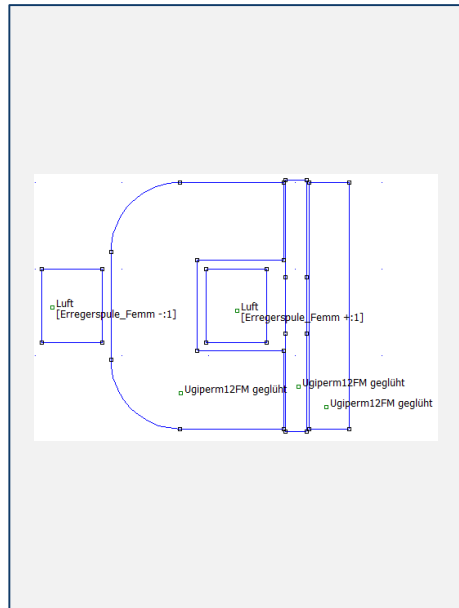
# Nockenwellenverstellung

Eine Kraft-/Hub-Kennlinie gibt ein Indiz darüber, wieviel Magnetkraft in welchem Arbeitspunkt zur Verfügung steht.



# Nockenwellenverstellung

Durch den Einsatz von NX-Magnetics kann die Geometrie in einem 3-dimensionalen Ersatzmodell erfasst und optimiert werden.





# NX Magnetics / Simcenter Magnetics

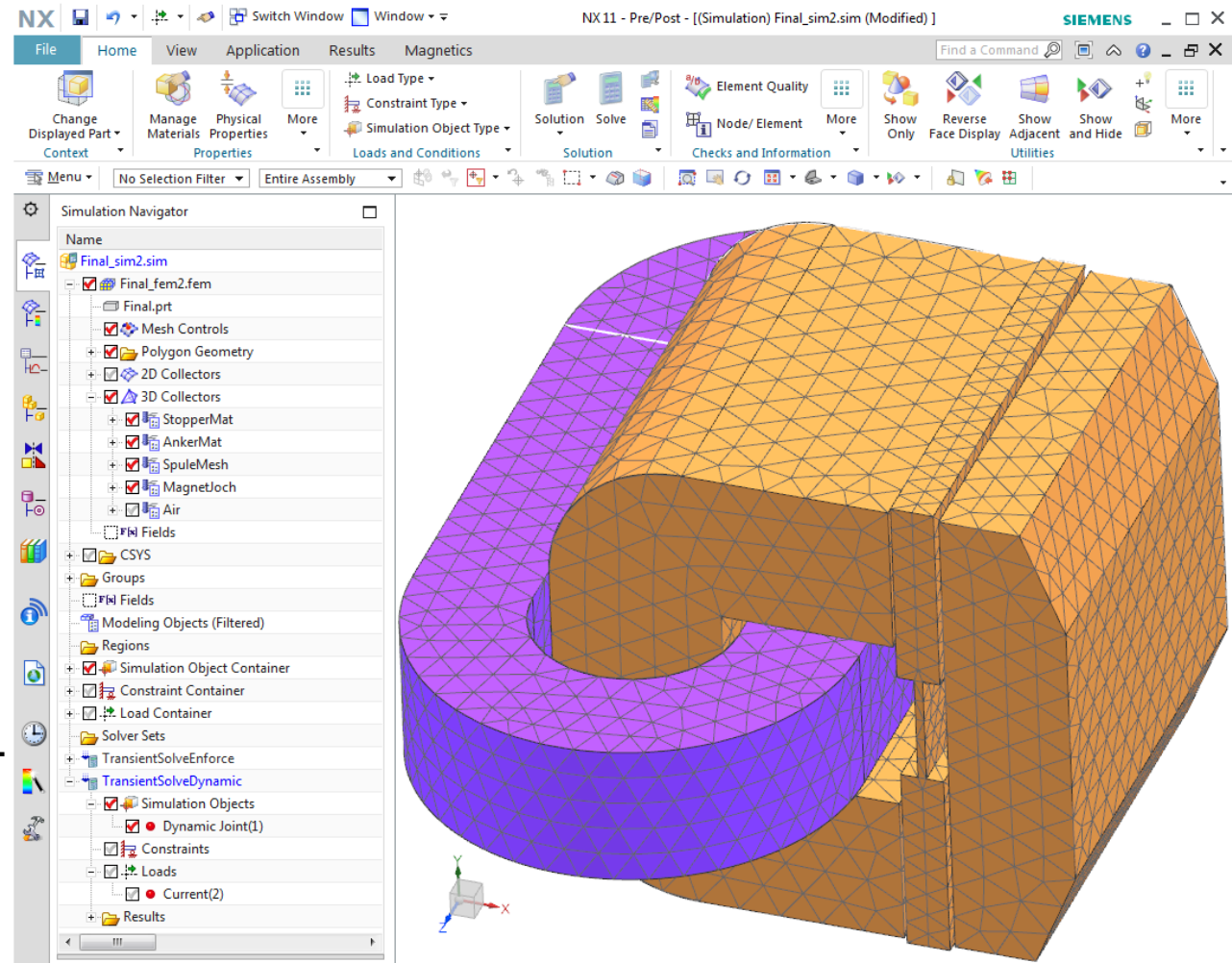
Der NX-Magnetics Solver berechnet zeitabhängige 3-dimensionale elektromagnetische Felder mit Wirbelströmen. Die Ankerbewegung kann aufgezwungen oder dynamisch erfolgen.

