Antriebslösungen mit Linearmotoren

Stephan Beineke, Lust Antriebstechnik GmbH

Übersicht

1. Einleitung

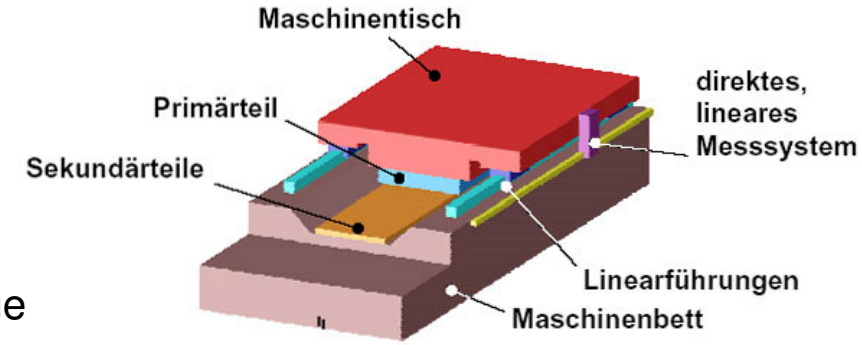
2. Lage- und Geschwindigkeitsbestimmung

3. Dynamische Linearmotorregelung

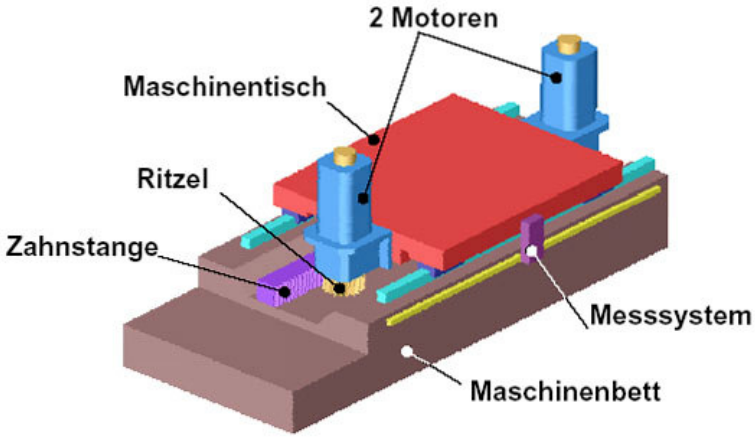
4. Anwendungsbeispiele für Antriebslösungen

Einleitung: Realisierung einer Linearbewegung

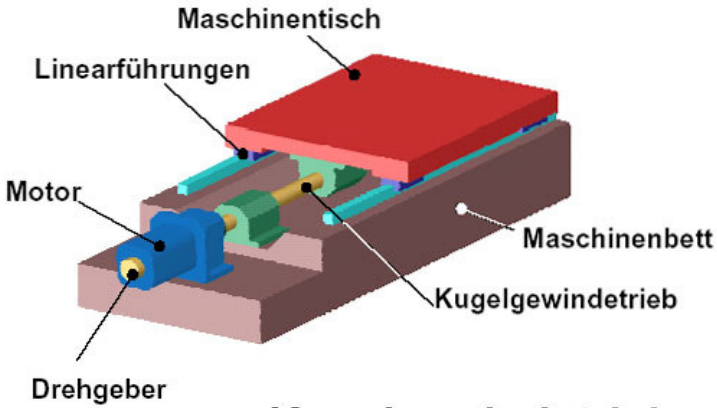
- direkte Umsetzung mit Linearmotor
- rotativer Antrieb mit/ohne Getriebe +
  (a) Riemen
  (b) Ritzel-Zahnstange
  (c) Kugelgewinde



Linearmotor



Ritzel-Zahnstangentrieb



Kugelgewindetrieb

Vor- und Nachteile von linearen Direktantrieben

Einleitung: Linearmotoren

Lage- und Geschw.-Bestimmung

Regelung von Linearmotoren

Anwendungen

Prinzipielle Vorteile

- höhere mechanische Steifigkeit, weniger Reíbung, keine Lose
- höhere Regelgüte (Dynamik, Genauigkeit) verbessert die Qualität
  höhere Geschwindigkeiten und Beschleunigungen erhöhen die Produktivität
- weniger Komponenten, geringerer Verschleiß, höhere Verfügbarkeit und Lebensdauer

Prinzipielle Nachteile

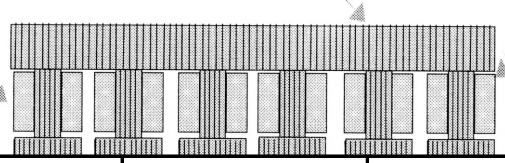
- sensibler bezüglich Regelung (Umrichter und Messeinrichtung)
- höhere Kosten für den Motor (Systemkosten können aber geringer sein!)
- keine Möglichkeit zur Kraftübersetzung, größere Verlustleistung
- Magnetfelder und Anziehungskräfte (z.B. auf Späne) können stören

Die anwendungsspezifischen Vor- und Nachteile sind entscheidend!

Synchron-Linearmotoren

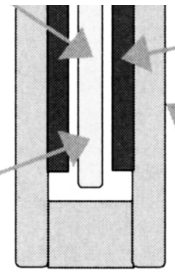
Standardmotor:

