

2.4 Bekannte Beispiele für Technologien zur berührungslosen Kraftaufbringung

2.4.1 Definition „berührungslose Handhabung“

Höppner (2002) hat in seiner Arbeit über die berührungslose Handhabung mit Ultraschall das berührungslose Handhaben von Teilen folgendermaßen definiert: „*Unter berührungsloser Handhabung versteht man das Schaffen, definierte Verändern oder vorübergehende Aufrechterhalten einer vorgegebenen räumlichen Anordnung von geometrisch bestimmten Körpern in einem Bezugskordinatensystem, wobei die hierfür nötigen Kräfte und/oder Momente ohne mechanischen Kontakt übertragen werden.*“ Damit werden aber Medien zugelassen, die sich auf die Bauteile negativ auswirken können, wie Fluide (Alkohole etc.), die sich nicht rückstandsfrei wieder entfernen lassen oder eine Partikelkonzentration auf den Bauteilen fördern.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit soll daher diese Definition eingeschränkt werden. Nur Medien, die bereits in der Umgebung des Bauteils vorhanden oder einem vorhandenen Medium äquivalent sind, dürfen im Sinne der Zielsetzung dieser Arbeit während des Handhabungsprozesses zur Krafterzeugung eingesetzt werden.

In der Technik sind mehrere Prinzipien bekannt, mit deren Hilfe bereits heute berührungslos Kräfte auf Bauteile oder allgemeiner auf relativ zur Lagerfläche statisch ruhende Körper aufgebracht werden können. In den folgenden Abschnitten werden Systeme aufgeführt, die auf elektrostatischen, magnetischen und fluidischen Effekten beruhen. Die fluidischen Effekte teilen sich nochmals in Luftlager und dynamische Luftströmungen, Bernoulligreifer und ultraschallbasierte Systeme auf. In den folgenden Abschnitten werden realisierte technische Anwendungen beschrieben, eine detailliertere Beschreibung der physikalischen Grundlagen erfolgt in Kapitel 3.

2.4.2 Elektrostatische Systeme

Elektrostatische Effekte eignen sich zum Aufbringen von Kräften unabhängig vom umgebenden Medium. Aufgrund der stark abnehmenden Kraftwirkung bei größeren Abständen sind keine Anwendungen bekannt, bei denen Bauteile berührungslos transportiert werden.

Grutzeck (2000) untersuchte taktile Greifer, die elektrostatische Kräfte zum Halten der Bauteile einsetzen. Eine Greiferelektrode erzeugt Influenzladungen im Greifobjekt. Der Greifer zeichnet sich durch einen einfachen Aufbau ohne mechanische Aktoren aus. Allerdings ist eine Polarisierbarkeit der Greifobjekte notwendig, was die Verwendung von leitenden Materialien weitgehend ausschließt. Die Greifkräfte sind begrenzt, da hohe Potentialdifferenzen Schaltkreise und Bauteilstrukturen zerstören können (Nienhaus 1996). Bei schlecht leitenden Teilen sind Remanenzladungen nach dem Greifvorgang wieder zu entfernen, da sie den Ablegungsvorgang verhindern können. Weitere Untersuchungen zum elektrostatischen Bauteiltransport wurden an der TU Braunschweig zum Greifen von Kugeln und Bauteilen unter $100\ \mu\text{m}$ Kantenlänge mit einem selbstzentrierenden Greifer durchgeführt (Hesselbach u. a. 2001).

2.4 Bekannte Beispiele für Technologien zur berührungslosen Kraftaufbringung

Neben dem Greifen wird der elektrostatische Krafteffekt vielfach technisch eingesetzt:

- In der Druckindustrie und bei Kopiergeräten wird Toner elektrostatisch auf die Belichtungswalze aufgetragen, bevor er auf das Papier übertragen und thermisch eingeschmolzen wird.
- In der Halbleiterindustrie werden zur Fixierung von Wafern vereinzelt elektrostatische Fixiervorrichtungen (Chucks) verwendet.
- Elektrostatische Kräfte werden zum Zuführen von Mikrosystemen eingesetzt, die auf einem Luftkissen schweben (Gengenbach & Boole 2000).

