Verbesserung der Betriebseigenschaften von hydrodynamischen Gleitlagern durch Formadaption

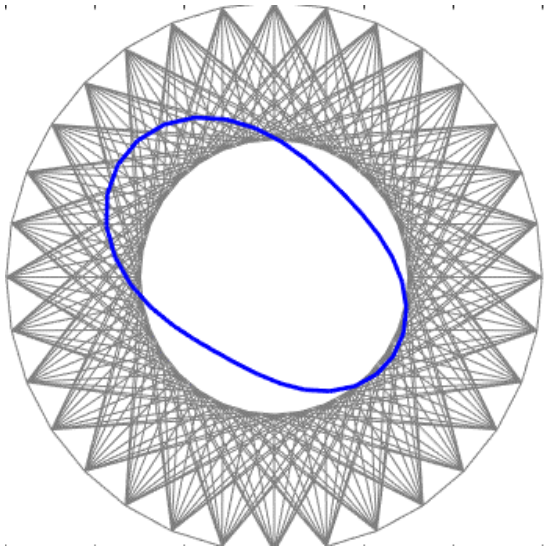
1. Prof. Dr. sc. ETH Alexander Hasse
2. Dipl.-Ing. B. Prase
3. **B. Sc. Stephanie Kirmse (Referentin)**

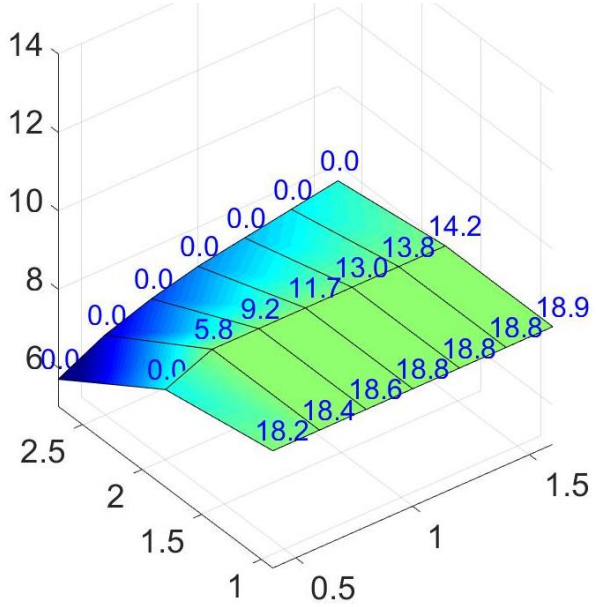
TU Chemnitz
Reichenhainer Straße 70
09126 Chemnitz

Tel: +49 371 531 37109

E-Mail: stephanie.kirmse@mb.tu-chemnitz.de

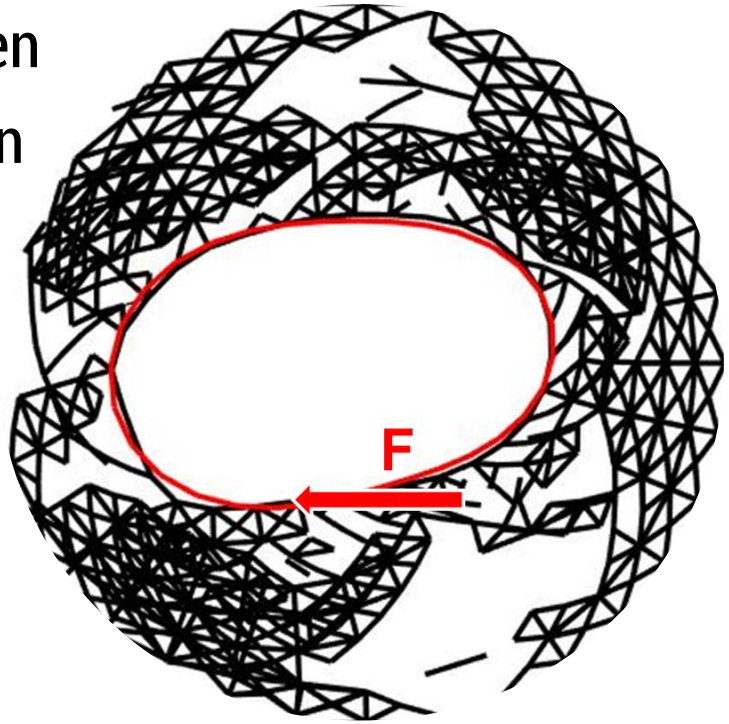
www.tu-chemnitz.de/mb/mp





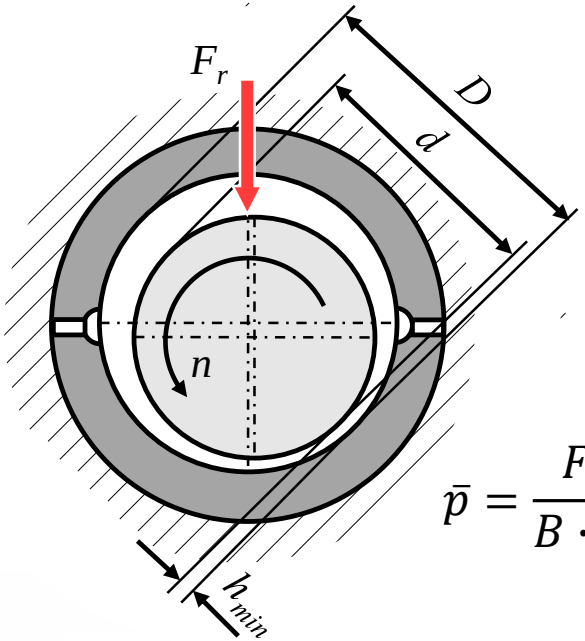
Gliederung

1. Einleitung und Problemstellung
2. Berechnung möglicher Formänderungen
3. Modellerstellung und Simulation
4. Vorauswahl passender Formänderungen
5. Beurteilung möglicher Formänderungen
6. Umsetzung
7. Zusammenfassung
8. Ausblick

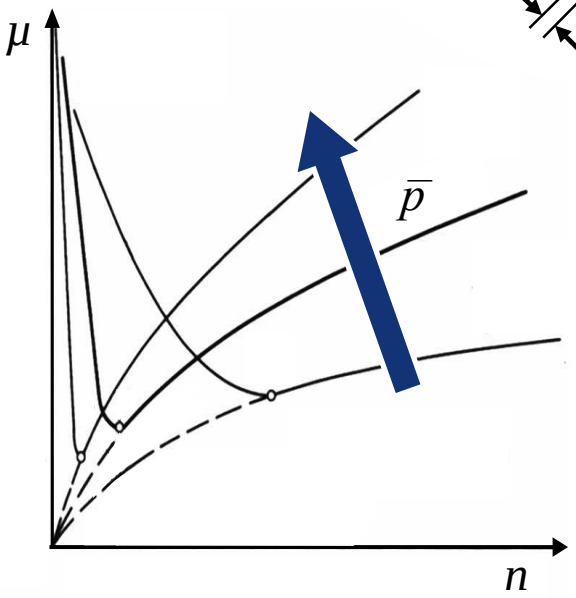


Hydrodynamische Gleitlager

- Hydrodynamische Gleitlager ermöglichen und führen gleitende Relativbewegung von mehreren Teilen eines Mechanismus
- Erforderliche hydrodynamische Tragkraft erzeugt durch:
  1. verengender Schmierspalt
  2. viskoser Schmierstoff
  3. Relativbewegung beider Reibpartner
- Stribeck-Kurve: Lagerreibung abhängig rel. Drehzahl n und spez. Lagerlast $\bar{p}$



$$\bar{p} = \frac{F_r}{B \cdot D}$$



D -	Durchmesser Lagerring
d -	Durchmesser Welle
F_r -	radiale Kraft
h_{min} -	minimale Schmier-spalthöhe
B -	Lagerbreite

Betriebseigenschaften von Gleitlagern abhängig von Betriebsparametern

- Verlagerung auf Gümpel'schem Halbkreis abhängig von Betriebsparametern

- <u>Zwei Sonderfälle:</u>

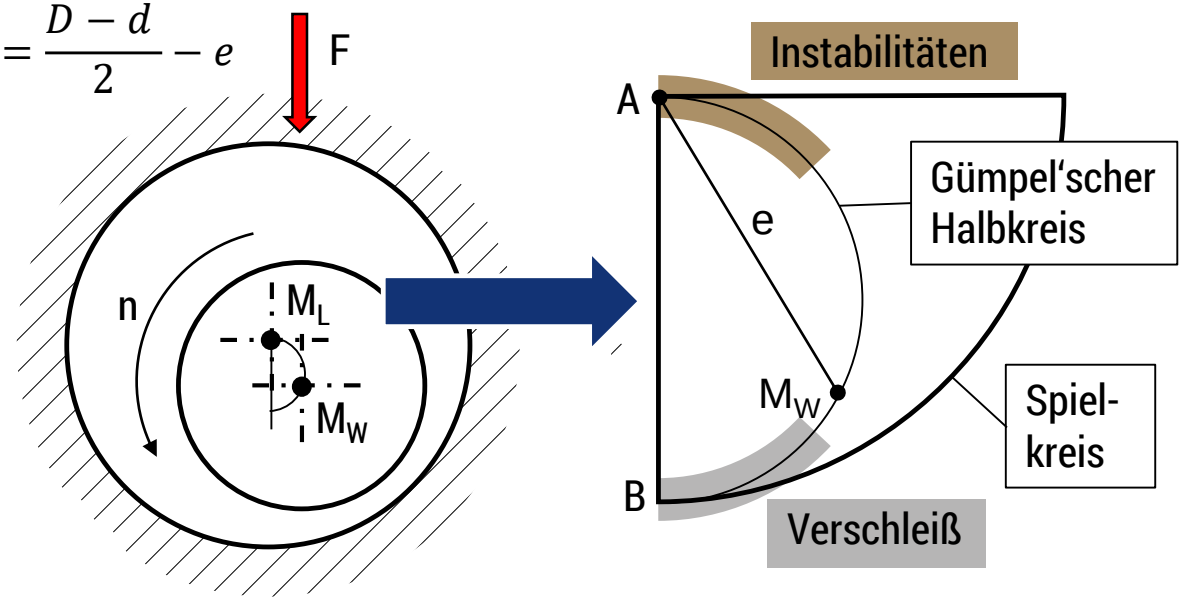
  A n=∞, So=0

  Flüssigkeitsreibung, h_{min} maximal

  B n=0, So=∞

  Festkörperreibung, h_{min} null

$$h_{min} = \frac{D-d}{2} - e$$



→ konstantes h_{min}, um Instabilitäten, übermäßigen Verschleiß und Eigenschaftsänderung abhängig von Betriebsparametern zu vermindern

Ansätze zur Einstellbarkeit Betriebseigenschaften

Bisherige Ansätze:

1. Verstellbare Lager mit starrer Geometrie: komplizierter Aufbau, teuer
2. Nachgiebige Lager: einfacher Aufbau, Formänderung nicht aktiv steuerbar

