

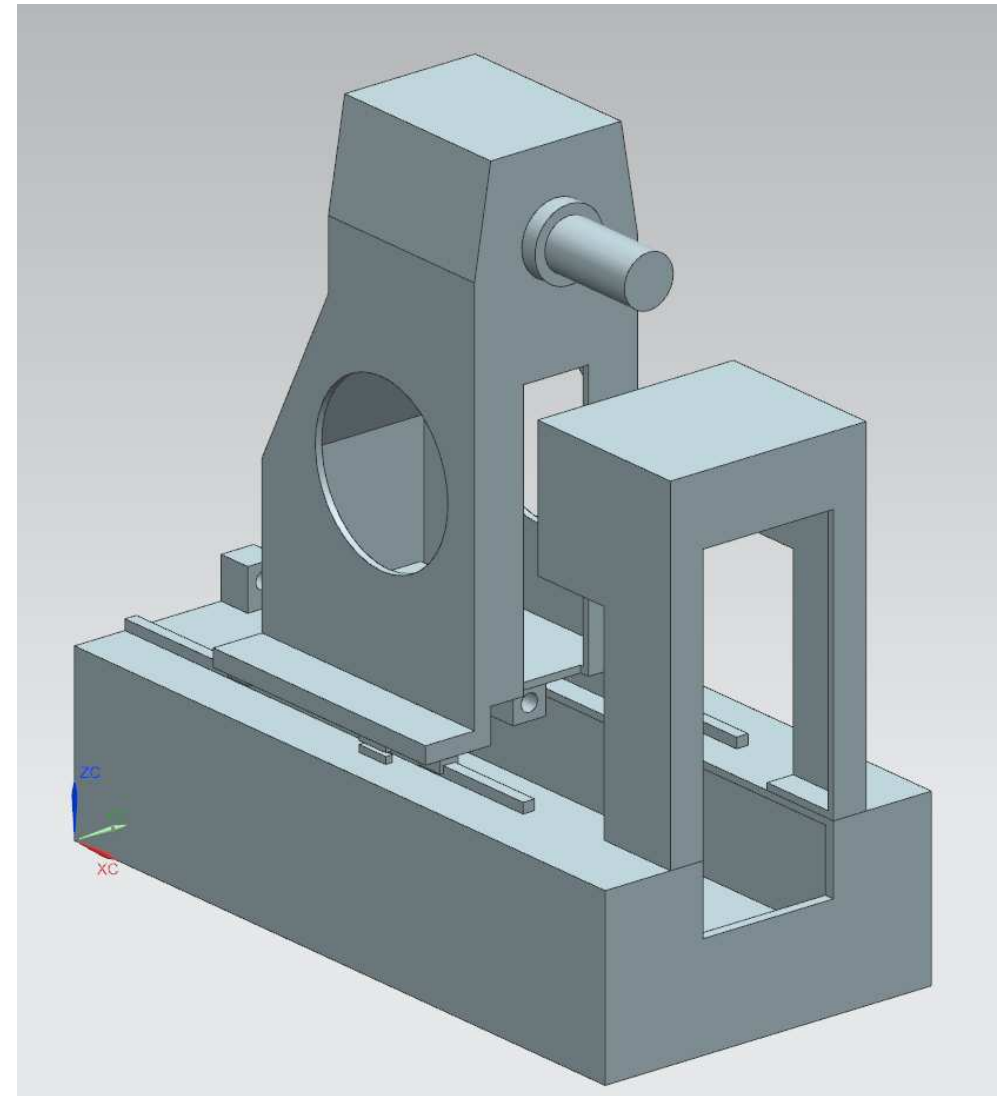
Dynamische Auslegung von Werkzeugmaschinen mit Hilfe von NX CAE und Matlab/Simulink

Dr. Jens Hamann
Haiko Klause
03.11.2016

- Aufgabenstellung
- Simulationen
- Simulationen mit NX
- Simulationen mit Matlab/Simulink
- Zusammenfassung
- Literaturverzeichnis

Ein wichtiges Qualitätskriterium von Maschinen (Werkzeugmaschinen, Produktionsmaschinen, Handlings Apparate) ist deren dynamisches Verhalten. Diesbezügliche Schwächen äußern sich z.B. im Überschwingverhalten, Konturfehlern, Rattermarken oder in zu geringer Produktivität, da die Beschleunigung reduziert werden mußte.

Das dynamische Verhalten von Maschinen kann verbessert werden, indem man eine geschickt ausgelegte Mechanik mit dem passenden Antriebsstrang samt optimal eingestellter Regelung kombiniert. Dies ist eine äußerst komplexe Aufgabe.



Normalerweise wird die Mechanik ausgelegt und dann von der Elektrik das Antriebssystem ausgesucht und projektiert. Die mechanische und die elektrische Abteilung sind nicht immer optimal untereinander abgestimmt oder es fehlt dem einen das Verständnis für den anderen. Das Ergebnis zeigt sich dann im Testbetrieb und weicht manchmal von den vorgegebenen Zielvorstellungen ab. Wie die Zielvorstellungen erreicht werden können sind sich die Mechaniker und Elektriker oft nicht einig. Die Testabteilung kann auch keine Analyse liefern, welche Änderungen ausgeführt werden müssen, um die Zielvorstellungen zu erreichen. Normaler Weise wird dann durch „try and error“ versucht eine Lösung zu finden, dabei nimmt man in Kauf dass einem die Zeit und das Budget davonläuft.

Eine Möglichkeit, eine Lösung von Anfang an zu finden ist der Einsatz von Simulationen. Mit Hilfe von FEM-Simulationen und Systemsimulationen können sowohl bei der Mechanik als auch bei der Elektrik/Regelung optimale Lösungen erzielt werden.

Dieser Vortrag zeigt einen Einstieg in die Lösung dieser Aufgabenstellung am Beispiel einer Achse einer Werkzeugmaschine

Folgende Simulationen helfen bei der Beurteilung einer Maschine:

- Eigenmodes (Schwingformen und Resonanzfrequenzen der Maschine)
- Statische Steifigkeit (Steifigkeit der Achse im Ruhezustand)
- Dynamische Steifigkeit (Steifigkeit der Achse beim Verfahren und beim Bearbeiten)
- Geschwindigkeitsfrequenzgang (Übertragungsfunktion zwischen Motor und Tool Center Point [Werkstückseite-Werkzeugseite])
- Positioniervorgang (Positioniersprung über der Zeit: Sollwert am Motor, Istwert am Tool Center Point [Werkstückseite-Werkzeugseite])

FEM Simulationen

- ▶ Eigenmodes
- ▶ Statische Steifigkeit
- ▶ Dynamische Steifigkeit der Mechanik
- ▶ Geschwindigkeitsfrequenzgang der Mechanik

Tool: NX Advanced Simulation

- ▶ Inklusive Antriebsstrang und Aufstellbedingungen

Systemsimulationen

- ▶ Dynamische Steifigkeit
- ▶ Geschwindigkeitsfrequenzgang
- ▶ Positioniervorgang