In der Vergangenheit wurden mehrere elektrostatische Greif- und Spannprinzipien erforscht. Ein Beispiel für einen elektrostatischen Greifer beschreibt das Schutzrecht DE 3439371 A1. Der zu greifende Gegenstand wird an eine mit einer Isolierschicht bedeckte Elektrode gebracht und durch Anlegen einer Gleichspannung zwischen Gegenstand und Elektrode angezogen. Hierzu muss das Bauteil in gewissem Grad leitfähig und unempfindlich gegenüber elektrostatischer Aufladung sein, was bei Elektronikbauteilen und Mikrosystemen sehr selten der Fall ist.

Ein ähnliches System beschreiben Jin und Kanemoto (1995). Hier werden Festplattenscheiben durch ein elektrostatisches Feld in der Schwebelage gehalten. Eine aufwändige Regelung gewährleistet eine konstante Schwebelage. Durch einen auftretenden Kanteneffekt aufgrund der speziellen Gestaltung des elektrischen Feldes wird die Scheibe gleichzeitig lateral zentriert.

2.4.3 Magnetsysteme

Besser skalierbare Kräfte als bei elektrostatischen Effekten liefern magnetische Systeme in zahlreichen Anwendungen. Eines der häufigsten Produkte ist der Elektromotor in seinen verschiedenen Ausführungen, bei dem zwischen Rotor und Stator magnetische Kräfte berührungslos das Drehmoment erzeugen.

Etwas deutlicher in den Bereich Handhabung weist die Magnetlagerung. Große schwere Wellen bzw. sehr schnell laufende Wellen können mit Spulen oder Dauermagneten versehen werden, die sich auf einem anderen statischen Magnetfeld abstützen und eine fast reibungsfreie rotatorische Lagerung bilden. Diese Felder sind sehr zuverlässig und lassen sich gut regeln und skalieren. Dauermagneten sind bei kleinen Anlagen wegen geringerer Wärmeentwicklung vorteilhafter als Spulen, erfordern aber eine höhere Investitionssumme. Bei großen Kräften werden tiefgekühlte Spulen eingesetzt, die sehr effizient hohe Ströme umsetzen können.

In dieselbe Kategorie fallen Linearsysteme von einfachen Linearschlitten in der Handhabungstechnik bis hin zum schienengebundenen Personentransportsystem Transrapid, bei denen die berührungslose Lagerung in Verbindung mit einem berührungslosen Antrieb in der Schiene bzw. dem Fahrweg und den Wagen untergebracht ist. Damit lassen sich hohe Beschleunigungen und Geschwindigkeiten bei minimaler Reibung und hohe Traglasten realisieren (Transrapid 2004).

Als eine sehr spezielle Art der berührungslosen Handhabung sei die Stabilisierung des Plasmas bei der Kernfusion erwähnt. Die Schwierigkeit besteht darin, ein sehr heißes Gas durch Magnetfelder und innere Stromeffekte berührungsfrei in einem torusförmigen Gebilde zu halten, ohne dass die Wände berührt und damit Verunreinigungen im Plasma erzeugt werden.

Für die Handhabung von Bauteilen aus der Halbleiterindustrie gehen Ford & Koh (1990) auf die Möglichkeit der Levitation von Wafern mit Hilfe von magnetischen Feldern ein (vgl. auch Abschnitt 3.1.7). Mit Hilfe von magnetischen Wechselfeldern als einer Möglichkeit oder der Ausnutzung des diamagnetischen Verhaltens von Silizium in sehr starken Magnetfeldern werden theoretische Varianten beschrieben, Wafer zu transportieren und zu positionieren. Eine realisierte Umsetzung ist nicht bekannt.