→ Forderung

aktive Formänderung durch wenige Aktoren + einfacher Aufbau

↓

Lösung

Nachgiebige Mechanismen mit selektiver Nachgiebigkeit:

- Struktur reagiert auf unterschiedliche Lastfälle mit ein und derselben Verschiebungsverteilung durch Konditionierung Steifigkeitsmatrix

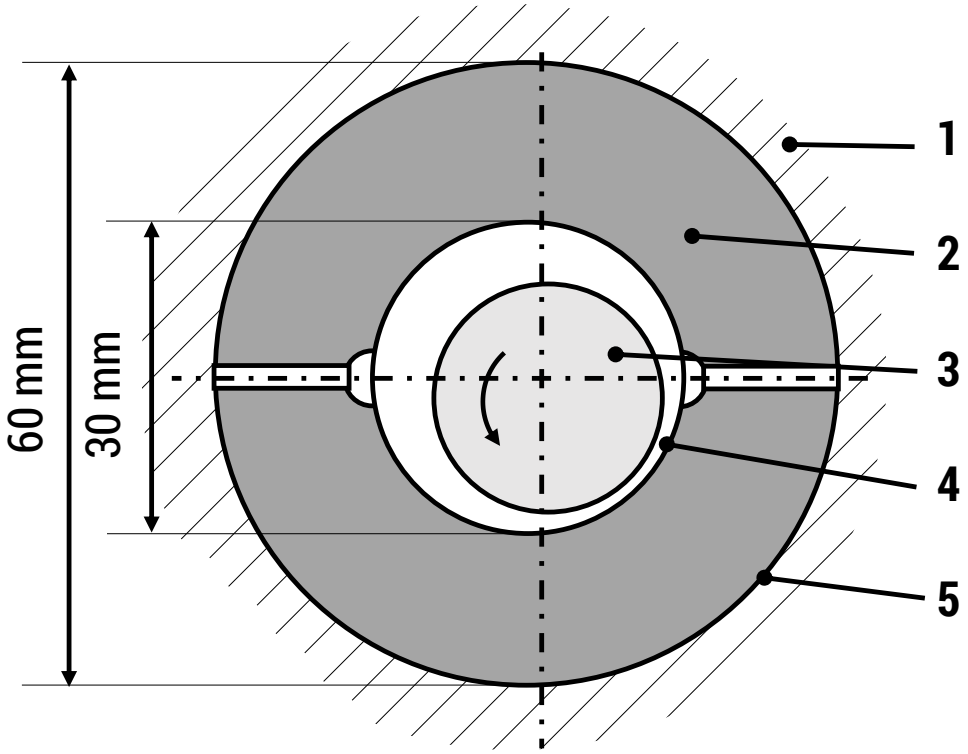
Agenda für Entwurf eines adaptiven Gleitlagers

1. Gewünschte Formänderung definieren, welche optimale Betriebseigenschaften über großen Betriebsbereich ermöglicht

2. Struktur Lagergehäuse finden, welche gewünschte Formänderung ermöglicht

Definition der Randbedingungen

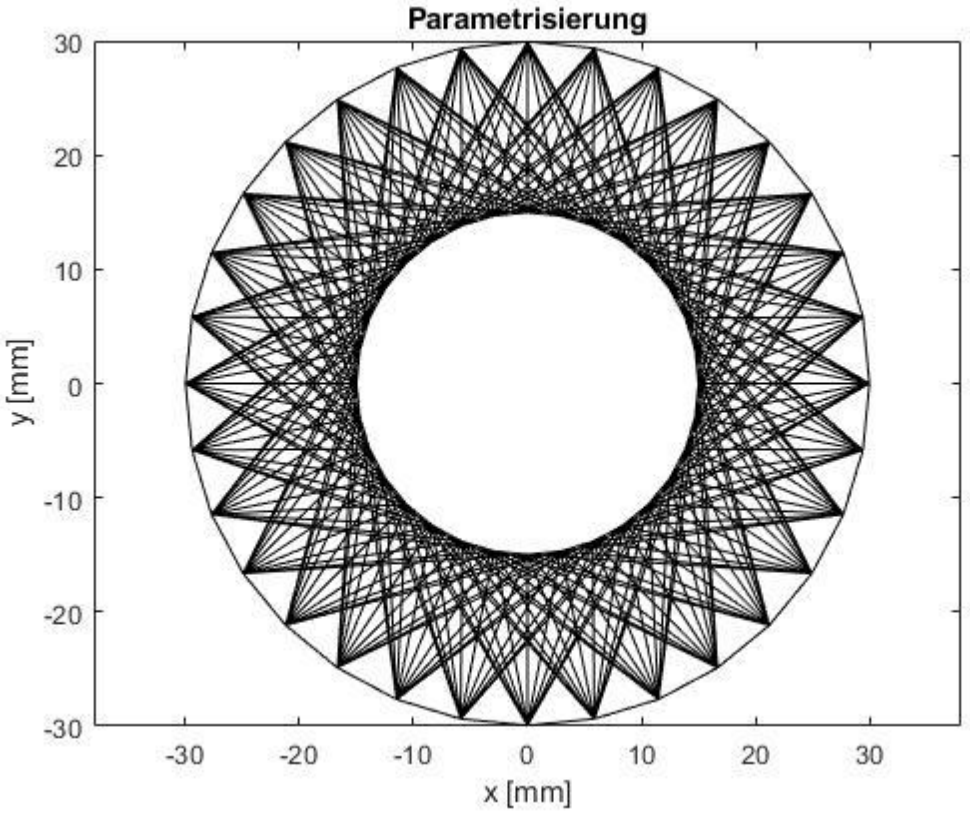
- Lagerring ins Gehäuse integriert
- Freie Variierung äußerer Durchmesser entsprechend Platzforderungen
- freie Gestaltung Bauraum
- Außerhalb Bauraum Gehäuse starr
- Für inneren Lagerring konstante Dicke erforderlich



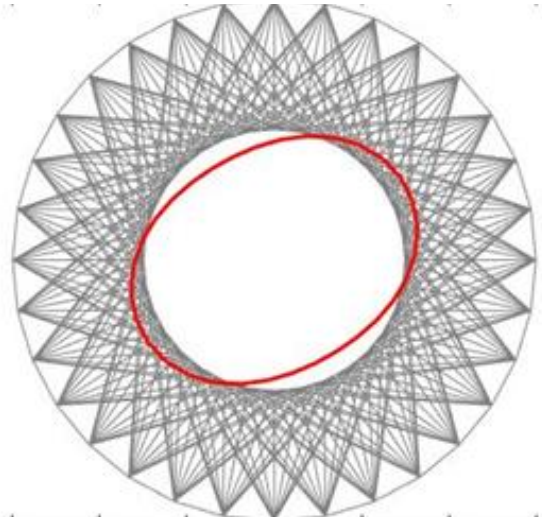
1 Starres Gehäuse
2 Bauraum
3 Welle
4 Innenkreis
5 Außenkreis

Parametrisierung Bauraum und zugehörige Eigenformen

- Eignung gewünschter Formänderung für Synthese gewährleisten
- Deformation Struktur zu einer der ersten Eigenformen ihrer Steifigkeitsmatrix benötigt wenig Energie
- Parametrisierung mit Balkenelementen → Dicke 2 mm, Breite 10 mm
- Berechnung Steifigkeits-matrix $\boldsymbol{K}$

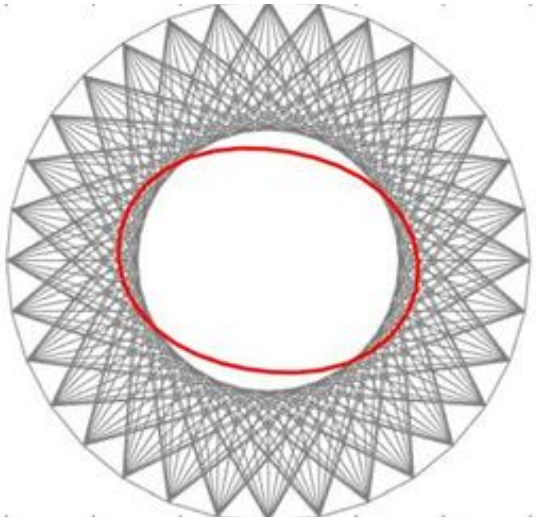


Parametrisierung Bauraum und zugehörige Eigenformen



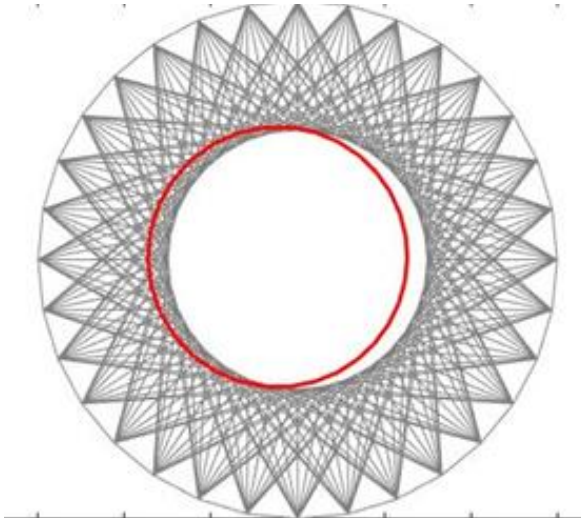
Eigenform 1: φ_1

Erfahrungsgemäß lassen sich erste drei Eigenformen der Steifigkeitsmatrix K der festgelegten Parametrisierung besonders gut durch Synthese abbilden



Eigenform 2: φ_2

Eigenform 3: φ_3

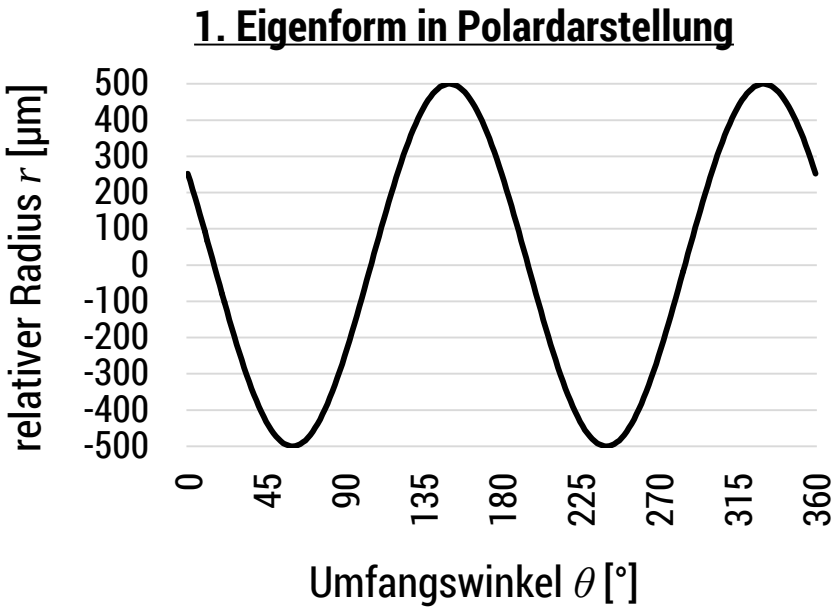


Erstellen möglicher Formen für hydrodynamische Simulation

- Für Auswahl möglicher Formen Linearkombinationen gewichteter ersten drei Eigenformen:

$$\varphi_d = \alpha_1 \bullet \varphi_1 + \alpha_2 \bullet \varphi_2 + \alpha_3 \bullet \varphi_3$$

