

Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik
Institut für Feinwerktechnik und Elektronik-Design

Piezoelektrische Motoren auf Basis akustischer Oberflächenwellen

15. Tagung Feinwerktechnische Konstruktion
Dresden, 14.10.2022

Gliederung

Piezoelektrische Motoren auf Basis akustischer Oberflächenwellen

Akustische Oberflächenwellen (AOW)

- Vorstellung
- Erzeugung
- Anwendungen

AOW Motor

- Stand der Technik
- Vor- und Nachteile

AOW-Motor mit nichtpiezoelektrischem Statorwerkstoff

- Konzept
- Entwurf
- Versuche

Zusammenfassung und Ausblick

Akustische Oberflächenwellen (AOW)

Akustische Oberflächenwellen (AOW)

Vorstellung

Bekannte Oberflächenwellen in der Natur:
— Schwerewellen des Wassers

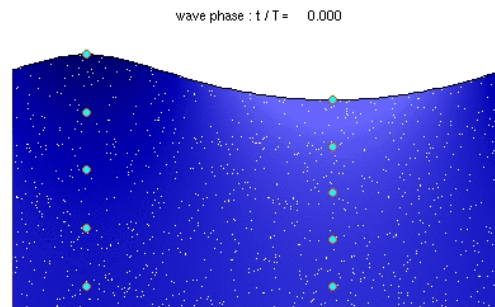


[1]

— Wirkprinzip Schwerewellen: Austausch von

- kinetischer Energie
- **Gravitationsenergie**

– Stokes-Drift:



[3]

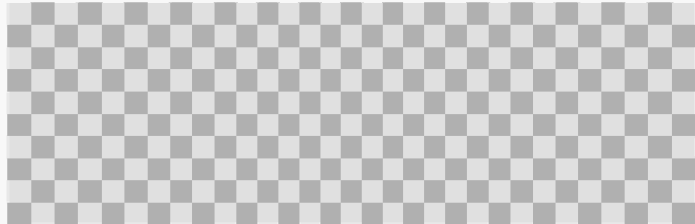
[1] Zeynel Cebeci CC BY-SA 4.0 Wikimedia Commons
[2] Kraaiennest CC BY-SA 4.0 Wikimedia Commons

Akustische Oberflächenwellen (AOW)

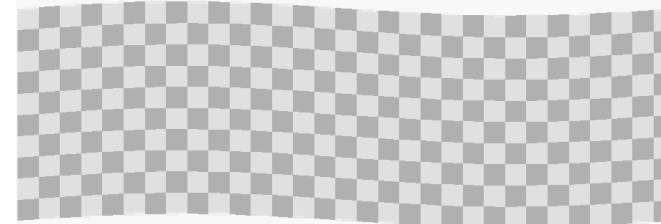
Vorstellung

- Wirkprinzip Festkörperwellen: Austausch von
 - kinetischer Energie und
 - **Spannenergie**

Alle Festkörperwellen sind Überlagerungen von
Longitudinalwellen und



Transversalwellen



Wellentypen in begrenzten Räumen:

Rayleigh-Wellen,

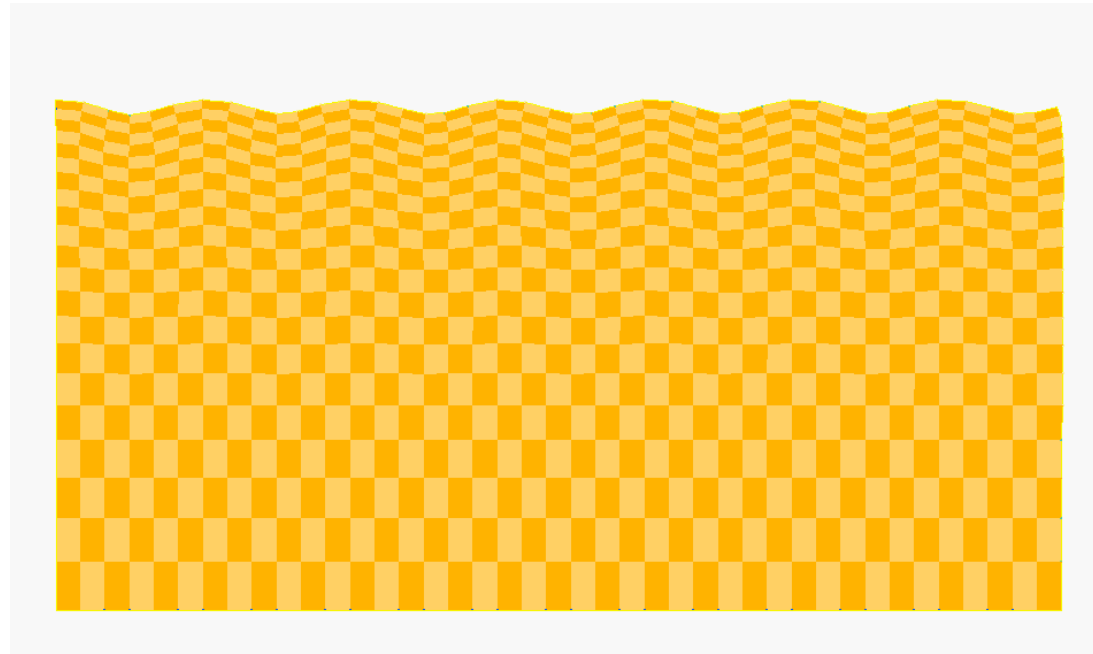
Love-Wellen,

Lamb-Wellen, ...

