TECHNISCHE UNIVERSITÄT CHEMNITZ
Professur Montage- und Handhabungstechnik

CAD basierte Ermittlung des reduzierten Massenträgheitsmoments für periodisch arbeitende Mechanismen mit ProE und Mathcad

Dipl.-Ing. Falk Ebert

Inhalt:

1 Problemstellung

2 Vorgehensweise Bestimmung des MTM

3 Simulationsablauf mit ProE Mechanism und Mathcad

4 Ergebnisvergleich mit WinDam

5 Alternative Ermittlung des MTM mit MKS-Programmen

6 Torque Feedback Simulation

Anhang: Matcad-Arbeisblatt zur Berechnung des reduzierten MTM

Ermittlung des reduzierten Massenträgheitsmoments

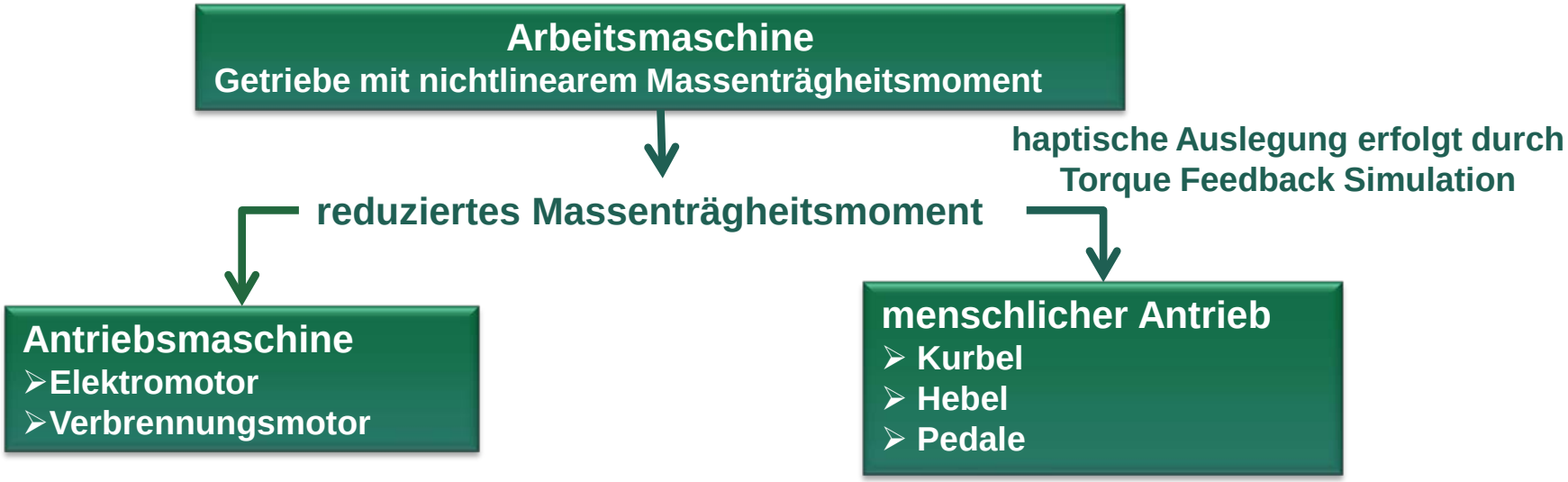
1 Problemstellung

Problemstellung:

Mehrkörpersystem-Programme besitzen im Allgemeinen keine Programmfunktion zur Ausgabe von reduzierten Massenträgheitsmomenten (red. MTM).

Das reduzierte Massenträgheitsmoment wird benötigt:
- **Auslegung von Antrieben und Durchführung von**
- **Torque Feedback Simulationen**

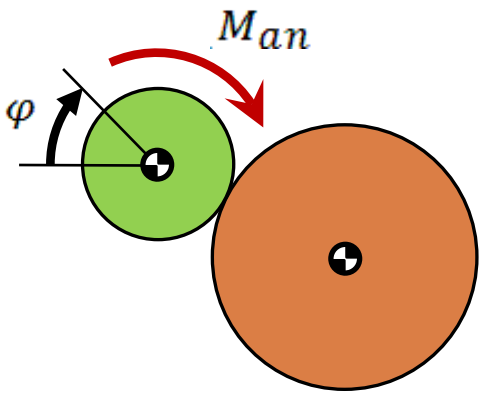
Ist der Verlauf des reduzierten MTM einer Arbeitsmaschine bekannt, so ist es zur Auslegung der Antriebsmaschine nicht erforderlich das MKS-Modell an den Antriebssystemhersteller weiterzugeben. Urheberechte können somit auf einfache Weise geschützt werden.



CAD/MKS basierte Bestimmung des konstanten Massenträgheitsmoments

konstante Übersetzung
z.B. Rädergetriebe

MKS-Modell



Berechnungsgleichung

$$J_{red} = \frac{M_{an}}{\ddot{\varphi}}$$

<u>Simulation</u>

- **Vorgabe einer konstanten Antriebsbeschleunigung**
- **Messung des erforderlichen Antriebsmoments**

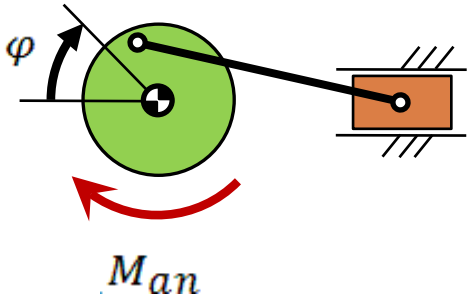
Ermittlung des reduzierten Massenträgheitsmoments

