

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

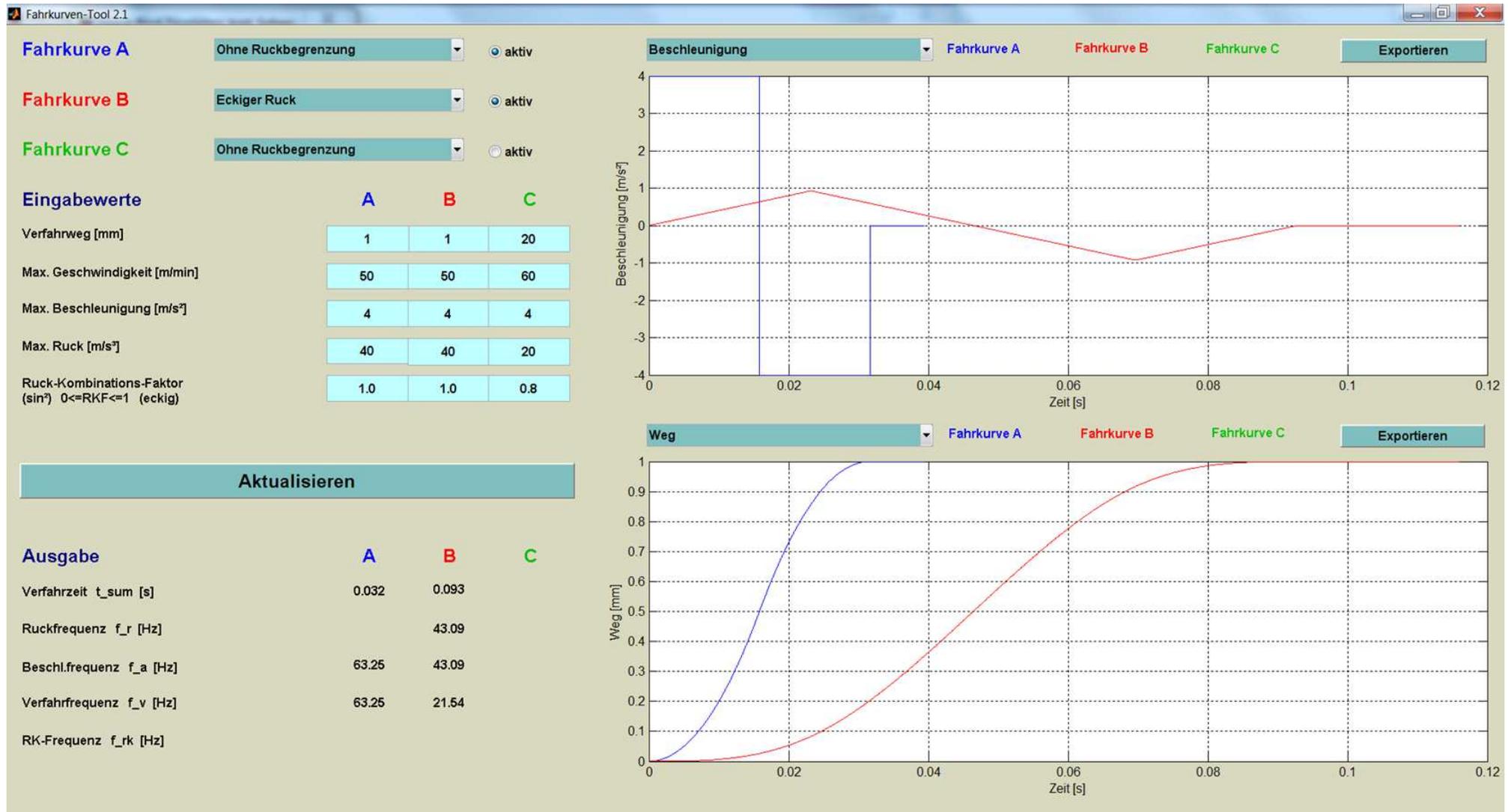
Dr. Jens Hamann  
Haiko Klause  
08.06.2016

- Aufgabenstellung
- CAD Daten der Werkzeugmaschine
- Modellbildung der Werkzeugmaschine
- Modellbildung des Antriebsstranges
- NX Simulationsmodell
- NX Simulationen (modal)
- NX Simulationsmodell für Matlab (Zustandsraumdarstellung)
- Modellbildung Antriebsregelung in Matlab/Simulink
- Gekoppelte Simulation mit Matlab/Simulink
- Simulation des Positioniervorganges in Matlab/Simulink
- Simulation des Positioniervorganges in NX
- Zusammenfassung
- Literaturverzeichnis

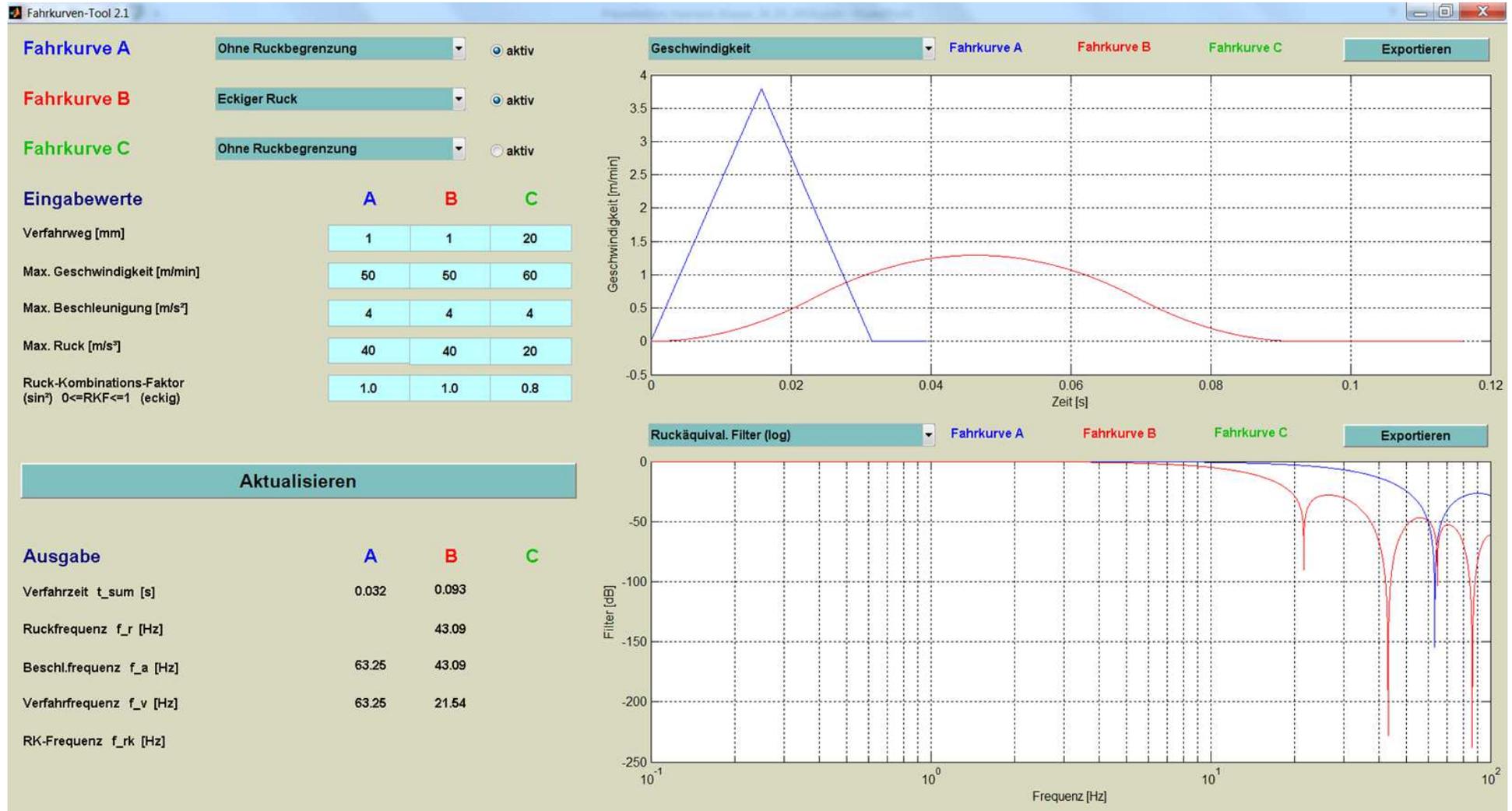
Sie haben eine Werkzeugmaschine, Produktionsmaschine oder einen Handlings Apparat, die ausgerüstet sind mit einem Servo-Antriebsstrang, einem Umrichter mit Strom-, Drehzahl- und Lageregler. Sie benötigen für Ihren Arbeitsprozess einen Positionierungsvorgang am Tool Center Point (TCP) und sind mit dem Ergebnis nicht zufrieden. Sie haben die CAD-Daten der Maschine vorliegen und wollen den Positioniervorgang simulieren, um das unbefriedigende Ergebnis zu analysieren.