Tool: Matlab/Simulink

- ▶ Regelstrecke: State Space Matrix, erzeugt mit NX Advanced Simulation

Simulationen mit NX

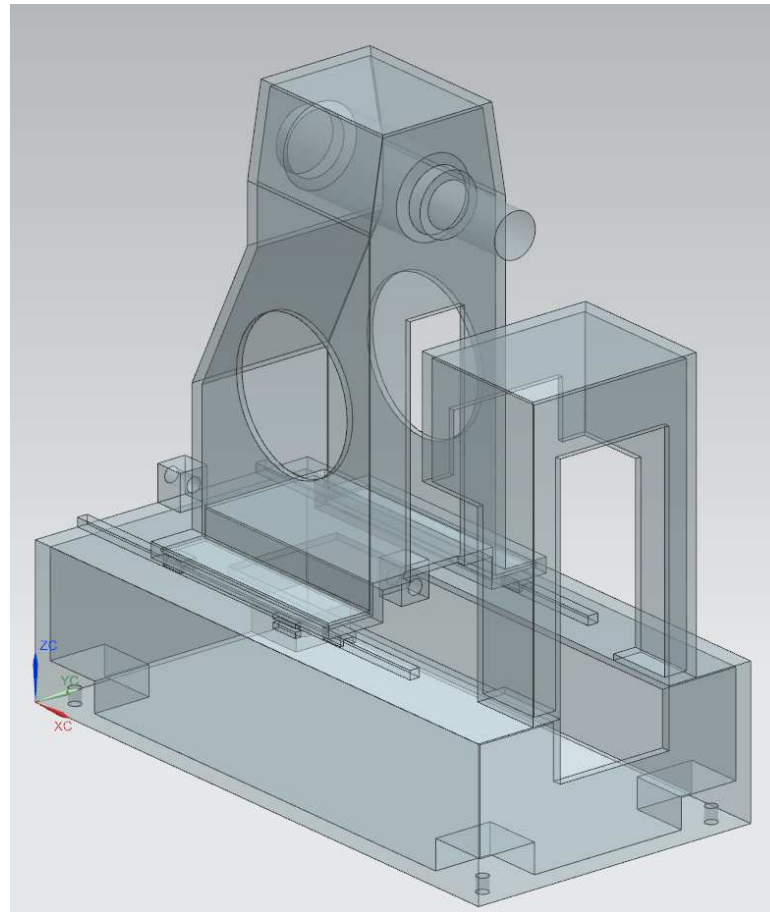
In NX Advanced Simulation kann der mechanische Teil, das mechanische Verhalten der Maschine in einer Simulation dargestellt werden. Die Auswirkungen der Regelung können hierbei nicht berücksichtigt werden.

Für das Erstellen eines Simulationsmodelles sind die notwendigen Informationen meist schon vorhanden:

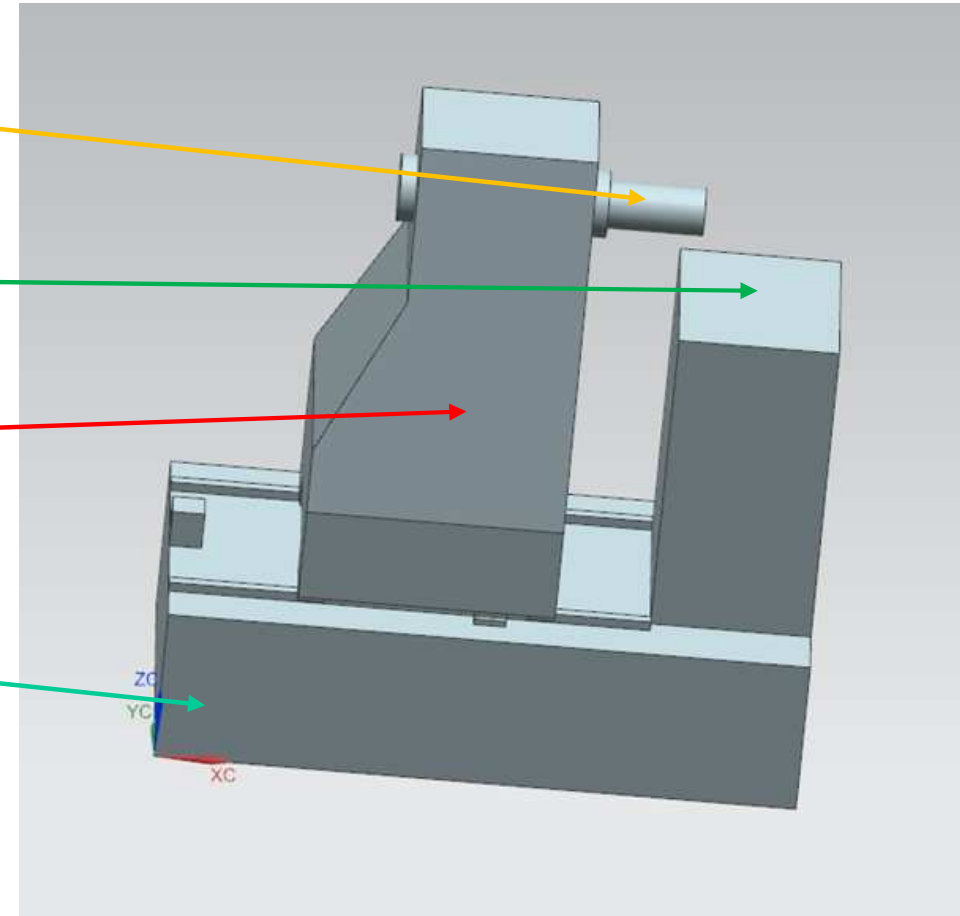
- die 3D-CAD Daten
- die zu verwendenden Werkstoffe
- Steifigkeiten der Führungen
- Steifigkeiten der Lager
- Steifigkeiten der Kugelrollspindeln
- Die Trägheitsmomente der Motoren, Kupplungen und der Kugelrollspindeln

CAD Daten der Werkzeugmaschine

- Grundgestell mit 4 Aufstellelementen an den äußeren Ecken des Grundgestells
- Auf dem Grundgestell befinden sich 2 lineare Führungssysteme mit 4 linearen Schuhen
- Der Turm ist in X-Achse beweglich und beinhaltet eine Hauptspindel, die modellmäßig nicht nachgebildet ist
- Auf dem Grundgestell ist die Aufspannfläche für das Werkstück befestigt

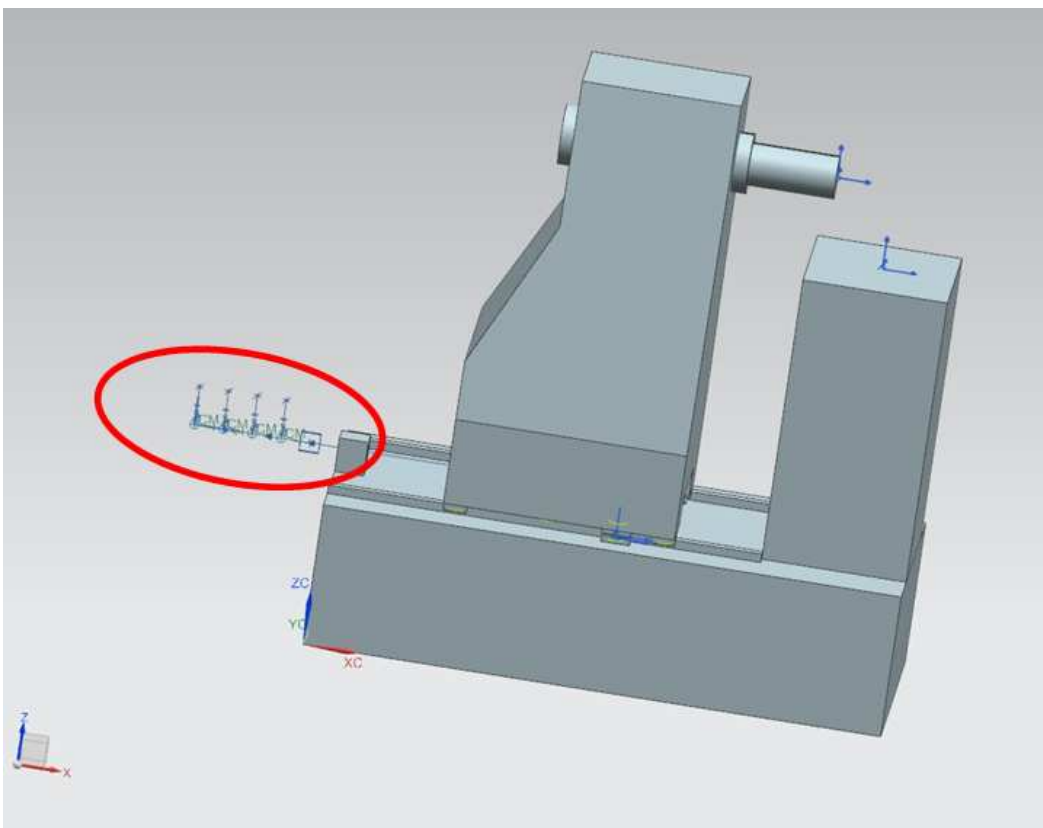


- Hauptspindel zum Fräsen (Lagerung nicht modelliert) mit Tool Center Point (TCP)
- Aufspannfläche für das Werkstück mit Tool Center Point Workpiece (TCPW)
- Verfahrbarer Turm in X-Richtung mit 4 linearen Führungssystemen
- Grundgestell mit 4 Aufstellelementen (Kran-Haken-Maschine)



Modellbildung des Antriebsstranges

Nachbildung des Antriebsstranges mit den Massepunkten und Federn in NX. Die Hauptfeder zwischen der Kugelrollspindel und der bewegten X-Achse setzt sich aus drei in Reihe geschalteten Federn zusammen. Die erste und wichtigste Feder ist die Druck-/Zugsteifigkeit des Kugelgewindeantriebes, die axiale Steifigkeit des Festlagers des Antriebsstranges und die axiale Steifigkeit der Kugelgewinde-Mutter.



