

Abbildung akustischer Wirkketten mittels funktionaler Produktarchitekturen

Alexander Gröninger, Sebastian Gramlich, Michael Roos

Continental, Division Chassis & Safety

Alexander.Groeninger@Continental-Corporation.com

Einleitung

Vor allem im Automotive Bereich stellt die Entwicklung möglichst emissionsarmer Produkte eine der grundlegenden kundenseitigen Anforderungen dar. Dies gilt insbesondere für Luft- und Körperschallemissionen. Ein umfassendes Vorgehen zur Analyse des akustischen Produktverhaltens wird bereits in ISO TR 11688 [1] beschrieben. Die darin verwendeten Methoden eignen sich insbesondere für spätere Entwicklungsphasen, in denen die Analyseschritte durch die physikalische Produktstruktur in Grundzügen festgelegt werden. Es fehlt jedoch ein geeignetes Hilfsmittel mittels dessen bereits die Analyse erster konzeptioneller Lösungen hinsichtlich einer möglichst geräuscharmen Auslegung unterstützt werden kann. Es wird daher ein Ansatz vorgestellt, der die Produktmodellierung während der frühen Entwicklungsphasen aufgreift und diese unter Verwendung einer geeigneten Beschreibung akustischer Phänomene erweitert. Diese stellt wiederum die Basis zur Strukturierung der akustischen Analyse sowie zur gezielten Definition von konstruktiven Maßnahmen dar.

Funktionsorientierte Produktarchitekturen

Gegenüber einer physikalischen bzw. komponentenbasierten Produktstruktur, wie sie z.B. in CAD-Systemen umgesetzt ist, empfehlen Pahl und Beitz [2] zunächst die Abstraktion des Produkts durch eine funktionale Produktarchitektur („Funktionsstruktur“). Die Strukturierung der Entwicklungsaufgabe in Teilfunktionen reduziert die Komplexität und unterstützt dadurch die zielgerichtete (Teil) Lösungs- und Konzeptfindung ([2], S. 49f).

Dazu werden die Haupt- und Nebenfunktionen des Produktes mittels Subjekt und Verb in einer einheitlichen Form beschrieben. Eine Verknüpfung der Funktionen zu einer gemeinsamen Struktur entsteht durch den Energie-, Material- und Signalfluss zwischen den Funktionen. Abbildung 1 stellt beispielhaft eine technische Funktion als Blackbox dar: Die Eingangsgröße „elektrische Energie“ wird durch die Operation „Energie wandeln“ in die Ausgangsgröße, eine mechanische Energie transformiert.

Auf der Funktionsmodellierung aufbauend nennen Pahl und Beitz als nächste Konkretisierungsschritte das Entwickeln von Wirkzusammenhängen. In Form von Wirkprinzipien werden grundlegende physikalische Effekte mit geometrischen und stofflichen Merkmalen verknüpft. Anhand dieser Wirkprinzipien sind Bewertung und Auswahl verschiedener Varianten möglich, die den Übergang von der Konzept- zur Entwurfsphase bilden und damit Basis für die weitere Grob- und Feingestaltung des Produkts darstellen.

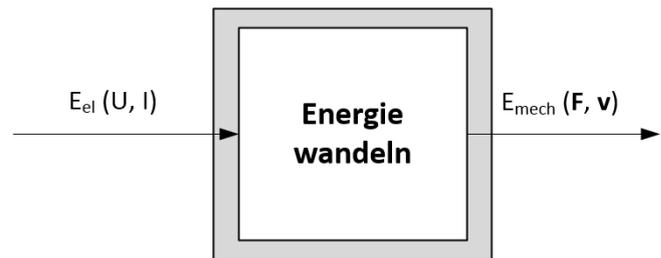


Abbildung 1: Funktion "Energie wandeln" mit Energiefluss

Der Konkretisierungsschritt von Funktionen zu Wirkzusammenhängen ermöglicht auch eine Berücksichtigung akustischer Wirkprinzipien und bildet damit die Grundlage zur Strukturierung des Vorgehens nach ISO TR 11688.

Integration akustischer Wirkketten in funktionale Produktarchitekturen

Das in ISO TR 11688 vorgestellte Verfahren gliedert die akustische Analyse in fünf Schritte: Die Klassifikation des Produkts in aktive und passive Komponenten, die Lokalisierung von Schallquellen, Übertragungspfaden und abstrahlenden Oberflächen sowie die Identifikation der stärksten Beitragsleister.

