



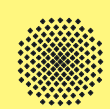
# **Rastkräfte bei Lineardirektantrieben – ein Vergleich geometrischer und elektronischer Kompensationsmöglichkeiten**

Dipl.-Ing. P. Joerges

Prof. Dr. W. Schinköthe

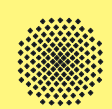
Institut für Konstruktion und Fertigung  
in der Feinwerktechnik, IKFF  
Universität Stuttgart

19. März 2010



# Übersicht

1. **Motivation, Ziel**
2. **Entstehung von Rastkräften**
3. **Einflussmöglichkeiten auf Rastkräfte**
  - Modifikationsmöglichkeiten bei der Geometrie
  - Kompensationsmöglichkeiten und Regelung
4. **Vergleich zwischen Geometrie und Regelung**
5. **Zusammenfassung**

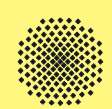


- **Motivation:**

Ausbaufähige Übersicht und Bewertung der Modifikationsmöglichkeiten (mechanisch, elektrisch) für das Bewegungsverhalten bei dynamischen Positionierprozessen unter Berücksichtigung von Rastkräften bei Lineardirektantrieben (LDA)

- **Ziel:**

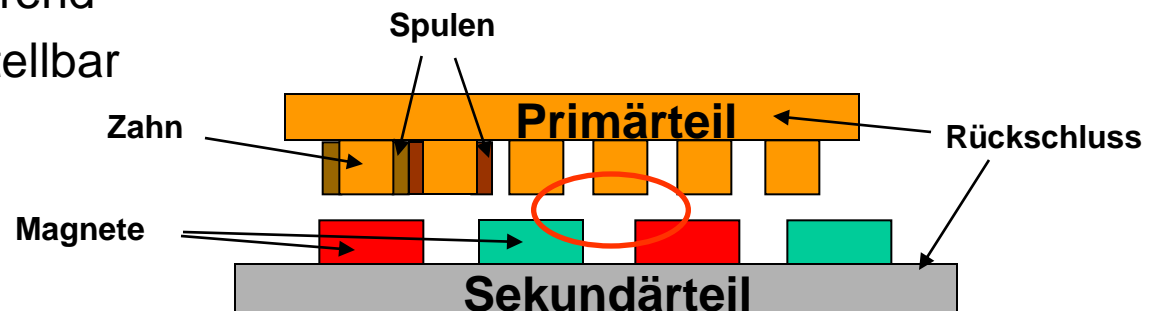
Überprüfen und Ableiten von definierten Konstruktions- (mechanisch) und Regelungs-/Steuerparadigmen (elektronisch) für LDA mit eisenbehafteten Läufern, um rastkraftreduzierend und/oder kompensierend zu wirken



## Rastkräfte:

engl.: Cogging Force, amerik.: Detent Force

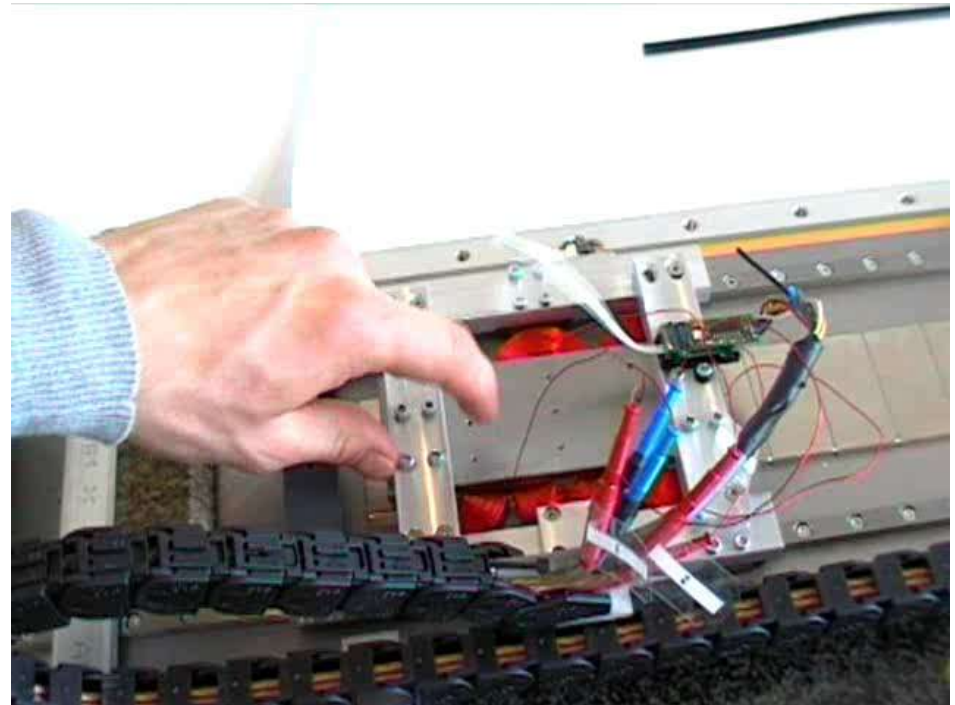
- magnetische Störkraft als Reluktanzkraft
- wirkt zwischen Eisen des Primärteils und Permanentmagneten des Sekundärteils
- abhängig von der relativen Position des Primärteils zu Permanentmagneten
- unabhängig vom Motorstrom
- in eisenlosen Läufern vernachlässigbar
- reduzierbar durch Geometrieoptimierung und regelungstechnische Verfahren
- periodisch wiederkehrend
- als Fourierreihe darstellbar