- α in Schritten $\Delta s = 0{,}1$ von 0 bis 1

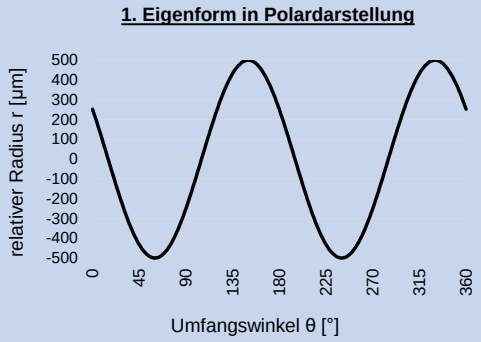


- Formen genormt → maximaler Eintrag 500 µm
- einige Formen doppelt aufgrund Normen → aussortiert: 1074 mögliche Formen
- Umrechnung in für ALP3T einlesbare Form → Verschiebungsfeld

Simulationsmodell in ALP3T

Lagerform:

- Netzauflösung
  256 x 34 = 8704 Punkte
- Generiertes Verschiebungsfeld



Lagerdaten:

- Innendurchmesser D = 30 mm
- Außendurchmesser
  D_a = 42 mm
- Breite B = 15 mm
- Radiales Kleinstspiel Ψ = 2 ‰
- Schmierstoff ISOVG 32
- Zuführtemperatur T_{zu} = 50 °C

ALP3T-Solver

- Lösung der Reynolds-Differentialgleichung für alle Punkte

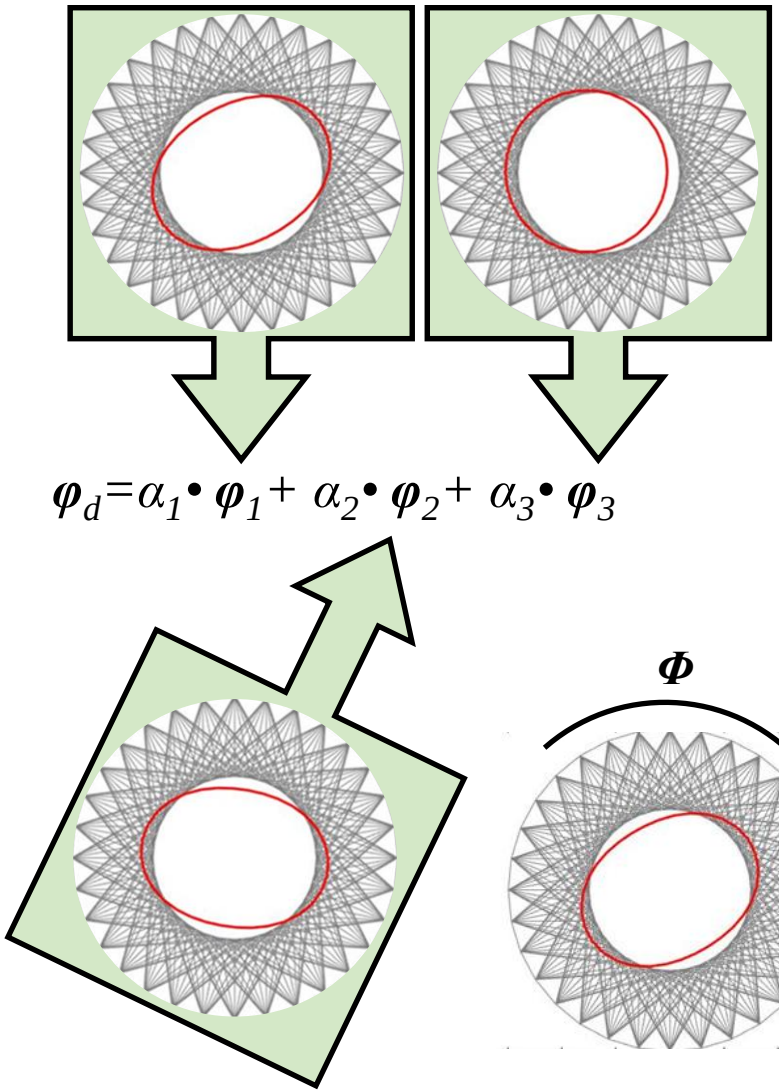
Parametervariation

Lagerform φ_d (1074x)

α_1=0,0; α_2=0,0; α_3=0,0
α_1=0,0; α_2=0,0; α_3=0,1
α_1=0,0; α_2=0,1; α_3=0,0
α_1=0,0; α_2=0,1; α_3=0,1
α_1=0,0; α_2=0,1; α_3=0,2
α_1=0,0; α_2=0,1; α_3=0,3
⋮

Orientierung Φ (8x)

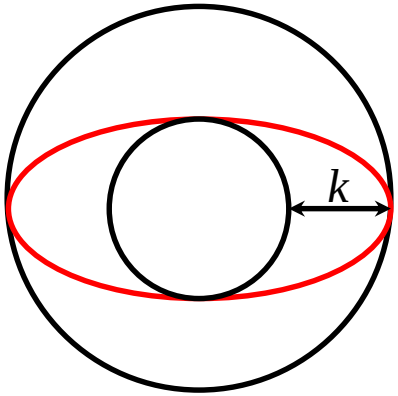
0 °
45 °
90 °
135 °
180 °
225 °
270 °
315 °



Parametervariation

Lagerform φ_d (1074x)

Orientierung Φ (8x)



— Mögliche Lagerform
— Idealer Kreis

Max. Form-abweichung k

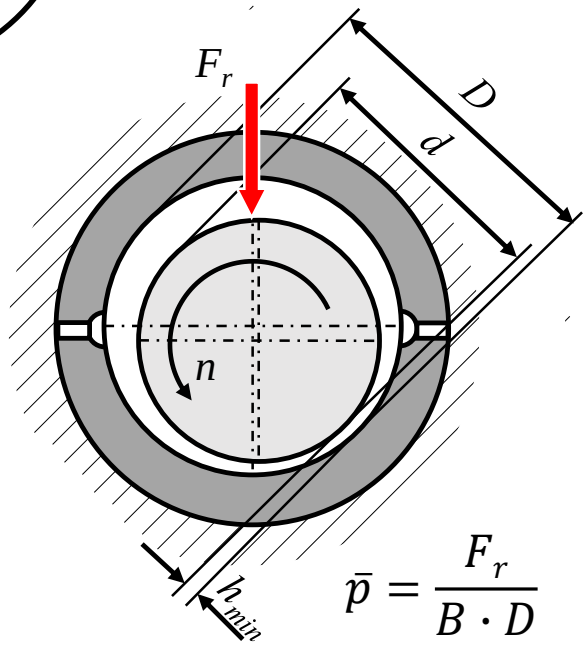
0 µm 10 µm
20 µm 30 µm
40 µm

Spezifische Lagerlast p

0,9 MPa
1,8 MPa
2,7 MPa

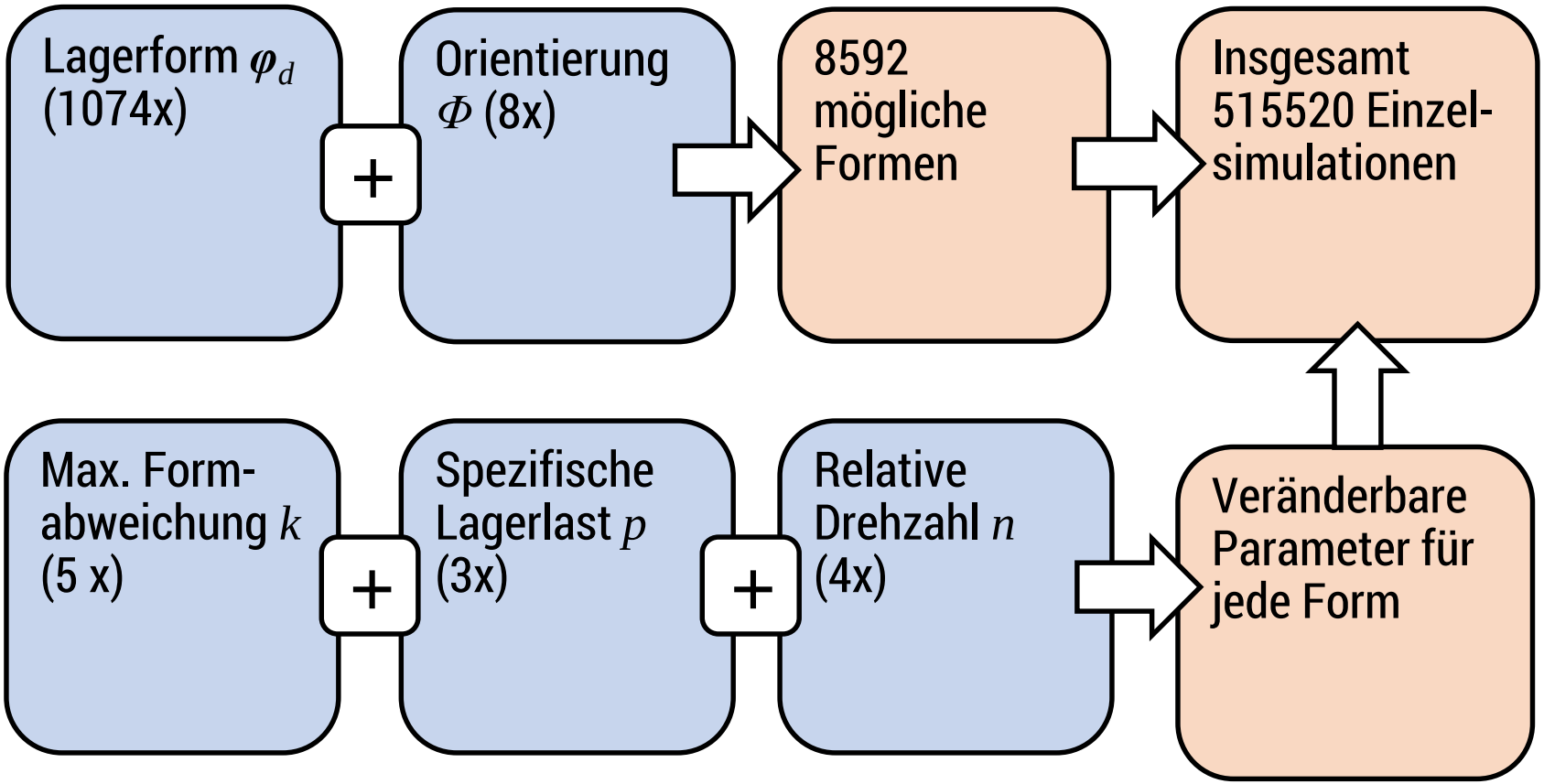
Relative Drehzahl n

4000 1/min
8000 1/min
12000 1/min
16000 1/min



$$\bar{p} = \frac{F_r}{B \cdot D}$$

Parametervariation



Vorauswahl

- n, p → Betriebs-parameter
- k → frei variierbar
- Angestrebtes konstantes h_{min} = 8 µm
- Grenzen für Vorauswahl: $5 \leq h_{min} \leq 8{,}5$