Zwar wird für das Verfahren eine generelle Anwendbarkeit auf alle Phasen des Produktlebenszyklus prognostiziert, allerdings ermöglicht erst die hier vorgestellte Integration in funktionsorientierte Produktarchitekturen die Modellierung von akustischen Anregungsmechanismen und deren direkte Verknüpfung mit den funktionserfüllenden Wirkprinzipien.

Aufgrund der zuvor erstellten Funktionsstruktur konkretisiert sich das Vorgehen der Internationalen Organisation für Normung (ISO): Zunächst wird für jede Funktion im Hauptenergiefluss das physikalische Wirkprinzip definiert und die damit direkt verknüpften akustischen Wirkprinzipien für eine Schallanregung antizipiert (s. Tabelle 1). Mittels der bereits in ISO 11688 beschriebenen akustischen Anregungsmechanismen können die akustischen Wirkprinzipien einheitlich beschrieben werden.

Tabelle 1: Anregungsmechanismen nach ISO 11688 [1]

Luftschall	Fluidschall	Körperschall
Turbulenz	Turbulenz	Stoß
Pulsieren	Pulsieren	Zahneingriff
Schock	Schock	Rollen
	Kavitation	Trägheit
		Reibung
		Magnetismus

Ist keine Verknüpfung möglich, ist die Funktion akustisch passiv. Eine vorherige Klassifizierung nach aktiven und passiven Funktionen entfällt somit. Durch das Hinzufügen des akustischen Effekts zur jeweiligen Funktion, wie in Abbildung 2 gezeigt, werden die verschiedenen Anregungen in einer erweiterten Funktionsträgerdarstellung abgebildet.

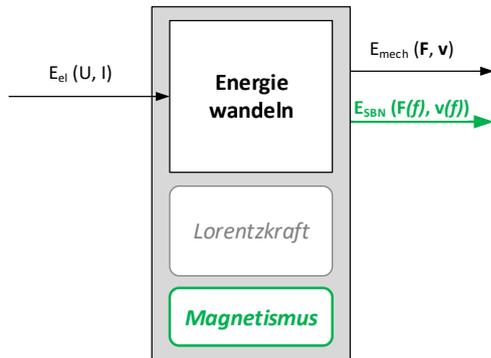


Abbildung 2: Funktionsträgerdarstellung mit physikalischem Effekt (grau) und akustischem Effekt (grün) sowie mechanischem (schwarz) und akustischem (grün) Energiefluss

Im nächsten Schritt werden alle Funktionen, die über einen mechanischen Energiefluss verknüpft sind, notwendigerweise als Transferpfade für Körperschall klassifiziert. Es wird, wie in Abbildung 2 gezeigt, ein akustischer Energiepfad ergänzt, um diese Transferpfade in der Funktionsstruktur abzubilden. Funktionen ohne akustische Anregung, die in diesem Energiepfad liegen, werden durch den Wirkeffekt „Transfer“ gekennzeichnet.

Die Schallabstrahlung ist in der Konzeptphase nur durch ein detailliertes Antizipieren des Produktverhaltens möglich. Sie hängt wesentlich von den Bauteiloberflächen, definiert durch deren geometrische und stoffliche Design Parameter, also deren Gestaltung, ab.

Eine Verknüpfung akustischer Wirkprinzipien mit den funktionserfüllenden Wirkprinzipien sowie der akustischen Wirkprinzipien untereinander ist bei der geometrischen Ausgestaltung einzelner Funktionsträger die Grundlage, um eine lärmarme Konstruktion sicherzustellen.

Anwendung auf die elektrische Parkbremse

Die beschriebene Integration akustischer Wirkketten in die funktionalen Produktarchitekturen wird im Folgenden anhand eines Aktuators für elektrische Parkbremsysteme, wie in Abbildung 3 dargestellt, erläutert. Abbildung 4 zeigt die erweiterte funktionale Produktarchitektur.

Die Hauptfunktionen des Aktuators umfassen das Wandeln elektrischer Energie in mechanisch rotatorische Energie, charakterisiert durch ein entsprechendes Moment und niedrige Drehzahl sowie das mechanische Sperren einer Rückdrehbewegung.

Die erste Funktion lässt sich weiter aufgliedern in

- das Wandeln der elektrischen Energie in mechanische Energie,
- das Beschränken der Energieform auf eine Rotation mittels der Funktion „Freiheitsgrad zulassen“,
- das Leiten der Energie und
- das Umformen der Energie, um Moment und Drehzahl zu ändern.