Eisenbehafteter Synchronmotor



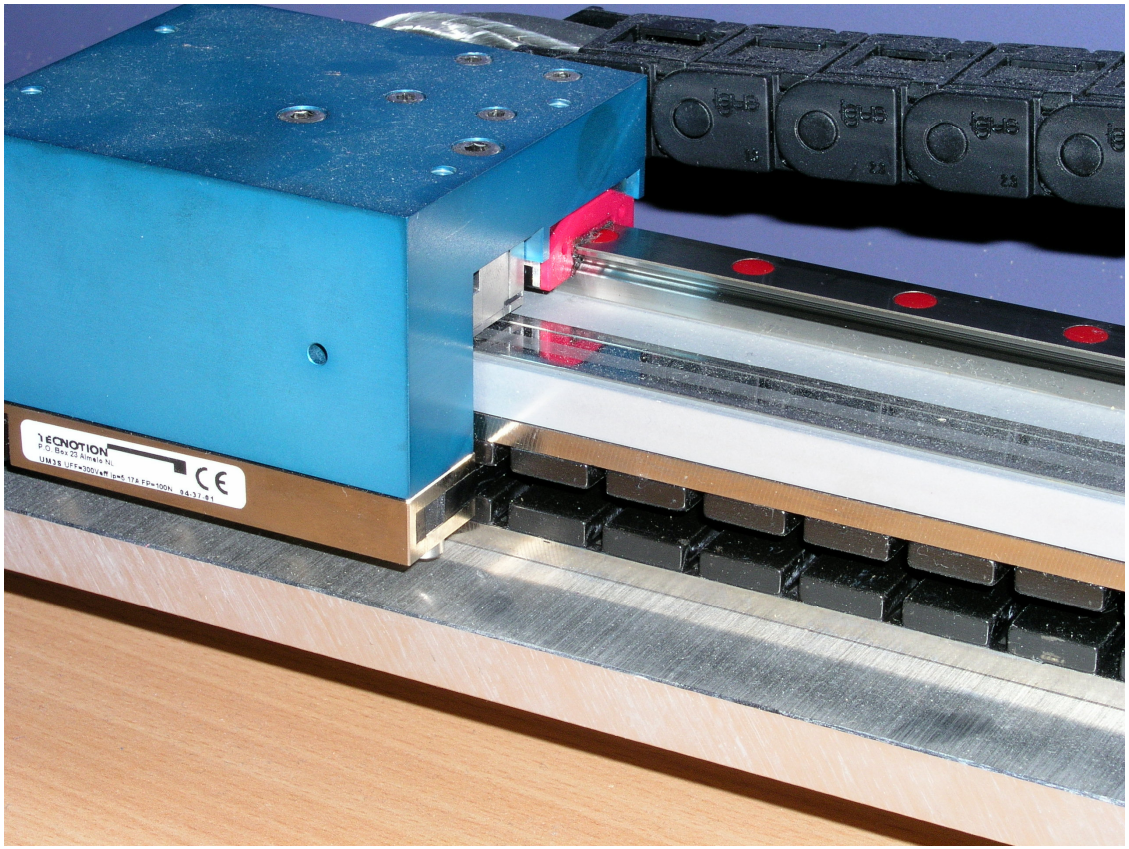
Vergleich der Motortypen	Kosten	Lager-kräfte	Kraft-welligkeit	Kraft / Volumen	Kraft/ Motormasse	Kühlung
„eisenbehaftet“	+	--	-	++	O	+
„eisenlos“	--	++	++	-	++	--

