Fb VII

Elektrotechnik Mechatronik Optometrie

„Statistische Tolerierung
mit der Multiziel - Konstruktionsstudie
und
flexiblen parametrischen
Komponenten
im CAD-System Creo“

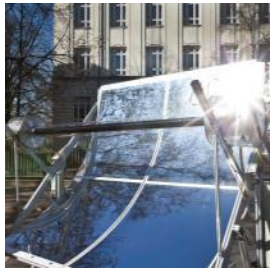
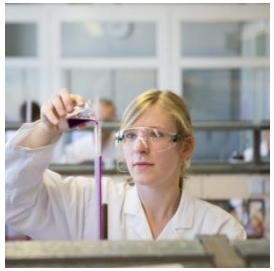
Prof. Dr.-Ing. Karsten Pietsch

M. Sc. Nikolaos Lengas

Stadt der Studiere Zukunft!

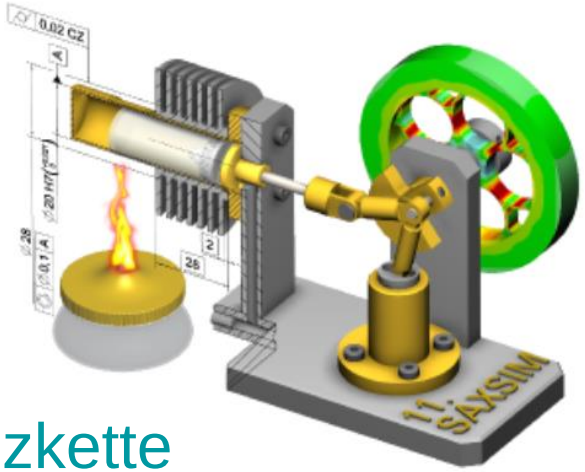
BEUTH HOCHSCHULE
FÜR TECHNIK
BERLIN

University of Applied Sciences

11. Anwendertreffen SAXSIM (SAXon SImulation Meeting) am 26.03.2019

Inhalt

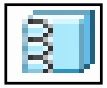


1. Projektvorstellung „Tolman“

2. Einleitung Toleranzmanagement

3. Problemstellung funktionelle Toleranzkette

4. Toleranzsimulation im CAD-System Creo


- Verwendung von flexiblen Teilen als „adaptive Teile“

- Nutzung der Multiziel – Konstruktionsstudie

5. Validierung

6. Ausblick

Beuth Hochschule für Technik Berlin

Fachbereich VII
Elektrotechnik Mechatronik Optometrie

Studiengänge
Bachelor und Master Mechatronik

Forschungsprojekt:

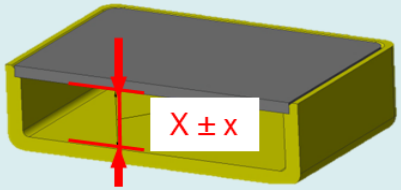
„Toleranzmanagement an mechatronischen Komponenten“ [1]

gefördert vom Institut für angewandte Forschung (IFAF)

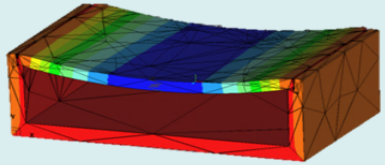
2. Einleitung Toleranzmanagement

Richtlinie ganzheitliches Toleranzmanagement

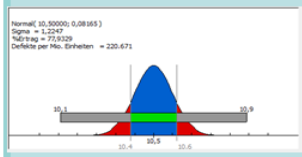
- Erfassen der Produkt-eigenschaften



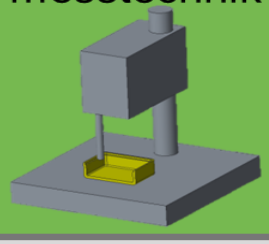
- Toleranz-vergabe und Tolerierungs-konzept
- Aufstellen eines Toleranzmodells mit Verformung



Toleranz-simulation



Fertigungs-messtechnik



Aufbau von Referenz-mustern

Validierung und Optimierung des Toleranz-modells z. B. mit einem Metamodell

✓ Verbesserung der
- Qualität
- Zuverlässigkeit
- Effizienz
- Einsatz von Ressourcen

mechatronischer Produkte

✓ Miniaturisierung möglich

3. Problemstellung funktionelle Toleranzkette

- Verknüpfung unterschiedlicher Größen durch physikalische Gesetze

  Funktionale Beziehung: $y = f(x_{01}, x_{02}, \ldots, x_{0i}, \ldots, x_{0m})$

  Abweichungen überlagern sich, d. h. sie pflanzen sich fort

- Lineares ***Toleranzfortpflanzungsgesetz*** **[2]** für nichtlineare funktionelle Toleranzketten (Abschätzung durch 1.Glied der Taylorreihe):

  - Unabhängige Eingangsparameter x_i

  - Schlusstoleranz:

$$T_y = \sum_{i=0}^{m} \overbrace{\left|\frac{\partial f}{\partial x_i}\right| \cdot T_{xi}}^{\text{Produkt}}$$

Toleranz des Eingangsparameters

Summe der absoluten Werte

partielle Differentialquotienten der Funktion

3. Problemstellung funktionelle Toleranzkette

Berechnung der Funktionseigenschaft und ihre Toleranz:

- Toleranzmittenmaß C_i $\quad C_i = \frac{(G_{xi}+K_{xi})}{2}$

- Toleranzen T_{xi} der Eingangsparameter

$$C_y \pm \frac{T_y}{2} = f(C_1, C_2, \dots, C_m) \pm \sum_{i=0}^{m} \left| \frac{\partial f}{\partial x_i} \right|_{x_i = C_i} \cdot \frac{T_{xi}}{2}$$