2 Vorgehensweise zur Bestimmung MTM

Bestimmung eines nicht konstanten Massenträgheitsmoments

z.B. Schubkurbelgetriebe

MKS-Modell



Berechnungsgleichung

$$J_{red}(\varphi)\cdot\ddot{\varphi}+\frac{1}{2}J'_{red}(\varphi)\cdot\dot{\varphi}^2=M_{an}(\varphi)$$

erste Simulation

- Vorgabe einer konstanten Antriebsgeschwindigkeit
- Messung des Antriebsmoments

$$J'_{red}(\varphi)=\frac{2M_{an}(\varphi)}{\dot{\varphi}^2}$$

periodisches Näherungspolynom (Fourier-Reihe) - Mathcad

$$J'_{red}(\varphi)=c_0+\sum_{i=1}^{n}c_{2i-1}\cos(i\varphi)+c_{2i}\sin(i\varphi)$$

zweite Simulation

- Vorgabe einer konstanten Antriebsbeschleunigung
- Messung des Antriebsmoments

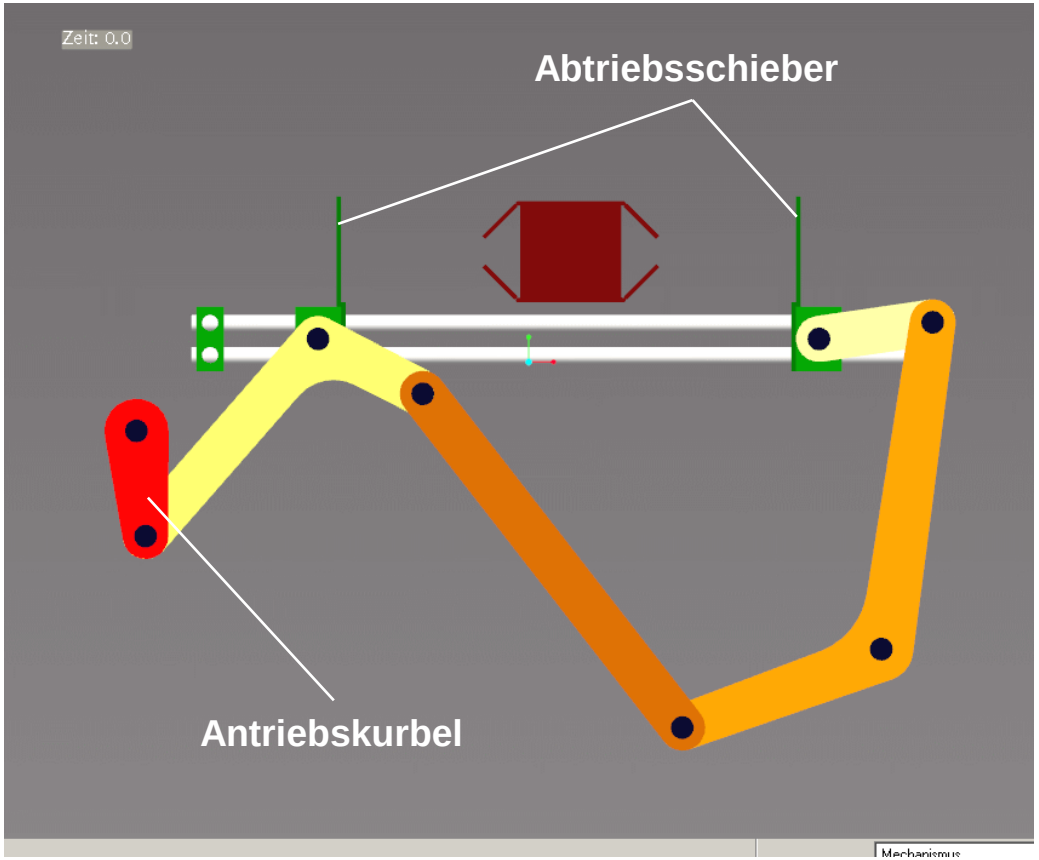
$$J_{red}(\varphi)=\frac{M_{an}(\varphi)-\frac{1}{2}J'_{red}(\varphi)\cdot\dot{\varphi}^2}{\ddot{\varphi}}$$

$$J_{red}(\varphi)=c_0+\sum_{i=1}^{n}c_{2i-1}\cos(i\varphi)+c_{2i}\sin(i\varphi)$$

periodisches Näherungspolynom

Voraussetzungen zur Ermittlung des reduzierten Massenträgheitsmoments

- nur starre Körper
- zwangläufiger Mechanismus mit Freiheitsgrad 1
- keine technologischen Kräfte
- Schwerkraft ist deaktiviert
- keine Federn oder Dämpfer
- keine Lagerreibung
- keine Lagerspiele
- stetiger und periodischer MTM-Verlauf



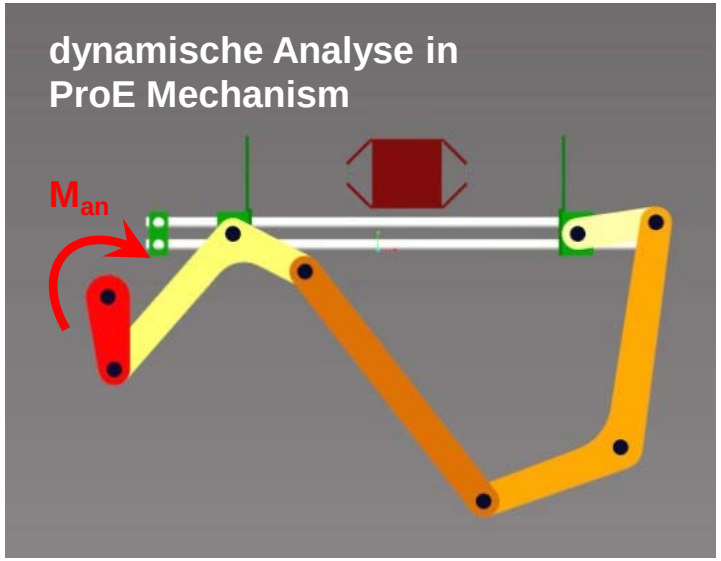
Beispiel: Verpackungsmaschine in ProE Mechanism