„Eisenloser“ Synchronmotor



Quelle: Gißler, SPS/DRIVES 2001

Eisenloser Linearmotor für höchste Dynamik und Präzision



Einleitung: Linearmotoren

Lage- und Geschw.-Bestimmung

Regelung von Linearmotoren

Anwendungen

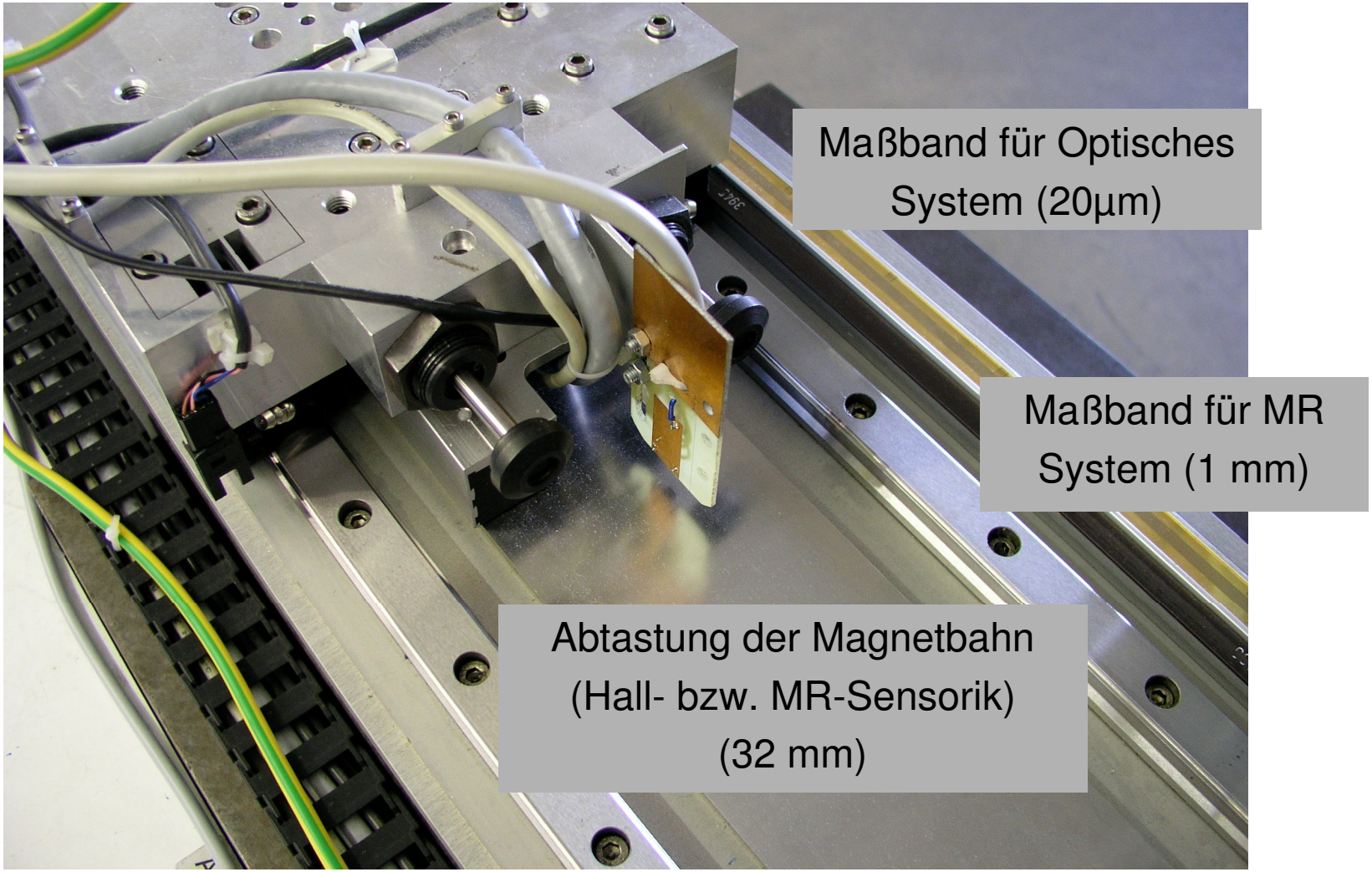
Standard-Linearmotor mit 4 Messsystemen

Einleitung: Linearmotoren

Lage- und Geschw.-Bestimmung

Regelung von Linearmotoren

Anwendungen



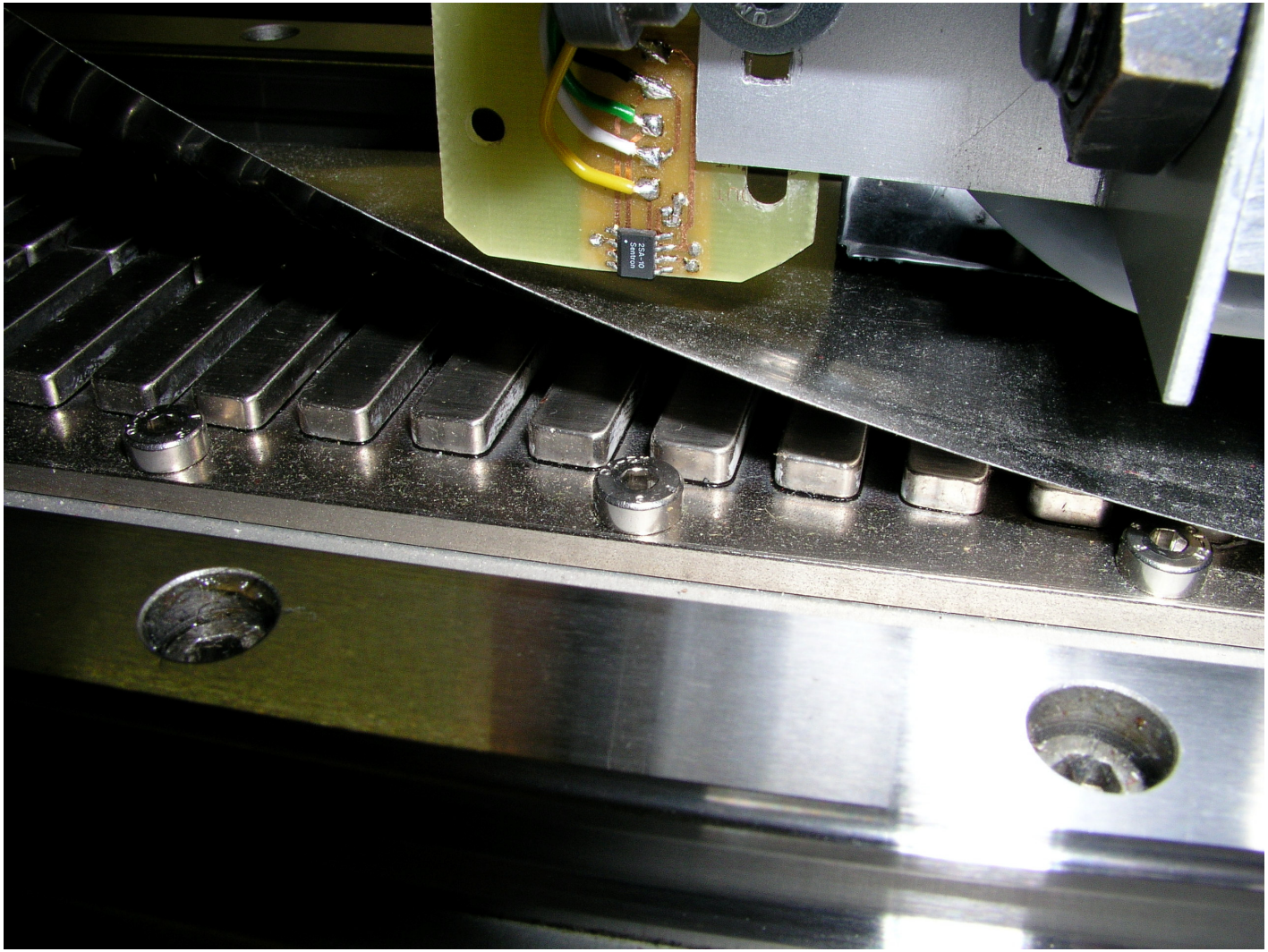
Abtastung der Magnetbahn

Einleitung:
Linearmotoren

Lage- und Geschw.-Bestimmung

Regelung von Linearmotoren

Anwendungen



Lage- und Geschwindigkeitsbestimmung

Einleitung: Linearmotoren

Lage- und Geschw.-Bestimmung

Regelung von Linearmotoren

Anwendungen

Das Messsystem bestimmt maßgeblich

- die Systemkosten und
- die erreichbare Dynamik.

Herausforderung: Beste Dynamik mit möglichst kostengünstigem Messsystem

Positions- und Geschwindigkeitsbestimmung

Servoregler CDD3000 (16bit µC + dSMC ASIC, Fixed Point, 30 MHz)

- Verfahren zur Kommutierungsfindung, um auf Absolutwertgeber verzichten zu können (Kostenreduktion)
- Performance-Verbesserung durch Spursignalkorrektur
- Performance-Verbesserung durch Beschleunigungssensoren

Servoregler ServoOne (32bit µC, Floating Point, 150 MHz)

- ***NEU*** Verbesserte Rauschunterdrückung durch Beobachter

Verfahren zur Kommutierungsfindung

(SPS/DRIVES 2003)

Einleitung: Linearmotoren

Lage- und Geschw.-Bestimmung

Regelung von Linearmotoren

Anwendungen

Aufgabenstellung

- Einsatz rein inkrementeller Geber bei Synchronmotoren, um die Kosten zu reduzieren
- Feldorientierte Regelung von Synchronantrieben benötigt die Kenntnis der Absolutlage des Läufers innerhalb einer Polteilung (Kommutierungswinkel)

Bekannte Lösungen

1. Hall-Sensoren als zusätzliches Absolutmesssystem für die Kommutierung
2. Stromeinprägung mit Ausrichtbewegung
3. Stromeinprägung mit Kommutierungswinkelregelung
4. Auswertung der Ständerinduktivitätssättigung

Eigene Lösungen mit Schwingungsanalyse (Patent)

