

Veröffentlichungen am IKFF



Piezoelektrische Wanderwellenmotoren für lineare Bewegungen

M. Hermann, W. Schinköthe (IKFF)

Beitrag zur

Tagung Innovative Kleinantriebe

9. - 10. Mai 1996

VDI - Berichte 1269 S. 301 - 314

© 1999 Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik

Piezoelektrische Wanderwellenmotoren für lineare Bewegungen

Dipl.-Ing. Martin Hermann, Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Schinköthe,
Stuttgart

Zusammenfassung

Wanderwellenmotoren sind als rotatorische Antriebe bekannt. Die Realisierung eines linearen Direktantriebes nach dem Prinzip des Wanderwellenmotors erfordert die Erzeugung einer Wanderwelle auf einem linearen Stator. Für einen geschlossenen Ringstator wird nachgewiesen, daß orthogonale Eigenformen existieren und eine Wanderwelle erzeugt werden kann. Mit der Methode der Finite Elemente werden in einer gekoppelten Feldberechnung mechanische und elektrische Eigenschaften des Stators bestimmt. Das Systemverhalten kann mittels Simulation über die meßtechnischen Möglichkeiten an Prototypen hinaus sehr detailliert untersucht werden.

1. Einleitung

In jüngster Vergangenheit wurden rotatorische Wanderwellenmotoren entwickelt, die besondere Eigenschaften wie hohes Antriebsmoment bei kleiner Baugröße, kleine Anlaufzeitkonstanten, hohe Positioniergenauigkeit und ein großes Haltemoment im stromlosen Zustand aufweisen. Diese Motoren finden mittlerweile Anwendung in feinwerktechnischen Großserienprodukten, z.B. in Autofokus-Objektiven.

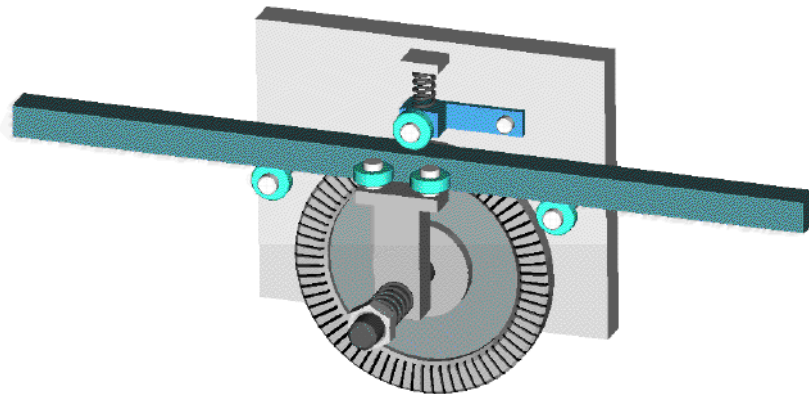
Viele antriebstechnische Aufgabenstellungen erfordern jedoch lineare Bewegungen. Es ist deshalb naheliegend, das Wirkprinzip des Wanderwellenmotors zur direkten Erzeugung linearer Bewegungen auszunutzen.

2. Lösungsansätze für lineare Wanderwellenantriebe

Im Vergleich zu den rotatorischen Motoren ist es nicht ohne weiteres möglich, auf einem linearen Stator eine Wanderwelle zu erzeugen. Wegen der geometrischen Begrenzungen treten Reflektionen und damit Überlagerungen zu stehenden Wellen auf.

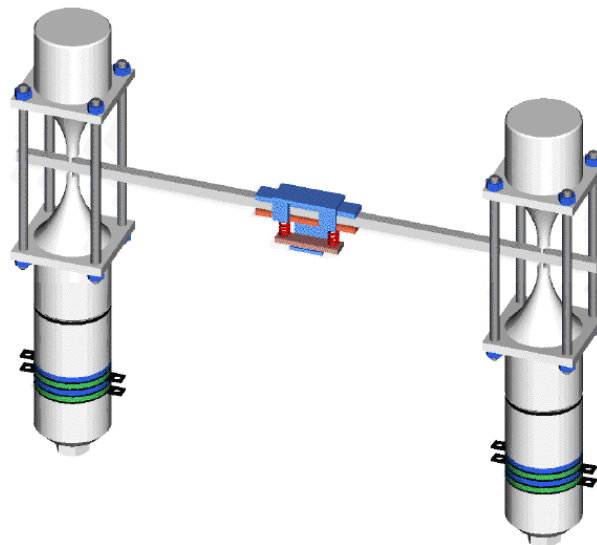
Eine mögliche Lösung ist, den Stator eines rotatorischen Motors zu benutzen und durch einen tangential angepreßten Stab als Läufer eine lineare Bewegung abzugreifen, Abb. 1. Nachteil einer solchen Anordnung ist, daß der Bewegungsbereich durch den Läufer verkörpert wird und

damit viel Masse bewegt werden muß. Außerdem neigt der Stab zu unerwünschten Schwingungen im hörbaren Spektrum, deren Ursache Querkraftkomponenten infolge der tangentialen Anpressung sind. Es müssen geeignete Maßnahmen zu deren Dämpfung vorgesehen werden.



Linearer Wanderwellenmotor mit tangentialem Bewegungsabgriff

Ein linearer Wanderwellenmotor mit einem Stab als Stator wurde in [1,2] untersucht, Abb. 2. Durch einen Stapelwandler wird nahe dem einen Ende des Stabes eine wandernde Biegewelle erregt, die durch den Stab läuft und bei Ankunft an einem zweiten identischen Stapelwandler von diesem absorbiert wird. Hierzu muß der empfangende Wandler in geeigneter Weise elektrisch beschaltet sein. Durch Vertauschen der Beschaltung beider Wandler kann die Bewegungsrichtung umgekehrt werden. In dem Stab läßt sich allerdings keine Resonanzerscheinung ausnutzen, da das Überlagern mehrerer Wellenzüge ja gerade vermieden werden muß. Für die erforderlichen Amplituden der laufenden Biegewelle müssen deshalb sehr leistungsstarke, groß bauende Stapelwandler eingesetzt werden.

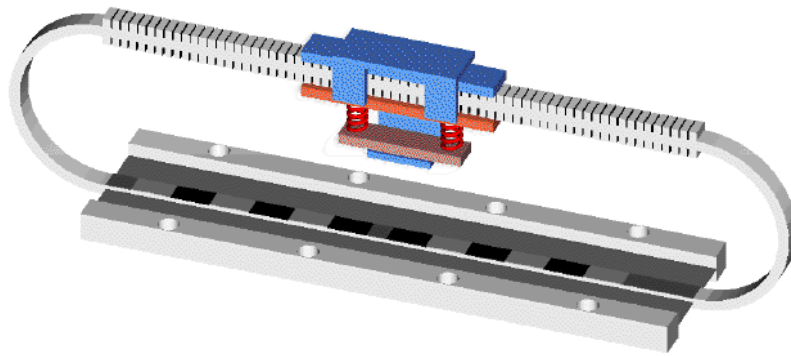


Linearer Wanderwellenmotor mit Stapelwandlern

Das Erzeugen einer Wanderwelle durch geeignete Überlagerung zweier stehen-

der Wellen, entsprechend den rotatorischen Motoren, kann auch in einer linearen Motorbauform ausgenutzt werden, falls die Wanderwelle auf einem in sich geschlossenen Statorring umlaufen kann. Für den linearen Bewegungsabgriff werden am Stator gerade Abschnitte vorgesehen, auf denen ein Läufer aufgesetzt wird, Abb. 3. Der Ringstator ist an zwei Membranen zu beiden Seiten des unteren Stababschnittes aufgehängt. Jede feste Einspannung direkt am Stator würde das Umlaufen einer Wanderwelle unmöglich machen.