Ermittlung des reduzierten Massenträgheitsmoments

3 Simulationsablauf mit ProE Mechanism und Mathcad

ProE Mechanism (MKS)

erste Simulation mit konstanter Antriebsgeschwindigkeit



zweite Simulation mit konstanter Antriebsbeschleunigung

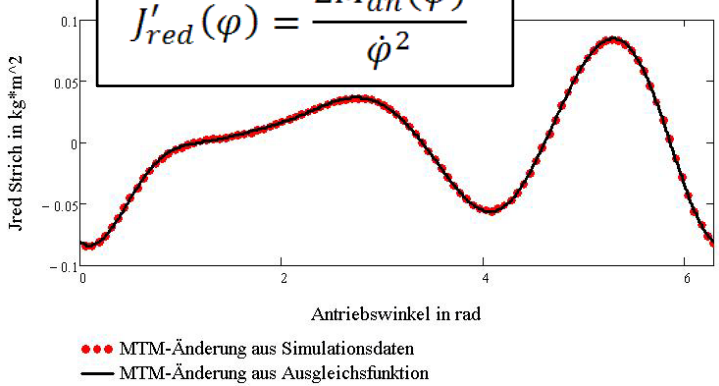
1 s Simulationszeit mit 100 Schritten

Textfile $M_{an}(\varphi)$

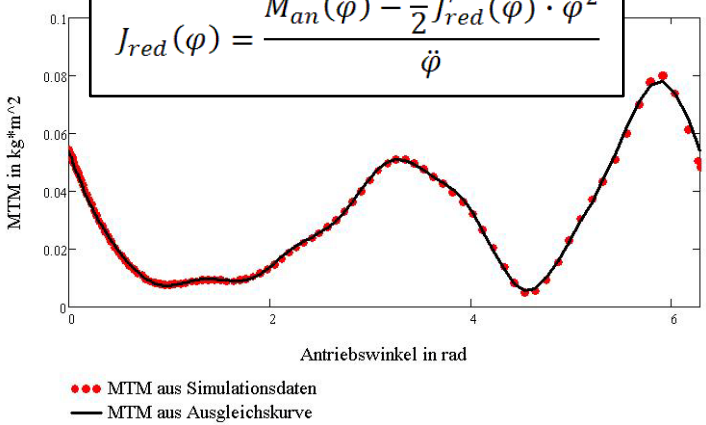
Textfile $M_{an}(\varphi)$

Mathcad

$$J'_{red}(\varphi) = \frac{2M_{an}(\varphi)}{\dot{\varphi}^2}$$



$$J_{red}(\varphi) = \frac{M_{an}(\varphi) - \frac{1}{2}J'_{red}(\varphi)\cdot\dot{\varphi}^2}{\ddot{\varphi}}$$



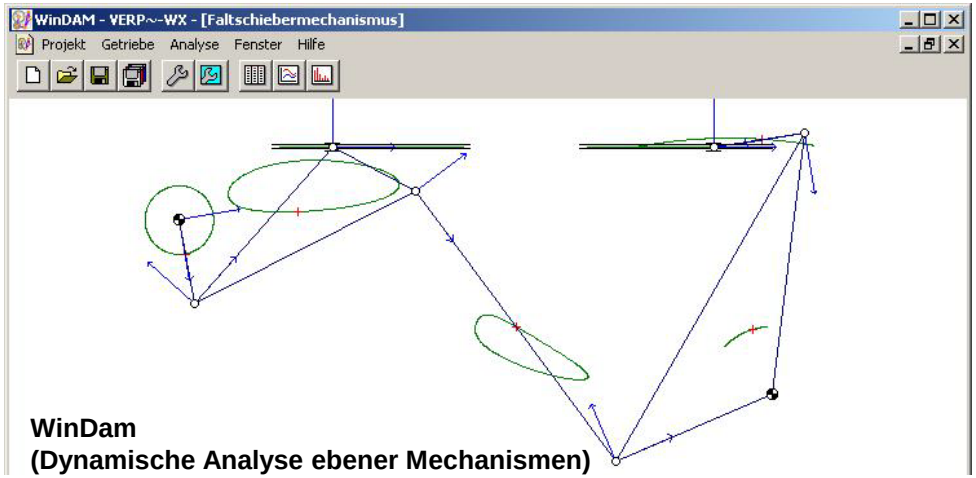
Hinweis: Die erste und zweite Simulation kann in ProE auch in eine Antriebsfunktion zusammengefasst werden. Damit ist nur noch ein Simulationsablauf erforderlich.