- dieser Vortrag zeigt einen Einstieg in die Lösung dieser Aufgabenstellung
- am Beispiel einer Achse wird gezeigt, wie diese Aufgabenstellung angegangen werden kann

## Verfahren der X-Achse um 1 mm –Verfahrprofil mit und ohne Ruck ( $40\text{m/s}^3$ )

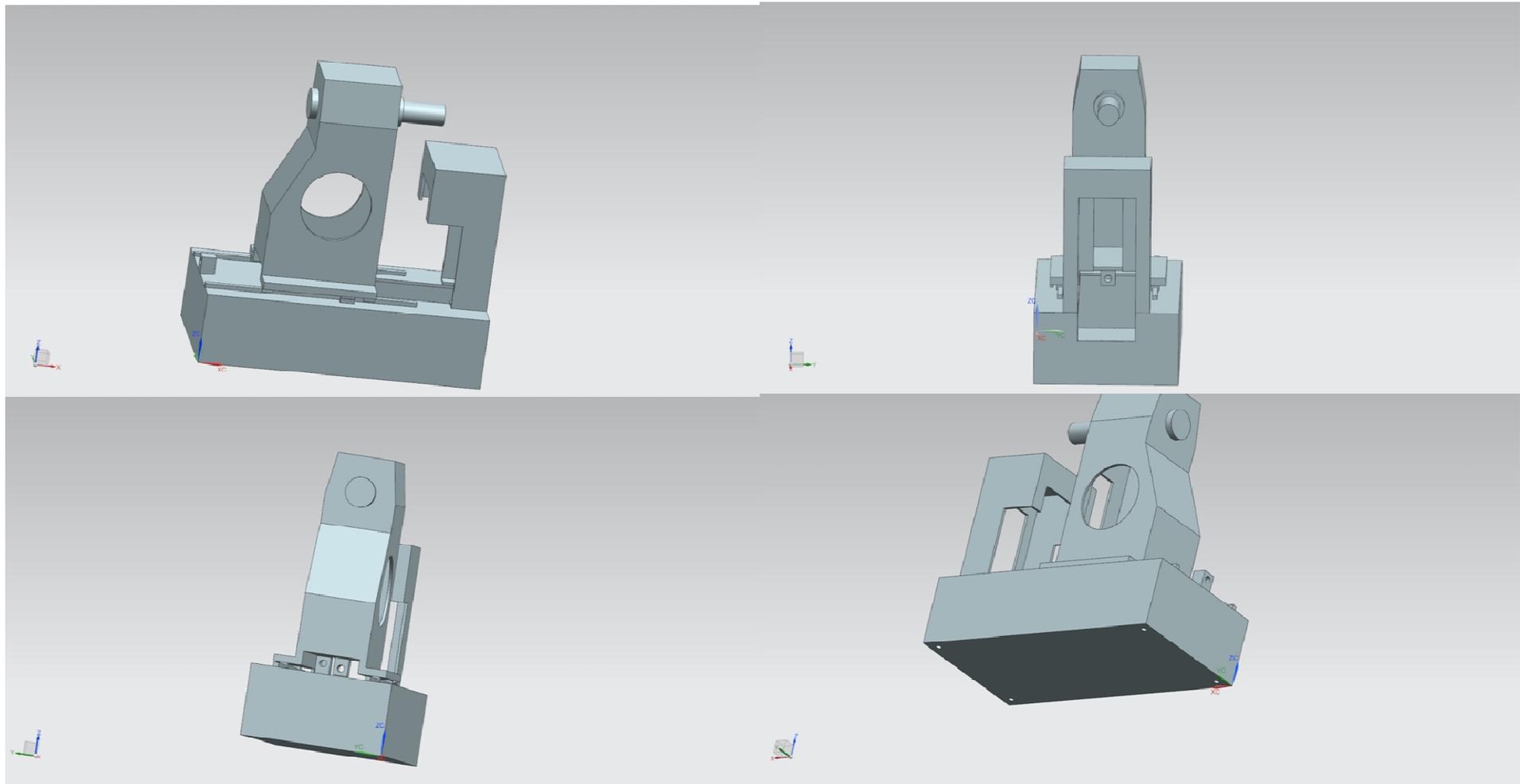


Verfahren der X-Achse um 1 mm – Geschwindigkeits-Verfahrprofil mit und ohne Ruck (40m/s<sup>3</sup>)