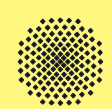




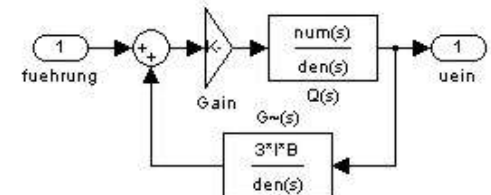
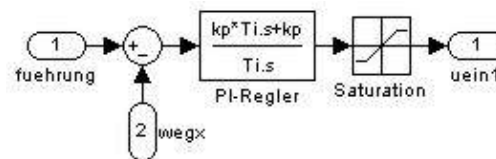
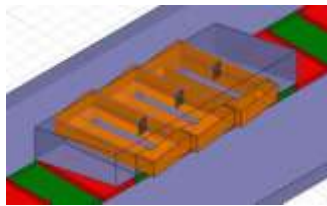
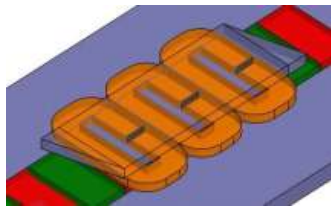
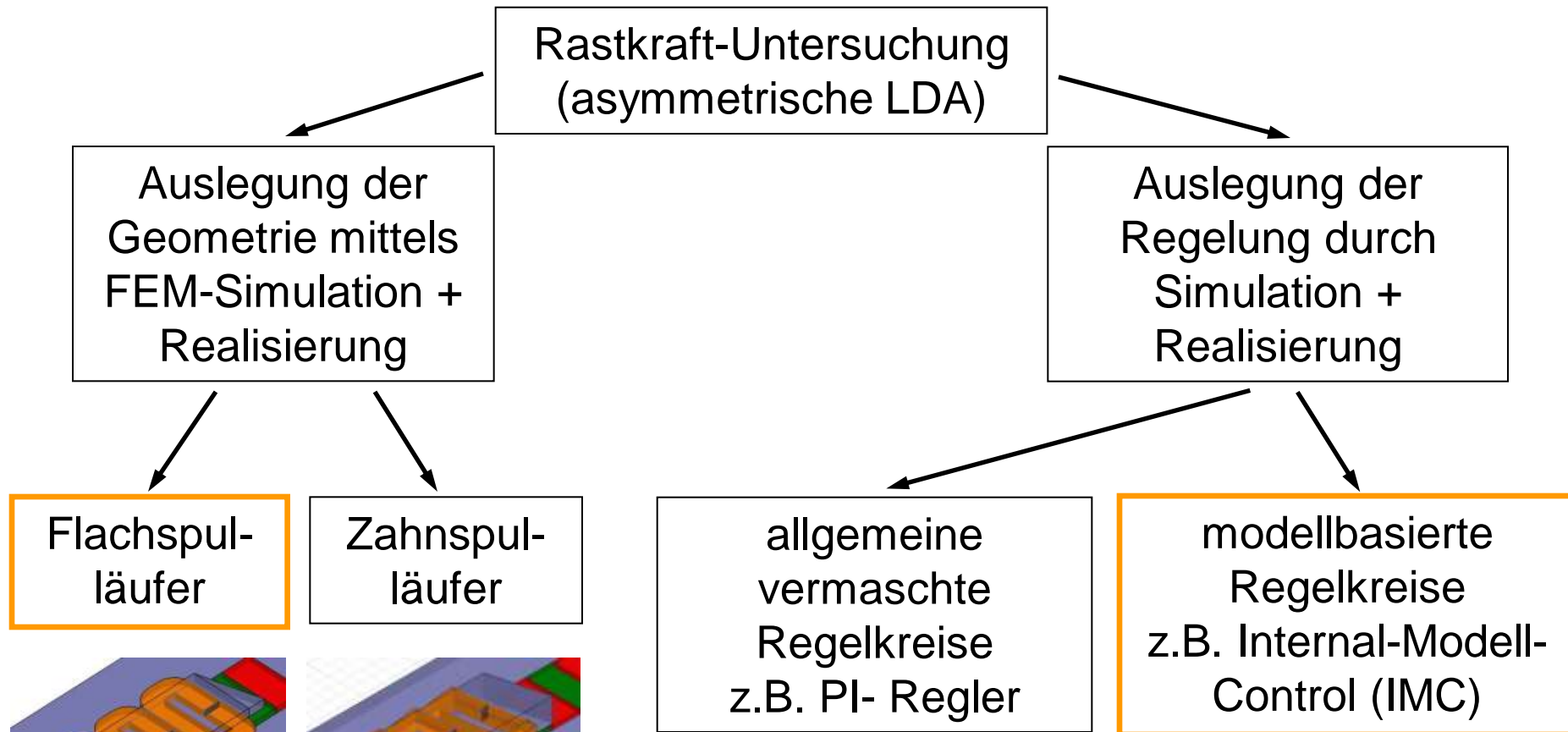
## Effekte der Rastkräfte:

- Verschlechterung der Positioniergenauigkeit
- Verschlechterung der Bahnfolgegenauigkeit
- Halten des Motors ohne Bestromung
- Geschwindigkeitsschwankungen → Schwingungen, Instabilitäten
- Starker Einfluss bei geringer Geschwindigkeit → da Schubkraft geringer
- Nichtlinearitäten





## Vorgehensweise:

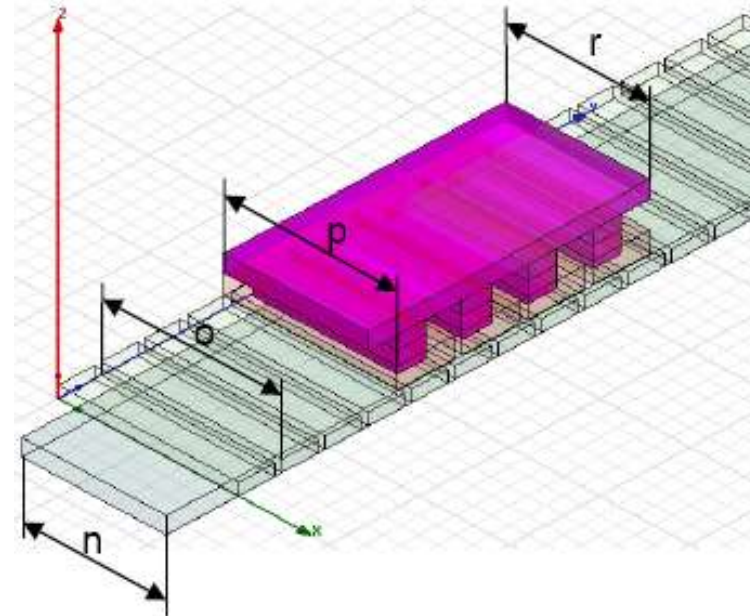




# Geometrische Modifikation:

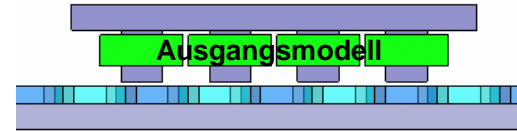
## Mechanisch :

- **Variation des Luftspaltes**
  - Luftspalthöhe
  - Flussleitbleche im Luftspalt
- **Magnete**
  - Magnetdrehung
  - Magnetabstände
  - Magnetlänge
  - Magnetform
  - ...
- **Rückschluss**
  - Rückschlusstyp (Flachspulmotor, Zahnspulmotor)
  - Rückschlusslänge
  - Anzahl der Nuten, Nutproportionen (Länge, Höhe, Breite, Drehung,...)
  - Zahnform, Endzahn (Zahnproportionen, Carterscher Faktor,...)
  - ...

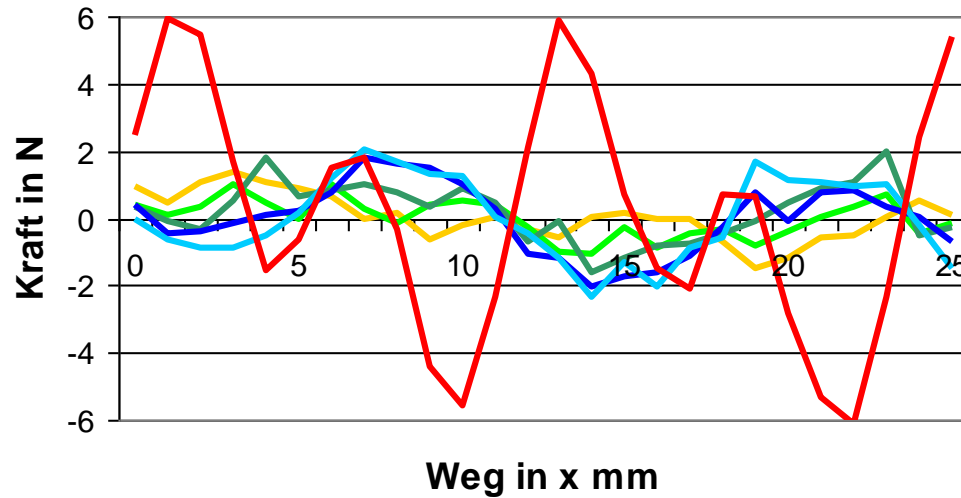
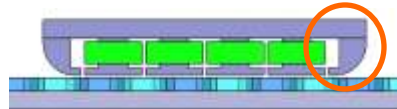




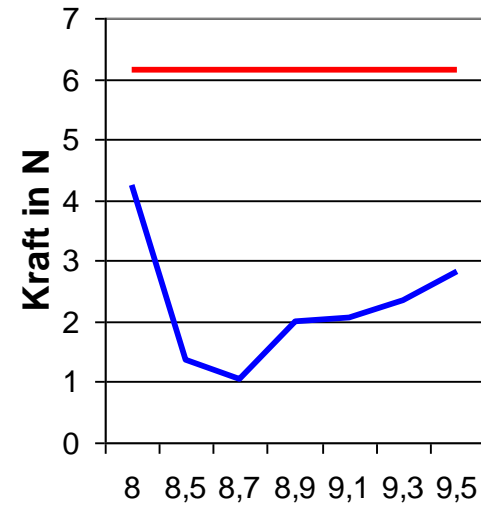
# Beispiel Endzahnoptimierung:



### Rastkraft T-Nut Motor mit Endzahnradius



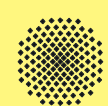
### Rastkraft über Endzahnradius



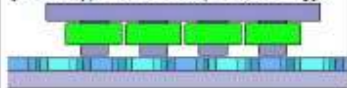




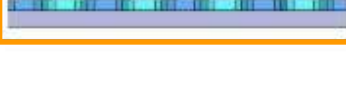
- T-Nut mit Radius 8,5mm
- T-Nut mit Radius 8,7mm
- T-Nut mit Radius 8,9mm
- T-Nut mit Radius 9,1mm
- T-Nut mit Radius 9,3mm
- Ausgangsläufer

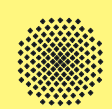
- max. Rastkraft
- Ausgangsläufer





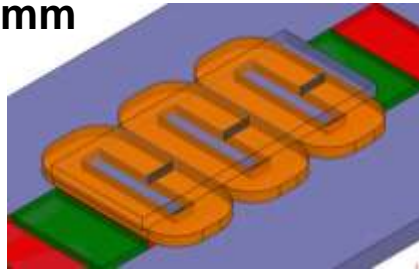
## Beispiel Endzahnoptimierung:

Läufer Bezeichnung; Abkürzung Magnetlänge, Strangzahl, Magnete sind um 4,3° gedreht	max. Rastkraft		max. Schubkraft		min. Schubkraft	
	Simulation in N/ Änderung in %	Messung in N/ Änderung in %	Simulation in N/ Änderung in %	Messung in N/ Änderung in %	Simulation in N/ Änderung in %	Messung in N/ Änderung in %
		6,14 /	5,59 /	26,5 /	23,9 /	15,3 /
Ausgangsläufer 78mm, (AL78), 10+2mm, 2 Stränge	-	-	-	-	-	-
	6,50 /	6,69 /	26,5 /	26,3 /	14,2 /	11,6 /
Verlängerter Läufer 90mm, (AL90), 10+2mm, 2 Stränge	+5,9	+19,7	0,0	+10,0	-7,2	-22,3
	1,77 /	2,24	25,2 /	22,7 /	17,8 /	18,2 /
Optimierte KWA-Zähne, (ALV1), 10+2mm, 2 Stränge	-71,2	-59,9	-4,7	-4,8	-3,7	+21,1
	1,37 /	1,42 /	26,1 /	24,6 /	17,0 /	12,6 /
T-Nut mit Radius 8,5mm, (ALV2), 10+2mm, 2 Stränge	-77,7	-74,6	-1,3	+3,0	+13,3	-16,0
	1,85 /	3,10	26,0	26,9 /	13,7 /	12,0 /
T-Nut abgeschrägt 90mm, (ALV3), 10+2mm, 2 Stränge	-69,9	-44,5	-1,8	+12,6	-9,8	-20,0
	1,26 /	1,71 /	26,97 /	25,7 /	17,5 /	12,9 /
T-Nut abgeschrägt 102mm, (LV4), 10+2mm, 2 Stränge	-79,5	-69,4	+2,0	+7,6	-12,5	-14,0

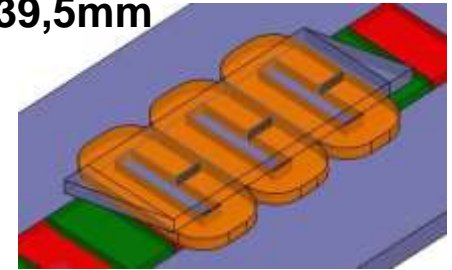


# Ergebnisse der Geometrievariation beim Flachspulläufer:

Rückschluss 127,5mm  
gerade

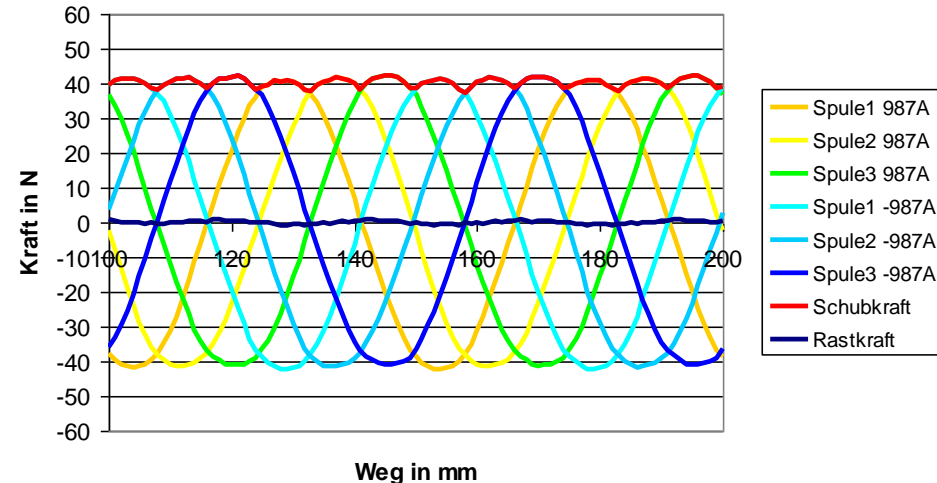
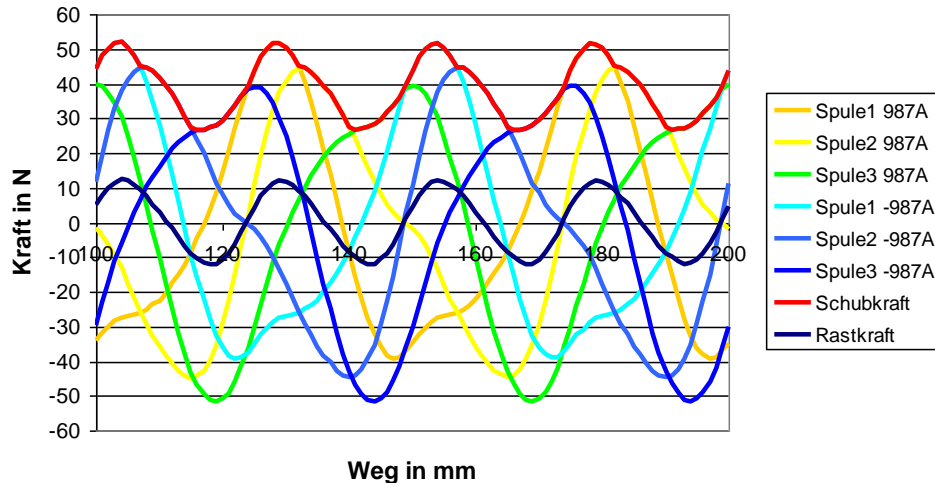


Rückschluss 139,5mm  
geschrägt



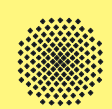
RS 127,5mm gerade FSL1, 25mm,3 Stränge

RS 139,5mm geschrägt FSL2, 25mm, 3 Stränge



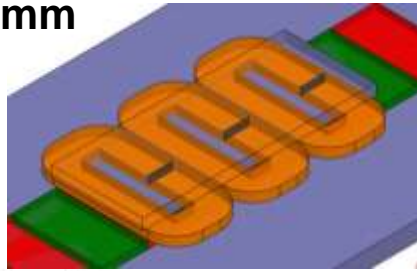
**Rastkraft: 12,3 N**  
**min. Schubkraft: 26,5N**  
**max. Schubkraft: 51,9N**