Für kleine Bauteile ist das Prinzip weniger geeignet, bei Wechselfeldern wegen der Bauteilbelastung gar nicht möglich (Jin u.a. 1995). Grutzeck (2000) beschreibt die Möglichkeit der Handhabung magnetisierbarer Bauteile, nennt jedoch den Nachteil der Dauermagnetisierung. Diese muss rückgängig gemacht werden, um das Bauteil kontrolliert ablegen zu können und die Funktion nicht zu beeinträchtigen. Bei kleinen Bauteilen ist keine industriell umgesetzte Anwendung bekannt.

2.4.4 Konventionelle Luftlager und Luftkissensysteme

Generell werkstoffunabhängig sind fluidbasierte Systeme, die gasförmige Medien zur Kraft-erzeugung verwenden. Als erstes Prinzip werden im Folgenden Luftlager beschrieben. Luftlager sind bereits so lange bekannt, wie die Möglichkeit bestand, Luft wirtschaftlich zu komprimieren und gute Oberflächen zu erzeugen. Technisch umgesetzt wurden Luftlager erstmals um 1900, der technische Durchbruch erfolgte nach 1945 (Wiemer 1969).

Ein konventionelles, auch statisches Luftlager entsteht, wenn zwischen zwei Oberflächen mit Überdruck Luft eingblasen wird, die die Platten trennt und ein Luftpolster ausbildet. Die Oberflächen können fast reibungsfrei aufeinander gleiten, ohne sich zu berühren.

Auf diesem Prinzip basierende Systeme werden auch aerostatische Lager genannt. Die einfachste Form stellt dabei das Elementarluftlager dar (Gerke 1991, Schroter 1995). Bartz (1993) gibt einen Überblick über die Einsatzmöglichkeiten im konventionellen Maschinenbau. Er nennt aerostatische Wellenlagerungen, die auch als poröse Tragelemente ausgebildet sein können. Ähnlich wie bei Magnetlagern trägt der Luftfilm die Wellen schnell rotierender Maschinenteile fast reibungsfrei und mit meist ausreichend hoher Steifigkeit. Daher werden aerostatische Lager auch für Hochpräzisionsführungen in Werkzeugmaschinen und Messmaschinen eingesetzt. Bei einem Lagerspalt von wenigen Mikrometern und einer Fertigungsgenauigkeit von 1 bis 2 μm können Positionsabweichungen unter 20 nm gewährleistet werden (Schroter 1995).

Für schwere Lasten werden aerostatische Gleitschuhe verwendet. Transportpaletten werden mit Gleitschuhen versehen und können auf ebenem Boden leicht verschoben werden. Ähnlich funktionieren aerostatische Tischlagerungen bei hochpräzisen Werkzeugmaschinen und

2.4 Bekannte Beispiele für Technologien zur berührungslosen Kraftaufbringung

Messmaschinen, wobei sehr enge und ausreichend steife Spalte realisierbar sind (Wiemer 1969).

Die funktionelle Umkehrung stellt das Luftgleitfördern dar. Dies ist ein aerodynamisches Verfahren für Objekte mit gleichmäßiger bzw. ebener Standfläche. Das Objekt gleitet auf einem Luftfilm, der aus den zahlreichen Düsenöffnungen eines porösen Bodens ausströmt. Die verbleibenden Haft- und Gleitreibungskräfte betragen etwa ein Tausendstel der Gewichtskraft, so dass beim Verschieben nur die Trägheit überwunden werden muss. Jedoch gibt es einige Einschränkungen dieses Prinzips. Bei Verwendung einer porösen Platte können ausschließlich spezielle Teile transportiert werden, bei denen die Bauteilkanten nicht durch Verkippen aufgrund des Bernoullieffekts (vgl. Abschnitt 2.4.5) aufliegen können. Abhilfe schafft ein paralleles Röhrensystem mit Drosseldüsen, das die Fläche zu einem Muster von konventionellen Luftlagern macht. Dies erfordert allerdings einen großen Aufwand in der Fertigung. Geometrisch komplexe Körper schweben zudem meist sehr unruhig.