Vorgehensweise

1. Abweichungen der Eingangsparameter als Toleranzen T_{xi} aufstellen
2. Partielle Differentiale der Funktion $y = f(x_{01}, x_{02}, \dots, x_{0i}, \dots, x_{0m})$ bilden
3. Einsetzen in die Funktionsgleichung $C_y \pm \frac{T_y}{2}$

Toleranzmodell eines Schließer Relais mit Zugfeder für die Öffnerkraft

$$f(C_1, C_2, \dots, C_m) \pm \sum_{i=0}^{m} \left| \frac{\partial f}{\partial x_i} \right|_{x_i = c_i} \cdot \frac{T_{xi}}{2}$$

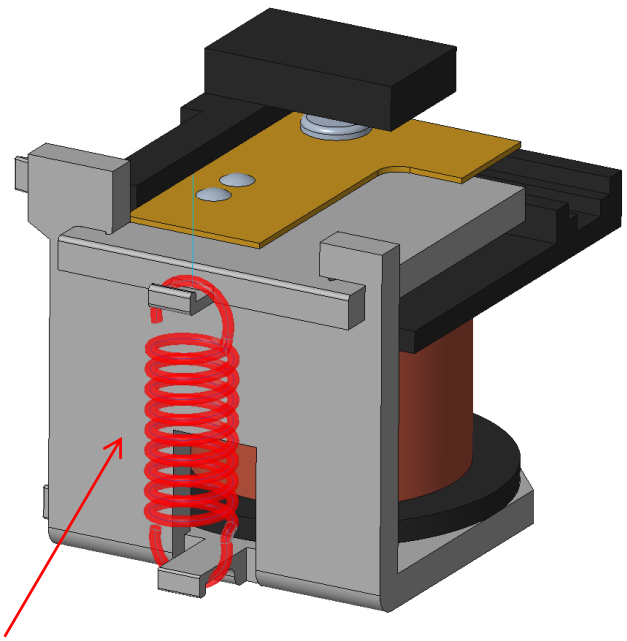
Vorspannweg $s_V = L_1 - L_0$

Drahtdurchmesser d_{Draht}

Windungsdurchmesser D_m

Schubmodul G_F

Hebelverhältnis a_1, a_2

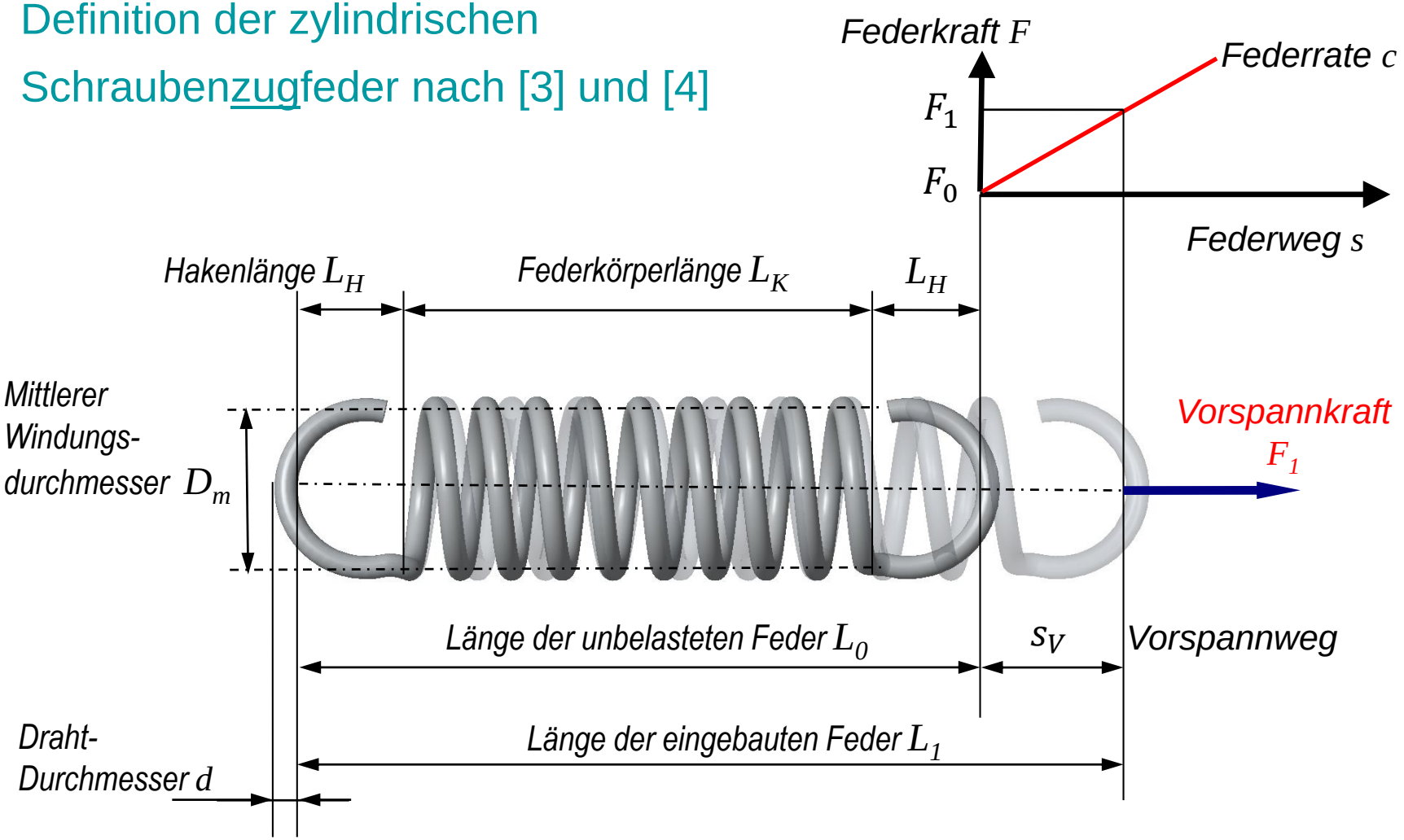


Öffnerkraft $F_Ö$

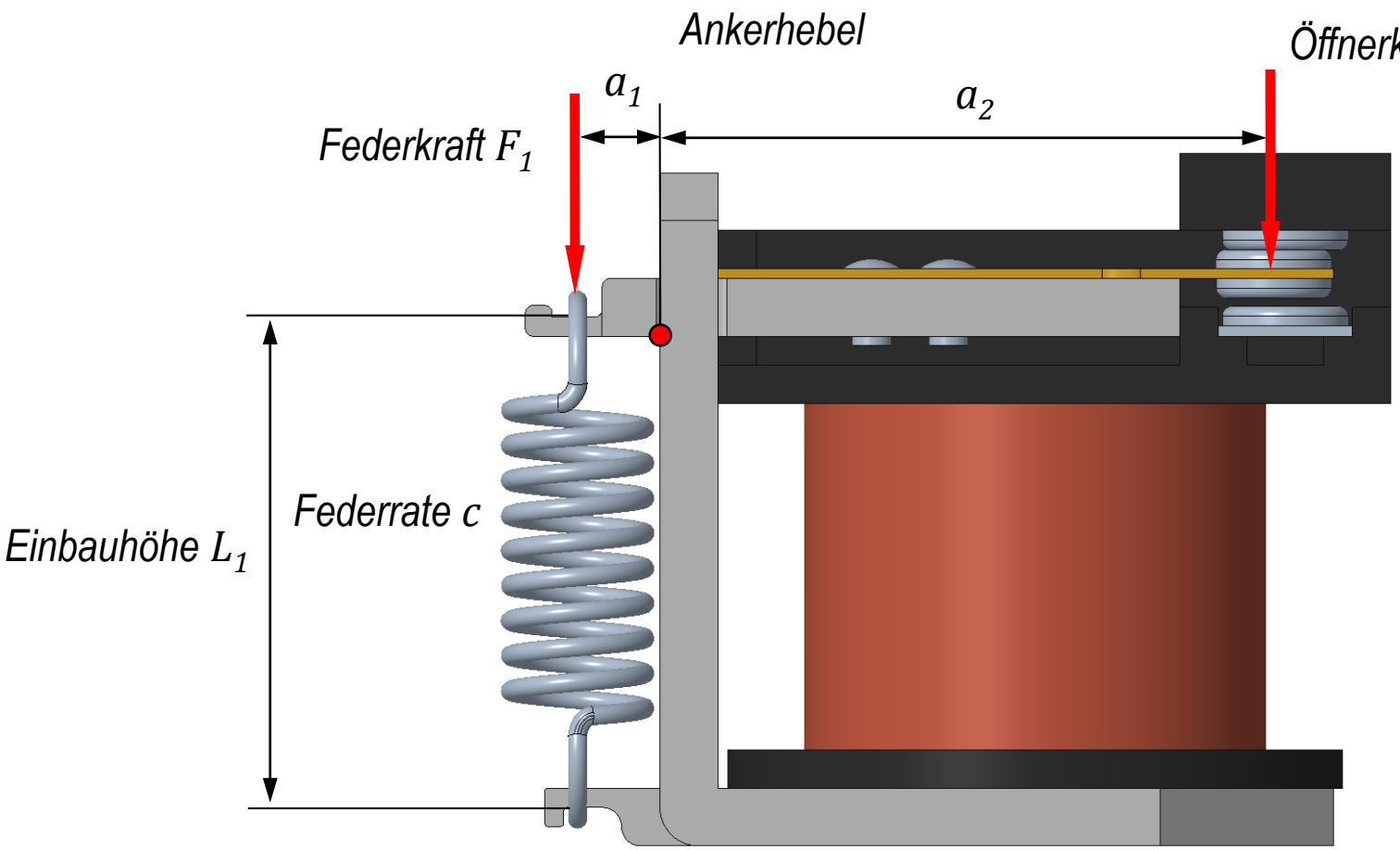
$$C_y \pm \frac{T_y}{2}$$

Teilmodell flexible adaptive Zugfeder

Definition der zylindrischen Schraubenzugfeder nach [3] und [4]



Toleranzmodell eines Schließer Relais mit Zugfeder für die Öffnerkraft



$$F_Ö = \frac{a_1}{a_2} \cdot F_1$$

Analytische Lösung des Toleranzmodells

1. Funktionelle Toleranzkette der Öffnerkraft

$$F_{Ö} = s_V \cdot c \cdot \frac{a_1}{a_2}$$

$$\boxed{F_{Ö}(L_0, L_1, G, d_{Draht}, D_m, a_1, a_2) = (L_1 - L_0) \cdot \frac{G_F \cdot d_{Draht}^4}{8 \cdot D_m^3 \cdot n_t} \cdot \frac{a_1}{a_2}}$$

2. Bestimmung aller partielle Differentiale

z. B. Einfluss Drahtdurchmesser

$$\frac{\partial F_{Ö}}{\partial d_{Draht}} = 4 \cdot (L_1 - L_0) \cdot \frac{G_F \cdot d_{Draht}^3}{8 \cdot D_m^3 \cdot n_t} \cdot \frac{a_1}{a_2}$$