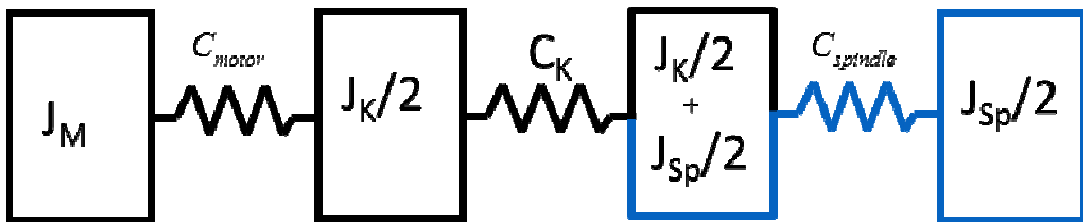
Modellbildung des Antriebsstranges

Modellbildung Antriebsstrang [1][2]: Der Antriebsstrang bestehend aus Motor, Kupplung, Kugelgewindeantrieb wird durch ein 4 Feder Masse System nachgebildet.

- J_M = Trägheitsmoment des Motors
- J_K = Trägheitsmoment der Kupplung und
- J_{Sp} = Trägheitsmoment des Kugelgewindeantriebes

Das Federsystem des Antriebsstranges ist gegeben durch:

- C_{motor} = Torsionssteifigkeit der Motorwelle
- C_K = Torsionssteifigkeit der Kupplung
- $C_{spindle}$ = Torsionssteifigkeit des Kugelgewindeantriebes



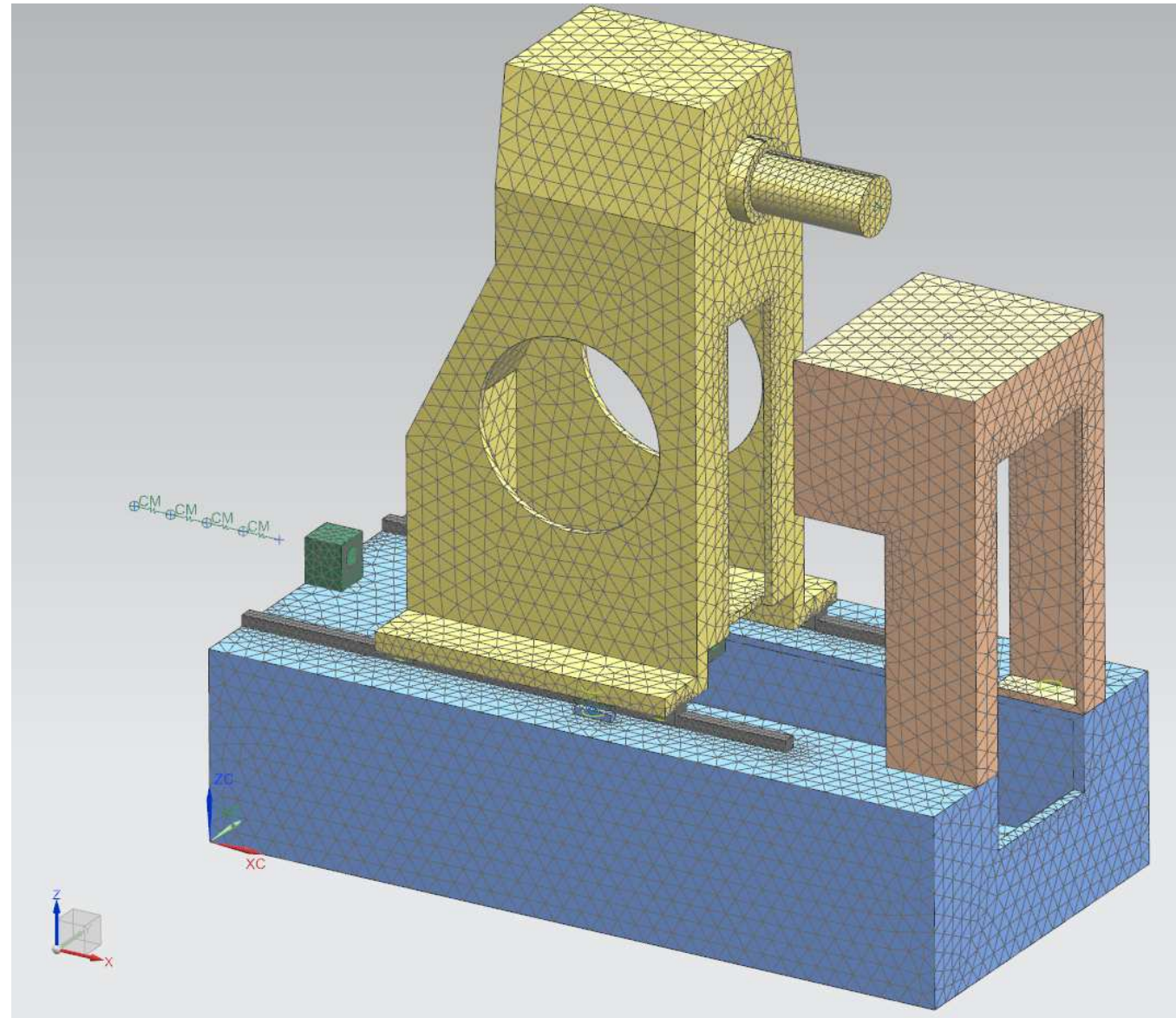
Die rotierenden Massen werden umgerechnet in lineare Massen ($m=J \times i^2$) und die Torsionsfedern werden umgerechnet in lineare Federn ($c_{trans} = c_{rot} \times i^2$).

Die Transformation ist gegeben durch $i=2\pi/(Spindelsteigung)$

NX Simulationsmodell

Die Kugelrollspindel wird durch das Modell des Antriebsstranges ersetzt.