Eine Variante hiervon sind so genannte „Air-in-floor“-Systeme. Die Luftversorgung ist im Tisch oder Boden untergebracht. Durch Überfahren von Kugelventilen werden diese ausgelöst und der Luftstrom freigesetzt. Es entsteht ein Luftfilm, auf dem das Transportgut gleitet (Rybarczyk 2004).

Da der Abstand zwischen Düse und Bauteil bei diesen Verfahren mit einigen Millimetern bis Zentimetern sehr groß wird, spricht man hier bereits von dynamischen Effekten. Der Luftverbrauch steigt dementsprechend. Hierzu gehört auch das Luftstrahlfördern, das besonders für großflächige, leichte Körper geeignet ist (Lorenz 1999). Diese werden durch Luftstrahlen aus halbkreisförmigen Öffnungen einer Luftkammer angehoben, seitlich angeblasen und dadurch beschleunigt. Durch dieses Prinzip kann ein Steigungsvermögen bis 30 % realisiert werden. Auch das Schubfördern gehört zu den dynamischen Luftförderprinzipien. Ein Druckunterschied zwischen Vorder- und Rückseite des Bauteils wird für die Beschleunigungskräfte ausgenutzt. Anwendungen sind das Fördern von Schrauben in Zuführschläuchen oder die Rohrpost. Rybarczyk (2004) beschreibt aerodynamische Zuführverfahren, bei denen Werkstücke aufgrund ihres lageabhängigen Luftwiderstands geordnet und ausgerichtet werden können. Die Werkstücke werden meist über Luftkissen und dynamisches Luftfördern bewegt und durch seitliche Strömungsfelder gedreht. Diese Verfahren sind jeweils an die unterschiedlichen Werkstückformen anzupassen.

Ebenfalls über rein fluiddynamische Effekte beeinflusst Schäfer (1999) optische Mikrolinsen mit einem axialen Luftstrahl, um sie zu justieren. Dabei wurden verschiedene Linsenformen untersucht. Der Luftstrahl dreht die Linse durch Anblasen unter verschiedenen Winkeln in die richtige Position. Die konvexe bzw. konkave Oberfläche der Linse bestimmt dabei signifikant die Kraft und die Position. Dieses Verfahren soll in der Mikromontage z. B. bei Endoskopen eingesetzt werden.

Interessant für das berührungslose Greifen von Bauteilen ist eine Patentanmeldung, die von der Siemens AG in Zusammenarbeit mit der TU München erarbeitet wurde. Hierbei werden Luftlagereffekte benutzt und mit anziehenden Kräften aus Vakuumdüsen kombiniert, um große Bauteile wie Wafer von oben zu greifen. Die Saugdüsen sind als Bohrungen ausgebildet,

die Druckdüsen als Mikrodüsen (Durchmesser ca. 40 μm) in porösem, oberflächenverdichtetem Sintermaterial realisiert. Durch das Zusammenwirken der homogen über die Greiferoberfläche verteilten Unterdruck- und Überdruckbereiche kann ein ebenes Bauteil ohne mechanischen Kontakt mit einem festen Abstand zur Greiferoberfläche gehalten werden. Dies ermöglicht die schonende Handhabung dünner, formlabiler Bauteile. Dabei verhindern Anschläge an den Bauteilrändern ein laterales Abgleiten des Bauteils vom Luftkissengreifer (Höppner 1999, Schutzrecht DE 19806306 A1).

2.4.5 Bernoulliprinzip, hydrodynamisches Paradoxon

In mehreren technischen Anwendungen wird das so genannte hydrodynamische Paradoxon genutzt. Aus einer zentralen Düse eines flächigen Greifkopfes strömt Druckluft senkrecht auf die Oberfläche des ebenen, flächigen Greifobjektes und wird in radialer Richtung abgelenkt. Zwischen Bauteiloberfläche und Greiferfläche strömt die Luft nach außen. In der Mitte an der Düse wird die Luft sehr stark beschleunigt, um dem kurvenförmigen Strömungsverlauf aus der Düse nach außen folgen zu können. Dadurch entsteht an der Greiferoberfläche ein Unterdruck, der sich zum Rand hin abbaut, wo sich Umgebungsdruck einstellt. Das Bauteil wird insgesamt an den Greifer gezogen, bis die Gewichtskraft, die Kraft des Staudrucks aus der Düse und die anziehende Kraft aus dem Beschleunigungsimpuls des Fluids im Gleichgewicht stehen. Es stellt sich dabei ein bestimmter Abstand (ca. 0,5 mm bis 3 mm) zwischen Greif- und Grifffläche des Bauteils ein, so dass das Objekt berührungslos gehalten wird.