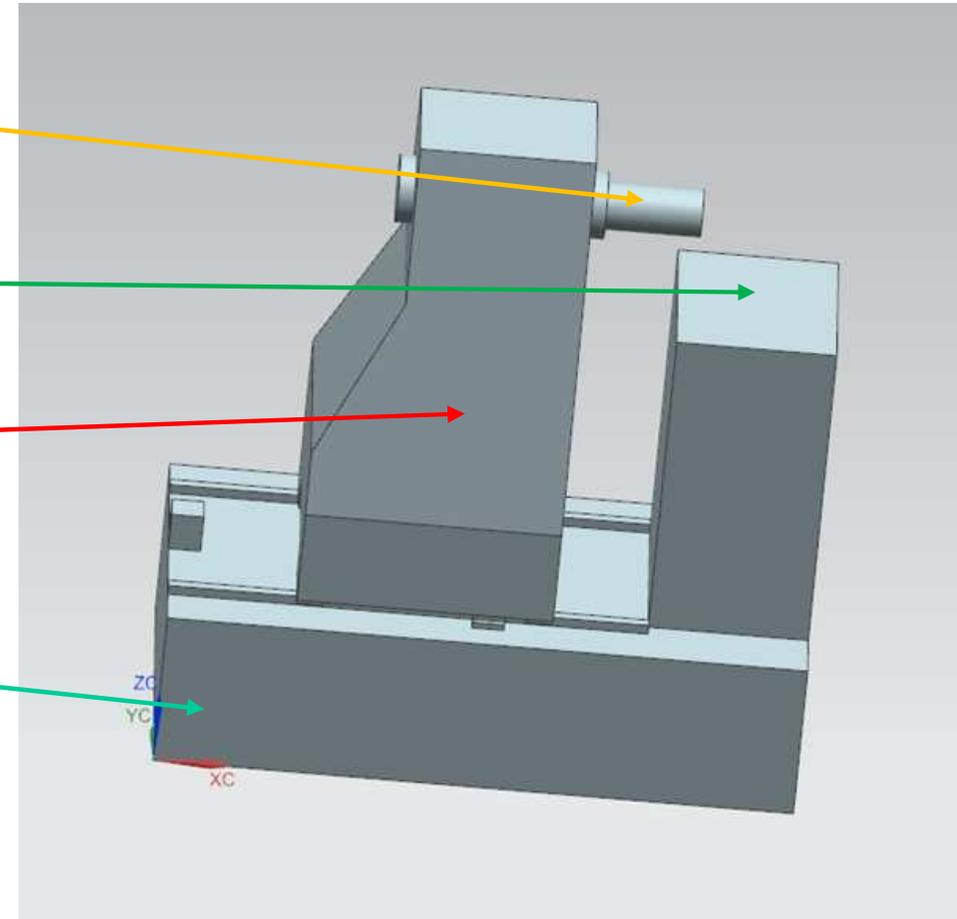


Ruckäquiv. Filter – entspricht dem Energieinhalt des Verfahrprofils

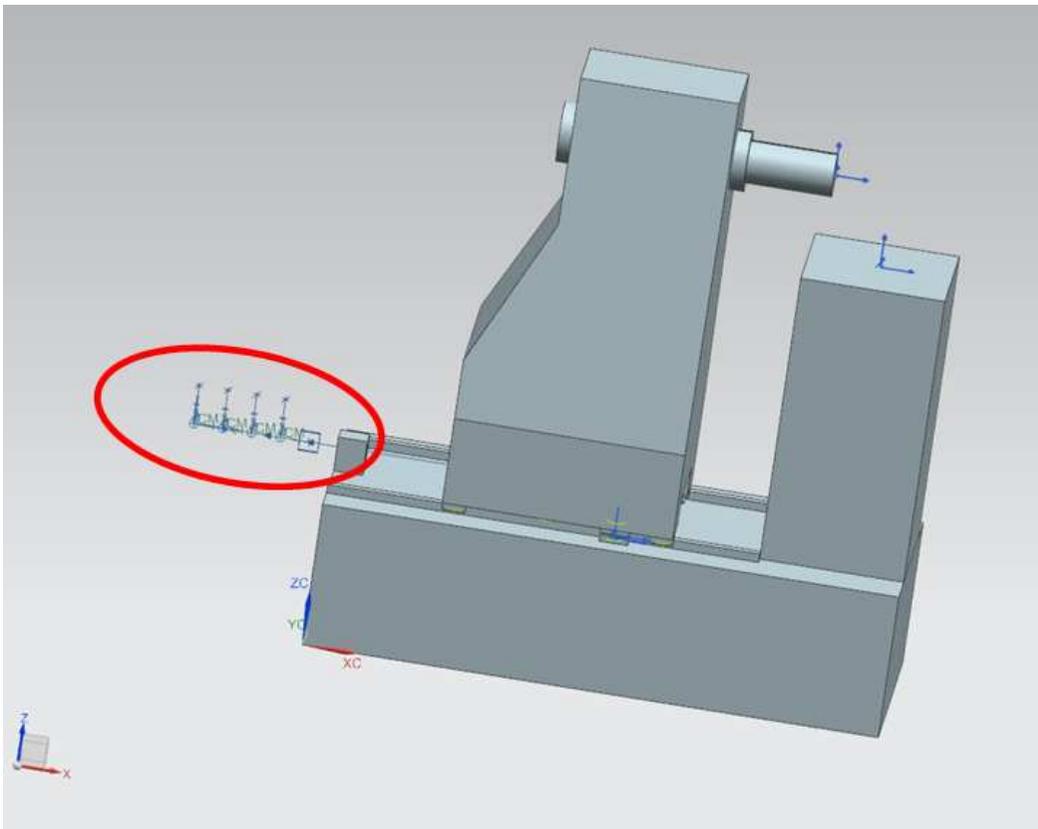
Wir haben ein Grundgestell mit 4 Aufstellelementen an den äußeren Ecken des Grundgestells. Auf dem Grundgestell befinden sich 2 lineare Führungssysteme mit 4 linearen Schuhen. Der Turm ist in X-Achse beweglich und beinhaltet eine Hauptspindel, die modellmäßig nicht nachgebildet ist. Auf dem Grundgestell 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)



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.



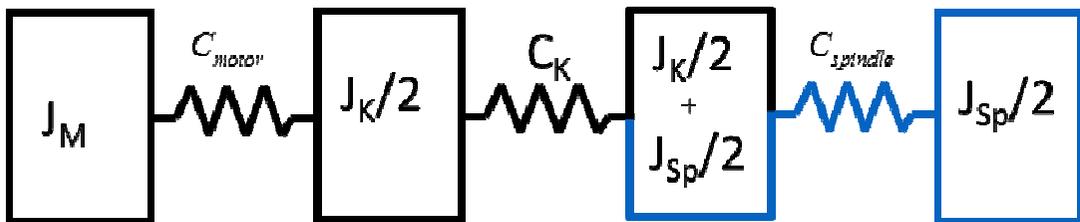
# Modellbildung des Antriebsstranges

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

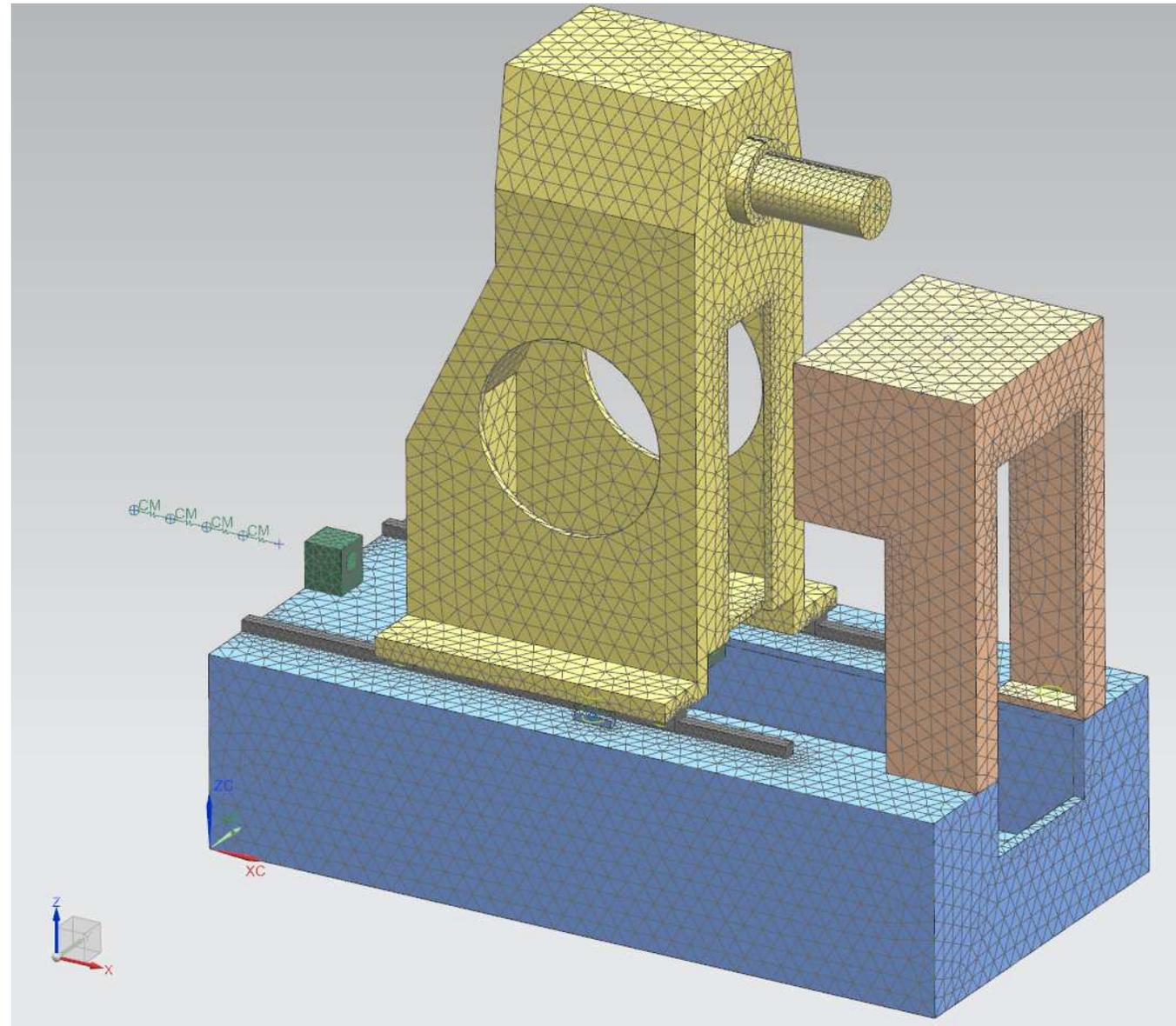


Die rotierenden Massen werden umgerechnet in lineare Massen ( $m=J \times i^2$ ) und die Torsionsfedern werden umgerechnet in lineare Federn ( $c_{trans} = c_{rot} \times i^2$ ).

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

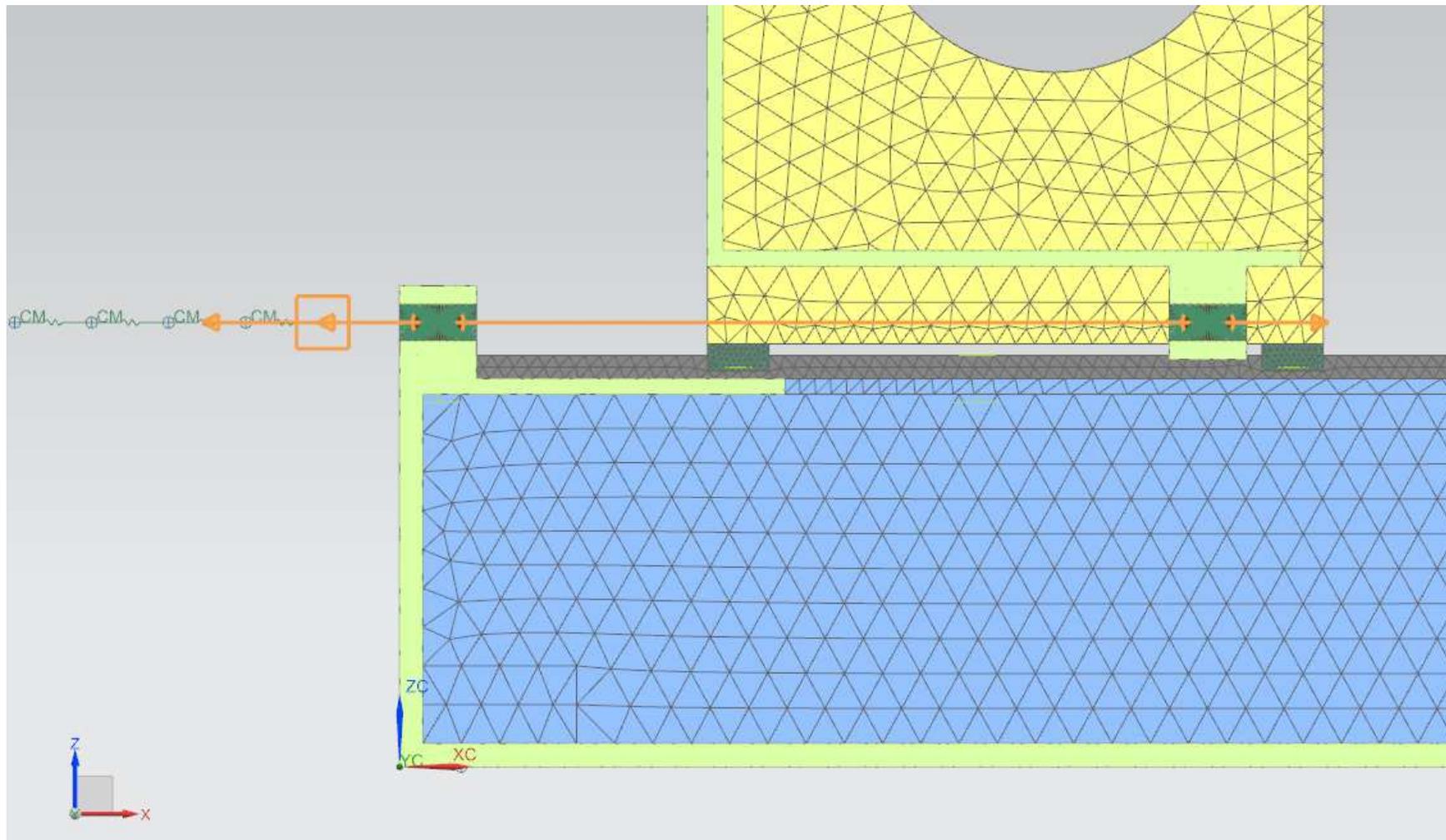
Die Kugelrollspindel wird durch das Modell des Antriebsstranges ersetzt.