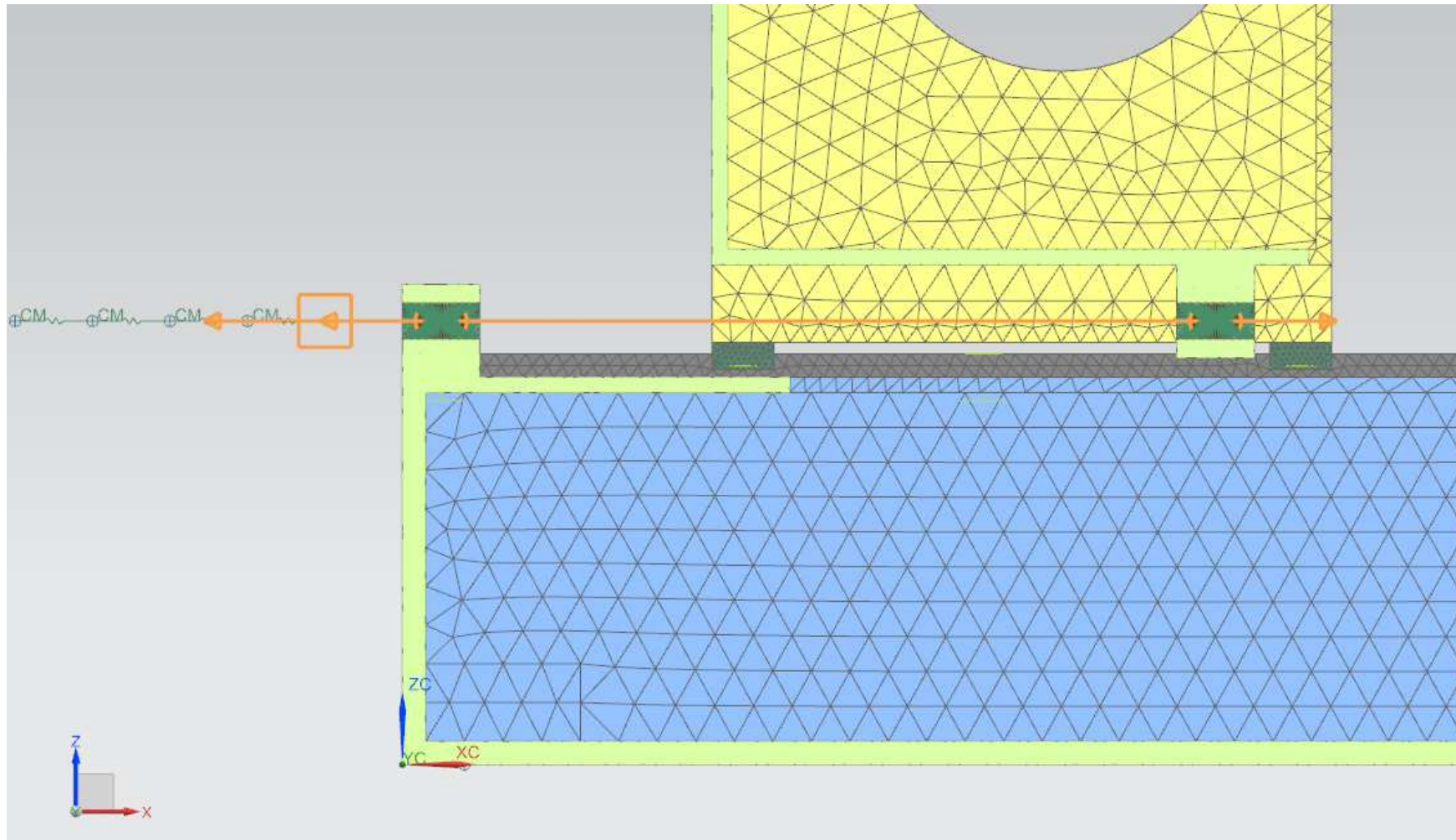
- Aufsteller: CBUSH grounded
- Lineare Führungen: CBUSH
- Lager: CBUSH
- Antriebsstrang: CONM2, CELAS1
- Gestell, Turm,....: CTETRA10
- Netzverbindungen: Mesh Mating (Glue-Coincident), RBE3



NX Simulationsmodell

Das Modell des Antriebsstranges wird durch eine Manual Coupling zwischen dem Festlager des Gestells und der Lagerung am Schlitten eingebunden.

- Manual Coupling (Drive Train – Maschine)
- User Defined Constraint (Drive Train)



Solution 103 Real Eigenvalues

- Plausibilität des Simulationsmodelles überprüfen
- Untersuchung der Eigenformen
 - Motor frei (Resonanz)
 - Motor geklemmt (Blocked Rotor Frequency)

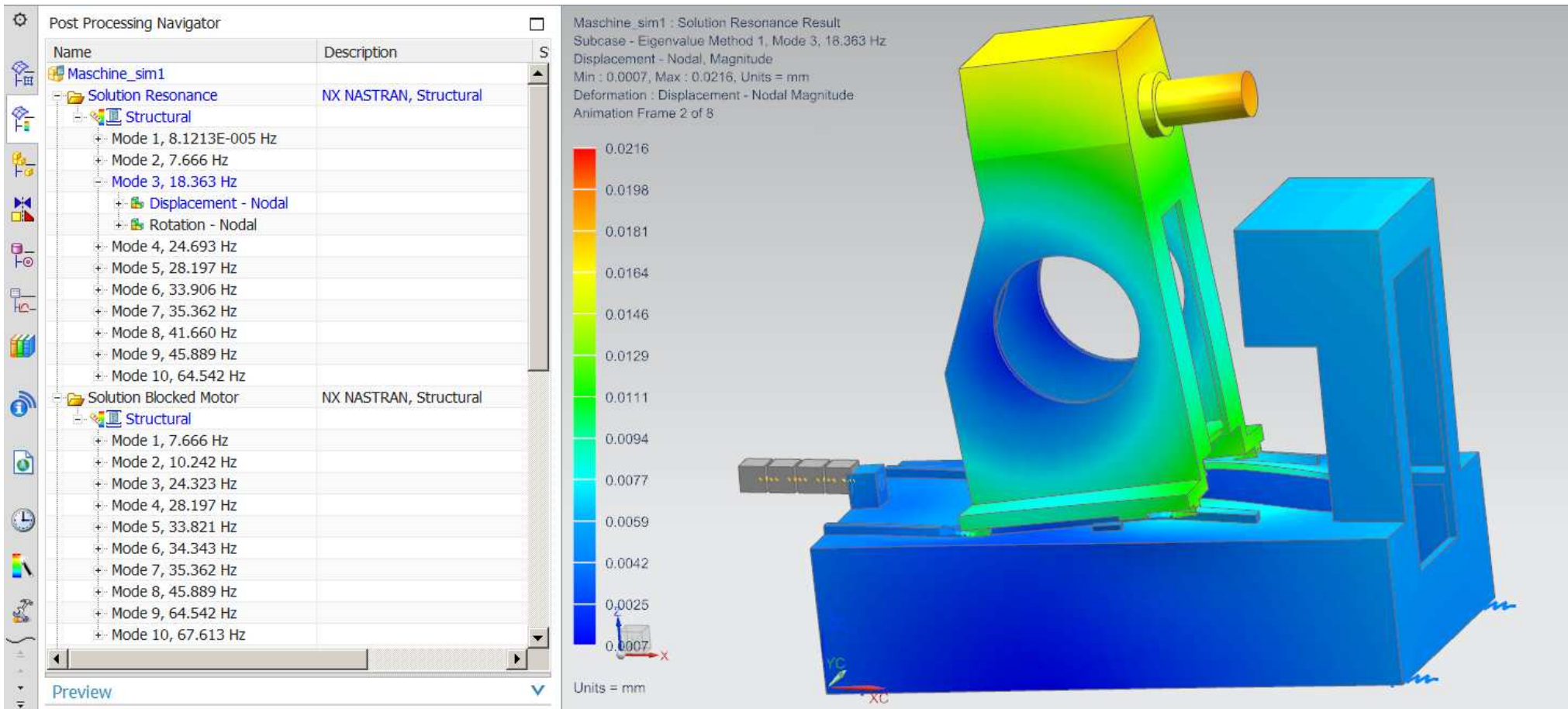
[Vergleich_Mode1](#)

[Vergleich_Mode2](#)

[Vergleich_Mode3](#)

[Vergleich_Mode4](#)