Natürlich kann die in Abb. 3 gezeigte Anordnung variiert werden. So muß z.B. der Läufer auf den geraden Abschnitt nicht umgreifend aufgesetzt werden, sondern kann auch nur einseitig von oben angedrückt



Linearer Wanderwellenmotor mit Ringstator

werden. Eine solche An-

ordnung kann kinematisch umgekehrt werden, d.h. der Statorring kann selbst als Läufer dienen und auf eine gerade, feststehende Führung angepreßt werden. Die in Abb.3 gewählte Anordnung hat den Vorteil, daß durch die beidseitige Anpressung des Läufers an den Stator die Vorschubkraft vergrößert wird und gleichzeitig keine Durchbiegung des Stators erfolgt. Zur Vergrößerung der Bewegungskomponente in Antriebsrichtung trägt der lineare Stababschnitt der Abtriebsseite eine Verzahnung.

Die Gestaltung eines solchen linearen Wanderwellenmotors erfordert aufwendige Berechnungen, z.B. der Eigenfrequenzen und Eigenformen. Berechnungsmethoden, Grenzen für die Auslegung und Fragen der geometrischen Gestaltung sollen deshalb der Schwerpunkt nachfolgender Darstellungen sein. Es soll die prinzipielle Vorgehensweise an die Aufgabenstellung verdeutlicht und die Realisierbarkeit linearer Wanderwellenmotoren nachgewiesen werden.

3. Untersuchung eines linearen Wanderwellenmotors mit Ringstator

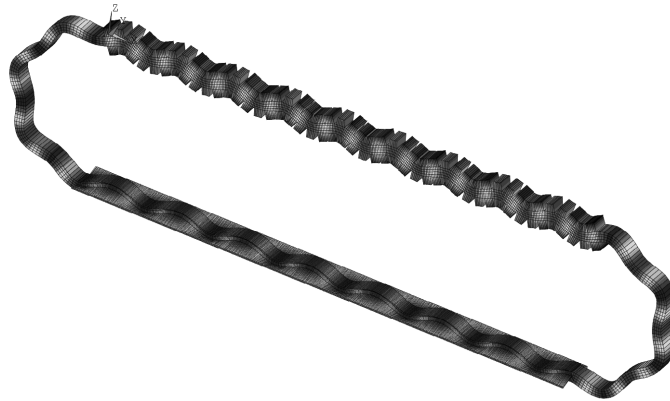
Für die Realisierung des linearen Wanderwellenmotors mit Ringstator muß zuerst geklärt werden, ob orthogonale Eigenformen existieren, die mit Piezokeramikelementen angeregt und zu einer Wanderwelle überlagert werden können. Wegen der komplexen Geometrie des Stators wird zur Bestimmung der Eigenformen die Finite Elemente Methode (FEM) angewendet. Durch Berücksichtigung des piezoelektrischen Effektes in Form einer gekoppelten Feldberechnung können zusätzlich die elektromechanischen Eigenschaften des Stators untersucht werden.

3.1 Modalanalyse

In das FEM-Modell werden die alternierend polarisierten Piezokeramik-elemente auf der Innenseite des Ringstators (Abb. 3) als aktives Piezomaterial integriert und jeweils beide Elektroden auf Potential 0V gesetzt.

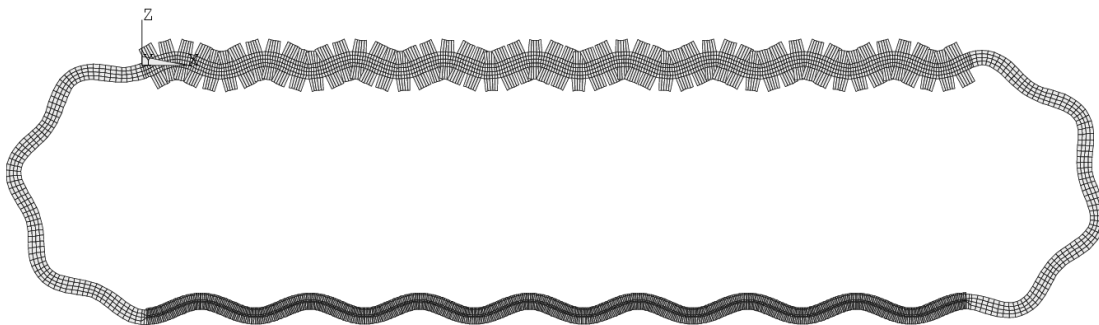
Die berechneten Eigen-

frequenzen entsprechen den Serienresonanzfrequenzen des elektromechanischen Wandlers, zumal die mechanische Dämpfung nicht berücksichtigt wird. Eine typische Biegeeigenform ist in Abb. 4 dargestellt. Als mechanische Randbedingung ist das Modell an den äußeren Kanten der Membrane fest