Akustische Oberflächenwellen (AOW)

Vorstellung

- Eigenschaften von Rayleigh-Wellen
 - Relevante Ausbreitung von 1,5-facher Wellenlänge in die Tiefe
 - Oberfläche vollführt elliptische Bewegung

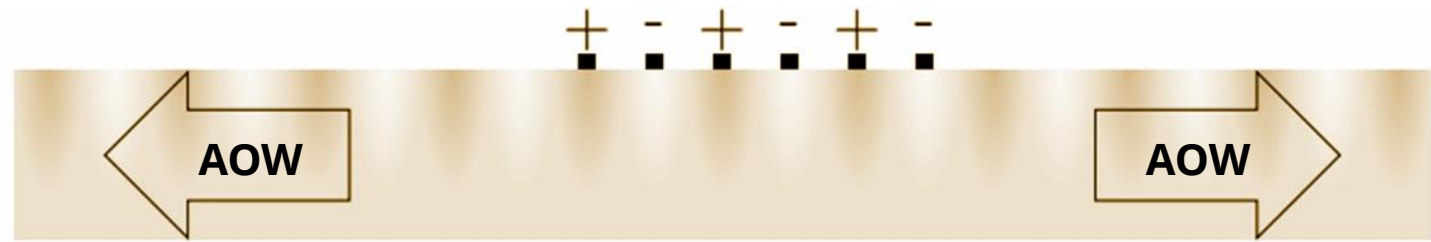


Akustische Oberflächenwellen (AOW)

Erzeugung

— Effiziente Anregung mit Inter-Digital-Transducern (IDT) auf piezoelektrischem Substrat

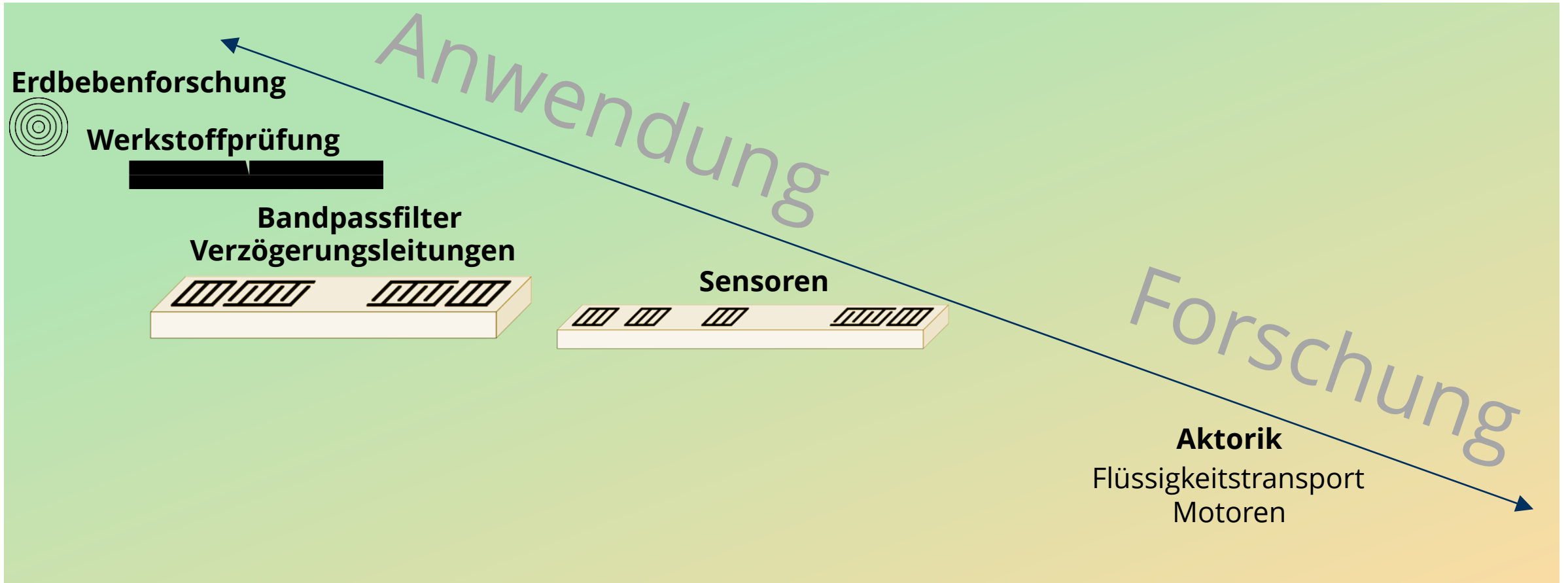
- Zwei kammartige ineinandergreifende Elektroden



- Anregung nur ideal für $f = c/\lambda$
- Je mehr Fingerpaare, desto schmalbandiger und effizienter die Anregung
- Inverser Betrieb möglich (Generator)

