

# Die Netzwerktheorie als leistungsfähige Entwurfsmethode für elektromechanische Systeme der Mikrotechnik und Mechatronik

Günther Pfeifer<sup>1</sup>, Roland Werthschützky<sup>2</sup>

<sup>1</sup> TU Dresden, Institut für Halbleiter und Mikrosystemtechnik, 01187 Dresden

<sup>2</sup> TU Darmstadt, Institut für Elektromechanische Konstruktionen, 64283 Darmstadt

## Die Netzwerkanalyse als Entwurfsmethode

Elektromechanische Systeme der Feinwerk- und Mikrotechnik umfassen Geräte, Baugruppen und Bauelemente. Typische Vertreter sind Sensoren der Kfz-, Verfahrens- und Medizintechnik, Stell- und Positioniersysteme im Maschinenbau, Mikrofone, Lautsprecher und Drucker in der Kommunikationstechnik sowie hydraulische Koppelsysteme und aktive Schalldämpfer in der Fahrzeugtechnik. Diese elektromechanischen Systeme bestehen aus miteinander verkoppelten elektrischen, mechanischen und akustischen Funktionselementen. Die unterschiedlichen Teilsysteme werden in Abbildung 1 durch elektromechanische Wandler verknüpft.

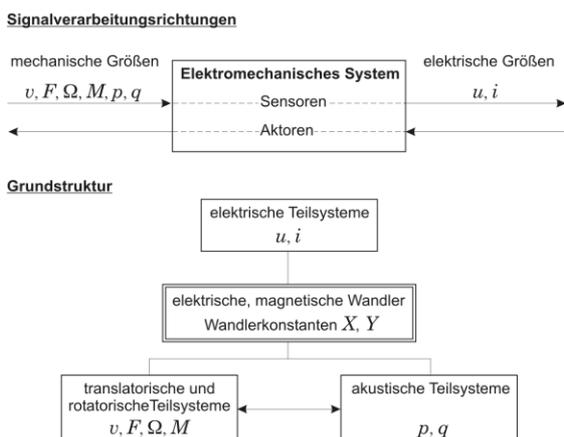


Abbildung 1: Signalverarbeitungsrichtungen und Grundstruktur elektromechanischer Systeme.

Die Beschreibung elektrischer Systeme durch die Netzwerktheorie zählt zum Grundwissen von Ingenieuren der Elektrotechnik und Informationstechnik. Die Anwendung der übersichtlichen und anschaulichen Analyseverfahren von elektrischen Netzwerken bilden die Vorteile dieser Methode. Durch die Abbildung mechanischer und akustischer Systeme auf Basis deren Isomorphie zu elektrischen Netzwerken und Einführung von elektromechanischen Wandlern zwischen dem elektrischen und mechanischen Netzwerk ist eine geschlossene Netzwerkbeschreibung komplexer elektromechanischer Systeme möglich (Abb. 2).

Die Theorie elektrischer Netzwerke beruht auf den Arbeiten von KIRCHHOFF und HELMHOLTZ. Grundlage dieser Theorie war die Linearitätsvoraussetzung. Parallel mit der Ausarbeitung einer an lineare Systeme angepassten.

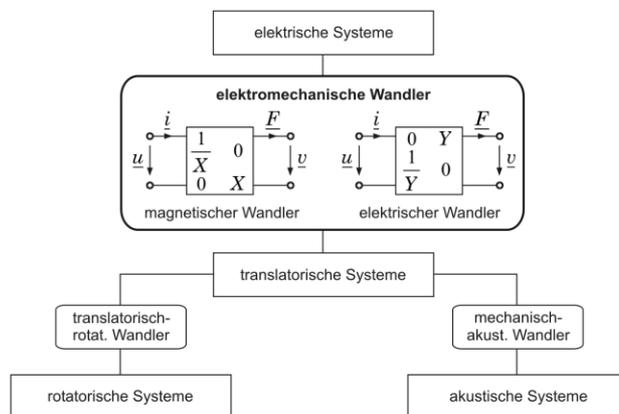


Abbildung 2: Allgemeines lineares dynamisches System mit Wandlern zwischen den unterschiedlichen Netzwerken.

