

***Forschungsberichte***

---



***Band 164***

***Jürgen Höppner***

***Verfahren zur berührungslosen  
Handhabung mittels  
leistungsstarker Schallwandler***

---

***herausgegeben von  
Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart***

---

***Herbert Utz Verlag***



# Forschungsberichte iwb

Berichte aus dem Institut für Werkzeugmaschinen  
und Betriebswissenschaften  
der Technischen Universität München

herausgegeben von

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart  
Technische Universität München  
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb)

<p>Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme Ein Titeldatensatz für diese Publikation ist bei Der Deutschen Bibliothek erhältlich</p>
--

Zugleich: Dissertation, München, Techn. Univ., 2002

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwendung, vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH 2002

ISBN 3-8316-0125-9

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München  
Tel.: 089/277791-00 · Fax: 089/277791-01

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Abkürzungen und Formelzeichen</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Einleitung und Motivation</b>	<b>9</b>
<b>3</b>	<b>Definition des Betrachtungsbereichs</b>	<b>13</b>
<b>4</b>	<b>Stand der Technik</b>	<b>17</b>
4.1	Nutzung stehender Wellen . . . . .	17
4.2	Nutzung der Kräfte nahe oberhalb schwingender Strukturen . . . . .	21
4.3	Zusammenfassung und Defizite . . . . .	24
<b>5</b>	<b>Zielsetzung und Vorgehensweise</b>	<b>27</b>
<b>6</b>	<b>Die Stehwellenlevitation</b>	<b>29</b>
6.1	Grundlagen der Akustik . . . . .	30
6.1.1	Fundamentalgleichungen der linearen Akustik . . . . .	30
6.1.2	Beschreibung ebener harmonischer Wellen . . . . .	37
6.1.3	Energiegrößen des Schallfeldes . . . . .	41
6.1.4	Strahlungsdruck und Impuls . . . . .	42
6.2	Stehende Wellen . . . . .	47
6.2.1	Beschreibung von Stehwellenfeldern . . . . .	48
6.2.2	Die akustischen Leitungsgleichungen . . . . .	51
6.3	Aufbau und Auslegung akustischer Positionierer . . . . .	54
6.3.1	Aufbau und Funktionsweise . . . . .	54
6.3.2	Abschätzung der axialen Positionierkräfte . . . . .	56
6.3.3	Wahl der optimalen Arbeitsfrequenz . . . . .	61
6.3.4	Auslegung der Wandleramplitude . . . . .	62
6.3.5	Abschätzung der radialen Positionierkräfte . . . . .	64
6.3.6	Auslegungsbeispiel . . . . .	66
6.4	Gültigkeitsbereich und Ausblick . . . . .	70
<b>7</b>	<b>Die Squeeze-filmlevitation</b>	<b>77</b>
7.1	Phänomenologie und Abgrenzung zur Akustik . . . . .	78
7.2	Physikalische Modellbildung . . . . .	82
7.2.1	Zyklische adiabate Kompression und Dilatation . . . . .	82
7.2.2	Die Poiseuille-Strömung . . . . .	86
7.2.3	Die Reynolds-Differentialgleichung . . . . .	91
7.3	Berechnung und Simulation . . . . .	100
7.3.1	Berechnungsmethoden und -werkzeuge . . . . .	101

7.3.2	Ortsdiskretisierung der Reynolds-Gleichung . . . . .	102
7.3.3	Diskussion und Interpretation der Simulationsergebnisse . . .	105
7.3.4	Umsetzungsbeispiel - Bestimmung eines Traglastprofils . . . .	108
7.4	Gültigkeitsbereich und Ausblick . . . . .	110
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>113</b>
<b>9</b>	<b>Literatur</b>	<b>115</b>

## 2 Einleitung und Motivation

Die industrielle Produktion ist eine fundamentale Säule der Exportnation Deutschland. Um in Zeiten der Globalisierung und des internationalen Wettbewerbs auch in Zukunft dauerhaft erfolgreich zu sein, sind neben innovativen Produkten auch neue Verfahren zu deren Herstellung erforderlich. Allerdings sind es in vielen Fällen nicht die Produktinnovationen, durch welche die Entwicklung neuer Produktionstechniken erzwungen wird. So ergeben sich oft durch innovative Ansätze aus dem Bereich der Fertigungstechnik auch neue Anregungen für die Produktentwicklung: Über Jahrzehnte erhaltene, verfahrensbedingte konstruktive Einschränkungen werden fallen gelassen und völlig neue Gestaltungsspielräume können eröffnet werden. Diese produktionstechnischen Revolutionen, in denen „der Prozess auf das Produkt wirkt“ [Reinhart 1997] haben ihre Ursprünge in der Regel in verschiedensten Wissensgebieten, und es stellt eine besondere Herausforderung für das Berufsbild des Produktionstechnikers dar, die dort angesiedelten Vorarbeiten für die Aufgabenstellungen in der Produktion wirtschaftlich nutzbar zu machen.