Die Vernetzung und das Postprocessing erfolgen im NX bzw. neu im Simcenter System von Siemens PLM.

In den nachfolgenden Simulationen werden 2D/3D Ergebnisse gegenübergestellt.

Außerdem wird bei aufgezwungener und dynamischer Bewegung gerechnet.

3D dynamisch hat die beste Realitätsnähe.

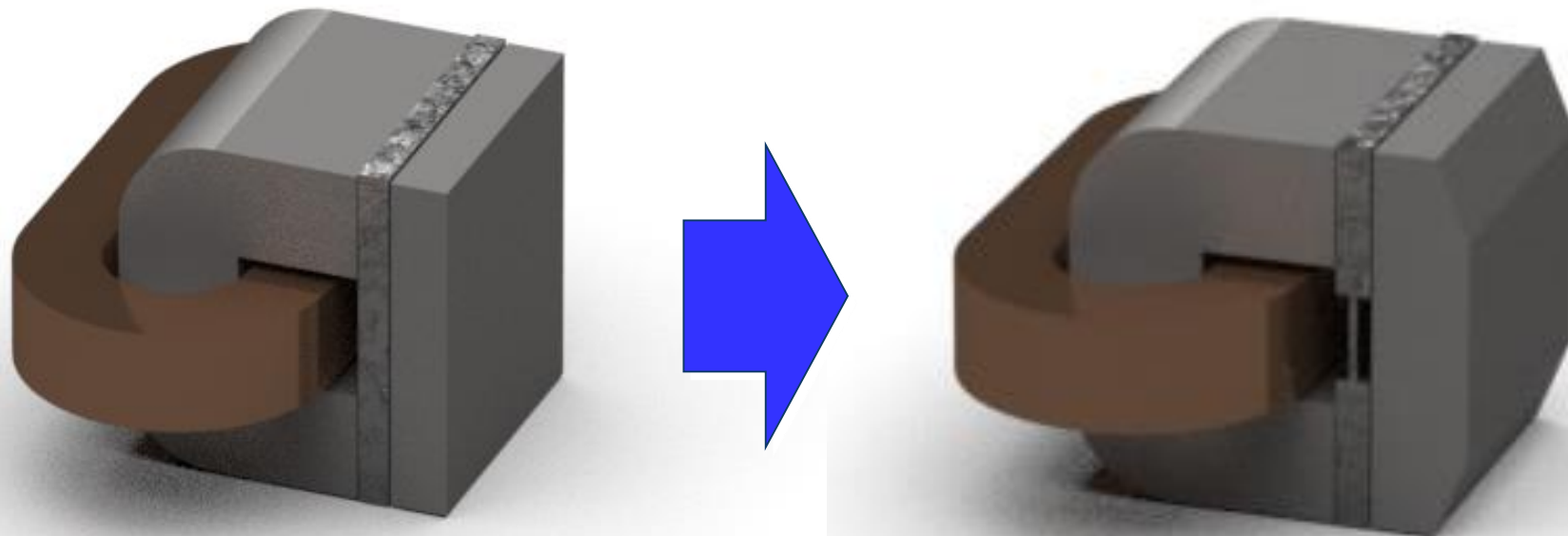


# Nockenwellenverstellung

Übergang Ausgangslage zu finalem Baustand

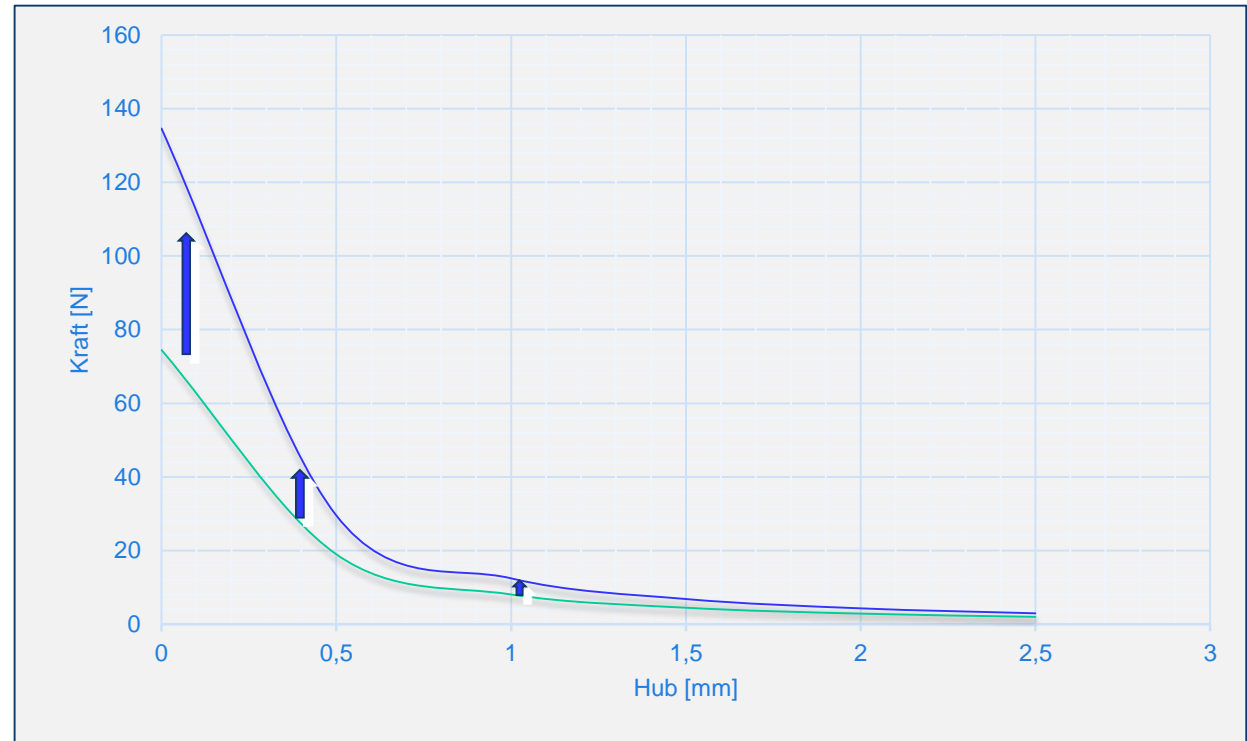
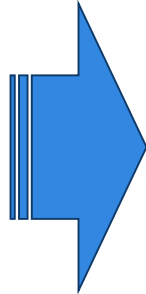