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



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)

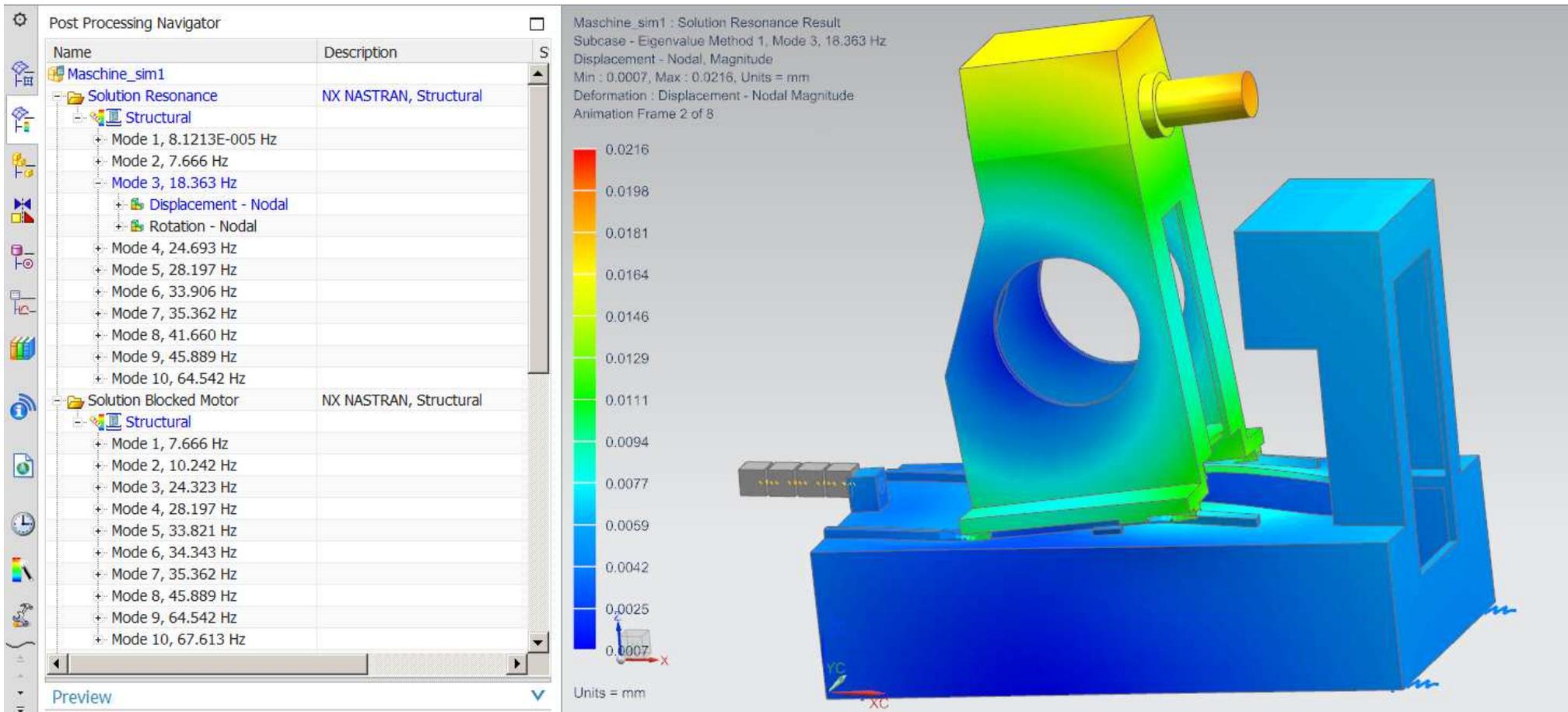
[Resonanz\\_Mode1](#)

[Tilger\\_Mode1](#)

[Resonanz\\_Mode3](#)

[Tilger\\_Mode2](#)

[Tilger\\_Mode3](#)

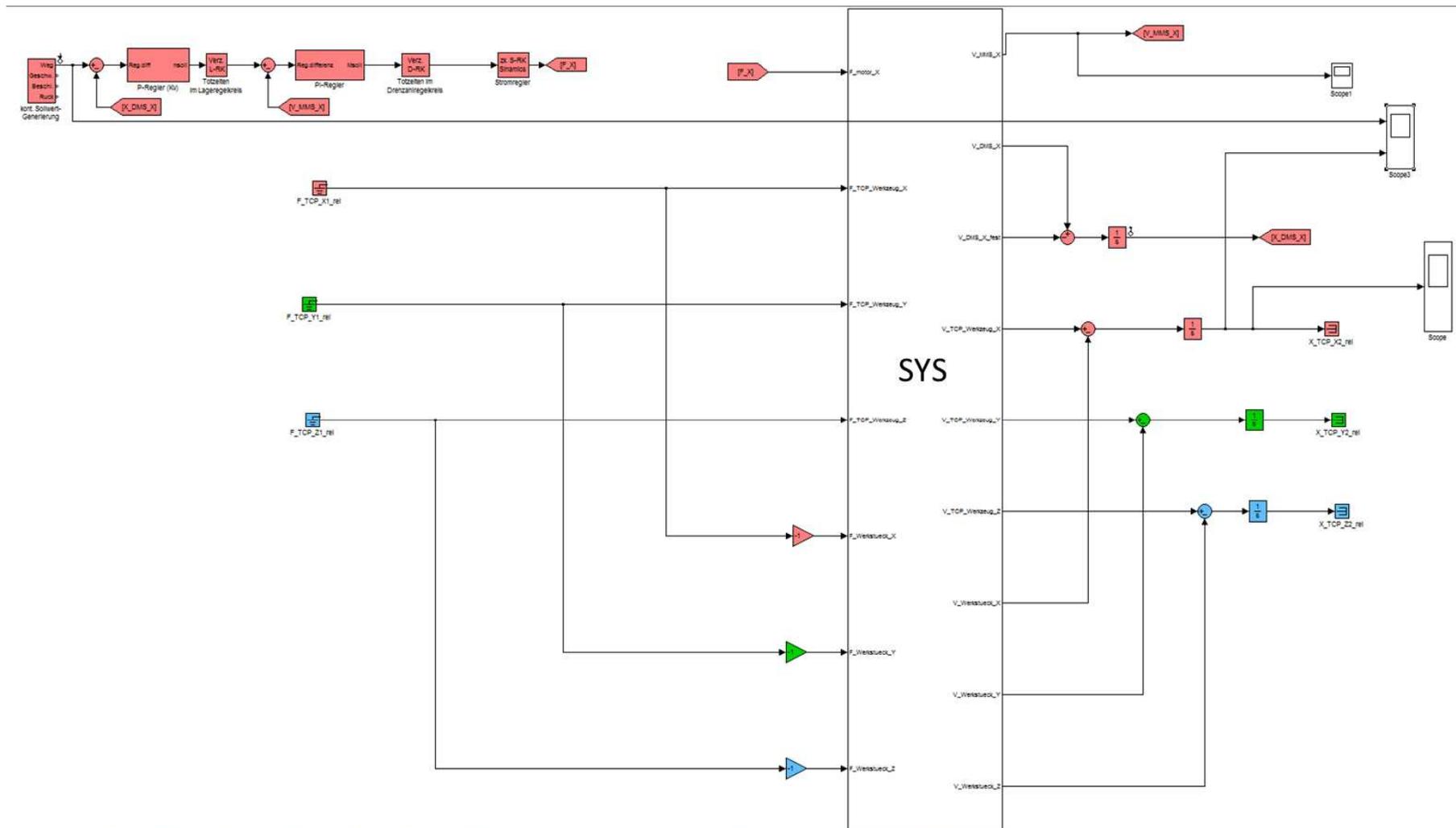


Ziel ist es, mit NX eine Beschreibung der Maschine im Zustandsraum zu erzeugen, welche in Matlab/Simulink in das Modell der Antriebsregelung als Regelstrecke eingefügt werden kann.