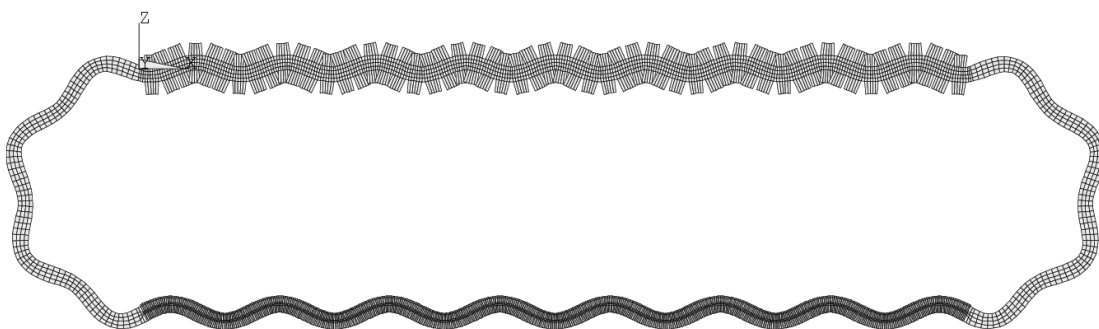


Eigenform Nr. 97 zur Eigenfrequenz 50999.752 Hz

Biegeeigenform Ringstator



Eigenform Nr. 97 zur Eigenfrequenz 50999.752 Hz



Eigenform Nr. 98 zur Eigenfrequenz 51002.8006 Hz

eingespannt. Das Ergebnis der Simulation zeigt, daß auch bei dem nicht rotationssymmetrischen Ringstator mit geraden Abschnitten orthogonale Biegeeigenformen auftreten, Abb 5. Bei der unteren Eigenform Nr.98 fällt die Symmetrie zur vertikalen Mittellinie (z-Richtung) auf. Die obere Eigenform Nr. 97 ist um eine viertel Wellenlänge verschoben. Es ergibt sich Punktsymmetrie der Eigenform zum Mittelpunkt des Statorrings, wenn man von den Unregelmäßigkeiten durch die Einspannung, die Piezoelemente und die Zähne auf dem oberen geraden Stab absieht. Für die untersuchte Geometrie ist es jedoch nicht selbstverständlich, daß die orthogonalen Eigenformen wie bei rotationssymmetrischen Statorn degenerieren, d.h. bei einer einzigen Eigenfrequenz auftreten. Eine ideale Wanderwelle entsteht allerdings nur für Eigenformpaare mit einer einzigen Eigenfrequenz. Für bestimmte Geometrien erhält man auch beim Ringstator degenerierte Eigenformen; z.B. durch Variation des Verhältnisses des Kreisringdurchmessers zur Länge der geraden Stababschnitte bei festgelegten Materialparametern. Masse- und Steifigkeitsverteilungen beider Eigenformen ergeben dieselbe modale Masse und modale Federsteifigkeit und damit dieselbe Eigenfrequenz. Die gezeigten Eigenformen in Abb. 5 sind ein solch degeneriertes Paar; die berechneten Eigenfrequenzen differieren nur um 0,006%.

3.2 Bestimmung des Kopplungsfaktors

Durch die Berücksichtigung der piezoelektrischen Anregung im FEM-Modell kann der Grad der elektromechanischen Wandlung in Form des effektiven Kopplungsfaktors bestimmt werden:

$$k_{eff} = \sqrt{\frac{f_p^2 - f_s^2}{f_p^2}} \quad (1)$$

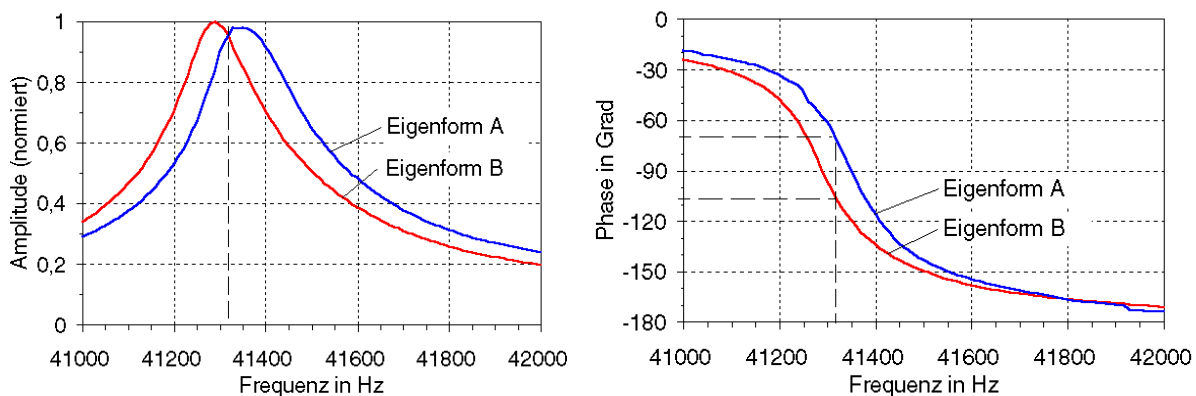
	f_s in Hz	f_p in Hz	k_{eff} in %
Eigenform Nr. 97	50999,75	51037,91	3,87
Eigenform Nr. 98	51002,80	51043,49	3,99

Tab. 1: Kopplungsfaktoren

Neben den bereits im vorausgehenden Abschnitt bestimmten Serienresonanzfrequenzen f_s müssen wie aus Gl. 1 ersichtlich noch die Parallelresonanzfrequenzen f_p berechnet werden. Hierzu wird eine zweite Modalanalyse durchgeführt, bei der die Masselektrode an der Berührfläche der Piezoelemente zum Metallring auf 0V gelegt und alle anderen Elektroden offen gelassen werden, so daß sich die elektrischen Ladungen nicht mehr ausgleichen können. Tabelle 1 zeigt eine Zusammenfassung der Ergebnisse.

3.3 Erzeugung der Wanderwelle im Ringstator

Mittels Simulation kann überprüft werden, ob für eine Statorgeometrie eine reine Wanderwelle entsteht. In [3] sind die Bedingungen für die Überlagerung zweier stehender Wellen zu einer Wanderwelle beschrieben. Eine reine Wanderwelle zeichnet sich dadurch aus, daß alle Oberflächenpunkte des Ringstators dieselbe elliptische Trajektorie durchlaufen. Werden die beiden orthogonalen Eigenformen nicht gleich stark angeregt, d.h zwei stehende Wellen mit unterschiedlicher Amplitude erzeugt, so sind die elliptischen Bahnkurven der Oberflächenpunkte unterschiedlich. Die Hauptachsen der Ellipsen verschiedener Punkte werden unterschiedlich groß und neigen sich in ihrer Lage. Dies wird durch ungleiche Eigenfrequenzen der beiden Eigenformen verursacht. Der an einem Prototypen gemessene Amplitudenfrequenzgang eines Eigenformpaares mit Frequenzdifferenz in Abb. 6 zeigt, daß



Amplitudenfrequenzgang eines Eigenformpaares mit Frequenzdifferenz Phasenfrequenzgang eines Eigenformpaares mit Frequenzdifferenz

die Amplituden beider stehender Wellen (Eigenformen) nur für den Schnittpunkt der beiden Kurven identisch sind. Die Amplitudenunterschiede in der Umgebung des Schnittpunktes sind meistens, je nach Frequenzdifferenz, nicht allzu groß.