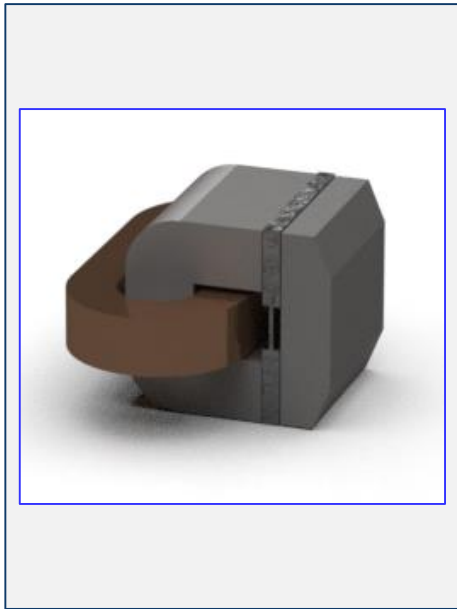
In mehreren Schritten mit Simulation und Geometrieänderung kann die Kraft-/Hub-Kennlinie unter realistischen Bedingungen optimiert werden.

Diese Arbeit wird von Konstrukteuren durchgeführt und als Computer werden normale CAD-Rechner genutzt. Die Rechenzeiten liegen meist unter 1 h.



# Nockenwellenverstellung

Durch NX-Magnetics: Erhöhung des Kraftniveaus und der Dynamik bei gleichzeitiger Reduktion der Gesamtmasse!



Fazit:

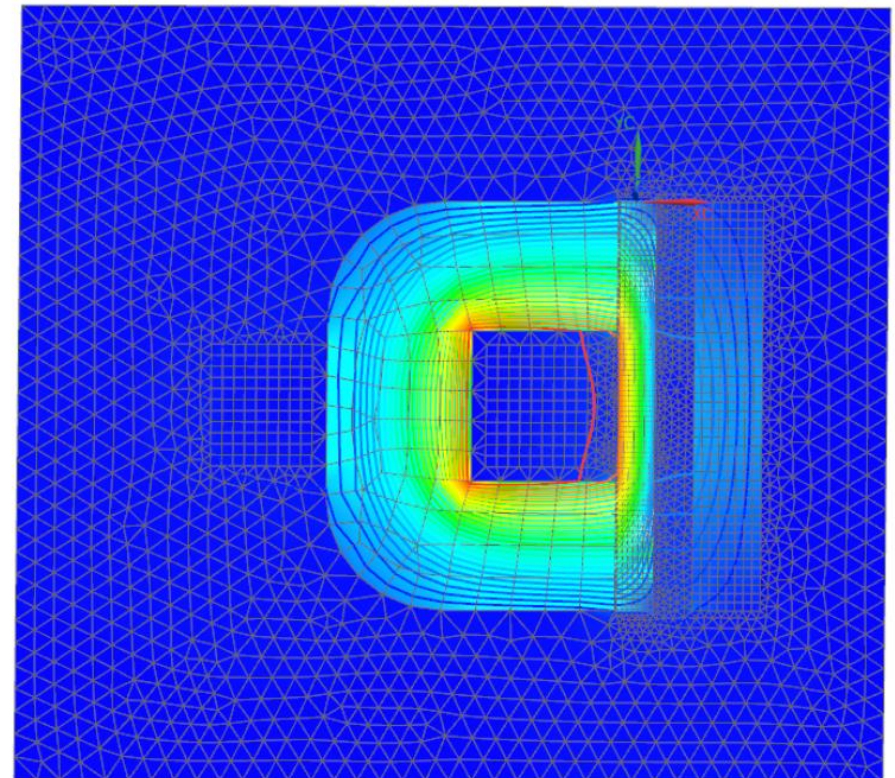
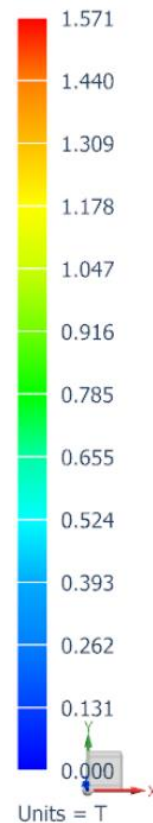
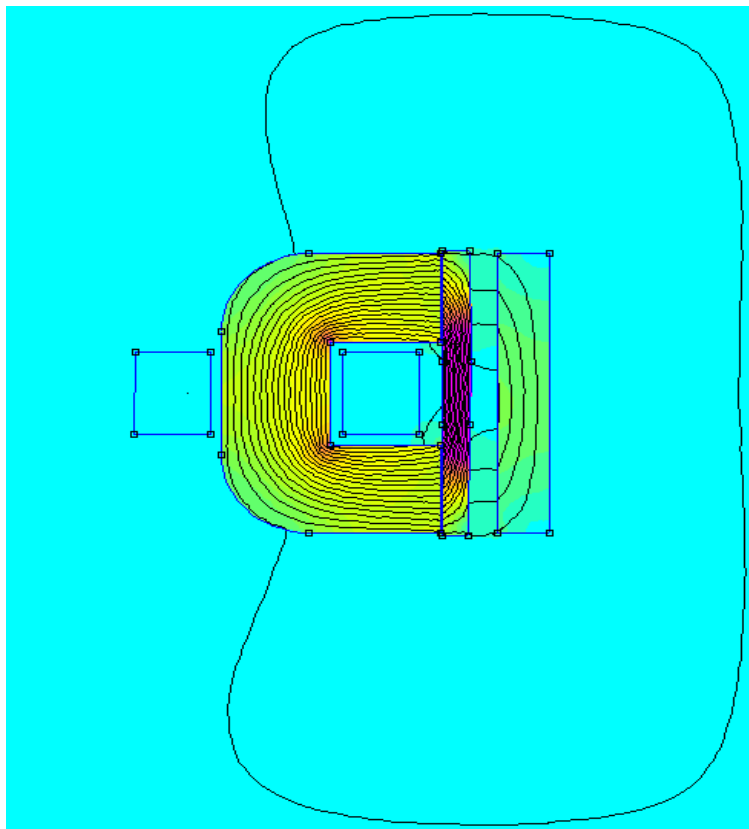
Realistische 3D Simulation ist erforderlich. 2D ist zu ungenau.