Signaltheorie entstand durch KÜPFMÜLLER die Systemtheorie der elektrischen Nachrichtentechnik. Mit der Entwicklung der Messtechnik und dem Feingerätebau wurde erkennbar, dass die linearen mechanischen Systemgleichungen den isomorphen Systemgleichungen der linearen elektrischen Netzwerke zugeordnet werden können. Auf diese Weise entstanden die sogenannten elektromechanischen Analogien durch WAGNER, REICHARDT und CREMER. LENK [1] verknüpfte die unterschiedlichen Teilnetzwerke durch Einführung der verlustfreien Vierpoldarstellung von elektromechanischen Wandlern und nutzte zu deren Beschreibung die durch KÜPFMÜLLER eingeführte Übertragungsfunktion. Außerdem erweiterte er die einfachen Darstellungen mit konzentrierten Bauelementen durch den Übergang zu verteilten Parametern und schuf damit auch die Möglichkeit der Beschreibung im erweiterten Frequenzgebiet, z.B. für Ultraschallwandler. Neuere Arbeiten [2] sind der Vereinfachung der Anwendung von Wellengleichungen bei verteilten Systemen durch Einführung finiter Netzwerkelemente und Kombination von Netzwerktheorie und FEM-Rechnung gewidmet.

## Anwendungsbeispiele

Als Beispiel für eine geschlossene Beschreibung mit konzentrierten Bauelementen ist in Abbildung 3 das Netzwerk eines elektrodynamischen Lautsprechers angegeben. Ein transformatorischer Vierpol verknüpft das elektrische und mechanische Teilnetzwerk des elektrodynamischen Wandlers. Die Verknüpfung zum akustischen Teilnetzwerk erfolgt durch einen gyratorischen

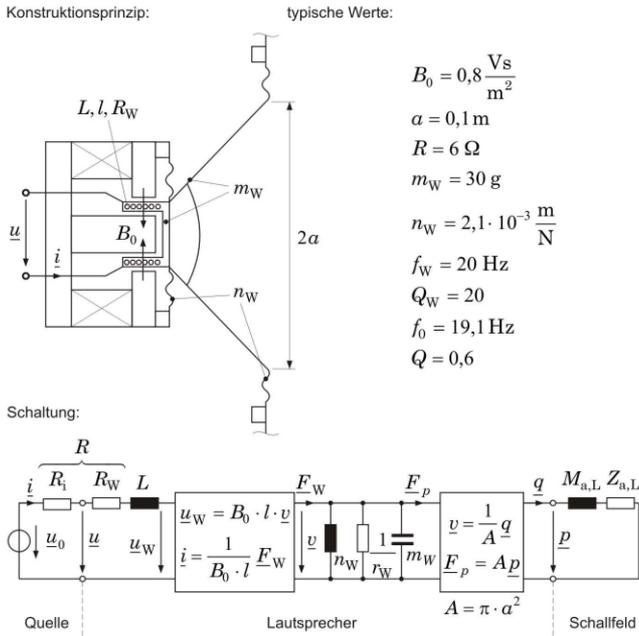


Abbildung 3: Netzwerkdarstellung des elektrodynamischen Lautsprechers.

Wandler. Die konzentrierten akustischen Bauelemente; mitschwingende akustische Luftmasse und Reibung; bilden in erster Näherung die Rückwirkung des Schallfeldes ab [2].