**Rastkraft: 1,3 N**  
**min. Schubkraft: 37,4N**  
**max. Schubkraft: 42,3N**

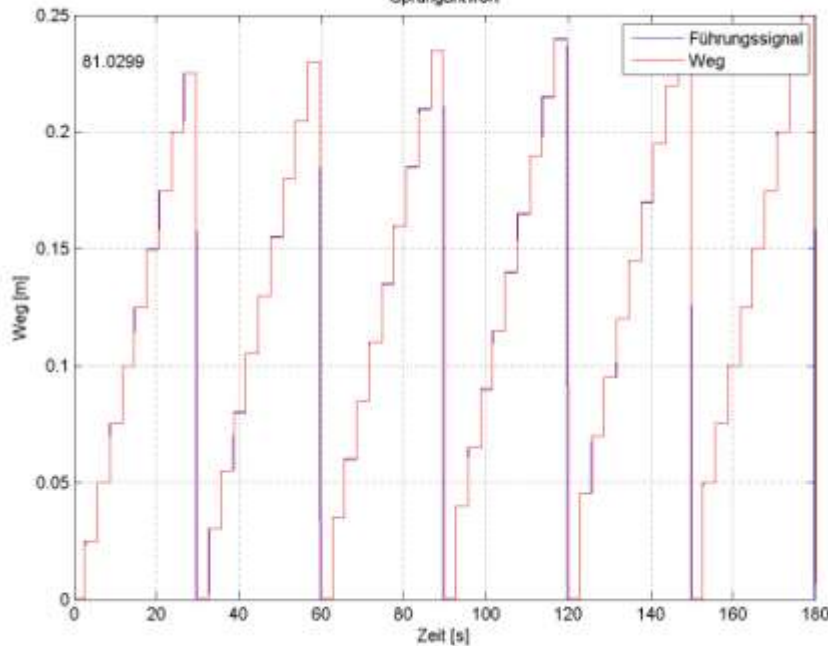


# Ergebnisse der Geometrievariation beim Flachspulläufers:

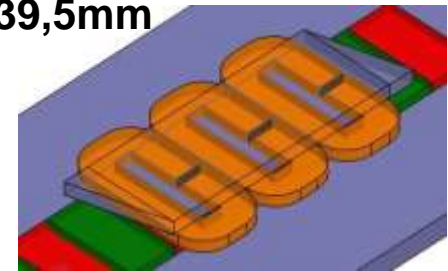
Rückschluss 127,5mm  
gerade



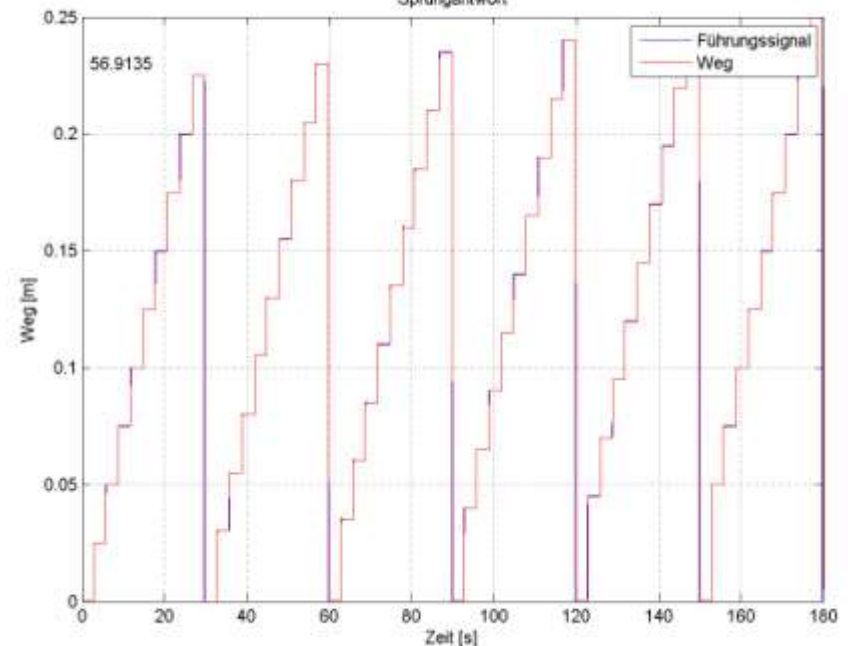
Sprungantwort



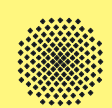
Rückschluss 139,5mm  
geschrägt



Sprungantwort

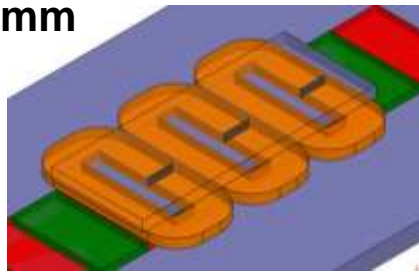


**Bahnfolgenauigkeit  
mit IMC-Regler  
Nicht optimal eingestellt, um Einfluss  
der Geometrie fest zu stellen!**

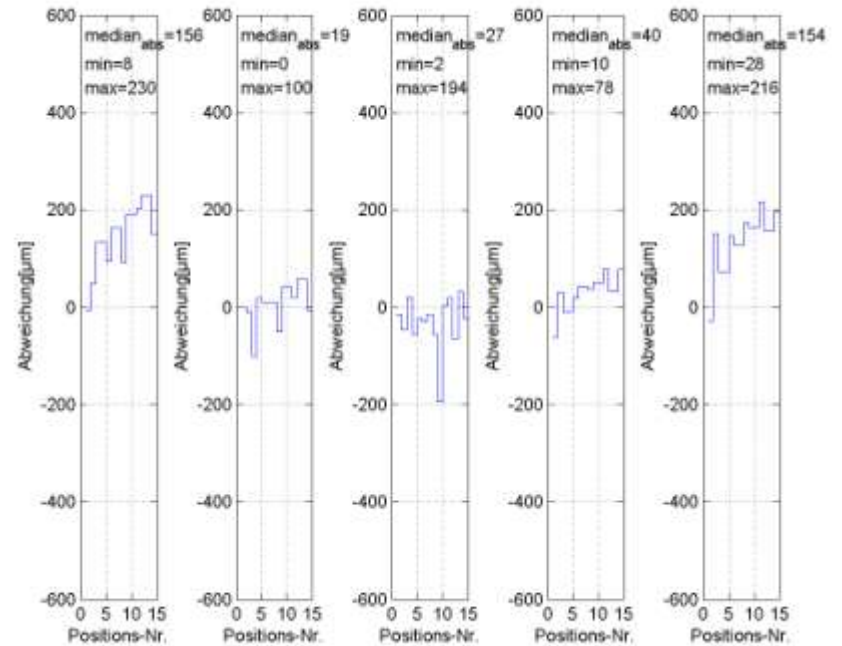
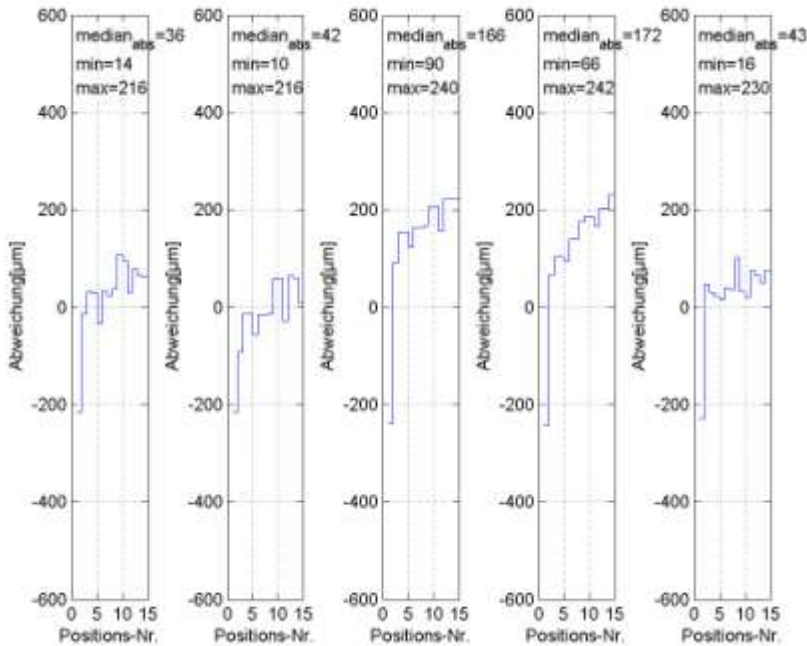
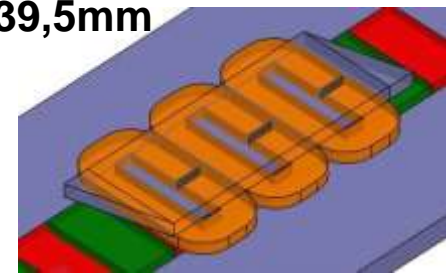