4 Ergebnisvergleich mit WinDam

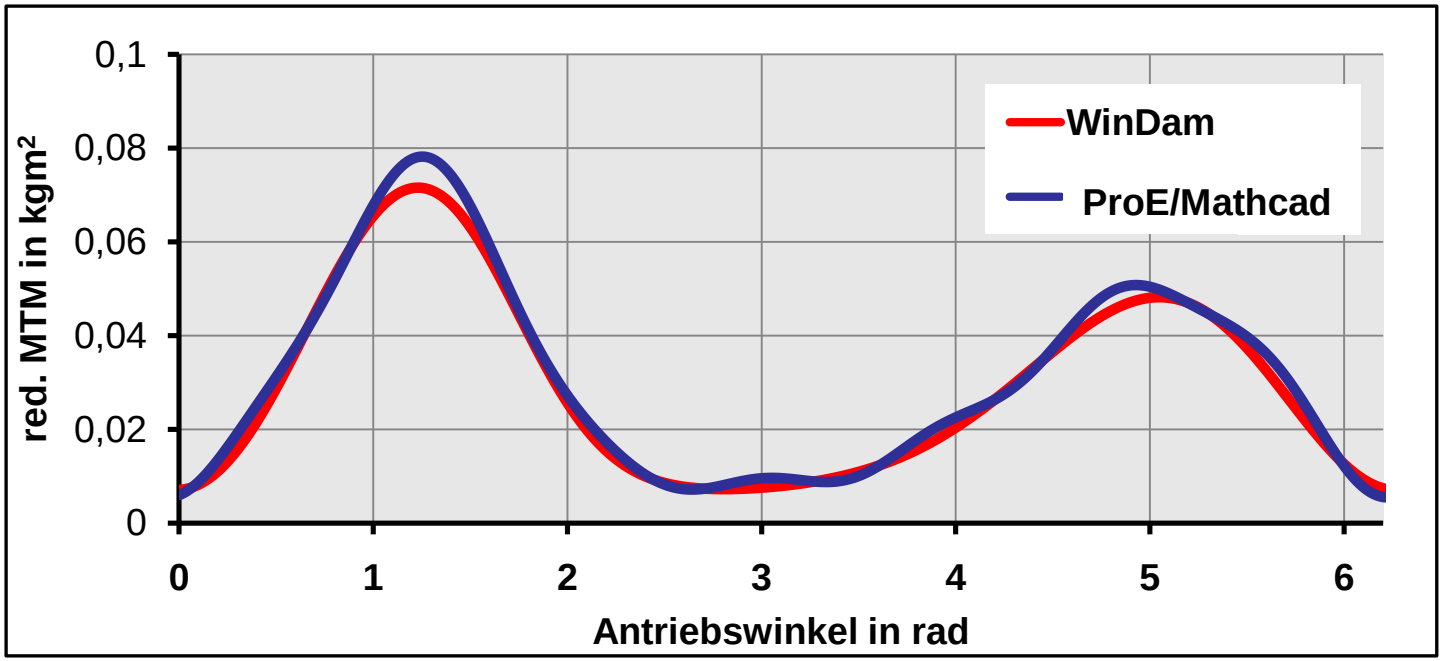
Vergleich mit WinDam

Abweichungen resultieren aus:

- genauere Geometriemodellierung innerhalb von ProE
- Approximation der diskreten Verläufe von reduzierten Massenträgheitsmoment und deren Ableitung in Mathcad



WinDam
(Dynamische Analyse ebener Mechanismen)



Alternative Bestimmung mit MKS-Programm durch eine Parameterstudie

Variation der Anfangslage des Mechanismus
→ Messung des Antriebsmoments unter konstanter Beschleunigung

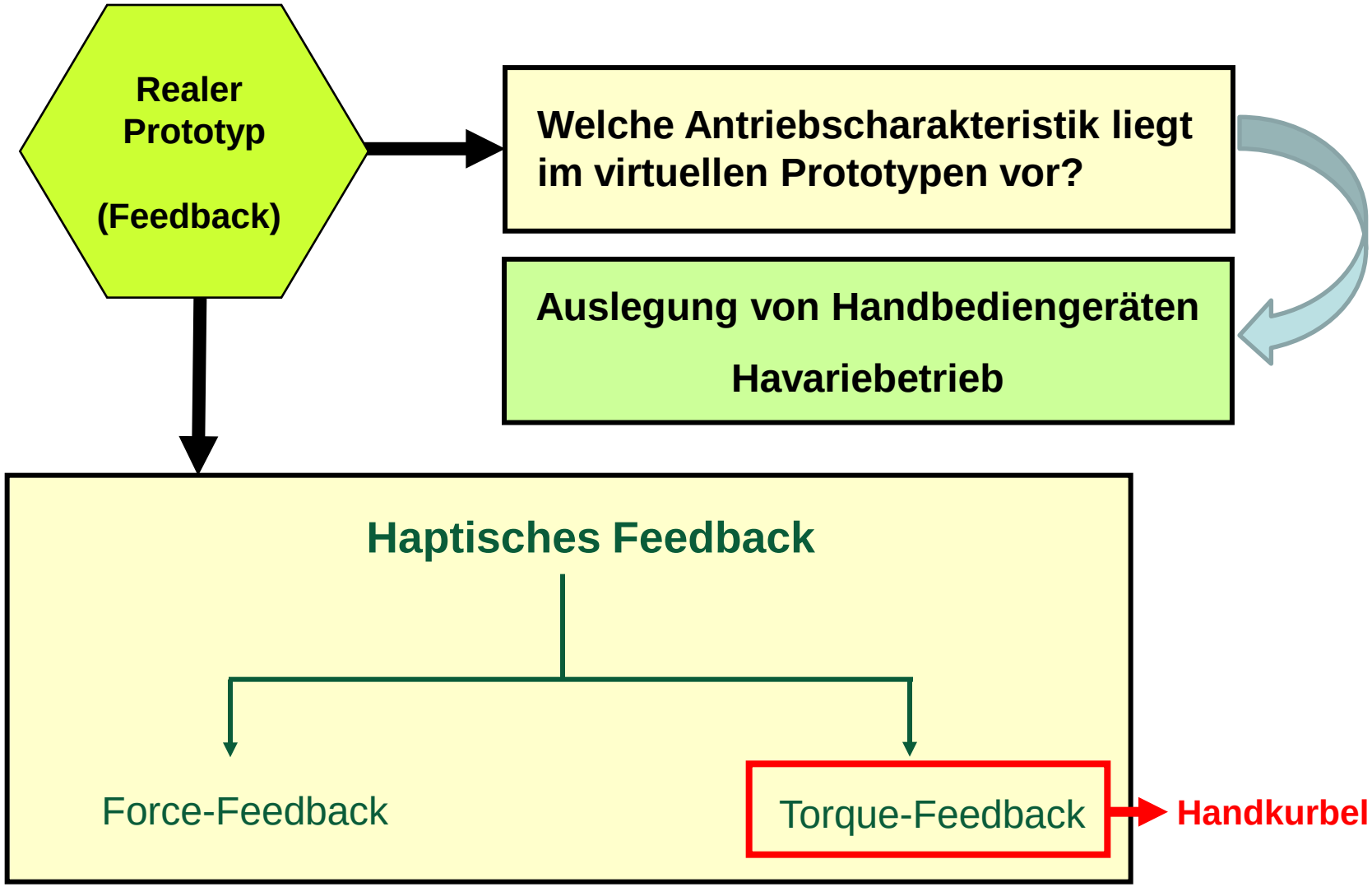
Die Beschleunigung in der jeweiligen Getriebeausgangstellung muss aus dem Stillstand erfolgen.
→ Anfangsgeschwindigkeit ist null

$$J_{red}(\varphi)\cdot\ddot{\varphi}+\cancel{\frac{1}{2}J'_{red}(\varphi)\cdot\dot{\varphi}^2}=M_{an}(\varphi)$$

Anteil entfällt,
da die Geschwindigkeit nahezu null ist!

Aus dem Antriebsmoment und dem zugehörigen Beschleunigungswert kann somit direkt das reduzierte MTM für jede gewählte Getriebestellung berechnet werden.