5. Auswertung der Phasenbeziehung
6. Bestimmung der maximalen Amplitude

Performance-Verbesserung durch Spursignalkorrektur

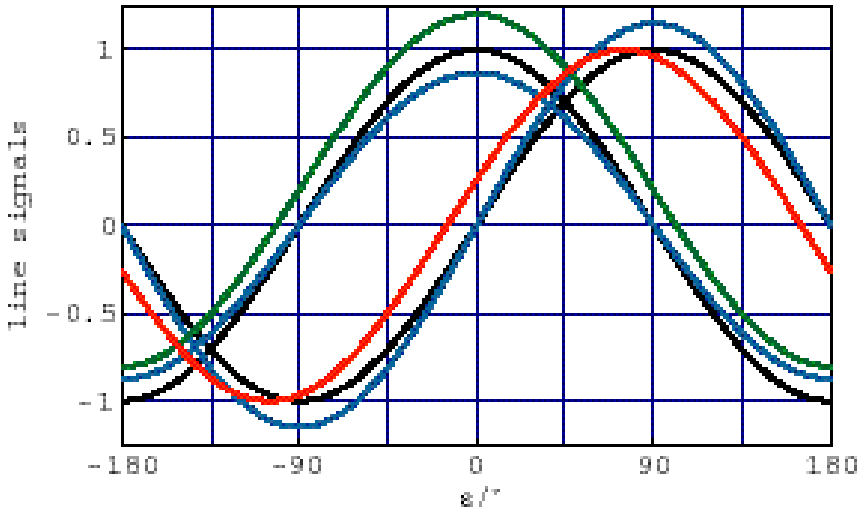
Einleitung: Linearmotoren

Lage- und Geschw.-Bestimmung

Regelung von Linearmotoren

Anwendungen

- **Lagegeber liefern zwei Spursignale (Sinus- u. Cosinus-Spur)**
- **Auswertung durch Zähler und Feininterpolation (atan, 14bit)**



Spursignale in komplexer Darstellung

$$\underline{s}(\varepsilon) = s_a(\varepsilon) + j \cdot s_b(\varepsilon)$$

$$\underline{s}(\varepsilon) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \underline{c}_k \cdot e^{jk\varepsilon}$$

$$\underline{s}(\varepsilon) = c_1 \cdot e^{j\varepsilon} \qquad \text{ideal}$$

Spursignale weisen systematische Fehler auf:

- Offset-Fehler ($\underline{c}_0 \neq 0$) maximal 4%
- Amplituden- Differenz (Re $\{\underline{c}_{-1}\} \neq 0$), maximal 4%
- Phasen-Fehler, Phase zw. Sinus und Cosinus ist nicht exakt 90° (Im $\{\underline{c}_{-1}\} \neq 0$)
- Harmonische Verzerrungen ($\underline{c}_{k,|k|>1} \neq 0$), typisch THD < 1%

Die dominanten Fehler hängen von $\underline{c}_0$ und $\underline{c}_{-1}$ ab.

Performance-Verbesserung durch Spursignalkorrektur

Einleitung: Linearmotoren

Lage- und Geschw.-Bestimmung

Regelung von Linearmotoren

Anwendungen

GPOC = Gain Phase and Offset Correction (Patent)

- Online-Korrektur-Verfahren, keine Inbetriebnahme notwendig
- wertet das Betragsquadrat der Spursignale durch Kreuzkorrelation mit der Lage aus

$$\left|\underline{s}(\varepsilon)\right|^2 = \left|\sum_{k=-\infty}^{\infty} \underline{c}_k \cdot e^{jk\varepsilon}\right|^2$$

$$\left|\underline{s}(\varepsilon)\right|^2 \approx c_1^2 + \underbrace{2c_1 \cdot \mathrm{Re}\{\underline{c}_{-1}\} \cdot \cos 2\varepsilon}_{\text{Amplitudendifferenz}} + \underbrace{2c_1 \cdot \mathrm{Im}\{\underline{c}_{-1}\} \cdot \sin 2\varepsilon}_{\text{Phasenfehler}}$$
$$+ \underbrace{2c_1 \cdot \mathrm{Re}\{\underline{c}_0\} \cdot \cos \varepsilon}_{\text{Offset Spur A}} + \underbrace{2c_1 \cdot \mathrm{Im}\{\underline{c}_0\} \cdot \sin \varepsilon}_{\text{Offset Spur B}}$$

Kreuzkorrelation für Phasenfehler

$$\varphi = k \cdot \int_0^{2\pi n} \left|\underline{s}(\varepsilon)\right|^2 \sin 2\varepsilon \cdot d\varepsilon$$

Performance-Verbesserung durch Spursignalkorrektur

Einleitung: Linearmotoren

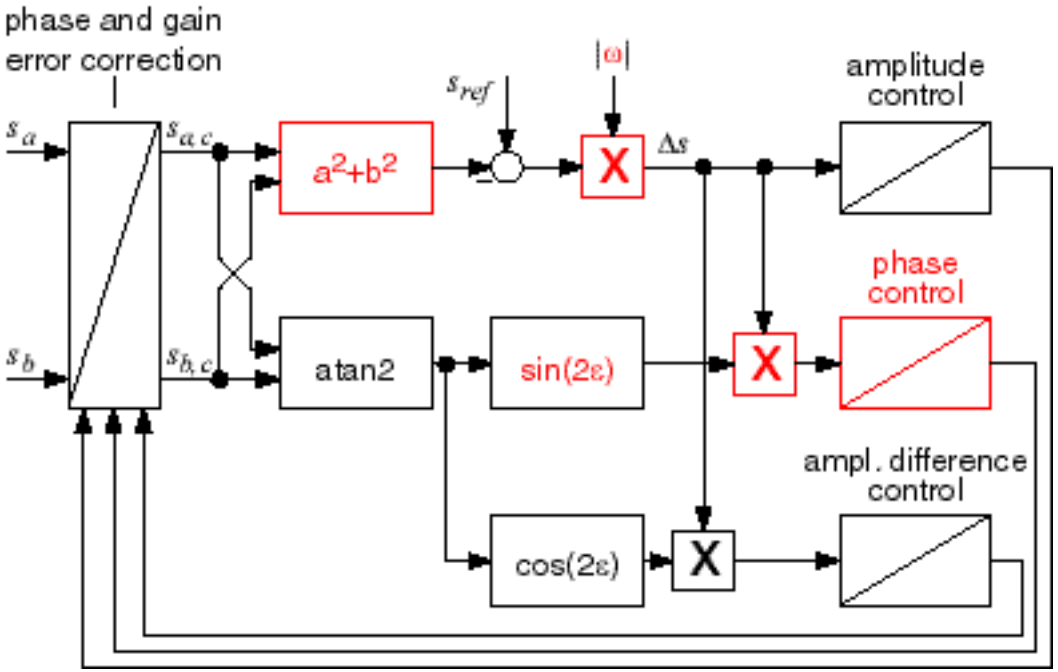
Lage- und Geschw.-Bestimmung

Regelung von Linearmotoren

Anwendungen

GPOC-Regelungsstruktur (Patent)

für Amplitudenkorrektur und Phasenkorrektur ($\varphi = k \cdot \int_0^{2\pi n} |\underline{s}(\varepsilon)|^2 \sin 2\varepsilon \cdot d\varepsilon$)



