Mehrfrequenter Stabschwinger als Leistungsultraschallwandler in der industriellen Reinigungstechnik

Oksana Lutz, Thomas Dreyer
Weber Ultrasonics GmbH, 76307 Karlsbad-Ittersbach, Deutschland, Email: o.lutz@weber-ultrasonics.de

Einleitung

In der industriellen Reinigungs- und Prozesstechnik wird Ultraschall hoher Intensität im Frequenzbereich von 18kHz bis 5MHz in einer Vielzahl unterschiedlicher Anwendungen verwendet. Die Reinigungswirkung hängt von mehreren Faktoren ab, unter anderem der Frequenz, der Amplitude des Ultraschallwandlers und den Eigenschaften des Mediums. Niedrige Ultraschallfrequenzen erzeugen generell starke transiente Kavitation und sind damit für grobe Reinigung geeignet. Je höher die Ultraschallfrequenz, desto geringer ist der Anteil transienter Kavitation. Hohe Frequenzen werden also zur Feinreinigung sensibler Bauteile verwendet.

Als Schallwandler werden meist Tauch- oder Plattenschwinger eingesetzt, die aus einem Array einzelner piezoelektrischer Wandler auf einer Metallmembran bestehen, wie es beispielhaft in Abbildung 1 zu sehen ist. Die Schallwandler sind meistens auf eine bestimmte Frequenz optimiert und die Vibration der Metallmembran erzeugt ein homogenes Ultraschallfeld. Durch ein entsprechendes Design der Schallwandler ist es nun möglich diese auf unterschiedlichen Resonanzfrequenzen anzuregen und so mehrere Frequenzen abzustrahlen [1]. Ein Mehrfrequenzsystem kann die Flexibilität der Reinigungsnalagen erhöhen und eine deutliche Platz- und Zeitersparnis liefern. Derartige auf Tauchschwingern basierende Systeme werden bereits erfolgreich eingesetzt.

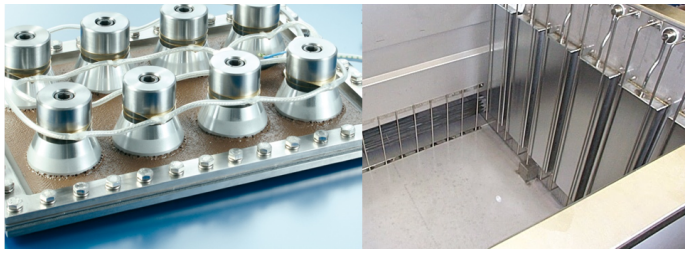

Abbildung 1: Beispiele für typische Platten- und Tauchschwinger.

Bedingt durch ihre Bauweise sind Tauchschwinger nicht in allen gängigen Ultraschallreinigungsanwendungen nutzbar. Durch die dünne Membranhülle können Tauchschwinger nur in offenen Tauchreinigungsanlagen eingesetzt werden, jedoch nicht in Anlagen unter Unter- oder Überdruck. Zudem können die relativ großen Abmessungen bei kleinen Tankvolumen problematisch sein.

Für solche Anwendungen stellen Ultraschallstabschwinger, wie in der Abbildung 2 zu sehen, eine Lösung dar. Ihr Funktionsprinzip beruht auf der Anregung einer Dehnwelle in einem massiven Stab oder einem Rohr durch einen einzelnen Leistungsultraschallwandler [2]. Die mechanische Robustheit dieser Konstruktion eignet sich ideal für Unter- und Überdruckanwendungen. Der geringe Platzbedarf, kombiniert mit dem hohen Wirkungsgrad, liefert auch in kleinen Anlagen ein gleichmäßiges Schallfeld. Üblicherweise besitzt jeder Stabschwinger eine durch seine Bauform bestimmte Arbeitsfrequenz. Wie auch im Fall der Tauchschwinger, wäre für eine erhöhte Flexibilität einer Reinigungsanlage ein Betrieb bei mehreren Frequenzen vorteilhaft. Derzeit sind aber keine kommerziellen Lösungen dazu bekannt.