# Ergebnisse der Geometrievariation beim Flachspullläufer:

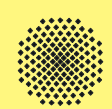
Rückschluss 127,5mm  
gerade



Rückschluss 139,5mm  
geschrägt



**Positioniergenauigkeit  
mit IMC-Regler  
Nicht optimal eingestellt, um Einfluss  
der Geometrie fest zu stellen!**

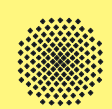


# Möglichkeiten der Kompensation:

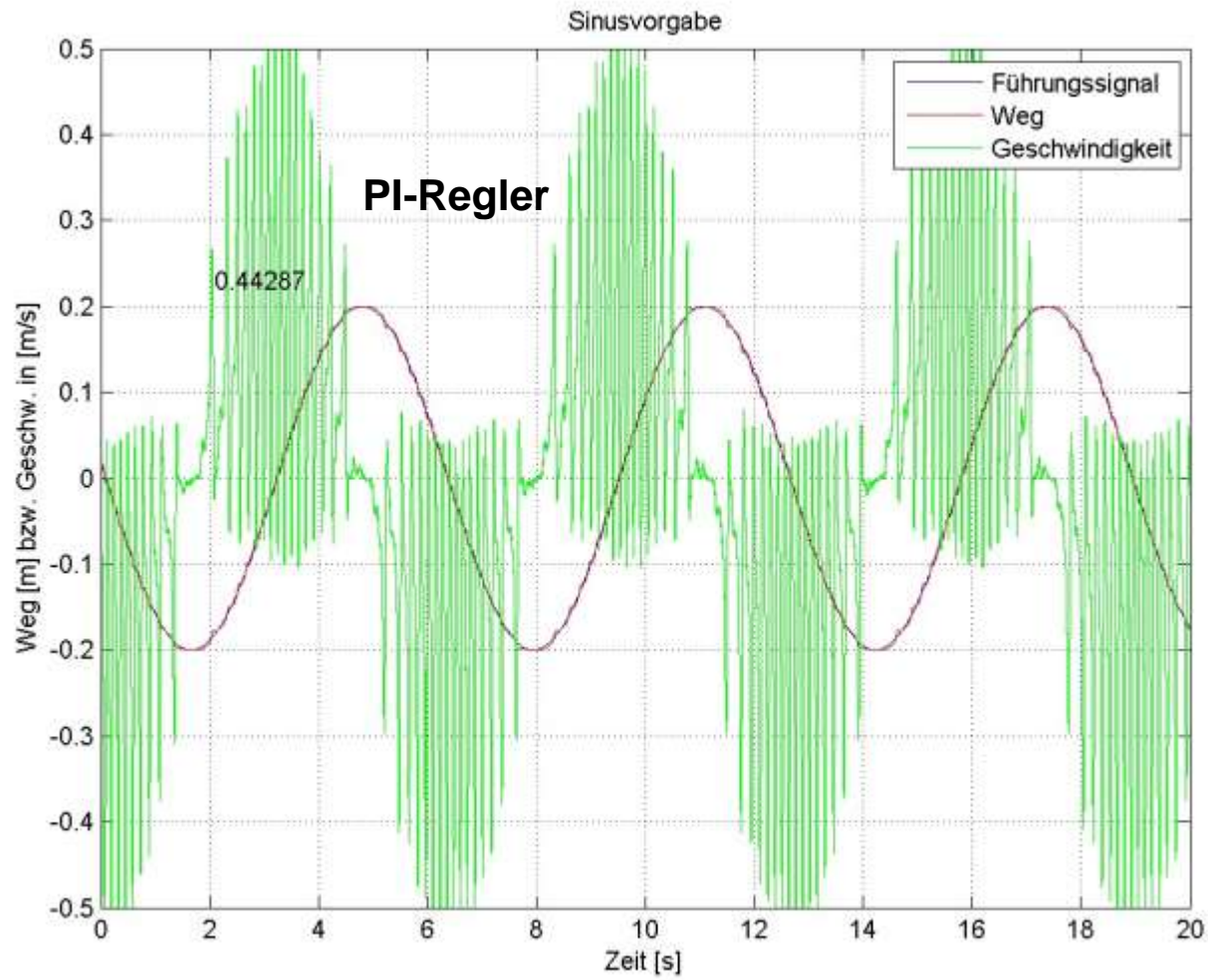
## Elektronisch, Regelung:

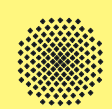
- **Kommutierung**
  - Sinuskommutierung, 3-strängiges System, 30 Watt pro Spule, getaktet bei 30 kHz mit PWM.
- **Reglermodelle/Regelkreisstrukturen**
  - PI –Regler, als Standard-Regler
  - Kaskadenregelung
  - Kaskadenregelung mit Störgrößenaufschaltung
  - Linear quadratische Regelung mit Beobachter (LQR)
  - **IMC-Regelung mit Störgrößenaufschaltung**
- **Regleroptimierung**
  - Analytisch Modellklassifizierung
  - Experimentell Modellklassifizierung





# Möglichkeiten der Kompensation:

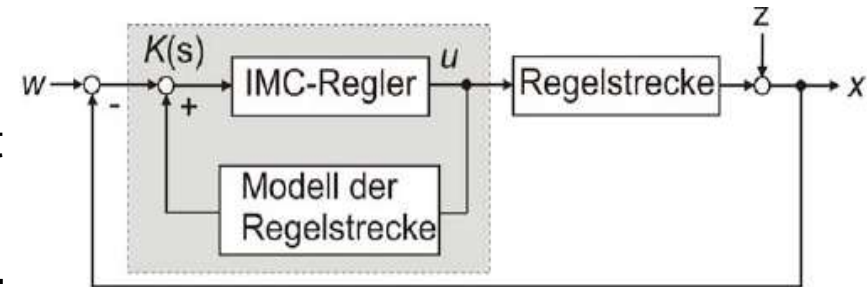




## Modellbasierte Regelung:

- **Internal Model Control (IMC)**

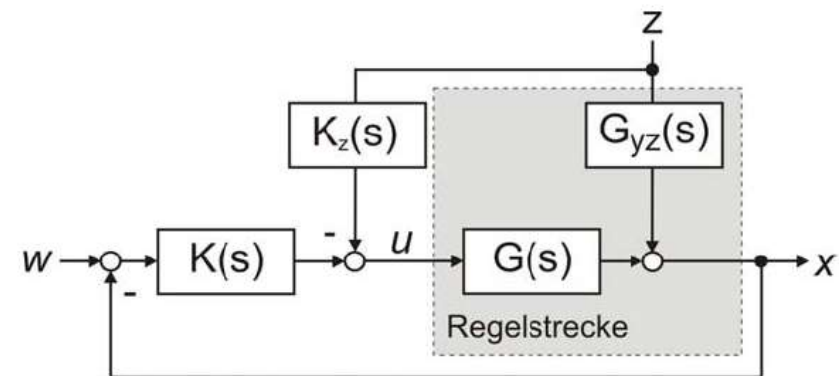
Der realen Regelstrecke  $G_S(s)$  wird ein Streckenmodell  $\hat{G}_S(s)$  zu geschaltet.  
Die Differenz der Streckenausgänge wird dem Regler  $G_{IMC}(s)$  zurück geführt.