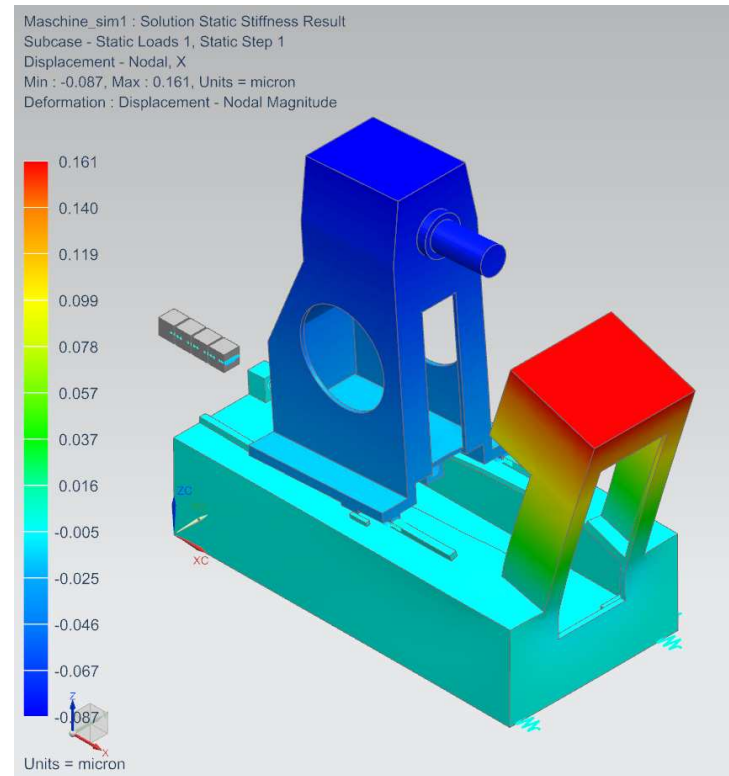
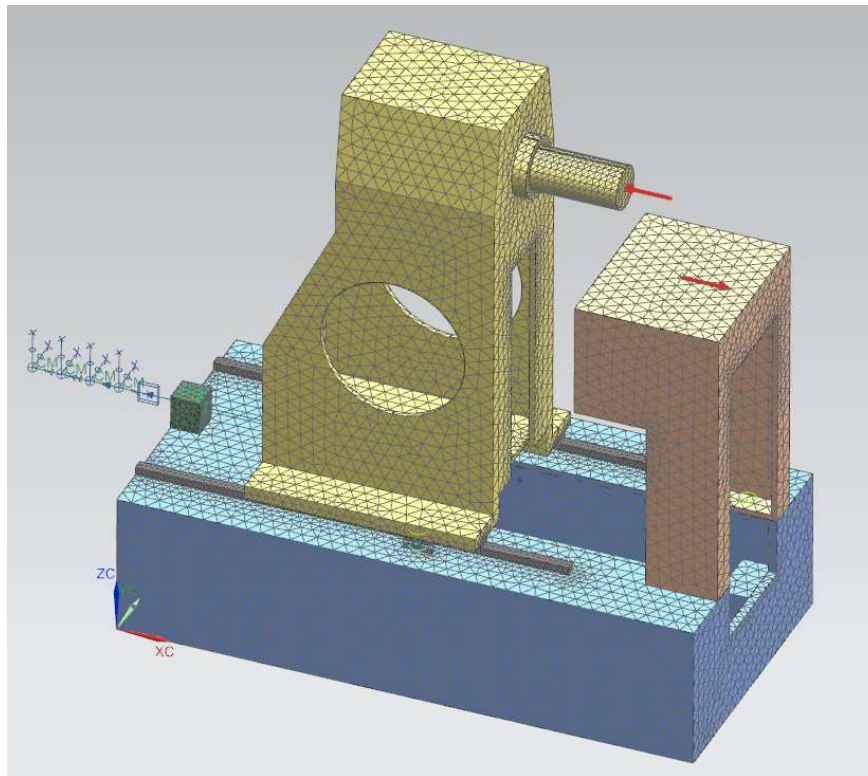
[Vergleich_Mode5](#)



Statische Steifigkeit

Solution 101

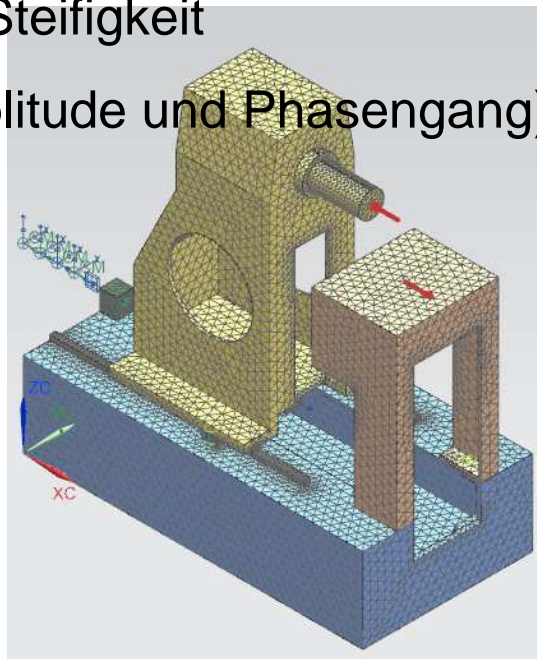
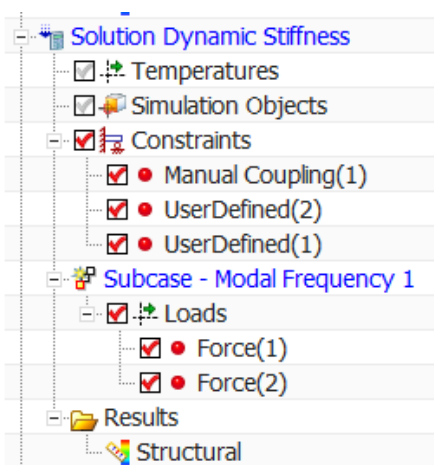
- Die statische Steifigkeit (Steifigkeit der Achse im Ruhezustand) ist eine grundlegende Kenngröße der Maschine
- Zur Ermittlung der statischen Steifigkeit wird der Motor geklemmt und zwischen TCP und TCPW ein Kräftepaar in Achsrichtung aufgebracht.
- Als Ergebnis wird die relative Verformung zwischen TCP und TCPW abgelesen, mit der verwendeten Kraft errechnet sich die statische Steifigkeit



Dynamische Steifigkeit der Mechanik

Solution 111 – Modal Frequency

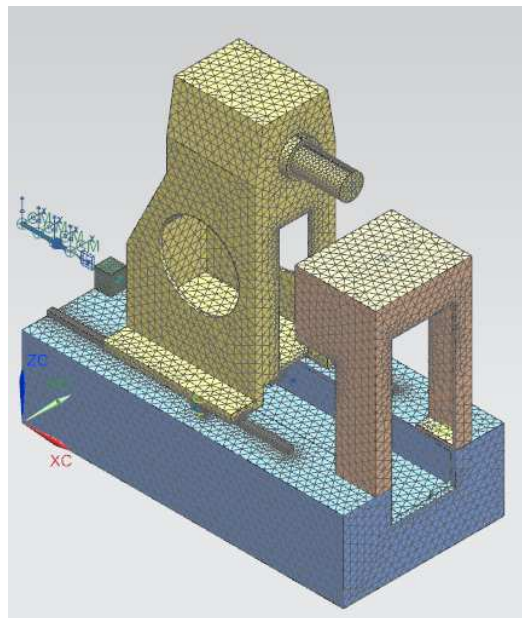
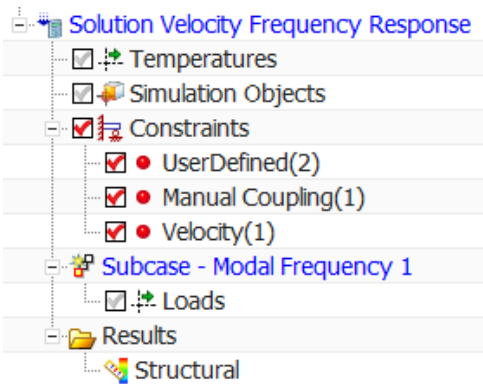
- Die dynamische Steifigkeit (Steifigkeit der Achse über dem betrachteten Frequenzbereich) berücksichtigt die Frequenzabhängigkeit der Steifigkeit, wird auch als Nachgiebigkeit verwendet
- Zur Ermittlung der dynamischen Steifigkeit wird der Motor geklemmt und zwischen TCP und TCPW ein Kräftepaar in Achsrichtung aufgebracht, welches zu allen Anregungsfrequenzen angeregt wird.
- Als Ergebnis wird die relative Verformung zwischen TCP und TCPW für jede Anregungsfrequenz abgelesen, mit der verwendeten Kraft errechnet sich die dynamische Steifigkeit
- XY-Plot (Amplitude und Phasengang)



Geschwindigkeitsfrequenzgang der Mechanik

Solution 111 – Modal Frequency

- Übertragungsfunktion zwischen Motor und TCP-TCPW
- Zur Ermittlung des Geschwindigkeitsfrequenzganges wird am Motor eine erzwungene Geschwindigkeit aufgebracht, welche zu allen Anregungsfrequenzen angeregt wird.
- Als Ergebnis wird die relative Verformung zwischen TCP und TCPW für jede Anregungsfrequenz abgelesen, mit der verwendeten erzwungenen Geschwindigkeit errechnet sich der Geschwindigkeitsfrequenzgang
- XY-Plot (Amplitude und Phasengang)



Simulationen mit Matlab/Simulink

In Matlab/Simulink kann die gesamte Maschine inklusive Regelung in einer Simulation dargestellt werden (gekoppelte Simulation mit Matlab/Simulink). Dazu wird in Matlab/Simulink das Modell des Kaskadenreglers aufgebaut, worin eine State Space Matrix der Maschine als Regelstrecke verwendet wird. Diese State Space Matrix der Maschine wird mit NX Advanced Simulation erzeugt.