Bernoulligreifer werden häufig für große, flächige Bauteile wie Wafer und Glasscheiben, aber auch für biegeschlaffe Bauteile wie Stoffe verwendet. Die Greifer werden von Robotern geführt, um die Bauteile umzudrehen (zu flippen) bzw. von oben gegriffen in Fertigungsgeräte einzulegen (Manz 2004, SEZ 2004).

Vereinzelt finden sich Anwendungen, bei denen Bernoulligreifer zum berührungslosen Greifen von nicht formstabilen Bauteilen eingesetzt werden. So wurden Forschungsprojekte durchgeführt, um Kunststofffolien, lackierte Bleche oder harzimpregnierte, klebrige Gewebematten zu greifen und zu montieren (Milberg 1989). Seit kurzer Zeit wird versucht, Bernoulligreifer für hochausgedünnte Wafer mit Dicken zwischen 50 und 500 μm einzusetzen (Binder & Kroupa 2003). Silizium dieser Dicke ist flexibel und biegsam, zerbricht aber bei zu großer Krümmung. Die besondere Herausforderung liegt darin, dass diese Wafer aufgrund innerer Spannungen oder äußerer Beschichtungen sich wie z. B. Kartoffelchips aufbiegen und federnd diese Gestalt immer wieder anzunehmen bestrebt sind. Für die Handhabung müssen die Wafer daher erst geradegebogen werden, um beim Absetzen kontrolliert ihre Wunschform wieder annehmen können. In dem zitierten Artikel werden Kombinationen von nicht berührungslosen Vakuum- und Bernoulligreifern beschrieben, die ein berührungsloses Geradeziehen mittels Bernoullieffekt und ein taktiles Greifen durch die Unterdruckdüsen nutzen, um Wafer mit einem „Bow“ (Durchbiegung) von 10 mm zu greifen. Diese Greiftechnik benötigt eine große Menge an Stickstoff (etwa 30 Liter/Minute) sowie Sensorik zum Detektieren der Wafer und vor allem deren Durchbiegung, stellt aber eine der wenigen Möglichkeiten zum schonenden Greifen ausgedünnter Wafer dar.

2.4 Bekannte Beispiele für Technologien zur berührungslosen Kraftaufbringung

Die Anwendung von Bernoulligreifern für die Handhabung kleiner Bauteile untersuchte Grutzeck (2000). Er stellte fest, dass es sehr schwierig ist, zu kleinen Größen zu skalieren. Es werden sehr hohe Strömungsgeschwindigkeiten benötigt, um bei geringen Abmessungen noch Kräfte zu erzeugen. Dies ist besonders bei kleinen Bauteilen wegen der Beschädigungsgefahr der Oberflächen problematisch, was auch Nienhaus (1999) bestätigt. In Versuchen wies Grutzeck nach, dass lediglich sehr enge Spalte erzielt werden können. Erhoffte bauteilzentrierende Kräfte, die bei großen Bauteilen teilweise in sehr schwacher Form auftreten, waren in der Praxis bei kleinen Bauteilen nicht messbar. Eine Handhabung kleiner Bauteile ist daher, wenn überhaupt, nur mit seitlichen Anschlägen umsetzbar.