Akustische Oberflächenwellen (AOW)

Anwendungen



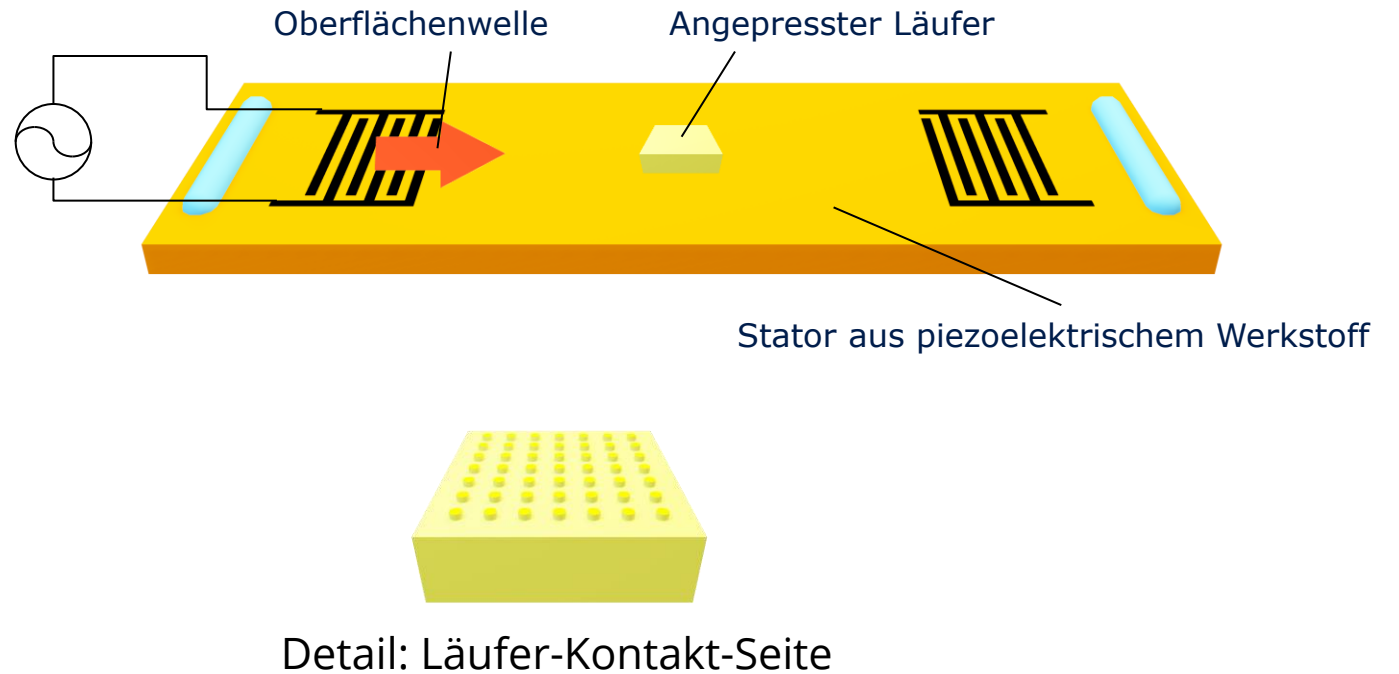
AOW-Motor

AOW-Motor

Stand der Technik

- Nutzung der *Rayleigh*-Welle für piezoelektrischen Motor
- Stator aus piezoelektrischem Werkstoff: LiNbO_3
- Für jede Bewegungsrichtung ein IDT
- Läufer hat strukturierte Kontaktfläche

- Technische Daten [3, 4]:
 - Normale Auslenkung AOW: 21 nm
 - Blockierkraft: 9 N
 - Leerlaufgeschwindigkeit: 0,55 m/s
 - Positioniergenauigkeit: 1 nm



[3] Shigematsu et al., Nanometer stepping drives of surface acoustic wave motor
[4] Kurosawa et al., Elastic friction drive of surface acoustic wave motor

AOW-Motor

Vor- und Nachteile

— Vorteile:

- Stator und Läufer sehr einfach aufgebaut
- Sehr hohe Leistungsdichte
- Hohe Präzision

— Nachteil:

- Stator komplett aus piezoelektrischem Einkristall (LiNbO_3)
 - Teuer; Spröde; Geringer Reibungskoeffizient (0,18 [5])

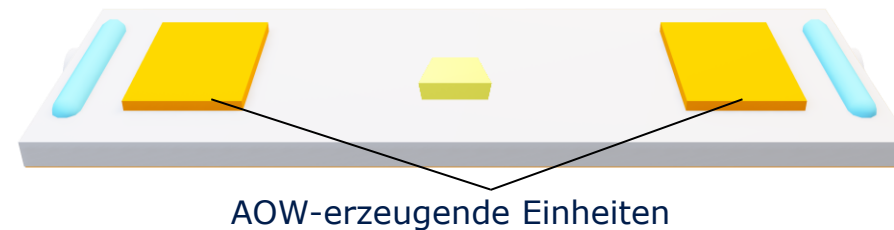
AOW-Motor mit nichtpiezoelektrischem Statorwerkstoff