3. Einsetzen und Lösen der analytischen Funktionsgleichung („Worst Case“)

Eingangsparameter mit Variation (Windungszahl n = 9)	**Nominal-wert**	**Toleranz** [3], [4], [5], [6]	**Toleranzeinfluss Federkraft**	
Mittlerer Windungsdurchmesser D_m	3,0 mm	0,2 mm	T_D=0,26 N	~28%
Unbel. Federlänge L_0	9,08 mm	0,6 mm	T_{L_0}=0,2 N	~21%
Drahtdurchmesser d_{Draht}	0,5 mm	0,016 mm	T_d=0,16 N	~18%
Einbaulänge L_1	13,0 mm	0,4 mm	T_{L_1}=0,13 N	~14%
Hebellänge a_1	2,0 mm	0,2 mm	T_{a_1}=0,13 N	~14%
Schubmodul G	81500 MPa	1630 MPa	T_G=0,03 N	~3%
Hebellänge a_2	16,0 mm	0,4 mm	T_{a_2}=0,02 N	~2%
Öffnerkraft $F_Ö$ F_{min} = 0,825 N F_{max} = 1,743 N	**1,284 N**		T_{MM}= 0,919 N	

Statistische Betrachtung

Die Größe der statistischen Schließtoleranz

entspricht der quadratischen Schließtoleranz

nach dem

Fehlerfortpflanzungsgesetz :

$$\sigma_{ges} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \sigma_i^{\,2}}$$

Statistischen Schließtoleranz:

$$T_{stat} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} T_i^{\,2}} = 6 \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \sigma_i^{\,2}}$$

Statistische Toleranz der Öffnerkraft $F_Ö$

$$T_{stat} = \sqrt{T_D^2 + T_{Lo}^2 + T_d^2 + T_{L1}^2 + T_{a1}^2 + T_G^2 + T_{a2}^2} = \mathbf{0,408\ N}$$

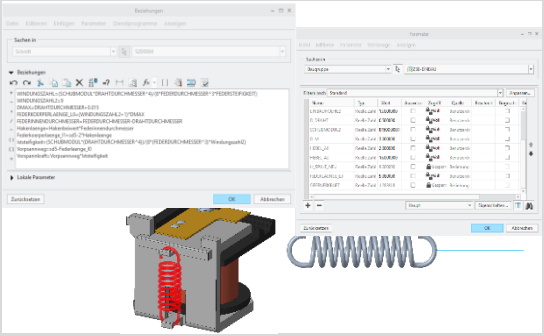
4. Toleranzsimulation im CAD-System Creo [7]

1. Baugruppenmodell erstellen

2. Funktionsmaße (Schlussmaße) definieren

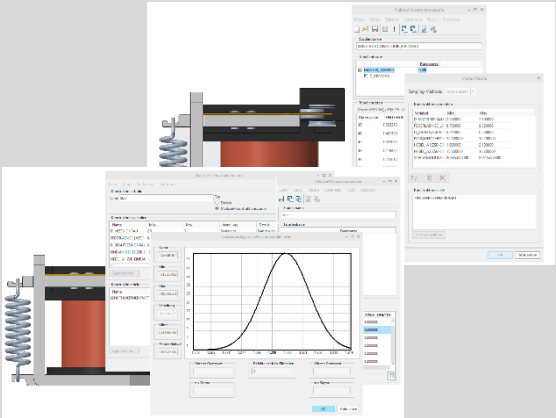
3. Verhaltensmodell aufstellen (z. B. Federkraft)

4. Baugruppenmodell mit flexiblen Teilen erstellen



5. Multiziel Konstruktionsstudie durchführen

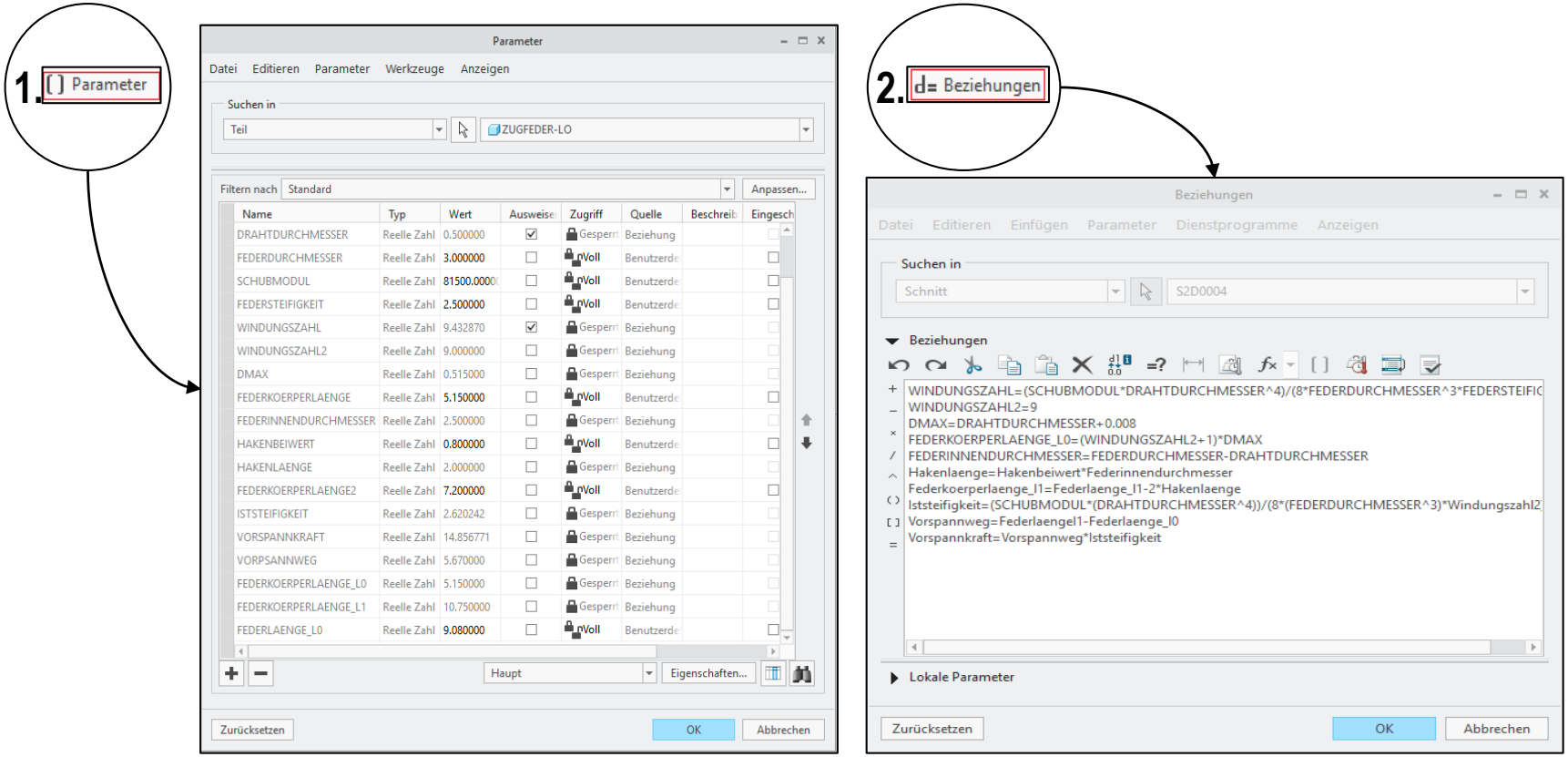
6. Abschließende Auswertung und Optimierung