Haptische Simulation kinetischer Eigenschaften



Haptische Simulation kinetischer Eigenschaften

SiL = Software in the Loop:

- **im Gegensatz zur HiL-Simulation wird keine besondere Hardware eingesetzt** (Zielhardware muss somit noch nicht feststehen);
- das regelungstechnische Softwaremodell wird in einer Entwicklungsumgebung (PC) zusammen mit dem simulierten Maschinenmodell (physikalisches Modell) ausgeführt;
- Vorstufe zur HiL-Simulation (geringe Kosten durch fehlende Zielhardware)

HiL = Hardware in the Loop:

- **Maschinenkomponente** (z. B. reales elektronisches Steuergerät oder reale mechatronische Baugruppe) **wird über eine definierte Schnittstelle** (z.B. Feldbus) **an ein physikalisches Maschinenmodell gekoppelt**;
- Visualisierung und Test der Maschinenfunktionen (Parameterüberwachung);
- Einsatz zur Erstellung und Erprobung von Steuerungsprogrammen und zur Analyse des Bewegungsverhaltens vor der Fertigung und Montage der Maschine (Projektkosten, Havariesituationen, verkürzte Inbetriebnahme, …)

Mathematische Modellbildung

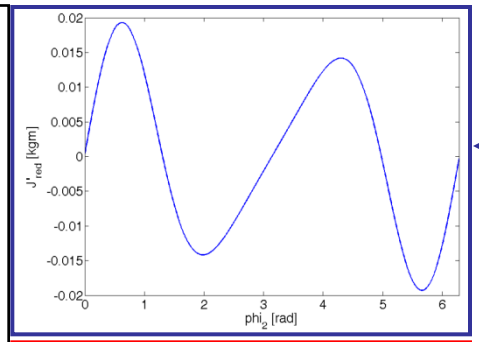
Ausgangspunkt ist die Bewegungsgleichung der starren Maschine:

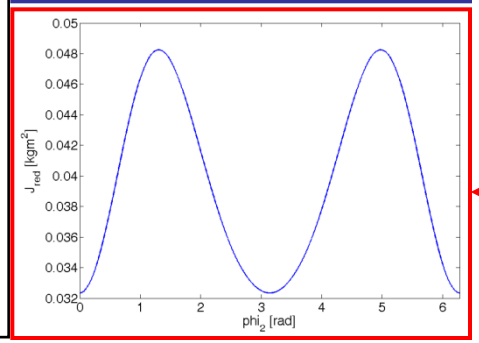
$$J(\varphi_2)\ddot{\varphi}_2 + \frac{1}{2}J'(\varphi_2)\dot{\varphi}_2^2 = M_{an}$$

- keine Deformationen an den Getriebegliedern
- keine Schwingungen

Anwendung auf die vorliegende Aufgabenstellung:

Lookup Tables (LUT)





berechnet

Anwender

$$-\frac{1}{2}\frac{J'(\varphi_2)}{J(\varphi_2)}\dot{\varphi}_2^2 + \frac{M_{an}}{J(\varphi_2)} = \ddot{\varphi}_2$$

berechnet

bekannt durch numerische Berechnung (Mathcad) oder MKS-Simulation (ProE)

Mathematische Modellbildung

Berücksichtigung der Reibung:

$$M_r = \boxed{M_{r0}} + \boxed{M_{r1}\dot{\varphi}_{21}}$$

viskose Reibung

Haftreibung und COULOMBsche Reibung

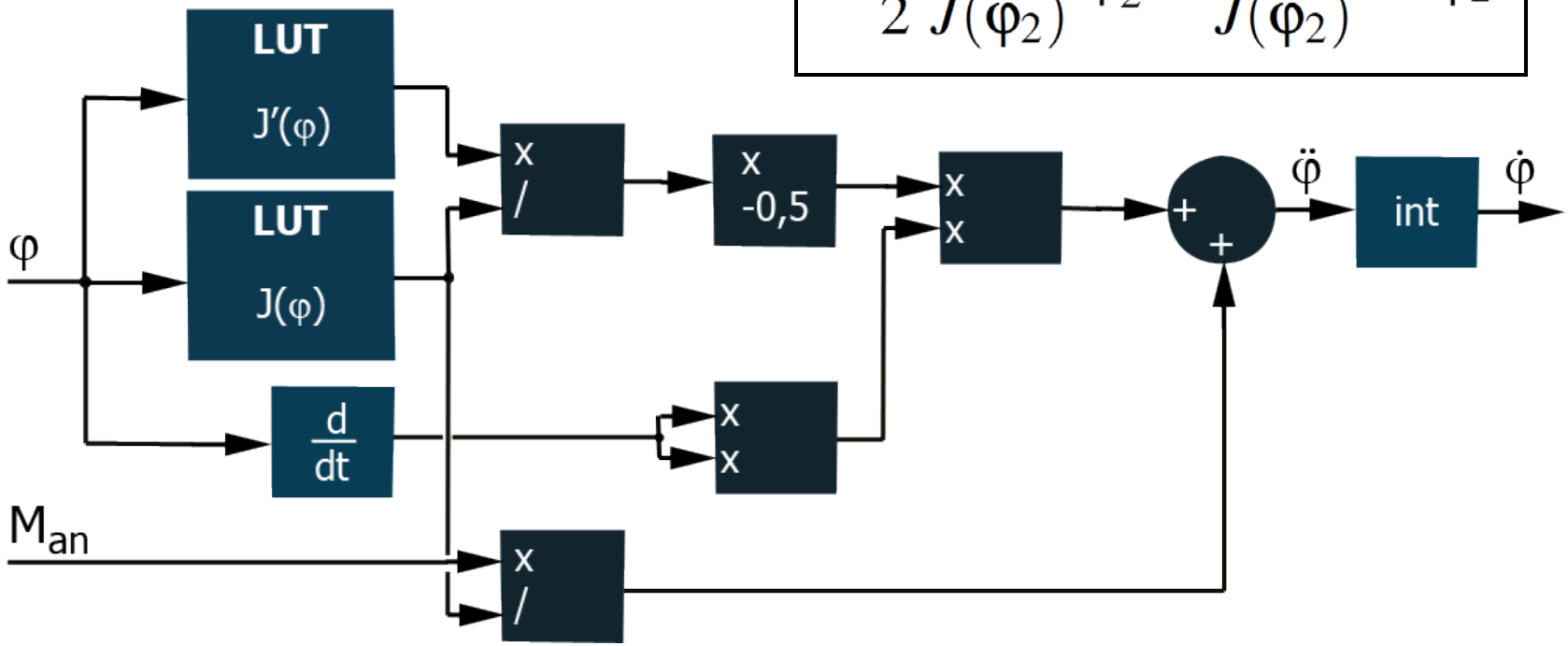
Die Haftreibung und COULOMBsche Reibung werden innerhalb der Bewegungsgleichung nicht berücksichtigt. Stattdessen wird in der Simulation vom gemessenen Kurbelmoment ein konstantes Reibmoment subtrahiert. Dadurch werden Eigenschwingungseffekte innerhalb des Momentenregelkreises eliminiert und die statischen Reibungsanteile in Näherung beachtet.