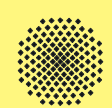


## allgemeiner Regelkreis:

- **Störgrößenaufschaltung**

Die Störgröße z wird erfasst und über eine entsprechende Übertragungsfunktion aufgeschaltet.





## Modellbasierte Regelung:

- **Internal Model Control (IMC)**

Der realen Regelstrecke  $G_S(s)$  wird ein Streckenmodell  $\hat{G}_S(s)$  zu geschaltet.

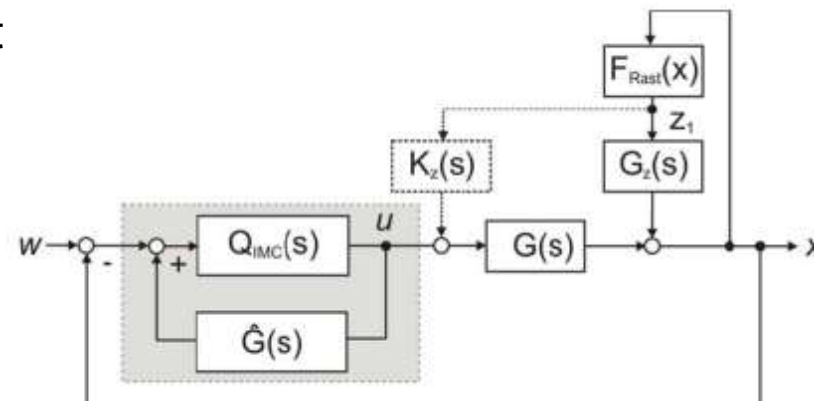
Die Differenz der Streckenausgänge wird dem Regler  $G_{IMC}(s)$  zurück geführt

### IMC-Reglers mit Störgrößenaufschaltung

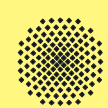
## allgemeiner Regelkreis:

- **Störgrößenaufschaltung**

Die Störgröße  $z$  wird erfasst und über eine entsprechende Übertragungsfunktion aufgeschaltet.





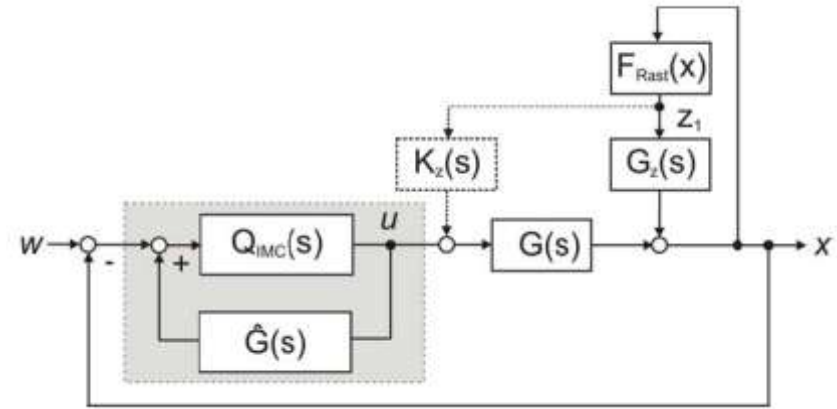


## Zustandsregelungen:

geschlossener Reglerentwurf für die gesamte Regelstrecke (lineare Regler)

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \ddot{x} \\ \dot{i} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -\frac{c}{m} & -\frac{d}{m} & \frac{3lB}{m} \\ 0 & -\frac{Bl}{L} & -\frac{R}{L} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ \dot{x} \\ i \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L} \end{pmatrix} U_{ein} + \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} F_{Rast}$$

$$y = (1 \ 0 \ 0) \cdot \bar{x}$$

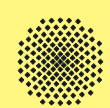


Regelstrecke:  $G(s) = \frac{X}{U_{ein}} = \frac{3 \cdot l \cdot B}{s^3(mL) + s^2(mR + dL) + s(dR + cL + 3B^2l^2) + cR}$

Störgröße:  $G_z(s) = \frac{X}{U_{ein}} = \frac{R + Ls}{s^3(mL) + s^2(mR + dL) + s(dR + cL + 3B^2l^2) + cR}$

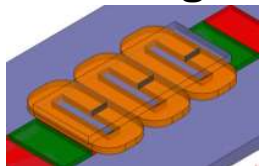
IMC-Regler:  $Q_{IMC}(s) = \frac{1}{3 \cdot l \cdot B} \frac{s^3(Lm) + s^2(Rm + dL) + s(dR + cL + 3l^2B^2) + cR}{\left(\frac{s}{w} + 1\right)^3}$

Störgrößen-Regler:  $K'_z(s) = -\frac{G_z(s)}{G(s)} = \frac{R + Ls}{3 \cdot l \cdot B}$



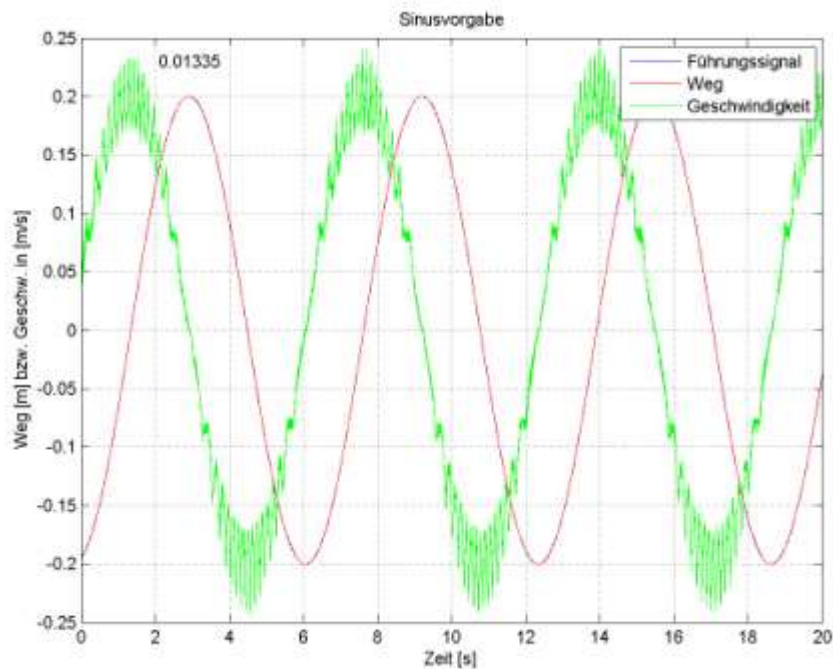
# Ergebnisse für die Regelung:

## IMC-Regler ohne Störgrößenaufschaltung

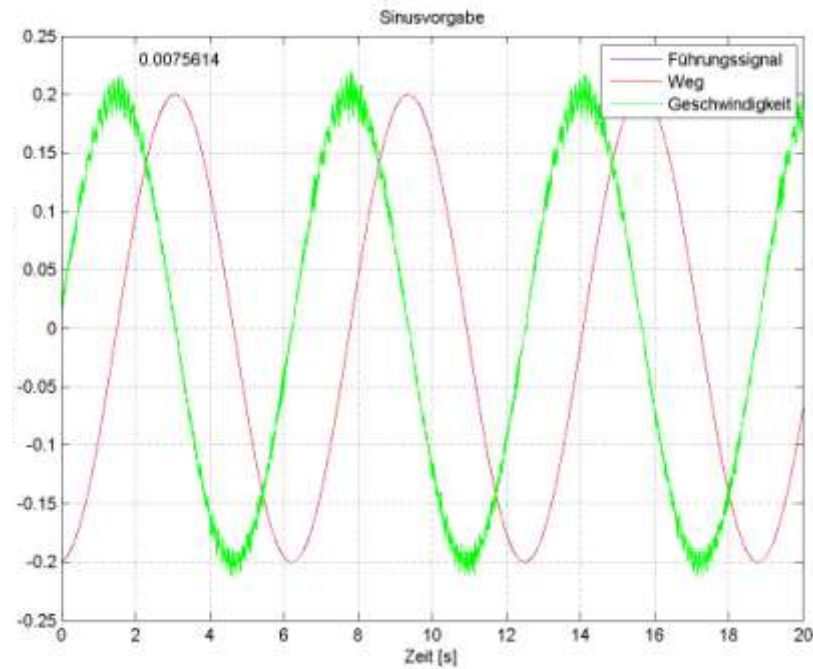
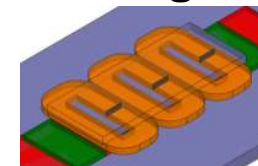