Performance-Verbesserung durch Spursignalkorrektur

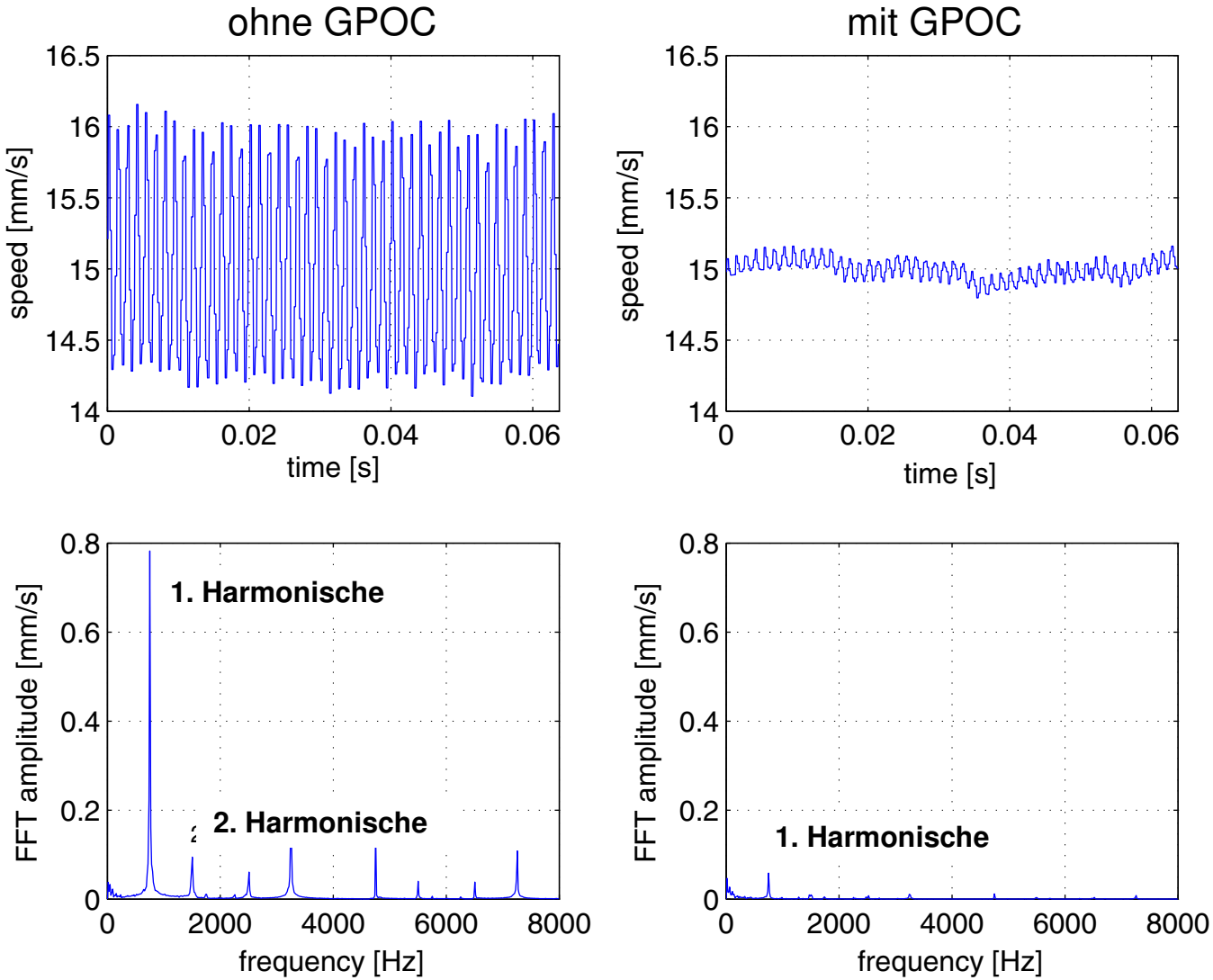
GPOC Experimentelle Ergebnisse

Einleitung: Linearmotoren

Lage- und Geschw.-Bestimmung

Regelung von Linearmotoren

Anwendungen



© Lust Antriebstechnik GmbH

Beobachter zur Drehzahlfilterung

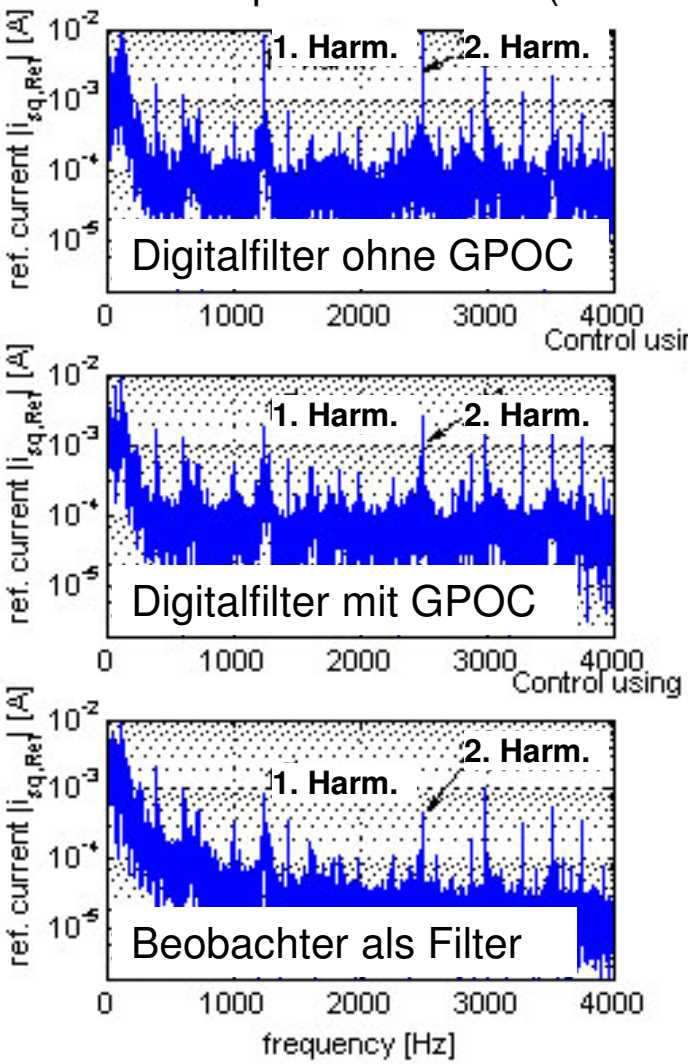
Einleitung: Linearmotoren

Lage- und Geschw.-Bestimmung

Regelung von Linearmotoren

Anwendungen

FFT q-Stromsollwert (akustische Geräusche des Antriebs)



Vergleich

- Digitalfilter (PT1) mit
- Lastmomentbeobachter (Einmassensystem)

Vorteile des Beobachters

- Antrieb deutlich leiser
- keine Phasenabsenkung durch Filterung