2.4.6 Ultraschallsysteme

Eine dritte Möglichkeit, mit Hilfe von Gasen Kräfte zu erzeugen, stellen Systeme dar, die auf Ultraschall im Frequenzbereich oberhalb von 20 kHz basieren. Hier sind grundsätzlich zwei Effekte zu unterscheiden:

- Der **Stehwelleneffekt** basiert auf Druck- und Schallschnelleunterschieden in einer stehenden Welle, die sich zwischen dem Schallerzeugern und einem Reflektor ausbildet, in deren Druckknoten Bauteile schweben.
- Beim **Nahfeldeffekt** werden strömungsmechanische Phänomene genutzt, die bei engen Spalten zwischen einer schnell schwingenden und einer ruhenden Oberfläche entstehen. Im Spalt bildet sich ein Überdruck aus, der wie ein flächiges Luftlager wirkt.

2.4.6.1 Handhabung von Mikroteilen durch stehende Wellen

Das Stehwellenprinzip wurde bereits erfolgreich in der Forschung eingesetzt. Speziell bei Mikrogravitationsexperimenten der NASA sowie der ESA in den 70er Jahren bestand die Anforderung, zur Untersuchung von Kristall- und Legierungsbildungsmechanismen im Bereich der Chemie und der Werkstoffforschung, Flüssigkeiten und Festkörper ohne Wandkontakt schweben zu lassen.

Hierzu wird im Abstand $a=n\lambda/2$ von der Schallquelle ein Reflektor angebracht. Infolgedessen bildet sich zwischen Quelle und Reflektor eine stehende Welle aus. Ein Bauteil kann im Druckknotenpunkt der stehenden Welle zum Schweben gebracht werden. Auf das Bauteil wirken zwei unterschiedliche Kräfte. Axial zum Schallfeld wirkt der Schallstrahlungsdruck der stehenden Welle auf Ober- und Unterseite des Bauteils. Bei einer leichten Verschiebung in axialer Richtung wird das Bauteil in den Knoten zurückgezogen, so dass sich mit anderen axialen Kräften, z. B. der Gewichtskraft, ein Gleichgewicht ausbilden kann.

Orthogonal zur Schallfeldachse wirken Bernoullieffekte um das Bauteil, die aus der Bewegung der Gasteilchen resultieren. Eine Auslenkung des Bauteils bewirkt dabei einen Unterdruck der Strömung auf der Innenseite. Dies resultiert aus der Richtfeldcharakteristik des Schallfeldes. Aufgrund der kleinen Stirnfläche der Ultraschallquellen schwingt die Abstrahl-

fläche in der Mode 0 und es bildet sich ein parabolisches Profil der Amplituden der Wechselströmung der Luft über dem Querschnitt des Schallerzeugers aus (Abbildung 4).

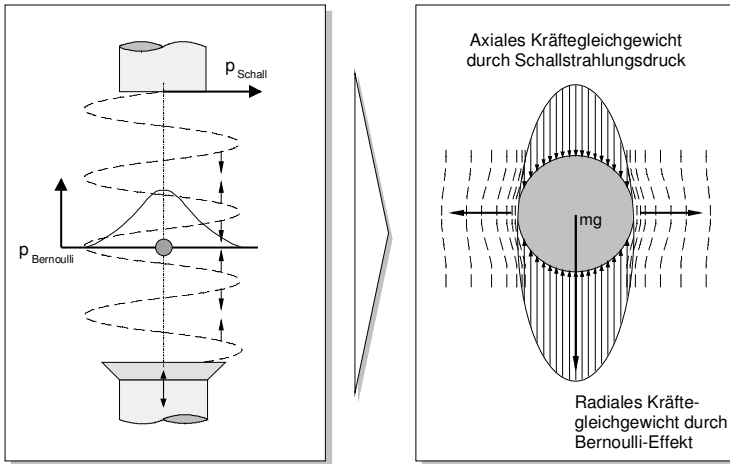


Abbildung 4: Ultraschallstehwelleneffekt

Das Prinzip ist dabei sehr tolerant gegenüber einer Verkippung des Schallfelds und eines Verdrehen des Reflektors gegenüber dem Schallerzeuger bis zu 60° , in Einzelfällen bis zu 90° . Damit besteht die Möglichkeit, den levitierten Gegenstand für eine Bearbeitung oder zum Aufnehmen und Ablegen zugänglich zu machen (Reinhart 1999).