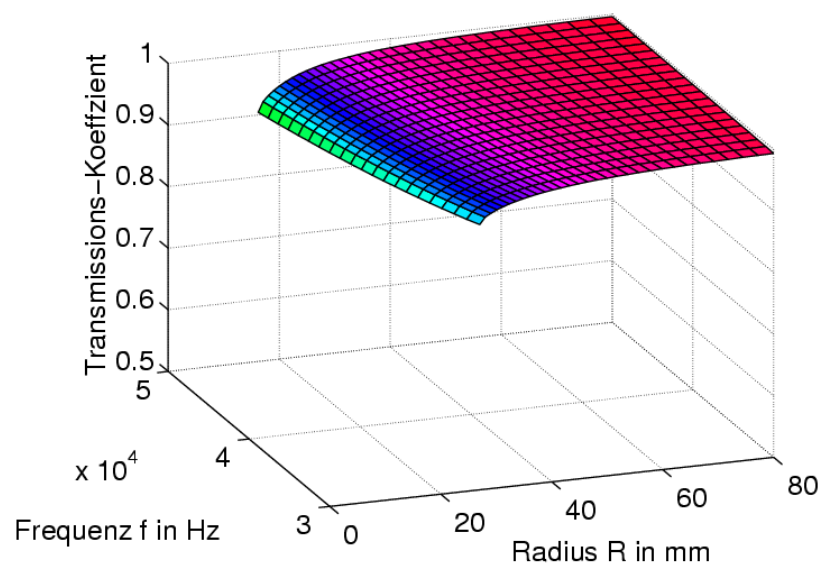
Die elliptischen Trajektorien schwanken in gleicher Weise, falls der Phasengang der beiden Eigenformen nicht identisch ist. Dies trifft für ein Eigenformpaar mit Frequenzdifferenz stets zu, Abb. 7. Bei Anregung beider Eigenformen mit derselben Frequenz tritt eine Phasendifferenz auf, die sich der örtlichen Phasenbedingung für eine ideale Wanderwelle [3] überlagert. Da für den Stator eines Wanderwellenmotors kleine Verluste und folglich kleine Dämpfungswerte angestrebt werden, verlaufen die Phasenübergänge sehr steil. Die Phasendifferenz und damit der Einfluß auf die elliptischen Bahnkurven ist deshalb in der Regel größer als der Einfluß durch die unterschiedlichen Amplitudenfrequenzgänge.

Beim Bau eines Wanderwellenmotors kann eine kleine Frequenzdifferenz hingenommen werden, weil der Stator durch das Anpressen des Rotors zusätzlich bedämpft wird und die Amplituden- und Phasendifferenzen kleiner werden.

Auf die Entstehung einer idealen Wanderwelle hat außerdem Einfluß, ob sich benachbarte Eigenformen mit dem Biegeeigenformpaar überlagern. Die Anregung einer benachbarten longitudinalen Eigenform hat ebenfalls Schwankungen der elliptischen Bahnkurven zur Folge.

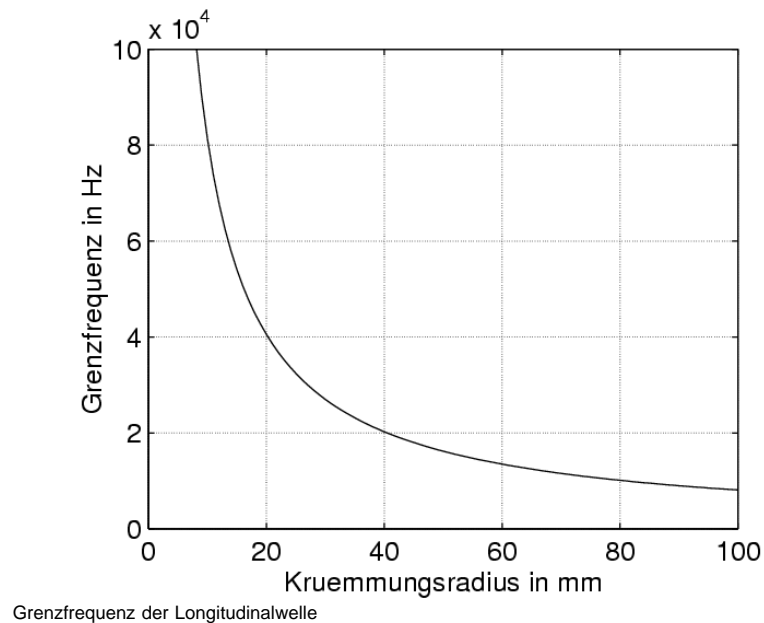
Für den Aufbau eines linearen Wanderwellenmotors nach Abb. 3 interessiert, wie eng der Kreisbogen gewählt werden kann. Da dieser nur zum Leiten der Wanderwelle dient ist ein möglichst kleiner Radius wegen des geringeren Platzbedarfs erstrebenswert. Der Kreisbogen kann allerdings nicht beliebig klein gewählt werden, da sich mit kleiner werdendem Radius die Biegesteifigkeit zunehmend ändert. Die Biegespannungen verlaufen nicht mehr linear sondern hyperbolisch über dem Querschnitt und die neutrale Faser verlagert sich hin zum Krümmungskreismittelpunkt. An den Übergängen zwischen geraden Stababschnitten und Kreisbögen treten Diskontinuitäten auf, die eine Reflektion der umlaufenden Wanderwelle bewirken. Dadurch sind die elliptischen Trajektorien ebenfalls nicht für alle Oberflächenpunkte identisch. Um den Einfluß des Krümmungsradius der Kreisbögen auf die Wanderwelle abschätzen zu können, kann eine Transmissions-/Reflektionsanalyse durchgeführt werden. Eine solche Analysetechnik ist aus der Mikrowellentechnik bekannt und wurde in [4] auf mechanische Wellenausbreitungsprobleme bei der Untersuchung großer Strukturen für die Raumfahrt angewendet. Ausgehend von den gekoppelten Differentialgleichungen zur Beschreibung der Wellenausbreitung in geraden und gekrümmten Balken, die z.B. in [5] angegeben sind, erhält man für den Grad der Transmission einer wandernden Biegewelle beim Übergang vom geraden Stab in den Kreisbogen das Diagramm in Abb. 8. Es wurden die Materialien und Geometrie des Ringstators zugrunde gelegt.

Schon für relativ große Radien zwischen 40 und 60 mm beginnt der Betrag des Transmissionskoeffizienten kleiner 1 zu werden. Die Wanderwelle wird zu einem Teil reflektiert. Bei höheren Frequenzen tritt die Reflexion erst bei kleineren



Transmissions der Biegewelle in den Kreisbogen (Betrag)

Radien auf. Ein wichtiges Ergebnis der Analyse ist die untere Grenze des Krümmungsradius. Im Diagramm entspricht sie dem linken Rand der dreidimensionalen Fläche. An dieser Linie ist für den zugehörigen Radius die Grenzfrequenz der Ausbreitung einer Longitudinalwelle im Kreisbogen erreicht. Bei Kombinati-