- 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.
```

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.

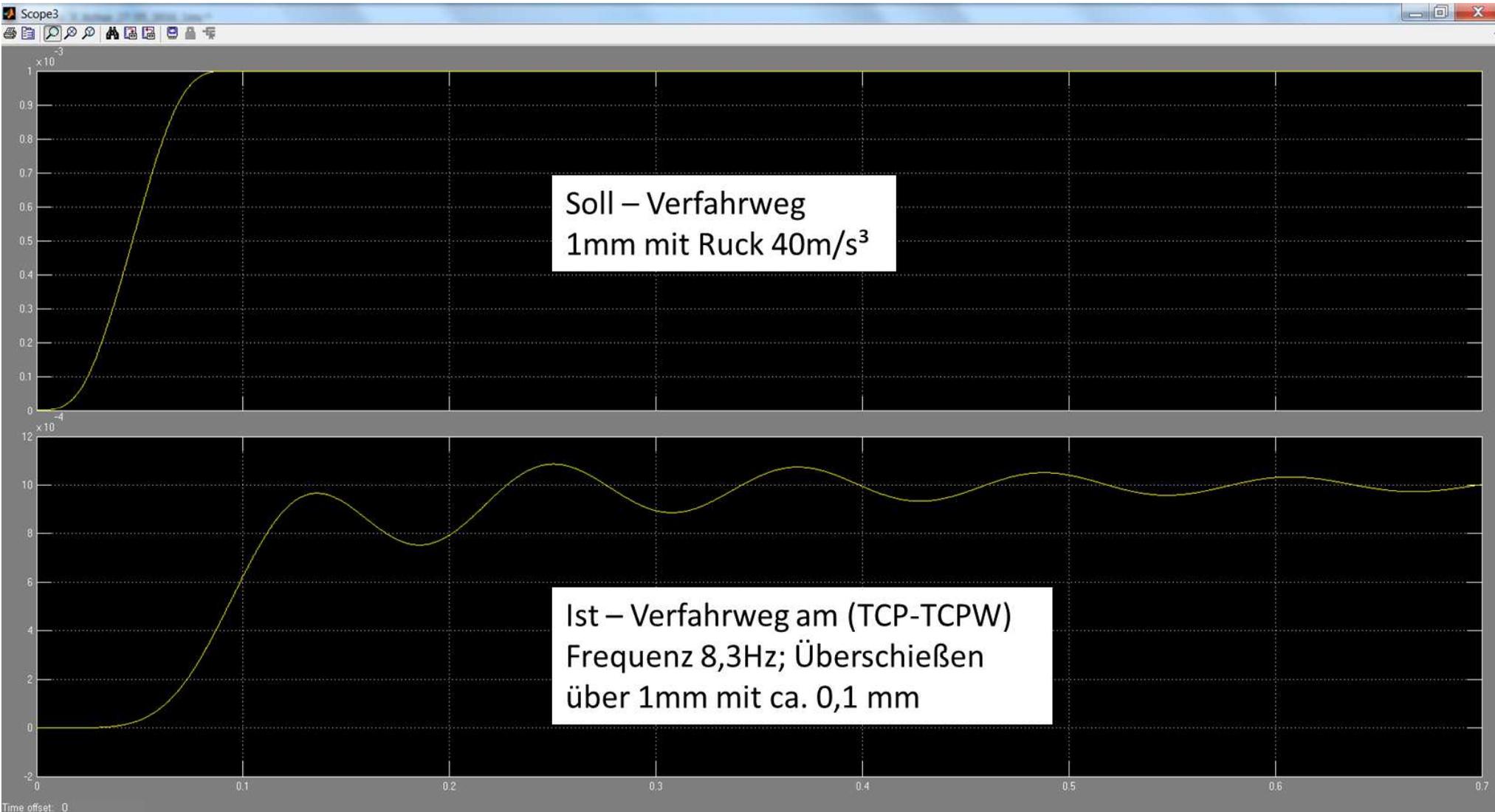


Die Dynamik der Antriebsregelungssysteme ist gekennzeichnet durch die Abtastzeiten des Lageregler, des Drehzahlreglers und des Stromreglers. Das Antriebssystem A hat die Werte 1ms/125µs/125µs und ist im Werkzeugmaschinen Bereich ein Standard-System. Das Antriebssystem B hat die Werte 4ms/500µs/500µs und wird für Produktionsmaschinen eingesetzt.

- Antriebssystem A1:  $K_v=1\_K_p=4\_T_n=20\text{ms\_}1\text{ms\_}125\mu\text{s\_}125\mu\text{s}$
- Antriebssystem A2:  $K_v=1\_K_p=4\_T_n=40\text{ms\_}1\text{ms\_}125\mu\text{s\_}125\mu\text{s}$
- Antriebssystem A3:  $K_v=1\_K_p=4\_T_n=80\text{ms\_}1\text{ms\_}125\mu\text{s\_}125\mu\text{s}$
- Antriebssystem B1:  $K_v=0.8\_K_p=1\_T_n=80\text{ms\_}4\text{ms\_}500\mu\text{s\_}500\mu\text{s}$

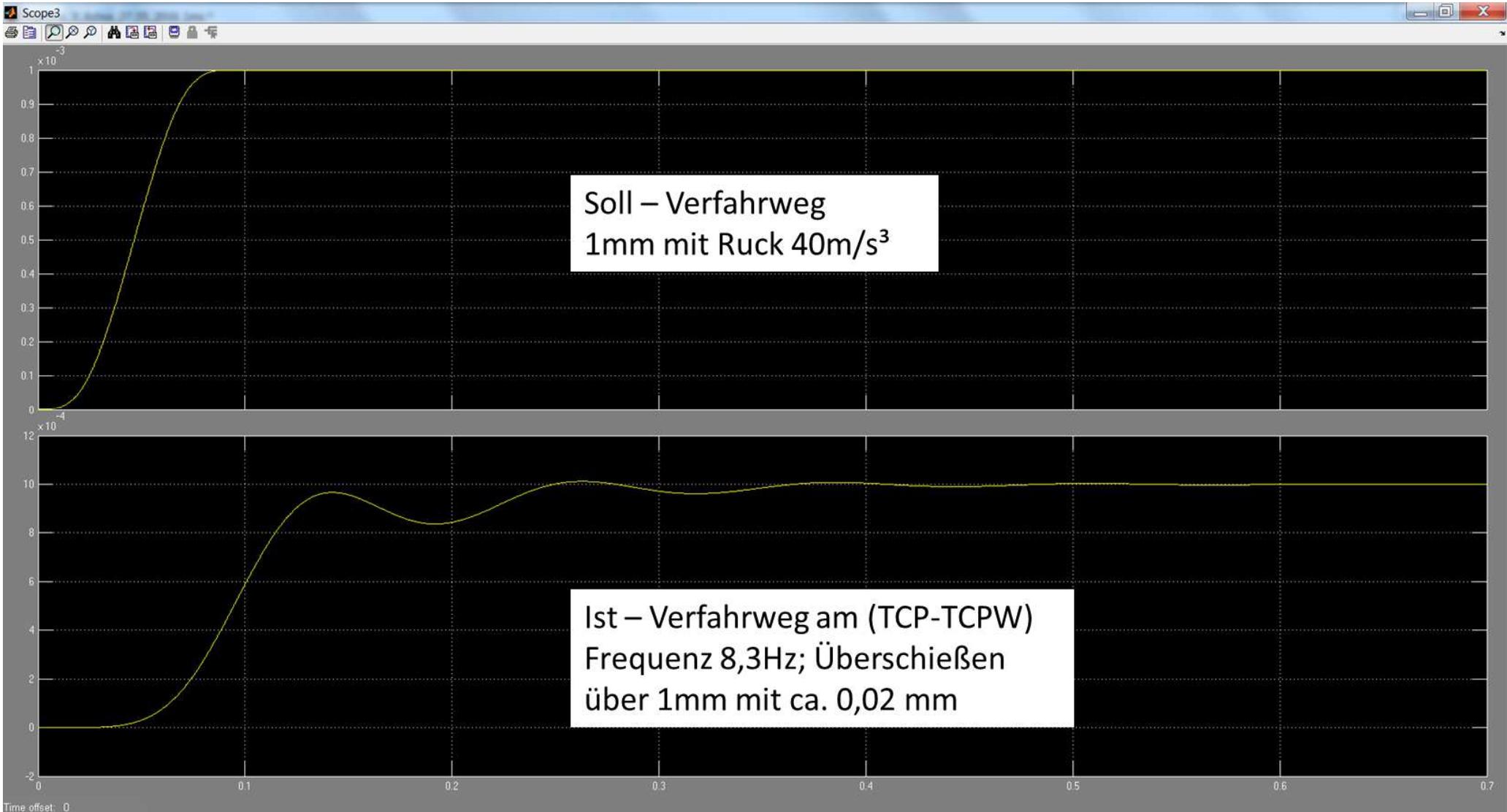
# Simulation des Positioniervorganges in Matlab/Simulink

Antriebssystem A1 ( $K_v=1$ \_ $K_p=4$ \_ $T_n=20\text{ms}$ \_1ms\_125 $\mu\text{s}$ \_125 $\mu\text{s}$ )



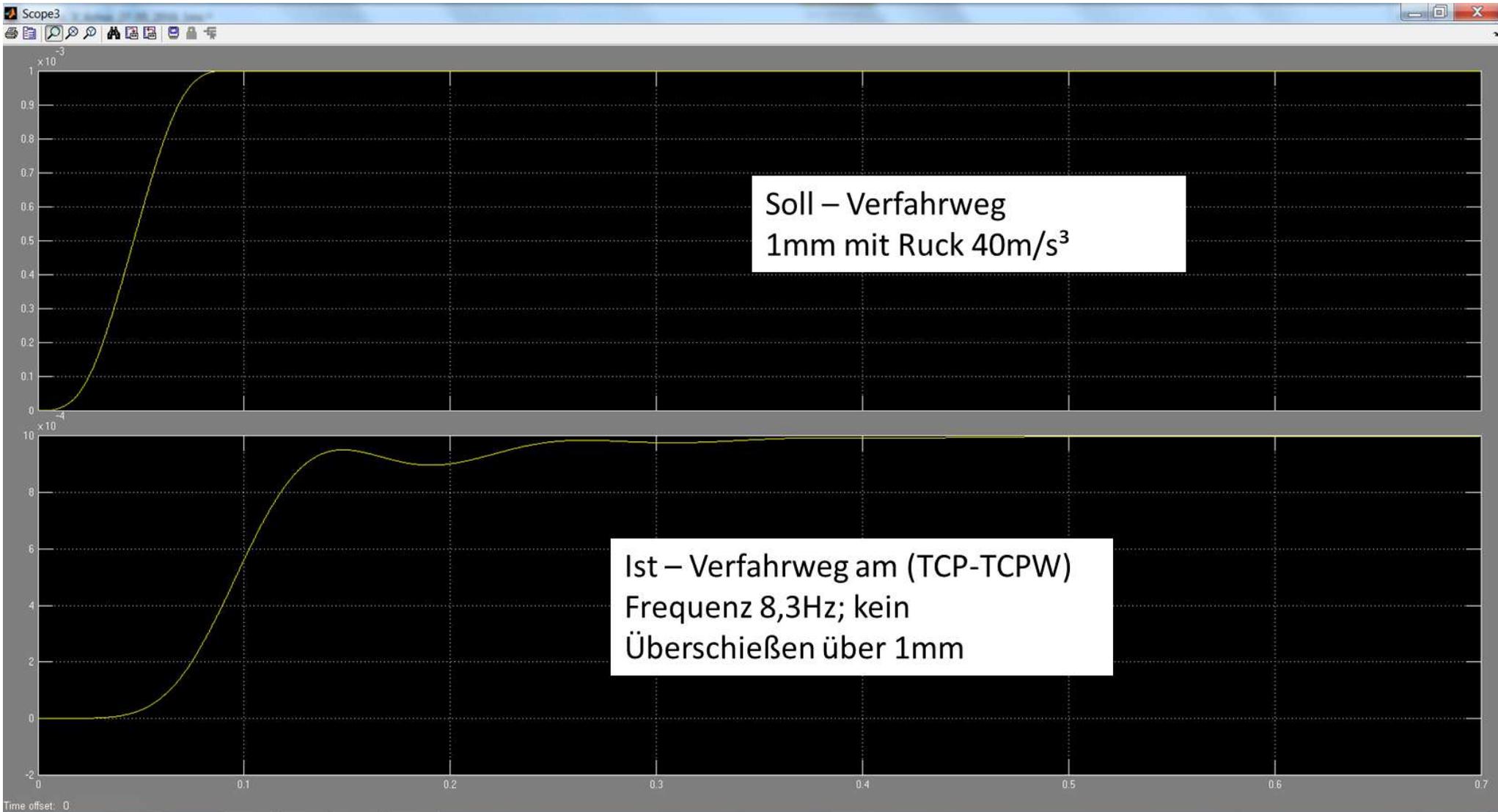
# Simulation des Positioniervorganges in Matlab/Simulink

Antriebssystem A2 ( $K_v=1$ \_ $K_p=4$ \_ $T_n=40\text{ms}$ \_1ms\_125 $\mu\text{s}$ \_125 $\mu\text{s}$ )



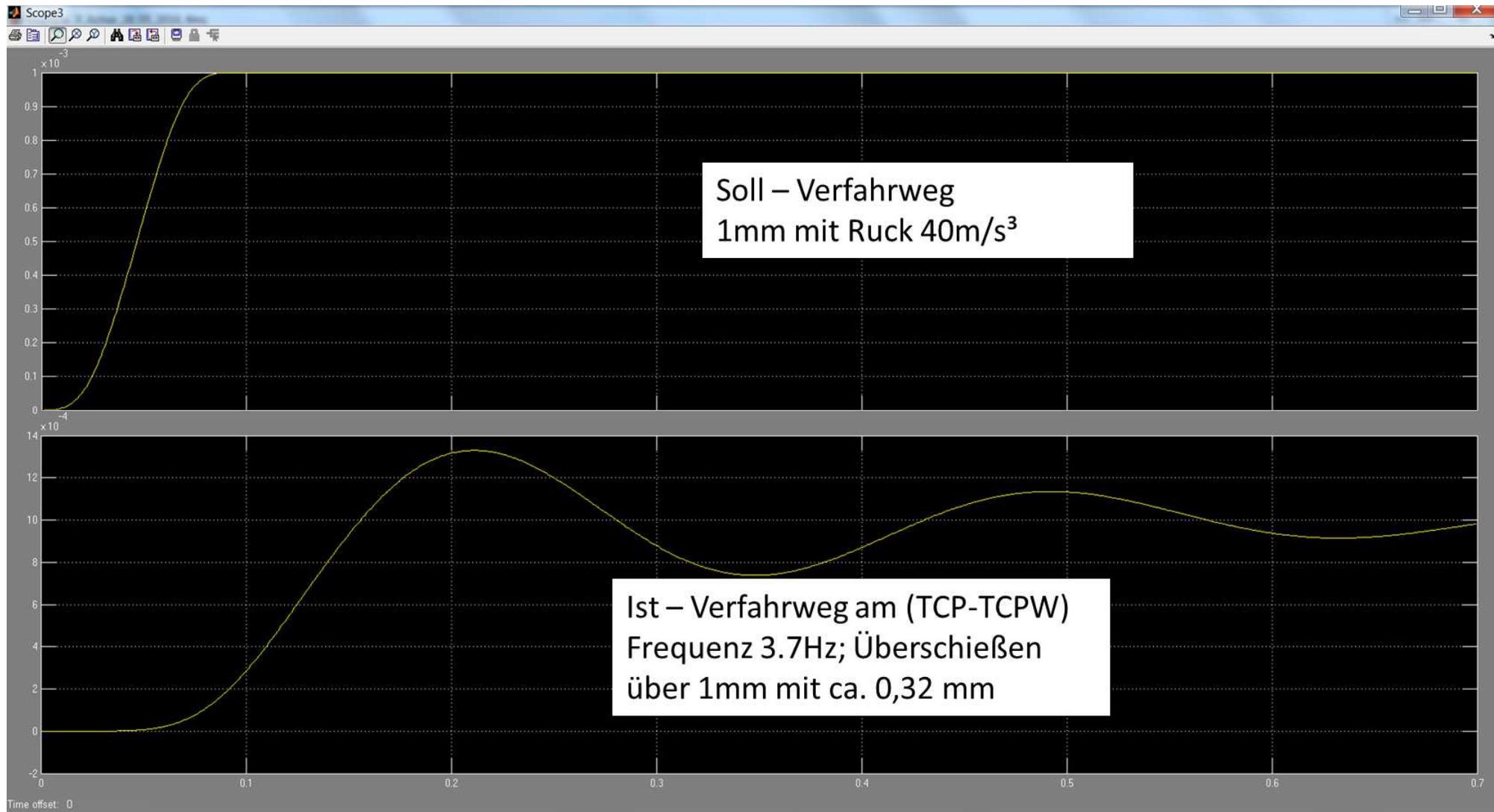
# Simulation des Positioniervorganges in Matlab/Simulink

Antriebssystem A3 ( $K_v=1$ \_ $K_p=4$ \_ $T_n=80ms$ \_ $1ms$ \_ $125\mu s$ \_ $125\mu s$ )



# Simulation des Positioniervorganges in Matlab/Simulink

Antriebssystem B1 ( $K_v=0.8$ \_ $K_p=1$ \_ $T_n=80\text{ms}$ \_4ms\_500 $\mu\text{s}$ \_500 $\mu\text{s}$ )