Hier wird gezeigt, wie ein solcher mehrfrequenter Stabschwinger für die gängigen Frequenzen von 25kHz und 40kHz mit Hilfe von FEM-Simulationen realisiert wurde.

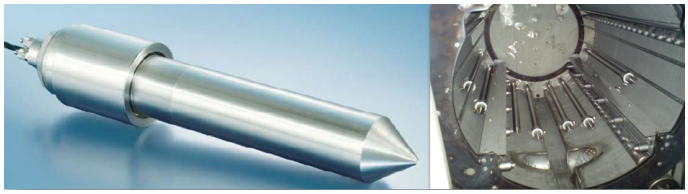

Abbildung 2: Beispiele für typische Stabschwinger.

Stabschwinger

Ein Stabschwinger besteht aus einem Ultraschallwandler, dem sogenannten Stabschwingerkopf, welcher die elektrische Energie in die mechanische Schwingung umwandelt, und einem Metallstab, welcher für die Abstrahlung der erzeugten Ultraschallwellen in das umgebende Medium sorgt. Entlang des Stabes breitet sich eine Dehnwelle mit abwechselnden longitudinalen und radialen Maxima aus, wobei die Abstände der einzelnen Maxima dabei von der Anregungsfrequenz abhängen, was schematisch in der Abbildung 3 dargestellt ist.

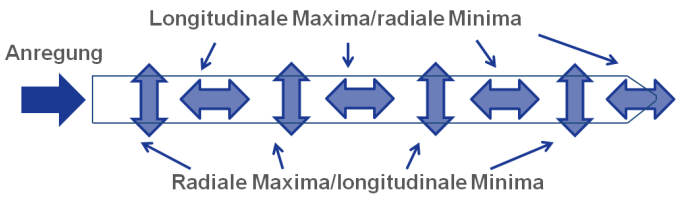

Abbildung 3: Schematische Darstellung der Funktionsweise eines Stabschwingers.

Der Stabschwingerkopf besteht im wesentlich aus einem Paket aus Piezokeramiken, welches durch metallische Front- und Endmassen verspannt ist. Die Geometrie des Kopfes ist auf eine bestimmte Arbeitsfrequenz optimiert, typischerweise beträgt die Gesamtlänge des Kopfes eine halbe Wellenlänge, wobei der untere Teil (Frontmasse) und der obere Teil (Keramikpaket und Endmasse) jeweils ein Viertel der Wellenlänge betragen. Die Details des Aufbaus sind in Abbildung 4 zu sehen.

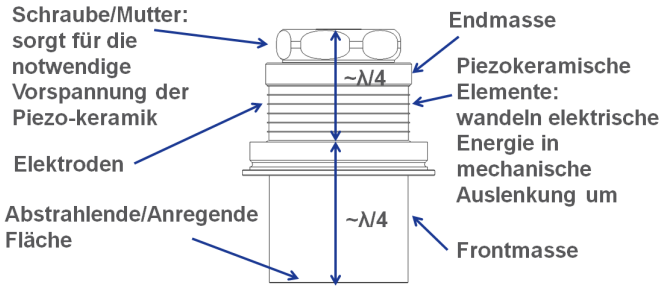

Abbildung 4: Aufbau eines typischen Stabschwingerkopfes.

Die Aufgabe des Stabschwingerkopfes ist eine möglichst effiziente Energieumwandlung von elektrischer Energie in Bewegungsenergie, wobei eine gleichmäßige longitudinale Schwingung der abstrahlenden Koppelfläche erzeugt werden soll. Da der Stabschwingerkopf mit einer sehr hohen elektrischen Leistung beaufschlagt wird (1-2kW sind üblich), ist es außerordentlich wichtig, die Verluste gering zu halten. Es müssen Piezokeramiken mit besonders niedrigen dielektrischen Verlusten verwendet werden. Wichtig ist es auch, die Anregung von ungewünschten Nebenesonanzen zu vermeiden, die zu Eigenschwingungen des Bolzens oder eines anderen Bauteils führen. Das Design des Stabschwingerkopfes muss auf die gewünschte Arbeitsfrequenz optimiert werden. Eine Anregung von Nebenresonanzen führt sehr schnell zur Zerstörung des Schwingers (Keramikbruch, Bolzenbruch, Risse in anderen Metallbauteilen etc.).