# Nockenwellenverstellung

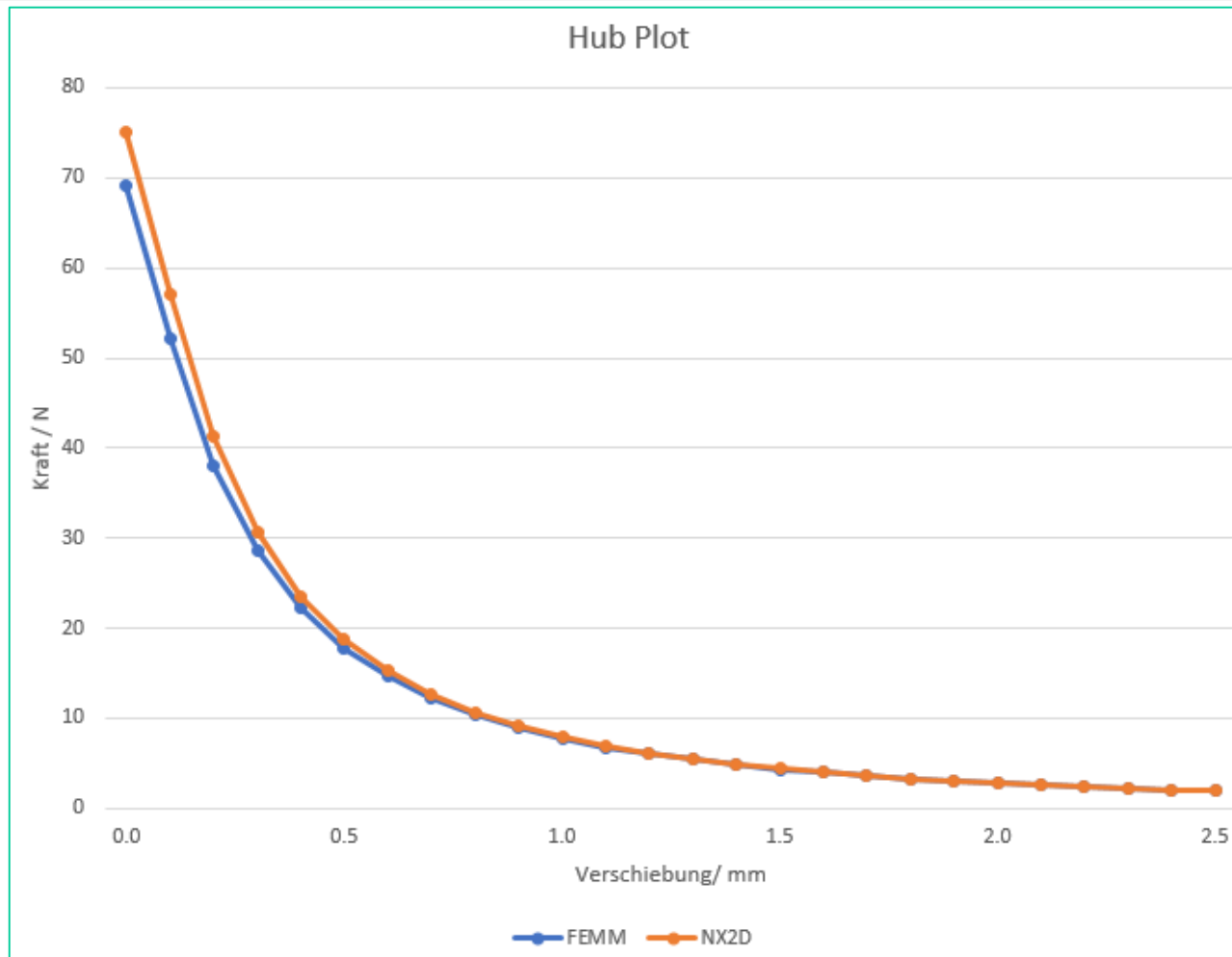
- Bisheriges Simulationstool: **FEMM 4.2**
  - Open Source Programm zur Simulation von Magneten (+)
  - Nicht lineare Materialien können simuliert werden (d.h. Nicht lineare B-H Kurven) (+)
  - Beschränkt auf 2D Simulationen (-)
  - Berechnung dynamischer Effekte nur bedingt möglich (-)
  - Umständliche Bedienung (-)
- Neue Simulationssoftware: **MAGNETICS for NX / Simcenter**
  - Nicht lineare Materialien können auch hier simuliert werden (+)
  - Simulationen in 2D und 3D sind möglich (+)
  - Die zusätzliche Berechnung dynamischer Effekte und Bewegung ist möglich (+)
  - Einfache Bedienung durch vollständige Integration in Siemens Simcenter (+)
- Vergleiche zwischen FEMM 4.2 und MAGNETICS for Simcenter
  - Im folgenden wird zunächst die Funktionsweise von MAGNETICS für die Nockenwelle validiert
  - Dazu wird eine Äquivalente MAGNETICS 2D Rechnung mit einer FEMM 4.2 Rechnung verglichen
  - Dabei bewegt sich der Nockenwellenanker von seiner Ausgangslage 2.5 mm nach außen

## 2D Vergleich der Magnetischen Flussdichte

- Der Anker der Nockenwelle befindet sich in dessen Endposition (2.5 mm beabstandet).
- Gezeigt sind FEMM 4.2 (links) und MAGNETICS (rechts).
- Die jeweiligen Spulen besitzen 185 Wicklungen und sind mit 3 Ampere bestromt.
- Die Felder stimmen überein.