Diese Simulation kann sowohl zur Beurteilung der Mechanik herangezogen werden, als auch zur Einstellung der Reglerparameter verwendet werden.

NX Advanced Sim: State Space Matrix der Regelstrecke

Mit NX Advanced Simulation wird eine Beschreibung der Maschine im State Space erzeugt, welche in Matlab/Simulink in das Modell der Antriebsregelung als Regelstrecke eingefügt werden kann.

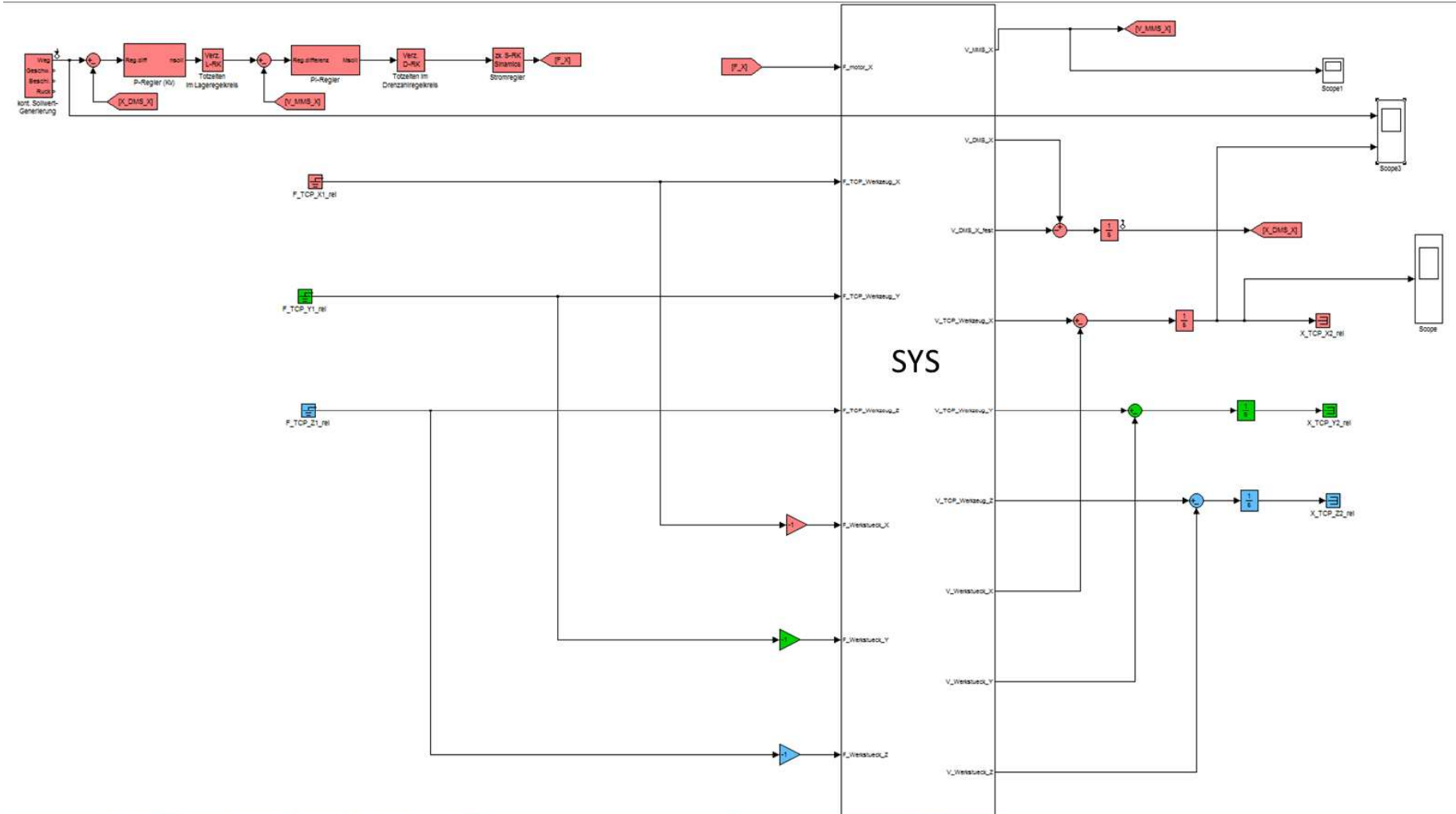
- Solution 103 Flexible Body
- DOF Sets für Input und Output erzeugen
- Modale Dämpfung definieren
- Ausgabe eines Matlab .m-Files, der die ABCD-Matrix der Maschine enthält

```

maschine_sim1_solstatespace_0.m
1  %
2  %
3  %
4  %   Superelement ID: 0
5  %   Created by NX Nastran
6  %   Siemens PLM Software Inc.
7  %
8  %
9  %   Input (U7) Degrees of Freedom
10 clear U7DOF
11 U7DOF=[ 1 77 77 77 78 78 78;
12         1 1 2 3 1 2 3]';
13 %
14 %   Output (U8) Degrees of Freedom
15 clear U8DOF
16 U8DOF=[ 1 5 6 77 77 77 78 78 78;
17         1 1 1 1 2 3 1 2 3]';
18 %
19 %   State Space [A] Matrix
20 clear A11 A12 A21 A22 AMAT
21 A11=[ -2.040355e-003 2.391029e-014 1.058721e-00
22        2.391022e-014 -4.816620e+000 -2.209816e-007 1.
23        1.058722e-008 -2.209816e-007 -1.163523e+001 4.
24        -5.108040e-009 1.066140e-007 4.722479e-002 -1.
25        -2.649718e-012 5.530336e-011 2.449668e-005 -1.
26        1.058772e-009 -2.209703e-008 -9.787898e-003 4.
27        -1.040089e-012 2.170643e-011 9.614876e-006 -4.
  
```

Modellbildung Antriebsregelung in Matlab/Simulink

Die Kaskadenregelung mit geschlossenem Stromregler, geschlossenem Drehzahlregler und geschlossenem Positionregler wird in Matlab/Simulink nachgebildet. Die Ergebnisse der SolStateSpace Matrix werden in Matlab Simulink in der SYS Matrix wiedergegeben. Die Eingangs- und Ausgangsgrößen der SYS Matrix müssen vorher in NX definiert werden.



© Dr. Binde Ingenieure, Design & Engineering GmbH: alle Rechte vorbehalten. All rights reserved.