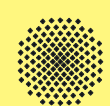
Rückschluss 127,5mm, Rastkraft: 12,3 N

Bahnfolgege nauigkeit



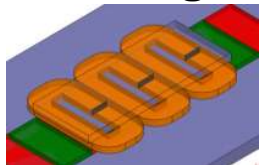
## IMC-Regler mit Störgrößenaufschaltung





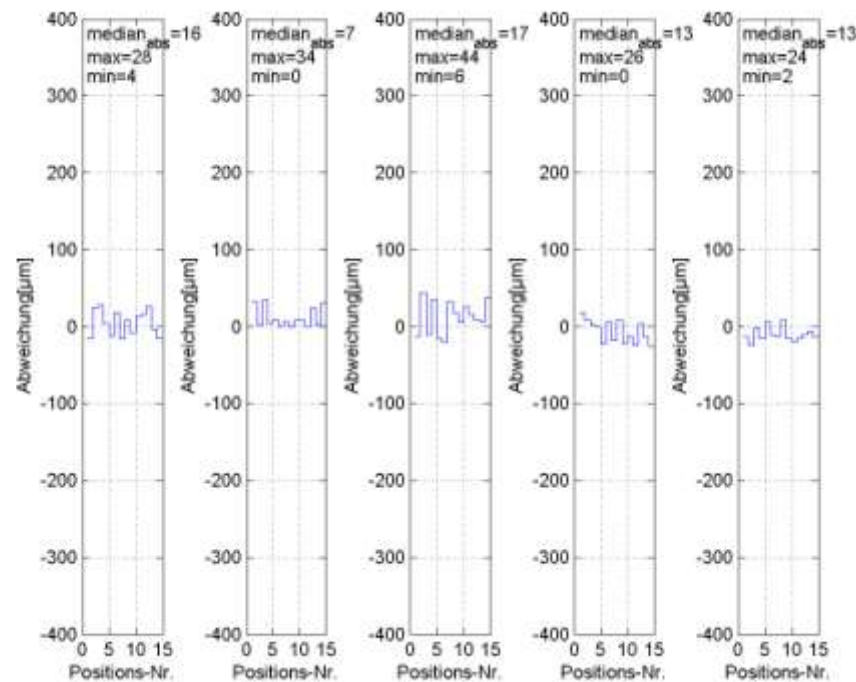
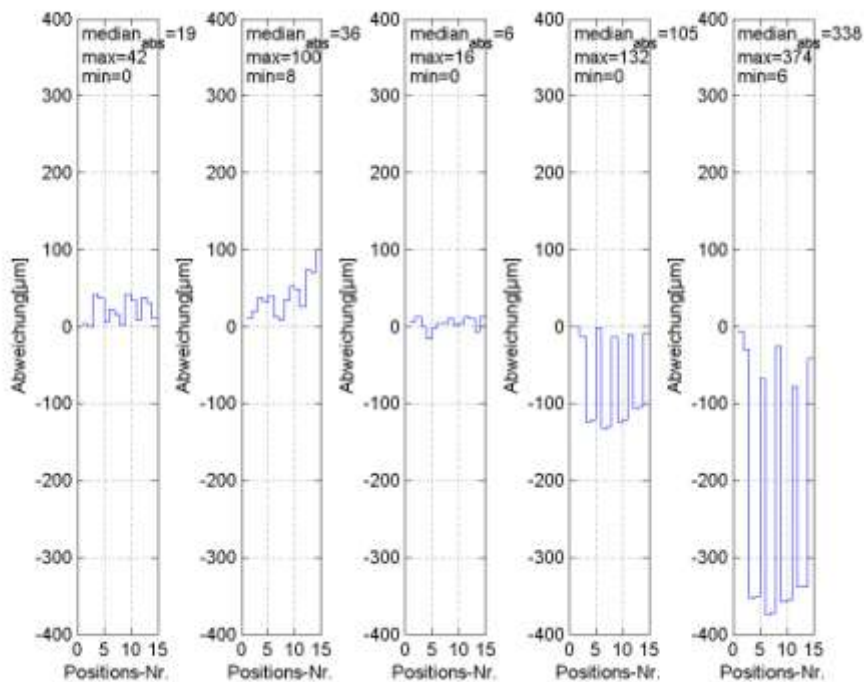
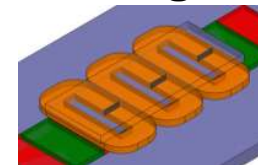
# Ergebnisse für die Regelung:

## IMC-Regler ohne Störgrößenaufschaltung



Rückschluss 127,5mm, Rastkraft: 12,3 N  
Positioniergenauigkeit

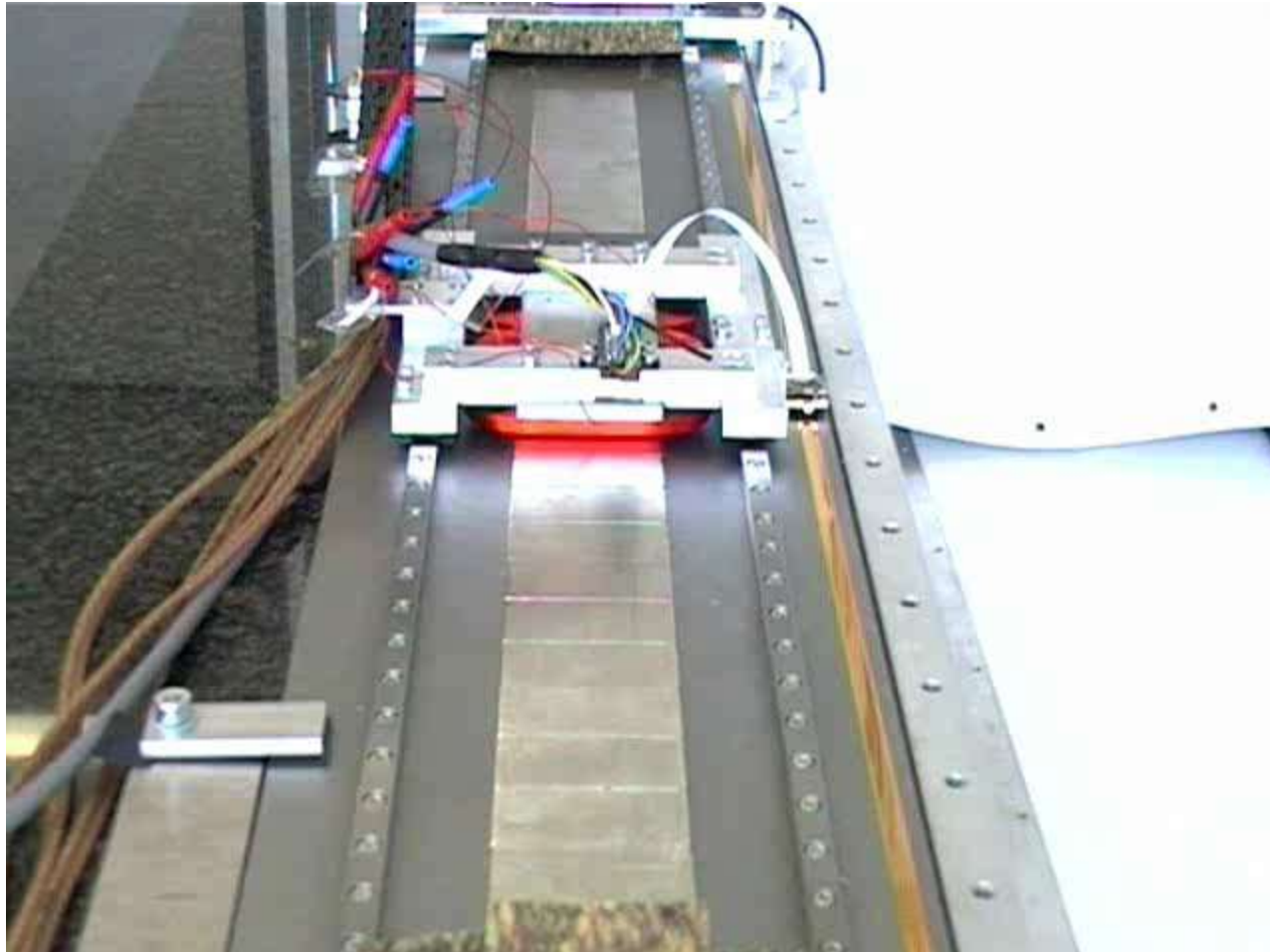
## IMC-Regler mit Störgrößenaufschaltung