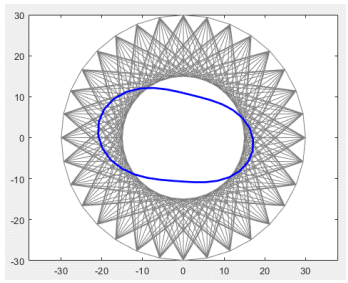
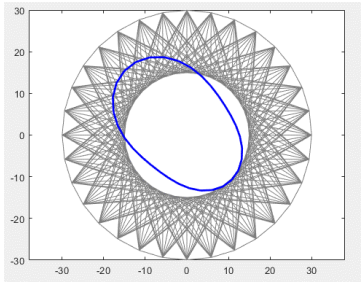
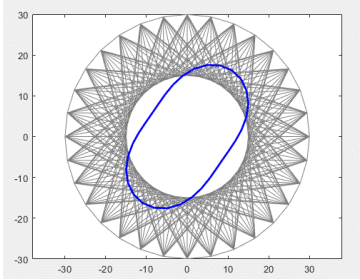
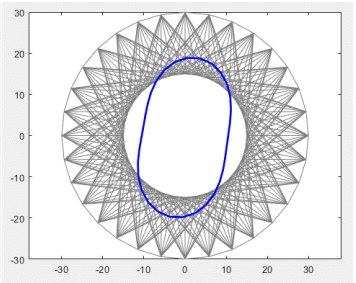
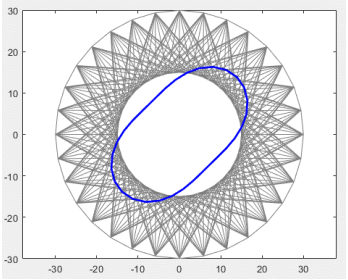
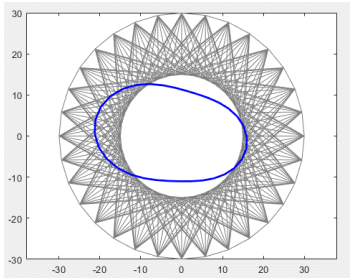
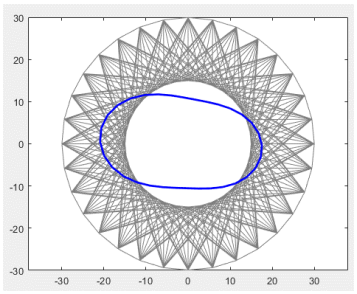
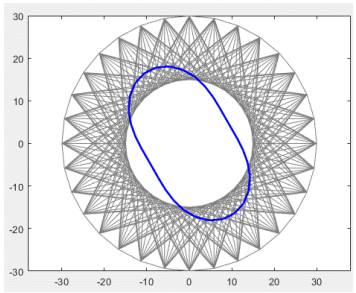
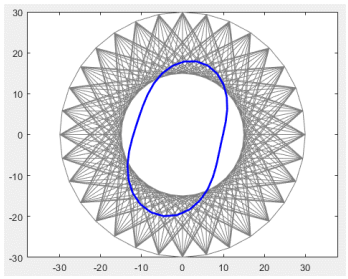
Berechnetes h_{min} für φ_1 mit Orientierung 225°

n x p		k_1 = 0 µm	k_2 = 5 µm	k_3 = 10 µm	k_4 = 15 µm	k_5 = 20 µm
n_1	p_1	11,2	11	10,3	0	6,9
	p_2	7,4	7	6,5	5,8	4,9
	p_3	5,7	5,3	4,8	4,3	0
n_2	p_1	12,7	0	12,8	0	7,7
	p_2	8,7	8,5	8,1	7,3	5,9
	p_3	0	6,4	6	0	4,7
n_3	p_1	0	0	1000	0	8
	p_2	0	0	9	8,3	6,4
	p_3	7,2	7	6,7	6,2	5,2
n_4	p_1	14	0	1000	1000	8,2
	p_2	9,7	9,8	0	0	6,6
	p_3	7,6	7,4	7,2	6,7	5,4

-> 0 = nicht durchgeführte Berechnungen (57,4 %)

-> 1000 = nicht konvergierte Berechnungen (7,8 %)

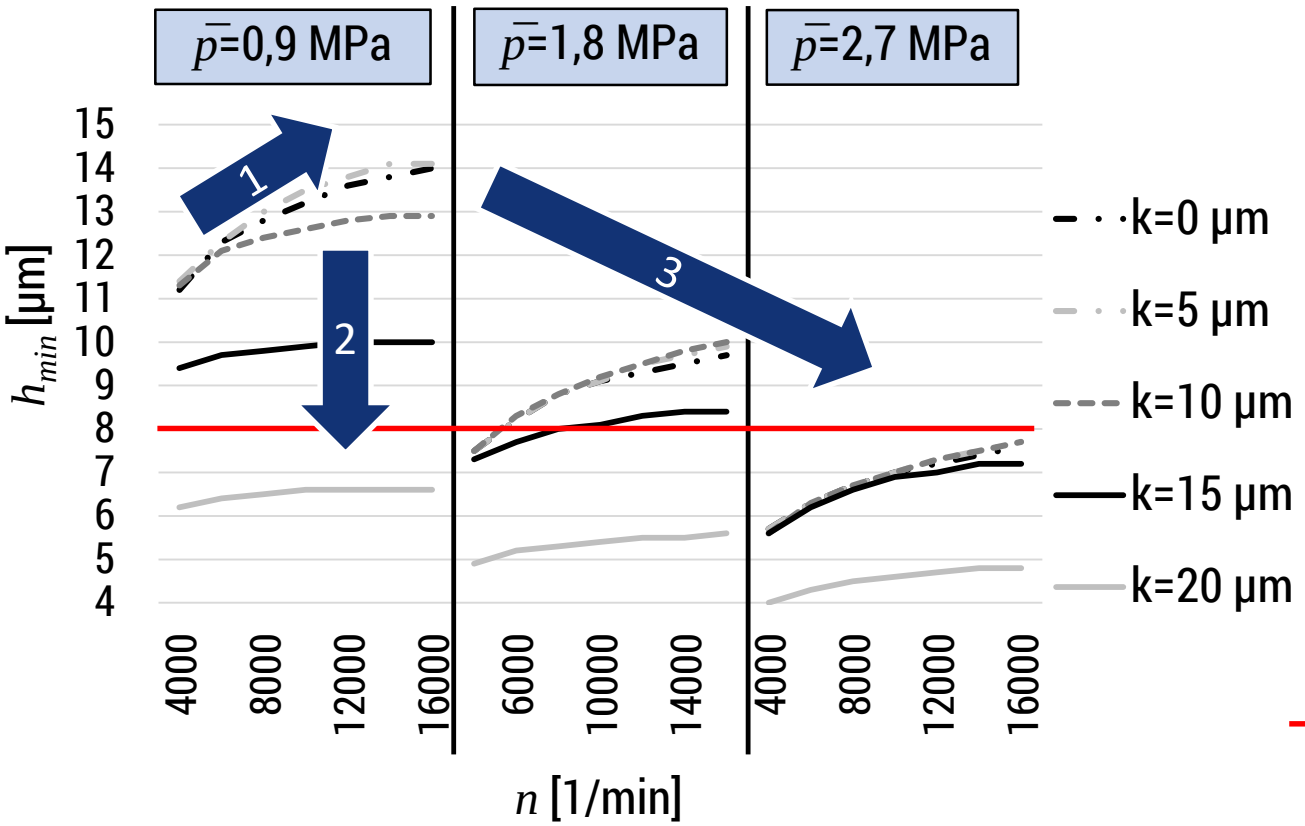
Ausgewählte Formänderungen

Orientierung Φ = 0 ° (4)	Orientierung Φ = 45 ° (6)	Orientierung Φ = 135 ° (1)	Orientierung Φ = 270 ° (2)	Orientierung Φ = 315 ° (2)
				
				
⋮	⋮			

- Feiner aufgelöste Nachsimulation
- Aufgrund von Konvergenzproblemen verbleiben 12 auswertbare Geometrien