Dynamische Steifigkeit (Kehrwert: Compliance)

- Zur Ermittlung der dynamischen Steifigkeit wird der Regler geschlossen und am TCP eine Kraft in Achsrichtung aufgebracht, welche zu allen Anregungsfrequenzen angeregt wird.
- Als Ergebnis wird die relative Verformung zwischen TCP und TCPW für jede Anregungsfrequenz abgelesen, mit der verwendeten Kraft errechnet sich die dynamische Steifigkeit
- XY-Plot (Amplitude und Phasengeang)

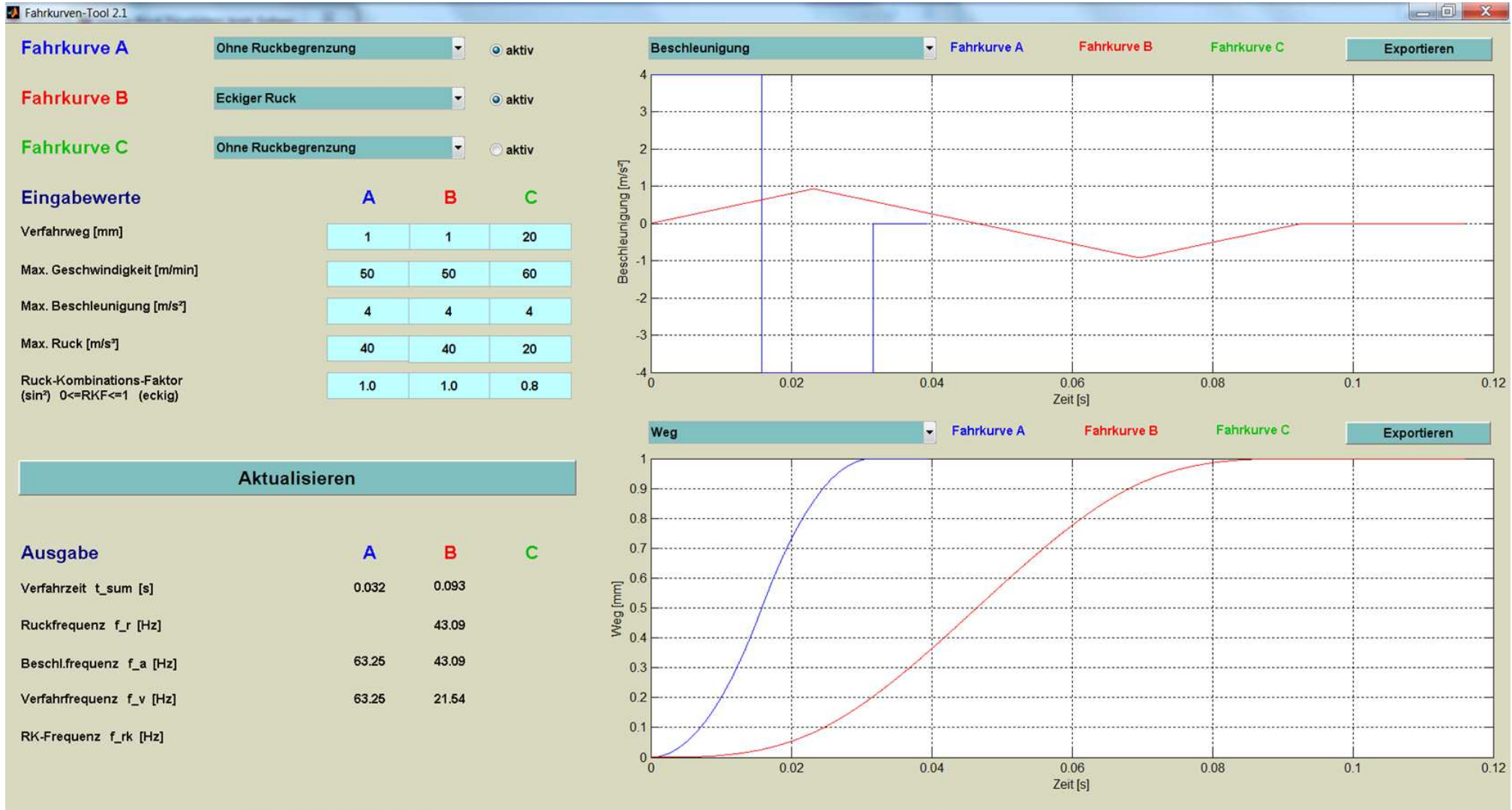
Geschwindigkeitsfrequenzgang (Mechanikfrequenzgang)

- Zur Ermittlung des Geschwindigkeitsfrequenzganges wird der Regler geöffnet und am Motor eine erzwungene Geschwindigkeit aufgebracht, welche zu allen Anregungsfrequenzen angeregt wird.
- Als Ergebnis wird die relative Geschwindigkeit zwischen TCP und TCPW für jede Anregungsfrequenz abgelesen, mit der verwendeten erzwungenen Geschwindigkeit errechnet sich der Geschwindigkeitsfrequenzgang
- XY-Plot (Amplitude und Phasengeang)

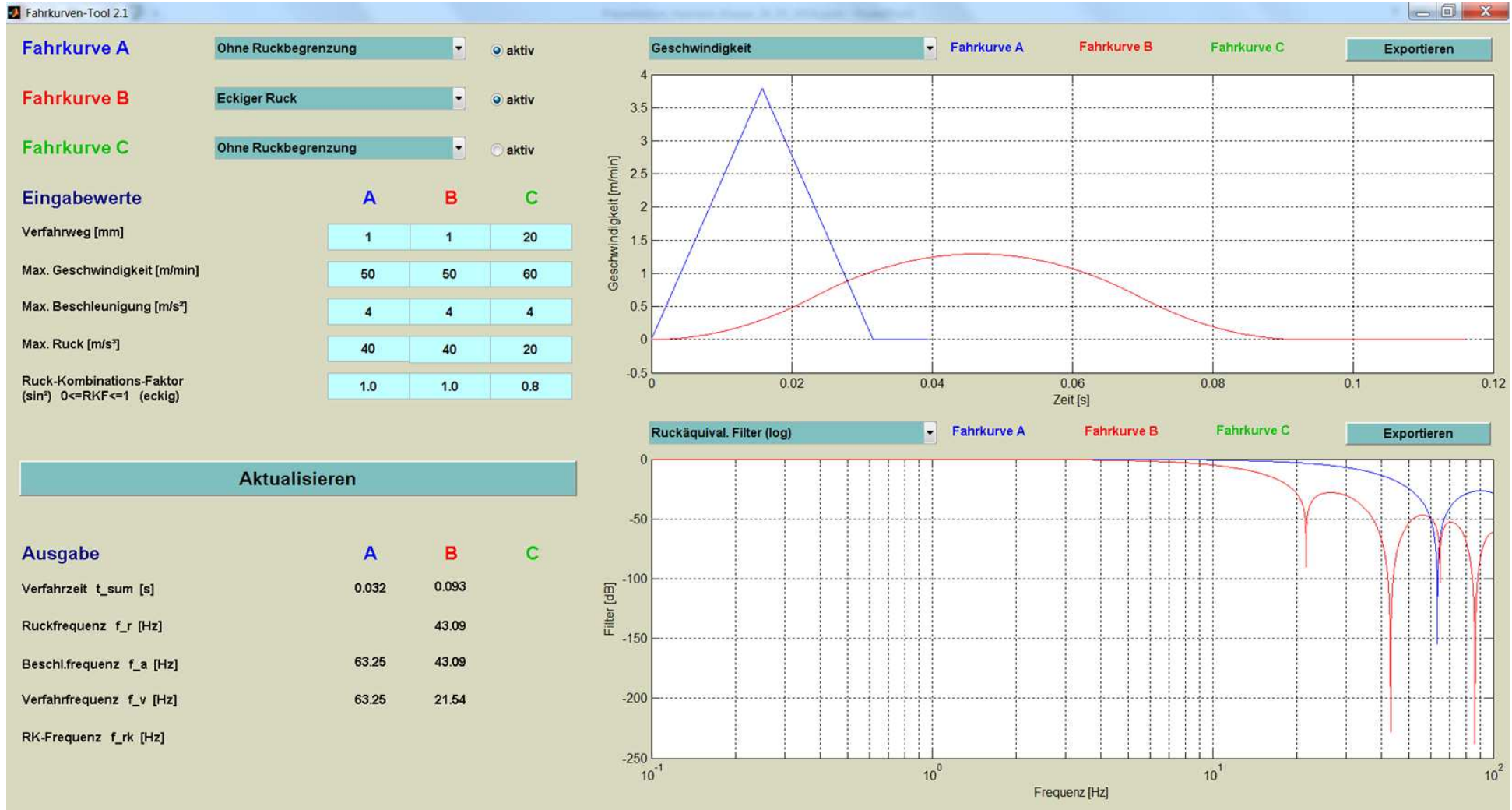
Positioniervorgang

- Zur Ermittlung des Positionierverhaltens wird als Sollwert der 1 mm Sprung (gewünschte Grenzen für Ruck, Beschleunigung und Geschwindigkeit) eingegeben
- Die Maschine steht in Regelung
- Als Ergebnis wird die relative Verformung zwischen TCP und TCPW über der Zeit abgelesen