Neue, innovative Verfahren und Prozesse wirken auf alle Bereiche und Phasen der Produktentwicklung. Eine Sonderstellung nimmt hier die Montagetechnik ein. Die Regel, dass die verfahrensgerechte Produktgestaltung die unabdingbare Voraussetzung jeder erfolgreichen und vor allem wirtschaftlichen Montage bildet, spiegelt dies wider und macht deutlich, wo die Wirksamkeit montagetechnischer Prozess- und Verfahrensinnovationen liegt: Neben der Kostensenkung durch die Ermöglichung einer wirtschaftlicheren Fertigung eröffnen neue Montageverfahren bisher völlig unbekannte Freiräume in der Produktgestaltung. Ein Beispiel für die prozessbedingte Einschränkung der Produktentwicklung durch die Montagetechnik liegt in den bis heute oft ungelösten großen Problemen bei der Handhabung berührungsempfindlicher Bauteile.

Berührungsempfindliche Bauteile finden sich in vielen Bereichen der industriellen Produktion, und ihre Handhabung stellt sich nicht nur innerhalb automatisierter Montageanlagen als problematisch dar. So ist man beispielsweise in der Automobilfertigung daran interessiert, frisch lackierte Sichtbauteile ohne Beschädigung ihrer Oberflächen zu manipulieren. Dies erfordert oft spezielle zusätzliche Halteelemente am Bauteil (Beeinflussung der Produktentwicklung bzw. Konstruktion) bzw. es müssen aufwändige Schutzmaßnahmen gegen das Zerkratzen der empfindlichen Oberflächen getroffen werden (ausschließlich manuelle Handhabung mit Schutzhandschuhen, Abdecken mit Kunststoffhauben). Oftmals ist eine Handhabung der frisch lackierten Bauteile überhaupt nicht

möglich, so dass diese direkt nach der Oberflächenveredelung vor ihrem Einbau zunächst Trocknungsanlagen durchlaufen müssen, was neben einer Erhöhung der Durchlaufzeit auch zu erheblichen Kosten führt. Kommt es trotz dieser Maßnahmen zu den im rauen Produktionsbereich oft schlecht vermeidbaren Beschädigungen, so müssen diese im Fahrzeug-Finish zeitaufwändig poliert bzw. nachlackiert werden.

Neben dem speziellen Problem der Handhabungstechnik frisch lackierter Bauteile in der Automobilindustrie stellt ganz allgemein der Umgang mit Werkstücken, die empfindliche Beschichtungen aufweisen, eine produktionstechnische Herausforderung dar. Auch in anderen Bereichen der Oberflächentechnik muss oft noch längere Zeit nach dem eigentlichen Prozessschritt jeder mechanische Kontakt mit dem Bauteil vermieden werden. Ein gutes Beispiel für derartige handhabungstechnische Problemstellungen findet man in der Mikrosystem- und Halbleiterfertigung: Die Handhabung und Lagerung von Substraten und Wafern mit empfindlichsten Oberflächen ist für jeden Equipment-Hersteller eine besonders schwierig zu beherrschende Anforderung.

Insbesondere an den aktuellen Prozessen der Halbleiterfertigung konventioneller Bauelemente ist auch leicht erkennbar, welche massiven Einschränkungen fehlende Handhabungstechnologien für die Produktentwicklung zur Folge haben können. So ist es bis heute nur in Ausnahmefällen möglich, beide Seiten der Halbleiterscheibe zu strukturieren (doppelseitig prozessierte Wafer), was die Verdopplung der Integrationsdichte bei gleicher Strukturbreite - einem technologischen Quantensprung - ermöglichen würde: Die Scheibenrückseite dient Handhabungszwecken, da während der meisten Prozessschritte der Wafer auf einer festen Unterlage (sog. „Chuck“) durch Ansaugen, elektrostatische Felder oder mechanisches Klemmen fixiert werden muss. Dieses „Chucking“ ist mit der Oberseite des Wafers wegen der Zerstörung durch die mechanische Belastung der Beschichtungen und Strukturen oder massive Ausbeuteverluste aufgrund Partikelgenerierung- und -verschleppung nicht möglich.

Die beiden Beispiele aus der Automobil- und der Halbleiterindustrie verdeutlichen die Notwendigkeit, sich im Rahmen der produktionstechnischen Forschung diesem Problem zu stellen: Zur Vermeidung von Beschädigungen empfindlicher Bauteile durch mechanischen Kontakt müssen „berührungslose Handhabungstechnologien“ entwickelt und qualifiziert werden, die durch innovative Ansätze das Kernproblem beheben und die zur Manipulation der berührungsempfindlichen Werkstücke benötigten Kräfte und Momente ohne mechanischen Kontakt aufzubringen imstande sind [Höppner 1999]. Durch berührungslose Handhabungsverfahren können so auf der einen Seite die Restriktionen in der Produktgestaltung durch Anforderungen

aus der Handhabungstechnik aufgelöst werden. Auf der anderen Seite steht die Aussicht auf eine Erhöhung der Wirtschaftlichkeit durch die Reduzierung der Anzahl beschädigter Bauteile.