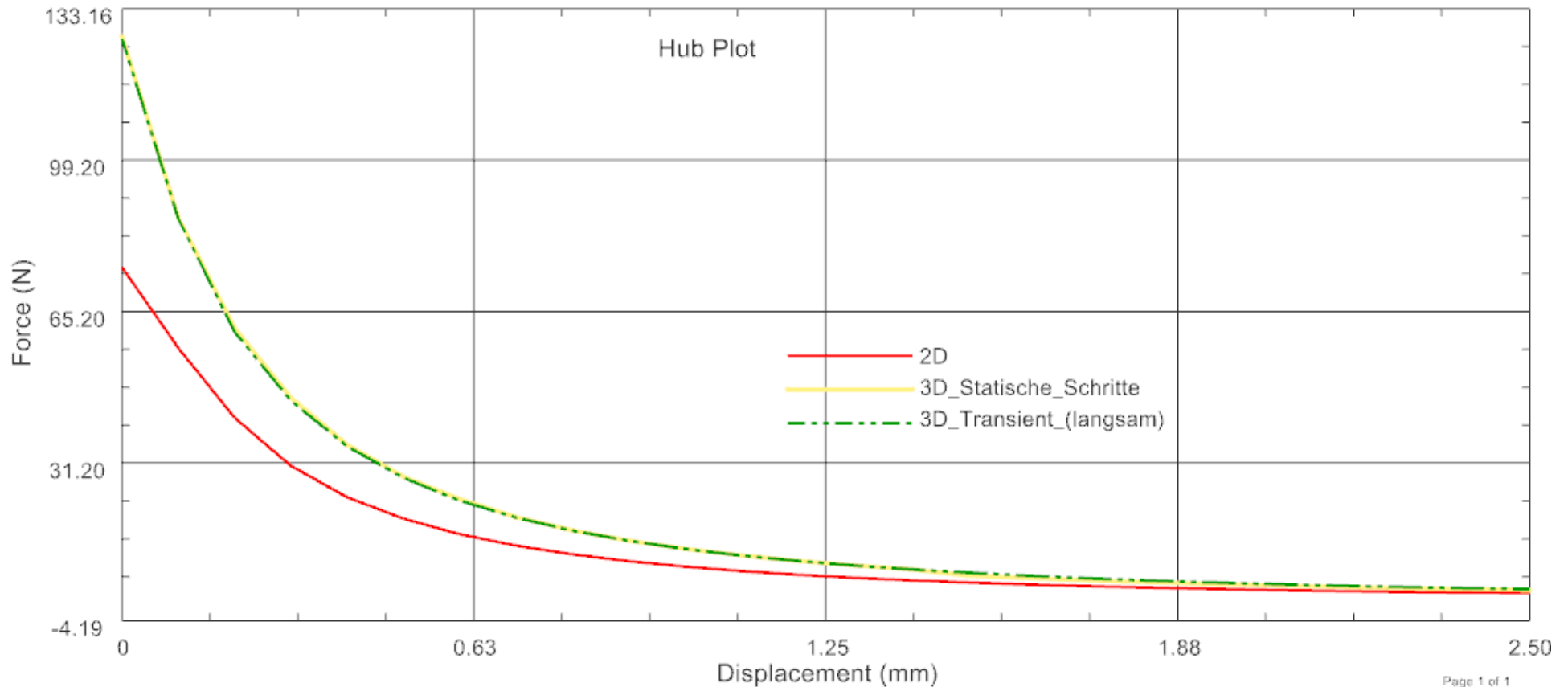
## 2D Vergleich der Kraft



- Im direkten Vergleich stimmen die Berechnungen von FEMM 4.2 und MAGNETICS 2D weitgehend überein.