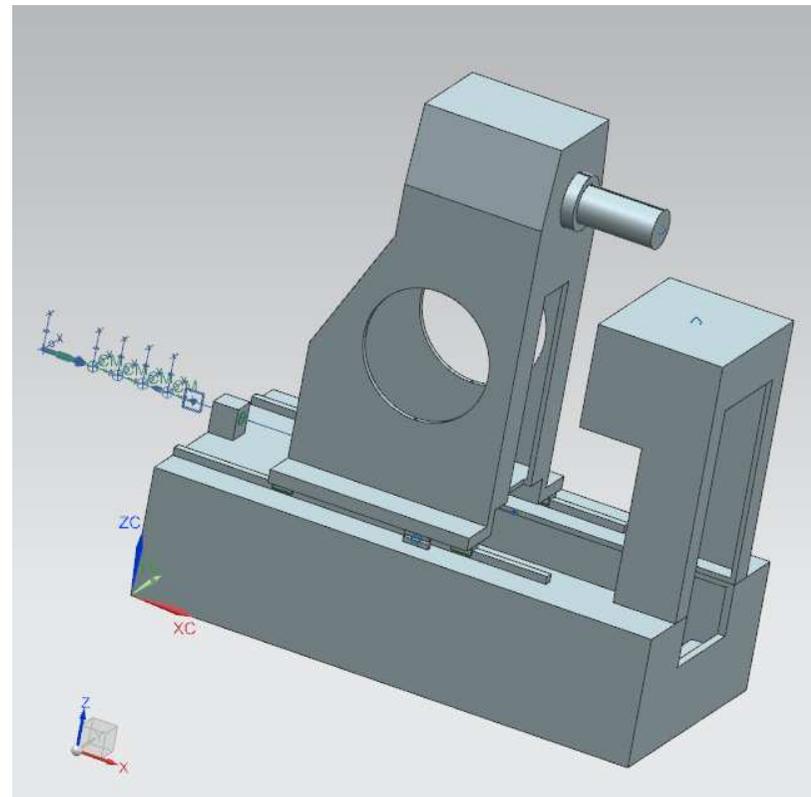
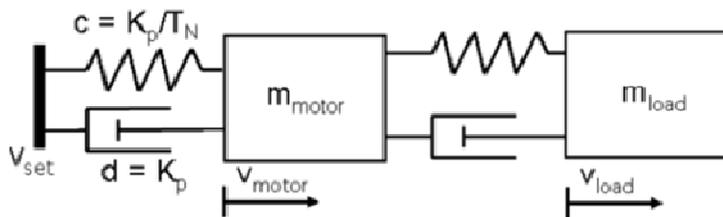


## Zusammenfassung der Ergebnisse:

<b>A1: Kv=1_Kp=4_Tn=20ms_1ms_125µs_125µs</b> Ist – Verfahrenweg am (TCP-TCPW) Frequenz 8,3Hz; Überschießen über 1mm mit ca. 0,1 mm	<b>A2:Kv=1_Kp=4_Tn=40ms_1ms_125µs_125µs</b> Ist – Verfahrenweg am (TCP-TCPW) Frequenz 8,3Hz; Überschießen über 1mm mit ca. 0,02 mm
<b>A3:Kv=1_Kp=4_Tn=80ms_1ms_125µs_125µs</b> Ist – Verfahrenweg am (TCP-TCPW) Frequenz 8,3Hz; kein Überschießen über 1mm	<b>B1:Kv=0.8_Kp=1_Tn=80ms_4ms_500µs_500µs</b> Ist – Verfahrenweg am (TCP-TCPW) Frequenz 3.7Hz; Überschießen über 1mm mit ca. 0,32 mm

# Simulation des Positioniervorganges in NX

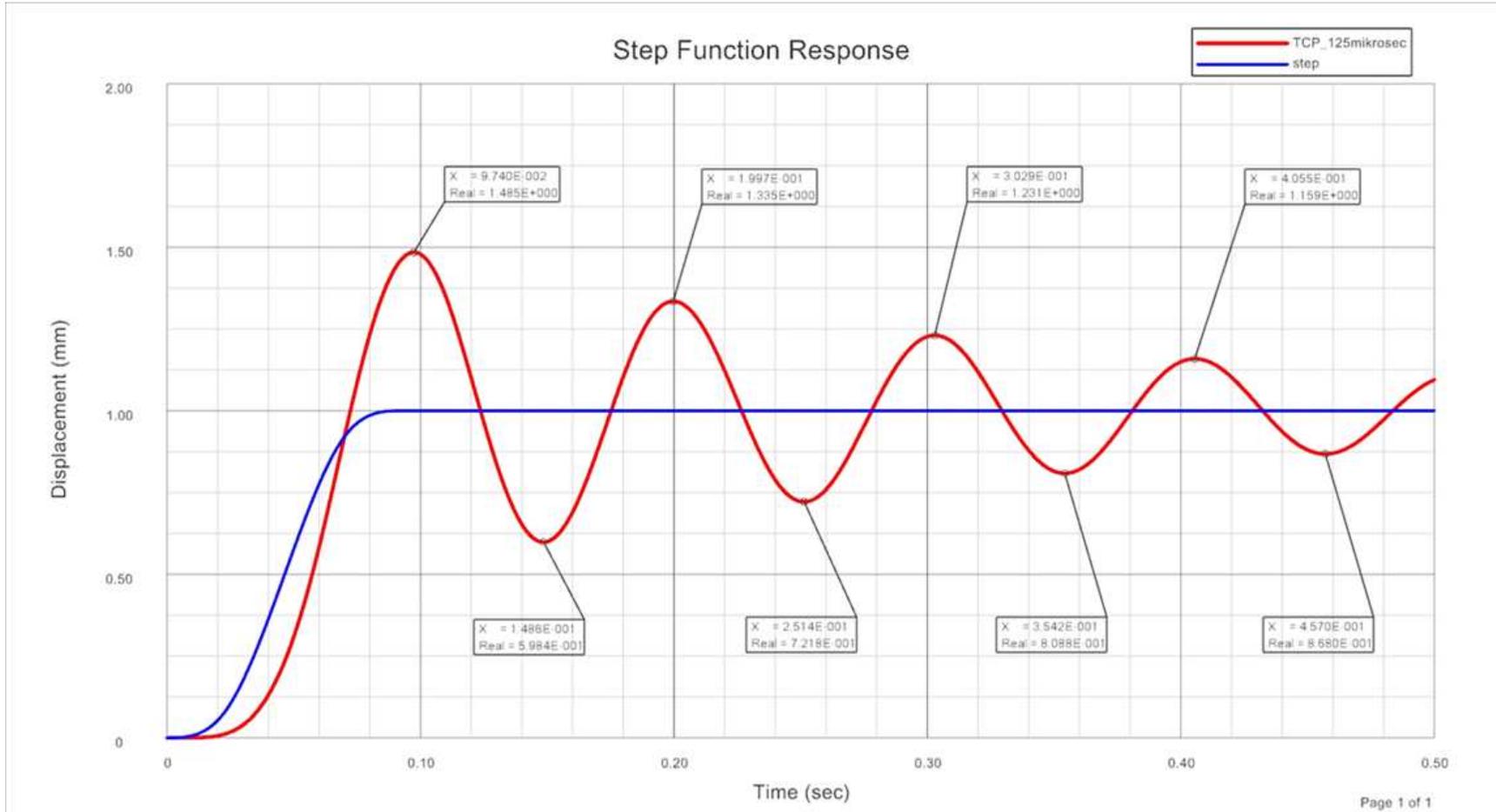
Vereinfachte Nachbildung der Antriebsregelung in NX [2]: Im Maschinenbau wird oft die Regelung einer Achse durch ein Regelungs-Feder und –Dämpfer (RFD) Ersatzsystem nachgebildet. Man kann sich das vereinfacht so vorstellen: Die Regelung des Motors ist so dynamisch, dass die zu verfahrenen Sollwerte vom Motor durchgesetzt werden. Das RFD hat allerdings keine Bandbreite und keine geschlossenen Regelkreise. Daher kann man nicht erwarten, dass die Schwingamplituden richtig wiedergegeben werden. Die Frequenzen, die beim Positioniervorgang auftreten, können mit der RFD Methode erkannt werden.



- Solution 112 Modal Transient Response
- Erweitern des Simulationsmodelles um die regelungstechnische Ersatzfeder:
  - Antriebssysteme A:
    - Feder: 133056N/mm
    - Dämpfer: 399170Ns/m
  - Antriebssystem B:
    - Feder: 33264N/mm
    - Dämpfer: 99792Ns/m
- Modale Dämpfung definieren
- Einleitung des Sprunges an der Ersatzfeder
