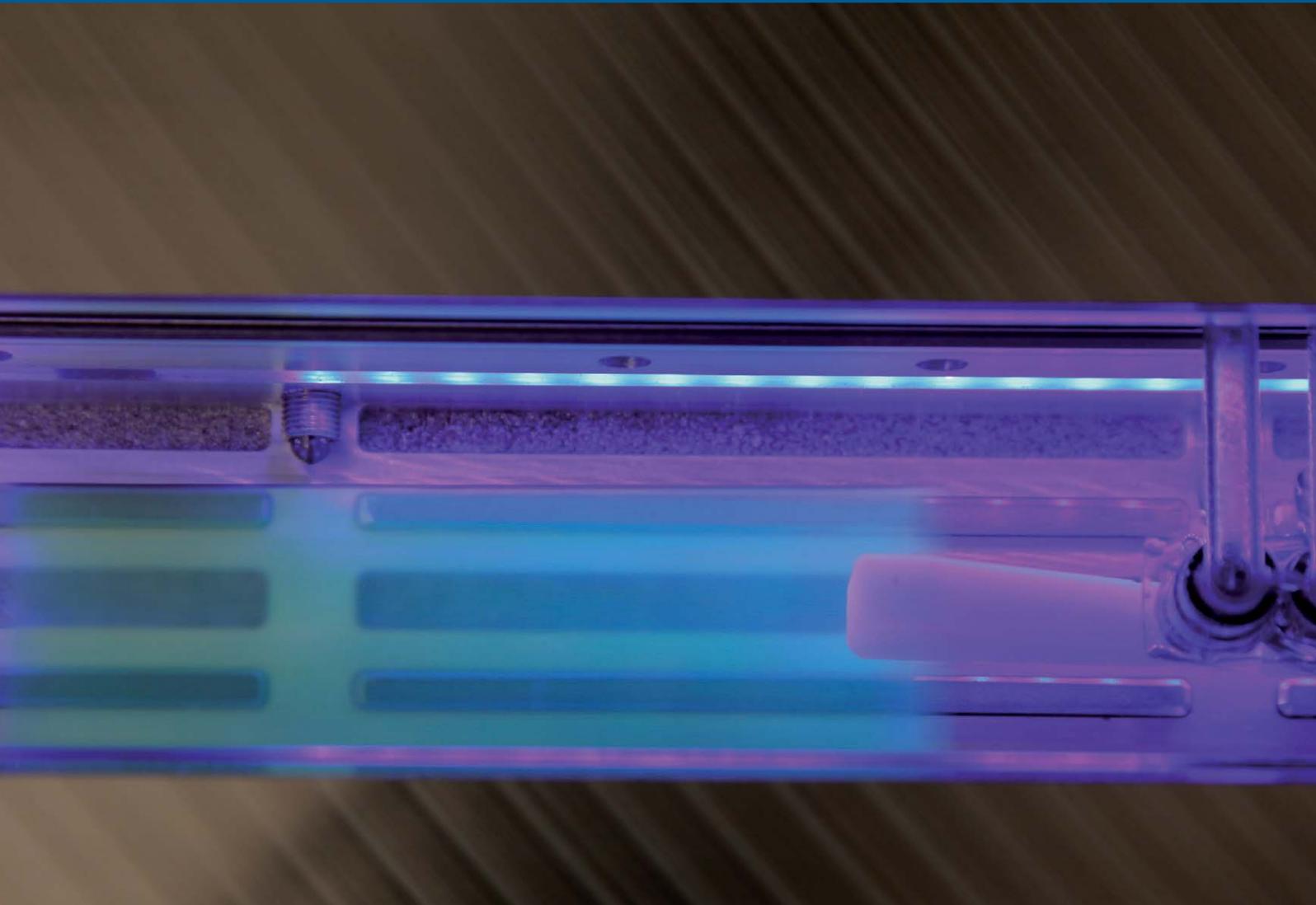


STUTTGARTER BEITRÄGE ZUR PRODUKTIONSFORSCHUNG

ANDREAS TEICHERT

---

# Handhabung von oberflächensensitiven Glasobjektträgern



Universität Stuttgart



Fraunhofer  
IPA

**Herausgeber:**

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl

Prof. Dr.-Ing. Prof. Dr. h. c. mult. Alexander Verl

Prof. Dr.-Ing. Prof. e. h. Dr.-Ing. e. h. Dr. h. c. mult. Engelbert Westkämper

Andreas Teichert

**Handhabung von oberflächensensitiven  
Glasobjektträgern**

**Kontaktadresse:**

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart  
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart  
Telefon 0711 970-00, Telefax 0711 970-1399  
info@ipa.fraunhofer.de, www.ipa.fraunhofer.de

**STUTTGARTER BEITRÄGE ZUR PRODUKTIONSFORSCHUNG****Herausgeber:**

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl  
Prof. Dr.-Ing. Prof. Dr. h. c. mult. Alexander Verl  
Prof. Dr.-Ing. Prof. e. h. Dr.-Ing. e. h. Dr. h. c. mult. Engelbert Westkämper

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart  
Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb (IFF) der Universität Stuttgart  
Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW)  
der Universität Stuttgart

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie;  
detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

ISSN: 2195-2892

ISBN: 978-3-8396-0488-5

D 93

Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2012

Druck: Mediendienstleistungen des  
Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB, Stuttgart

Für den Druck des Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.

© by **FRAUNHOFER VERLAG**, 2012

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB  
Postfach 800469, 70504 Stuttgart  
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart  
Telefon 0711 970-2500  
Telefax 0711 970-2508  
E-Mail [verlag@fraunhofer.de](mailto:verlag@fraunhofer.de)  
URL <http://verlag.fraunhofer.de>

Alle Rechte vorbehalten

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften. Soweit in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden ist, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen.

## GELEITWORT DER HERAUSGEBER

Produktionswissenschaftliche Forschungsfragen entstehen in der Regel im Anwendungszusammenhang, die Produktionsforschung ist also weitgehend erfahrungsbasiert. Der wissenschaftliche Anspruch der „Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung“ liegt unter anderem darin, Dissertation für Dissertation ein übergreifendes ganzheitliches Theoriegebäude der Produktion zu erstellen.

Die Herausgeber dieser Dissertations-Reihe leiten gemeinsam das Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA und jeweils ein Institut der Fakultät für Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik an der Universität Stuttgart.

Die von ihnen betreuten Dissertationen sind der marktorientierten Nachhaltigkeit verpflichtet, ihr Ansatz ist systemisch und interdisziplinär. Die Autoren bearbeiten anspruchsvolle Forschungsfragen im Spannungsfeld zwischen theoretischen Grundlagen und industrieller Anwendung.

Die „Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung“ ersetzt die Reihen „IPA-IAO Forschung und Praxis“ (Hrsg. H.J. Warnecke / H.-J. Bullinger / E. Westkämper / D. Spath) bzw. ISW Forschung und Praxis (Hrsg. G. Stute / G. Pritschow / A. Verl). In den vergangenen Jahrzehnten sind darin über 800 Dissertationen erschienen.

Der Strukturwandel in den Industrien unseres Landes muss auch in der Forschung in einen globalen Zusammenhang gestellt werden. Der reine Fokus auf Erkenntnisgewinn ist zu eindimensional. Die „Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung“ zielen also darauf ab, mittelfristig Lösungen für den Markt anzubieten. Daher konzentrieren sich die Stuttgarter produktionstechnischen Institute auf das Thema ganzheitliche Produktion in den Kernindustrien Deutschlands. Die leitende Forschungsfrage der Arbeiten ist: Wie können wir nachhaltig mit einem hohen Wertschöpfungsanteil in Deutschland für einen globalen Markt produzieren?

Wir wünschen den Autoren, dass ihre „Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung“ in der breiten Fachwelt als substanziell wahrgenommen werden und so die Produktionsforschung weltweit voranbringen.

Alexander Verl

Thomas Bauernhansl

Engelbert Westkämper



# Handhabung von oberflächensensitiven Glasobjektträgern

Von der Fakultät für Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik  
der Universität Stuttgart  
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte Abhandlung

vorgelegt von

**Andreas Teichert**  
aus Haan (Rheinland)

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Prof. Dr. h. c. mult. Alexander Verl  
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Alfred Gerlach

Tag der mündlichen Prüfung: 22.10.2012

Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und  
Fertigungseinrichtungen der Universität Stuttgart  
2012

## Kurzfassung

Deutschland befindet sich neben den USA in einer Vorreiterrolle für technische Entwicklungen. Die Branchen der Biotechnologie und Medizintechnik erleben durch diesen Fortschritt zurzeit einen rasanten Wandel. Die technische Unterstützung im medizinischen Alltag steht im Mittelpunkt aktueller Forschungsarbeiten. Als Grundlage von mikroskopischen Untersuchungen werden beispielweise oberflächenfunktionalisierte Glasobjektträger verwendet. Um diese technischen Hilfen nutzen zu können, ist es zwingend erforderlich, dass die Glasobjektträger von sehr hoher Qualität sind. Sie müssen daher nach der Produktion hochrein und unversehrt sein, um die Ergebnisse der Untersuchungen nicht zu verfälschen.

Die heutige Produktion stößt dabei schnell an ihre Grenzen. Denn manuelle Arbeitsabläufe besitzen derzeit einen großen Anteil an den Herstellungsprozessen und Handhabungsaufgaben. Der Mensch ist ein entscheidender Faktor bei der Herstellung von funktionalisierten Glasobjektträgern.

Das Ziel dieser Arbeit war die Entwicklung eines automatisierbaren Verfahrens zur Handhabung oberflächensensitiver Glasobjektträger. Dieses sollte unter Beachtung der Anforderungen an Reinheit und Unversehrtheit, den Transport oberflächensensitiver Glasobjektträger zwischen und während den einzelnen Fertigungsschritten ermöglichen. Das Hauptaugenmerk bei der Entwicklung dieses Transportsystems lag darauf, dass alle das Werkstück beeinflussende

## Kurzfassung

---

Kräfte ohne mechanischen Kontakt, also vollständig berührungslos, übertragen werden.

Das entwickelte Transport-Flow-Pipe-Verfahren zur Handhabung empfindlicher Werkstücke entspricht diesen Anforderungen. Es bietet die Möglichkeit, in Kombination mit flexiblen und kontaktlosen Prozessen, die Produktion von oberflächensensitiven Werkstücken in einer eigenen Schutzatmosphäre außerhalb von Reinräumen zu automatisieren. Außerdem können durch einen anpassungsfähigen Aufbau auch Werkstücke und Bauteile anderer Formen und Ausprägungen transportiert werden. Diese können unregelmäßig oder sogar formlabil sein.

### Short Summary

Along with the USA, Germany has assumed a pioneering role in the development of technical innovations. This progress is currently causing rapid changes in the fields of biotechnology and medical engineering. Current research work focuses on providing technical assistance in the work that is carried out everyday on the medical sector. For example, glass slides with functionalized surfaces are essential to examinations that are carried out with microscopes. In order to be able to utilize these technical aids, it is absolutely necessary for these glass slides to be of a very high quality. After production, they must therefore be ultra-clean and remain intact to prevent any results of analyses carried out with them from being distorted.

And this is where production currently quickly reaches its limits. Because manufacturing processes and handling tasks require that many manual work sequences be carried out. The person carrying out this work represents a decisive factor in the production of functionalized glass slides.

The aim of this project was to develop an automated process for the handling of surface-sensitive glass slides. While meeting the demands that are made on purity and intactness, the process intended to make it possible for surface-sensitive glass slides to be transported between and during the individual stages of production. The priority in developing this transport system was to transfer all forces affecting the work piece without the need for mechanical contact, i.e. to do so absolutely contact-free.

## Short Summary

---

The developed transport-flow-pipe process meets these demands. In conjunction with flexible and contact-free procedures, this process will enable the production of surface-sensitive work pieces to be automated within their own protective atmosphere outside of clean rooms. The adaptable design will also make it possible to transport work pieces and components with different shapes and designs. These could be irregular or even unstable shapes.

# Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	XV
Abbildungsverzeichnis	XVII
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Ausgangssituation	1
1.2 Problemstellung	4
1.3 Zielsetzung und Vorgehensweise	11
<b>2 Anforderungen an die Handhabung oberflächensensitiver Glasobjektträger</b>	<b>17</b>
2.1 Merkmale hoher Qualität von Glasobjektträgern	17
2.2 Oberflächensensitivität und Kontaminationsempfindlichkeit	19
2.3 Fragile Seitenkanten und Flächenpressungen	24
<b>3 Definition von Materialfluss und Handhabung</b>	<b>26</b>
3.1 Einordnung der Begriffe Materialfluss und Handhabung	26
3.2 Ordnungszustand eines Werkstückes	28

3.3	Transportieren als Teilfunktion der Handhabung	29
3.4	Greifen als Teilfunktion der Handhabung	31
<b>4</b>	<b>Analyse bekannter Handhabungstechnologien</b>	<b>34</b>
4.1	Taktile Handhabungstechnologien	34
4.1.1	Definition taktiler Handhabung	34
4.1.2	Taktiles Greifen	35
4.1.3	Taktiles Transportieren	45
4.1.4	Nachteile taktiler Handhabungstechnologien	48
4.2	Berührungslose Handhabungstechnologien	49
4.2.1	Definition berührungsloser Handhabung	49
4.2.2	Elektrostatische Verfahren	51
4.2.3	Magnetische Verfahren	51
4.2.4	Adhäsive Verfahren	52
4.2.5	Luftlagerverfahren	54
4.2.6	Verfahren nach dem Bernoulliprinzip	61
4.2.7	Ultraschallverfahren	63
4.2.8	Nachteile berührungsloser Handhabungstechnologien	66

4.3	Beurteilung bekannter Technologien zu den Anforderungen an eine Handhabungsvorrichtung für Glasobjektträger	67
4.3.1	Bewertungskriterien	67
4.3.2	Entscheidungstabelle über die einzelnen Verfahren	70
4.3.3	Zusammenfassung und Fazit zum Stand der Technik	72
4.3.4	Ansätze zur Entwicklung eines innovativen Handhabungsverfahrens für Glasobjektträger	74
<b>5</b>	<b>Prinzipien zur berührungslosen Kompensation der vertikalen Gewichtskraft</b>	<b>76</b>
5.1	Freiheitsgrade eines Werkstückes bei Kompensation der Gewichtskraft	76
5.2	Eigenschaften von aerostatischen Lagern	79
5.2.1	Tragkraft und Lagerspalt	79
5.2.2	Steifigkeit und Dämpfung	80
5.3	Technologien zur Erzeugung von aerostatischen Lagern	82
5.3.1	Aerostatische Düsenluftlager	83
5.3.2	Aerostatische Sinterluftlager	84

5.4	Versuchsreihe zur Analyse von Sintermaterialeigenschaften	86
5.4.1	Analyse des Verhältnisses von Betriebsdruck zu Luftdurchfluss	89
5.4.2	Analyse des Verhältnisses von Luftdurchfluss zu Lagerspalt	90
5.4.3	Analyse der Luftdruckverteilung in der Vorkammer	92
5.4.4	Analyse des Verhältnisses von Lagerspalt zu Tragkraft	93
5.4.5	Analyse des Verhältnisses von Lagerspalt zu Steifigkeit	95
5.4.6	Fazit der Versuchsreihe zur Analyse von Sintermaterial	96
5.5	Vorrichtungen zur Erzeugung einer aerostatischen Transportbahn	98
5.5.1	Transportbahn aus flächigem Sintermaterial	98
5.5.2	Transportbahn aus rundem Sintermaterial	100
5.5.3	Schienensystem als Transportbahn	103
5.5.4	Fazit zur Entwicklung einer Transportvorrichtung	106
<b>6</b>	<b>Prinzipien zur berührungslosen Kompensation lateraler Auslenkkräfte</b>	<b>107</b>
6.1	Freiheitsgrade eines Werkstückes bei der Kompensation lateraler Auslenkkräfte	108
6.2	Versuchsreihe zur Kompensation lateraler Auslenkkräfte	110
6.2.1	Transportbahn mit verschiedenen Seitenführungsprinzipien	111

6.2.1.1	Geschlossene Führungsschienen	111
6.2.1.2	Rillenschienenführung	113
6.2.1.3	Rillenschienenführung mit zusätzlichem Luftlager	115
6.2.1.4	Schräge Luftdüsen auf Werkstückoberfläche	117
6.2.1.5	Zwischenfazit nach Versuchsreihe mit flexibler Transportbahn	119
6.2.2	V-Verfahren	120
6.2.3	Differenzdruckverfahren	123
6.2.4	90°-Verfahren	125
6.2.5	Schienentransportverfahren	130
6.2.6	Geschlossenes Schienentransportverfahren	132
6.2.7	Transport-Flow-Pipe-Verfahren	136
6.3	Prinzipien zur berührungslosen und steuerbaren Kontrolle über den Freiheitsgrad X (Transportrichtung)	139
6.4	Zusammenfassung zur Kompensation lateraler Auslenkkräfte	140
<b>7</b>	<b>Konzeption und Umsetzung des Transport-Flow-Pipe-Verfahrens</b>	<b>142</b>
7.1	Versuchsstand Transport-Flow-Pipe-System	142
7.2	Versuche und Ergebnisse	146

## Inhaltsverzeichnis

---

7.3	Produktion von Glasobjektträgern	150
7.4	Bauelemente und Werkstücke anderer Produktionen	153
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Fazit</b>	<b>156</b>
8.1	Zusammenfassung	156
8.2	Bewertung und Ausblick	164
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>171</b>

---

## Abkürzungsverzeichnis

$\alpha$	Rotationswinkel um translatorische Gerade X
$\beta$	Rotationswinkel um translatorische Gerade Y
$\gamma$	Rotationswinkel um translatorische Gerade Z
A	Rotationswinkel um translatorische Gerade U
AP	<b>A</b> rbeits <b>p</b> unkt
B	Rotationswinkel um translatorische Gerade V
C	Rotationswinkel um translatorische Gerade W
CAD	(engl.) <b>c</b> omputer- <b>a</b> ided <b>d</b> esign, rechnerunterstützte Konstruktion
CPC	(engl.) <b>c</b> ontinuous <b>p</b> rocess <b>c</b> ontrol, kontinuierliche Prozessüberwachung
D	Durchmesser
DC	(engl.) <b>d</b> ip <b>c</b> oating, Tauchbeschichtung
DNA	<b>D</b> esoxyribon <b>u</b> kleins <b>ä</b> ure (kurz DNS, englisch DNA)
FD	Betriebsdruckluftkraft
FG	Gewichtskraft
FR	Reibungskraft
FT	Tragkraft
FDA	<b>f</b> ood and <b>d</b> rug <b>a</b> dministration (USA), Lebensmittelüberwachung
FMEA	<b>F</b> ehler <b>m</b> öglichkeiten- und <b>E</b> influss <b>a</b> nalyse
Ink-Jet	(engl.) Tintenstrahldrucker
IR	<b>I</b> nfrar <b>o</b> t

## Abkürzungsverzeichnis

---

m	Luftmassenstrom
P	Luftdruck
PU	Umgebungsluftdruck
PI	Prozessinnenluftdruck
SC	(engl.) <b>s</b> pin coating, Rotationsbeschichtung
U, V, W	translatorische Geraden, Beispiele Kapitel 3
X, Y, Z	translatorische Geraden, Herleitung: Transport-Flow-Pipe-Verfahren

# Abbildungsverzeichnis

## Kapitel 1

- 1.1 Mikroskopuntersuchung eines Glasobjektträgers  
(Quelle: [www.bigstock.de](http://www.bigstock.de))
- 1.2 Vereinfachter Produktionsablauf von beschichteten Glasobjektträgern
- 1.3 Homogenität von Oberflächenbeschichtungen (v.l.): manuell von Hand (inhomogen), Tauchbeschichtung (homogen), Ink-Jet-Druck (homogen)
- 1.4 Fehlererkennung auf Glasobjektträgeroberfläche durch Zeilenkamera während des Transportierens (v.l.): Kratzer, Partikellinie, Partikelschleier

## Kapitel 2

- 2.1 Fingerabdruck auf beschichtetem Glasobjektträger
- 2.2 Abgeplatzte Partikel an der Seitenkante eines Glasobjektträgers

## Kapitel 3

- 3.1 Handhaben als Teilfunktion des Materialflusses (VDI 2411 1970)
- 3.2 Körpereigenes- und Bezugskordinatensystem (VDI 2860 1990)
- 3.3 Orientierungs- und Positionierungsgrad von Körpern (VDI 2860 1990)
- 3.4 Teil- und Elementarfunktionen der Funktion Handhaben (VDI 2860 1990)

- 3.5 Transportband bewegt Glasobjektträger auf Werkstückträger
- 3.6 Greifvorrichtung: Veränderung der räumlichen Anordnung eines Werkstückes ohne Veränderung seines Orientierungs- und Positionierungszustandes in Bezug auf die Greifvorrichtung (hier: Dualbernoulligreifer)

## Kapitel 4

- 4.1 Die menschliche Hand als Greifvorrichtung
- 4.2 Ausbeuteverluste durch definierte Handhabungsflächen
- 4.3 Beispielhafte Darstellung einer Stapelvorrichtung für 5 Glasobjektträger
- 4.4 Zweifingergreifer mit Problematik der Bruchfase und Bestückschatten
- 4.5 Detailansicht einer beispielhaften Stapelvorrichtung
- 4.6 Zweifingergreifer greift auf definierten Oberflächenbereich
- 4.7 Glasobjektträger von Vakuumgreifer gehalten
- 4.8 Förderband mit Werkstückträger für Glasobjektträger
- 4.9 Tauchbeschichtung von Glasobjektträgern in einem Magazin
- 4.10 Digitaler Druckprozess auf transportiertem Glasobjektträger
- 4.11 Adhäsives Greifen durch einen Finger
- 4.12 Verschiedene Luftlagertypen und Luftverteilungen (Schroter 1995):
  - a) Einfachluftlager mit zentraler Düse
  - b) Vorkammerluftlager
  - c) Vorkammerluftlager mit Drossel
  - d) Lager mit flächig verteilten Düsen oder Sintermaterial
- 4.13 Vergleich zwischen Düsen- und Sinterluftlagern (FVM) (Schroter 1995)
- 4.14 Funktionsprinzip eines Luftkissengreifers (Siemens 1999)

- 4.15 Luftkissengreifer mit mechanischem Führungsanschlag (Heinzl 2004)
- 4.16 Dualbernoulligreifer bei der Handhabung von Glasobjektträgern
- 4.17 Tabelle Entscheidungskriterien zu bekannten Handhabungsverfahren

### Kapitel 5

- 5.1 Freiheitsgrade eines Glasobjektträgers
- 5.2 Freiheitsgrad (x-Richtung) eines Werkstückes in Transportvorrichtung
- 5.3 Lagerspalt zwischen einem Glasobjektträger und einer Transportfläche
- 5.4 Bewertungsgrade der Steifigkeit eines aerostatischen Lagers
- 5.5 Luftdruckverteilung im aerostatischen Lager mit Einzeldüse (links) sowie mit Einzeldüse und Vorkammertechnologie (rechts)
- 5.6 Vergleich von Luftdruckverteilung von Sinterluftlagern unter verschiedenen Betriebsluftdrücken
- 5.7 Unterwassertest zur Luftverteilung von porösem Sintermaterial
- 5.8 Versuchsstand zur Analyse verschiedener poröser Sintermaterialien
- 5.9 Sintermaterial nach Feinheitegrad - von 2  $\mu\text{m}$  (links) bis 120  $\mu\text{m}$  (rechts)
- 5.10 Ergebnisdiagramm des Versuches Betriebsdruck zu Luftdurchfluss
- 5.11 Ergebnisdiagramm des Versuches Luftdurchfluss zu Lagerspalthöhe
- 5.12 Ergebnisdiagramm des Versuches zur Analyse der Luftdruckverteilung
- 5.13 Ergebnisdiagramm des Versuches Lagerspalt zu Tragkraft
- 5.14 Tabelle zum Verhältnis Lagerspalt zu Tragkraft
- 5.15 Ergebnisdiagramm des Versuches Lagerspalt zu Steifigkeit
- 5.16 Tabelle zum Verhältnis Lagerspalt zu Steifigkeit
- 5.17 Luftdruckverteilung von Luftlagern durch verschiedene Sintermaterialien