Verwendung von flexiblen Teilen als „adaptive Teile“

Parametrische Modellierung der Zugfeder

1. Definition lokaler Parameter im Bauteil über den Reiter Werkzeuge.
2. Festlegung von Parameterbeziehungen über das Berechnungsblatt.



Verwendung von flexiblen Teilen als „adaptive Teile“

Aufstellung der funktionellen Maßkette der Federkraft

1. Bindung der Federkraft mit einer Kurvenlänge

   (Kurvenlänge entspricht Betrag des Kraftvektors)

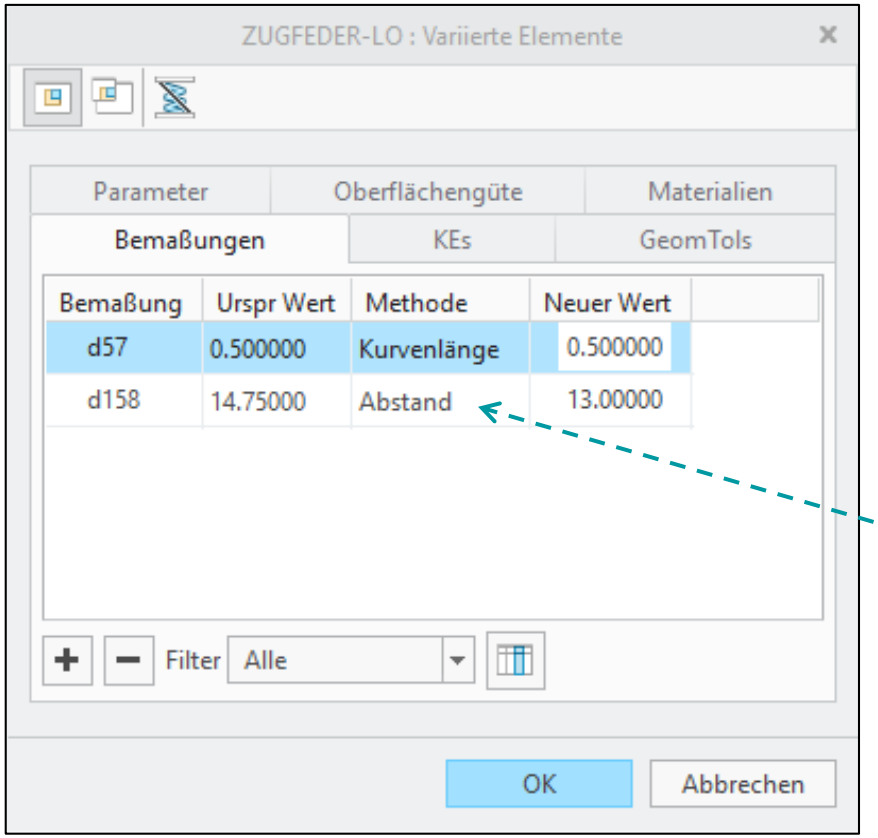
2. Anlegen eines KEs zur Messung dieser Kurvenlänge →

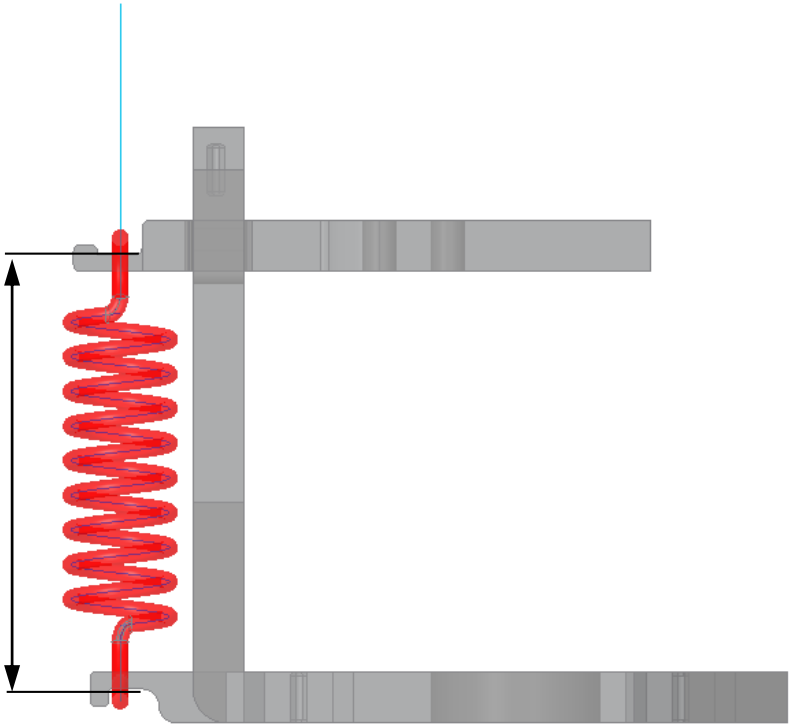
3. Angabe des Mess – KEs in einer Konstruktionsstudie als Ziel für die Parametervariation

Verwendung von flexiblen Teilen als „adaptive Teile“

Einbauen der Zugfeder als flexibles Bauteil in der Baugruppe

Die Flexibilität der Feder erlaubt beim Einbauen festgelegte Parameter zu übernehmen und in der Baugruppe zu steuern.