Beurteilung hinsichtlich minimaler Schmierspalthöhe

Verlauf von h_{min} bei verschiedenen k-Faktoren



-> Exemplarisch für Formänderung 001007

1 h_{min} ↑, wenn n ↑

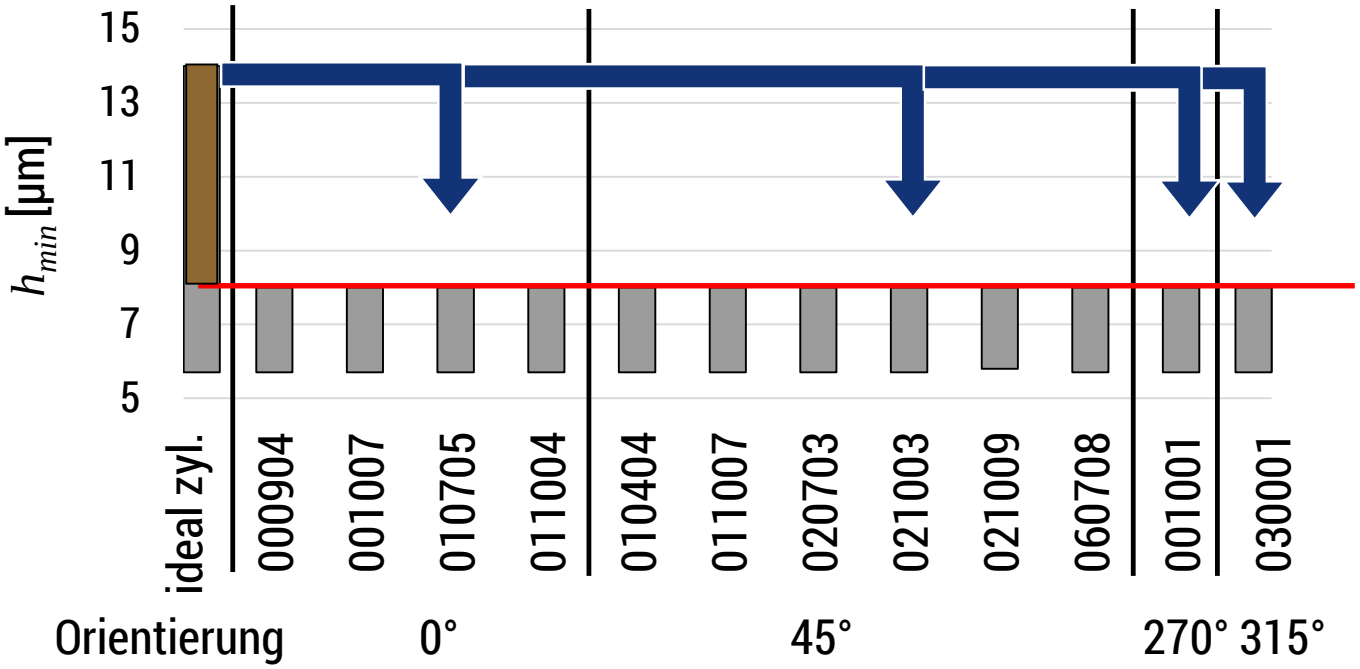
2 h_{min} ↓, wenn k ↑

3 h_{min} ↓, wenn $\bar{p}$ ↑

Gewünschtes konstantes h_{min}

Beurteilung hinsichtlich minimaler Schmierspalthöhe

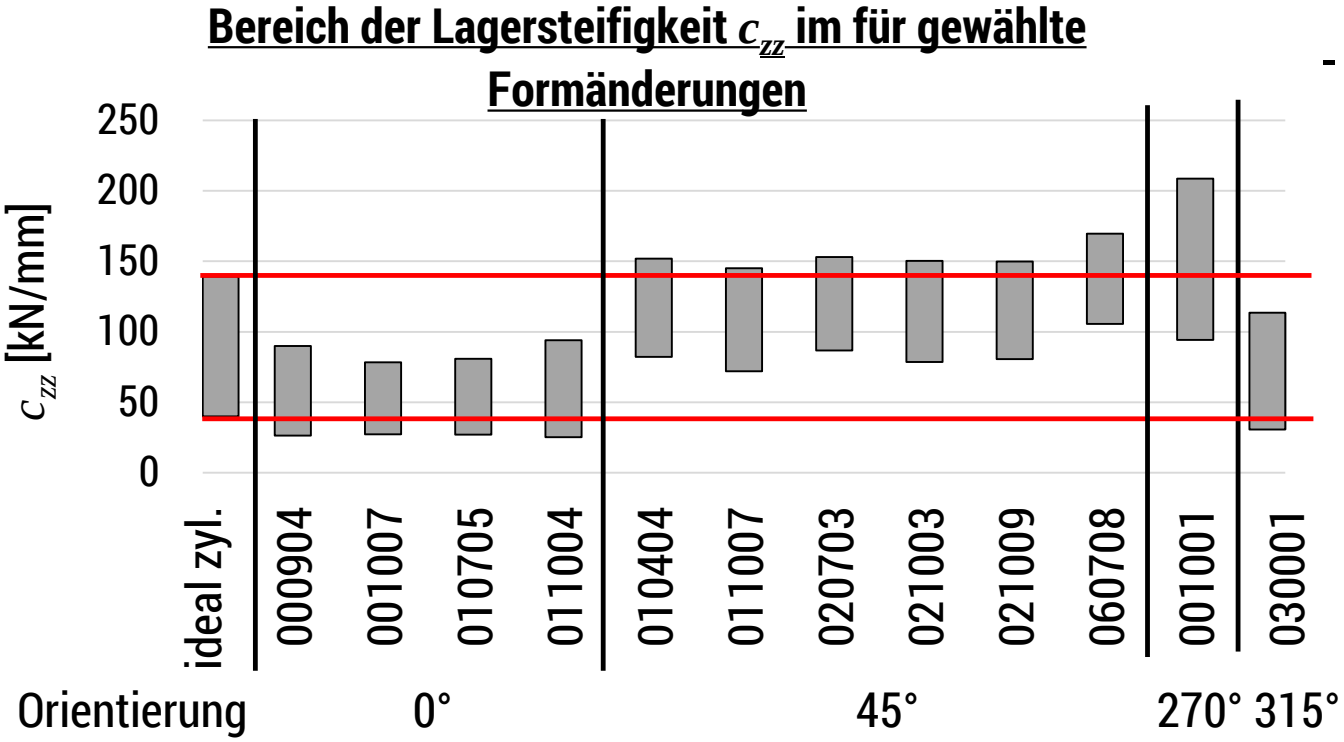
Bereich minimaler Schmierspalthöhe h_{min} für gewählte Formänderungen



- h_{min} für alle 12 Formänderungen auf 8 µm absenkbar
- Niedrigere h_{min} können nicht angehoben werden

- Alle 12 Formänderungen für Adaption h_{min} geeignet → Bewertung weiterer Kenngrößen

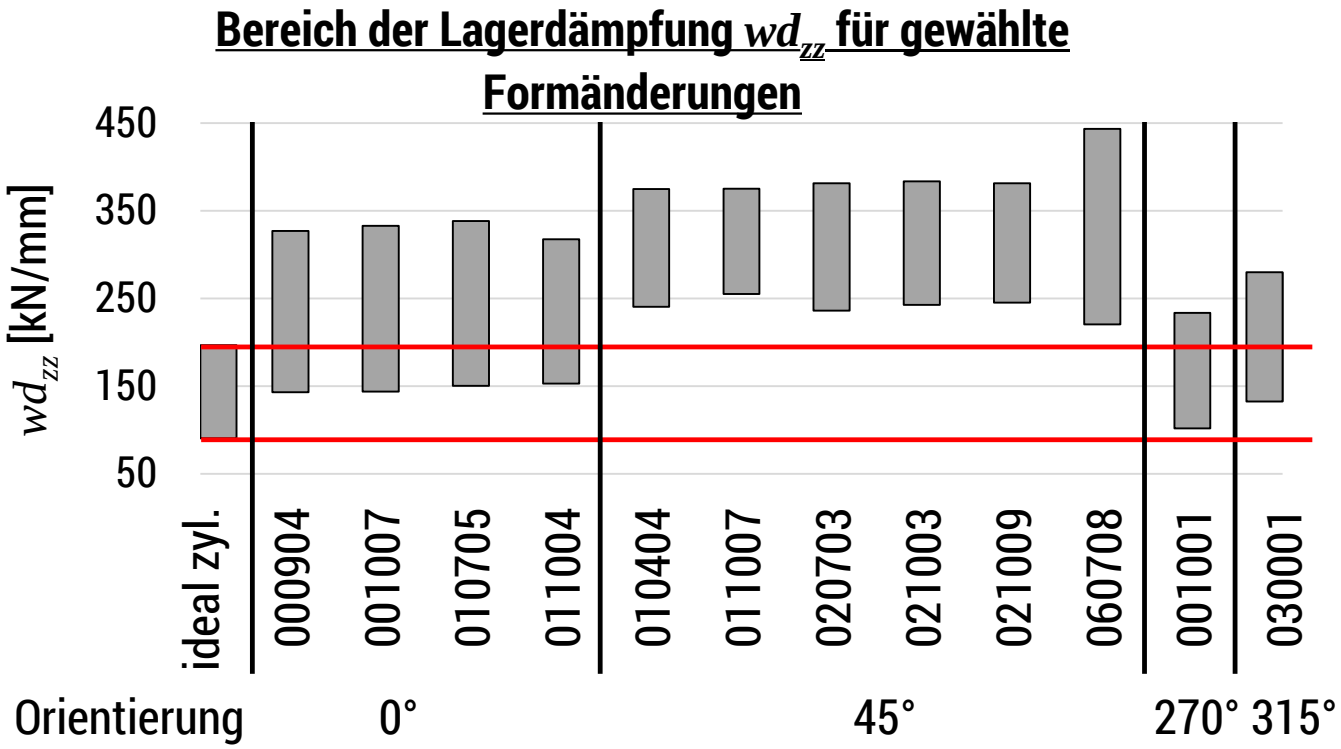
Beurteilung hinsichtlich Lagersteifigkeit



- Berechnete Lagersteifigkeit für Betriebspunkte in denen h_{min} = 8 µm möglich ist

- Schlechtere Steifigkeiten für Orientierung 0° und 315°
- Bessere Steifigkeiten für Orientierung 45° und 270°

Beurteilung hinsichtlich Lagerdämpfung

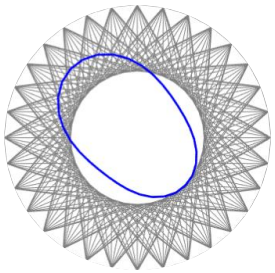


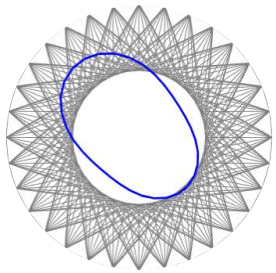
- Berechnete Lagerdämpfung für Betriebspunkte in denen h_{min} = 8 µm möglich ist

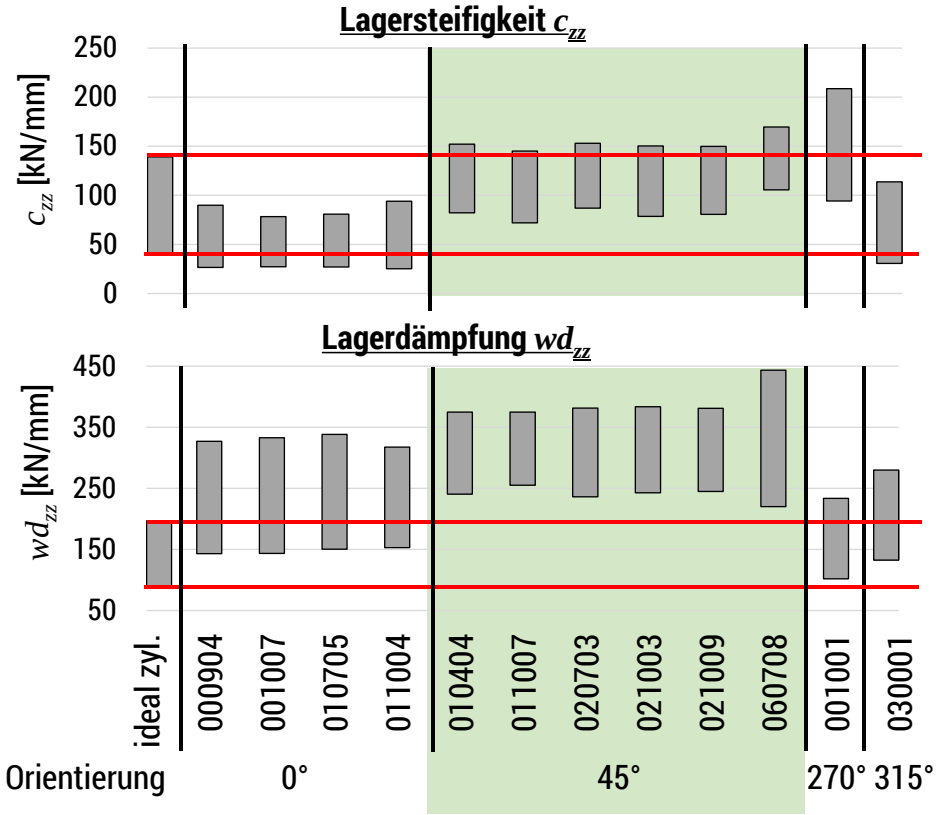
- Dämpfungen verbessert
- Beste Dämpfungen für Formen 45°

Welche Formänderung ist am besten?