- 5.18 Transportbahn aus flächigem Sintermaterial
- 5.19 Luftdruckverteilung bei flächigem Luftlager
- 5.20 Segmentierung der Transportfläche in Transportrichtung
- 5.21 Einsatz von rundem Sintermaterial als Transportoberfläche
- 5.22 Glasobjektträger auf rundem Sinterlager mit Flutterbewegungen
- 5.23 Schienensystem als Transportfläche für Glasobjektträger
- 5.24 Steifigkeit bei flächigem (links) und gleisförmigem Sinterlager (rechts)

## Kapitel 6

- 6.1 Freiheitsgrade mit und ohne Seitenführung auf Transportbahn
- 6.2 Freiheitsgrade der lateralen Auslenkkräfte
- 6.3 Transportbahn für verschiedene Seitenführungen
- 6.4 Transportbahn mit Seitenführungsschiene
- 6.5 Verkanteter (links) und gekippter (rechts) Glasobjektträger
- 6.6 Seitenführungsschiene mit Rillen
- 6.7 Führungsschiene mit Rillen und Düsen
- 6.8 Schräge Seitenführungsdüsen auf die Werkstückoberfläche
- 6.9 Transversale Neigung der Transportfläche gegen die Querachse
- 6.10 V-Verfahren zum Ausgleich entgegengesetzter Hangabtriebskräfte
- 6.11 Ergebnisse der Versuchsreihe des V-Verfahrens
- 6.12 V-Verfahren mit nach rechts und links verschobenem Glasobjektträger
- 6.13 Differenzdruckverfahren
- 6.14 90°-Verfahren in der Theorie
- 6.15 Starke Drucküberhöhung (links) durch Luftauslass (rechts) beseitigt

- 6.16 90°-Verfahren mit Vorschub des Werkstückes durch Luftdüse
- 6.17 Schienentransportverfahren zum berührungslosen Transport
- 6.18 Schienentransportverfahren in geschlossener Schutzhülle
- 6.19 Ein Überdruck in der Schutzhülle (links) wird durch zusätzliche Luftauslassöffnungen an den Seitenrändern verhindert (rechts)
- 6.20 Querschnitt des Transport-Flow-Pipe-Verfahrens
- 6.21 Beschleunigung eines Werkstückes in Transportrichtung

### Kapitel 7

- 7.1 Versuchsstand Transport-Flow-Pipe-System
- 7.2 Segmentierung der Transportbahn
- 7.3 Das Transport-Flow-Pipe-System – die Transportröhre
- 7.4 Ein Glasobjektträger wird durch eine Bewegungsvorrichtung berührungslos beschleunigt oder verzögert
- 7.5 Ein Glasobjektträger wird im Transportsystem berührungslos positioniert
- 7.6 Messwerte im Transport-Flow-Pipe-System
- 7.7 Mögliche automatisierte Glasobjektträgerproduktion mithilfe des Transport-Flow-Pipe-Verfahrens sowie innovativen Fertigungsprozessen
- 7.8 Teilespektrum in der Mikrosystemtechnik (Bark 1998)
- 7.9 Werkstücke unterschiedlicher Form transportiert durch das Transport-Flow-Pipe-Verfahren
- 7.10 Formlabile Werkstücke transportiert im Transport-Flow-Pipe-Verfahren

## Kapitel 8

### 8.1 Glasobjektträger gleitet auf Wasser als Transportmedium

# Kapitel 1

## Einleitung

In Kapitel 1 wird ein Überblick über die Ausgangssituation und Motivation dieser Arbeit gegeben. Diese werden in einen Kontext gesetzt und durch ein Beispiel begründet. Hieraus leitet sich im zweiten Abschnitt die Problemstellung ab, die durch ein weiteres Beispiel erläutert wird. Im letzten Abschnitt wird die Zielsetzung behandelt sowie ein kurzer Überblick über den Inhalt der weiteren Kapitel gegeben.

### 1.1 Ausgangssituation

Die Branchen Biotechnologie und Medizintechnik sind heutzutage einer rasanten Entwicklung ausgesetzt. Technischer Fortschritt ist in der Gesellschaft, unterstützt durch die Globalisierung, ein Standardmerkmal geworden. So liegt die technische Unterstützung im medizinischen Alltag im Fokus aktueller Forschungs- und Entwicklungsarbeiten. Ständig befinden sich neue Produkte auf dem Weg vom Labor zur Marktreife, wie beispielsweise molekulare Diagnostikchips (Biochips, Biosensoren), neue Analyseverfahren (etwa für Zellkulturen) oder Prozesse (wie funktionale Oberflächenbeschichtungen). Neben den USA hat Deutschland eine Vorreiterrolle für biotechnische Entwicklungen und Produktionen übernommen. Investitionen in Milliardenhöhe in den Standort Deutschland im Bereich der Arzneimittel und Diagnostika machten dies möglich

## 1 Einleitung

---

(Stadler 2005). Bei der Qualität und Leistungsfähigkeit technischer Einrichtungen und Produktionsanlagen teilt sich Deutschland mit den USA ebenfalls die Führungsposition (Stadler 2005).

Für diese Branchen werden zunehmende Wachstumschancen erwartet. Gerade in den westlichen Ländern, in denen immer älter werdende Menschen bereit sind, für Gesundheit und Wellness selbst zu zahlen, ist diese Entwicklung noch längst nicht abgeschlossen. Der Gesundheitsbereich ist bei 44 % der Biotechnologie-Unternehmen einer der wichtigsten Zweige der Branche (Step 2008).

### Individualisierte Krebstherapie

Ein Beispiel für eine solche Entwicklung findet sich in der Krebstherapie. Trotz großer Fortschritte in der Behandlung von Krebszellen versagen Therapien oder verursachen häufig starke Nebenwirkungen bei den Patienten. Die individualisierte Therapie ist nach Aussage von Ärzten und Wissenschaftlern die nächste Revolutionsstufe. Sie könnte die Überlebenschancen der Patienten verbessern sowie Nebenwirkungen minimieren.

Um die Therapie auf den einzelnen Patienten abzustimmen, kann mithilfe von sogenannten Biomarkern jedem Patienten eine individuelle Therapieform zugeordnet werden. Als Biomarker werden in der Medizin biologische Merkmale wie Zellen, Gene oder Enzyme bezeichnet, die objektiv gemessen werden können. Sie ermöglichen somit als Indikatoren eine tiefer gehende Aussage über Krankheiten. Auf nitrozellulosebeschichteten Glasobjektträgern basierende Biochips, auch Mikroarrays genannt, stellen eine vielversprechende Methode zur Auswertung solcher Biomarker dar (Espina 2011). Dabei können Signalproteine

(Biomarker), etwa zur Bestimmung von Krebszellen, durch die Zugabe verschiedener Antikörper erkannt werden. Proteinbasierte Biochips bilden somit auf oberflächenfunktionalisierten Glasobjektträgern das Messverfahren zur Auswertung neu entwickelter Biomarker.

Auf den beschichteten Glasobjektträgern werden die inneren Schaltkreise, sozusagen die Anatomie der Krebszellen eines Patienten, dargestellt. Dazu ist es zwingend erforderlich, dass die Glasobjektträger von sehr hoher Qualität sind (Liotta 2011). Als Maß für ihre Qualität sind die Merkmale Oberflächenreinheit und Unversehrtheit entscheidend. Diese Anforderungen werden in Kapitel 2 intensiver betrachtet und spezifiziert. Die Ergebnisse der Auswertungen von Biochips mit wertvollen menschlichen Proben haben großen Einfluss auf die Entscheidung der weiteren Behandlung eines Patienten. Sie sind unmittelbar von der Qualität der beschichteten Glasobjektträger abhängig (Liotta 2011).



*Abbildung 1.1 Mikroskopuntersuchung eines Glasobjektträgers*

# 1 Einleitung

---

Weitere Anwendungsbeispiele der Biochip-Technologie auf der Basis von beschichteten Glasobjektträgern finden sich in der Auswertung von Signalproteinen zu Melanomen, Leukämie, Brust-, Lungen- oder Eierstockkrebs (Espina 2011). Zukünftig ist es sogar denkbar, dass jede von der FDA zugelassene Therapie zur Individualisierung auf den einzelnen Patienten eine Messung von Biomarkern vorschreibt. Oberflächenbeschichtete Glasobjektträger bilden dazu die Grundlage (Petricoin 2011).

## 1.2 Problemstellung

Durch die positive Entwicklung der Branchen Biotechnologie und Medizintechnik steigt der Bedarf an qualitativ hochwertigen Glasobjektträgern (derzeit ca. 250.000 Stück/Jahr) stetig an. Gleichmaßen wächst die Variantenvielfalt dieser Produkte, beispielweise durch unterschiedliche Funktionalisierungen der Oberflächen. Durch den zusätzlich steigenden Kostendruck in Ländern mit relativ hohen Lohnkosten werden flexible Automatisierungslösungen erforderlich (Sinn 2007). Nur durch technischen Fortschritt und Innovationssprünge können die Kostennachteile durch höhere Effizienz neuer Verfahren und Prozesse gegenüber Mitbewerbern ausgeglichen sowie die Position des Standortes Deutschland verbessert werden (Milberg 1997).

Durch den Anstieg der Variantenvielfalt ist eine Vielzahl von unterschiedlichen Prozessschritten für jede Version erforderlich. Daher wird hier zur Veranschaulichung auf die Herstellung häufig verwendeter Aminosilan beschichteter Objektträger eingegangen. Zur besseren Übersicht ist die Darstellung vereinfacht worden.

## Produktion von oberflächenfunktionalisierten Glasobjektträgern

Der nachstehende Abschnitt beschreibt anhand der folgenden Abbildung 1.2 den derzeitigen Produktionsablauf bei der Herstellung von oberflächenfunktionalisierten Glasobjektträgern.

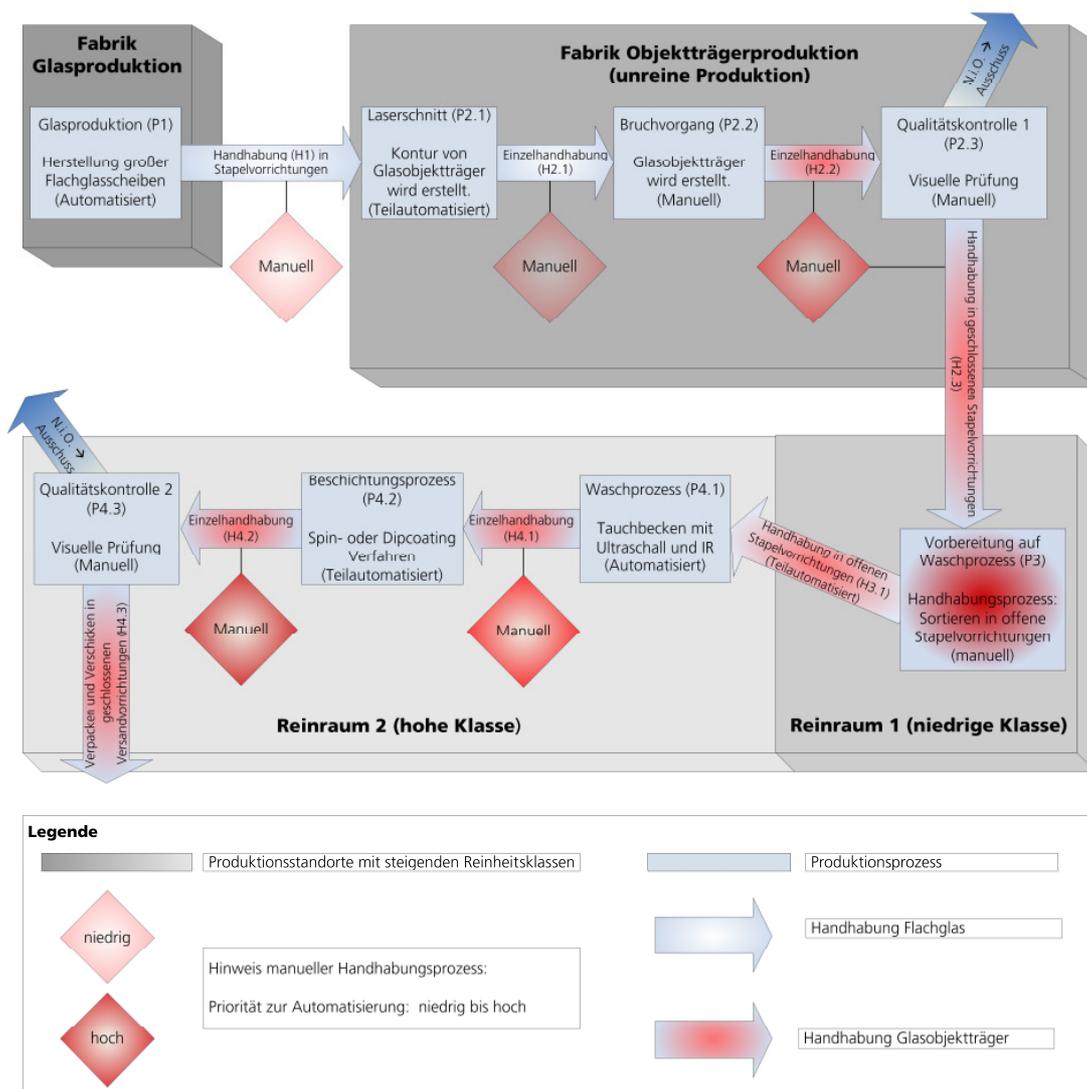


Abbildung 1.2 Vereinfachter Produktionsablauf von Glasobjektträgern

Zunächst werden in einer Fabrik große Flachglasscheiben hergestellt (P1). Auf deren Oberfläche werden anschließend durch moderne Laserschnittverfahren

## 1 Einleitung

---

die Konturen der Glasobjektträger geschnitten (P2.1). Von Hand werden diese dann vorsichtig entlang der Laserschnittkante einzeln in ihre Form gebrochen (P2.2). Bis zu diesem Prozessschritt verursacht die Herstellung sehr viel Schmutz in Form von Staub sowie Mikropartikeln. Sie kann deshalb nicht unter geschützten Bedingungen (Reinraum) durchgeführt werden.

Die Glasobjektträger werden im folgenden Fertigungsschritt bereits der ersten Qualitätskontrolle durch menschliche Begutachtung unterzogen (P2.3). Sind diese frei von mechanischen Beschädigungen, werden sie manuell in geschlossene Haltevorrichtungen von meist 25 Einheiten verpackt. Anschließend transportiert das Fertigungspersonal die befüllten Haltevorrichtungen in Reineräume niedriger Reinheitsklassen (H2.3). Zur Vorbereitung auf den automatisierten Reinigungsvorgang in Tauchbecken werden die Objektträger manuell aus den geschlossenen in offene Haltevorrichtungen umsortiert (P3).

Die durch den Herstellungsprozess stark verunreinigten Werkstücke belasten dabei die Reinraumumgebung. Die anschließenden Reinigungs- und Beschichtungsprozesse erfordern dadurch zum Schutz der funktionalen Oberfläche einen erneuten Standortwechsel. Dieses geschieht durch eine Schleuse in einen Reinraum höherer Schutzklasse. Der Produktionsablauf ist bei jeder Produktvariante bis zu diesem Prozessschritt gleich. Er unterscheidet sich erst im Folgenden durch unterschiedliche Herstellungsprozesse.

Die gebündelten Glasobjektträger werden nun automatisch dem Reinigungsprozess zugeführt (H3.1). Sie werden verschiedenen Reinigungsschritten in Tauchbädern unter Anwendung von Ultraschall unterzogen. Die Funktionsoberflächen werden dabei für den Beschichtungsprozess hochrein vorbereitet. Anschließend folgt eine Infrarottrocknung (P4.1).

Die Funktionalisierung der Oberflächen findet nachfolgend ebenfalls durch Tauch- oder Rotationsbeschichtungsverfahren statt (P4.2). Ein Mitarbeiter kontrolliert den zeitlichen Ablauf und stellt die Handhabungsvorrichtung zwischen und während der verschiedenen Prozesse dar (H4.1, H4.2).

Vor dem Verpacken der funktionalisierten Glasobjektträger und dem Versand an biomedizintechnische Labors (H4.3) erfolgt die abschließende Qualitätskontrolle jedes Einzelstückes durch den Menschen unter reinen Bedingungen (P4.3). Sind sie frei von Beschädigungen und Verunreinigungen, werden sie manuell in Versandvorrichtungen sortiert und anschließend luftdicht verschlossen.

### **Folgen verunreinigter Laborverbrauchsmittel**

Welche weitreichenden Folgen, beispielweise im biomedizintechnischen Bereich, eine nur minimale Verunreinigung des Ausgangsmaterials bei der Analyse von Probenmaterial haben kann, zeigte die Suche nach dem „Phantom von Heilbronn“. Das sogenannte Phantom wurde mit zahlreichen Einbrüchen und Morden in Verbindung gebracht. An verschiedenen Tatorten, verteilt durch Deutschland sowie Frankreich und Österreich, konnten übereinstimmende DNA-Spuren vom mutmaßlichen Täter nachgewiesen werden. Wie sich dann allerdings herausstellte, stammten die Spuren von einer Mitarbeiterin eines Unternehmens zur Verpackung von Medizinprodukten. Ihre DNA gelangte auf Wattestäbchen, die routinemäßig bei Untersuchungen am Tatort zur Sicherung von DNA-Spuren verwendet wurden. Sie waren also als Grundmaterial bereits vor der Verwendung kontaminiert (Spiegel 2009). Zur Folge hatte diese Verunreinigung eine mehrjährige polizeiliche Suche nach einem Phantom.

## 1 Einleitung

---

Das Verfahren zur Untersuchung von DNA-Proben ist standardisiert und Fehler sind nahezu ausgeschlossen. Obwohl man von einer Produktion der Wattestäbchen unter reinen Bedingungen und dem Tragen von Schutzkleidung durch das Personal ausgeht, ist die Qualität des Produktes Wattestäbchen sehr unterschiedlich. Im besten Fall sind diese steril, also frei von gefährlichen Bakterien oder anderen schädlichen Mikroorganismen, aber nicht frei von menschlicher DNA. Letztlich fehlen auch hier verpflichtende Standards und neue Produktionstechniken für die Herstellung dieser hochempfindlichen Produkte (Lubbadeh 2009). Der Einsatz von DNA verunreinigten Glasobjektträgern, beispielweise in der individualisierten Therapie von Krebserkrankungen, könnte dabei ebenfalls schwerwiegende Folgen haben (Kapitel 1.1).

### **Problematik bei der derzeitigen Produktion von Glasobjektträgern**

Um die Anforderungen an Reinheit und Unversehrtheit der Glasobjektträger während der Herstellung erfüllen zu können, stellt die durch steigende Stückzahlen und den Kostendruck benötigte Automatisierung bei der Produktion eine große Herausforderung dar. Bei den Stückzahlen wird in naher Zukunft ein Anstieg von aktuell 250.000 (Stand 2010) auf 1 Mio. Stück/Jahr und mittelfristig auf 10 Mio. Stück/Jahr erwartet.

Heutzutage sind nur einzelne Prozessschritte im Produktionsablauf durch Tauch- und Rotationsbeschichtungsverfahren teilautomatisiert. Dadurch stößt die Produktion bei ansteigenden Stückzahlen und einer zunehmenden Variantenvielfalt schnell an ihre Grenzen. Diese Verfahren sind durch viele Be- und Entladevorgänge langsam und nur schlecht geeignet für eine vollautomatisierte Produktion mit steigendem Durchsatz und somit schnelleren

Taktzeiten. Sie benötigen durch die Größe der Tauchbecken viel Platz und ein großes Totvolumen an Reinigungs- und Beschichtungsmaterial. Es macht sie zusätzlich unflexibel und unrentabel für die Produktion kleinerer Stückzahlen mit einer höheren Variantenvielfalt. Beispielsweise müssen bei einem Wechsel der Beschichtung die Tauchbecken aufwendig geleert, gereinigt und neu befüllt werden. Das ausgetauschte Beschichtungsmaterial muss anschließend entsorgt und kann somit nicht erneut verwendet werden. Dieses ist bei Beschichtungen aus Aminosilan ein erheblicher Kostenfaktor. Die übrigen Prozesse, beispielsweise die sich wiederholende Qualitätskontrolle, werden derzeit manuell durch geschultes Personal durchgeführt. Problematisch sind bei diesen Kontrollenmaßnahmen ebenfalls der Durchsatz und die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse. Verschiedene Mitarbeiter können die Reinheit durch subjektive Wahrnehmung unterschiedlich beurteilen. Oft kann sich das Urteilsvermögen ein und desselben Mitarbeiters mit zunehmender Arbeitsdauer ändern. Durch den Zeitdruck ist die Arbeit anstrengend und monoton. Dieses kann sich negativ auf die Kontinuität und Qualität der Abläufe auswirken. Ebenso wird die Handhabung zwischen den einzelnen Herstellungsprozessen zurzeit manuell realisiert. Es fehlt an geeigneten Greif- und Transportmöglichkeiten für die Fertigung solch empfindlicher Werkstücke (Teichert 2011). Die Automatisierung der vielen Pick-and-Place-Vorgänge beim Be- und Entladen der verschiedenen Stapelvorrichtungen (Abbildung 1.2) ist ein wichtiger Bestandteil für eine effiziente Produktion. Beim Einsatz von taktilen Greifern oder Transportvorrichtungen in Form von Förderbändern wurden allerdings massive Kontaminationen durch übertragende Partikel oder Beschädigungen durch Flächenpressungen festgestellt. Diese haben den Einsatz solcher Lösungen im

## 1 Einleitung

---

Herstellungsprozess bisher verhindert. Bekannte Handhabungstechnologien werden in Kapitel 4 genauer betrachtet, analysiert und verglichen.

Der Mensch ist daher ein entscheidender Faktor bei der Herstellung von oberflächenfunktionalisierten Glasobjektträgern. Ohne sein Einwirken ist die Handhabung der Werkstücke und somit eine vollständige Automatisierung derzeit nicht möglich. Allerdings kann er bei der Handhabung der Glasobjektträger, bedingt durch die anstrengenden und monotonen Arbeitsabläufe, unter Zeitdruck auch Fehler verursachen. Zusätzlich stellt der Mensch gegenüber automatisierten Verfahren bei steigenden Stückzahlen einen erheblichen Kostenfaktor dar. Denn der höhere Bedarf an Glasobjektträgern erfordert gleichzeitig eine höhere Produktivität, die derzeit aber nur durch die Verstärkung des Personals und somit weiteren Kosten erreichbar ist.