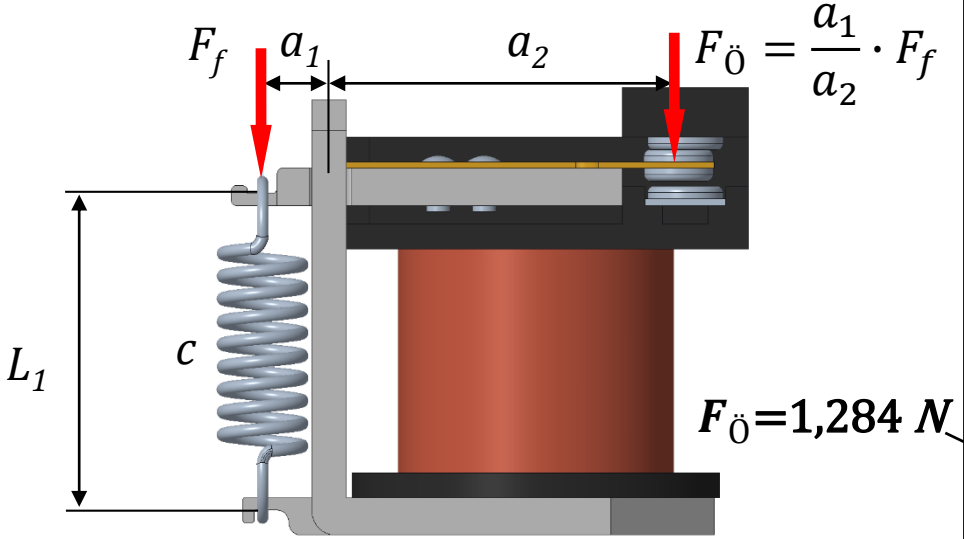




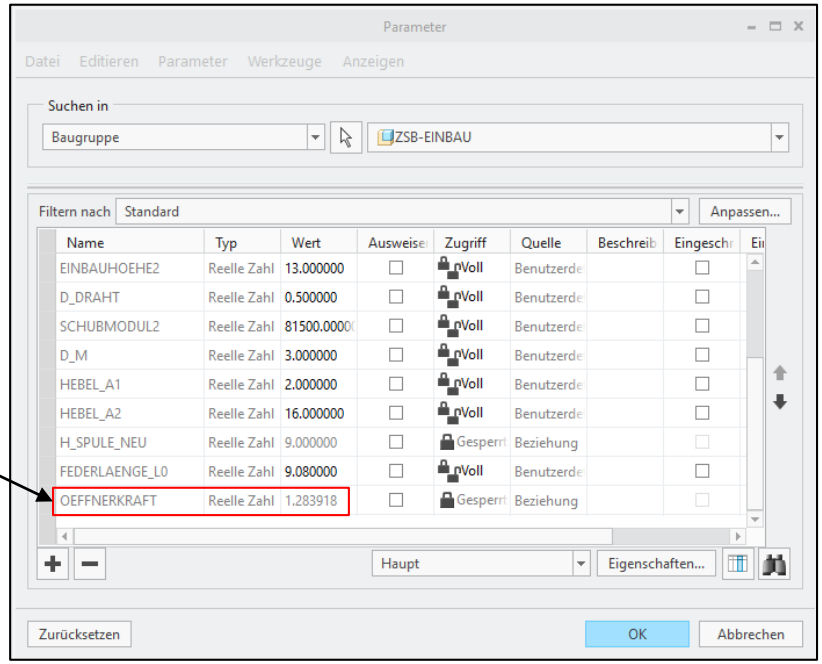
Verwendung von flexiblen Teilen als „adaptive Teile“

Globale Steuerung von lokalen Parametern in der Baugruppe

1. Definition globaler Parameter in der Baugruppe.
2. Übergabe der lokalen Parameter des jeweiligen Bauteils im Berechnungsblatt.
   - Steuerung der Parameter in der Baugruppe.
   - Berechnung der Öffnerkraft $F_{Ö}$.