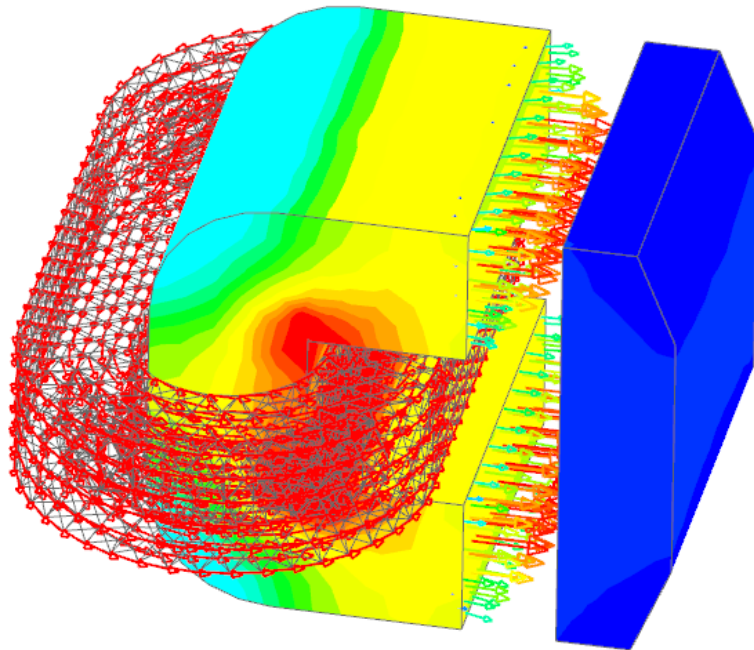
# 3D Vergleich der Kraft



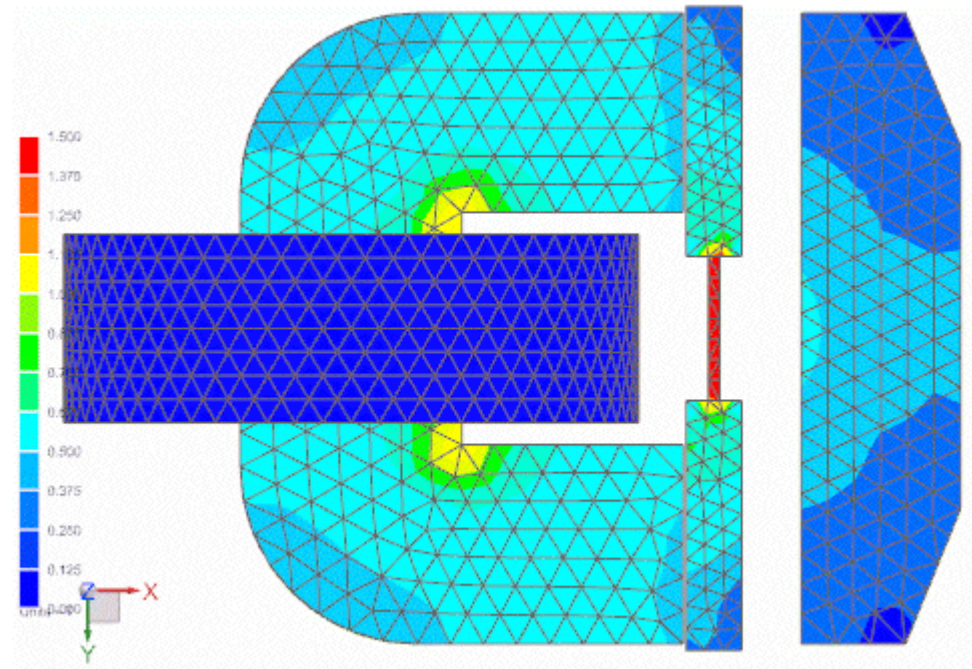
- Die 3D Simulation (nur MAGNETICS) zeigt Abweichungen:
  - Bei 3D (gelbe + grüne Kurven) treten höhere Kräfte auf als bei 2D (rot).  
Erklärung durch 3D Randeffekte
  - Eine transiente Rechnung mit langen (1 sec) Relaxationszeiten (grüne Kurve) stimmt mit einer Serie von statischen Rechnungen (gelbe Kurve) überein
  - Fazit: Die 3D Ergebnisse sind plausibel

# Dynamische 3D Simulation

- Bild mit Animation der Bewegung.
- Der Anker startet mit 2.7 mm Abstand und wird durch die Magnetkraft der Spule angezogen. Aufgrund seiner Masse beschleunigt der Anker



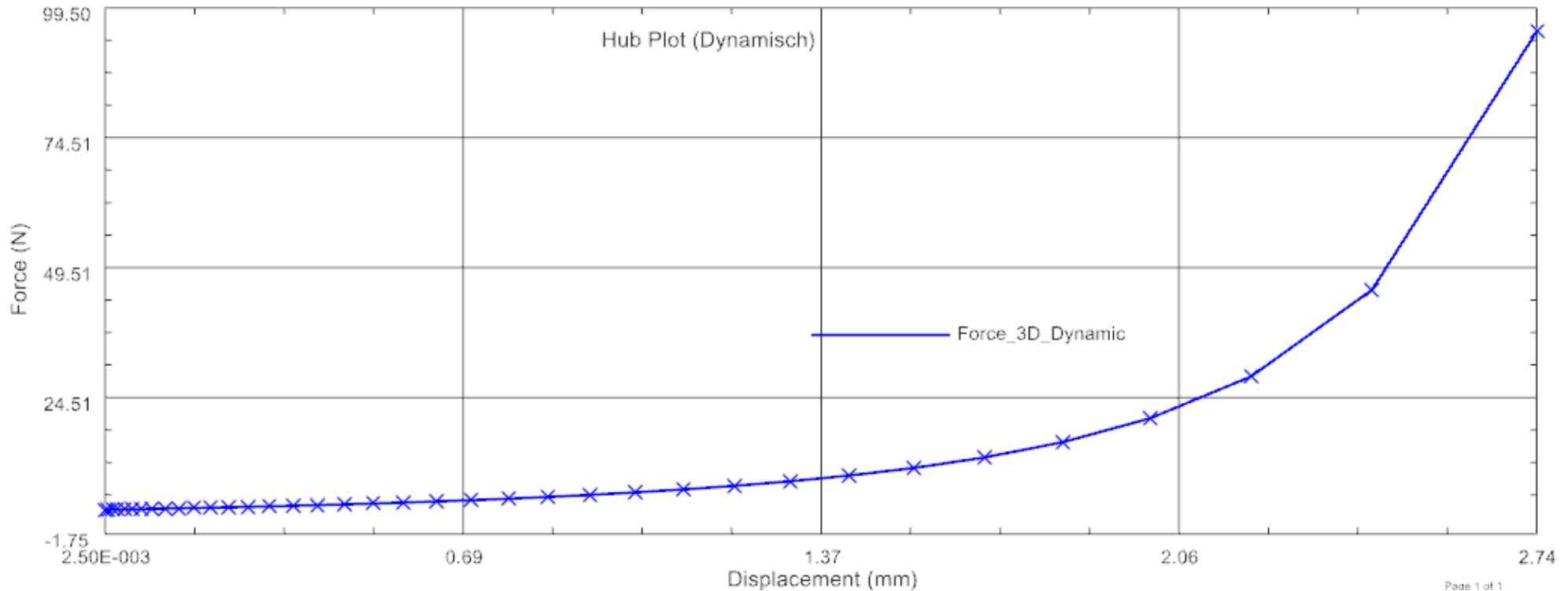
- Bild links: Flussdichte, Kräfte, Strom