AOW-Motor mit nichtpiezoelektrischem Statorwerkstoff

Konzept

— Idee:

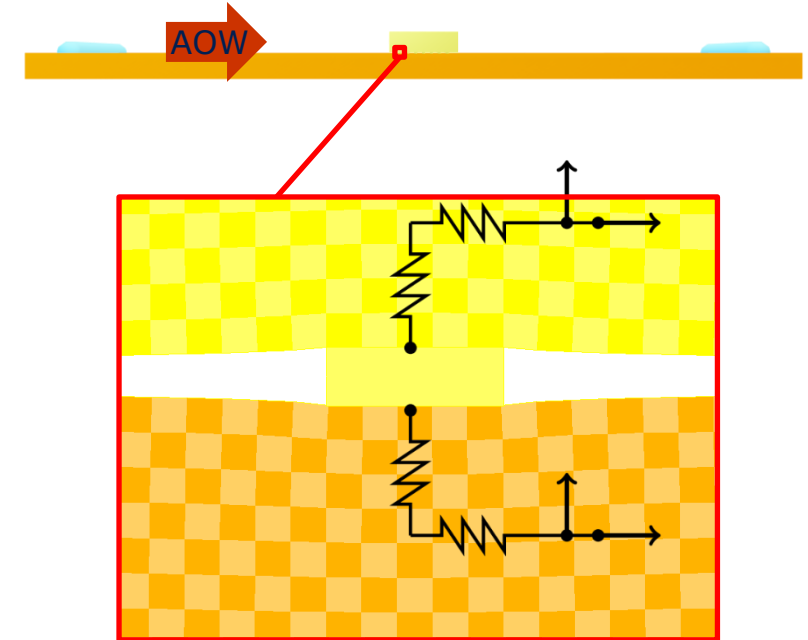
- Stator aus nichtpiezoelektrischem Werkstoff
 - Größerer Gestaltungsspielraum (Werkstoffpreis, Zähigkeit, Reibung)



AOW-Motor mit nichtpiezoelektrischem Statorwerkstoff

Entwurf

- Numerisches Motormodell
 - **Stand der Technik** (nach *Shigematsu* und *Kurosawa*)
 - Betrachtung eines Kontaktpunktes
 - Statorverschiebung nach AOW-Auslenkung
 - Drei Zustände möglich:
 - Kein Kontakt
 - Haftreibung
 - Gleitreibung
 - Zeitlich gemittelte tangentiale Kontaktkraft ergibt Vorschubkraft
 - Vorgabe der Läufergeschwindigkeit

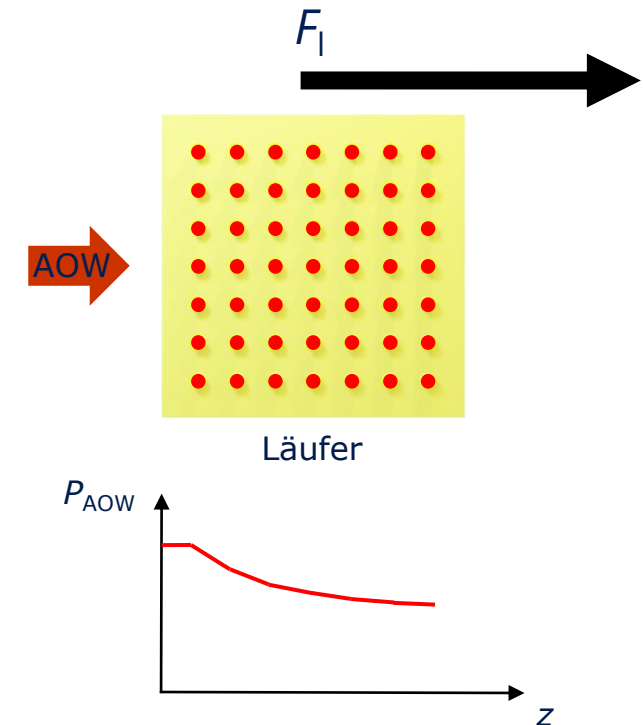


AOW-Motor mit nichtpiezoelektrischem Statorwerkstoff

Entwurf

— Numerisches Motormodell

- **Stand der Technik** (nach *Shigematsu* und *Kurosawa*)
- Betrachtung eines Kontaktpunktes
- Ermitteln der Gesamtkraft
 - Berechnen der Vorschubkraft einer Noppe
 - Kraft multiplizieren mit Noppenanzahl in Reihe
 - Entnahme von Reib- und Arbeitsleistung aus Wellenleistung
 - Anwenden auf nächste Noppenreihe
 - Aufsummieren der Reihenkräfte
 - Fortführen für alle Reihen