Das zweite Beispiel (Abb. 4) zeigt einen piezomagnetischen Ultraschallsender zur Ortung von stationären oder beweglichen Objekten unter der Meeresoberfläche nach dem Sonar-Verfahren. Der Ultraschallsender wird als  $\lambda/2$ -Schwinger mit Trägerfrequenzen im Bereich von 20 kHz bis zu einigen 100 kHz betrieben. Die mechanischen Bauelemente des US-Schwingers sind als Wellenleiter abgebildet. Die Vierpolmatrix des Wellenleiters kann in

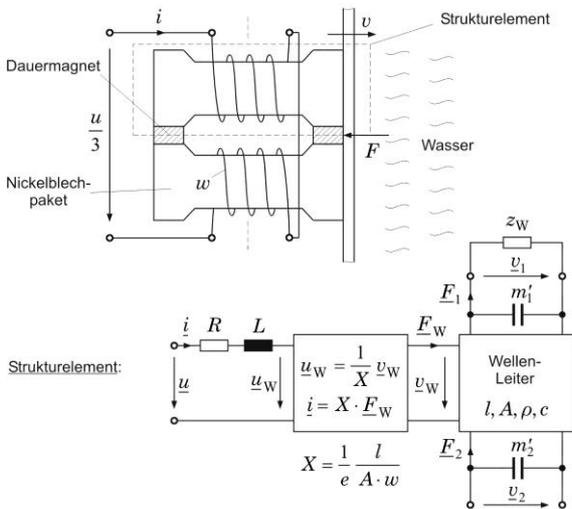


Abbildung 4: Piezomagnetischer Ultraschallsender für Sonargeräte.

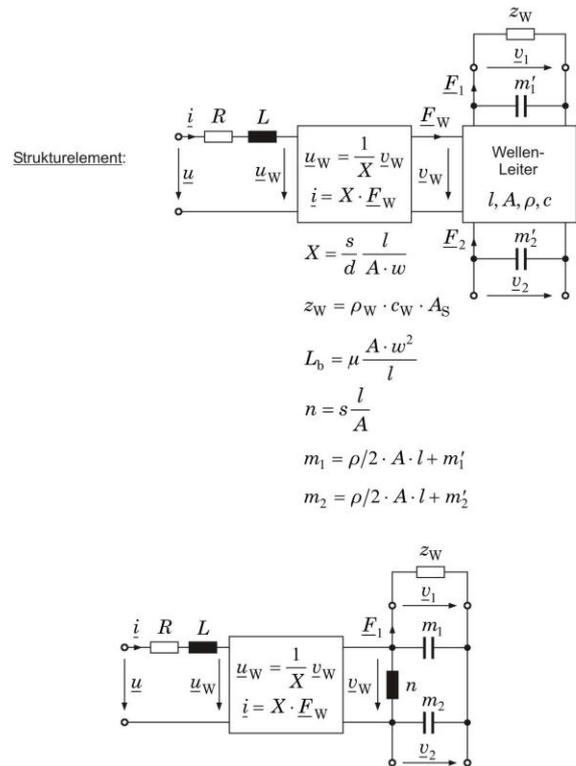


Abbildung 5: Näherungsschaltung eines Strukturelementes des Ultraschallsenders.

erster Näherung in Abbildung 5 durch eine  $\Pi$ -Schaltung ersetzt werden. Damit ist dann die geschlossene Berechnung des Netzwerkes möglich.

**Fazit**

Merkmale der Netzwerk-Methode:

- Übersichtliches, klar strukturiertes Entwurfsverfahren in Anlehnung an die physikalische Realität.
- Nutzt die Vorteile der linearen Systembeschreibung im Frequenzbereich.
- Ermöglicht dem **Elektroingenieur** mit Hilfe der Methodik der elektrischen Netzwerktheorie ein rasches Einarbeiten in den Entwurf „fremder“ Gebiete, wie Mechanik, Fluidik und thermische Systeme.

Zukünftig erfolgt bei der Beschreibung von Systemen mit verteilten Parametern der Übergang zu Finiten Netzwerkelementen und die Kombination mit der FEM-Simulation.

**Literatur**

[1] Lenk, A.: Elektromechanische Systeme. Band 1 bis 3, VEB Verlag Technik, Berlin 1971, 1974 1975.  
 [2] Lenk, A.; Ballas, R.; Werthschützky, R.; Pfeifer, G.: Electromechanical Systems in Microtechnology and Mechatronics. Springer Verlag, Heidelberg, Berlin