- Film rechts: Bewegung, Flussdichte



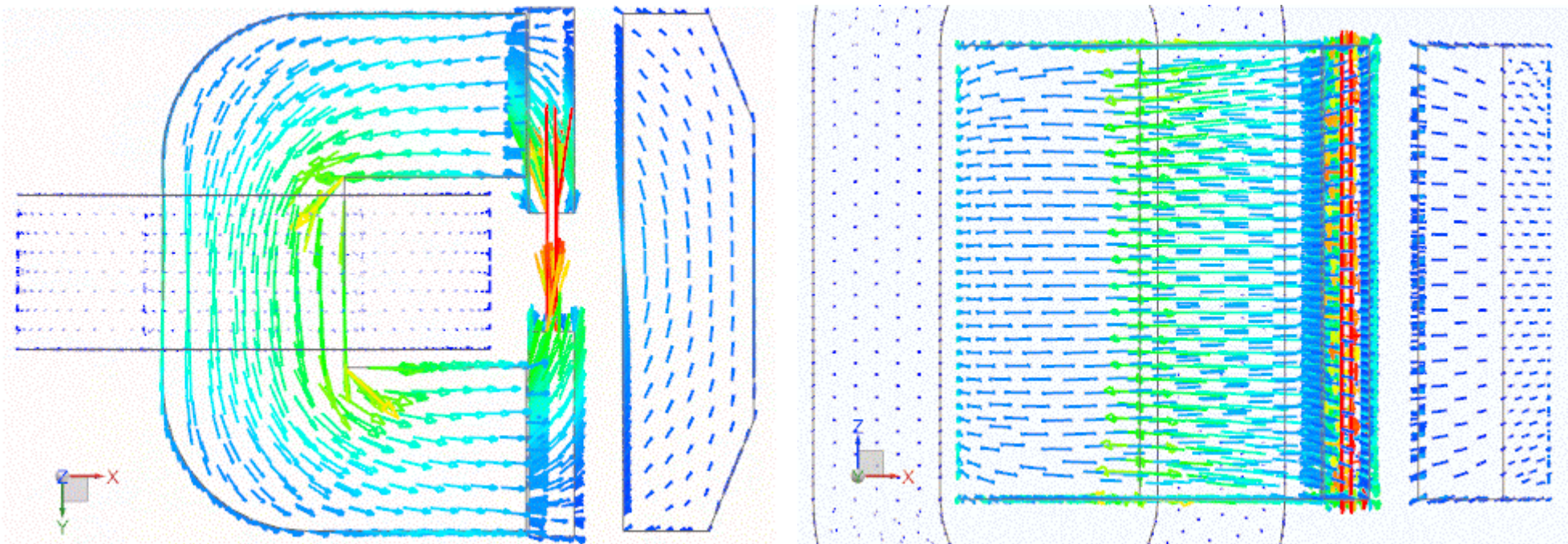
# Dynamische 3D Simulation (Kräfte)



- In der gezeigten Rechnung wurden dynamische Effekte berücksichtigt
  - Der Anker (Massiv) wird allmählich zum Stopper hin beschleunigt.
  - Durch die induzierten Wirbelfelder fällt die Kraft jedoch schwächer als im reinen statischen Fall aus, da diese den Anker abbremsen.
  - Es lässt sich auch die Zeit ermitteln, die für diese Bewegung benötigt wird.
  - Fazit: Für genaue Berechnungen sollten dynamische 3D Simulationen gemacht werden.

## 3D Simulation, Streuflüsse

- Magnetische Feldlinien (Flussdichte)
- Linke Ansicht: kaum 3D Effekte sichtbar
- Rechte Ansicht: Verdichtung an Rändern sichtbar.  
Erklärung durch zusätzliche Wirkung der Spulen am Rand



## 3D Simulation, Kraftverteilung

- Ungleichmäßige Verteilung der Kräfte.
- Verdichtung am Rand, wie auch schon die Feldlinien
- Diese Zusatzkräfte werden in 2D Simulationen vernachlässigt.