- mehr Phasenreserve und damit mehr Stabilität
- höhere Reglerverstärkungen möglich
- besseres Führungsverhalten

© Lust Antriebstechnik GmbH

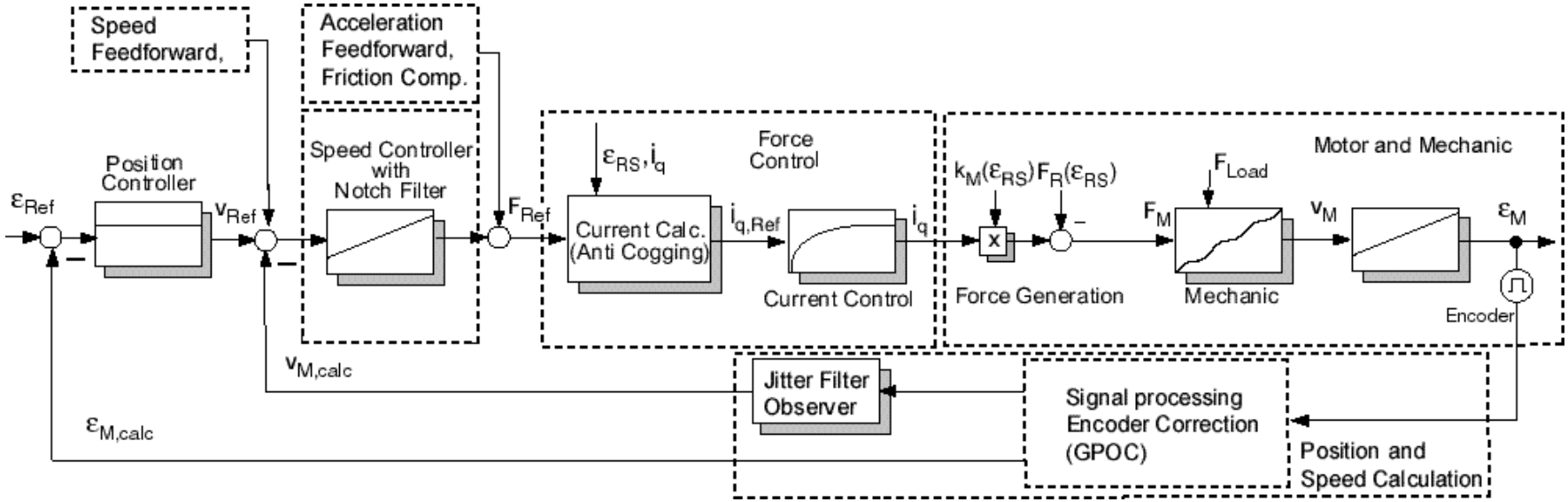
Regelung von Linearmotoren: Reglerstruktur

Einleitung: Linearmotoren

Lage- und Geschw.-Bestimmung

Regelung von Linearmotoren

Anwendungen



Servoregler CDD3000 (16bit µC + dSMC ASIC, Fixed Point, 30 MHz)

- Vorsteuerung von Geschwindigkeit und Beschleunigung
- Rastkraftkompensation (Anti-Cogging)
- Frequenzgangmessung und Notchfilter

Servoregler ServoOne (32bit µC, Floating Point, 150 MHz)

- ***NEU*** Erweiterte Regelungsstrukturen u.a. mit aktiver Schwingungsdämpfung, erweiterte Filter ...

