

Systematische Entwicklung von Ultraschallkonvertern

Modellbasierter Entwurf und experimentelle Validierung

Das Herzstück eines Ultraschallwerkzeugs ist der Ultraschallkonverter, genau gesagt: die Piezokeramik in seinem Innern. Hier wird die elektrisch zugeführte Energie auf Basis des indirekten piezoelektrischen Effekts in mechanische Vibrationen gewandelt. Ultraschallkonverter sind meist als Verbundschwinger aus Piezoscheiben mit metallischen Endstücken ausgeführt, und zwar werden die Abmessungen so gewählt, dass der Piezo-Metall-Verbund seine erste Resonanzfrequenz (die der sogenannten $\lambda/2$ -Resonanz) bei einer gewünschten Betriebsfrequenz oberhalb 20 kHz besitzt. In Leistungsschallanwendungen wird der Konverter oft durch einen mechanischen Amplitudenverstärker ergänzt („Horn“), um ohne Überschreitung der maximal zulässigen mechanischen Dehnung in den Piezoelementen hohe Schallintensitäten in der Prozesszone erreichen zu können (Bild 1 und 2).

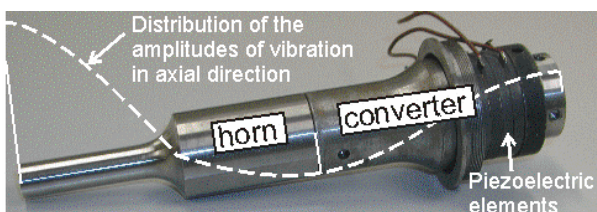


Bild 1 Ultraschallkonverter mit Piezoelementen und Horn zur Amplitudenverstärkung

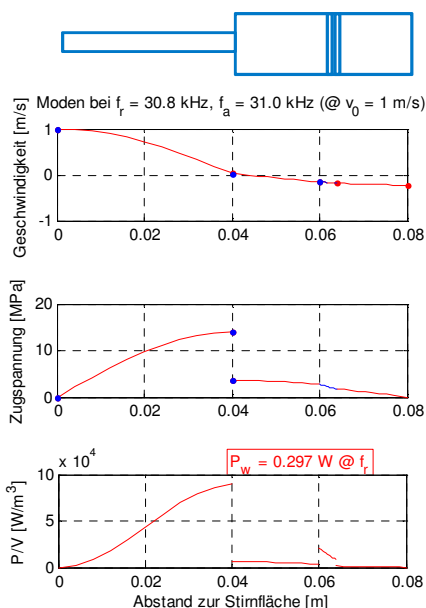


Bild 2 Verteilung der Amplituden von Geschwindigkeit und Zugspannung sowie der Leistungsdichte entlang der Achse eines Ultraschallkonverters in Serienresonanz

Ultraschallkonverter sind Hochtechnologie-Erzeugnisse: Sowohl die elektromechanische Schwingungstheorie zu ihrer Beschreibung und Dimensionierung als auch die vielen Fehlerquellen, die sich bei der Detailkonstruktion und beim Zusammenbau in der Praxis ergeben, fordern besonderes Spezialwissen des Entwicklungsingenieurs. Neben Festigkeitsanforderungen, Verlusten durch innere Reibung und Grenzflächenreibung, Limitationen in übertragbarer Leistung und Spannung muss auch die Wärmeentwicklung in die Betrachtung einbezogen werden, die sich aus der in Bild 2 dargestellten Verteilung der Leistungsdichte ergibt.

Aufbau und Konverterentwurf

Betrachtet man einen typischen Ultraschallkonverter von außen, so ist es zunächst verwunderlich, warum dieses System so kompliziert sein soll. Im Wesentlichen besteht er aus ein paar metallischen Drehteilen, einigen Piezoringen mit Elektrodenblechen und einem zentralen Schraubbolzen zum Vorspannen der Piezoringe (diese vertragen eine schwellende Druckbelastung erheblich besser als eine Zug-Druck-Wechselbelastung). Beste Voraussetzungen also für eine kostengünstige Massenfertigung – wenn erst einmal ein vernünftiger Konverterentwurf vorhanden ist.

Bei genauerem Hinsehen wartet aber selbst der Grundaufbau mit einigen Hinterhältigkeiten auf: Die erste Hürde betrifft das Vorspannen der Keramik – zu viel führt zur Depolarisierung der Keramik, zu wenig zu erheblichen Performanceverlusten. Die Anbindung des Resonanzschwingers an seine Umgebung muss dämpfungsarm erfolgen, ebenso sind Fügstellen innerhalb des Piezo-Ringstapels potentielle Verlustquellen. Durch die eigene Montage vieler Konverter haben wir bei der ATHENA Technologie Beratung GmbH viel Erfahrung gesammelt, die wir gern an Sie weitergeben, um Ihren Entwicklungsprozess zu verkürzen.

Angepasstes Schwingerdesign

In Produkten der Ultraschalltechnik sind typischerweise Kosten und Bauraum limitiert. Für den Ultraschallkonverter folgt daraus als erstes die Frage, wie groß der Durchmesser der Piezokeramik mindestens sein muss, wie viele Ringe man einsetzen muss und welche Dicke diese besitzen sollten. Weiterhin sollte der Piezo-Ringstapel an einer optimalen Position entlang der Schwingerachse platziert sein, wobei im Allgemeinen ein Kompromiss aus übertragbarer Leistung und erreichbarer Ausgangsamplitude angestrebt wird. Aus Sicht des Ultraschallgenerators ist eine vernünftige Impedanz-

anpassung erforderlich. Darüber hinaus stellt sich die Frage nach dem sinnvollsten Material für die Metallteile: Muss es wirklich Titan sein oder reicht auch Alu oder Stahl? Zudem müssen alle genannten Fragen für mindestens zwei Betriebspunkte abgewogen werden - Resonanz- oder Antiresonanzbetrieb?