AOW-Motor mit nichtpiezoelektrischem Statorwerkstoff

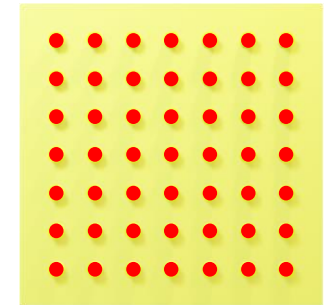
Entwurf

— Numerisches Motormodell

– Erweiterungen

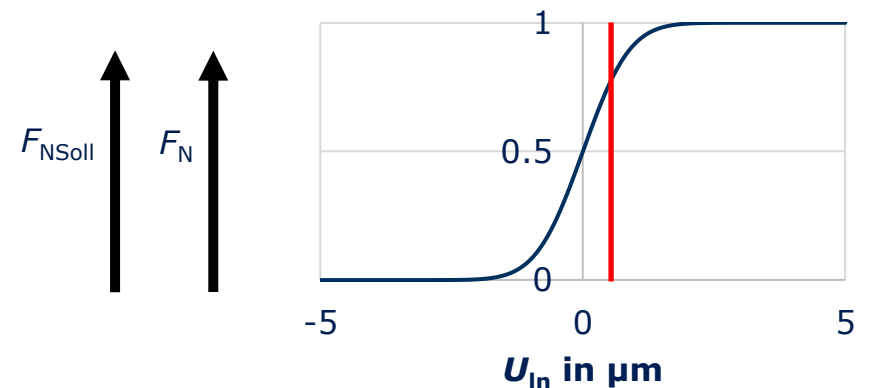
Rauheit und Ebenheit

- Vorh. Modell nutzt Korrekturfaktor „Effektivitätsfaktor“ $\eta=0,6$
- Annahme: Normalverteilung der Kontakthöhen
- $F_N = \eta_{pr} K_{gesn} \int_{-\infty}^{u_{ln}} N(u_n, R_{au}) d u_n$
- $\eta = \sqrt{N(u_{ln}, R_{au})}$



n_{pr} ... Anzahl Noppen
 K_{gesn} ... Gesamtsteifigkeit normal
 u_n ... Verschiebung normal
 u_{ln} ... Läuferverschiebung normal
 N ... Verteilungsfunktion
 R_{au} ... Mittenrauwert ungefiltert
 F_{NSoll} ... Soll-Anpresskraft

Relative Kontaktfläche



AOW-Motor mit nichtpiezoelektrischem Statorwerkstoff

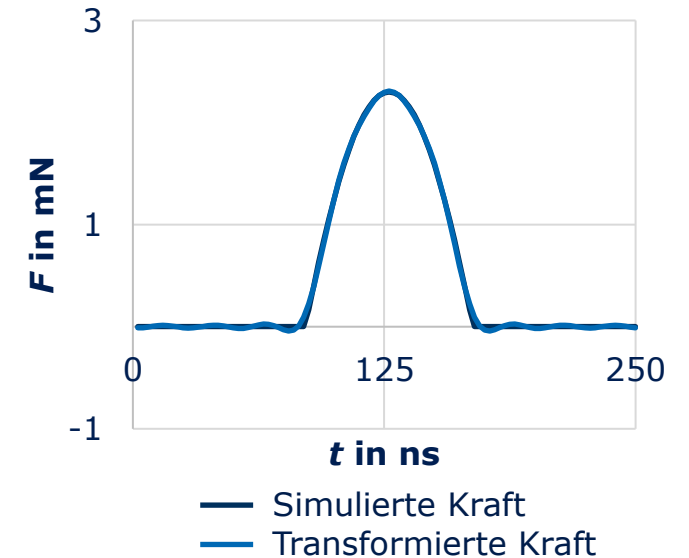
Entwurf

— Numerisches Motormodell

– Erweiterungen

Dynamische Verluste

- DFT auf Kraftverlauf $F(t)$ anwenden
- Berechnen des Strahlungsdämpfungskoeffizienten d
- Berechnen der dynamischen Verluste $P_{\text{dyn}} = \sum_{i=0}^m P_i(\hat{F}_i, f_i)$



f_i ... Frequenz der Schwingung i
 \hat{F}_i ... Kraftamplitude der Schwingung i
 P_i ... Einzelleistung für Frequenz f_i
 m ... Anzahl überlagerter Schwingungen
 P_{dyn} ... Dynamische Verlustleistung