Die um den Reibungsanteil erweiterte Bewegungsgleichung lautet damit:

$$J_{red}(\varphi)\ddot{\varphi} + \frac{1}{2}J'_{red}(\varphi)\dot{\varphi}^2 + M_{r1}\dot{\varphi}_{21} = M_{an}(\varphi)$$

Regelungstechnische Modellbildung

$$-\frac{1}{2}\frac{J'(\varphi_2)}{J(\varphi_2)}\dot{\varphi}_2^2 + \frac{M_{an}}{J(\varphi_2)} = \ddot{\varphi}_2$$



Praktische Umsetzung im Versuchsfeld

Ergebnisse der Getriebeanalyse
z. B. Pro/Mechanism, Mathcad, WinDAM

φ J_{red} $\frac{dJ_{red}}{d\varphi}$

Bildsequenzen der Simulation
z. B. Pro/Mechanism

*.png- Datei

- Echtzeit Controller
- Simulation
  - Differentialgleichung
  - Kennlinien

CompactRIO

Ethernet

Analog-/ Digi-talsignale

Analog-/ Digi-talsignale

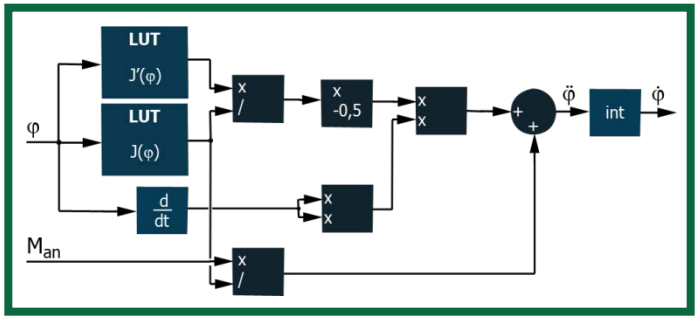
V-Regelung

Compax3

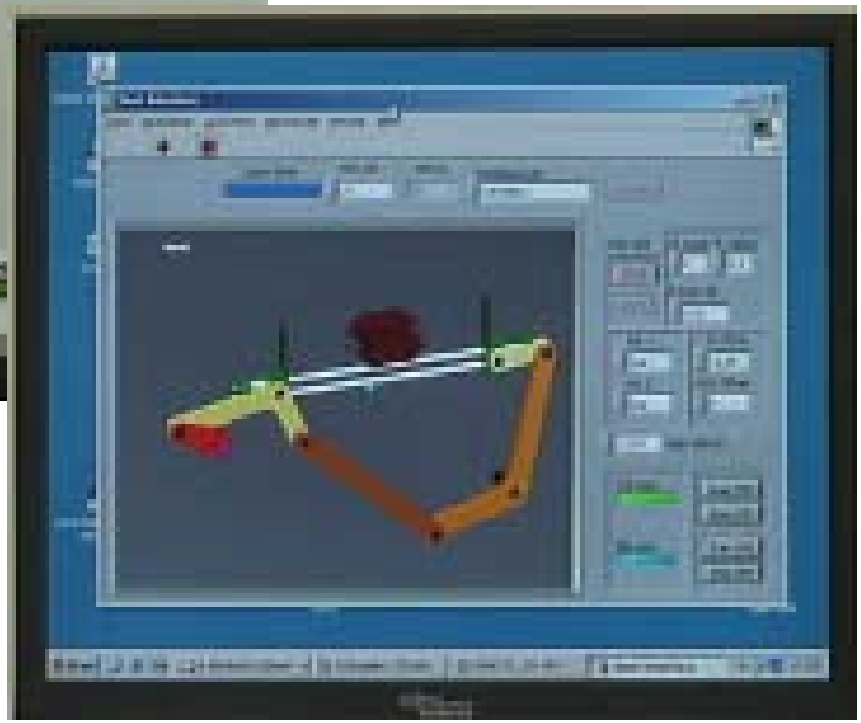
Getriebemotor

- Getriebe i=4
- Handkurbel

Anwender: M_{an} $\dot{\varphi}_{an}$ $\ddot{\varphi}_{an}$



Torque Feedback Simulation der Verpackungsmaschine im Versuchsfeld



Literatur

[1] Engelke, J.: Entwicklung eines „Torque-Feedback“ Antriebskonzeptes zur realen Bewegung virtueller Mechanismen. Diplomarbeit 2008, TU Chemnitz

[2] VDI-Richtlinie 2149, Blatt 1: Getriebedynamik - Starrkörper-Mechanismen. VDI-Gesellschaft Entwicklung Konstruktion Vertrieb

[3] Berger, M.: Kinematischer Entwurf und antriebstechnische Optimierung teilflexibler Mechanismen mit mehreren Antrieben. VVD Tagung 2009, TU Dresden

CAD basierte Ermittlung des reduzierten Massenträgheitsmoments für periodisch arbeitende Mechanismen

Mit diesem Arbeitsblatt koennen aus den mit Mehrkoerpersystemen (z.B. ProE Mechanism) ermittelten periodischen Antriebsmoment-verlaeufen die reduzierten Massentraegheitsmomente von Getrieben berechnet werden. Aus den diskreten Simulationsdaten werden mit Hilfe eines trigonometrischen Polynoms Ausgleichskurven ermittelt und für eine nachfolgende Antriebsauslegung oder Torque-Feedback Simulation zur Verfügung gestellt.