- Auswahl bester Formänderung= Kompromiss
- Auswahl auf Lageranwendung angepasst
- Auswahl hinsichtlich Lagersteifigkeit und Lagerdämpfung





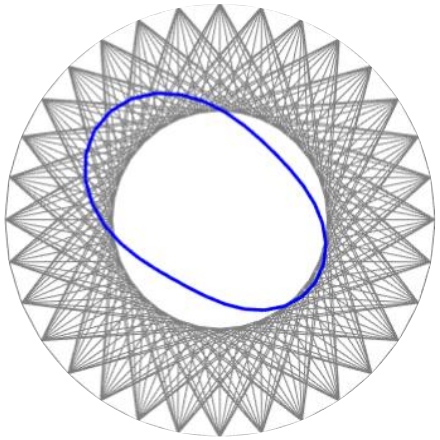


→ Formänderungen der Orientierung 45 ° am besten geeignet

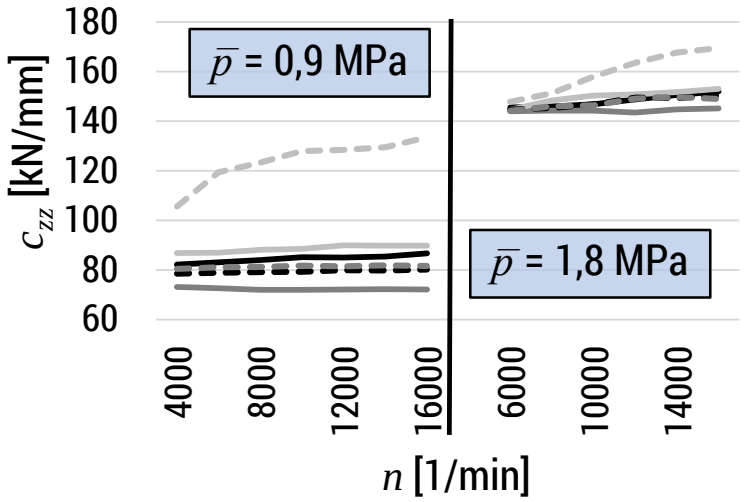
Welche Formänderung ist am besten?

- 6 Formänderungen bleiben übrig
- Beste Lagersteifigkeiten für Form 060708
- Bei $\bar{p}$ = 0,9 MPa auch beste Dämpfung

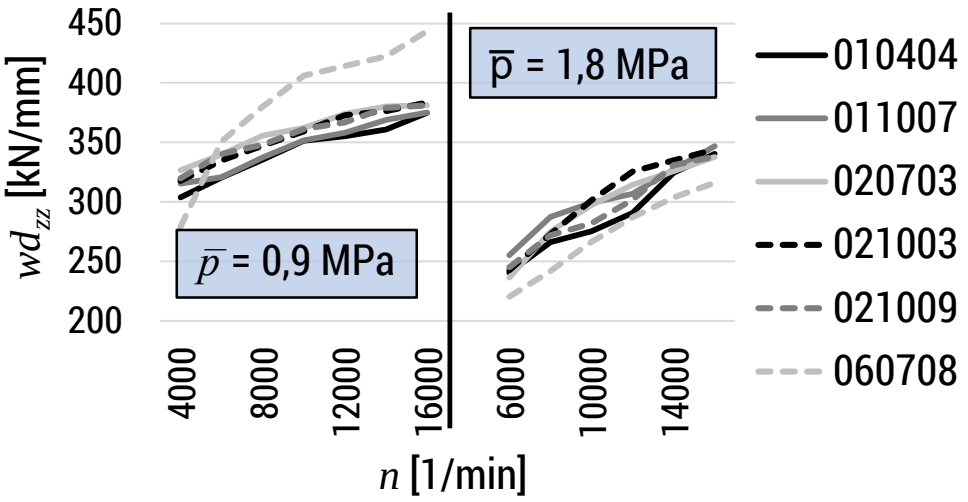
060708 = beste Form-änderung



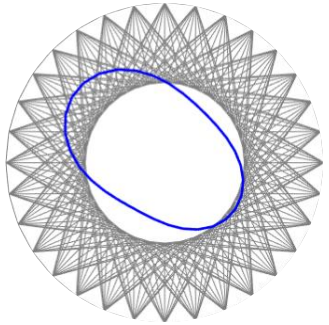
Lagersteifigkeit c_{zz} für Formänderungen der Orientierung 45°



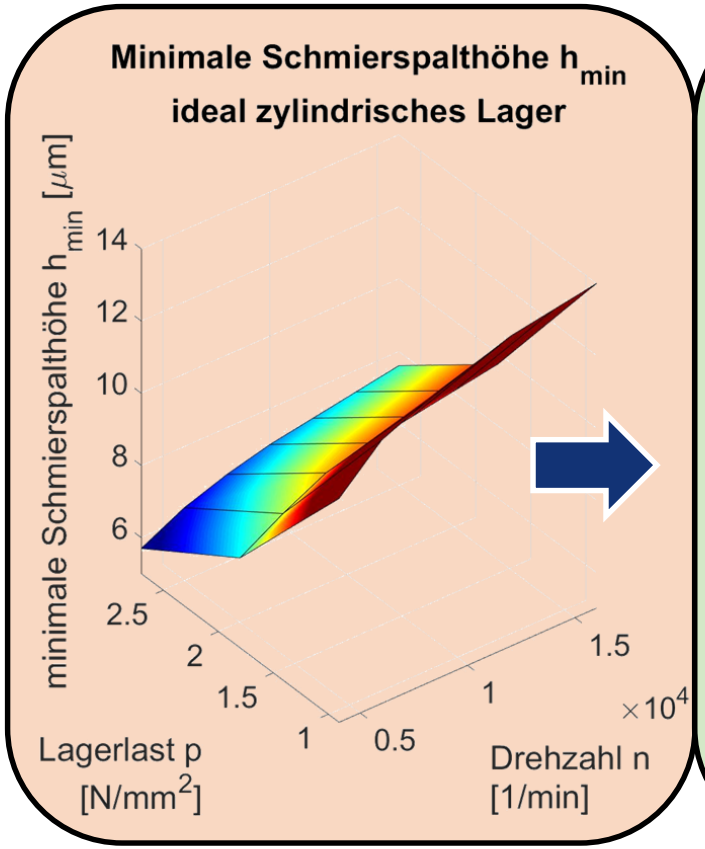
Lagerdämpfung wd_{zz} für Formänderungen der Orientierung 45°

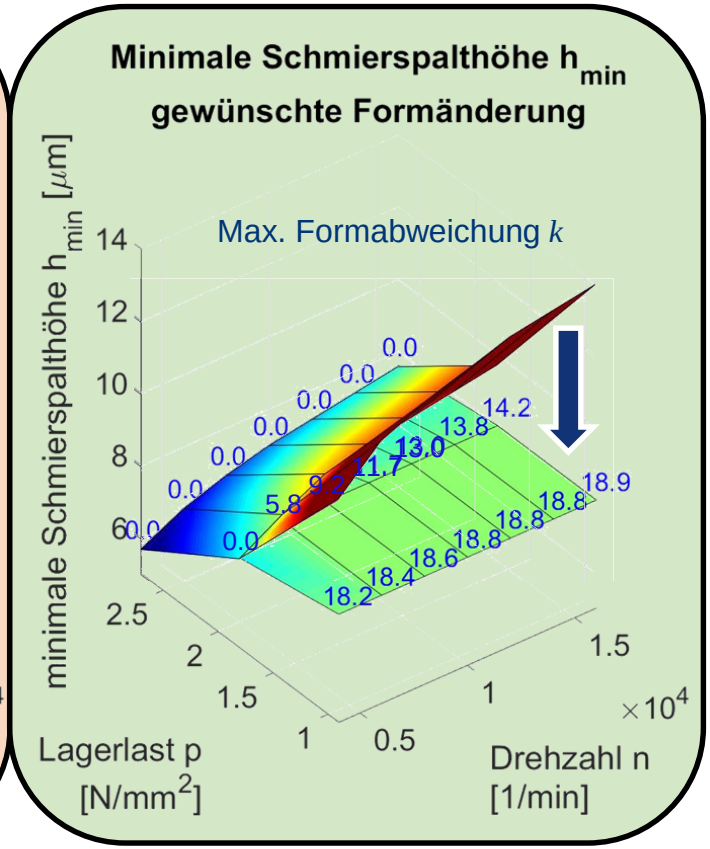


Beurteilung der gewählten Formänderung

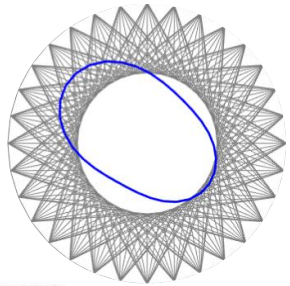


- Notwendiges k durch lineare Interpolation
- Für genauere Werte und weitere Betriebspunkte Nachsimulation
- Bei $\bar{p}$ = 1,8 MPa starke Form-änderung
- Bei $\bar{p}$ = 0,9 MPa weniger starke Formänderung