Die Gewährleistung der erforderlichen Produktionsreinheit stellt eine weitere Herausforderung an die Automatisierung dar. Nicht nur durch mechanischen Kontakt kann eine Verunreinigung entstehen, sondern auch kleinste, über die Luft übertragene Partikel können zu einer Kontamination der beschichteten Oberfläche führen und somit deren Funktion beeinträchtigen (Franzkowiak 2005). Die Fertigung von Glasobjektträgern funktioniert daher nur unter hochreinen Bedingungen zuverlässig. Durch die Verlegung der Produktion in Reinräume werden diese Anforderungen derzeit wenigstens teilweise erfüllt. Diese Lösung stellt aber nur einen Kompromiss auf Zeit dar. Denn auch dort stehen heute verfügbare Automatisierungssysteme oder der Mensch vor bislang nicht erfüllbaren Aufgaben. Sie stellen auch unter reinen Bedingungen Partikelquellen dar (Gommel 2005) und erhöhen somit selbst im Reinraum die Gefahr der Kontamination der Glasobjektträger (Kapitel 2).

Durch die Produktionsbedingungen entstehen für das herstellende Personal weitere Probleme. Die eintönigen und unter Zeitdruck ausgeführten Arbeiten werden durch die Verlegung der Produktion in eine reine Umgebung und dem damit verbundenen Tragen von Schutzkleidung sowie Mundschutz und Haube nochmals erschwert. Für die erforderlichen Pausen muss die Kleidung beim Betreten und Verlassen des Reinraumes stets aufwendig gewechselt werden. Dieses führt wiederum zu Zeitverlusten.

Das Betreiben eines Reinraumes stellt einen enormen Kostenfaktor dar. Sie werden daher zumeist sehr klein gehalten, um die Kosten so gering wie möglich zu halten. Bei einer Ausweitung der Produktion ist es aber derzeit notwendig, zusätzliches Personal einzustellen, um dem erhöhten Durchsatz gerecht werden zu können. Dadurch steigt gleichzeitig der Platzbedarf in den Reindräumen für die zusätzlichen Produktionshelfer. Dieses würde zwangsläufig zu kostenintensiven Kapazitätserweiterungen führen.

Bei den ersten Produktionsschritten erschwert zusätzlich die Entstehung von Staub und Verunreinigungen die Prozessbedingungen. Um die Reinraumumgebung nicht zu belasten, müssen diese Prozesse deswegen außerhalb von Schutzräumen stattfinden. Da aber nach der Reinigung der Glasobjektträger zum Schutz der Oberfläche reine Umgebungen erforderlich sind, muss die Fertigung während des laufenden Prozesses verlegt werden. Dieses bedeutet erneut einen Zeitverlust, logistischen Aufwand und die Gefahr, die empfindlichen Werkstücke zu beschädigen.

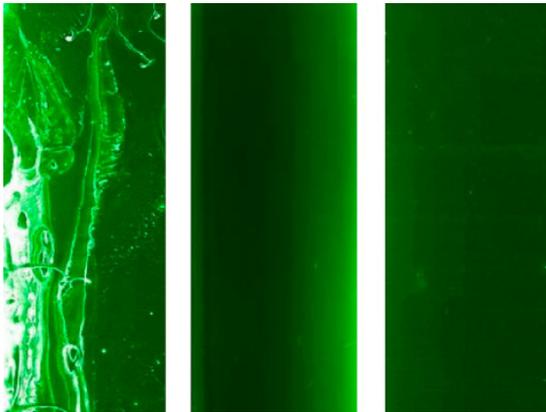
### 1.3 Zielsetzung und Vorgehensweise

Die beschriebene Produktion von beschichteten Glasobjektträgern benötigt derzeit eine Vielzahl unterschiedlicher, teilautomatisierter oder manueller Prozesse in verschiedenen Prozessumgebungen. Die Reinigung und Beschichtung der Glasobjektträger in Tauchbecken mithilfe von Stapelvorrichtungen ist aufwendig, langsam und zieht eine Menge von Pick-and-Place-Vorgängen nach sich. Diese manuellen Handhabungsvorgänge stoßen schnell an die Grenzen möglicher Taktzeiten sowie reproduzierbarer Qualität. Die Qualitätskontrolle durch den Menschen ist für die schnell steigenden Stückzahlen weder effizient noch zuverlässig möglich (Kapitel 1.2).

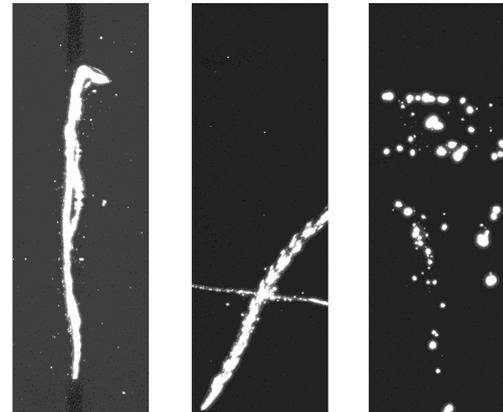
#### **Innovative Produkte erfordern angepasste Automatisierungslösungen**

Die Faktoren Miniaturisierung, Funktionsintegration und Zuverlässigkeit spielen bei der Herstellung von Biochips und somit von Glasobjektträgern eine entscheidende Rolle. Diese Eigenschaften führen zu steigenden Qualitätsanforderungen dieser innovativen Analysemethoden. Oberflächenfunktionalisierte Glasobjektträger benötigen daher neue Produktionsverfahren. Durch die zusätzlich stark ansteigenden Stückzahlen mit einer hohen Variantenvielfalt sind flexible Automatisierungslösungen erforderlich. Diese sollen den Menschen als Teil des Herstellungsprozesses ersetzen. Das Fertigungspersonal könnte in der Folge mit qualifizierten Aufgaben beauftragt werden. Ein positiver Nebeneffekt wären die verbesserten Arbeitsbedingungen des Produktionspersonals.

Die Entwicklung von flexiblen Automatisierungslösungen für die Herstellungsprozesse sind nicht Teil dieser Arbeit, werden aber zur Vollständigkeit und dem besseren Verständnis an dieser Stelle kurz vorgestellt. Im behandelten Beispiel, der Produktion von Aminosilan beschichteten Glasobjektträgern, sind es die Prozesse Reinigung, Beschichtung und Qualitätskontrolle (Abbildung 1.2).



*Abbildung 1.3 Homogenität von Oberflächenbeschichtungen (v.l.): manuell von Hand (inhomogen), Tauchbeschichtung (homogen), Ink-Jet-Druck (homogen)*



*Abbildung 1.4 Fehlererkennung auf Glasobjektträgeroberfläche durch Zeilenkamera während des Transportierens (v.l.): Kratzer, Partikellinie, Partikelschleier*

Für die beschriebenen Reinigungs- und Beschichtungsprozesse wurden bei der Produktion von Aminosilan beschichteten Glasobjektträgern innovative Technologien mittels digitaler Drucktechnik entwickelt. Durch kontaktlosen Ink-Jet-Druck kann die Oberfläche der Glasobjektträger gereinigt und funktionalisiert werden. Die Vorteile der digitalen Drucktechnik bei vergleichbarer Oberflächenqualität (hinsichtlich Homogenität und Kontaktwinkel) gegenüber Tauchbeschichtungsverfahren sind deutlich erhöhte

## 1 Einleitung

---

Taktzeiten im Single-Pass-Modus, ein geringeres Totvolumen an Beschichtungsmaterial, weniger Platzbedarf und eine flexible sowie digitale Einsatzmöglichkeit bei unterschiedlichen Herstellungsvarianten.

Die Qualitätskontrolle kann durch Zeilenkameras automatisiert erfolgen (Abbildung 1.4). Die entstandenen Bilder können parallel zum Fertigungsprozess durch Softwaresysteme ausgewertet und beurteilt werden. Dieses Verfahren funktioniert ebenfalls kontaktlos im Single-Pass-Modus, während ein einzelnes Werkstück entlang der Prozessstation transportiert wird. Höhere Taktzeiten und ein reproduzierbares Ergebnis, durch die Erkennung und Beurteilung von Fehlern durch Softwarealgorithmen anstelle des Menschen, sind die entscheidenden Vorteile beim Einsatz solcher Systeme.

### **Optimierte Handhabung von oberflächensensitiven Glasobjektträgern**

Das Ziel dieser Arbeit ist, die Handhabung der oberflächensensitiven Glasobjektträger während der Fertigung zu optimieren. Die vielen Pick-and-Place-Vorgänge durch den Menschen zwischen und während der einzelnen Prozesse verlangsamen den Durchsatz, beinhalten jeweils die Gefahr von Partikelkontamination oder Beschädigung und sind letztlich in ihrer Qualität und Taktzeit nicht reproduzierbar. Eine effiziente und qualitativ hochwertige Produktion von funktionalisierten Glasobjektträgern ist bei einer vollständigen Automatisierung der Prozessschritte aber auch von der Handhabung der Werkstücke zwischen den einzelnen Bearbeitungsschritten abhängig.

Zu diesem Zweck soll ein vollautomatisierbares Verfahren entwickelt werden. Dieses soll reproduzierbar und unter Beachtung der Anforderungen an Reinheit und Unversehrtheit (Kapitel 2) die Handhabung oberflächensensitiver

Glasobjektträger ermöglichen. Die erschwerten Herstellungsbedingungen außerhalb und innerhalb von Reinräumen sowie die Möglichkeiten flexibel und mit einem hohen Durchsatz zu fertigen, sollen dabei Beachtung finden. Angestrebt sind bei einer automatisierten Anlage 3 Millionen Stück pro Jahr, was bei 250 Produktionstagen im Jahr und 10 Stunden Fertigung pro Tag 3 Sekunden pro Glasobjektträger ergibt.

### **Vorgehensweise und Kapitelübersicht**

Zur Definition einer detaillierten Aufgabenstellung werden in Kapitel 2 zunächst die speziellen Anforderungen in Bezug auf Reinheit und Unversehrtheit von Glasobjektträgern ausführlich betrachtet und spezifiziert. Diese finden bei den anschließenden Versuchsreihen zur Entwicklung eines Handhabungsverfahrens Beachtung. Zur Analyse bekannter Technologien wird in Kapitel 3 zunächst der Begriff Handhabung nach einer Richtlinie des VDI definiert und die unterschiedlichen Möglichkeiten sowie Verfahren dargestellt. Anschließend werden in Kapitel 4 im Stand der Technik sowohl taktile wie auch bekannte berührungslose Verfahren zur Handhabung von oberflächensensitiven Glasobjektträgern beschrieben, miteinander verglichen und abschließend bewertet. Im letzten Abschnitt des vierten Kapitels wird die Aufgabenstellung zur Entwicklung eines Handhabungsverfahrens für Glasobjektträger aus den Analysen und Bewertungen der vorangegangenen Untersuchungen der Kapitel 2 bis 4 definiert.

In Kapitel 5 werden durch eine Versuchsreihe Prinzipien zur berührungslosen Kompensation der Gewichtskraft eines Glasobjektträgers dargestellt und bewertet. Dazu werden zunächst einige grundlegende Technologien

## 1 Einleitung

---

beschrieben und analysiert. Die zur berührungslosen Kontrolle über Werkstücke nötige Kompensation lateraler Auslenkkräfte wird in Kapitel 6 zunächst definiert. Es folgt die Beschreibung einer Versuchsreihe zu fluidischen Zentrierkräften sowie eine Bewertung der einzelnen Technologien. Sie endet mit der Entwicklung des Transport-Flow-Pipe-Verfahrens.

In Kapitel 7 wird der Aufbau eines Versuchstandes, dem Transport-Flow-Pipe-System, zur Validierung des in Kapitel 6 entwickelten Verfahrens beschrieben. Durchgeführte Versuche werden dargestellt und die Ergebnisse bewertet. Ein Modell zum Einsatz in die beschriebene Glasproduktion sowie die Umsetzbarkeit auf Werkstücke anderer Formen und Produktionen wird ebenfalls in Kapitel 7 beschrieben. Den Abschluss bildet Kapitel 8 mit einer kurzen Zusammenfassung. Anschließend wird das entwickelte Transport-Flow-Pipe-Verfahren aus technischer und wirtschaftlicher Sicht bewertet sowie ein Ausblick in weitere Entwicklungsmöglichkeiten gegeben.

### Kapitel 2

## Anforderungen an die Handhabung oberflächensensitiver Glasobjektträger

In diesem Kapitel werden die spezifischen Eigenschaften von funktionalisierten Glasobjektträgern betrachtet. Die daraus resultierenden Anforderungen an die Handhabung während der Produktion im Hinblick auf die Qualitätsmerkmale Reinheit und Unversehrtheit werden beschrieben und spezifiziert. Dabei werden primär die Eigenschaften Oberflächensensitivität, Kontaminations- und Bruchempfindlichkeit der Werkstücke für eine schonende Handhabung analysiert.

### 2.1 Merkmale hoher Qualität von Glasobjektträgern

Glasobjektträger werden in vielen Bereichen, hauptsächlich aber in der biomedizinischen Technik, eingesetzt. Beispielsweise werden sie zur DNA-Analyse oder zum Auswerten von Biomarkern durch Biochips oder Mikroarrays genutzt (Kapitel 1). Sie werden auch Traggläser genannt und sind in einer Standardgröße von 76 mm x 26 mm (Abweichungen  $\pm 0,1$  mm) und einer Dicke von 1 mm bis 1,5 mm (Abweichungen  $\pm 0,05$  mm) nach ISO 8255 genormt (ISO 8255 2011). Darüber hinaus sind viele andere Formen und Größen erhältlich: Beispielsweise Mikrotiterplatten in den Abmaßen 100 mm x 74 mm

## 2 Anforderungen an die Handhabung oberflächens. Glasobjektträger

---

(Dicke 1 mm) oder Deckgläser in den Abmessungen 435 mm x 410 mm und Dicken von maximal 0,2 mm.

In den nachfolgenden Versuchsreihen zur Handhabung werden nur Glasobjektträger der Standardmaße von 76 mm x 26 mm betrachtet. Diese stellen die Grundlage für biomedizinische Entwicklungen dar. Sie besitzen während und nach der Produktion folgende Merkmale und Anforderungen an eine schonende Handhabungstechnologie: Sie sollten frei von Farbverfälschungen und hochtransparent sein (Reinheit). Zusätzlich ist eine sehr planare und homogene Oberfläche erforderlich (Unversehrtheit).

An diese Merkmale werden hohe bis sehr hohe Qualitätsanforderungen gestellt, um ein möglichst maximales Signal-/Rauschverhältnis bei einer mikroskopischen oder analytischen Betrachtung zu erhalten. Selbst minimale Beschädigungen oder Verunreinigungen können fatale Folgen haben (Kapitel 1). Bei der Produktion spielen daher die spezifischen Eigenschaften Kontaminationsempfindlichkeit und Oberflächensensitivität sowie die fragile Seitenkante der Glasobjektträger eine wichtige Rolle. Neben diesen Merkmalen und Anforderungen an die Handhabung gibt es weitere Qualitätskriterien für Glasobjektträger. Diese stehen aber nicht in direktem Zusammenhang mit dem Einsatz von Handhabungstechnologien und werden nur der Vollständigkeit halber sowie zu einem besseren Verständnis an dieser Stelle genannt. Mikroskopglasobjektträger sollten zur funktionalen Beschichtung eine hohe chemische Beständigkeit und Benetzbarkeit beider Oberflächenseiten aufweisen. Für Mikroskopuntersuchungen werden hohe spektrale Transmissionen und eine niedrige Eigenfluoreszenz erwartet, um ein möglichst maximales Signal-/Rauschverhältnis bei der Betrachtung zu erhalten. Diese Merkmale werden bereits bei der Glasherstellung entscheidend beeinflusst und bestimmt.

### 2.2 Oberflächensensitivität und Kontaminationsempfindlichkeit

Die empfindlichen Funktionsoberflächen der Glasobjektträger bilden die Grundlage für alle mikroskopischen und analytischen Anwendungen. Sie sind sowohl im beschichteten als auch im unbeschichteten Zustand anfällig für verschiedene Fehlerquellen. Diese können in zwei Kategorien unterteilt werden: zum einen in mechanische Beschädigungen (Unversehrtheit), zum anderen in Fehler durch Verschmutzung und Kontamination (Reinheit). Kontaminationen durch Mikropartikel in Form von Keimen oder DNA führen nicht nur zu einem schlechten Signal-/Rauschverhältnis, sondern können die Auswertung von Biomarkern durch Biochips sogar unbemerkt verfälschen. Hierbei ist zu beachten, dass sowohl die Oberseite als auch die Unterseite der Glasobjektträger von hoher Qualität sein muss. Zwar wird häufig nur eine Seite zur Auswertung herangezogen, aber Fehler auf der Unterseite können das Ergebnis trotzdem negativ beeinflussen. Sie führen beispielsweise zu falschen Lichtreflexionen oder irreführenden Farbgebungen.

#### **Fehlerquelle mechanische Beschädigungen (Unversehrtheit)**

Mechanische Beschädigungen, beispielsweise in Form von Kratzern oder Mikrorissen, können bereits bei der Herstellung und Verarbeitung großer Flachglasscheiben entstehen. Sie sollten bei einer ersten Qualitätskontrolle entdeckt und aussortiert werden. Wichtig zu diesem Zeitpunkt der Produktion ist die Klassifizierung der Fehlermerkmale. Denn durch den bisher sehr unreinen Herstellungsprozess in normaler Fabrikumgebung sind die Glasobjektträger massiv mit Fehlern durch Verschmutzungen und Kontaminationen aus

## 2 Anforderungen an die Handhabung oberflächens. Glasobjektträger

---

Umwelteinflüssen behaftet. Diese spielen zu diesem Zeitpunkt aber keine Rolle, da die erforderlichen Reinigungsprozesse im Laufe der weiteren Herstellung noch folgen. Die Glasobjektträger dürfen also bis zu diesem Prozessschritt nur aufgrund von mechanischen Beschädigungen aussortiert werden.

Für das Qualitätskriterium Unversehrtheit der Oberflächen ist entscheidend, diese ab der ersten Qualitätskontrolle frei von mechanischen Beschädigungen sowohl bei der Bearbeitung als auch bei der Handhabung zu halten. Als Maß für die Unversehrtheit gilt derzeit die Genauigkeit des geschulten menschlichen Auges. Kratzer oder Mikrorisse können bis zu einer Genauigkeit von ungefähr 1 µm bis 2 µm erkannt werden.

### **Fehlerquellen Verschmutzung und Kontamination (Reinheit)**

Zusätzlich zu den mechanischen Beschädigungen sind die Glasobjektträger anfällig für Fehler durch Kontaminationen oder Verschmutzungen aus Umwelteinflüssen sowie Partikelverschleppungen. Unter Kontamination eines Objektes wird die unerwünschte Verunreinigung eines ursprünglich keimfreien oder keimarmen Gegenstandes durch Bakterien oder andere Mikroorganismen verstanden. Verschmutzungen können beispielweise Staub- oder Mikropartikel sein. Die Kontaminations- und Verschmutzungsempfindlichkeit der Glasobjektträger ist bei der Handhabung allerdings erst nach einem ersten Reinigungsprozess während der Produktion zu berücksichtigen. Die durch das Herstellungsverfahren des Ausgangsmaterials (Flachglasscheiben) bedingte Kontamination oder Verschmutzung der Oberflächen kann dabei meist durch verschiedene Lösungsmittel wieder entfernt werden.

Nach dem Reinigungsprozess sind die Glasobjektträgeroberflächen hochrein. Sie bilden dadurch sowie durch eine hohe Benetzbarkeit der Oberfläche eine haftende Grundlage für Partikel. Einerseits ist dieses für die Probenmaterialien erwünscht, andererseits aber auch unerwünscht für alle Fremdpartikel. Diese Eigenschaft wird durch die anschließende funktionale Beschichtung verstärkt. Denn sie bildet zumeist eine zusätzlich haftende Grundlage für das Probenmaterial.

Die Reinigungs- und Beschichtungsprozesse finden bereits in einem Reinraum der Klasse 100 (alte US-Norm, neu: ISO 5 nach ISO 14644-1) statt (Abbildung 1.2). So wird sichergestellt, dass Partikel wie Staub sowie Feinstaub aus Umwelteinflüssen keinen Einfluss mehr auf die Reinheit der Glasobjektträger haben. Mit der Reinraumklasse 100 werden maximal 3.520 Partikel mit einer maximalen Größe von 0,5  $\mu\text{m}$  in einem Raum von 1  $\text{m}^3$  toleriert. In einem Reinraum der neuen Norm ISO 5 sind es maximal 832 Partikel bis zu einer Größe von 1  $\mu\text{m}$ . Dies ist ein sehr geringer Wert. Ein Vergleich: In einer Stadt sind in ebenfalls 1  $\text{m}^3$  Luft bereits 100 Mio. Partikel kleiner als 0,5  $\mu\text{m}$  sowie immerhin 100.000 Partikel mit einer Größe von bis zu 5  $\mu\text{m}$  zu finden.

Bei Kontaminationen oder Verschmutzungen der Oberflächen ist das gleiche Qualitätsmerkmal wie bei der Unversehrtheit entscheidend. Erkannt werden sollten bei einer Qualitätskontrolle Partikel und Mikroorganismen bis zu einer Mindestgröße von 1 - 2  $\mu\text{m}$ . Diese sollten nach dem Reinigungsprozess durch die Reinraumumgebung ausgeschlossen sein. Außer sie werden bei der Handhabung durch den Menschen oder durch ein Automatisierungssystem verschleppt und auf die Werkstücke übertragen.

Dass bei der Qualitätskontrolle erkannte Fehler klassifiziert werden können (Kapitel 1), ist auch nach dem Reinigungsprozess von großer Bedeutung. Denn

## 2 Anforderungen an die Handhabung oberflächens. Glasobjektträger

---

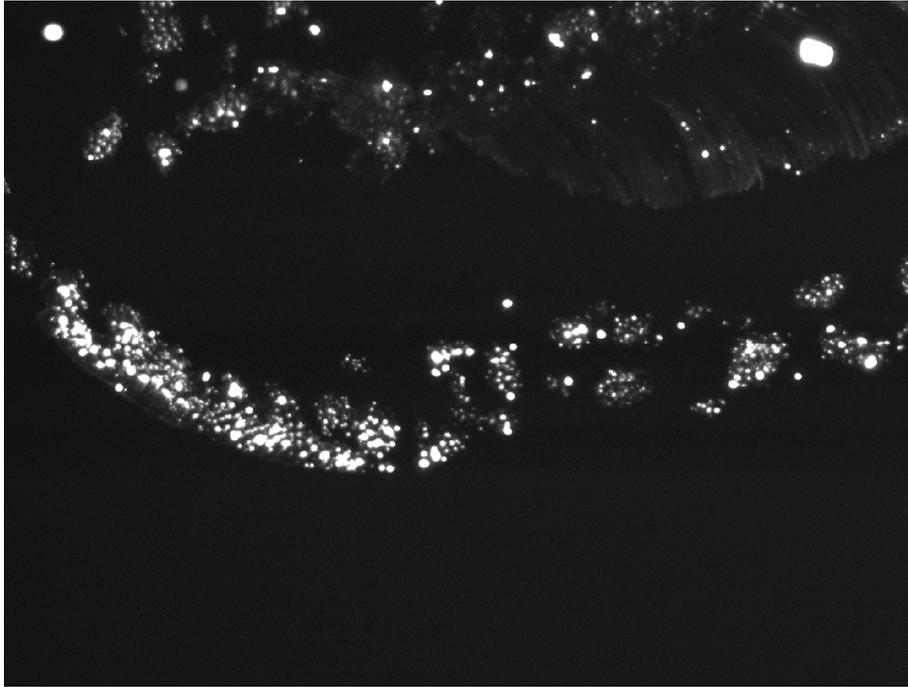
die Qualitätsmerkmale Reinheit und Unversehrtheit können auch zu einem späteren Produktionszeitpunkt unterschiedlich behandelt werden. Während beschädigte Glasobjektträger nicht mehr verwendet werden dürfen, können lediglich verunreinigte Glasobjektträger an den Anfang der Prozesskette zurückgeführt werden. Eine erneute Reinigung kann die Verschmutzungen beseitigen. Dieser Aspekt sollte sowohl bei der Qualitätskontrolle, als auch bei einer Handhabungsvorrichtung Beachtung finden.