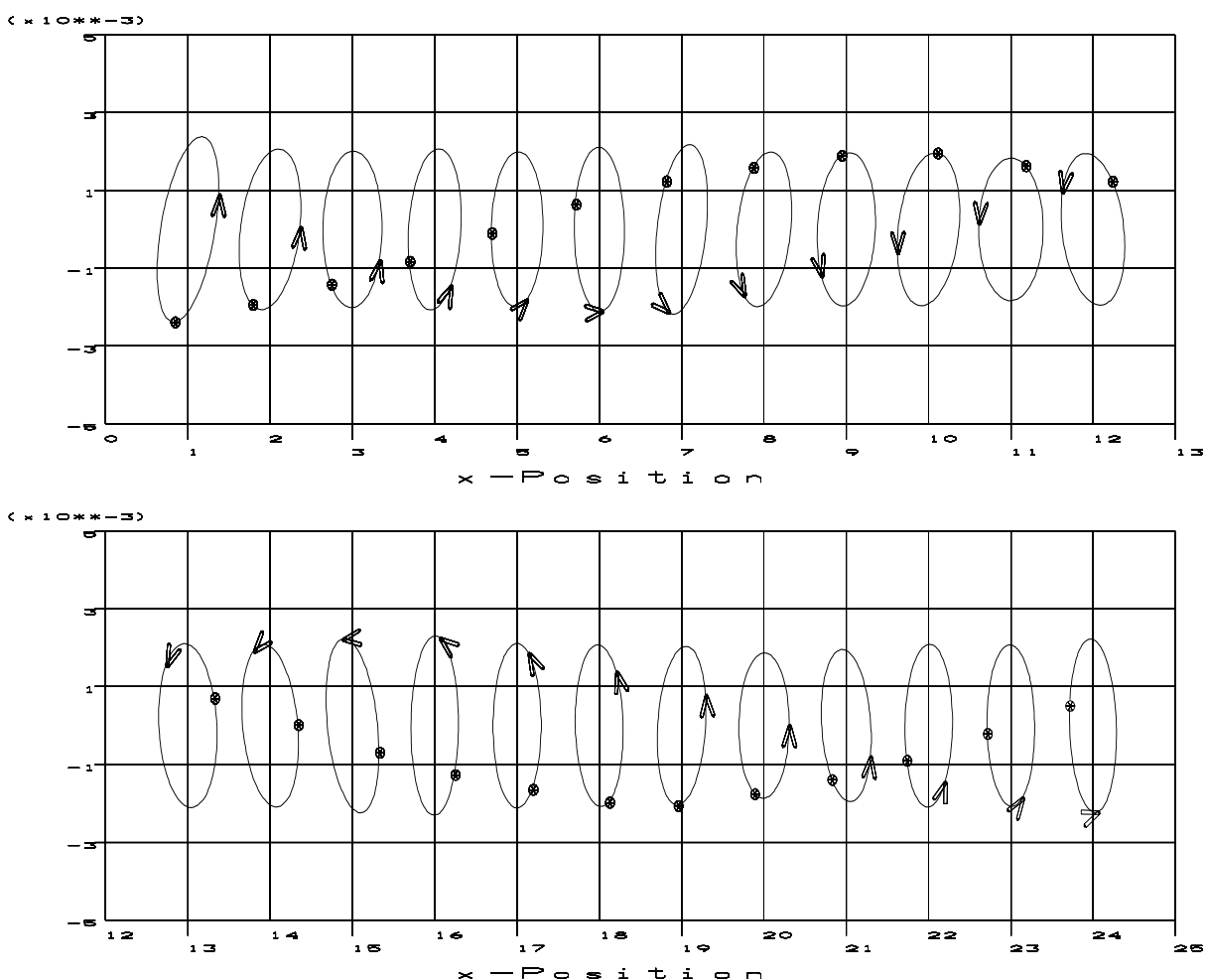


onen von Frequenz und Radius, die in Abb. 9 unterhalb der Grenzfrequenzkurve liegen, kann im Kreisbogen keine Longitudinalwelle mehr fortschreiten. Im Gegensatz zum geraden Stab existiert im Kreisbogen eine Kopplung zwischen Biegewelle und Longitudinalwelle. Tritt eine wandernde Biegewelle vom geraden Stab in den Kreisbogen über, so entsteht aus einem Teil der Biegewelle eine fortschreitende Longitudinalwelle. Ist nun für die Ausbreitung der Longitudinalwelle die Grenzfrequenz erreicht, kann diese Kopplung so nicht mehr stattfinden. Unter diesen Umständen ist es nicht mehr möglich, eine reine wandernde Biegewelle im Ringstator zu erzeugen.

Die Ergebnisse der Transmissions-/Reflektionsanalyse erlauben allerdings keine Aussage darüber, für welchen Radius oberhalb der Grenzfrequenz noch mit einer für die Anwendung ausreichend reinen Wanderwelle zu rechnen ist. Für einen unendlichen Krümmungsradius würden keine Reflektionen auftreten. Inwiefern die teilweise Reflektion der Wanderwelle für Radien zwischen ∞ und dem Radius bei der Grenzfrequenz zu überlagerten stehenden Wellen führt, hängt unter anderem von der Dämpfung des Systems ab.

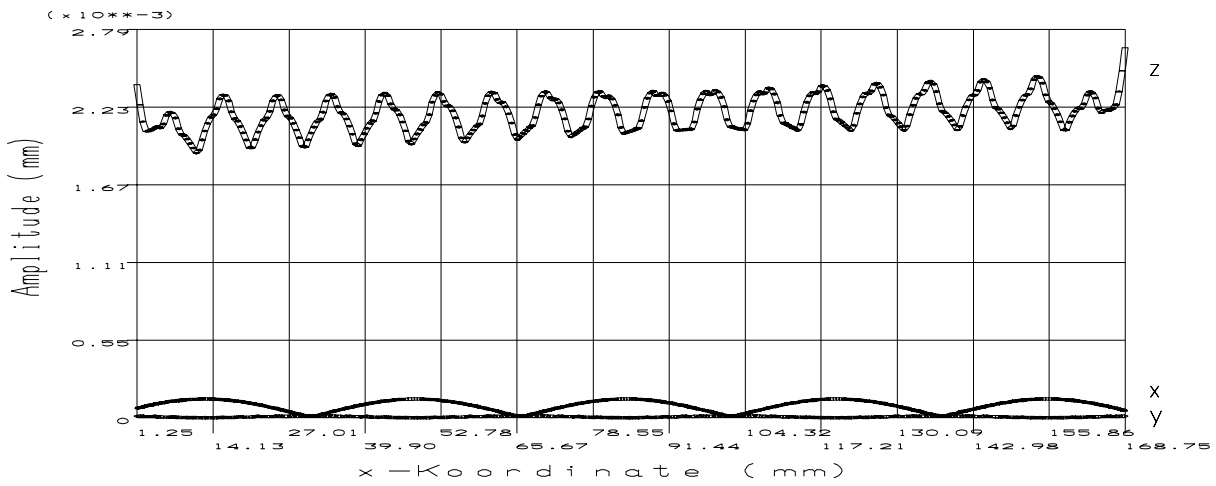
Für eine ausgewählte Geometrie kann durch Simulation die erzeugte Wanderwelle überprüft werden. In Abschnitt 3.1 wurde für einen Stator aus Aluminium mit Krümmungsradius 25mm und einer Länge der geraden Abschnitte von 170 mm ein degeniertes Eigenformpaar (Abb. 5) gefunden. Die beiden Eigenformen besitzen dieselbe Eigenfrequenz und damit einen identischen Amplituden- und Phasenfrequenzgang. Die Piezokeramik auf der Innenseite des unteren geraden Stabes lassen sich in zwei Anregungsbereiche unterteilen. Beide Anregungsbereiche bestehen aus sechs alternierend polarisierten Piezoelementen, die jeweils eine halbe Biegewellenlänge lang sind. Jeder der beiden Bereiche regt eine der orthogonalen