Mehrfrequente Stabschwinger: Entwicklung

Das Ziel der Entwicklung war es, einen Stabschwinger zu entwickeln, welcher auf zwei verschiedenen Frequenzen arbeiten kann und dabei jeweils eine vergleichbare akustische Leistung erzeugt, wie vergleichbare Stabschwinger für einzelne Frequenzen. Hierfür wurden Finite-Elemente-Simulationen mit dem Softwarepaket ANSYS durchgeführt. Zunächst wurde nach einer geeigneten Geometrie des Stabschwingerkopfes gesucht und anschließend nach einem passenden Stab.

Die Herausforderung bei der Entwicklung der Geometrie war es, neben der ersten longitudinalen Schwingungsmode eine zweite Schwingungsmode zu finden, bei der der maßgebliche Teil der Schwingung weiterhin in eine longitudinale Bewegung der abstrahlenden Fläche geht und das ohne dabei zu viele Verluste durch andere Schwingungskomponenten zu verursachen. Hierfür wurde der in Abbildung 4 gezeigte bekannte Aufbau entscheidend modifiziert. Die axialen Abmessungen der unteren (Frontmasse) und der oberen Teile (Keramikpaket und Endmasse) stehen nun im Verhältnis 2/3 und 1/3 zueinander. Während für die erste longitudinale Schwingungsmode der Durchmesser des Kopfes keine große Rolle spielt, hat er einen entscheidenden Einfluss auf die zweite Resonanzfrequenz. Daher wurde er entsprechend angepasst, um die gewünschte Frequenz zu erreichen. Die Form des Unterteiles wurde optimiert, um die Effizienz der zweiten Schwingungsmode zu steigern. Die Geometrie des resultierenden Stabschwingerkopfes, welcher bei 25 und 40kHz schwingt, ist in Abbildung 5 im Vergleich zu den typischen Geometrien der entsprechenden Stabschwinger für einzelne Frequenzen gezeigt. In Abbildung 6 ist die Form der beiden Schwingungsmoden des neuen Stabschwingerkopfes dargestellt.

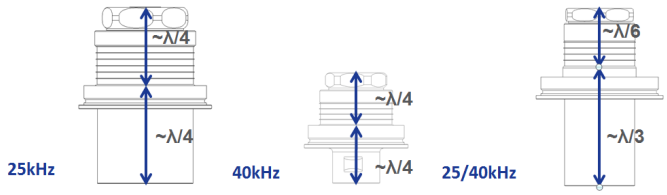

Abbildung 5: Aufbau des Stabschwingerkopfes des mehrfrequenten Stabschwingers im Vergleich zu den gängigen Köpfen von monofrequenten Stabschwingern.

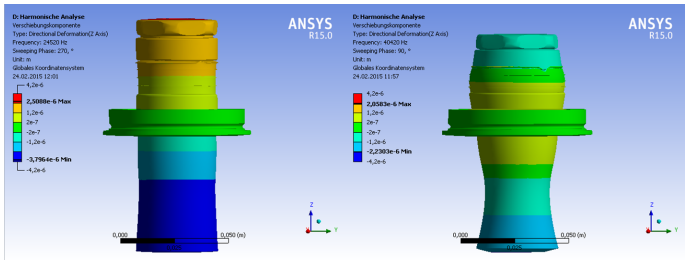

Abbildung 6: Die Form der beiden Schwingungsmoden des neuen Stabschwingerkopfes bei 25kHz (links) und 40kHz (rechts).

Im zweiten Schritt wurde in der Simulation nach einem passenden Stab gesucht. Die Aufgabe war es, die Geometrie des Stabes so zu gestalten, dass die Resonanzfrequenzen der jeweiligen sich auf dem Stab einstellenden Schwingungsmoden mit denen des Kopfes übereinstimmen. Besonders entscheidend war hierbei die Variation des Stabdurchmessers, wodurch der gewünschte Abstand zwischen den Resonanzen erreicht werden konnte. In Abbildung 7 ist die Geometrie des resulierenden Stabes im Vergleich zu den üblichen Geometrien der monofrequenten Stabschwinger gezeigt. Die Form der beiden Schwingungsmoden ist in Abbildung 8 dargestellt.