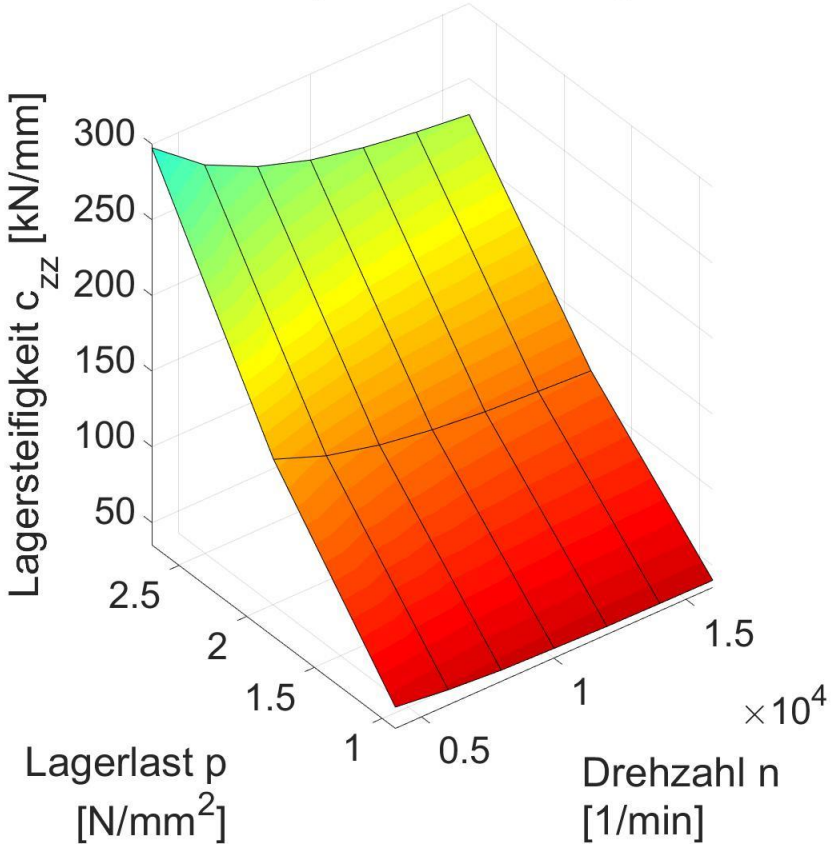




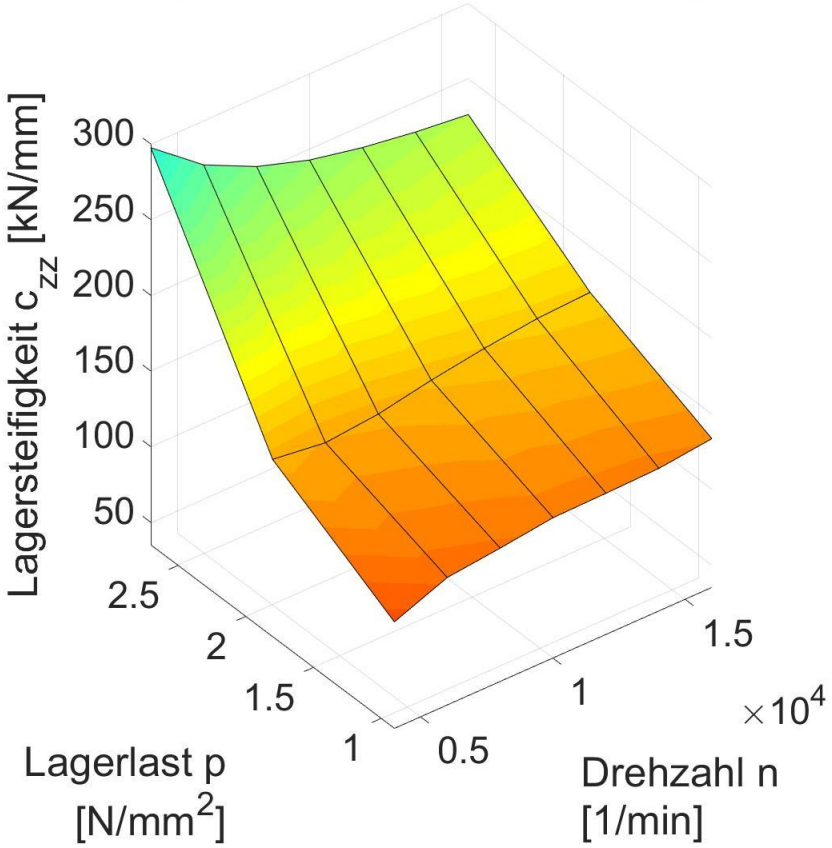
Beurteilung der gewählten Formänderung



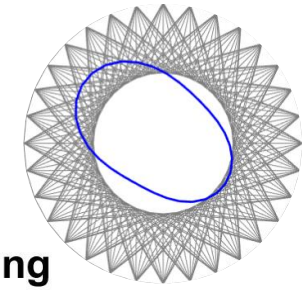
Lagersteifigkeit c_{zz}
ideal zylindrisches Lager



Lagersteifigkeit c_{zz}
gewünschte Formänderung

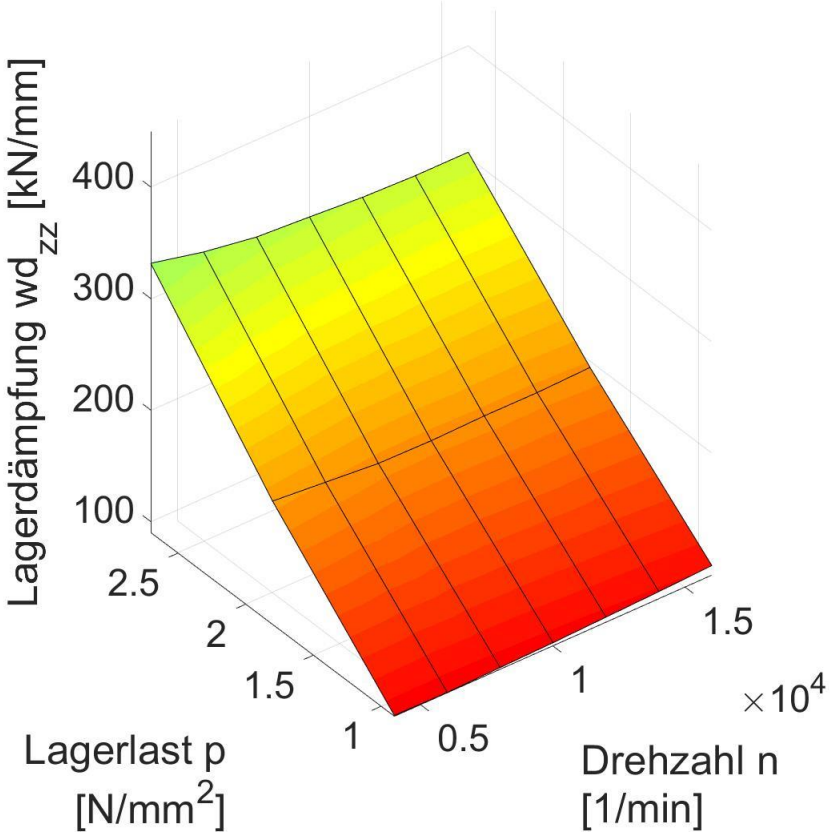


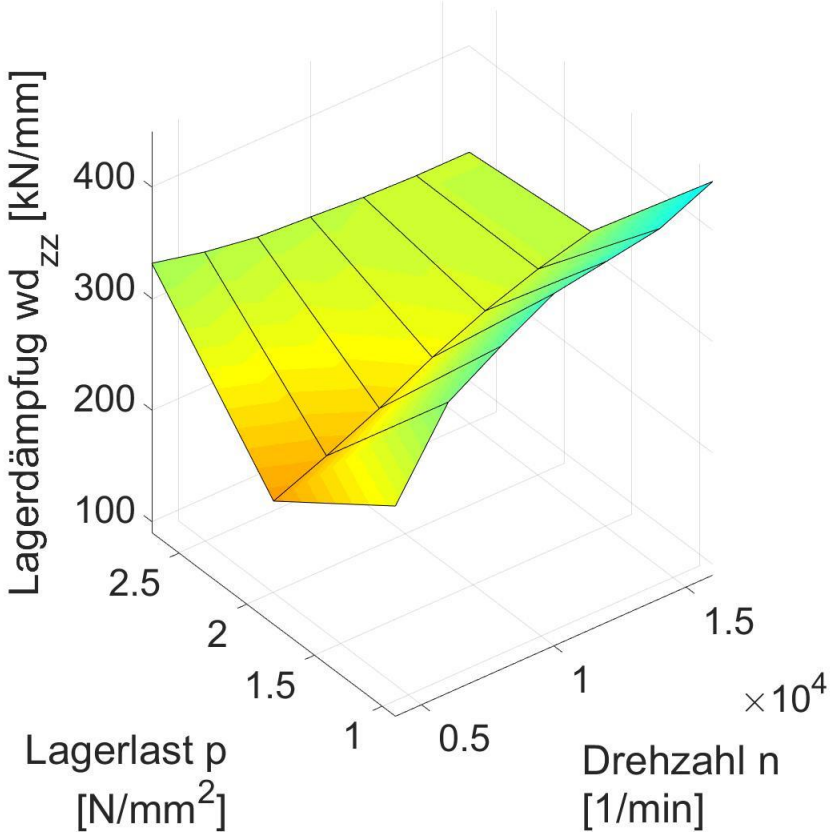
Beurteilung der gewählten Formänderung



Lagerdämpfung wd_{zz} ideal zylindrisches Lager

Lagerdämpfung wd_{zz} gewünschte Formänderung





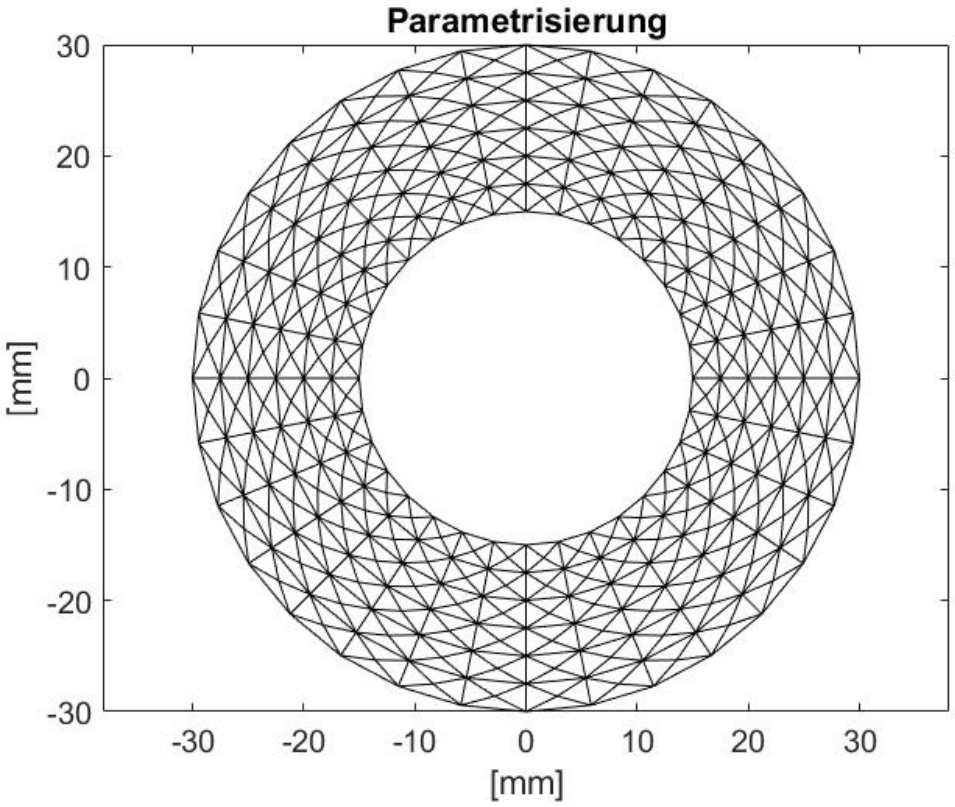
Agenda für Entwurf eines adaptiven Gleitlagers