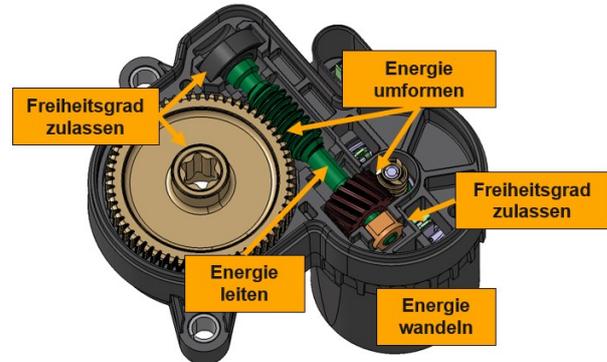


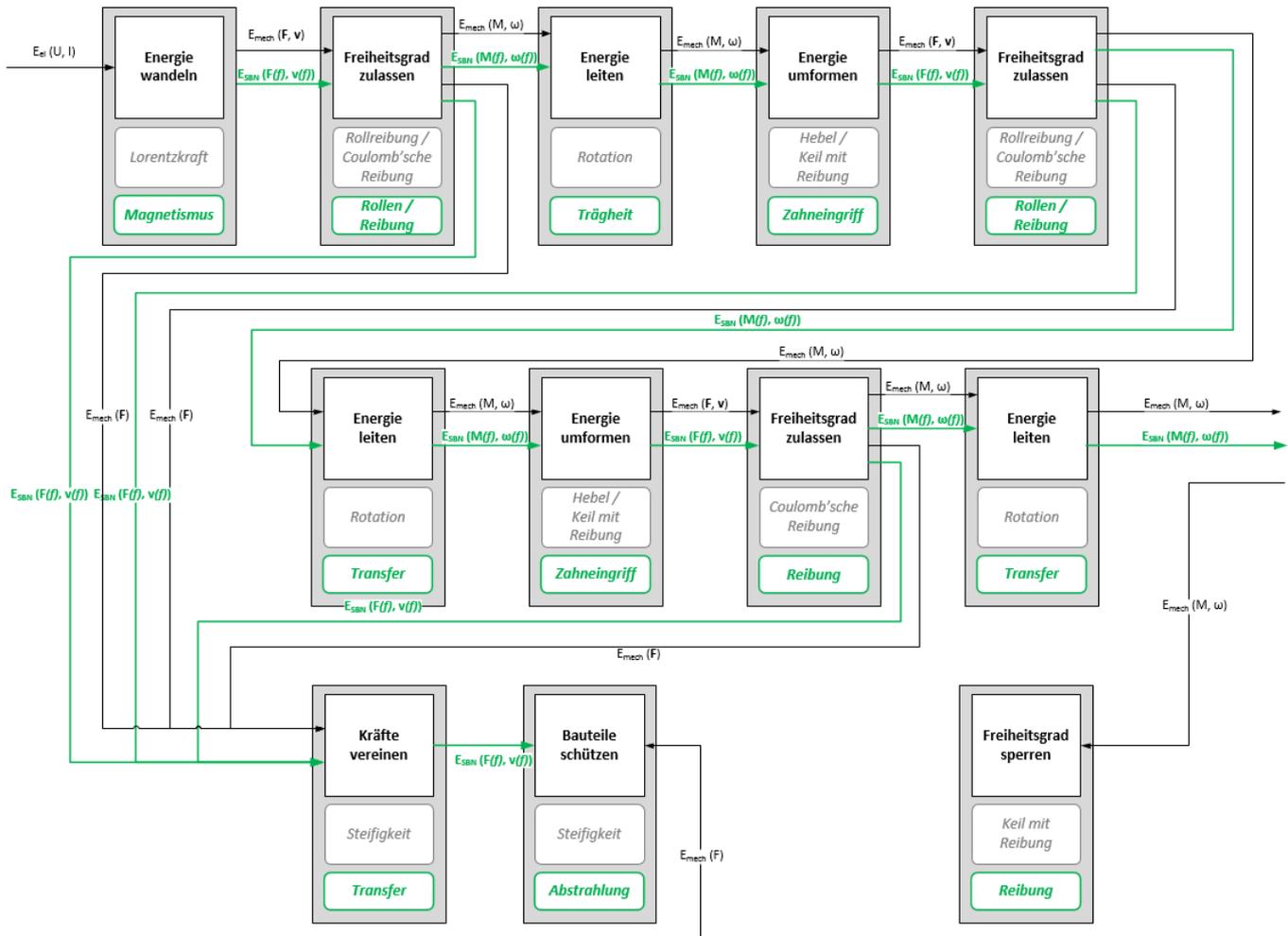
Abbildung 3: Aktuator für elektrische Parkbremsen mit funktionaler Beschreibung