Eingabe und Dateiimport

Antriebsmoment aus der Simulation "konstante Antriebswinkelgeschwindigkeit" einlesen

$M_v :=$ Antriebsmoment_Geschw.txt

Vorgabewert der konstanten Antriebswinkelgeschwindigkeit mit der die Simulation durchgeführt wurde

$\omega := 2\pi$

Antriebsmoment aus der Simulation "konstante Beschleunigung" einlesen

$M_a :=$ Antriebsmoment_Beschl.txt

Vorgabewert der konsten Antriebsbeschleunigung mit der die Simulation durchgeführt wurde

$\alpha := 4\pi$

Eingabe und Dateiimport

Datenzuordnung

Spalten für Winkel bzw. Antriebsmoment aus den Import-Dateien werden den Matcad-Variablen zugeordnet.

$\phi_v := \left(M_v^{\langle 0 \rangle} - 175.063\right) \cdot Grad$ Vektor des Antriebswinkels aus der Simulation "konstante Winkelgeschwindigkeit"

$M_{an_v} := M_v^{\langle 1 \rangle}$ Vektor des Antriebsmoments aus der Simulation "konstante Winkelgeschwindigkeit"

$\phi_a := \left(M_a^{\langle 0 \rangle} - 175.063\right) \cdot Grad$ Vektor des Antriebswinkels aus der Simulation "konstante Winkelbeschleunigung"

$M_{an_a} := M_a^{\langle 1 \rangle}$ Vektor für Antriebsmoment aus der Simualtion "konstante Winkelbeschleunigung"

Datenzuordnung

Berechnung der Aenderung des red. MTM

Berechung der Aenderung des reduzierten MTM aus den Simulationswerten

$$J_{red_strich_Exp} := M_{an_v} \cdot \frac{2}{\omega^2}$$

Berechung der Ausgleiskurve für die Änderung des reduzierten MTM

Ausgleichsfunktionen wird als Vektorfunktion definiert:

$$F_A(\phi) := \left(1 \quad \cos(\phi) \quad \sin(\phi) \quad \cos(2\phi) \quad \sin(2\phi) \quad \cos(3\phi) \quad \sin(3\phi) \quad \cos(4\phi) \quad \sin(4\phi) \quad \cos(5\phi) \quad \sin(5\phi) \quad \cos(6\phi) \quad \sin(6\phi)\right)^T$$

$c := linanp\left(\phi_v, J_{red_strich_Exp}, F_A\right)$ Bestimmung der Konstanten (linanp/linfit verwendet das Prinzip der kleinsten Quardrate nach Gauß)

berechnete Koeffizienten:

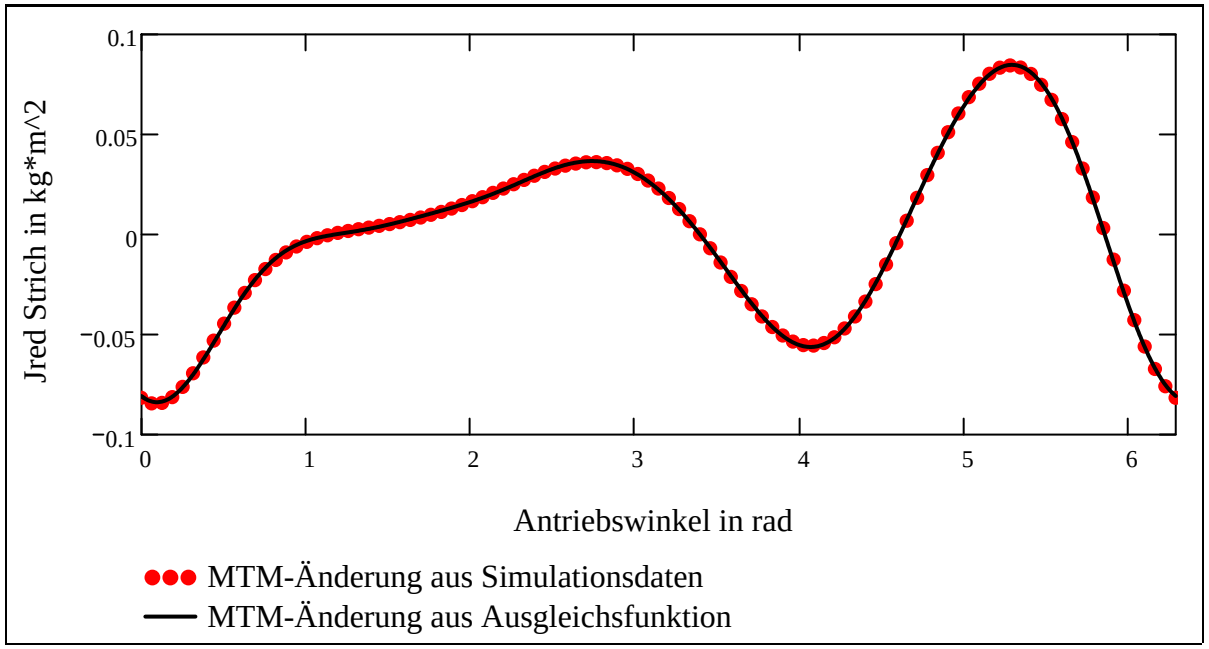
$c^T =$

	0	1	2	3	4	5
0	$-9.326 \cdot 10^{-6}$	-0.011	$-4.092 \cdot 10^{-3}$	-0.019	-0.042	-0.036

$J_{red_strich_Fkt}(\phi) := c \cdot F_A(\phi)$ Aenderung des reduzierten Massentraegheismoments berechnet aus der Ausgleichsfunktion