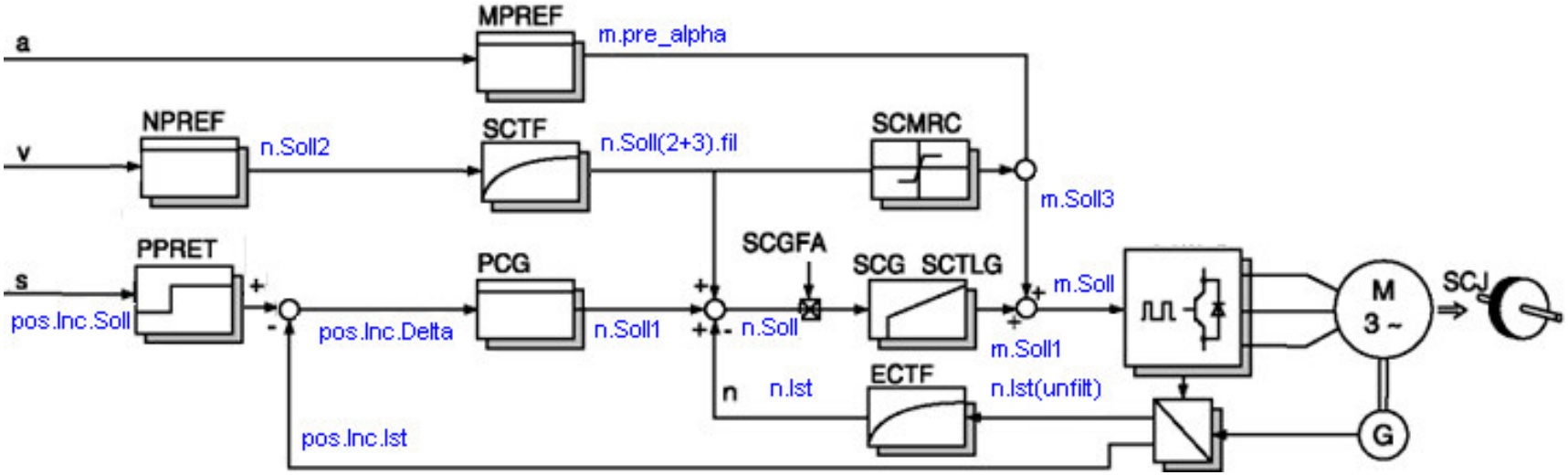
Beschleunigungsvorsteuerung

Einleitung: Linearmotoren

Lage- und Geschw.-Bestimmung

Regelung von Linearmotoren

Anwendungen



- Vorsteuerung bis zur Beschleunigung (= Kraft = Strom)
- Vorsteuerung für Reibkräfte
- Filter für Phasenverschiebung der Vorsteuergrößen
- Dynamik des Führungsverhaltens entspricht der des Stromregelkreises

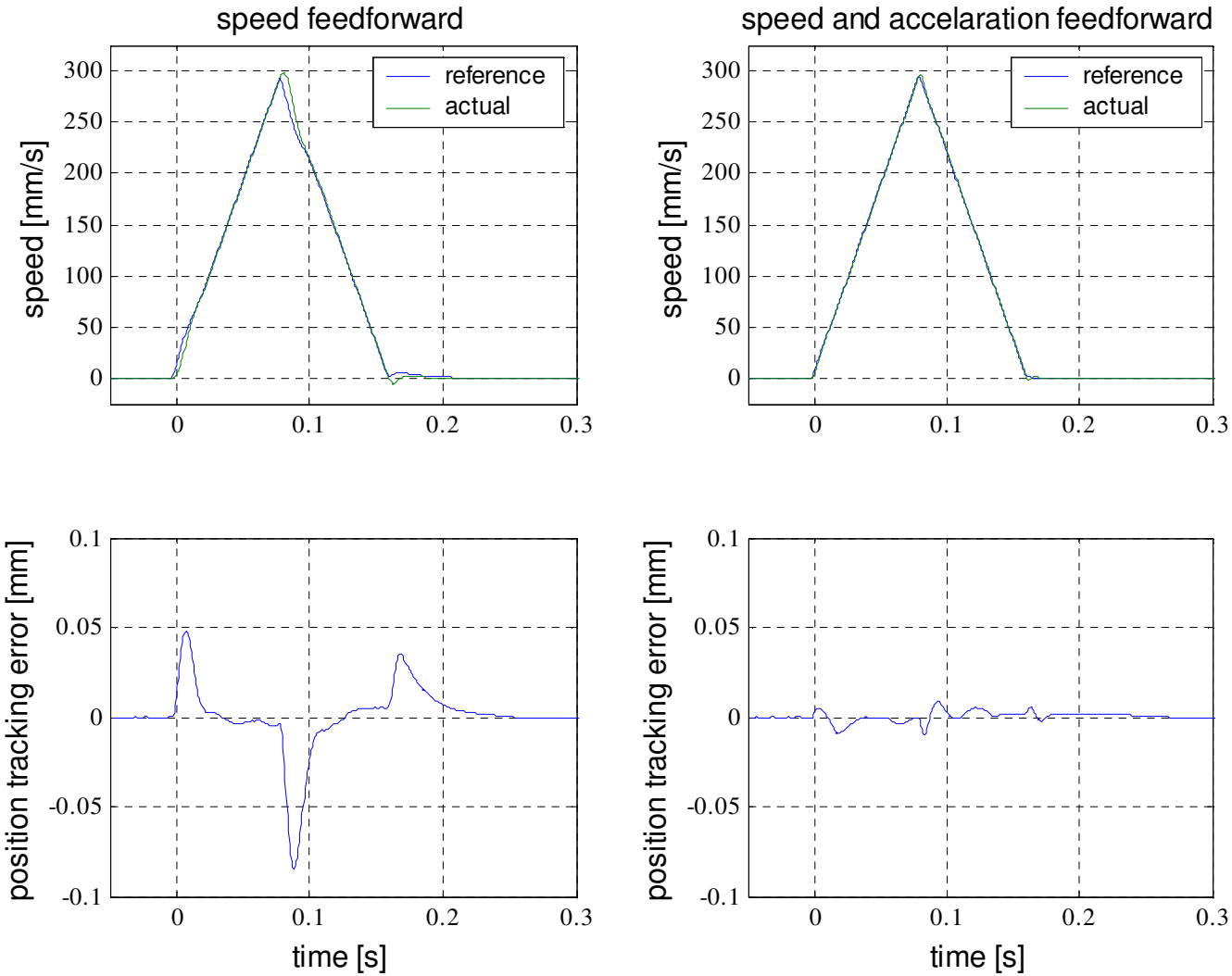
Ergebnisse ohne/mit Beschleunigungsvorsteuerung

Einleitung: Linearmotoren

Lage- und Geschw.-Bestimmung

Regelung von Linearmotoren

Anwendungen



© Lust Antriebstechnik GmbH

Rastkraftkompensation (Anti-Cogging)