Nun gibt es prinzipiell die Möglichkeit, alle Material- und Geometrieparameter zu variieren und zu prüfen, welche Größe worauf Einfluss hat. Leider wird man dabei schnell feststellen, dass eigentlich alles auf alles einen Einfluss hat und dass sich darüber hinaus die Resonanzfrequenz des Systems bei jeder Iterationsschleife ändert, was dann wieder auf viele unterschiedliche Weisen kompensiert werden kann. Schnell stellt sich die Frage: Welche Größen sind überhaupt frei wählbar, welche Abhängigkeiten gibt es? Was sind eigentlich die relevanten Zielgrößen der Optimierung? Amplitude, Leistung, Gewicht, Kosten,...?

Bei der ATHENA Technologie Beratung GmbH wurde in enger Kooperation mit der Universität Paderborn eine mathematisch-analytische Beschreibung des Systems „Ultraschallkonverter“ gefunden, in welcher die wesentlichen schwingungsmechanischen Abhängigkeiten erfasst sind. Es handelt sich um einen funktionsorientierten Lösungsansatz auf Basis einer reduzierten Modellgeometrie, dessen Ergebnisse in geschlossenen Gleichungen darstellbar sind, so dass sich die wesentlichen Abhängigkeiten analysieren lassen (Beispiel s. Bild 3). Mit dem Modell lassen sich die modalen Parameter des in Bild 4 dargestellten vereinfachten Ersatzmodells, das die Basis für die Entwicklung eines passenden Ultraschallgenerators bildet, aus Geometrie- und Materialparametern der Konstruktion errechnen.

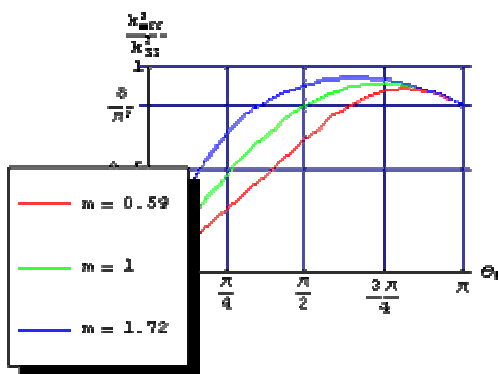


Bild 3 Piezoelektrischer Kopplungsfaktor in Abhängigkeit von der normierten Länge des Piezostapels für einen Ultraschallkonverter mit zentral angeordnetem Piezo (drei Kurven für unterschiedliche Metalle der Endabschnitte: rot = Alu, grün = Titan, blau = Stahl)

Dazu haben wir einen Prüfstand mit einer flexiblen Resonanzansteuerung entwickelt, mit dem beliebige Ultraschallschwinger ohne individuelle Anpassung der Elektronik bei einstellbarer Amplitude in Resonanz betrieben werden können (kHz bis MHz-Frequenzbereich).

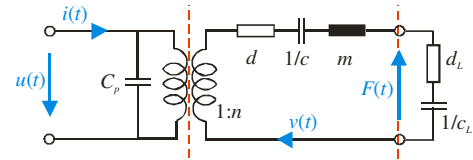


Bild 4 Elektromechanisches Ersatzschaltbild für den Ultraschallkonverter aus Bild 1 (rechts: Lastdämpfung d_L und –steifigkeit c_L)

Messung an Prototypen

Jedem erfahrenen Ultraschalltechniker ist bekannt, dass Modellrechnungen von idealisierenden Annahmen ausgehen, die in der Praxis nicht immer erfüllt sind. Der modellbasierte Entwurf sollte daher stets von experimentellen Untersuchungen an Prototypen begleitet werden. Speziell bei Konverterentwicklungen empfiehlt es sich bereits in frühen Entwicklungsphasen erste Prototypen bei Nennleistung in Resonanz zu vermessen. Dadurch lassen sich die Verlustmechanismen quantifizieren, die maßgeblich den elektrischen Leistungsbedarf bestimmen (Bild 5).

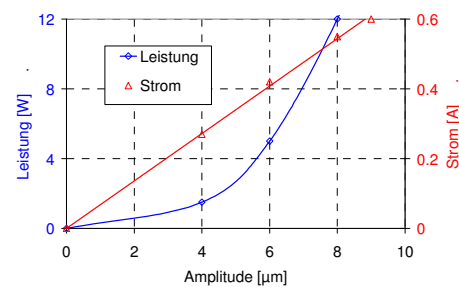


Bild 5 Messergebnis zum Leistungsbedarf eines Ultraschallschwingers bei Betrieb in Resonanz

Mit unserem Methodenbaukasten sind wir in der Lage zielorientiert Konvertergeometrien zu entwerfen, das System in seiner Funktionsweise zu charakterisieren und passend zu Ihrer Anwendung zu optimieren.

Kontakt

Autor: Dr.-Ing. Walter Littmann, Leiter der Technischen Entwicklung der ATHENA Technologie Beratung GmbH



ATHENA
Technologie Beratung GmbH
Technologiepark 13
33100 Paderborn

Tel.: +49-52 51-3 90 65 60
Fax: +49-52 51-3 90 65 63

E-Mail: info@myATHENA.de
<http://www.myATHENA.de>