Prototyp

Um die Simulationsergebnisse zu verifizieren, wurde ein Prototyp des in den Simulationsrechnungen optimierten neuen Stabschwingers aufgebaut. Der Stabschwingerkopf

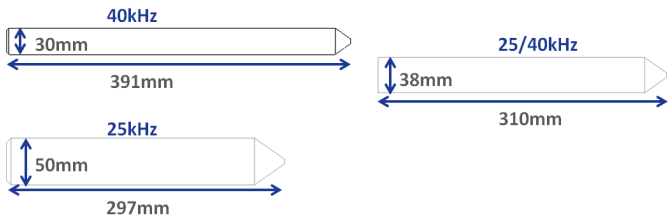

Abbildung 7: Geometrie des Stabes des mehrfrequenten Stabschwingers im Vergleich zu den gängigen Stäben von monofrequenten Stabschwingern.

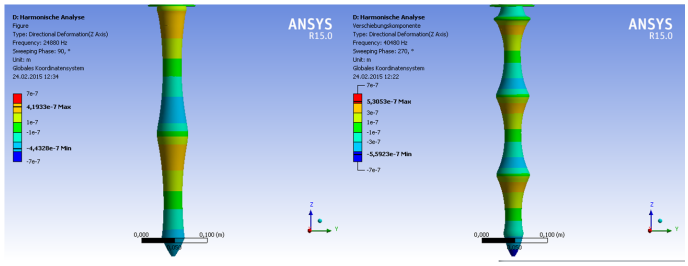

Abbildung 8: Die Form der beiden Schwingungsmoden des neuen Stabschwingers bei 25kHz (links) und 40kHz (rechts).

sowie der gesamte Stabschwinger sind in Abbildung 9 gezeigt.

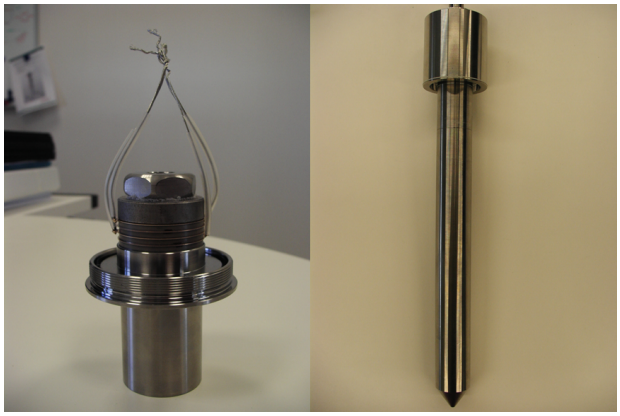

Abbildung 9: Prototyp: der Stabschwingerkopf (links) und kompletter Stabschwinger (rechts).

Zunächst wurden die Resonanzfrequenzen des Stabschwingerkopfes überprüft, hierfür wurde die elektrische Eingangsimpedanz über der Frequenz mit den Simulationsergebnissen verglichen. Als Ergebnis zeigte sich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation, die in Abbildung 10 zu sehen ist. Weiterhin wurde die Eingangsimpedanz des kompletten Stabschwingers gemessen. Das Ergebniss ist in Abbildung 11 dargestellt. Auch hier ergibt sich bei 25kHz und 40kHz eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation. Um die Leistungsfähigkeit und die Effizienz des Prototypen zu testen, wurde dieser mit entsprechenden Generatoren einem Dauerlauf in einem Wasserbad unterzogen. Dabei wurde festgestellt, dass der Stabschwinger bei beiden Frequenzen eine Leistung von ca. 600W im Dauerbetrieb liefert. Im Vergleich zu den üblichen Werten von monofrequenten Stabschwingern vergleichbarer Länge (25kHz 750W, 40kHz 450W) ist dies ein sehr gutes Ergebnis.