AOW-Motor mit nichtpiezoelektrischem Statorwerkstoff

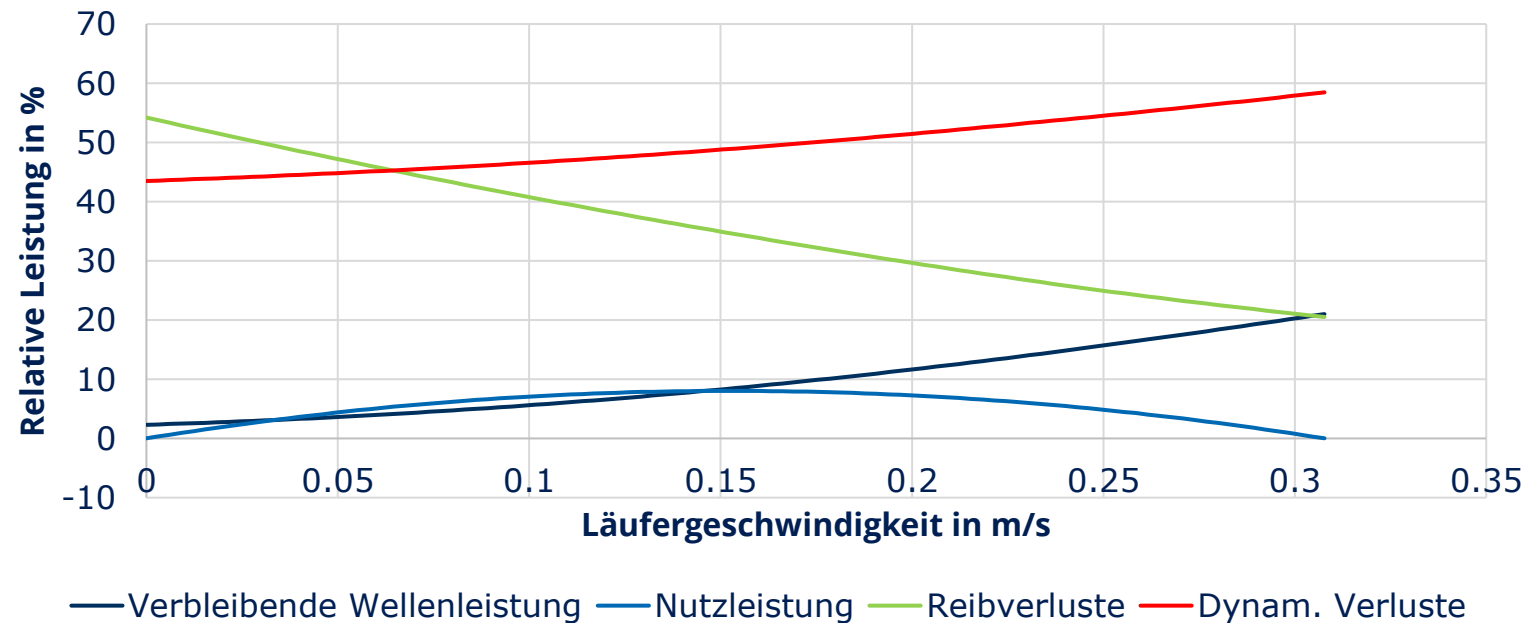
Entwurf

— Numerisches Motormodell

– Erweiterungen

Dynamische Verluste

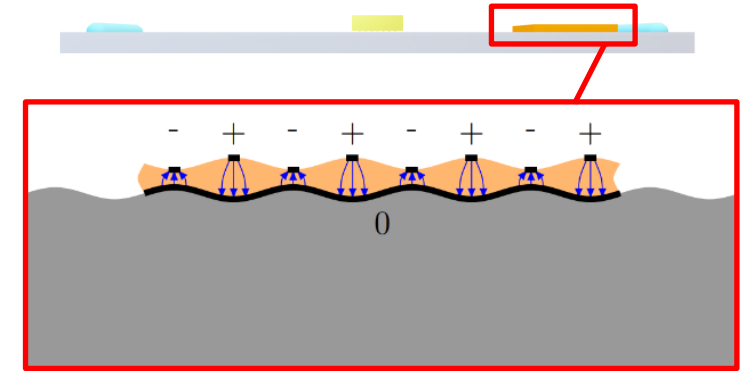
- Beispielhafte Leistungen für vorhandenen AOW-Motor (auf Startleistung normiert)



AOW-Motor mit nichtpiezoelektrischem Statorwerkstoff

Entwurf

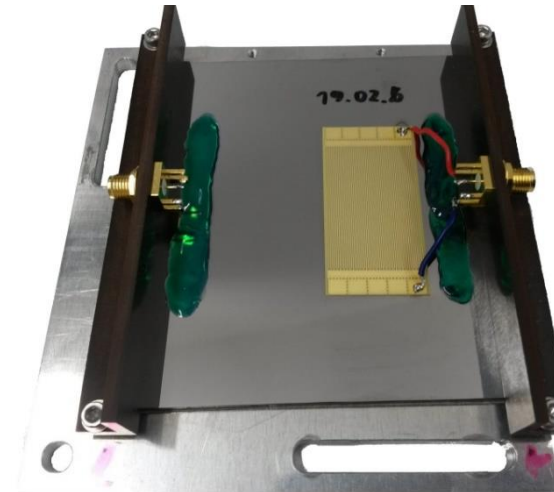
- Läufer:
 - Entsprechend Literatur
- Stator:
 - AOW erzeugende Einheit aus normal polarisiertem PZT-Block mit außenliegenden Elektroden
 - FEM-Modell für Dimensionierung
 - Kopplung von Elektrostatik und Mechanik
 - 2D
 - Transient