Die Stehwellenlevitation wird außerhalb der Forschung industriell nicht verwendet. Bisher wurden keine Greifsysteme basierend auf diesem Prinzip entwickelt. Vor allem Fragen des Aufnehmens und Ablegens von Bauteilen sowie der rotatorischen Ausrichtung sind noch ungeklärt. Aktuell wird im Rahmen eines Forschungsverbundes der Bayerischen Forschungsstiftung versucht, Lösungen für diese Aufgaben zu finden (Zitzmann u. a. 2004).

Für die beschriebene Kraftwirkung lassen sich beliebig viele Positionen finden, solange eine freie Ausbreitung des Schallfeldes nicht gestört wird. Das gleichzeitige Lagern mehrerer kleiner Bauteile in jeweils einem Knoten der stehenden Welle ist möglich.

Bei genügend großer Schallenergie und einer adäquaten Bauteilfläche kann das Bauteil den Reflektor auch ersetzen. Damit können Levitationshöhen im Bereich kleiner ganzzahliger Vielfacher der halben Wellenlänge realisiert werden. Abbildung 5 zeigt den Verlauf der Kraft auf den Reflektor abhängig vom Abstand. Da sich zwischen Wafer und Schallquelle eine stehende Welle ausbildet, wird ein Wafer, der sich in Bereichen von $\pm\lambda/4$ um einen Knoten der stehenden Welle befindet, in den Punkt des Kräftegleichgewichts zwischen Gewichtskraft und Rückstellkraft gedrückt. Daraus ergeben sich bei Schallfrequenzen zwischen 20 kHz Levitationshöhen um 8 mm.

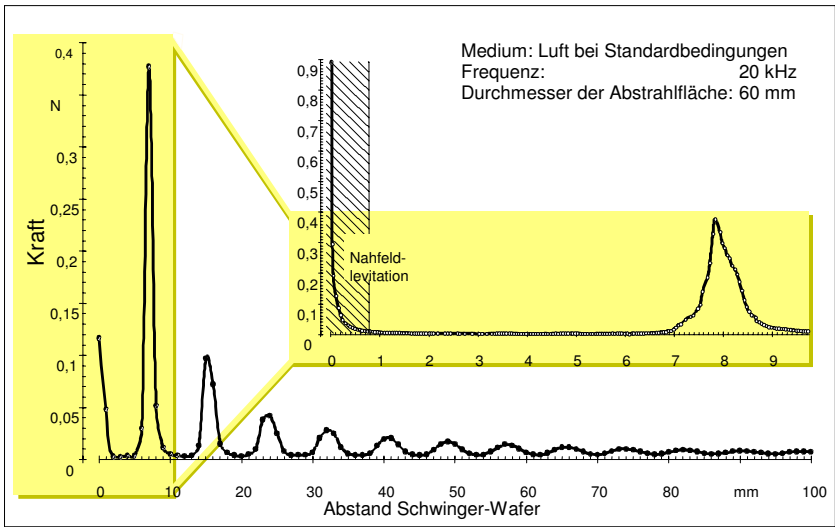


Abbildung 5: Gemessener Kraftverlauf beim Annähern eines Bauteils an eine Ultraschallquelle

2.4.6.2 Handhabung von flächigen Bauteilen durch Nahfeldlevitation

In Abbildung 5 wird ebenfalls deutlich, dass die Levitationskraft im Nahfeld sprunghaft ansteigt. Wie später noch gezeigt werden wird, kann dieser Effekt nicht mehr mit schalltheoretischen Ansätzen erklärt werden, sondern es sind fluiddynamische Theorien anzuwenden.

Das Nahfeld zeichnet sich durch eine hohe Kraftdichte aus, weshalb hier relativ große Massen levitiert werden können. Eine Voraussetzung dafür ist eine möglichst plane Seite des anzuhebenden Körpers mit guten Schallreflexionseigenschaften. Die Kraftwirkung verhält sich proportional zu Schallamplitude, Schallfläche und sinkender Levitationshöhe. Die Eigenschaften nähern sich daher denen eines aerostatischen Luftlagers an. Dabei werden Levitationshöhen im Bereich zwischen einigen zehn Mikrometern und wenigen Millimetern erreicht.