Die Verknüpfung der Funktion mit dem jeweiligen Wirkprinzip legt die funktionale Wirkkette des Aktuators fest. Die Funktion „Energie umformen“ wird physikalisch durch den Hebeleffekt dargestellt. Praktisch entspricht eine Hebelwirkung bei einer Drehbewegung einer Getriebeübersetzung.

Da akustische Anregungsmechanismen auf physikalischen Effekten beruhen, lassen sie sich unmittelbar verknüpfen. Somit ergibt sich ein direkter Zusammenhang zwischen technischer Funktion, funktionserfüllendem Wirkprinzip und akustischer Anregung. Die Verknüpfung der akustischen Anregungsmechanismen mit den physikalischen Effekten (und damit zu den Funktionen) ergibt sich, wie beispielhaft in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Übertrag von technischer Funktion zu physikalischem Effekten für das jeweilige Wirkprinzip und Verknüpfung mit den akustischen Anregungsmechanismen

Technische Funktion	Physikalischer Effekt	Verknüpfte akustische Anregung
Energie wandeln	Lorentzkraft	Magnetismus
Freiheitsgrad zulassen	Rollreibung / Coulomb'sche Reibung	Rollen / Reibung
Energie leiten	Stoffschlüssige Rotationsübertragung	Trägheit
Energie umformen	Hebeleffekt	Zahneingriff
Energie sperren	Keileffekt mit Reibung	-



weist aufgrund der Zahneingriffsfrequenz einen deutlichen

Abbildung 4: Wirkstruktur mit Funktionen (schwarz), physikalischen (grau) und akustischen (grün) Effekten verbunden durch mechanische (schwarz) und akustische (grün) Energien

Aufgrund der Wahl der geometrischen und stofflichen Merkmale für das Wirkprinzip zur Energiewandlung ist eine hohe Übersetzung erforderlich, die technisch durch zwei seriell angeordnete Energieumformer realisiert wird. Es ergibt sich die in Abbildung 4 dargestellte Wirkstruktur. Sie bildet zudem bereits die akustischen Energie- bzw. Transferpfade ab. Bei der akustischen Analyse ist zur Priorisierung der Funktionen im Fall mehrerer Energiepfade für Haupt- und Nebenfunktionen zunächst der Pfad mit dem größten Energiefluss zu betrachten.

Geräuschbeispiel

Der Umgang mit der funktionalen Wirkstruktur wird am Beispiel eines amplituden- und frequenzmodulierten Schalldruckpegels, wie in Abbildung 5 dargestellt, erläutert. Die Modulationsfrequenz f_M entspricht der Grundfrequenz (Drehzahl) aller Funktionen vom ersten bis zum zweiten Energieumformer.

Eine detailliertere Betrachtung zeigt, dass eine Unwuchterregung durch den Energieleiter aufgrund der geringen Rotationsgeschwindigkeit als gering einzuschätzen ist. Der Funktionsträger „Energie umformen 2“ hingegen

Zusammenhang zur Modulation auf. Im Rahmen einer detaillierten Analyse wird mittels einer Finiten Elemente Analyse die Steifigkeitsänderung eines Zahneingriffs berechnet. Auf dieser Basis lässt sich der Zahneingriff als ein Hauptbeitragsleister der Modulation identifizieren, wie in Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 3: Priorisierung der Schallanregung für einzelne Funktionen

Technische Funktion	Akustische Anregung	Frequenz der Anregung f_A	Beitrag
Energie umformen 1	Zahneingriff	$f_A \gg f_M$	keiner
Freiheitsgrad zulassen	Rollen / Reibung	$f_A \gg f_M$; breitbandig	keiner
Energie leiten	Trägheit	$f_A = f_M$	gering
Energie umformen 2	Zahneingriff	$f_A = f_M$	groß

Mittels der technischen Produktarchitektur kann der Einfluss der akustischen Anregung auch auf die vor- und nachgelagerten Funktionsträger, also die akustische Wirkkette beschrieben werden. Schwankende Zahnkräfte führen demnach auch zu einer Schwankung der übertragenen Energie, was sich insbesondere am Funktionsträger „Energie umformen 1“ bemerkbar macht. Eine variierende Last sowie geometrische Auslenkungen aufgrund endlicher Steifigkeiten können im Zahnkontakt zu Fehleingriffen und damit zu starken Stoßanregungen führen. Entsprechende Auswirkungen konnten mit einer FE Analyse nachgewiesen werden.