AOW-Motor mit nichtpiezoelektrischem Statorwerkstoff

Entwurf

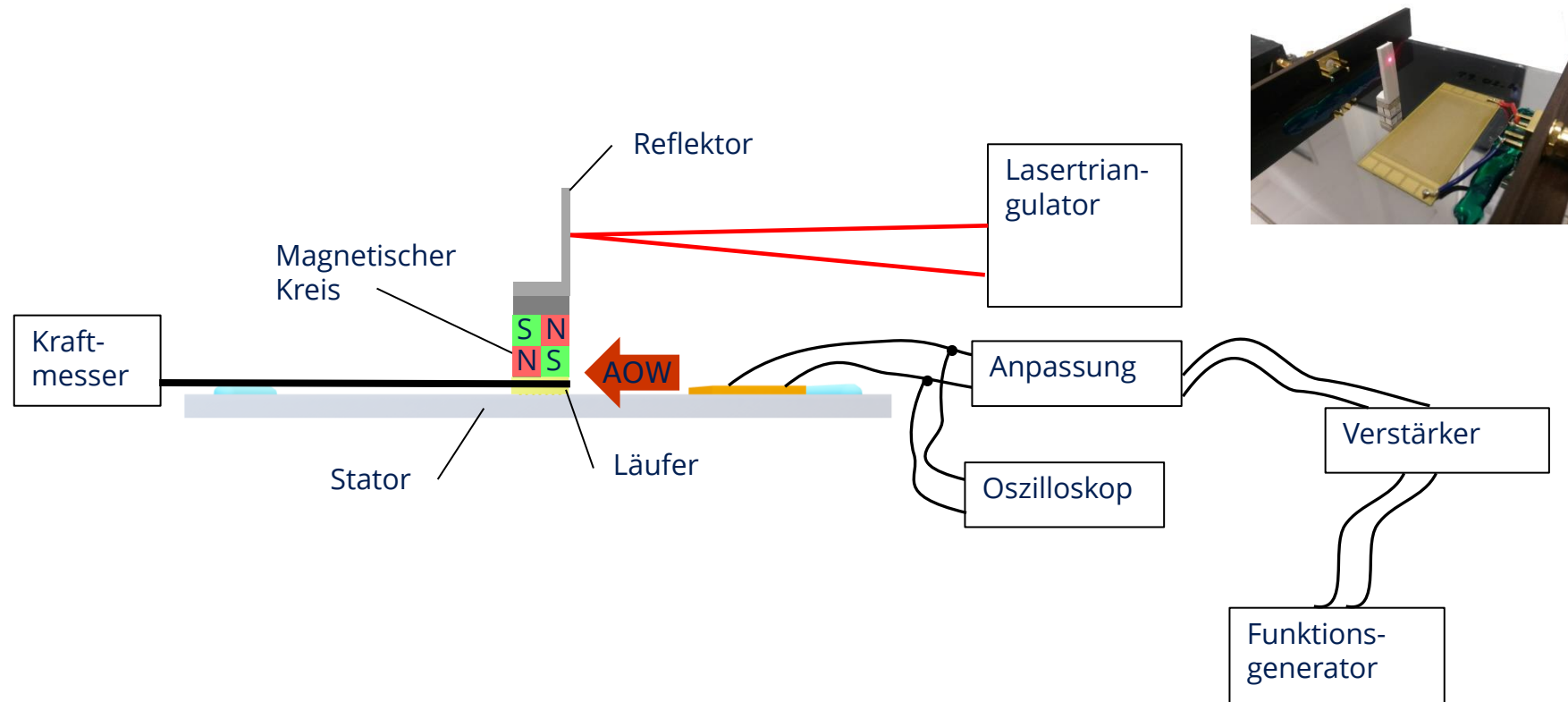
- Gefertigter Stator aus nichtpiezoelektrischem Werkstoff
 - 200 μm PZT Platte auf geläpftem und poliertem 3 mm Stahlsubstrat
 - Mittenrauwert 15,7 nm ungefiltert über 4 mm
 - 800 μm Wellenlänge