- Output Requests: Ausgabe des Displacements für die Knoten an TCP, TCPW und an der Ersatzfeder als XY-Plot

## Antriebssysteme A:

Das Ergebnis am TCP liefert ein Überschwingen mit 0,5mm und eine Frequenz von 9,7Hz. Die Tilger Eigenfrequenz, die frequenzmäßig am nächsten liegt ist, ist Mode 2 bei 9,726Hz. D.h. Mode 2 ist für das Positionierverhalten in der Frequenz verantwortlich. Die Amplitude des Überschießens kann nur zusammen mit der Regelung bestimmt werden.

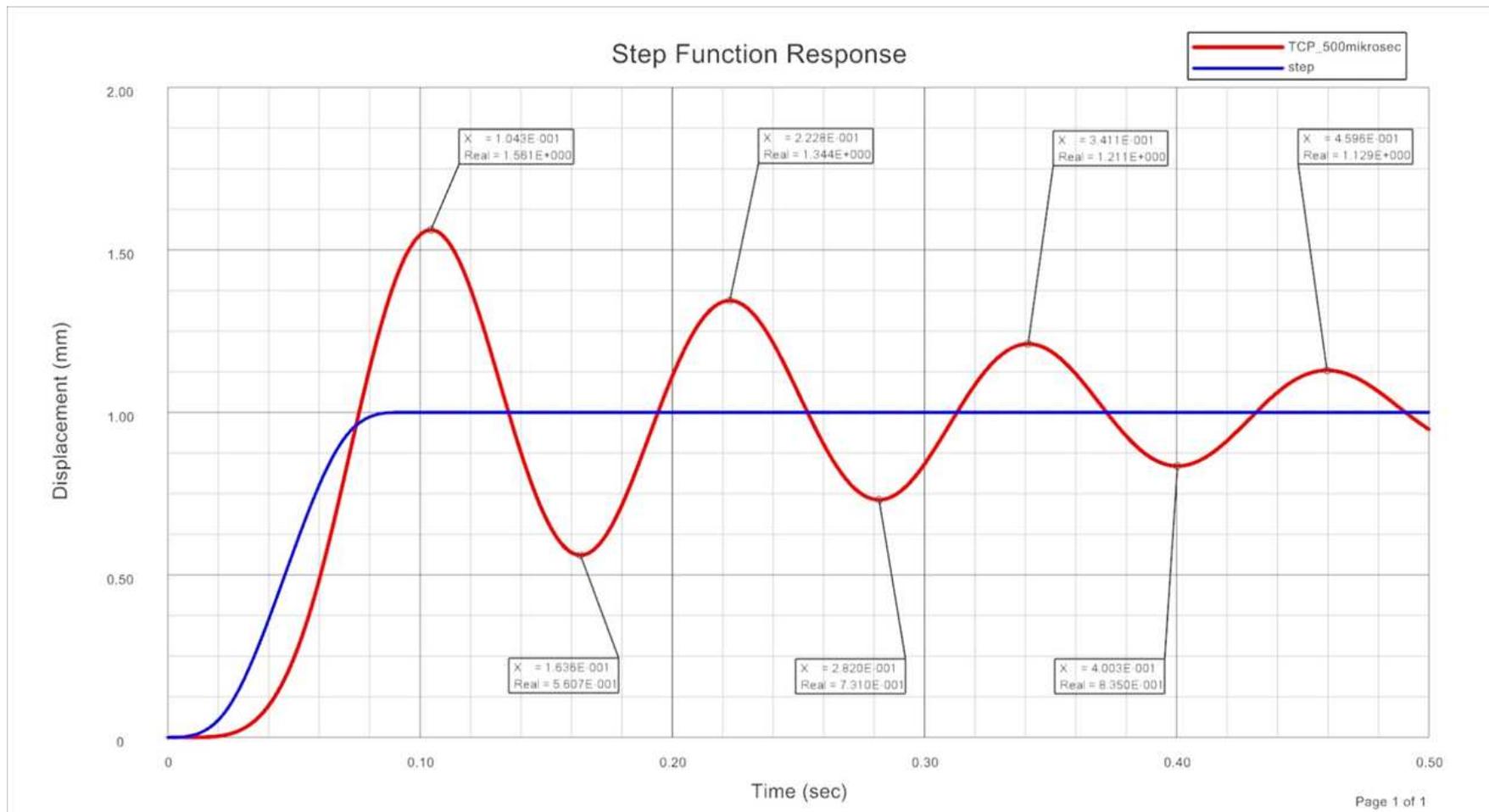


Tilger Mode2

Maschine_sim2	
[-] Solution Resonance	N
[-] [-] Structural	
[-] Solution Blocked Motor	N
[-] [-] Structural	
[-] [-] [-] Mode 1, 7.666 Hz	
[-] [-] [-] Mode 2, 9.726 Hz	
[-] [-] [-] Mode 3, 24.246 Hz	
[-] [-] [-] Mode 4, 28.197 Hz	
[-] [-] [-] Mode 5, 31.973 Hz	
[-] [-] [-] Mode 6, 33.926 Hz	
[-] [-] [-] Mode 7, 35.362 Hz	
[-] [-] [-] Mode 8, 45.889 Hz	
[-] [-] [-] Mode 9, 63.657 Hz	
[-] [-] [-] Mode 10, 64.542 Hz	

## Antriebssystem B:

Das Ergebnis am TCP liefert ein Überschwingen mit 0,56mm und eine Frequenz von 8,4Hz. Die Tilger Eigenfrequenz, die frequenzmäßig am nächsten liegt ist Mode 2 bei 8,437Hz. D.h. Mode 2 ist für das Positionierverhalten in der Frequenz verantwortlich. Die Amplitude des Überschießens kann nur zusammen mit der Regelung bestimmt werden.



Tilger Mode2

- Maschine\_sim3
  - Solution Resonance
    - Structural
  - Solution Blocked Motor
    - Structural
      - Mode 1, 7.666 Hz
      - Mode 2, 8.437 Hz
      - Mode 3, 23.731 Hz
      - Mode 4, 26.876 Hz
      - Mode 5, 28.197 Hz
      - Mode 6, 33.910 Hz
      - Mode 7, 35.362 Hz
      - Mode 8, 45.889 Hz
      - Mode 9, 46.751 Hz
      - Mode 10, 64.542 Hz