Eigenformen an. Die Anpassung der Position der Piezoelemente jedes Bereiches an eine Eigenform, dergestalt, daß die Piezoelemente genau zwischen zwei Knoten der zugehörigen Biegeeigenform liegen, gewährleistet eine gleiche Anregung beider Bereiche. Ein nicht kontaktiertes Piezoelement zwischen den beiden Anregungsbereichen entspricht in seiner Länge genau der Verschiebung der beiden Eigenformen infolge ihrer Orthogonalität um eine viertel Wellenlänge. In einer harmonischen Analyse wird an beide Anregungsbereiche eine sinusförmige Spannung von 80V angelegt, wobei die beiden Spannungen zeitlich um 90° phasenverschoben sind. Die FEM-Berechnung ermittelt das Ergebnis für den einge-



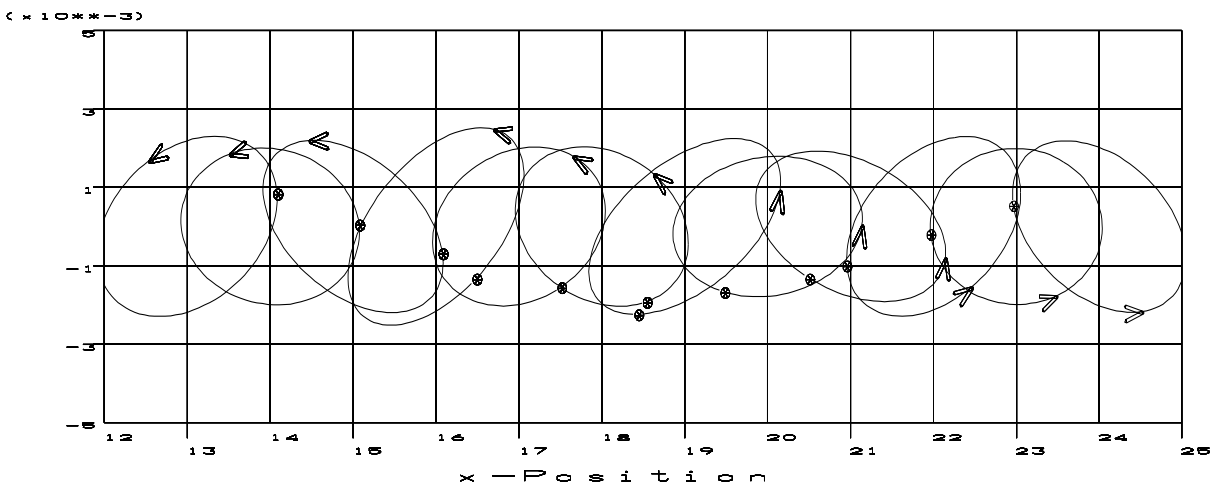
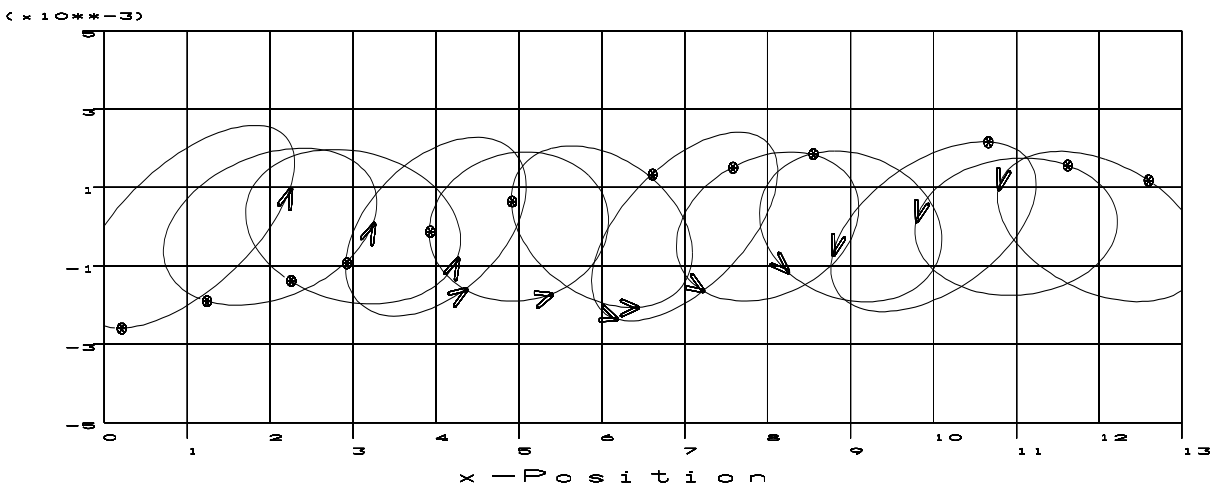
Trajektorien von Punkten im Zahngrund des geraden Abschnitts ($f = 51001,3 \text{ Hz}$)

schwungenen Zustand. Die Analyse der Bewegungsbahnen der Oberflächenpunkte im oberen geraden Abschnitt des Ringstators erlaubt eine Aussage über die erzeugte Wanderwelle. In Abb. 10 sind die Trajektorien der Punkte in Höhe des Zahngrundes, ausgehend vom linken



Darstellung der Auslenkungsamplituden für Punkte in der neutralen Faser des oberen geraden Abschnitts ($f = 51001,3 \text{ Hz}$)