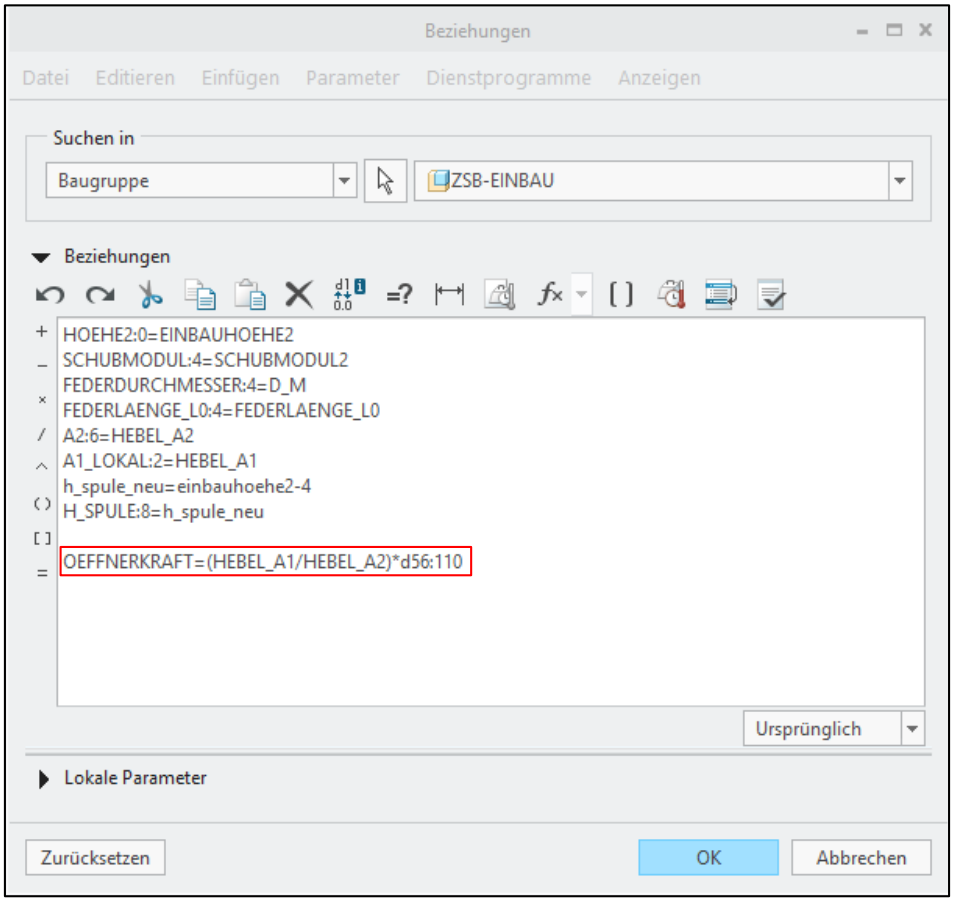
1. Globale Parameter



Verwendung von flexiblen Teilen als „adaptive Teile“

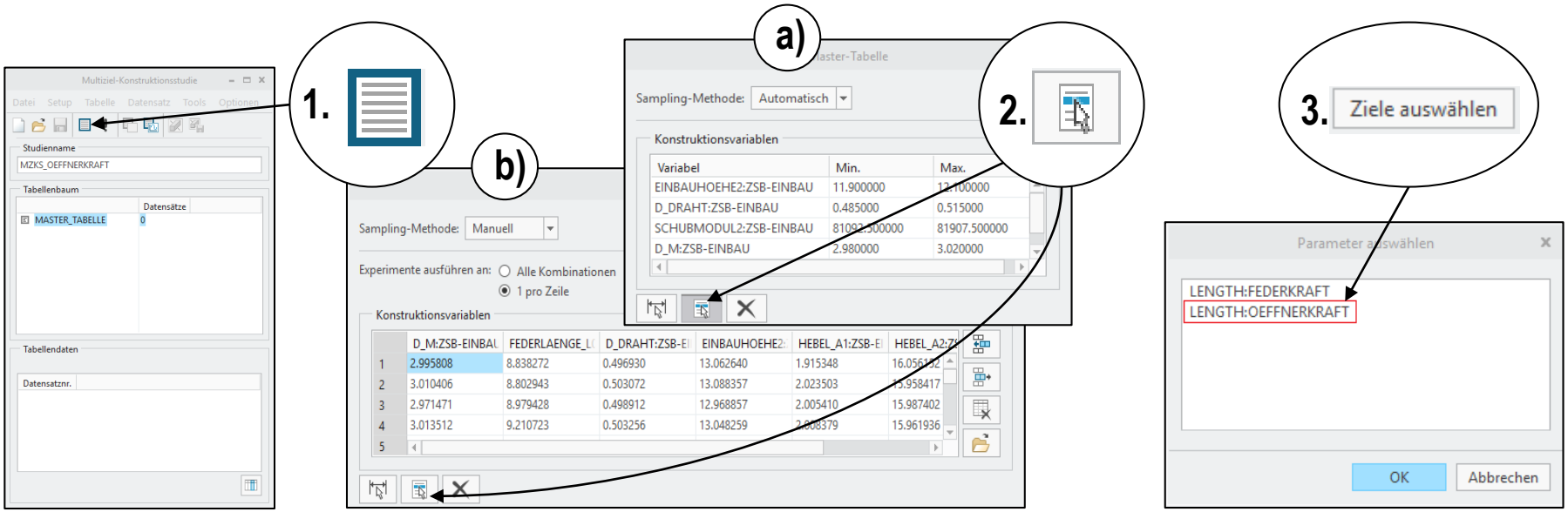
Globale Steuerung von lokalen Parametern in der Baugruppe

2. Steuerung im Berechnungsblatt



Nutzung der Multiziel – Konstruktionsstudie

1. Vorbereitung: Definition des Setups, Sampling-Methode:
   a) Automatisch: Gleichmäßige Variation der Eingangsparameter innerhalb der angegebenen Grenzen
   b) Manuell: Import von benutzerdefinierten Verteilungen der Eingangsparameter aus CSV Datei
2. Auswahl der Eingangsparameter
3. Auswahl des Konstruktionsziels als Toleranzmittenmaß



Statistische Betrachtung des Einflusses der Toleranzen

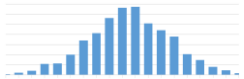
Auswahl der Eingangsparameter

Parameter	Nominalwert mit Toleranz	Standardabweichung $\sigma_i = \frac{T_i}{6}$
Mittlerer Windungsdurchmesser D_m	$(3{,}0 \pm 0{,}1)$ mm	0,033 mm
Unbelastete Federlänge L_0	$(9{,}08 \pm 0{,}3)$ mm	0,1 mm
Drahtdurchmesser d_{Draht}	$(0{,}5 \pm 0{,}08)$ mm	0,0267 mm
Einbaulänge L_1	$(13{,}0 \pm 0{,}2)$ mm	0,067 mm
Hebellänge a_1	$(2{,}0 \pm 0{,}1)$ mm	0,033 mm
Schubmodul G	(81500 ± 815) MPa	271,67 MPa
Hebellänge a_2	$(16{,}0 \pm 0{,}2)$ mm	0,067 mm

Nutzung der Multiziel – Konstruktionsstudie

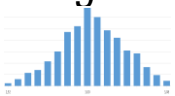
4. Durchführung der Experimente mit einer Anzahl n von Datensätzen. Anzahl n der Datensätze für die gewünschte Genauigkeit vorgeben [8].