Berechnung der Aenderung des red. MTM

Bild 1: Änderung des reduzierten MTM



Berechnung des red. MTM

Berechung des reduzierten MTM aus den Simulationswerten und der Ausgleichskurve für das reduzierte MTM

$i := 0 .. \text{zeilen}(\phi_a) - 1$ Bereichsvariable

$\omega_a := 4\pi \cdot \sqrt{\frac{\phi_a}{2\pi}}$ Berechung der momentanen Antriebsgeschwindigkeit

$J_{red_Exp_i} := \frac{M_{an_a_i} - \frac{1}{2} \cdot J_{red_strich_Fkt}(\phi_{a_i}) \cdot (\omega_{a_i})^2}{\alpha}$ Berechung des red. MTM

Ausgleichsfunktionen wird als Vektorfunktion definiert:

$F_B(\phi_a) := (1 \quad \cos(\phi_a) \quad \sin(\phi_a) \quad \cos(2\phi_a) \quad \sin(2\phi_a) \quad \cos(3\phi_a) \quad \sin(3\phi_a) \quad \cos(4\phi_a) \quad \sin(4\phi_a) \quad \cos(5\phi_a) \quad \sin(5\phi_a) \quad \cos(6\phi_a) \quad \sin(6\phi_a) \quad \cos(7\phi_a) \quad \sin(7\phi_a))^T$

$d := \text{linanp}(\phi_a, J_{red_Exp}, F_B)$ Bestimmung der Konstanten (linanp/linfit verwendet das Prinzip der kleinsten Quardrate nach Gauß)

Berechung der Koeffizienten für die Ausgleichskurve

$d^T =$

	0	1	2	3	4	5
0	0.031	$4.393 \cdot 10^{-3}$	-0.011	0.021	$-9.657 \cdot 10^{-3}$	$-4.423 \cdot 10^{-4}$

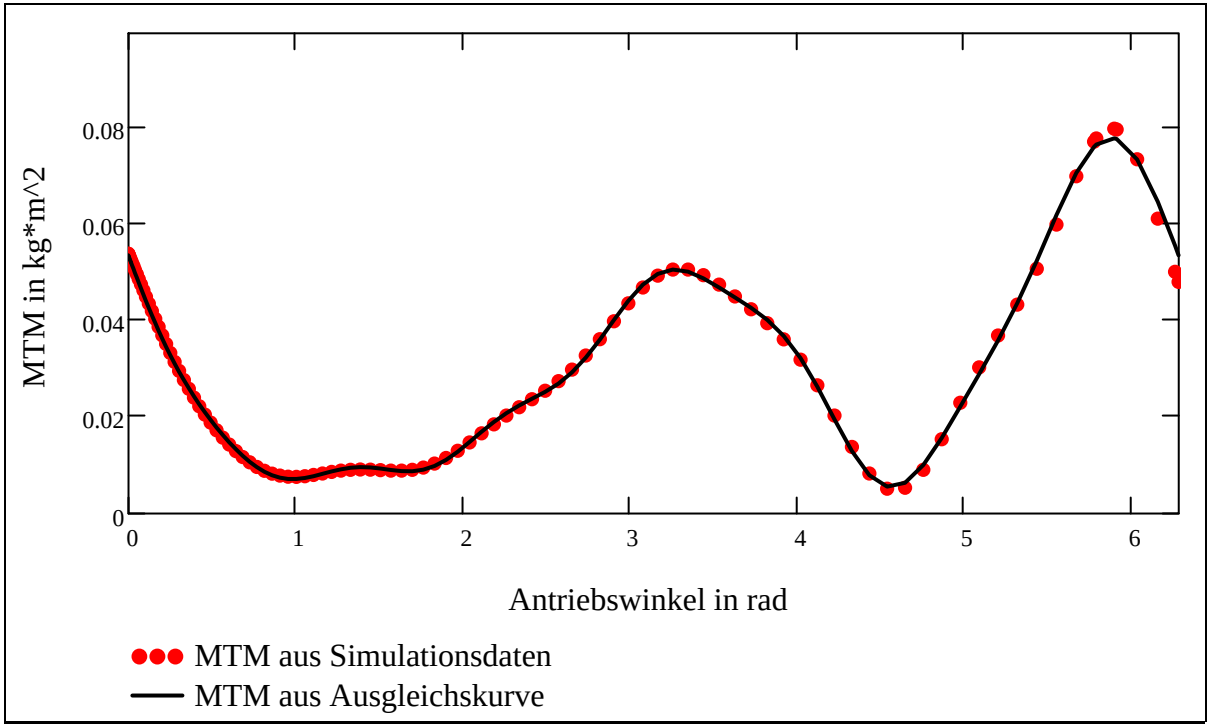
$J_{red_fkt}(\phi) := d \cdot F_B(\phi)$ Ausgleichsfunktion für das reduzierte MTM

$\mathrm{korr}\left(\overrightarrow{J_{red_strich_Fkt}(\phi_a)}, \overrightarrow{\frac{d}{d\phi_a} J_{red_fkt}(\phi_a)}\right) \cdot 100 = 98.164$

Korellation zur Bewertung der Approximationsguete
100% kennezichnen eine vollstaendige Uebereinstimmung

Berechnung des red. MTM

Bild 2: reduziertes MTM



Daten-Export

Schreiben der Koeffizienten für das reduzierte und die Aenderung des reduzierten MTM in eine Textdatei

oeffizienten_MTM.da Koeffizienten_MTM_Strich.da

d c

Schreiben des Funktionsverlaufs für das reduzierte und die Aenderung des reduzierten MTM in eine Textdatei hier zur Weiterverarbeitung für die Torque-Feedback-Simulation

$Stuetzstellen := 1000$ Anzahl der Datenpaare für die Torque-Fedback-Simulation

$n := 0, 1 .. Stuetzstellen - 1$

$MT_{n,0} := \frac{2\pi \cdot n}{Stuetzstellen - 1}$ $MTS_{n,0} := \frac{2\pi \cdot n}{Stuetzstellen - 1}$

$MT_{n,1} := d \cdot F_B(MT_{n,0})$ $MTS_{n,1} := c \cdot F_A(MT_{n,0})$

J.out dJ.out

MT MTS

Daten-Export