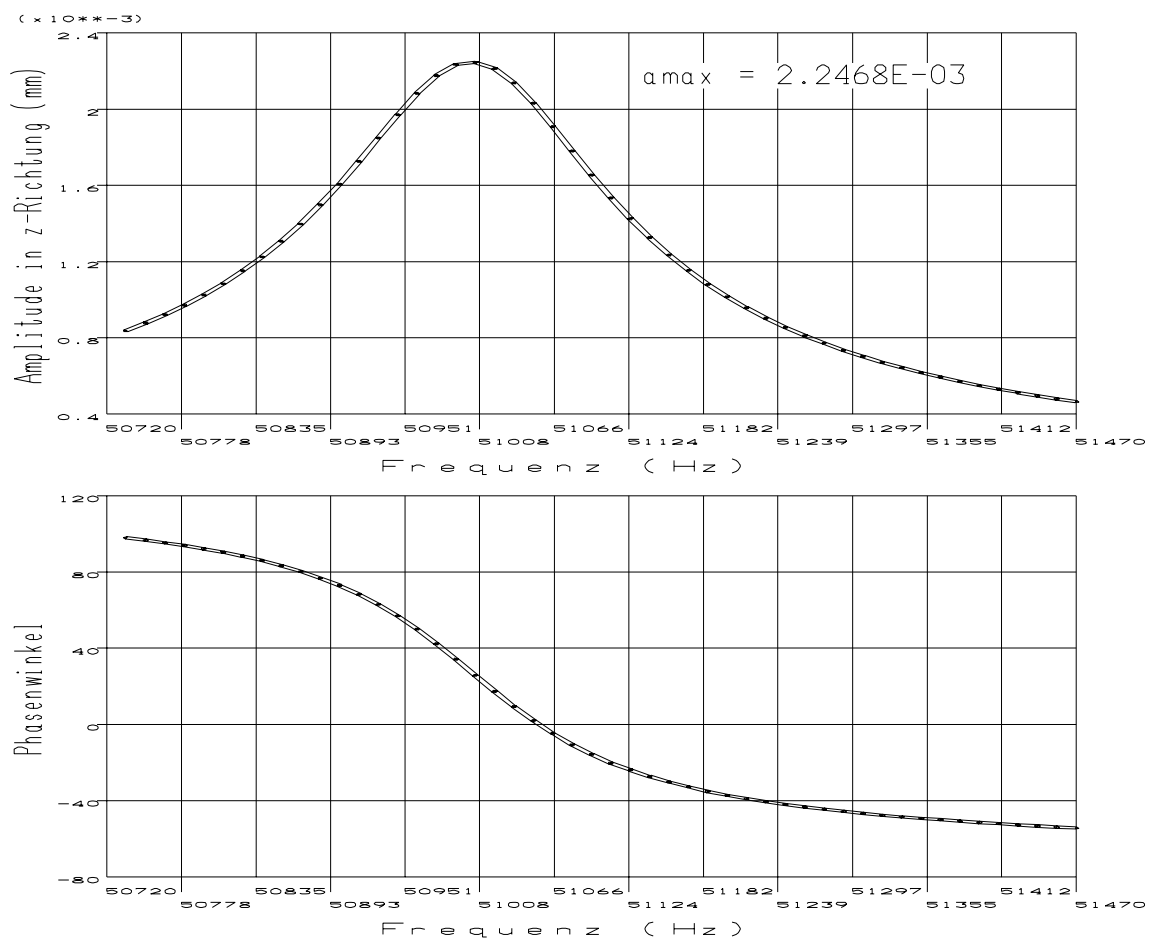
Rand des oberen geraden Abschnitts, für eine Wellenlänge dargestellt.



Trajektorien der Oberflächenpunkte im geraden Abschnitt

Trotz kleinerer Schwankungen der Amplitude und der Lage der Ellipsen hat sich eine annähernd ideale Wanderwelle ausgebildet. Da das Eigenformpaar keinen Frequenzunterschied aufweist kann die Unregelmäßigkeit nur durch Reflektion der Wanderwelle beim Übergang in die Kreisbögen oder die unerwünschte Anregung einer benachbarten Eigenform entstehen. Abb. 11 zeigt die Amplituden der Auslenkungen für Punkte in der neutralen Faser des oberen geraden Stabes. Es ist eine sehr kleine Auslenkung in x-Richtung, also eine schwache Longitudinalschwingung, zu erkennen.

Für die Antriebswirkung ist die Auslenkung der Berührungspunkte in x-Richtung interessant. Die Trajektorien der zu Abb. 10 entsprechenden Oberflächenpunkte der Zähne sind in Abb. 12 wiedergegeben. Man sieht, daß die x-Komponente der Auslenkungen etwa die Größenordnung der transversalen Auslenkung (z-Richtung) erreicht. Die Zähne erfüllen also ihre Aufgabe die Bewegungskomponente in Antriebsrichtung zu vergrößern. Eine unterschiedliche Verformung der einzelnen Zähne bewirkt die Schwankung in der Ausrichtung der Ellipsen.