Gegenüber den regelungstechnischen Ersatzfedern (RFD) ist die tatsächliche Regelung, nachgebildet in Matlab/Simulink offensichtlich noch „weicher“, da die Schwingungen, die beim Positionieren auftreten, bei 8,3Hz bzw. 3.7 Hz liegen. Ein Kriterium müsste man zum Vergleich noch anführen: Wann erreicht der Ist-Verfahrweg das erste Mal die 1mm. Dies zeigt das die Ergebnisse mit RFD zu optimistisch sind. Es gibt keinen Schleppabstand (Lageregler) und keinen PID Regler für den Drehzahlregler.

Insofern gibt die RFD Methode nur eine Aussage über die **relevante Schwingungsform für das Positionierverhalten. Dies ist die wichtigste Information, die der Maschinenbauer benötigt um einen verbesserten Entwurf zu konstruieren. Insofern kann die RFD Methode für den mechanischen Konstrukteur eine große Hilfe sein und er verlässt nicht seinen Erfahrungsbereich.**

- CAD => FEM Modell:
  - mit NX Advanced Simulation
- Eigenwerte / Eigenformen:
  - Solution 103 Real Eigenvalue in NX Advanced Simulation
  - Auswertung der Eigenwerte und Eigenformen
  - Die Eigenwerte und Eigenformen (Modell mit RFD) kombiniert mit den Ergebnissen des Positioniervorganges können für die Suche nach den Problemstellen der Maschine hilfreich sein
- Zustandsraummatrix für Matlab/Simulink erzeugen:
  - Solution 103 Flexible Body in NX Advanced Simulation
- Positioniervorgang simulieren:
  - mit Matlab/Simulink
  - Einlesen der Zustandsraummatrix aus NX
- Positioniervorgang (vereinfacht) simulieren:
  - Solution 112 Modal Transient Response in NX Advanced Simulation
  - Simulationsmodell erweitert um die regelungstechnische Ersatzfeder
  - Einschränkung: Amplitude nicht verwendbar

## 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.