Vorspannweg L_1 , L_0



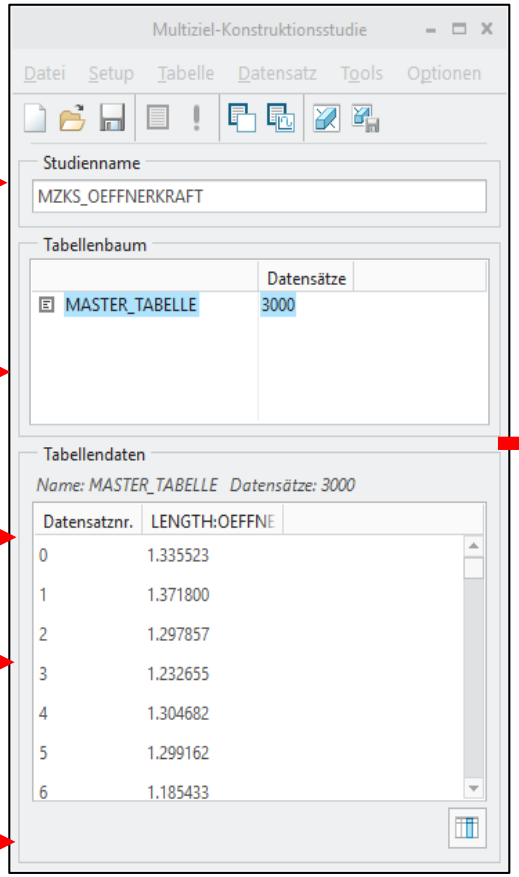
Drahtdurchmesser d_{Draht}

Windungsdurchmesser D_m



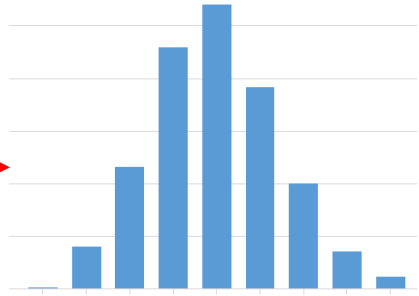
Schubmodul G_F

Hebelverhältnis a_1, a_2



$(n = 3000\ Datensätze)$

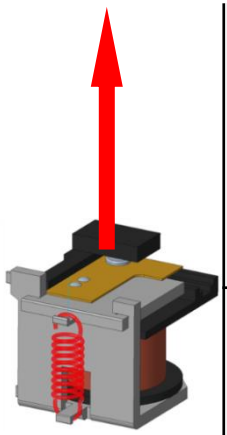
Öffnerkraft $F_Ö$



$F_{ömittel}$ = 1,284 N

Standardabweichung: $\sigma = 0{,}069\ N$

Vergleich der analytischen Lösung mit der Multiziel – Konstruktionsstudie

Toleranzbetrachtung mit unterschiedlichen Toleranzmodellen				
Öffnerkraft $F_{Ö}$		*Analytisch*	*CAD-System (Multiziel-Konstruktionsstudie)*	*Relative Abweichung*
	Worst Case	T_{MM}=0,919 N	T_{MMa}= 0,72 N *(Aut. gleichv. Sampling)*	~ 22%
			T_{MMv}= 0,49 N *(Normalverteiltes Sampling)*	~ 47%
	Statistisch	T_{stat}=0,408 N	T_{stat}= 0,72 N *(Aut. gleichv. Sampling)*	~ 76%
			T_{stat}= 0,414 N *(Normalverteiltes Sampling)*	< 2%

6. Ausblick

- Vergleich der Ergebnisse mit Toleranzsimulationsprogrammen mit unterschiedliche Verteilungen der Eingangsparameter
- Anwendung der Konstruktionsstudie für nicht direkt analytische Verhaltensmodelle die z. B. über eine Finite Element Analyse gelöst werden
- Integration von flexiblen CAD-Modellen mit gemessenen Verteilungen
- Berücksichtigung von Form- und Lagetoleranzen im Parametermodell
- Erweiterung durch weitere funktionelle Toleranzketten wie z. B. Magnetkräfte

Quellen

[1] Forschungsprojekt „Toleranzmanagement an mechatronischen Komponenten“

Internet: https://www.ifaf-berlin.de/projekte/tolman/,
http://projekt.beuth-hochschule.de/tolman/

[2] Trumpold, H.: Toleranzsysteme und Toleranzdesign: Qualität im Austauschbau. München, Wien: Hanser 1997

[3] DIN 2097 Zylindrische Schraubenfedern aus runden Drähten. 1973, Berlin: Beuth

[4] DIN 13906-2 Zylindrische Schraubenfedern Berechnung und Konstruktion. 2013, Berlin: Beuth

[5] DIN EN 10270-1 Stahldraht für Federn Teil 1. 2017, Berlin: Beuth

[6] DIN ISO 2768 Teil 1 Allgemeintoleranzen ohne einzelne Toleranzeintragung. 1991, Berlin: Beuth

[7] PTC, „Creo Parametric und Creo Simulate,“ Firmensitz 140 Kendrick Street Needham, MA 02494 USA, www.ptc.com, 2018.

[8] Beucher, O.: Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik mit MATLAB. Karlsruhe, Deutschland: Springer 2005