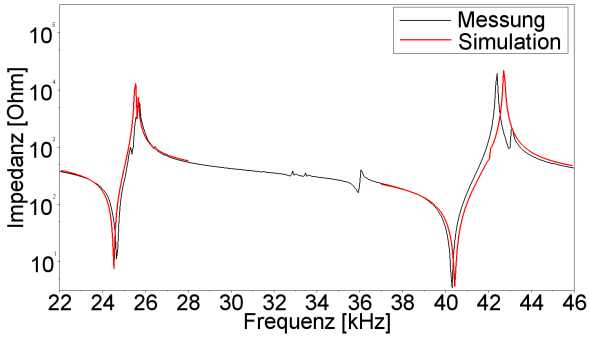

Abbildung 10: Der Betrag der elektrischen Impedanz über der Frequenz für den neuen Stabschwingerkopf. Die gemessene Kurve wird mit den Simulationen verglichen.

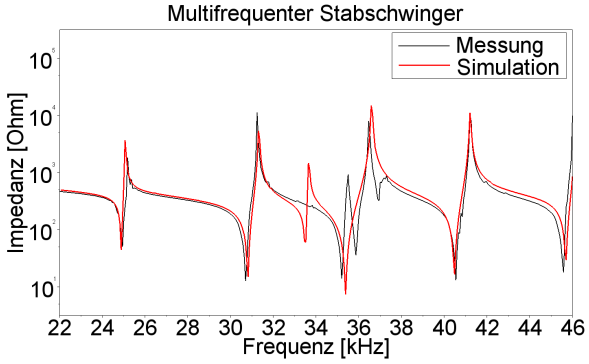

Abbildung 11: Der Betrag der elektrischen Impedanz über der Frequenz für den neuen Stabschwinger. Die gemessene Kurve wird mit den Simulationen verglichen.

Zusammenfassung und Ausblick

Stabschwinger bieten durch ihre mechanische Robustheit und Kompaktheit Vorteile für spezielle Anwendungen in der industriellen Reinigungs- und Prozesstechnik, bei denen der Einsatz von Tauchschwingern nur schwer möglich ist. Aufgrund ihres speziellen Designs gibt es bislang nur auf eine einzelne Arbeitsfrequenz optimierte Stabschwinger. Ein Mehrfrequenzstabschwinger bietet eine deutliche Platz- und Zeitersparnis und erhöht die Flexibilität der Reinigungsanlagen.

Ein zweifrequenter Stabschwinger wurde mit Hilfe von FEM-Simulationen entwickelt. Eine modifizierte Gestaltung des Stabschwingerkopfes war dabei notwendig, damit auch eine zweite Schwingungsmode generiert werden kann, die die Anforderungen an die abgegebene Leistung und die Effizienz eines typischen Stabschwingers erfüllen kann. Als Ergebnis konnte ein Stabschwinger mit zwei Arbeitsfrequenzen, 25kHz und 40kHz, entworfen werden. Zur Verifizierung der Simulation wurden Prototypen gefertigt und verschiedenen Tests unterzogen. Es zeigte sich eine sehr gute Übereinstimmung der Resonanzfrequenzen zwischen

Simulation und Messung. Anschließende Dauertests unter realistischen Einsatzbedingungen zeigten eine sehr zufriedenstellende Leistungsabgabe bei beiden Frequenzen, die mit üblichen monofrequenten Stabschwingern vergleichbar ist.

Das Ziel der weiteren Entwicklungsschritte ist eine weitere Erhöhung der maximal erzeugbaren Ultraschallleistung bei geringen internen Verlusten. Eine weitere Steigerung der abgestrahlten Schallleistung kann durch die Verwendung eines längeren Stabes erreicht werden, da sich dadurch die abstrahlende Fläche entsprechend vergrößert. Auch hier stehen noch Untersuchungen aus, um die maximal abgebbare Leistung zu ermitteln.

Danksagung

Wir bedanken uns beim Bundesministerium für Wirtschaft und Energie für die Unterstützung dieses Projektes im Rahmen des zentralen Innovationsprogrammes für den Mittelstand (ZIM). Förderkennzeichen EP140503.

Literatur

[1] Lin, S.: Study on the multifrequency Langevin ultrasonic transducer. Ultrasonics 33 (6) pp. 445-448, 1995

[2] Weber, D.: Ultrasonic Rod transducer. US 7,688,681, Patent, 2010