### **Reinheitsprobleme der manuellen Produktion**

Durch die derzeitige manuelle Handhabung der Glasobjektträger bildet der Mensch im Reinraum trotz Reinheitsbestimmungen eine zusätzliche Partikelquelle. Er kann bereits beim einfachen stillen Sitzen in einer Minute 100.000 Partikel mit einer Größe von über 0,5 µm verlieren. Dieses können beispielweise abgestorbene Hautteilchen, Haare oder auch Schweiß sein. Bei aktiven Bewegungen für die Produktion können es bis zu 1 Mio. Partikel pro Minute werden (Nappi 1995). Da der Mensch derzeit für die Handhabung in der Produktion unverzichtbar ist, muss dieses Risiko aber akzeptiert werden.

Das Tragen von Schutzkleidung sowie Handschuhen und Hauben soll diese Verunreinigungen verhindern. Die beschichteten Oberflächen stellen die Funktionsschicht der Glasobjektträger dar und dürfen unter keinen Umständen berührt werden (Teichert 2011). Dennoch können Kontaminationen unter anderem mit gefährlichen Keimen, Mikroorganismen oder auch menschlicher DNA nicht vollständig ausgeschlossen werden. Diese Verunreinigungen können aber häufig nicht durch eine einfache Qualitätskontrolle nachgewiesen werden. Sie sind zu klein und werden weder vom menschlichen Auge noch von

hochauflösenden Kameras erkannt. Sie müssten durch chemische Testverfahren ermittelt werden und verbleiben somit bisher unbemerkt auf den Glasobjektträgern, denn der Aufwand solcher Untersuchungen ist meist zu groß.

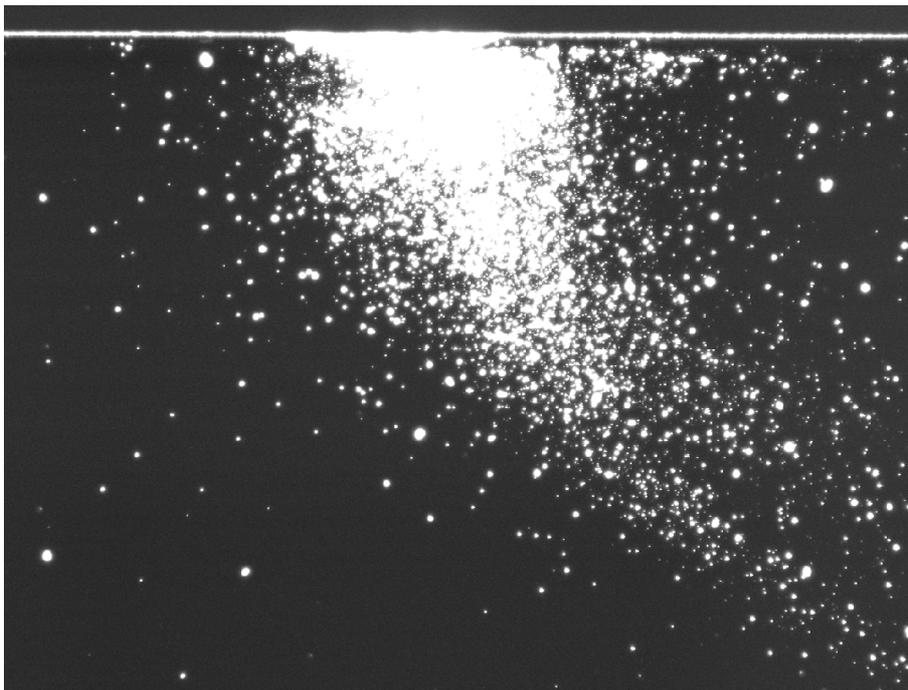


*Abbildung 2.1 Fingerabdruck auf beschichtetem Glasobjektträger*

Aus den genannten Gründen wird im Folgenden stets darauf geachtet und analysiert, wie sich das zu entwickelnde Handhabungsverfahren auf die Qualitätskriterien Reinheit und Unversehrtheit der Glasobjektträgeroberflächen auswirkt.

### 2.3 Fragile Seitenkanten und Flächenpressungen

Durch das innovative Laserschnittverfahren weisen Glasobjektträger an den Seitenkanten eine hohe Qualität in Bezug auf eine genaue Schnittkante und einer minimalen Anzahl von Mikrorissen auf. Trotzdem stellt die fragile Seitenkante eine Schwachstelle dar. Sie weist produktionsbedingt die Form einer leicht unregelmäßigen Fase auf. Besteht bei der Handhabung zwischen zwei Festkörpern, beispielweise einem Glasobjektträger und einer taktilen Greifervorrichtung (Hand oder Greifer), ein das Werkstück einspannender Kontakt, tritt durch die Kraft zwischen den Flächen der Festkörper eine Flächenpressung auf.



*Abbildung 2.2 Abgeplatzte Partikel an der Seitenkante eines Glasobjektträgers*

Diese mechanische Wirkung auf die Seitenkante kann zu Absplitterungen oder Mikrorissen führen. Eine weitere negative Auswirkung besteht dann in der

Verunreinigung der Oberflächen der Glasobjektträger durch die abgeplatzten Partikel. Bei der Handhabung eines Glasobjektträgers durch taktile, einspannende Greiferfinger ist die Form der Seitenkante problematisch. Es treffen durch die unregelmäßige Fase keine zwei ebenen Flächen aufeinander, bei denen sich die Krafteinwirkung gleichmäßig verteilen könnte. Lediglich die äußere Kante des Glasobjektträgers wird von der Handhabungsvorrichtung eingespannt. Somit entsteht eine punkt- oder linienförmige Krafteinwirkung, die eine deutlich höhere Intensität besitzt.

Die Fertigungstoleranzen der Glasobjektträger von bis zu  $\pm 0,1$  mm beeinflussen zusätzlich den Greifvorgang. Beim automatisierten Greifen wird im Moment des Formschlusses die Greifkraft reduziert, um das Werkstück nicht durch die Krafteinwirkung zu beschädigen. Dieses ist auch beim Einsatz von Greifern für Glasobjektträger sinnvoll, um die Seitenkante zu entlasten. Der Formschluss kann bei exakten Werkstücken durch eine präzise Steuerung ohne aufwendige Sensorik reproduzierbar hergestellt werden. Bei zu großen Fertigungstoleranzen muss das Werkstück aber zunächst durch einen mechanischen Kontakt detektiert werden, sodass eine Regelung die Greifkraft anschließend reduziert. Durch die Abweichungen in den Abmaßen der Glasobjektträger kann es dabei kurzzeitig zur vollen Greifkrafteinwirkung auf die Seitenkante kommen. Diese kann dann zu den beschriebenen Abplatzern und Mikrorissen führen.

Diese Probleme müssen bei der Analyse vorhandener taktile Handhabungsmethoden Beachtung finden und werden in Kapitel 4 näher beschrieben und analysiert. Bei einem Verfahren zur Handhabung von Glasobjektträgern muss folglich eine Beschädigung der Seitenkanten durch Flächenpressungen nahezu ausgeschlossen werden können.

### Kapitel 3

## Definition von Materialfluss und Handhabung

Dieses Kapitel beinhaltet eine Definition der Begriffe Handhabung und Materialfluss sowie deren Einordnung in den Kontext dieser Arbeit. Es soll dazu dienen, die zum Verständnis benötigten Ausdrücke und Begriffe Handhabung, Greifen und Transportieren präzise zu definieren und voneinander abzugrenzen.

### 3.1 Einordnung der Begriffe Materialfluss und Handhabung

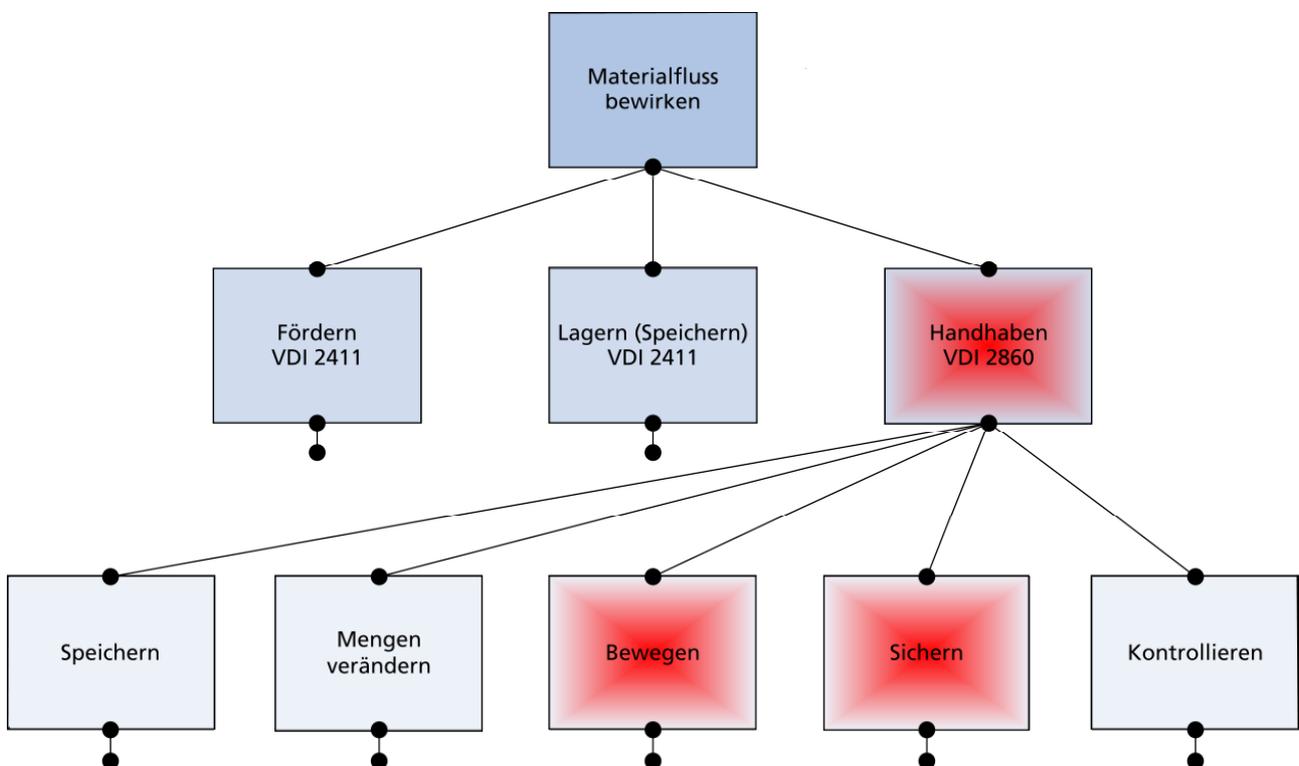


Abbildung 3.1 Handhaben als Teilfunktion des Materialflusses (VDI 2411 1970)

### 3 Definition von Materialfluss und Handhabung

Nach einer Definition der VDI-Richtlinie 2411 ist die Handhabung eine Teilfunktion des Materialflusses. Dieser ist dort wie folgt definiert: „... die Verkettung aller Vorgänge beim Gewinnen, Be- und Verarbeiten sowie bei der Verteilung von Gütern innerhalb festgelegter Bereiche. Zum Materialfluss gehören alle Formen des Durchlaufes von Arbeitsgegenständen (zum Beispiel Material, Stoffmengen, Datenträger) durch ein System“ (VDI 2411 1970). Weitere Teilfunktionen des Materialflusses sind das Fördern und Lagern. Der Unterschied zwischen der Teilfunktion Handhabung und den Teilfunktionen Fördern und Lagern besteht in ihren Bedingungen. Für das Lagern und Fördern ist nur die Positionsbedingung, beispielsweise der Lagerort, vorgegeben. Sie beziehen sich auf formlose Stoffe wie Gase, Flüssigkeiten oder Pulver.

Bei der Handhabung ist zusätzlich die Orientierung des zu handhabenden Körpers zu beschreiben. Es ist somit auf geometrisch bestimmte Körper, wie Glasobjektträger, zu beziehen. Das Bezugskoordinatensystem (Abbildung 3.2, rechts) ist das den Körper umgebende System (U, V, W). So erklärt es auch Arnold in seiner Ausführung über Materialflusslehre (Arnold 1998). Weiterführend beschreibt die VDI-Richtlinie 2860 das Handhaben als „das Schaffen, definierte Verändern oder vorübergehende Aufrechterhalten einer vorgegebenen räumlichen Anordnung von geometrisch bestimmten Körpern in einem Bezugskoordinatensystem“ (VDI 2860 1990).

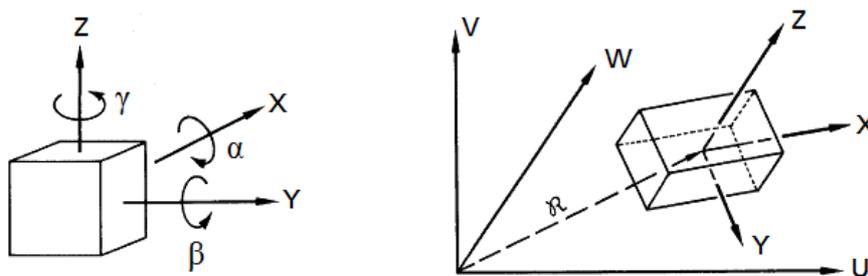


Abbildung 3.2 Körpereigenes- und Bezugskoordinatensystem (VDI2860 1990)

### 3 Definition von Materialfluss und Handhabung

---

Das körpereigene Koordinatensystem beschreibt den zu handhabenden Körper mit sechs Freiheitsgraden, jeweils drei translatorischen ( $X, Y, Z$ ) sowie rotatorischen ( $\alpha, \beta, \gamma$ ). Bewegungen verändern seine räumliche Anordnung und lassen sich anhand seiner Ausgangsorientierung und Ausgangsposition eindeutig beschreiben. Die Bezugspunkte beider Koordinatensysteme können frei gewählt werden. Es empfiehlt sich für das Bezugskordinatensystem die Handhabungseinrichtung und beim körpereigenen Koordinatensystem ein Eckpunkt des zu handhabenden Körpers als Ursprung zu wählen.

#### 3.2 Ordnungszustand eines Werkstückes

Um verschiedene Unterfunktionen des Handhabens beschreiben zu können, ist zunächst der Ordnungszustand eines Körpers zu bestimmen. Dieser beschreibt den Grad der Bestimmtheit des körpereigenen Koordinatensystems und somit dessen Freiheitsgrade. Das körpereigene Koordinatensystem ist dazu in einen Orientierungs- (rotatorische Freiheitsgrade) und Positionierungszustand (translatorische Freiheitsgrade) des Werkstückes unterteilt.

Die Freiheitsgrade erstrecken sich von null (vollständig unbestimmt) bis drei (vollständig bestimmt). Der Ordnungszustand setzt sich demnach wie folgt zusammen:

**Ordnungszustand OZ = Orientierungsgrad OG / Positionierungsgrad PG**

Ein Ordnungszustand eines festen Körpers von  $OZ = 0/0$  beschreibt somit ein völlig ungeordnetes System und  $OZ = 3/3$  ein völlig geordnetes System (VDI 2860 1990).

### 3 Definition von Materialfluss und Handhabung

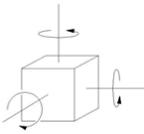
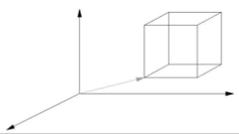
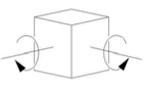
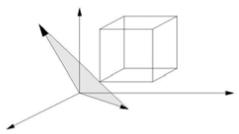
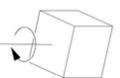
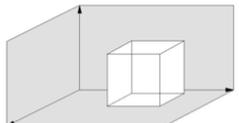
Orientierungsgrad		Positionierungsgrad	
OG	Orientierung des Werkstücks	PG	Ursprungsposition des körpereigenen Koordinatensystems des Werkstücks
3	Alle 3 rotatorischen Freiheitsgrade bestimmt 	3	Definierter Punkt 
2	2 rotatorische Freiheitsgrade bestimmt 	2	Beliebig auf einer Kurve (z. B. Gerade, Kreisbahn) 
1	1 rotatorischer Freiheitsgrade bestimmt 	1	Beliebig auf einer Fläche (z. B. Ebene, Zylinder) 
0	Alle rotatorischen Freiheitsgrade unbestimmt 	0	Beliebig im Raum 

Abbildung 3.3 Orientierungs- und Positionierungsgrad von Körpern (VDI 2860 1990)

### 3.3 Transportieren als Teilfunktion der Handhabung

Durch die Bestimmung des Ordnungszustandes eines Werkstückes lassen sich wichtige Teilfunktionen des Handhabens beschreiben. Diese gliedern sich in die Funktionen Speichern, Mengen verändern, Bewegen, Sichern und Kontrollieren mit ihren jeweiligen Elementarfunktionen.

Die Teilfunktion „Speichern“ definiert hauptsächlich das Aufbewahren von Vorräten, die Funktion „Mengen verändern“ das Zu- oder Abführen von Werkstoffen und das „Kontrollieren“ Prüfungsvorgänge zur Anwesenheit und

### 3 Definition von Materialfluss und Handhabung

---

Identität von Werkstücken. Diese Teilfunktionen sind für diese Arbeit nicht von Bedeutung und wurden deshalb nur der Vollständigkeit halber erwähnt.

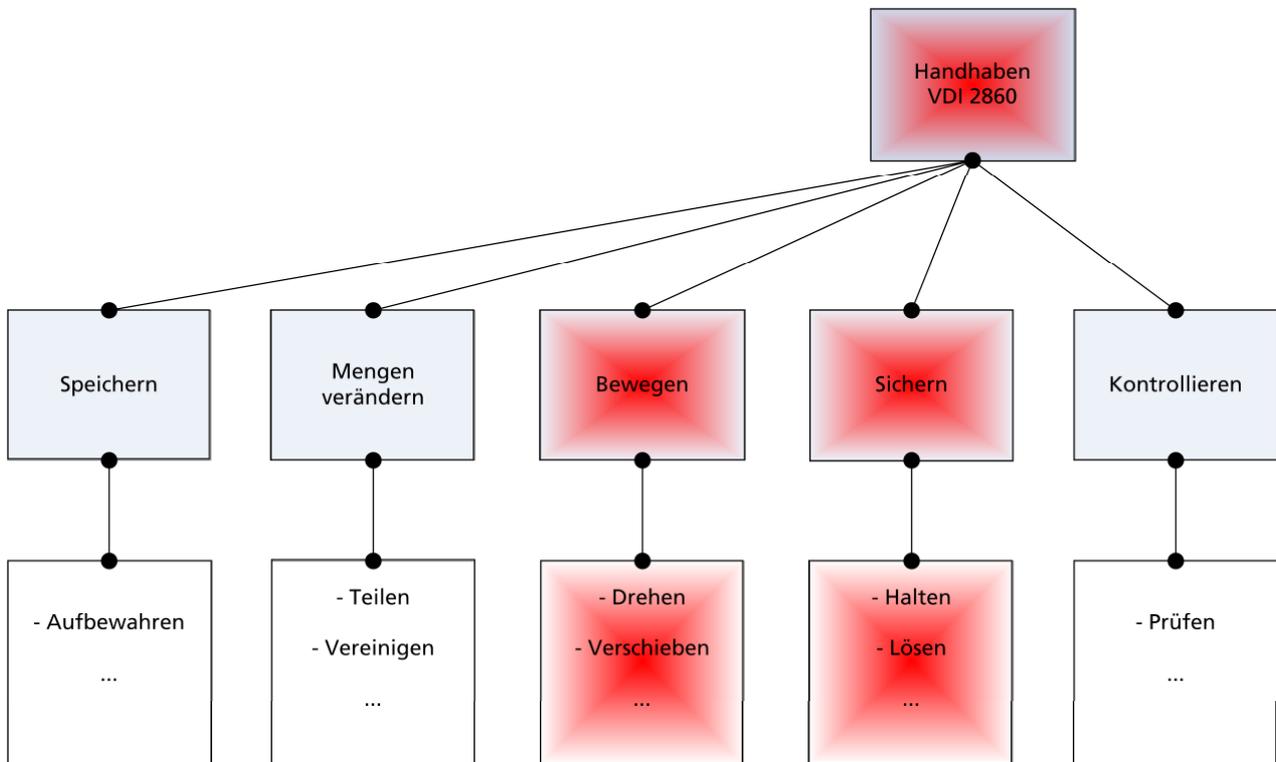


Abbildung 3.4 Teil- und Elementarfunktionen der Funktion Handhaben (VDI 2860 1990)

Im Folgenden wird unter dem Begriff Handhaben das Bewegen und/oder das Sichern von Werkstücken in Form von Glasobjektträgern verstanden. Dabei wird das „Bewegen“ mit der Elementarfunktion „Verschieben“ als das Bewegen eines Körpers aus einer vorgegebenen Position in eine andere vorgegebene Position entlang einer Geraden definiert. Die Orientierung des Werkstückes bleibt dabei unverändert. Die Ordnungszahl beträgt demnach laut Definition  $OZ = 3/2$ .