Verfahren der X-Achse um 1 mm –Verfahrprofil mit und ohne Ruck (40m/s³)



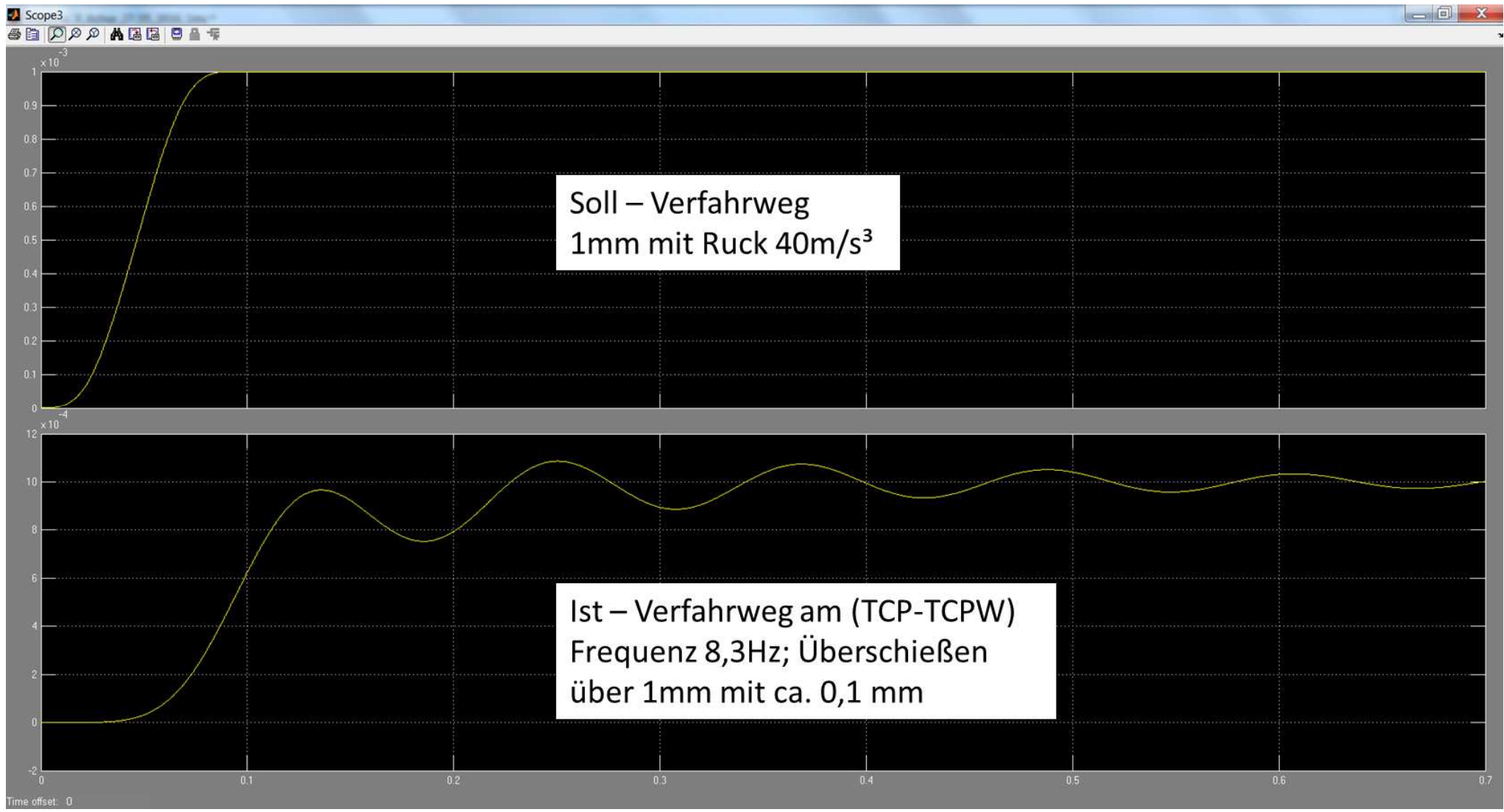
Verfahren der X-Achse um 1 mm – Geschwindigkeits-Verfahrprofil mit und ohne Ruck (40m/s³)



Ruckäquival. Filter – entspricht dem Energieinhalt des Verfahrprofiles

Simulation des Positioniervorganges in Matlab/Simulink

Antriebssystem A1 ($K_v=1$ _ $K_p=4$ _ $T_n=20ms$ _1ms_125 μs _125 μs)



© Dr. Binde Ingenieure, Design & Engineering GmbH: alle Rechte vorbehalten. All rights reserved.

- Simulationen:
 - FEM Simulation
 - Systemsimulation
- FEM Simulationen mit NX Advanced Simulation
 - Eigenwerte / Eigenformen:
 - Statische Steifigkeit
 - Dynamische Steifigkeit der Mechanik
 - Geschwindigkeitsfrequenzgang der Mechanik
- Systemsimulationen mit Matlab / Simulink
 - Zustandsraummatrix für Matlab/Simulink erzeugen mit der Solution 103 Flexible Body in NX Advanced Simulation
 - Kaskadenreglermodell mit Matlab/Simulink erzeugen, Zustandsraummatrix integrieren => Systemsimulation
 - Positioniervorgang
 - Dynamische Steifigkeit / Compliance
 - Mechanikfrequenzgang

Verwendete Literatur:

[1]: siehe folgende Seite

[2]:Systementwurf für Werkzeugmaschinen,J. Hamann, U. Ladra, E. Schäfers

[Beitrag Hamann Ladra Schäfers Systementwurf für Werkzeugmaschinen 25 03 2010 dt.doc](#)

Literatur bezüglich [1]:

- [1] Verein deutscher Ingenieure (VDI): Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. VDI-Richtlinie 2206, Beuth Verlag, Berlin, 2004.
- [2] J. Lückel: The Concept of Mechatronic Function Modules applied to Compound Active Suspension Systems. Symposium: Research Issues in Automotive Integrated Chassis Control Systems, International Symposium for Vehicle System Dynamics, Herbertov, CSFR, 1992.
- [3] J. Lückel, T. Hestermeyer, X. Liu-Henke: Generalization of the Cascade Principle in View of a Structured Form of Mechatronic Systems. IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM 2001), Como, 2001.
- [4] J. Lückel, C. Ettingshausen, T. Hestermeyer, P. Schlautmann: Neue Bahntechnik Paderborn - Eine Anwendung der verallgemeinerten Kaskade. Innovative Antriebssysteme - Erstes Internationales Symposium für Mechatronik (ISOM'02), 21. - 22. März 2002 – Chemnitz.
- [5] E. Schäfers, J. Hamann, H.-P. Tröndle: Zum Einfluss der Abstützung von Antriebssträngen auf die Dynamik mechatronischer Systeme am Beispiel von Werkzeugmaschinen. Tagungsband 1. Paderborner Workshop „Intelligente mechatronische Systeme“, 20. und 21. März 2003; HNI-Verlagsschriftenreihe, Bd. 122, Paderborn 2003.
- [6] E. Schäfers, J. Hamann, H.-P. Tröndle: Dynamische Eigenschaften direkt angetriebener Systeme. Tagungsband 3. Paderborner Workshop „Intelligente mechatronische Systeme“, 17. und 18. März 2005, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, 2005.
- [7] E. Schäfers, J. Denk, J. Hamann: Schwingungsdämpfung für Be- und Verarbeitungsmaschinen. VDI/VDE-Fachtagung Elektrisch-mechanische Antriebssysteme, 27.-28. September 2006, Böblingen, 2006.
- [8] E. Schäfers, U. Ladra: Einfluss der Abstützung von Antriebssträngen auf das Gesamtsystem. Tagungsband SPS IPC Drives Nürnberg 2004.
- [9] H. Groß, J. Hamann, G. Wiegärtner: Elektrische Vorschubantriebe in der Automatisierungstechnik. Publicis MCD Verlag, Erlangen und München, 2000.
- [10] Industrial Technology Research Institute (ITRI), Taichung, Taiwan.