Maßnahmen zur Reduzierung der Modulation richten sich an die beiden beschriebenen Getriebestufen. Der Funktionsträger „Energie umformen 2“ wird durch eine erhöhte Überdeckung sowie ein verbessertes Zahnprofil so gestaltet, dass die akustische Anregung deutlich reduziert wird. Für den Funktionsträger „Energie umformen 1“ wurde eine verbesserte Zahngeometrie in der zugehörigen Getriebestufe entwickelt, wodurch eine robustere Ausrichtung der Wirkflächen zueinander gewährleistet wird und eine zusätzliche Stoßanregung vermieden wird.

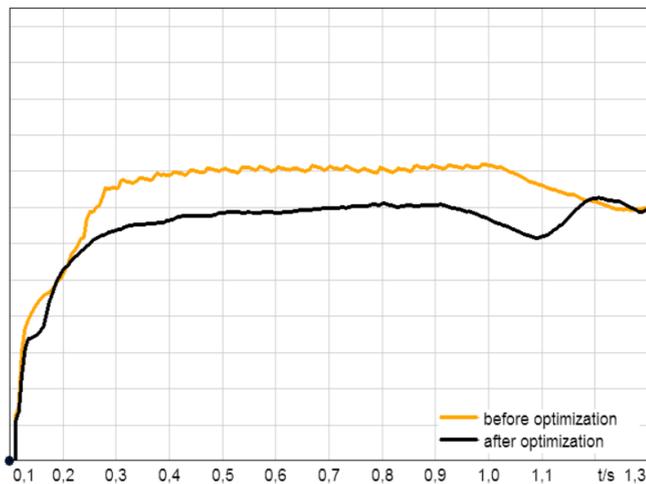


Abbildung 5: Zeitverlauf des Schalldruckpegels beim Betrieb des Aktuators mit Amplitudenmodulation vor einer Optimierung (orange) sowie nach einer Optimierung (schwarz)

Die Modulation wird durch die Kombination der beschriebenen Maßnahmen deutlich reduziert, wie ein Vergleich der Schalldruckpegelverläufe in Abbildung 5 zeigt. Die Verwendung der funktionalen Produktarchitektur legt dabei den Grundsatz für die Strukturierung der Analyse und der Definition von Randbedingungen für einzelne Analysen.

Zusammenfassung

Der Ansatz akustische Wirkketten über eine funktionsorientierte Produktarchitektur zu modellieren, geht über eine rein physikalische d. h. komponentenbasierte Produktstruktur, wie sie z. B. der ISO 11688 zugrunde liegt, hinaus. Die Ableitung der akustischen Wirkprinzipien aus den mechanischen Wirkprinzipien sowie die visuelle

Darstellung von Transferpfaden und Wirkketten werden erst durch diese Modellierung ermöglicht.

Das Beispiel eines elektromechanischen Aktuators für elektromechanische Parkbremssysteme zeigt, wie eine solche Produktarchitektur die akustischen Wirkzusammenhänge übersichtlich darstellt, die akustische Produktanalyse strukturiert und den effizienten Einsatz von Analysewerkzeugen für die wesentlichen akustischen Beitragsleister ermöglicht. Durch die Auswertung und Verknüpfung der Analyseergebnisse aus vibro-akustischen Messungen sowie FE-Simulationen konnte der Einfluss der identifizierten Beitragsleister verifiziert und konstruktive Maßnahmen abgeleitet werden.

Zukünftig soll die Abbildung akustischer Wirkketten mittels funktionaler Produktarchitekturen auch als Basis dienen, um das akustische Verhalten schon frühzeitig im Produktentwicklungsprozess zu antizipieren und damit in die Konzept- und Lösungsfindung zu integrieren.

Literatur

- [1] ISO/TR 11688: Acoustics – Recommended practice for the design of low-noise machinery and equipment (1995).
- [2] Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J., & Grote, K.-H.: Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung Methoden und Anwendung. (Konstruktionslehre.) Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. (2005).