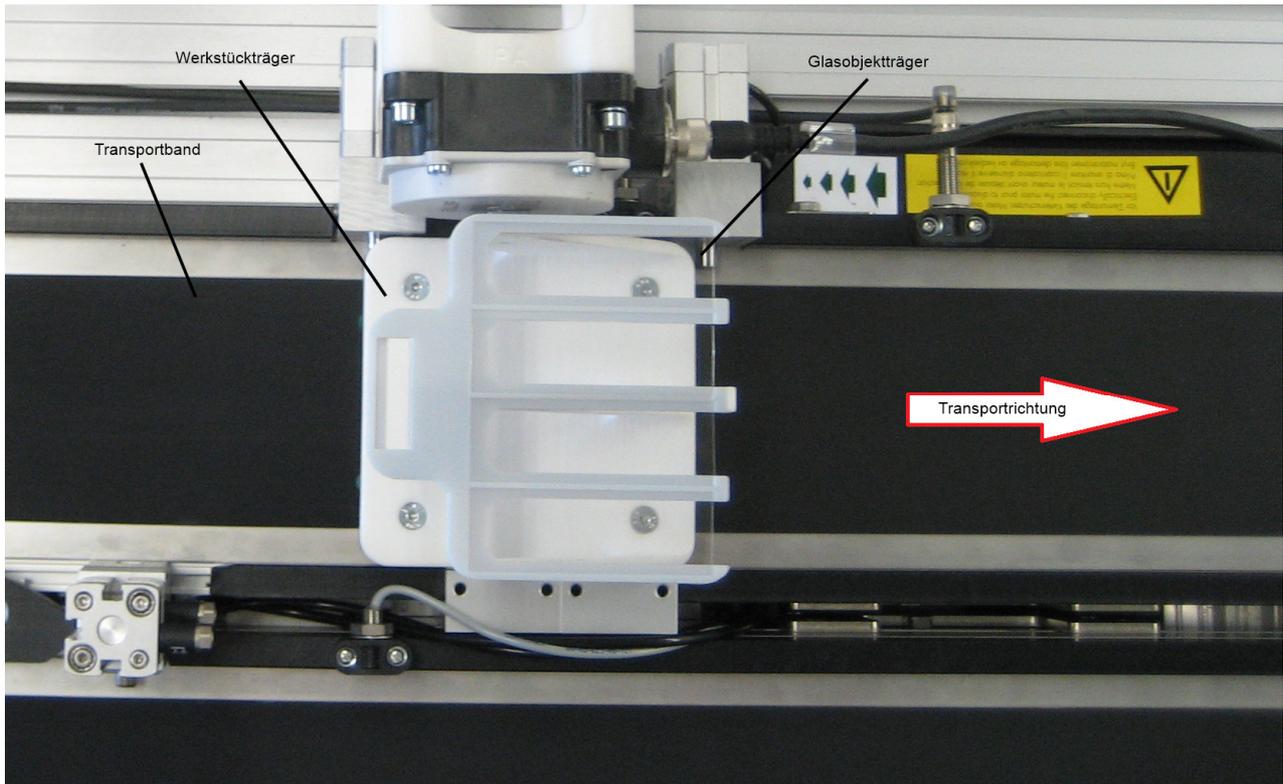


Abbildung 3.5 Transportband bewegt Glasobjektträger auf Werkstückträger

Beispiele für solche Funktionen können Transport- oder Förderbänder sein, die in ihrem Bezugskordinatensystem fest installiert sind. Durch das „Bewegen“ transportieren diese Vorrichtungen Werkstücke bei unveränderter Orientierung entlang einer Transportlinie (translatorischer Freiheitsgrad) von ihrer Ausgangsposition in eine neue, definierte Position. Im Folgenden wird eine solche Vorrichtung als Transportvorrichtung bezeichnet.

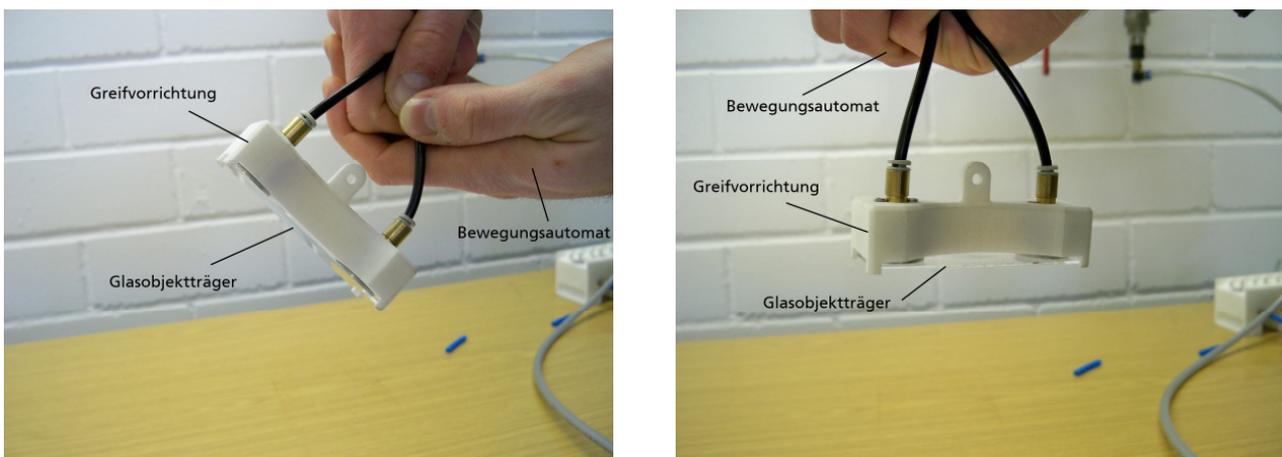
#### 3.4 Greifen als Teilfunktion der Handhabung

Die Teilfunktion „Sichern“ mit den Elementarfunktionen „Halten“ und „Lösen“ (Abbildung 3.4) dient dem Erhalt der definierten Ordnungszustände eines Werkstückes. Diese treten durch Form- oder Kraftschluss und ihrer Kombination

### 3 Definition von Materialfluss und Handhabung

---

beim Halten durch beispielsweise Greif- oder Spannvorrichtungen auf. Der Ordnungszustand beträgt in diesem Fall  $OZ = 3/3$  und besitzt dementsprechend keine Freiheitsgrade für das Werkstück. Solche Handhabungsvorrichtungen, im Folgenden Greifvorrichtungen genannt, sind meist auf sogenannten Bewegungsautomaten installiert. Diese können beispielsweise Industrieroboter oder Linearportale sein. Durch die Bewegung eines solchen Automaten verändert sich nach einer Definition aus der VDI-Richtlinie 2860 gleichzeitig das Bezugskordinatensystem der Greifvorrichtung. Dadurch ergibt sich eine räumliche Veränderung des Werkstückes, allerdings ohne Veränderung seines Orientierungs- und Positionszustandes zum Bezugskordinatensystem. Das Werkstück selbst wird dementsprechend fest gehalten.



*Abbildung 3.6 Greifvorrichtung: Veränderung der räumlichen Anordnung eines Werkstückes ohne Veränderung seines Orientierungs- und Positionierungszustandes in Bezug auf die Greifvorrichtung (hier: Dualbernoulligreifer)*

Dieses ist nach einer Definition aus der VDI-Richtlinie 2860 ein entscheidender Unterschied zwischen einer Transport- und einer Greifvorrichtung. Eine Transportvorrichtung verändert die räumliche Anordnung eines Werkstückes

durch Veränderung dessen körpereigener Position im Bezugskordinatensystem. Es besitzt somit mindestens einen Freiheitsgrad. Eine Greifvorrichtung verändert hingegen die räumliche Anordnung eines Werkstückes durch die Bewegung eines Bewegungsautomaten und dient damit der Veränderung seines eigenen Bezugskordinatensystems (Abbildung 3.2). Das Werkstück wird dabei durch Formschluss, Kraftschluss oder berührungslos gehalten und besitzt keinen Freiheitsgrad. Die körpereigene Position bleibt im Bezugskordinatensystem gleich, obwohl sich dessen räumliche Anordnung verändert.

# Kapitel 4

## Analyse bekannter Handhabungstechnologien

In diesem Kapitel folgt eine Analyse bekannter Technologien zur Handhabung beschichteter Glasobjektträger sowie ihrer Einsatzmöglichkeiten. Es werden sowohl taktile, wie auch berührungslose Greif- und Transportvorrichtungen beschrieben und analysiert. Beide Technologien, taktil und berührungslos, werden zunächst definiert und voneinander abgegrenzt. Zum Abschluss des Kapitels folgt ein tabellarischer Überblick über den heutigen Stand der Technik. Die bekannten Verfahren werden miteinander verglichen und im Hinblick auf die Zielsetzung bewertet. Im Fazit werden die abzuleitenden Konsequenzen beschrieben und eine detaillierte Aufgabenstellung zur Entwicklung eines Verfahrens zur Handhabung oberflächensensitiver Glasobjektträger definiert.

### 4.1 Taktile Handhabungstechnologien

#### 4.1.1 Definition taktiler Handhabung

Der Begriff taktile Handhabung stammt aus dem Lateinischen (lat. tangere = berühren) und bedeutet berührungsbehaftete Handhabung. Dabei können nach der Definition von Handhabung aus Kapitel 3 sowohl Greif- als auch Transportvorrichtungen gemeint sein.

Beim Greifen werden zunächst mechanische und fluidische Systeme unterschieden. Mechanische Greifer sichern ein Werkstück durch Kraft- oder Formschluss sowie einer Kombination aus beiden Methoden. Unter Formschluss versteht man das Halten eines Körpers durch Umschließen in einer bestimmten Orientierung und Position. Beim Kraftschluss wird das Halten durch Spannen und die entstehenden Reibkräfte realisiert.

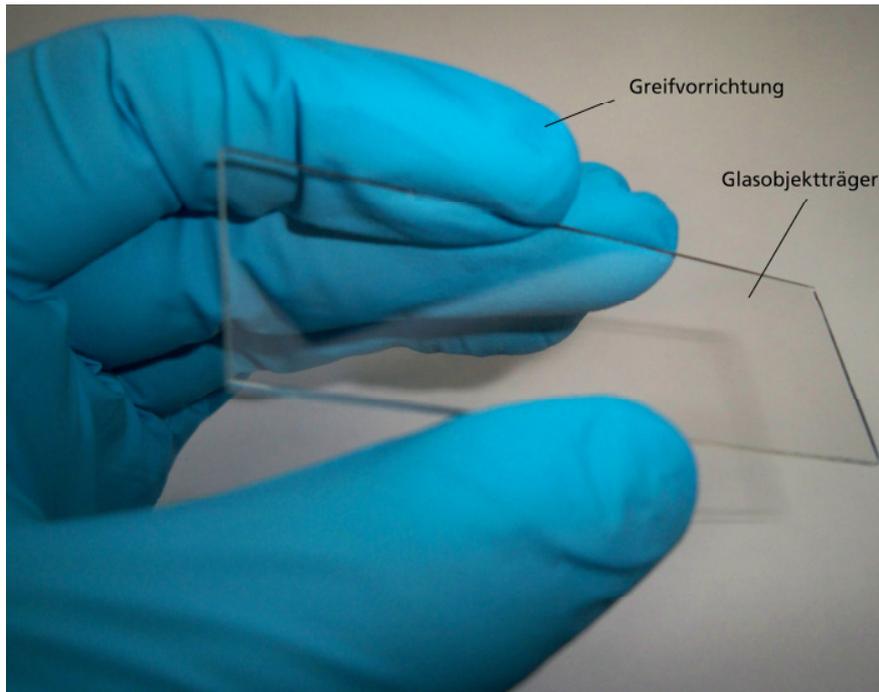
Bei fluidischen Systemen handelt es sich zumeist um Vakuumgreifer. Für die Handhabung durch taktile Transportvorrichtungen werden industrielle Förderbänder genutzt. Die Objektträger werden dabei in Magazinen gebündelt. Im Mittelpunkt der Betrachtung taktiler Handhabungsmethoden steht der Umgang mit den in Kapitel 2 beschriebenen Qualitätskriterien Reinheit und Unversehrtheit.

### 4.1.2 Taktiler Greifen

Ein Greifer stellt eine flexible Verbindung zwischen einer Bewegungseinrichtung und einem Werkstück dar. Diese kann geschlossen, gehalten und geöffnet werden.

### Manuelle Handhabung

Eine Möglichkeit der Handhabung durch Greifen stellt die menschliche Hand mit dem Arm als Bewegungsvorrichtung dar. Die manuelle Handhabung oberflächensensitiver Glasobjektträger besitzt viele Vorteile und ist daher zurzeit in der Produktion nahezu unverzichtbar (Kapitel 1).



*Abbildung 4.1 Die menschliche Hand als Greifvorrichtung*

Die Hand kann zum Schutz der Glasobjektträger durch sterile Handschuhe bekleidet werden. Durch häufigen Wechsel der Handschuhe werden die Oberflächen der Glasobjektträger nur selten verunreinigt und das Risiko der Verschleppung von Partikeln minimiert. Die Produktion findet zusätzlich in einem Reinraum statt, sodass die Qualitätsmerkmale bezüglich der Reinheit zumeist erfüllt werden. Lediglich durch den Menschen verursachte oder verschleppte Partikel in den Reinraum können eine Kontamination der Oberflächen verursachen (Kapitel 2).

Die beschriebenen Flächenpressungen zwischen Greifvorrichtung und Glasobjektträger, speziell im Moment des Zugreifens, wirken sich bei der manuellen Handhabung zumeist nicht negativ auf die fragilen Seitenkanten der Glasobjektträger aus. Der Mensch benötigt als Sensorik zur Detektion des Kraftschlusses und somit dem Sichern des Werkstückes zunächst einen mechanischen Kontakt. Durch die Empfindlichkeit und Präzision seiner Sensorik

## 4 Analyse bekannter Handhabungstechnologien

---

sowie Aktorik (zumeist zwei oder drei Finger) führen diese Flächenpressungen aber nur selten zu Beschädigungen durch Abplatzer oder Mikrorisse. Zusätzlich begünstigt wird dieses schonende Verhalten durch die sehr nachgiebige Fingeroberfläche. Die menschliche Haut, steril verkleidet durch Handschuhe, reagiert sehr sanft und nachgiebig bei einem Kontakt mit einem Werkstück. Sie bildet dadurch einen sehr anpassbaren und präzisen Formschluss.

Die manuelle Handhabung stellt durch die beschriebenen Eigenschaften eine sehr flexible und anpassungsfähige Vorrichtung dar, die zumeist den Anforderungen an Reinheit entspricht. Dadurch können Glasobjektträger nach der Produktion zur Nutzung in biomedizinischen Labors von Wissenschaftlern auch problemlos auf diesem Wege gehandhabt werden, ohne dabei Gefahr zu laufen, zu viele Exemplare zu beschädigen.

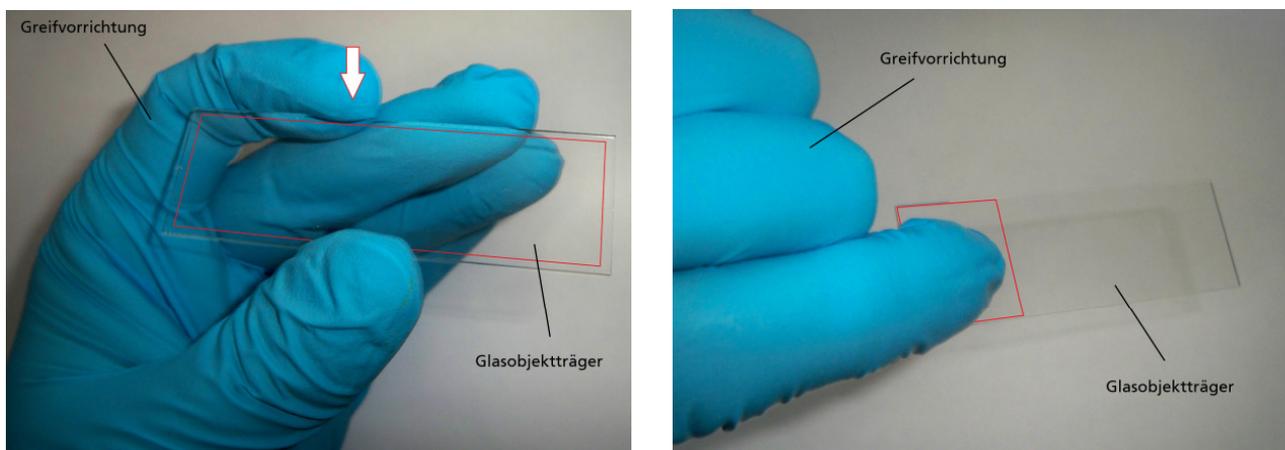


Abbildung 4.2 Ausbeuteverluste durch definierte Handhabungsflächen

Der Einsatz dieser Greifvorrichtung hat allerdings auch entscheidende Nachteile. Durch das Nachgeben der Haut beim Greifvorgang wird ein angepasster Formfluss des Fingers um den Glasobjektträger erzeugt. Allerdings berühren die Finger dabei ebenfalls die funktionale Oberfläche am Seitenrand. Dadurch kann

## 4 Analyse bekannter Handhabungstechnologien

---

in diesem Randbereich eine Beschädigung der homogenen Beschichtung auftreten (Abbildung 4.2, links). Daher wird meist ein definierter Handhabungsbereich von ungefähr 1 bis 3 mm geopfert oder eine ganze Grifffläche von ungefähr  $\frac{1}{4}$  der Oberfläche definiert. Dies führt allerdings zu einer unerwünschten Verringerung der Funktionsfläche und somit der Effektivität jedes Glasobjektträgers.

Der größte Nachteil der manuellen Greifvorrichtung ist allerdings eine schlechte und nicht reproduzierbare Taktzeit. Durch enorm steigende Stückzahlen (Kapitel 1) nimmt der Zwang zur Automatisierung der Handhabung massiv zu. Automatisierte Systeme arbeiten meist schneller und präziser sowie durch das Ausbleiben von Leistungsschwankungen reproduzierbarer mit weniger Fehlern. Zusätzlich sind sie ab einer gewissen Losgröße oft vorteilhaft bei den Betriebskosten.

Um den Durchsatz trotz manueller Produktion zu steigern, werden die Glasobjektträger zu Einheiten von oft 25 Stück in Stapelvorrichtungen zusammengefügt. Diese werden manuell bestückt und entleert. In den Magazinen werden sie durch kleine statische Pins oder Seitenführungen mit einer kleinen Handhabungstoleranz (ca. 0,2 mm) in einer Position fixiert. Da die statischen Führungen keine Kräfte auf die Werkstücke übertragen und somit nur die eigene Gewichtskraft auf die fragilen Seitenkante oder Oberflächen wirkt, sind Beschädigungen durch die Stapelvorrichtungen selten. Die Berührungen an den funktionalen Oberflächen durch die Seitenführungen führen allerdings auch in diesem Fall zu einer Verkleinerung der Funktionsfläche und somit zu einem Sinken der Effizienz. Um Partikelverschleppungen zu vermeiden, müssen die Stapelvorrichtungen oft gereinigt werden.

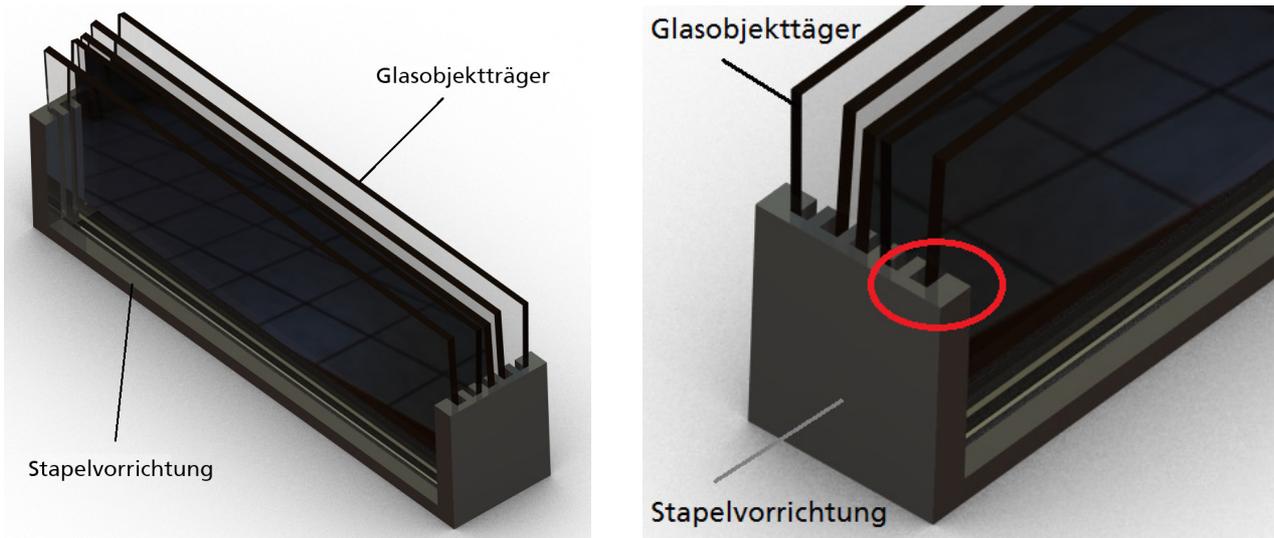


Abbildung 4.3 Beispielhafte Darstellung einer Stapelvorrichtung für 5 Glasobjektträger

Der Zeitgewinn durch die Magazinierung der Werkstücke wird durch die vielen Pick-and-Place-Vorgänge beim Be- und Entladen deutlich verringert. Zusätzlich steigt die Gefahr von Beschädigungen durch Verkantungen bei den Sortiervorgängen. Diese entstehen durch die aus Effizienzgründen sehr schmalen Führungsschienen (Abbildung 4.3, rechts). Sie werden so klein wie möglich gehalten, um die maximale Anzahl an Glasobjektträgern auf einer Fläche lagern zu können. Dadurch ist eine sehr genaue Handhabung notwendig, um das Verkanten und somit Beschädigungen zu vermeiden.

Die Magazinierung der Werkstücke eignet sich gut bei den bisherigen Reinigungs- und Beschichtungsprozessen in Tauchbecken. Die Glasobjektträger verweilen dabei in den Magazinen und werden gesammelt in die Becken getaucht. Für vollautomatisierte und flexible Prozesse wie die beschriebene Digitaldrucktechnik (Kapitel 1) müssen die Glasobjektträger allerdings mit mindestens einer ihrer Oberflächen frei zugänglich sein. Sie können daher nur sehr aufwendig in Magazinen gehandhabt werden.

### Greifen durch mechanische Prinzipien

Das Greifen durch elektrisch oder pneumatisch angetriebene Fingergreifer funktioniert ähnlich wie die manuelle Handhabung, die solchen Systemen meist als Vorbild dient.

Die Vorteile gegenüber der manuellen Handhabung liegen im höheren Durchsatz durch eine schnellere Taktzeit, einer durch Computersteuerung höheren Reproduzierbarkeit und den im Vergleich zumeist geringeren Betriebskosten. Bei konventionellen Greifern existiert eine große Anzahl an Varianten und Einsatzmöglichkeiten, da diese leicht an viele Werkstücke anpassbar sind.

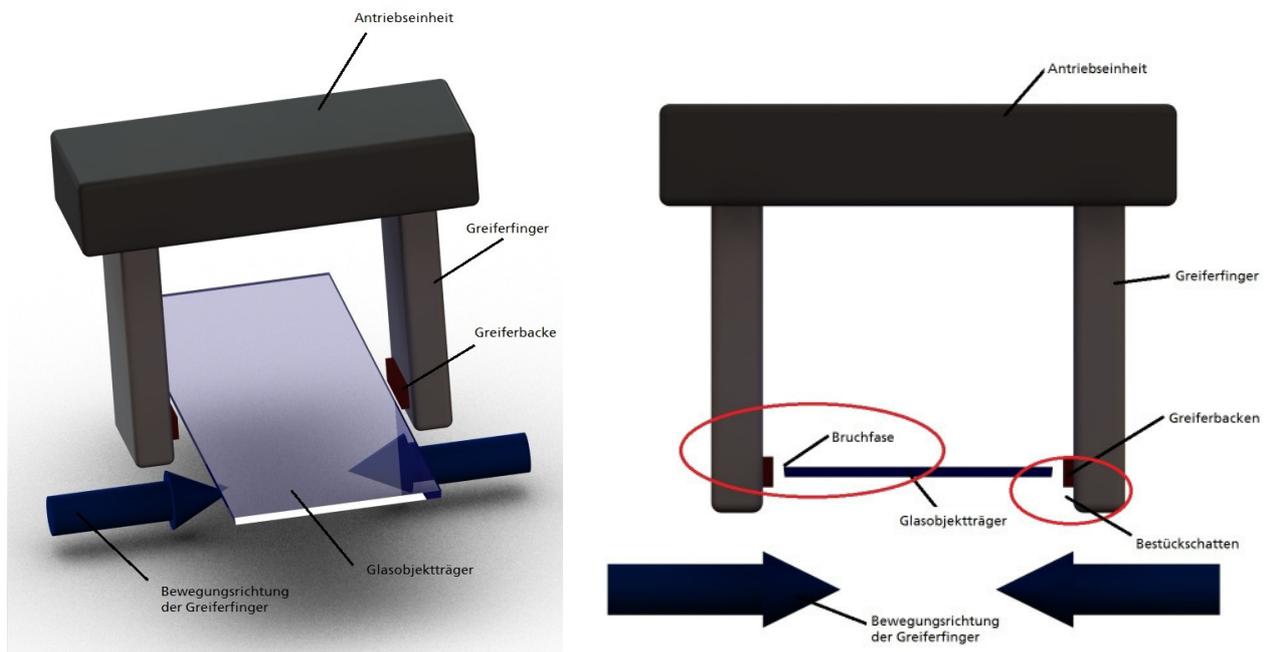


Abbildung 4.4 Zweifingergreifer mit Problematik der Bruchfaser und Bestückschatten

Gegenüber dem manuellen Greifen ist nachteilig, dass beim Aufnehmen des Werkstückes eine präzise regelungstechnische Kontrolle der Greifkraft erforderlich ist, um Beschädigungen an den unregelmäßigen Seitenkanten zu vermeiden. Dazu bedarf es einer präzisen und sensiblen Sensorik, um bereits beim ersten Kontakt der Greiferbacken mit dem Glasobjektträger die Greifkraft zu minimieren (Kapitel 2).