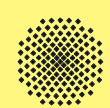




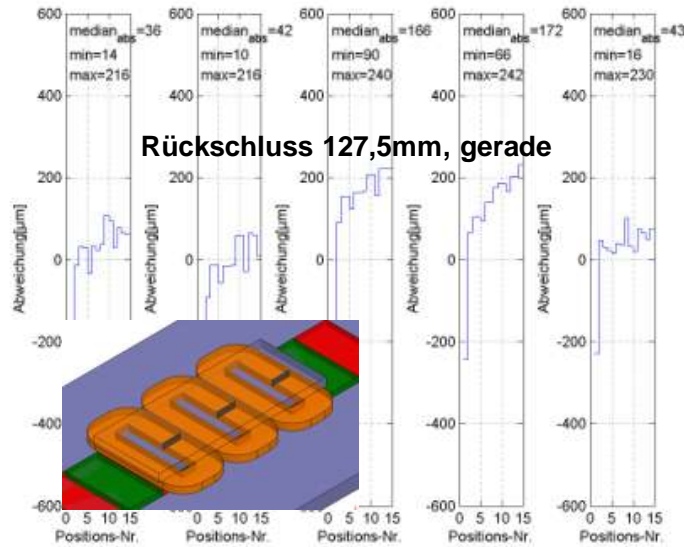
# Ergebnisse für die Regelung:

## IMC-Regler mit Störgrößenaufschaltung





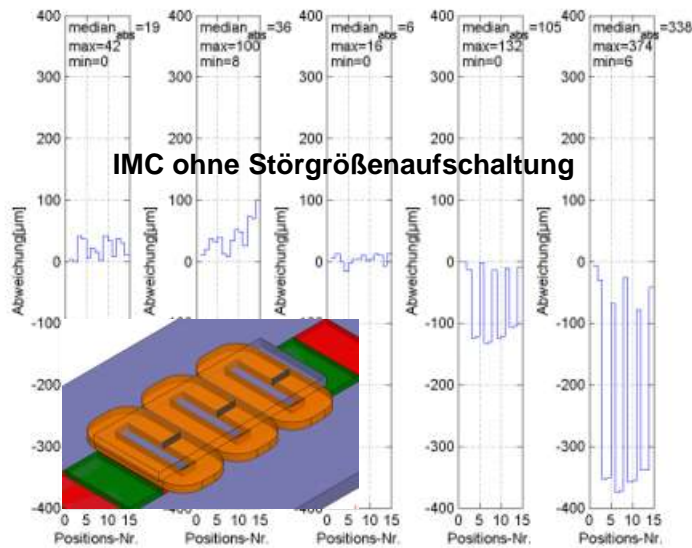
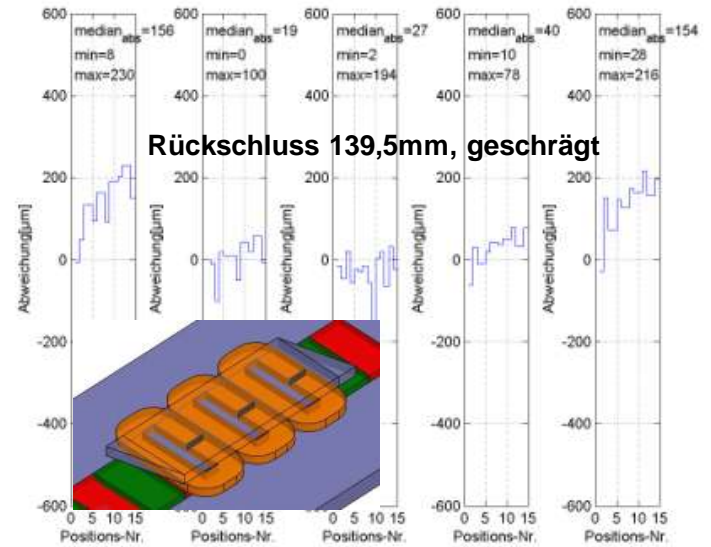
# Vergleich der Positioniergenauigkeit:



Geometrie:



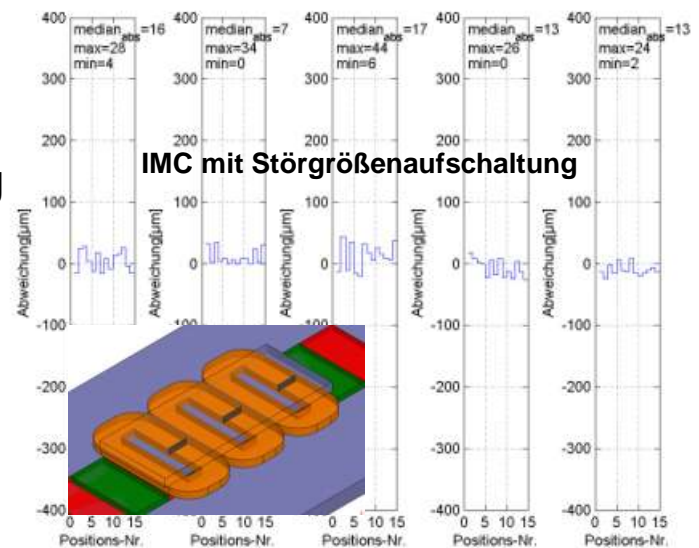
↑ 30%

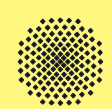


IMC-Regelung



↑ 97%



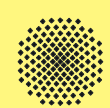


## Zusammenfassung:

### Ergebnisse der Geometrievariation

- Zahl der zu variierenden Parameter lässt sich stark reduzieren, 25 → 7
- Verringerung der Rastkraft auf Werte zwischen 1,5 N und 2,5 N bei optimierten Flachspul- und Zahnspulmotoren, Ausgangsbasis: 12,3N
- Erhöhung der Positioniergenauigkeit um ↑30%
- Der Vernetzungsgrad ist für Motorauslegung bei FEM mit entscheidend





## Zusammenfassung:

### Ergebnisse der IMC-Kompensationsregelung

- Rastkräfte sind vollständig ausregelbar
- Verbesserung der Positioniergenauigkeit, von  $200\mu\text{m}$  auf bis zu  $7\mu\text{m}$ ,  $\uparrow 97\%$
- Verbesserung der Bahnfolgegenauigkeit,  $\uparrow 48\%$
- Verringerung der Geschwindigkeitswelligkeit
- Reglerauslegung bis zu 50% schneller als FEM-Simulation



**Vielen Dank  
für Ihre Aufmerksamkeit!**