Dieser Effekt wurde mittlerweile in mehreren Prototypen zur Handhabung von Halbleiterwafern eingesetzt. Er zeichnet sich aus durch einfachen Aufbau, ein günstiges Prozesskennfeld und nicht vorhandene Beeinträchtigung der Prozessumgebung wie z. B. durch störende Luftströmungen bei Luftlagern.

Abbildung 6 zeigt realisierte Versuchsmuster für den Transport und das Greifen von Wafer-scheiben aus der Halbleiterindustrie.

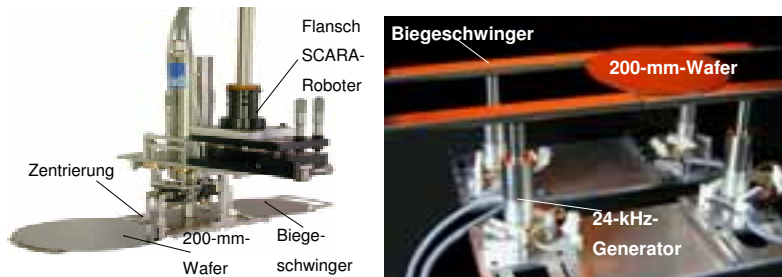


Abbildung 6: Versuchsmuster für Transport und Greifen mit Ultraschall (Höppner 2002)

2.4.7 Adhäsive Systeme

In mehreren Quellen werden Systeme als berührungslos bezeichnet, die über Adhäsionskräfte von Flüssigkeiten Kräfte auf Bauteile ausüben und sie dadurch greifen. Hierzu werden Tropfen von Wasser oder Alkoholen an der Greiffläche ausgeschieden, die beim Annähern das Bauteil benetzen. Es bilden sich zwei Dreiphasengrenzen zwischen den Festkörpern (Bauteil und Greifer), der umgebenden Luft und dem Adhäsiv aus. Die aus der Oberflächenspannung entstehenden Kräfte bewirken zum einen, dass der Flüssigkeitsfilm das Bauteil definiert auf Abstand hält und gleichzeitig bei einem geeignet geformten Greifer auf diesem zentriert. Dementsprechende Systeme wurden u. a. in den Arbeiten von Bark (1998) und Grutzeck (2000) untersucht. Die Greifkräfte erreichen 20 mN mit Wasser bei einem $4 \times 4 \text{ mm}^2$ großen Bauteil. Der Abstand zum Greifer beträgt wegen der Höhe des verbleibenden Tropfen etwa $700 \mu\text{m}$. Die erreichten Genauigkeiten bei der Zentrierung der Bauteile liegen bei einem lateralen Versatz von 170 bis $800 \mu\text{m}$. Durch geeignete Pumpmechanismen, die das Volumen der Tropfen nachträglich verringern können, kann die Genauigkeit positiv beeinflusst werden. Der gesamte Zyklus beträgt mindestens zwei Sekunden für das Aufnehmen.

Das Ablegen des Bauteils erfolgt durch schlagartiges Verdampfen des Fluids durch ein Filmheizelement oder Abpumpen der Flüssigkeit. Jedoch sind immer Rückstände des Adhäsivs auf den Bauteilflächen nachweisbar.

Diese Tatsache schließt für diese Arbeit eine weitere Betrachtung adhäsiver Systeme aus. *Berührungslos* wurde im Sinne der vorliegenden Arbeit so definiert, dass kein weiteres Medium als das bereits in der Umgebung vorhandene mit dem Bauteil in Berührung kommen soll (vgl. Abschnitt 2.4.1). Dies ist bei adhäsiven Greifprinzipien nicht gegeben. Wegen der möglichen Beeinträchtigung nachfolgender Prozessschritte und der geringen Geschwindigkeit ist kein Einsatz adhäsiver Greifer im industriellen Umfeld bekannt.