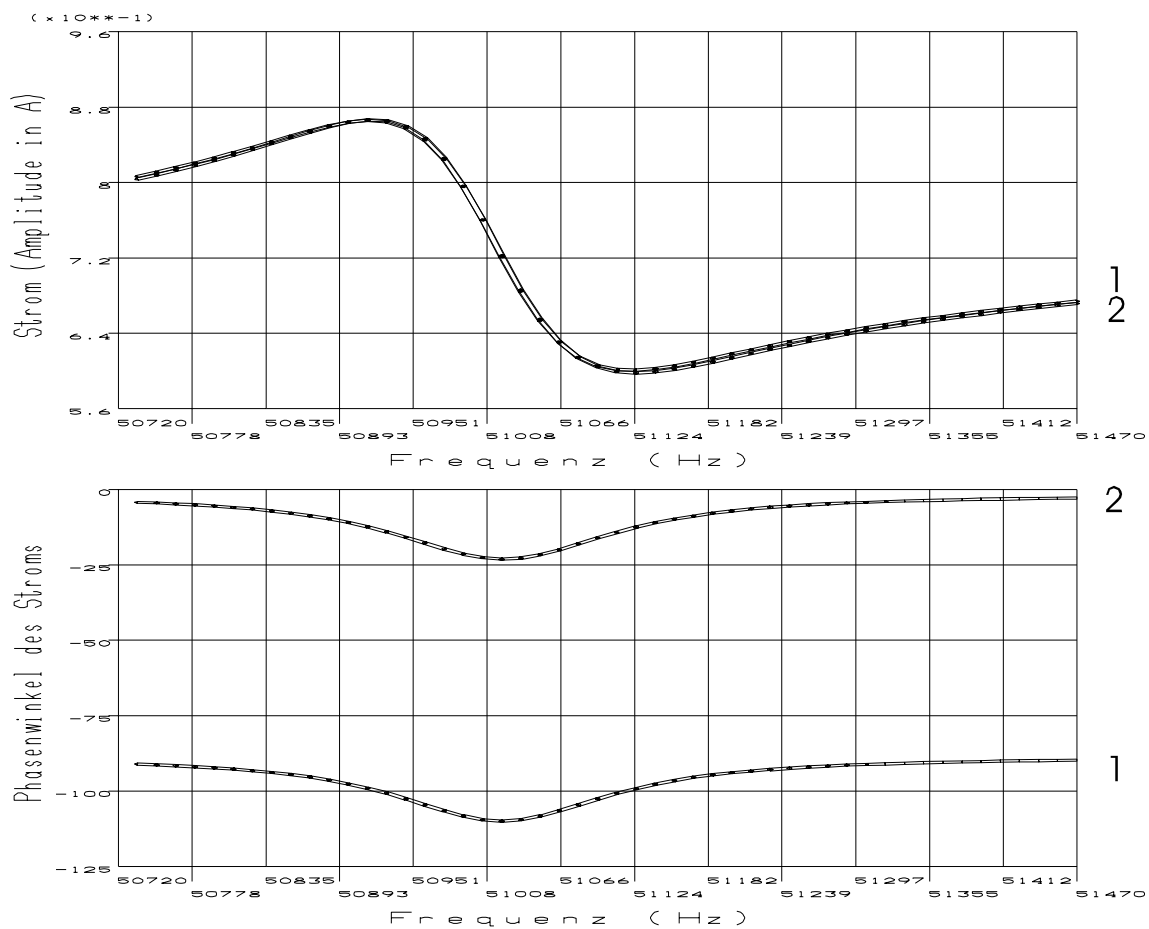


Amplitudenfrequenzgang der Wanderwelle bei 80V Anregespannung

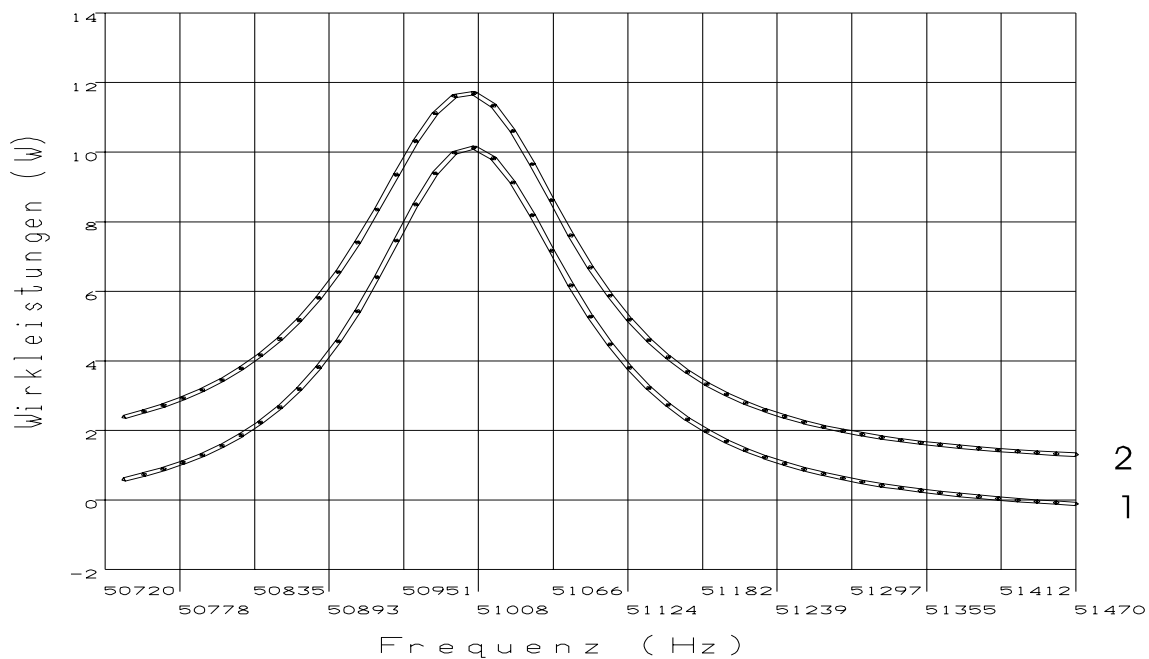
3.4 Frequenzganganalyse des Ringstators

Mit einer zusätzlichen Frequenzganganalyse läßt sich die Frequenzabhängigkeit von mechanischen und elektrischen Größen untersuchen. Die Resonanzkurve der erzeugten Wanderwelle zeigt Abb. 13.

Die gekoppelte piezoelektrisch-mechanische Feldberechnung ergibt außerdem den vom Stator aufgenommenen Strom, Abb. 14. Es sind die Verläufe für beide Anregungsbereiche (1,2) dargestellt. Am Phasenverlauf erkennt man, daß sich der Stator infolge der Piezokeramik-elemente unterhalb der Resonanz kapazitiv verhält, an der Resonanzstelle induktive Einflüsse auftreten und der Wandler oberhalb der Resonanz wieder rein kapazitives Verhalten zeigt. Aus Strom und vorgegebener Anregespannung können dann die aufgenommene elektrische Scheinleistung und deren Wirk- und Blindanteile bestimmt werden. Abb. 15 stellt die in den Stator fließende Wirkleistung dar. Damit kann abgeschätzt werden, welche Leistung die Ansteuerschaltung aufbringen muß, wenn die kapazitive Blindleistung durch eine parallelgeschaltene Induktivität kompensiert wird. Die unterschiedliche Amplitude der Kurven ist auf



Frequenzgang des aufgenommenen Stroms beider Anregungsbereiche



Frequenzgang der Wirkleistung für die beiden Anregungsbereiche

eine nicht ganz exakte Anpassung der Piezoelemente an die Biegeeigenformen zurückzuführen. Durch die Diskretisierung in Finite Elemente ergeben sich Nulldurchgänge der Biegeeigenformen, die nicht notwendigerweise mit den Elementgrenzen zusammenfallen. Die Modellierung der Polarisationsübergänge benachbarter Piezokeramikelemente kann ebenfalls nur an den Elementgrenzen erfolgen. Somit liegen die einzelnen Piezoelemente nicht völlig exakt zwischen den Nulldurchgängen der Biegeeigenformen. Da die beiden Anregungsbereiche an verschiedene Eigenformen angepaßt werden und diese Anpassung aus genannten Gründen für beide Eigenformen unterschiedlich genau sein kann, ergibt sich der gezeigte Unterschied.

4. Ausblick

In der vorliegenden Darstellung wurde gezeigt, daß das von rotatorischen Ultraschallmotoren bekannte Prinzip der Bewegungserzeugung mit einer Wanderwelle auch auf einen linearen Antrieb übertragen werden kann. Es wurden bereits funktionierende Prototypen aufgebaut, die das beschriebene Prinzip mit Ringstator umsetzen. Momentan wird an einer Verbesserung der Parameter des linearen Wanderwellenmotors gearbeitet.

Literatur

- [1] KURIBAYASHI, M., UEHA, S., MORI, E.: Excitation conditions of flexural traveling waves for a reversible ultrasonic linear motor. J. Acoust. Soc. Am., Vol. 77, No. 4, April 1985.
- [2] KUROSAWA, M., UEHA, S.: High speed ultrasonic linear motor with high transmission efficiency. Manuscript for Ultrasonics.
- [3] FRÖSCHLE, A.: Analyse eines Piezo-Wanderwellenmotors, Dissertation, Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik. Universität Stuttgart, 1992.
- [4] VON FLOTOW, A. H.: Disturbance propagation in structural networks; control of large space structures. PhD Dissertation, Stanford University, 1984.
- [5] GRAFF, K. F. : Elastic Wave Propagation in a Curved Sonic Transmission Line, IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics, Vol. Su-17, No. 1, 1970.

Neue Telefon- und Telefaxnummer:

Telefon: +49 (0)711 685 – 6 6402

Telefax: +49 (0)711 685 – 6 6356

Neue E-Mail-Adressen:

ikff@ikff.uni-stuttgart.de

linearantriebe@ikff.uni-stuttgart.de

piezoantriebe@ikff.uni-stuttgart.de

spritzguss@ikff.uni-stuttgart.de

zuverlaessigkeit@ikff.uni-stuttgart.de