Die menschliche Haut bildet durch ihre Nachgiebigkeit einen anpassbaren Formschluss ohne die Gefahr einer kurzzeitigen Kraftüberhöhung und somit einer Beschädigung der Glasobjektträger beim Greifvorgang. Das Material der mechanischen Greiferbacken muss im Vergleich zur Haut allerdings unflexibel und unnachgiebig gewählt werden. Weiche Greiferbacken, beispielsweise aus Naturkautschuk, wären wie bei der manuellen Handhabung ideal, um durch ihre Nachgiebigkeit beim Greifvorgang die Seitenkanten zu schützen. Diese Materialwahl würde aber durch die scharfen Seitenkanten der Glasobjektträger auch die Gefahr beinhalten, durch das Lösen von Partikeln einen Abrieb zu verursachen und somit durch den eigenen Verschleiß die Oberflächen zu kontaminieren.

Ein fester Werkstoff, wie beispielsweise Teflon, ist weniger anfällig, durch die scharfe Seitenkante beschädigt zu werden. Er ist außerdem leichter zu reinigen und vermindert somit die Gefahr der Partikelerzeugung und -verschleppung durch die Greiferbacken. Nachteilig ist bei festen Werkstoffen aber die beschriebene Gefahr einer Beschädigung der Seitenkanten durch die fehlende Nachgiebigkeit.

Beim Greifen von flächigen und dünnen Bauteilen treten zudem durch das Überstehen der Greiferfinger Bestückschatten an den Seitenkanten auf (Abbildung 4.4). Für die weitere Bearbeitung der Glasobjektträgeroberfläche

## 4 Analyse bekannter Handhabungstechnologien

---

können diese hinderlich sein. Im Fall von Beschichtungsprozessen durch digitale Drucktechnik beispielsweise würde der Druckkopf nicht nah genug an die Werkstückoberfläche gelangen. Die Glasobjektträger müssten wie beim manuellen Handhabungsprozess auf einer passenden Vorrichtung abgelegt werden.

Um den Durchsatz bei taktilen Greifvorrichtungen zu erhöhen, können erneut Stapelmagazine eingesetzt werden. Im Gegensatz zur manuellen Handhabung funktioniert das Einsortieren der Glasobjektträger durch taktile Greifer mit hoher Positioniergenauigkeit heutiger Bewegungsautomaten meist beschädigungsfrei und sehr reproduzierbar. Das Entladen stellt allerdings einen hohen Anspruch an die Sensorik und Aktorik solcher Systeme.

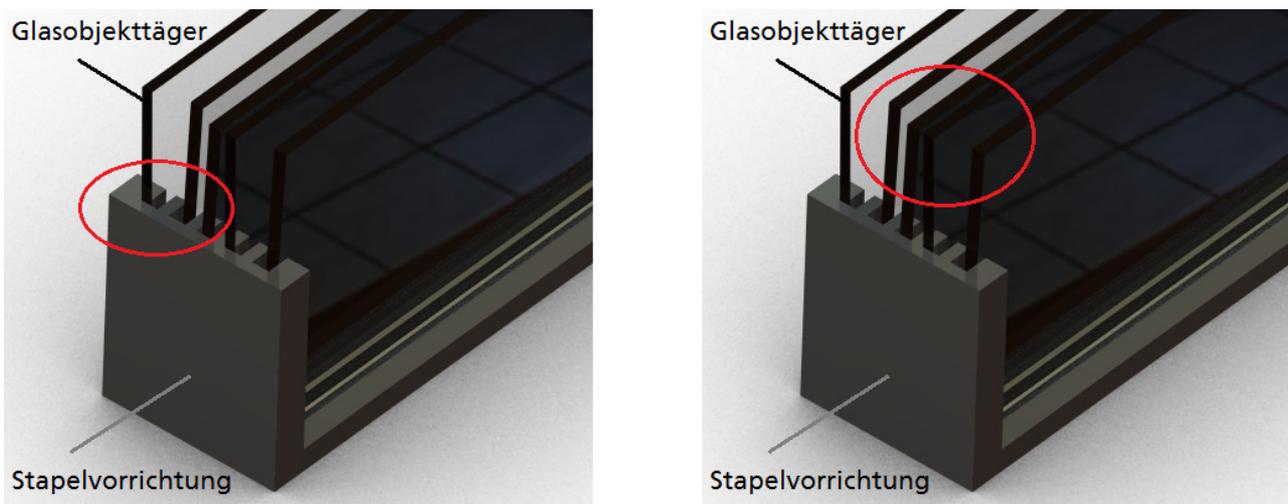


Abbildung 4.5 Detailansicht einer beispielhaften Stapelvorrichtung

Durch die beschriebenen Handhabungstoleranzen der Seitenführungen von ungefähr 0,2 mm sowohl in der Länge als auch in der Breite liegen die Glasobjektträger nicht exakt in einer vorgegebenen Position im Stapelmagazin. Sie können sich dabei seitlich verschieben (linke rote Markierung) oder leicht vertikal kippen (rechte rote Markierung). Die an schmalen Seitenkanten zu

greifenden Glasobjektträger müssen daher zunächst aufwendig detektiert und anschließend gegriffen werden.

Denkbar wäre es, ähnlich der manuellen Handhabung (Abbildung 4.2, rechts), sie in einem definierten Bereich an der Oberfläche zu greifen. Dieses hätte aber ebenfalls eine deutliche und unerwünschte Reduzierung der funktionalen Oberfläche und somit der Effizienz der Glasobjektträger zur Folge.

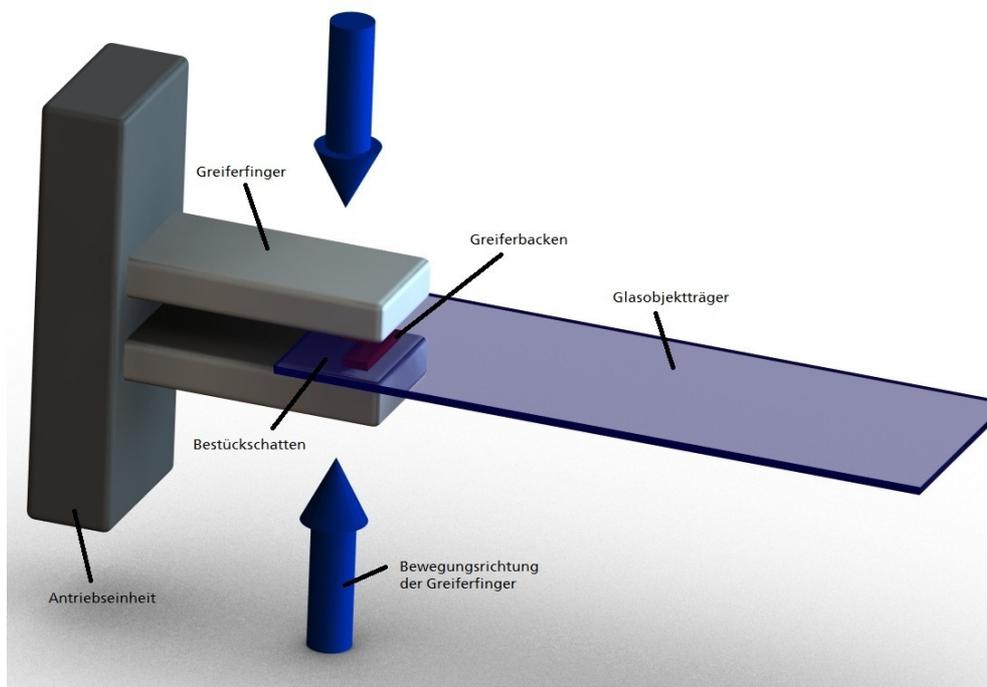


Abbildung 4.6 Zweifingergreifer greift auf definierten Oberflächenbereich

Ein weiterer Nachteil ist der Einsatz von Bewegungsautomaten zur Veränderung der Orientierung und Position der Glasobjektträger. Der Einsatz von Industrierobotern oder Lineareinheiten in Reinräumen ist durch die gegebenen Reinheitsanforderungen sehr preisintensiv, da spezielle reinraumtaugliche Varianten gewählt werden müssten. Zusätzlich ist das Risiko von Partikelfreisetzung oder Verschleppung auch bei diesen nie völlig auszuschließen.

### Greifen durch fluidische Prinzipien

Als taktile, fluidische Greifer kommen zumeist Vakuumgreifer zum Einsatz. Sie benötigen zum Ansaugen eine glatte Oberfläche auf dem Greifobjekt, können aber ansonsten sehr flexibel und frei in ihren Geometrien eingesetzt werden. Dabei arbeiten sie häufig mit einem einfachen statischen Unterdruck (Zöppig 1997). Dieser hält das Greifobjekt, in diesem Fall ein Glasobjektträger, von einer Oberflächenseite.

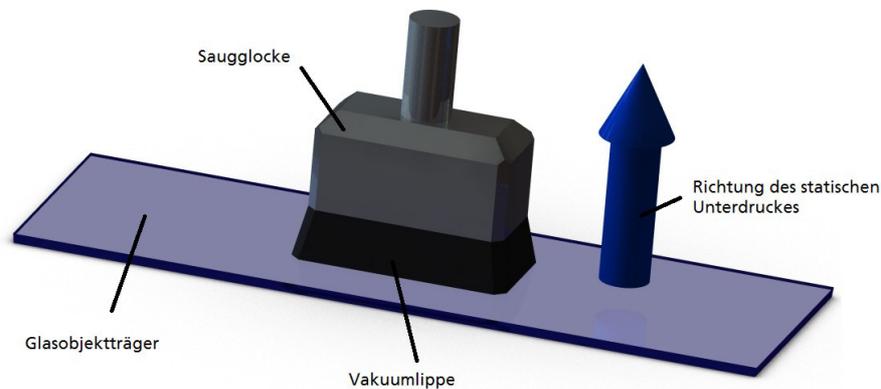


Abbildung 4.7 Glasobjektträger von Vakuumgreifer gehalten

Die nicht gegriffene Seite bleibt frei und kann vollständig bearbeitet werden. Das ist ein Vorteil gegenüber dem taktilen, manuellen oder mechanischen Greifen. Bei diesem entsteht entweder ein Bestückschatten oder eine Reduzierung der Funktionsoberfläche. Bei der Handhabung durch Vakuumsauger müssen die Glasobjektträger daher vor der Bearbeitung durch digitale Druckköpfe beispielsweise nicht zuerst abgelegt, sondern können sofort im gehaltenen Zustand bearbeitet werden.

Nachteilig ist auch bei diesem Verfahren der mechanische Kontakt der Greiferlippe mit mindestens einer funktionalen Oberflächenseite. Da die Greiferlippe zur Herstellung eines Unterdruckes zumeist aus weichen Materialien gewählt wird, ist die Gefahr der Oberflächenkontamination durch Abrieb oder Verschleppung besonders hoch. Zudem wird auf mindestens einer Seite durch das Aufsetzen der Greiferlippe die funktionale und homogene Oberfläche zerstört. Obwohl die Glasobjektträger oft nur einseitig verwendet werden, ist eine Zerstörung oder Kontamination der Unterseite nicht akzeptabel, denn diese können ebenfalls zu Fehlern oder Irritationen führen (Kapitel 2).

Wie bei den bisher beschriebenen Greifvorrichtungen benötigen auch Vakuumgreifer im Reinraum einsatzfähige Bewegungsautomaten. Um die Glasobjektträger zur Durchsatzsteigerung zu bündeln, werden sie beim Einsatz von Vakuumgreifern ebenfalls meist in offene und platzsparende Stapelvorrichtungen sortiert. Durch die Größe des Vakuumgreifers können sie dann aber nur nacheinander ein- und aussortiert werden, da jeweils nur der äußerste Glasobjektträger frei angesaugt werden kann. Zusätzlich spielt auch hier die aufwendige Detektion des Werkstückes, um präzise Greifen zu können, eine große zeitliche sowie durch die nötige Sensorik auch kostenintensive Rolle.

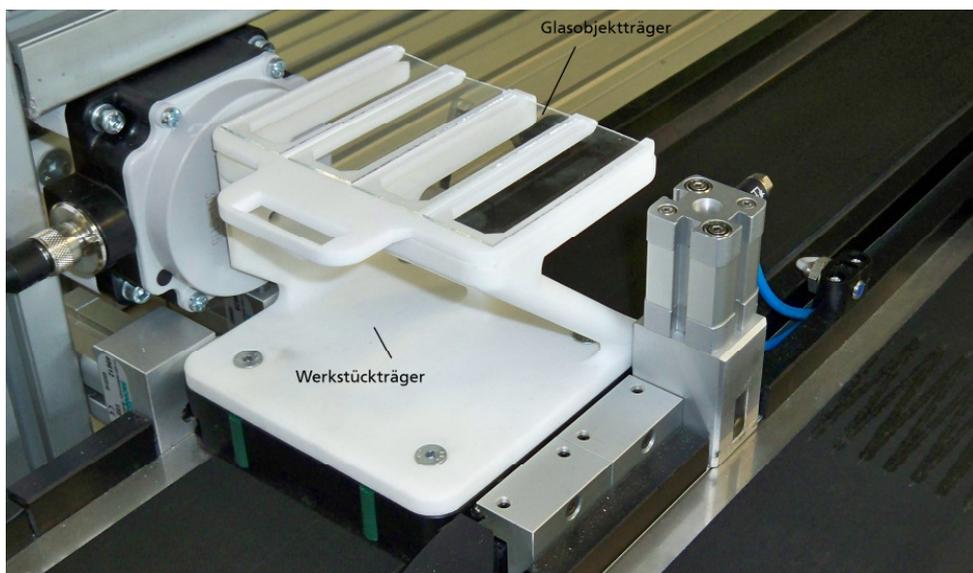
### 4.1.3 Taktiler Transportieren

Transportvorrichtungen liegen oft in Form von Förderbändern oder ähnlichen Systemen vor. Diese werden schon sehr lange für die Handhabung von beispielsweise Schüttgut im Bergbau eingesetzt. Bei der Abfüllung von Getränkeflaschen werden sie auch zum sortierten Einzeltransport verwendet.

## 4 Analyse bekannter Handhabungstechnologien

---

Die Flaschen stehen dabei auf einem Förderband und werden entlang einer Führungsschiene einzeln zur Bearbeitung über die Prozessstraße bewegt. Förderbänder benötigen zum Transport von Werkstücken keine zusätzlichen Bewegungsautomaten wie Greifvorrichtungen. Sie besitzen mindestens einen translatorischen Freiheitsgrad und können somit die Werkstücke entlang einer Linie selbst bewegen (Kapitel 3). So kann aus Förderbändern ein logistisches Netz entlang verschiedener Prozesse aufgebaut werden. Dieses ist beispielsweise in Distributionszentren zur Paketverteilung oder am Flughafen zum Gepäcktransport der Fall.



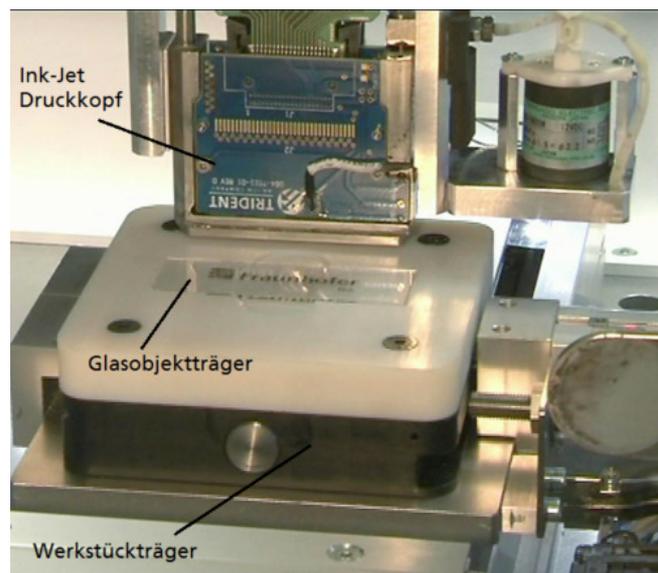
*Abbildung 4.8 Förderband mit Werkstückträger für Glasobjektträger*

Bei sensiblen und kleinen Werkstücken werden meist Werkstückträger eingesetzt, um diese auf den Förderbändern, einzeln oder in Gruppen zusammengefasst, geschützt und sortiert den jeweiligen Prozessen zuzuführen. Dieses empfiehlt sich auch für funktionalisierte Glasobjektträger. Um diese beim Transport über ein Förderband gleichzeitig auch bearbeiten zu können, sollten sie entgegen der platzsparenden, senkrecht angeordneten Stapelvorrichtungen

(Abbildung 4.3) in waagerechter Position nebeneinander angeordnet werden. Auf diese Weise ist es möglich, sie verschiedenen Prozessen wie der Tauchbeschichtung (Abbildung 4.9) oder einem digitalen Druckprozess (Abbildung 4.10) zuzuführen, da zumindest eine funktionale Oberfläche frei zugänglich ist.



*Abbildung 4.9 Tauchbeschichtung von Glasobjektträgern in einem Magazin*



*Abbildung 4.10 Digitaler Druckprozess auf transportiertem Glasobjektträger*

Der Vorteil von Transportvorrichtungen gegenüber Greifvorrichtungen liegt in einem höheren Durchsatz an Werkstücken. Ein Greifer kann gleichzeitig nur ein Werkstück handhaben, um es in eine Stapelvorrichtung zu sortieren oder einem Prozess zuzuführen. Je nach Aufwand dieser Pick-and-Place-Anwendung, Lageerkennung beim Aufnehmen, Transportweg, Prozessdauer, Lageerkennung beim Ablegen, kann der Vorgang viel Zeit in Anspruch nehmen. Ein Förderband dagegen kann gleichzeitig fast beliebig viele Werkstücke transportieren. Die Kapazität ist nur durch die Größe der Werkstückträger und des Förderbandes

## 4 Analyse bekannter Handhabungstechnologien

---

begrenzt. Die Werkstückträger können dicht aneinandergereiht transportiert werden. So wird eine deutliche Verkürzung der Zykluszeiten erreicht. Gegenüber dem Sammeln und Vereinzeln von Werkstücken durch Pick-and-Place-Vorgänge steigert sich hier deutlich die Produktionseffizienz. Ein Trend zum Einzelstücktransport auf Transportvorrichtungen ist beispielweise auch bei der Produktion von Wafern zu erkennen (Oyrer 2005).

Ein Nachteil der Handhabung durch Transportvorrichtungen ist erneut eine Berührung der Glasobjektträger auf mindestens einer Funktionsoberfläche. Die Folgen sind wie bei den Greifprozessen mögliche Verunreinigungen und Beschädigungen, wodurch ebenfalls die Produktqualität beeinträchtigt wird. Dadurch muss auch bei der Anwendung dieser Technologie ein nicht funktionaler Bereich definiert werden, der die Effizienz jedes einzelnen Glasobjektträgers reduziert. Zur Bearbeitung steht zudem zunächst nur eine Oberflächenseite zur Verfügung. Werden beide Seiten benötigt, müssen die Glasobjektträger während des Produktionsprozesses durch eine Greifervorrichtung gedreht werden. Ebenfalls sind Glasobjektträger auf Förderbändern nicht vor Umwelteinflüssen wie Partikeln, mit den weiter oben bereits beschriebenen möglichen Folgen, geschützt. Daher müssen die Transportvorrichtungen auch für Anwendungen in Reinräumen ausgelegt sein.

### 4.1.4 Nachteile taktiler Handhabungstechnologien

Nach der Betrachtung der grundlegenden Prinzipien zur taktilen Handhabung oberflächensensitiver Glasobjektträger wird im Folgenden noch einmal die Problematik im Hinblick auf die Qualitätsanforderungen zusammengefasst:

- Kontamination der funktionalen Oberflächen durch Partikelverschleppung, Abnutzen der Greiferbacken sowie Saugerlippen oder abgeplatzte Mikropartikel beeinflussen negativ die Reinheit.
- Berührungen auf den funktionalen Oberflächen, etwa durch Finger- oder Greiferabdrücke, stören die homogene Oberflächenbeschichtung und führen zur Reduzierung des funktionalen Bereiches.
- Beschädigungen in Form von Abplatzern, Rissen oder Kratzern können durch Flächenpressungen bei Greifvorgängen oder durch Verkanten beim Sortieren in Stapelvorrichtungen entstehen.
- Sowohl Greif- als auch Transportvorrichtungen schützen die Werkstücke nicht vor Umwelteinflüssen wie Staub oder anderen Verschmutzungen. Die Vorrichtungen müssen daher im Reinraum betrieben werden. Dieses verursacht weitere Kosten und kann die Reinraumumgebung belasten.

Diese Probleme entstehen zumeist durch die verschiedenen Berührungen der Handhabungsvorrichtungen mit den Werkstücken. Deshalb wird in den folgenden Kapiteln der Einsatz von bekannten berührungslosen Prinzipien zur Handhabung empfindlicher Glasobjektträger betrachtet und analysiert.

### 4.2 Berührungslose Handhabungstechnologien

#### 4.2.1 Definition berührungsloser Handhabung

In der Literatur sind viele unterschiedliche Definitionen für den Begriff der berührungslosen Handhabung zu finden. Ob von „kontrolliertem Schweben von

## 4 Analyse bekannter Handhabungstechnologien

---

Bauteilen“ oder „Kontrollieren von Werkstücken durch Geisterhand“ gesprochen wird, haben die meisten Definitionen eines gemeinsam, sie sprechen von „Kontrolle“. Denn das alleinige Schweben von Objekten auf einem Luftfilm sowie die industrielle Umsetzung sind lange bekannt (Wiemer 1969). Anwendung findet es beispielsweise in der Industrie zum Transportieren schwerer Lasten auf einem Luftfilm oder bei hochgenauen Linearachsen. In der Unterhaltungsindustrie ist der Air-Hockey-Tisch eine sehr bekannte Anwendung des Luftkissenprinzips. Dieses Beispiel zeigt aber auch, dass die hier benutzte Spielscheibe zwar nahezu reibungslos und ohne Mühe über den Tisch gleitet, aber eine wirkliche Kontrolle über die Richtung oder Position der Scheibe kann ohne mechanischen Kontakt nicht hergestellt werden.