1. Gewünschte Formänderung definieren, welche optimale Betriebseigenschaften über großen Betriebsbereich ermöglicht

2. Struktur Lagergehäuse finden, welche gewünschte Formänderung ermöglicht

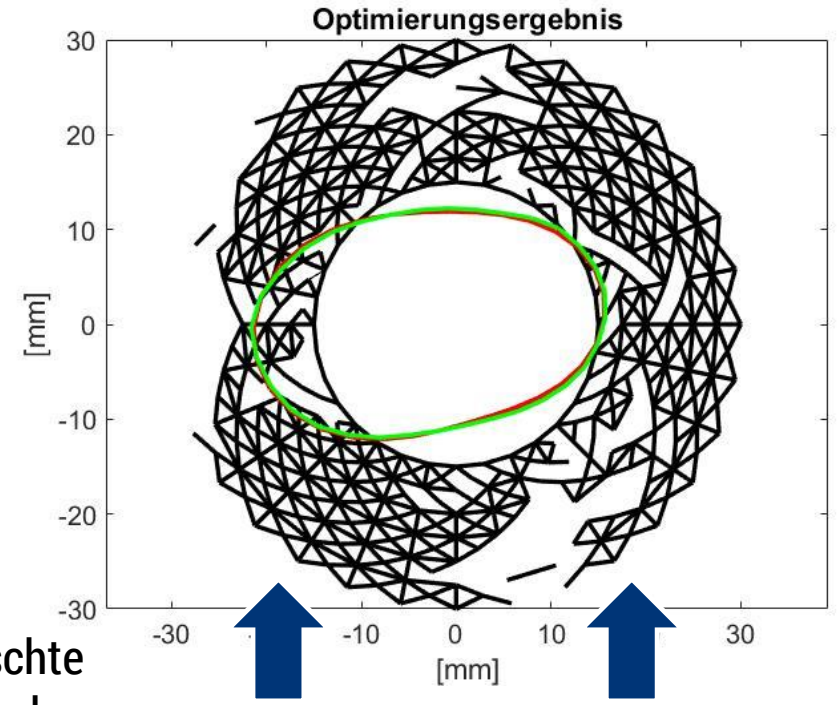
Synthese Lagergehäuse als Struktur mit selektiver Nachgiebigkeit

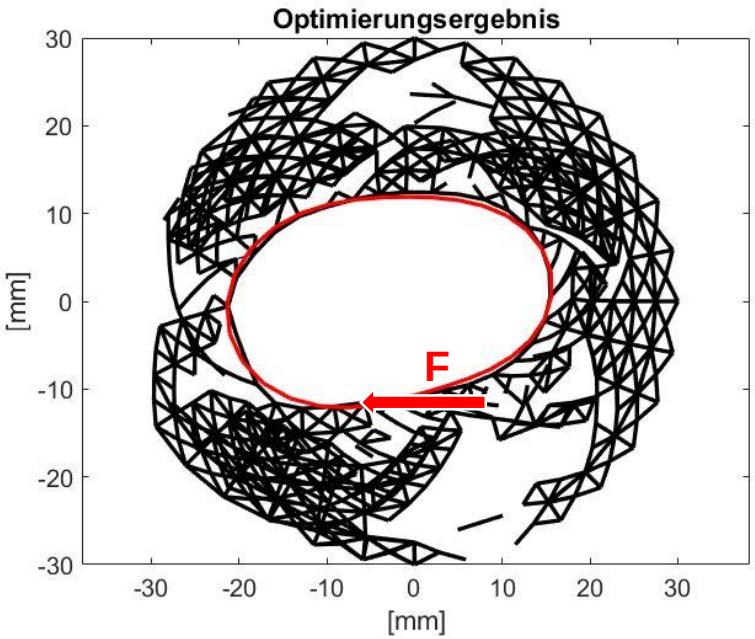
- Da gewählte Parametrisierung nicht für Synthese geeignet, neue Parametrisierung mit ähnlichen ersten 3 Eigenmoden
- Davon 2 hintereinander implementiert
- Auf Punkte im Innenkreis Verschiebungen der gewünschten Formänderung aufbringen
- Lösen Optimierungsproblem



Optimierte Struktur

- Mit einem Aktor ist gewünschte Formänderung erreichbar
- Größe Kraft bestimmt Größe k
- Kontinuierliche Formänderung möglich

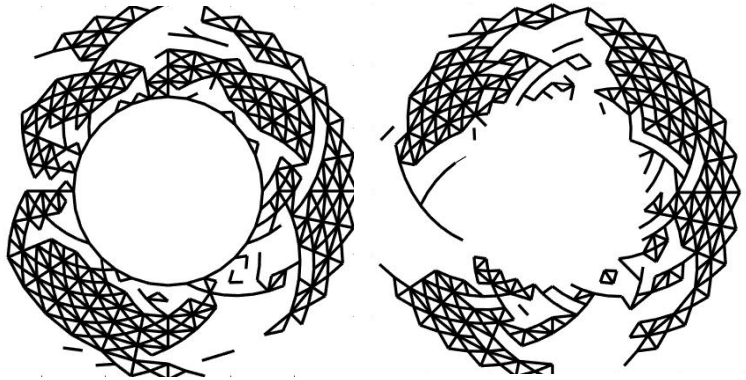




— Gewünschte Eigenmode φ_d

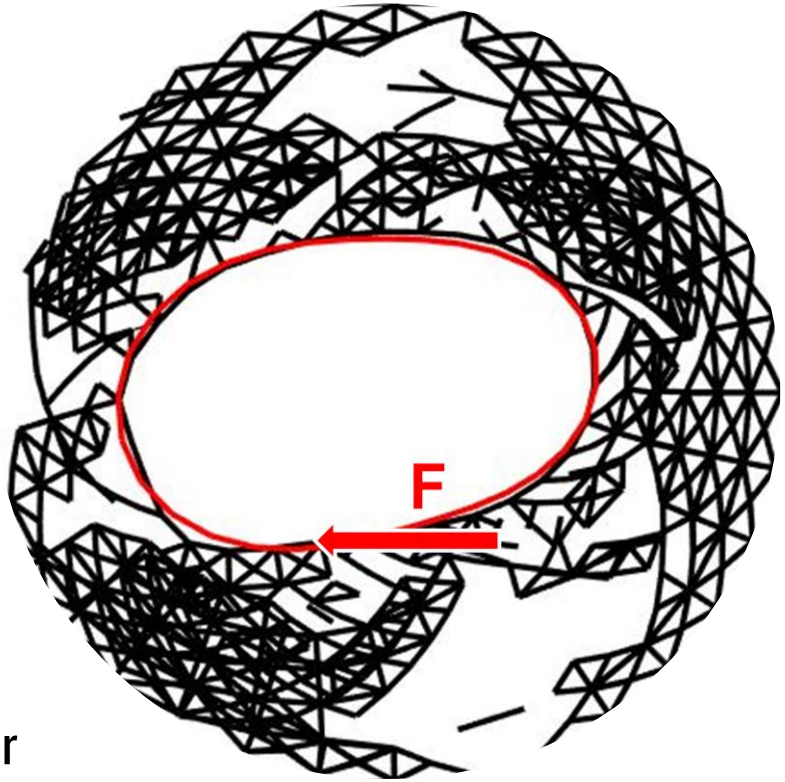
— Generierte 1. Eigenform

← Aktorkraft



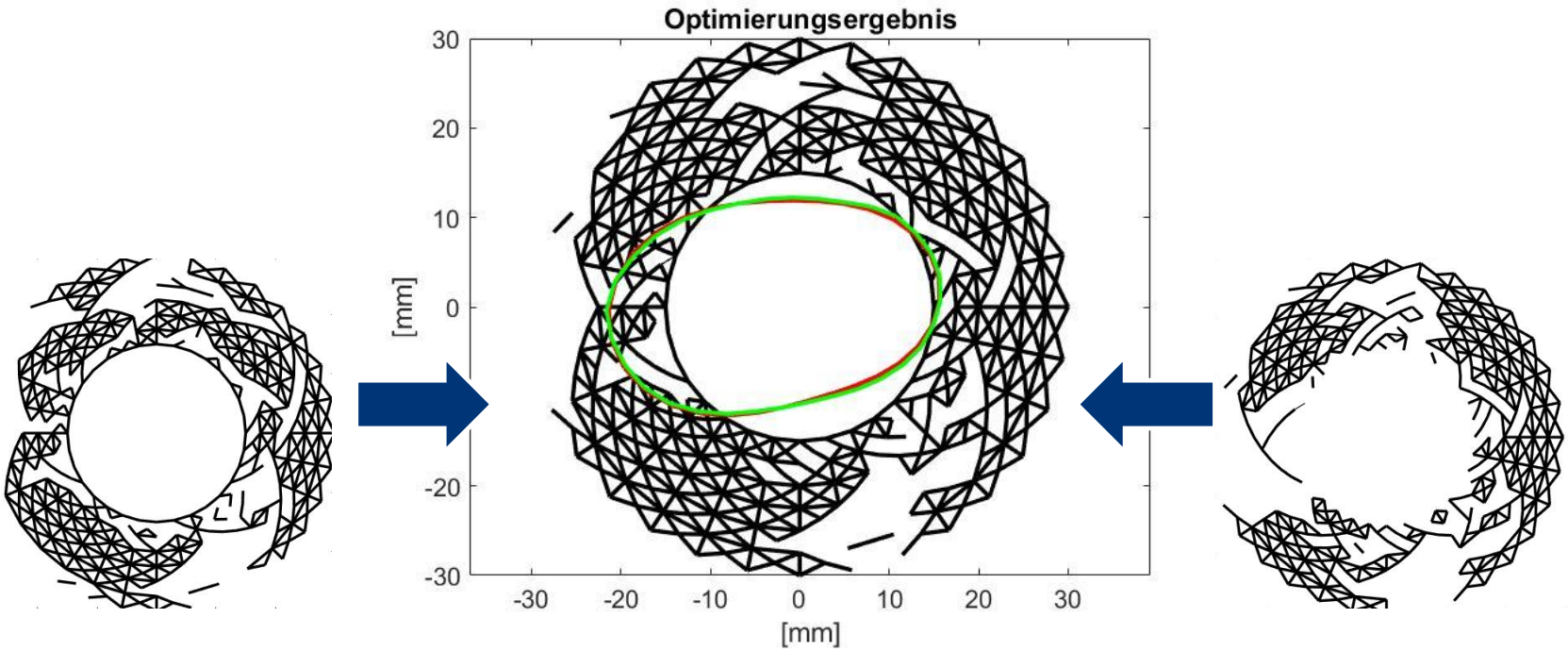
7. Zusammenfassung

- Gewünschte Formänderung ermöglicht konstantes h_{min} über großen Betriebsbereich
- Im Vergleich zu statischen Formen bessere Lagerdämpfung und Lagersteifigkeit bei gegebener Sicherheit gegen Verschleiß und Instabilität
- Mehrere mögliche Formänderungen
- Synthese als Lagergehäuse mit selektiver Nachgiebigkeit möglich
- Die gewünschte Formänderung ist mit einem Aktor erreichbar
- Für Auswahl der Formänderungen müssen für jeden Anwendungsfall neue Simulationen durchgeführt werden
- Auswahl ist ein Kompromiss zugeschnitten auf Anwendungsfall



8. Ausblick

- Genauigkeit Formannäherung verbessern
- Auch für andere Lagergeometrien und Anwendungsfälle testen
- Konstruktion und Umsetzung generierter Struktur



Vielen Dank für die Aufmerksamkeit!