Einleitung: Linearmotoren

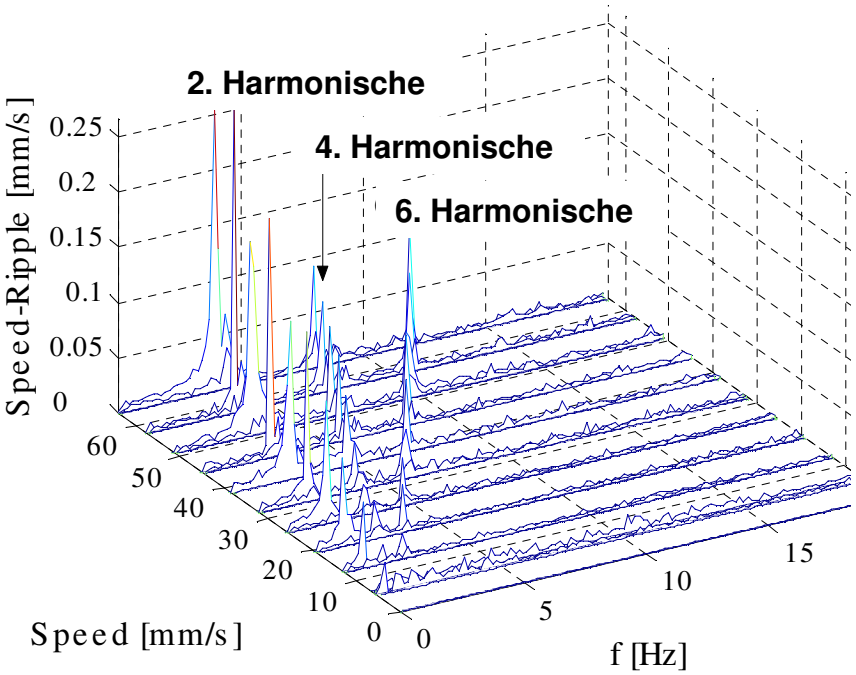
Lage- und Geschw.-Bestimmung

Regelung von Linearmotoren

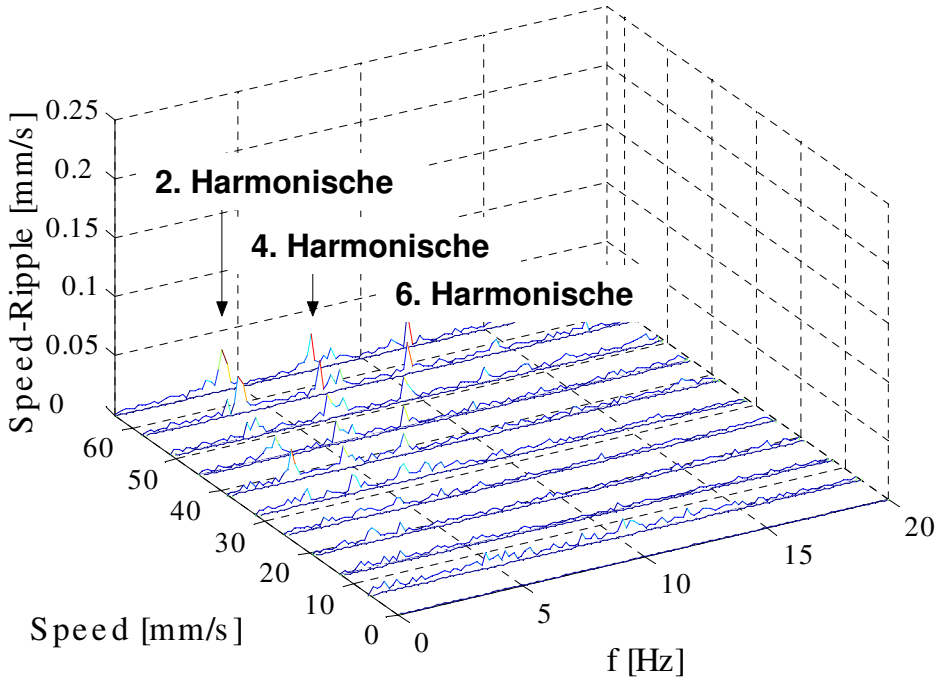
Anwendungen

Wasserfalldiagramme der Geschwindigkeitsverläufe (Spektren bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten)

ohne Kompensation



mit Kompensation



Anwendungsbeispiele von Linearmotoren bei Lust

Einleitung: Linearmotoren

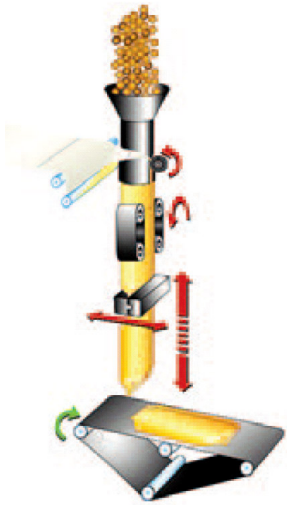
Lage- und Geschw.-Bestimmung

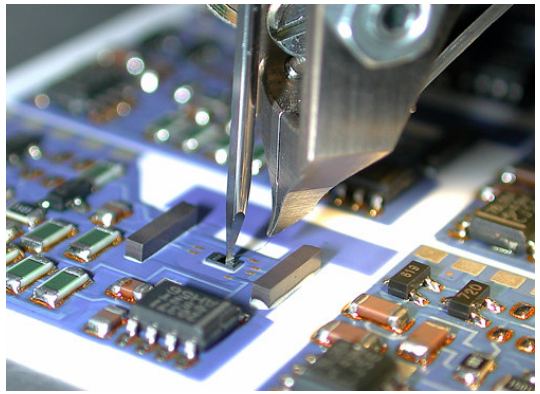
Regelung von Linearmotoren

Anwendungen

Lösungen mit „Standard“-Antriebstechnik

- schnelle Handlingapplikationen
- Laserschneiden, Wasserstrahlschneiden
- Verpackungsmaschinen
- Belichtung von Fotoplatten
- Bonding, Bestückautomaten (eisenlose Motoren)
- Materialtransport, Parksystem





Anwendungsbeispiele von Linearmotoren bei Lust

Einleitung: Linearmotoren

Lage- und Geschw.-Bestimmung

Regelung von Linearmotoren

Anwendungen

Spezielle Lösungen (Software, Hardware, Engineering)

- Folienstreckmaschine
- Transportsystem im Vakuum
- Neue Bahn Paderborn (Linearmotor als Bahnantrieb)

Zusammenfassung

Einleitung: Linearmotoren

Lage- und Geschw.-Bestimmung

Regelung von Linearmotoren

Anwendungen

Antriebslösungen mit Linearmotoren ...

- werden in Maschinendesigns zunehmend eingesetzt
- bekommen immer größere wirtschaftliche Bedeutung
- stellen höhere Anforderungen an Servoregler

- erfordern kostengünstige Messsysteme mit guter Auswertung
- Regelungstechnik für höchste Dynamik

Die beste Systemlösung entscheidet!

Gute Maschinendesigns sind in der Entwicklung!

Aber es ist noch viel Optimierungspotential vorhanden!

- Umsetzung im Servoregler ServoOne