Eine genauere Definition liefert Höppner in einer Arbeit über berührungslose Handhabungssysteme (Höppner 2002): „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.“ Dieses ist eine Erweiterung der Definition von Handhabung aus der beschriebenen VDI-Richtlinie 2860 (Kapitel 3). Der Unterschied zwischen berührungsloser und taktiler besteht also in der Kontrolle über ein Werkstück ohne mechanischen Kontakt. Schilp grenzt diese Definition auf Medien zur berührungslosen Kraftübertragung ein, die keine negativen Auswirkungen auf das Bauteil ausüben (Schilp 2006). Solche können beispielweise Fluide sein, die sich nicht rückstandsfrei entfernen lassen oder die Partikelkonzentration auf dem Bauteil fördern.

### 4.2.2 Elektrostatische Verfahren

Elektrostatische Aufladungen sind in technischen Anwendungen normalerweise nur als Störfaktor, unter anderem bei Greifprozessen, bekannt. Trotzdem ist es möglich, bevorzugt kleine Bauteile, durch das Anlegen einer elektrischen Spannung an einem Greifer oder Bauteil ohne Berührung zum Schweben zu bringen. Dabei werden drei grundlegende Prinzipien des Greifens durch elektrostatische Kräfte unterschieden (Hesselbach 2001). Diese Unterschiede beruhen laut Hesselbach auf den elektrischen Eigenschaften des zu greifenden Gegenstandes. Zwei Varianten beziehen sich auf leitfähige Objekte und können somit im Hinblick auf die Zielsetzung dieser Arbeit vernachlässigt werden. Das dritte Prinzip funktioniert bei nicht leitenden, polarisierbaren Bauteilen. Dabei werden lokale Dipole erzeugt und ausgerichtet. Die erzielbaren Kräfte sind allerdings sehr gering. Zusätzlich ist bisher nicht bekannt, wie sich der Einfluss elektrischer Spannungen und Felder auf die funktionalen Beschichtungen der Glasobjektträger auswirkt.

### 4.2.3 Magnetische Verfahren

Magnetische Verfahren zur berührungslosen Handhabung hängen vom Material des Werkstückes ab, da diese magnetisch, magnetisierbar oder aufladbar sein müssen. Dieses ist bei Glas nur sehr eingeschränkt der Fall. Halbleiter können durch Polarisierung sogar Schaden nehmen. Ebenfalls ist der Einfluss auf die biochemische Oberflächenfunktionalisierung nicht bekannt. Diese Faktoren

## 4 Analyse bekannter Handhabungstechnologien

---

schließen den Einsatz solcher Systeme zur Handhabung oberflächensensitiver Glasobjektträger aus.

Magnetische Verfahren finden trotz ihres eingeschränkten Materialspektrums große Anwendungsbereiche. Ein Einsatzbeispiel ist die Transrapidbahn, die nahezu ohne Reibung bei enormer Traglast hohe Beschleunigungen und Geschwindigkeiten erreicht.

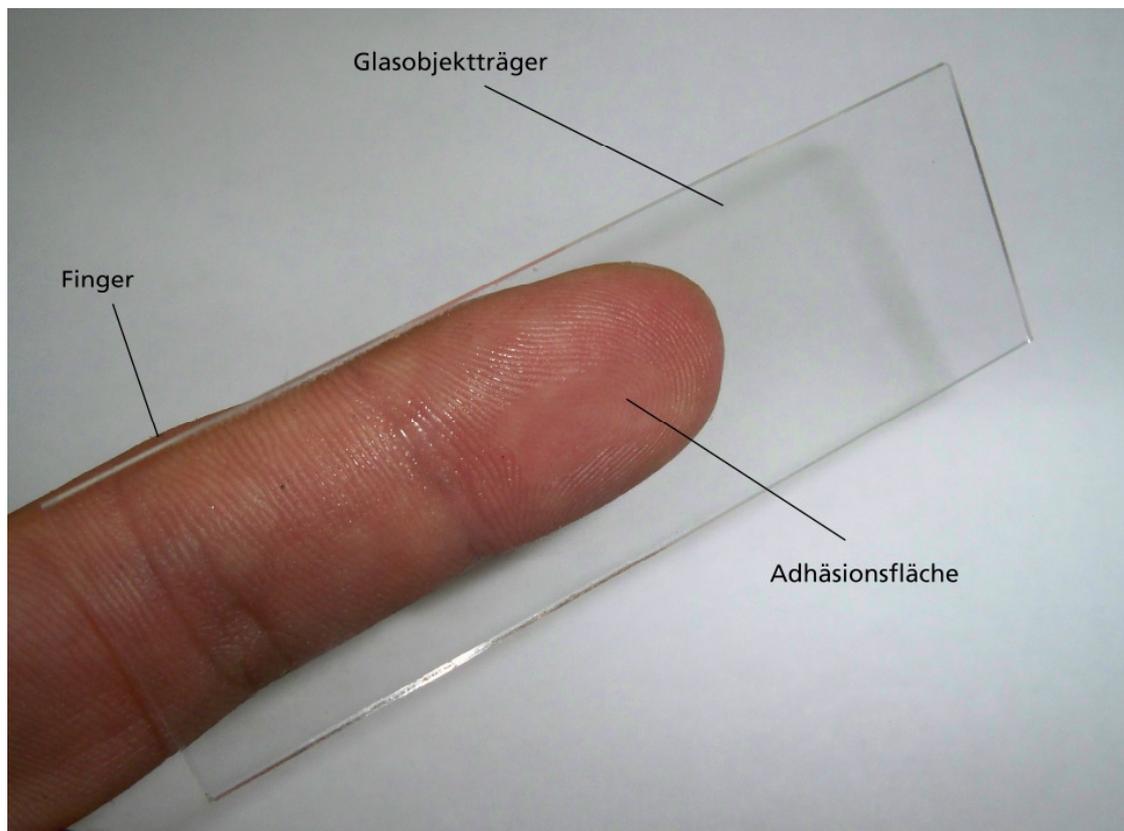
### 4.2.4 Adhäsive Verfahren

Nach der Definition der berührungslosen Handhabung muss das Greifen mittels Adhäsionskräften zunächst als berührungsloses Verfahren eingestuft werden. Durch das Einbringen von Flüssigkeiten, beispielweise Wasser oder Alkohol, zwischen einem Greifer und Werkstück werden verschiedene Kräfte freigesetzt. Zum einen wirken Oberflächenkräfte zur Zentrierung, zum anderen Kapillarkräfte senkrecht zur Greiffläche und somit entgegen der Schwerkraft. Auf diese Weise können kleine Bauteile gehalten werden.

Ein bekanntes, alltägliches Beispiel ist das Kleben von Gegenständen an einem angefeuchteten Finger. Es wirken Kapillarkräfte senkrecht zum Finger und ziehen das Werkstück an. Trocknet die Flüssigkeit langsam ab, schwinden auch die Kapillarkräfte und der Gegenstand, hier ein Glasobjektträger, wird wieder losgelassen.

Die eingesetzten Flüssigkeiten zum Auslösen der Adhäsionskräfte beeinflussen allerdings direkt die Homogenität der beschichteten Glasobjektträgeroberfläche. Dadurch kann nach der Einschränkung zur berührungslosen Handhabung mittels Fluiden, die keinen negativen Einfluss auf die Werkstücke haben (Schilp

2006), bei funktionalisierten Glasobjektträgern nicht mehr von einem berührungslosen Verfahren durch Adhäsionskräfte gesprochen werden. Denn der Greifbereich müsste dementsprechend, wie bei den taktilen Handhabungsverfahren, erneut um eine definierte Fläche zum Greifen eingeschränkt werden (Abbildung 4.2). Damit einhergehend ist wiederum die Verringerung der Effizienz der funktionalisierten Glasobjektträger.



*Abbildung 4.11 Adhäsives Greifen durch einen Finger*

Den Einsatz von Adhäsionskräften untersuchte auch Bark in einer Arbeit über das adhäsive Greifen kleiner Bauteile mittels niedrigviskoser Flüssigkeiten (Bark 1998). Diese waren allerdings auf eine Größe von ca. 4 mm x 4 mm beschränkt. Das Handhaben größerer Bauteile ist nur mit großem Aufwand und sehr geringen Bewegungsgeschwindigkeiten reproduzierbar möglich.

### 4.2.5 Luftlagerverfahren

Luftlager gehören zur Klasse der Gleitlager und werden in zwei Kategorien unterteilt, aerodynamische und aerostatische Lager.

#### Aerodynamische Lager

Bei aerodynamischen Lagern wird ein Lagerspalt erzeugt, indem sich zwei Lagerflächen gegeneinander bewegen und dadurch einen Überdruck erzeugen. Dazu müssen sie so gestaltet sein, dass die Lagerflächen die Luft im Lagerspalt bei Bewegung komprimieren. Die komprimierte Luft staut sich und bildet ein Luftlager ohne den Einsatz einer externen Druckluftversorgung. Dieses Verfahren wird beispielweise in Wellenlagerungen, in Form von Spiralrillenlagern (Mujiderman 1966), eingesetzt. Weitere Anwendungsbeispiele finden sich in Festplatten und CD-Playern. Vorteile gegenüber beispielweise durch Öl gelagerte Vorrichtungen sind gute Reibungswerte sowie die Sauberkeit des Mediums Luft. Nachteilig ist allerdings, dass sich die Lagerflächen ohne Bewegung durch das Fehlen des Überdruckes im Lagerspalt berühren. Um diesen aufzubauen, werden hohe Geschwindigkeiten benötigt. Durch die Qualitätsanforderungen an die Fertigungstoleranzen entstehen hier hohe Herstellungskosten (Risse 2001).

Für den Einsatz zur Handhabung von oberflächensensitiven Glasobjektträgern ist die Technologie der aerodynamischen Lager nicht interessant, da sich das zu handhabende Werkstück meist in einer ruhenden Lage befindet. In diesem Fall kann sich kein aerodynamisches Luftlager aufbauen.

### Aerostatische Lager

Bei aerostatischen Lagern bildet die durch einen Kompressor in einen Lagerspalt gepresste Druckluft einen Schmierfilm und zugleich ein Druckpolster. Dieses kann Bauteile berührungslos tragen. Die Zielsetzung beim Einsatz eines Luftlagers ist, eine optimale Tragkraft, Steifigkeit und Dämpfung bei möglichst geringem Luftverbrauch sowie gleichmäßiger Luftverteilung zu erreichen.

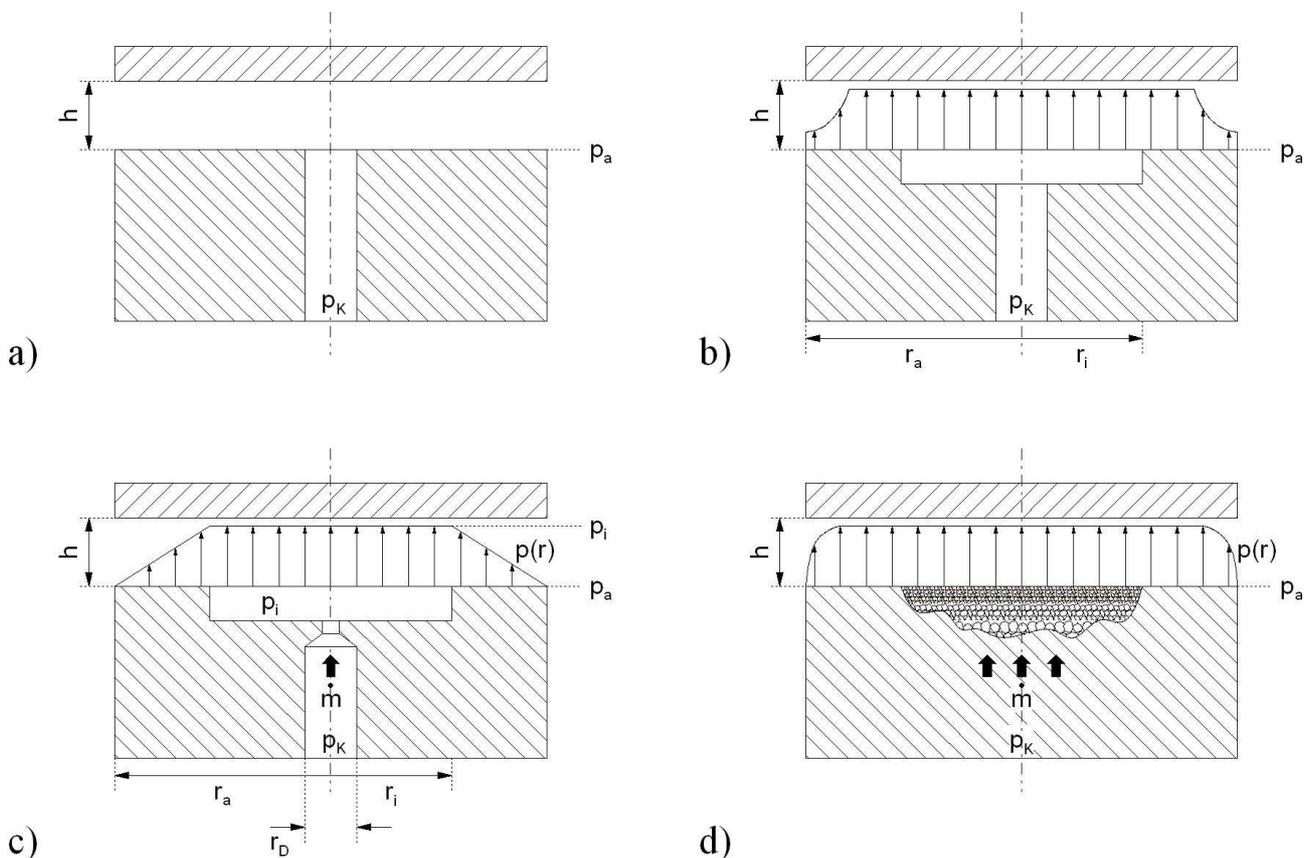
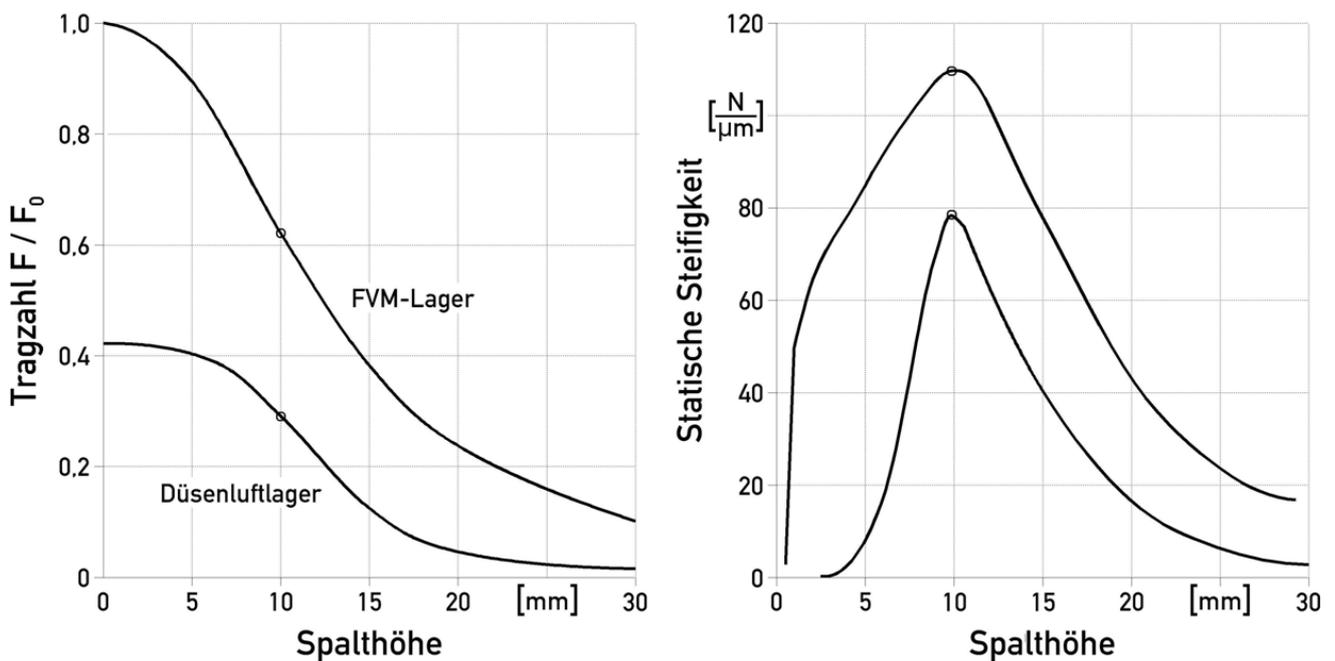


Abbildung 4.12 Verschiedene Luftlagertypen und Luftverteilungen (Schroter 1995): a) Einfachluftlager mit zentraler Düse b) Vorkammerluftlager c) Vorkammerluftlager mit Drossel d) Lager mit flächig verteilten Düsen oder Sintermaterial

## 4 Analyse bekannter Handhabungstechnologien

Um diese Eigenschaften zu erreichen, werden vier Arten von Luftlagern unterschieden. Ihr Einsatz hängt zumeist von der Art und Form des Werkstückes ab (Abbildung 4.12). Die einfachste Form eines Luftlagers ist eine zentrale Düse. Durch diese Anordnung kann das Werkstück allerdings keine eigene Ruhelage einnehmen. Die Tragkraft und Steifigkeit sind im Verhältnis zum Luftverbrauch sehr schlecht. Um die Eigenschaften zu verbessern und dem Lager eine selbstregelnde Wirkung zu verleihen, wird unmittelbar an der Lageroberfläche eine Vorkammer eingesetzt. Diese hat eine direkte Wirkung auf die Luftverteilung unter dem Werkstück und somit auf die Eigenschaften Tragkraft, Steifigkeit und Dämpfung. Wird nun zusätzlich zu diesem Aufbau eine Drossel vor der Vorkammer verwendet, können die Eigenschaften noch einmal verbessert werden.



a)

b)

Abbildung 4.13 Vergleich zwischen Düsen- und Sinterluftlagern (FVM) (Schroter 1995)

Eine Anordnung von vielen diskreten Mikrodüsen oder offenporigen Sintermaterialien ermöglicht den homogensten und damit effektivsten Luftlagerfilm. Denn der Druck fällt bei diesem auch am Rand nicht ab und bleibt über die gesamte Fläche weitgehend konstant. Dieses verdeutlicht die folgende Abbildung durch einen Vergleich der Tragkraft und Steifigkeit verschiedener Lagertechnologien.

Abbildung 4.13 zeigt, dass ein Sinterluftlager ungefähr eine 2,5-fache Tragkraft bei einer ebenfalls höheren Steifigkeit besitzt. Zusätzlich zeichnet ein geringerer Luftverbrauch diese Technologie aus. Der Einsatz von industriellen aerostatischen Lagern bietet viele Vorteile (Bartz 1993):

- Zwischen den Lagerflächen lassen sich relativ hohe Geschwindigkeiten erzielen.
- Mechanische oder thermische Veränderungen haben keinen Einfluss auf die Lagereigenschaften.
- Es entsteht nur sehr geringe, meist unschädliche Reibung.
- Durch ein Luftlager wird kein eigenes Verlustmoment erzeugt.
- Durch eine gleichmäßige Luftverteilung werden Bauteile nur sehr gering belastet.
- Die Eigenschaften Steifigkeit, Dämpfung und Tragkraft lassen sich durch unterschiedliche Bauformen und Einstellungen zuverlässig anpassen.

Ein Nachteil von aerostatischen Lagern sind hohe Betriebskosten durch den Luftverbrauch. Der Verbrauch von 1.000 Liter Druckluft pro Minute wird mit Kosten von ungefähr 3 Cent angegeben. Ziel beim Einsatz dieser Verfahren ist demnach, den Verbrauch so gering wie möglich zu halten.

## 4 Analyse bekannter Handhabungstechnologien

---

In der Literatur wird bei aerostatischen Verfahren häufig vom Nachteil einer Partikelbeschlebung des Werkstückes durch das Handhabungsgerät gesprochen. Deshalb wird anstelle von Luft beispielweise zur Nutzung von teurerem Stickstoff als Fluid geraten. Beim Einsatz heutiger industrieller Feinstfilter, ISO-Klasse 1 Zertifizierung (ISO 8573-1 2010), wird mit einer Filterfeinheit von  $0,01 \mu\text{m}$  eine maximale Partikelgröße von  $0,1 \mu\text{m}$  bei einer Partikeldichte von maximal  $0,1 \text{ mg/m}^3$  und einem maximalen Ölgehalt von  $0,01 \text{ mg/m}^3$  garantiert. Dieses entspricht und übertrifft die Qualitätskriterien der Handhabung von oberflächensensitiven Glasobjektträgern (Kapitel 2), sodass die Luftreinheit kein Hindernis für den Einsatz solcher Systeme darstellt. Im Folgenden werden Anwendungsmöglichkeiten für die Handhabung durch Luftlagertechnologien beschrieben.

### Beispiel Luftkissengreifer

Ein Luftkissengreifer besteht aus einer Vielzahl an Überdruck und Unterdruckdüsen. Der im optimalen Fall in seiner geometrischen Form dem Bauteil angepasste Greifer zieht durch die Unterdrucköffnungen das Bauteil an. Gleichzeitig stößt die ausströmende Luft aus den Überdruckdüsen dieses wieder ab. Sobald sich in einem bestimmten Abstand zwischen Greifer und Bauteil ein Kräftegleichgewicht ergibt, befindet sich das Bauteil in einer ruhigen Gleichgewichtslage.

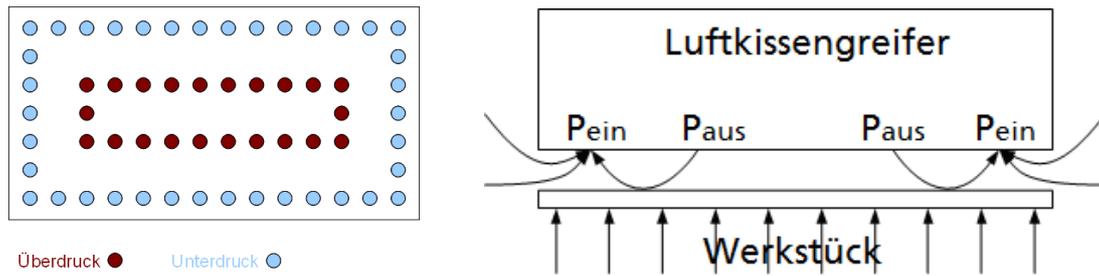


Abbildung 4.14 Funktionsprinzip eines Luftkissengreifers (Siemens 1999)

Es wird in einem Abstand von wenigen  $\mu\text{m}$  berührungslos gehalten. Wie die beschriebenen taktilen Greifvorrichtungen benötigen auch Luftkissengreifer für Bewegungen eines gesicherten Werkstückes einen Bewegungsautomaten, der ebenfalls im Reinraum betrieben werden kann.