AOW-Motor mit nichtpiezoelektrischem Statorwerkstoff

Versuche

— Motor-Messaufbau

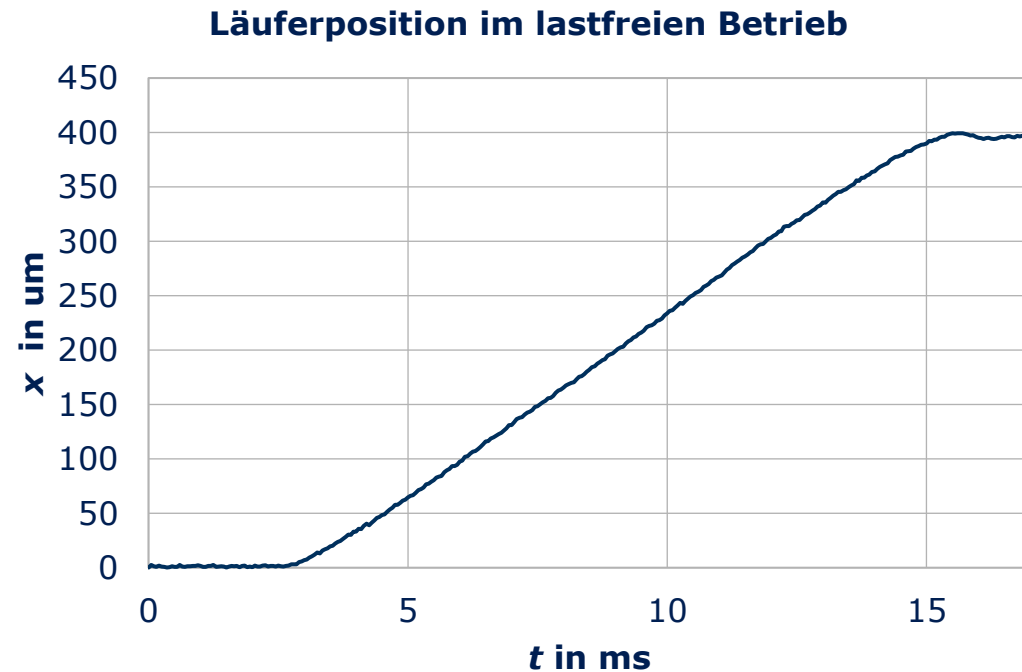


AOW-Motor mit nichtpiezoelektrischem Statorwerkstoff

Versuche

- Messergebnisse
 - Ansteuerfrequenz: 3,85 MHz
 - Ansteuerspannung: 50 V_{op}
 - Dauer: 50.000 Perioden

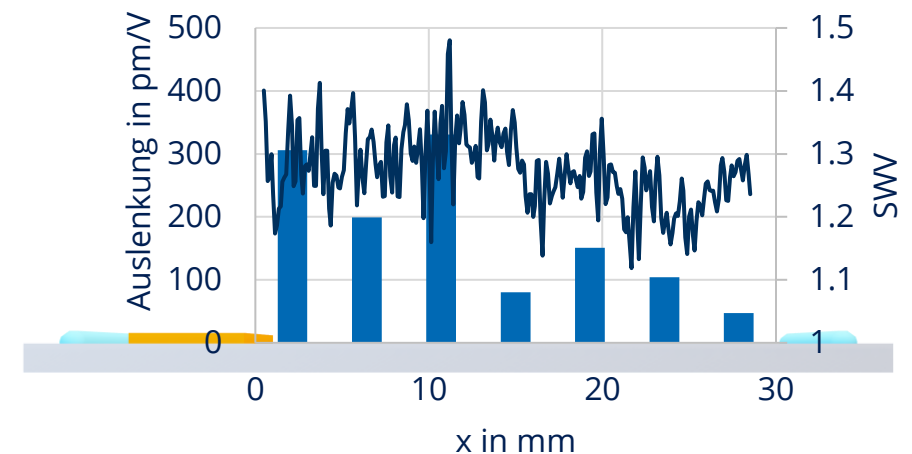
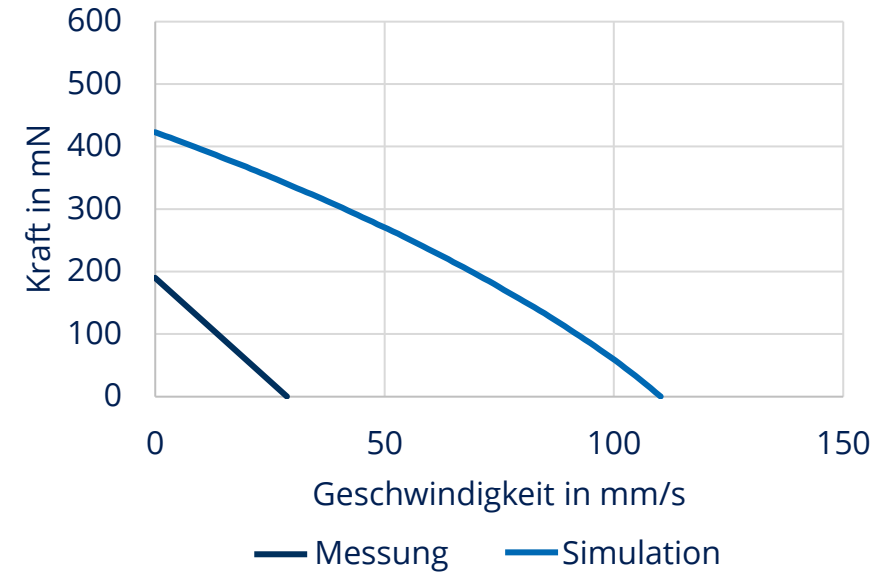
Parameter	Wert
Leerlaufgeschwindigkeit	29 mm/s
Blockierkraft	0,19 N



AOW-Motor mit nichtpiezoelektrischem Statorwerkstoff

Versuche

- Diskussion Motorparameter
 - Modell zeigt größere Kennwerte
 - Größeres Stehwellenverhältnis (SWV) in Nähe zu AOW erzeugenden Einheiten
 - Große Auslenkungsschwankungen feststellbar
- Qualitätseinbußen durch:
 - Parasitäre Volumenwellen
 - Werkstoffunstetigkeiten (Körner)



Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung und Ausblick

— Zusammenfassung

- Vorteile von AOW-Motoren
 - Einfach im Aufbau
 - Hohe Leistungsdichte
 - Präzise
- Numerische Modelle erlauben eine systematische Weiterentwicklung des Motors
- Motorbetrieb mit nichtpiezoelektrischem Statorwerkstoff ist möglich
 - Eben- und Rauheit polykristalliner Werkstoffe ist beherrschbar

— Ausblick

- Klären der Diskrepanz numerisches Motormodell – Messung
 - Versuche mit kleineren Korngrößen
 - Versuche mit gedämpften Statorunterseiten
- Realisieren höherer Auslenkungen der Statoren

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!