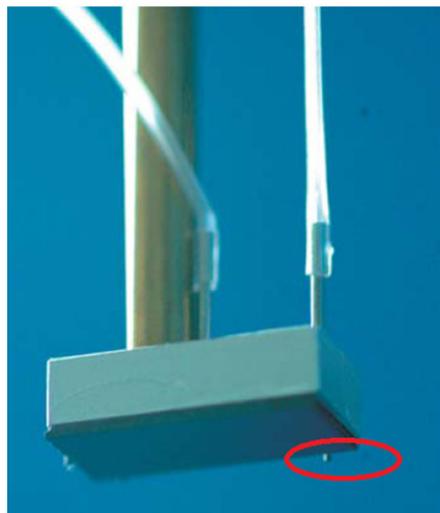


Abbildung 4.15 Luftkissengreifer mit mechanischem Führungsanschlag (Heinzl 2004)

Auf Abbildung 4.15 ist zu erkennen, dass der berührungslose Greifer zur seitlichen Stabilisation des Werkstückes bei Bewegungen mechanische Seitenanschlüsse benötigt. Berührungslose, bauteilzentrierende Kräfte treten bei größeren Bauteilen nur in schwacher Form auf. Sie reichen lediglich bei

## 4 Analyse bekannter Handhabungstechnologien

---

langsamen Geschwindigkeiten aus, sodass seitliche Führungen die Bauteile zentrieren müssen (Heinzl 2004). Es kann also berührungslos gehalten, aber nicht kontrolliert bewegt werden. Die mechanischen Berührungen erhöhen wiederum die Gefahr von Beschädigungen an den fragilen Seitenkanten oder einer Kontamination der Oberfläche durch Partikelverschleppung.

Ein Luftverbrauch von ca. 80 L/min ist ein weiterer Nachteil dieses Verfahrens. Auch die Ausführung in Kombination mit vollautomatisierten Prozessen ist schwierig. Die Werkstücke müssen erneut zunächst auf einer Haltevorrichtung abgelegt werden. Dieses fördert zusätzlich die Gefahr der Beschädigung oder Kontamination.

### Beispiel Flachglastransport

Große Flachglasscheiben für Fernseher oder Autos werden heutzutage bereits auf aerostatischen Lagern anstelle von mechanischen Rollen transportiert. Beschädigungen wie Kratzer werden dadurch vermieden. Die Druckluft strömt gleichmäßig durch feinste Poren eines gesinterten Materials und schafft ein homogenes Luftlager zwischen Transportfläche und Glasplatte. Um die Gläser dabei auf dem Luftfilm kontrolliert zu transportieren, werden Sauggreifer auf deren Ober- oder Unterseite oder seitliche Führungsanschlänge eingesetzt. Diese bewegen oder positionieren die Gläser entlang einer Linearbahn. Das sehr weiche Material der Greiferoberflächen hinterlässt auf den Oberflächen dabei keine Beschädigungen, sondern höchstens Mikropartikel. Diese spielen aber bei der Herstellung von Flachbildschirmen nur eine untergeordnete Rolle. Wie aber in Kapitel 4.1.2 beschrieben, ist der Einsatz von Vakuumgreifern auf der Oberfläche der beschichteten Glasobjektträger ausgeschlossen. Daher müssen in

diesem Fall mechanische Seitenanschläge, ähnlich der Anwendung beim Luftkissengreifer, eingesetzt werden. Der Einsatz solcher statischen Führungen kann wiederum zu Bauteilbeschädigungen oder Oberflächenkontaminationen führen.

Ein Vorteil dieses Verfahrens besteht, wie bei den taktilen Transportvorrichtungen, durch den Einzelstücktransport in einem deutlich höheren Durchsatz gegenüber einer Greifvorrichtung. Zusätzlich können die Glasobjektträger durch berührungslose, automatisierte Prozesse online bearbeitet werden, ohne vorher in einer Haltevorrichtung abgelegt werden zu müssen.

### 4.2.6 Verfahren nach dem Bernoulliprinzip

Der Bernoullieffekt funktioniert nach einem strömungsmechanischem Prinzip und wird auch hydrodynamisches Paradoxon genannt. Industrielle Anwendungen zur berührungslosen Handhabung besitzt der Bernoulligreifer hauptsächlich beim Halten und Umsetzen großer sowie oft formlabiler Bauteile wie beispielweise Wafer. Aber auch für die Handhabung von Glasobjektträgern lässt er sich einsetzen. Um Werkstücke zu greifen, strömt Druckluft oder ein anderes Fluid, etwa ein Schutzgas, mit hoher Geschwindigkeit aus einer oder mehreren zentralen Düsen eines flächigen Greifers senkrecht auf ein flächiges, ebenes Werkstück. Dieses lässt zunächst ein Wegdrücken des Werkstückes durch die ausströmende Luft vermuten. Sie versucht aber dem Hindernis zur Seite auszuweichen und wird dadurch zusätzlich beschleunigt.

## 4 Analyse bekannter Handhabungstechnologien

---

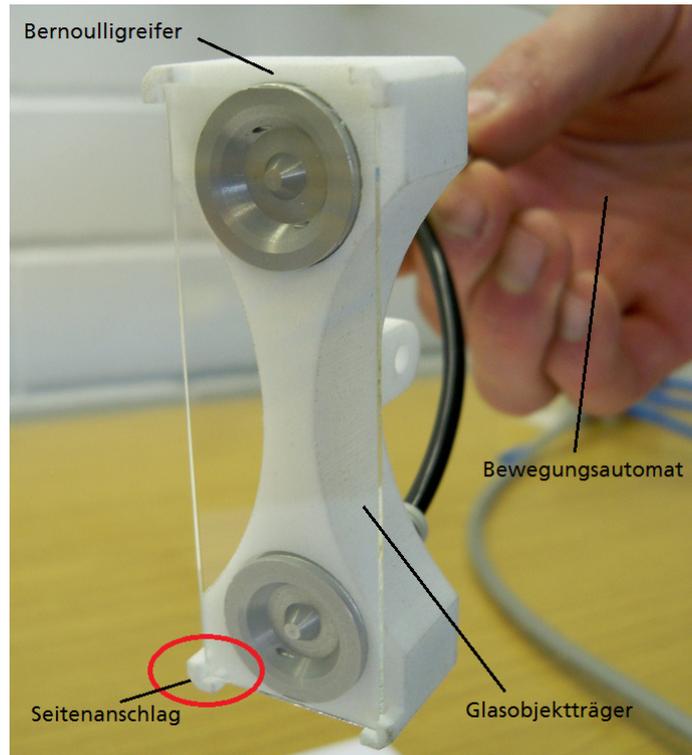


Abbildung 4.16 Dualbernoulligreifer bei der Handhabung von Glasobjektträgern

Nach Bernoulli besitzt Luft mit einer schnelleren Strömungsgeschwindigkeit einen geringeren statischen Druck als langsamer strömende Luft. Da unterhalb des Werkstückes die Strömungsgeschwindigkeit der Luft nahezu null beträgt, es herrscht der Umgebungsdruck, entsteht durch die beschleunigte Luft an der Oberfläche dort ein Unterdruck. Dieser ist im Zentrum der Greiferoberfläche am stärksten ausgeprägt und baut sich gleichmäßig zum Rand des Bauteils wieder ab. Dadurch wird es an den Greifer herangezogen. Bei einem Abstand von etwa 0,5 mm bis 3 mm zwischen Greifer und Werkstück gleichen sich die Anziehungskraft des Unterdruckes und die wirkenden Gegenkräfte wieder aus. Diese bestehen aus der vom Greifer ausströmenden Luft sowie der Gewichtskraft des gehaltenen Bauteils (Hering 1992). Durch das Verfahren lassen sich, abhängig vom Durchfluss, Greifkräfte von bis zu 2,5 N realisieren. Die Steifigkeit bleibt konstant in einem Bereich zwischen 35 N/mm und

40 N/mm (Binder 2003). Es ist also gut geeignet für schwere Werkstücke wie etwa Glasobjektträger.

Ein Nachteil für die Handhabung von empfindlichen Glasobjektträgern ist der große Luftverbrauch. Es wurde ein Durchfluss von bis zu 60 L/min bei einem Handhabungsvorgang mit einem Dualbernoulligreifer gemessen (Abbildung 4.17). Nachteilig für die homogene Oberflächenbeschichtung sind zusätzlich die hohen Strömungsgeschwindigkeiten des Prozessmediums. Diese sind allerdings nötig, um den beschriebenen Bernoullieffekt überhaupt zu erzielen. Sie können gleichzeitig aber zu Störungen der Homogenität der Funktionsoberfläche führen.

Auf Abbildung 4.16 ist zu erkennen, dass auch der Bernoulligreifer zur seitlichen Stabilisation des Werkstückes mechanische Seitenansläge benötigt. Wie beim Luftkissengreifer treten bauteilzentrierende, seitliche Kräfte auf. Diese können allerdings wiederum nur kleinste Werkstücke zentrieren und bei langsamen Geschwindigkeiten kontrollieren, sodass mechanische Führungen bei größeren Bauteilen und höheren Geschwindigkeiten erneut benötigt werden (Schilp 2006).

### 4.2.7 Ultraschallverfahren

Ultraschallverfahren zur berührungslosen Handhabung machen sich hauptsächlich den sogenannten Nahfeldeffekt zunutze (Reinhart 2001). Wie bei aerostatischen Lagern wird in einem sehr kleinen Spalt zwischen zwei ebenen Oberflächen durch strömungsmechanische Eigenschaften ein Luftfilm erzeugt (Zäh 2004). Der Nahfeldeffekt wird durch einen Piezoschwinger ermöglicht, dessen Aufbau bereits seit 1924 bekannt ist (Langevin 1924). Die ebene

## 4 Analyse bekannter Handhabungstechnologien

---

Greiferoberfläche wird durch den Piezoschwinger, im Gegensatz zum flachen und schallharten Werkstück, in schnelle Schwingungen versetzt. Dadurch entsteht im Lagerspalt ein Überdruck, der ähnlich wie ein flächiges aerostatisches Lager wirkt. Daher wird bei diesem Verfahren auch von Ultraschall-Luftlagern gesprochen. Wichtig für den Einsatz sind eine plane Fläche sowie ein gutes Schallreflexionsverhalten des Werkstückes (Schilp 2006). Die Formtoleranz der Greiffläche muss zwischen ca. 10 µm bis 500 µm liegen und zusätzlich kleiner als die erreichbare Luftspaltbreite sein.

Ein Vorteil von Ultraschallsystemen sind bisher die geringeren Betriebskosten gegenüber aerostatischen Verfahren. Da keine Luft aus einem Kompressor dem Prozess zugeführt werden muss, sondern das Umgebungsmedium komprimiert wird, fallen lediglich die Energiekosten an. Diese liegen unter den Kosten zur Herstellung von industrieller Druckluft. Demgegenüber stehen allerdings die höheren Investitionskosten von Ultraschallsystemen. Ein weiterer Vorteil entsteht durch die Nutzung des Umgebungsmediums als Prozessmedium. Dadurch wird in einem Reinraum die Prozessumgebung nicht belastet und der laminare Strömungsfluss nicht gestört. Ausgeschlossen ist somit auch eine Kontamination des Werkstückes durch das Prozessmedium. Dieses sollte allerdings durch heutige Filtertechnologien der ISO 1 Norm auch bei aerostatischen Verfahren ausgeschlossen sein und für die Produktion von oberflächenfunktionalisierten Glasobjektträgern keine Rolle spielen (Kapitel 4.2.5).

Bei der automatisierten Produktion von beschichteten Glasobjektträgern stellt sich allerdings ein entscheidender Nachteil von Ultraschallsystemen zur berührungslosen Handhabung ein. Sowohl die Reinigung als auch die Herstellung der funktionalen Oberfläche wird durch Prozesse durchgeführt, die mit flüssigen Medien wie beispielsweise Lösungsmitteln arbeiten. In

Kombination mit Flüssigkeiten wird bei Ultraschallsystemen allerdings die Energie im System vernichtet und der Prozess dadurch problematisch. So wird auch eine Beschichtung durch digitale Drucktechnik (Kapitel 1) während der Handhabung mittels Leistungsschall nur schwierig umzusetzen sein. Der Einfluss auf die funktionale Beschichtung der Glasobjektträger ist ebenfalls noch nicht geklärt. Die Kombination von Ultraschall und Flüssigkeiten sowie deren Wirkung ist aus der Ultraschallreinigung bekannt. Ultraschallsysteme sind zusätzlich sehr sensibel und müssen präzise dem Werkstück und dem Prozess angepasst werden, da das Prozessfenster für alle Prozessparameter exakt eingestellt werden muss. Dieses ist zeit- und wartungsintensiv (Reinhart 2010). Im Folgenden werden Anwendungsbeispiele zum Einsatz von Ultraschallverfahren gegeben.

### **Beispiel Ultraschallgreifer**

Der Ultraschall-Vakuumgreifer funktioniert nach dem gleichen Prinzip wie ein Luftkissengreifer, der aus vielen Über- und Unterdruckdüsen besteht. Unterschied ist in diesem Fall, dass die abstoßende Kraft nicht durch Überdruckdüsen, sondern durch den Nahfeldeffekt mittels Ultraschall erzeugt wird. Vorteil gegenüber dem Luftkissengreifer ist ein deutlich geringerer Luftverbrauch. Demgegenüber machen sich aber erheblich höhere Anschaffungskosten bemerkbar. Die seitliche Fixierung der Bauteile durch mechanische Anschläge zur kontrollierten Bewegung sowie deren Nachteile sind vergleichbar mit der Ausführung beim Luftkissengreifer.

### Beispiel Ultraschalltransportbahn

Wie bei den aerostatischen Technologien gibt es auch durch Ultraschall erzeugte Transportbahnen für Werkstücke. Die Levitationskraft wird anstelle von einströmender Luft durch den Nahfeldeffekt mittels Ultraschall erzeugt. Die Wafer werden zumeist in einer Höhe zwischen 100  $\mu\text{m}$  – 300  $\mu\text{m}$  transportiert (Schilp 2006). Auch die seitliche Führung der Werkstücke durch mechanische Anschläge ist erneut vergleichbar mit der Ausführung durch Luftlagertechnologien. Wie bei den Greifsystemen stehen die geringeren Betriebskosten den höheren Anschaffungskosten gegenüber.

#### 4.2.8 Nachteile berührungsloser Handhabungstechnologien

In den vorangegangenen Kapiteln wurden verschiedene bekannte Technologien zur berührungslosen Handhabung von Glasobjektträgern beschrieben und analysiert. Dabei wurde zusammenfassend festgestellt, dass alle Verfahren durch berührungslose Technologien die Gewichtskraft der Werkstücke kompensieren und diese somit frei schweben lassen (Werkstücklevitation). Aber eine Kontrolle, also eine gerichtete Gegenkraft über die lateralen Auslenkkräfte, benötigt zumeist kleinste taktile Anschläge, Seitenführungen oder Zentrierungen. Sie ist somit nicht vollständig berührungslos. Durch den berührungslosen Ausgleich der Werkstückmasse werden bei den mechanischen Berührungen allerdings nur geringe Kräfte auf die Seitenkanten der Werkstücke übertragen. Dadurch sind beispielsweise bei Halbleiterbauteilen mit empfindlichen Oberflächen, aber unempfindlichen Seitenkanten nur selten Beschädigungen zu erwarten. Die

Partikelbildung und Partikelverschleppung wird dadurch zwar reduziert, aber durch die Berührungen nicht ausgeschlossen.

### 4.3 Beurteilung bekannter Technologien zu den Anforderungen an eine Handhabungsvorrichtung für Glasobjektträger

#### 4.3.1 Bewertungskriterien

Zur Erstellung einer Entscheidungstabelle für die Beurteilung von bekannten Verfahren zur Handhabung von oberflächensensitiven Glasobjektträgern müssen verschiedene Kriterien berücksichtigt und unterschiedlich gewichtet werden. Sie werden im Folgenden vorgestellt und mit einer Gewichtung für die Gesamtbewertung versehen.

#### Handhabungsqualität

Hierbei fallen hauptsächlich die Qualitätskriterien aus Kapitel 2 ins Gewicht. Das Qualitätsmerkmal Unversehrtheit wird unter dem Punkt „Schutz vor Beschädigungen“ mit insgesamt 25 % der Gesamtnote gewichtet. Beschädigte Werkstücke müssen entsorgt werden und stellen somit einen erheblichen Kostenfaktor dar. Es handelt sich im Wesentlichen um den Schutz der empfindlichen Seitenkanten sowie der Oberflächen vor Mikrorissen, Kratzern oder anderen mechanischen Beschädigungen.

Die Reinheit wird unter dem Aspekt „Schutz vor Kontamination“ betrachtet und mit 20 % ebenfalls sehr hoch bewertet. Verunreinigte oder kontaminierte Werkstücke stellen nicht zwangsläufig einen direkten Ausschuss dar, sondern

## 4 Analyse bekannter Handhabungstechnologien

---

können der Prozesskette wieder zugeführt werden (Kapitel 2). Sie können aber die Taktzeiten und damit den Durchsatz erheblich stören und senken. Neben der Reinheit fällt unter dieses Kriterium auch der Schutz der funktionalen Oberflächenbeschichtung vor Beschädigungen.

### Sicherheit und Durchsatz

Diese Aspekte spiegeln sich in den Kriterien „Taktzeit“ und „Reproduzierbarkeit“ wider. Sie werden jeweils mit 15 % und 10 % zum Gesamtergebnis bemessen, da sie erheblichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit eines Systems haben können. Entscheidende Faktoren können beispielsweise viele und komplexe Pick-and-Place-Vorgänge sein, welche die Prozesse verlangsamen, da die Werkstücke erst aufwendig detektiert werden müssen. Wie genau ein Werkstück im Hinblick auf die Reproduzierbarkeit gegriffen und wieder abgelegt werden kann, steht dabei als eine Fragestellung im Mittelpunkt.

### Integration in ein vollautomatisierbares Anlagenkonzept

Bei diesem wichtigen Punkt steht die Umsetzung eines Handhabungssystems in eine vollautomatisierbare Produktion mit den dabei verwendeten Bearbeitungsprozessen im Vordergrund. Können die Werkstücke direkt während der Handhabung bearbeitet werden oder müssen sie für das Verfahren zunächst auf anderen Vorrichtungen abgelegt werden? Dieses würde zusätzlich Einfluss auf die Qualität und Taktzeit der Produktion haben und ist daher mit 15 % bewertet. Zusätzlich findet der Aufwand zur Umsetzung einer solchen Technologie in diesem Punkt Beachtung.

### Wirtschaftlichkeit

Neben der technologischen ist die wirtschaftliche Machbarkeit mitentscheidend für den Einsatz eines automatisierten Verfahrens. Die Kosten für Anschaffung und Betrieb über den Einsatzzeitraum müssen mit dem Nutzen einer solchen Investition in einem positiven Verhältnis stehen. Bei einer langfristigen Einsatzplanung stehen die Betriebskosten im Vordergrund und werden mit 10 % zum Gesamtergebnis bewertet. Die Anschaffungskosten fallen mit 5 % ins Gewicht.

## 4 Analyse bekannter Handhabungstechnologien

### 4.3.2 Entscheidungstabelle über die einzelnen Verfahren

Bewertung bekannter Handhabungsverfahren für den Einsatz in der Produktion von Glasobjektträgern Kriterium und Gewichtung [%]	manuelle Handhabung	taktile Greifer	Vakuumbreifer	taktiler Transportieren	Luftkissengreifer	Bernoulligreifer	Luftkissentransport	Ultraschallgreifer	Ultraschalltransport
Schutz vor Beschädigung [25 %]	8	2	<b>9</b>	4	6	4	6	6	6
Schutz vor Kontamination [20 %]	<b>6</b>	2	0	2	3	3	3	3	3
Taktzeit [15 %]	2	6	7	<b>8</b>	6	6	<b>8</b>	6	<b>8</b>
Reproduzierbarkeit [10 %]	2	4	4	<b>8</b>	4	4	<b>8</b>	4	<b>8</b>
Umsetzbarkeit Prozesse [15 %]	3	3	4	<b>7</b>	3	3	<b>7</b>	0	0
Anschaffungskosten [5 %]	<b>8</b>	6	6	4	6	6	4	2	2
Betriebskosten [10 %]	4	8	6	6	2	4	4	<b>8</b>	<b>8</b>
<b>Gesamtbewertung [100 %]</b>	<b>4,95</b>	<b>3,75</b>	<b>5,2</b>	<b>5,25</b>	<b>4,35</b>	<b>4,05</b>	<b>5,75</b>	<b>3,8</b>	<b>5,2</b>

Abbildung 4.17 Tabelle Entscheidungskriterien zu bekannten Handhabungsverfahren

Die Bewertungspunkte sind nach einer Skala von 0-10 wie gewählt:

- 10: sehr gute Eigenschaften
- 8: gute Eigenschaften
- 6: in Ordnung
- 4: noch akzeptabel
- 2: wenig akzeptabel
- 0: nicht akzeptabel

### Auswertung

Ein Einsatz von Vakuumsaugern oder Ultraschalltechnologien zur Handhabung von Glasobjektträgern ist trotz der guten Gesamtergebnisse aufgrund ihrer Eigenschaften nicht möglich. Vakuumsauger schützen das Werkstück sehr gut vor mechanischen Beschädigungen, benötigen zum Greifen aber zwingend eine flache Oberfläche. Dabei würde eine Funktionsschicht der Glasobjektträger zerstört. Dieses ist nicht akzeptabel. Ultraschalltechnologien funktionieren nicht in Kombination mit Flüssigkeiten. Diese werden aber bei den Bearbeitungsprozessen Reinigung und Beschichtung eingesetzt. Zusätzlich kann die funktionale Oberfläche negativ beeinflusst werden. Bernoulli- und Luftkissengreifer sind gegenüber einer manuellen Handhabung zwar schneller und reproduzierbarer in den Abläufen, schützen die Qualität der Werkstücke aber nur unzureichend, sodass ein Einsatz solcher Verfahren nicht den erforderlichen Nutzen bringt. Bei Weitem schlechter sind die Ergebnisse bei taktilen Greifvorrichtungen, die nochmals die Gefahr von Beschädigungen erhöhen. Transportvorrichtungen punkten primär durch ihre Taktzeiten und Reproduzierbarkeit. Sie liegen dadurch ganz vorne in den Bewertungen. Durch den Wegfall von Pick-and-Place-Vorgängen ist der Durchsatz höher und die Gefahr der Beschädigungen sinkt. Aerostatische Verfahren sind schonender beim Transport der Werkstücke als taktile Systeme.

Die Anschaffungskosten und durch den Luftverbrauch nicht unerhebliche Betriebskosten sorgen für Nachteile gegenüber der manuellen Produktion. Entscheidender Faktor für den Einsatz des Menschen bleibt aber die Handhabungsqualität. Zwar kann ein automatisiertes Lufttransportsystem ein Vielfaches der Menge eines Menschen handhaben, aber die höchste Qualität in

## 4 Analyse bekannter Handhabungstechnologien

---

Bezug auf die Reinheit und Unversehrtheit der Werkstücke schafft zurzeit nur die manuelle Produktion. Dieses ist ein entscheidender Faktor, weshalb produzierende Unternehmen im Hinblick auf die Gesamtkosten bei der automatisierten Handhabung für die Glasobjektträgerproduktion noch zögern.

### 4.3.3 Zusammenfassung und Fazit zum Stand der Technik

Bei der Bewertung bekannter Technologien zur Handhabung von oberflächensensitiven Glasobjektträgern fällt auf, dass die meisten Verfahren der manuellen Handhabung in den Kriterien Durchsatz, Sicherheit, Prozessintegration und Wirtschaftlichkeit überlegen sind. Der Vorteil der manuellen Handhabung liegt in der Handhabungsqualität, sodass diese heutzutage größtenteils noch eingesetzt wird.

In diesem Bereich haben taktile Verfahren große Nachteile beim Schutz der Werkstücke vor mechanischen Beschädigungen oder Kontaminationen sowie Verschmutzungen. Dieses ist hauptsächlich durch die vielen mechanischen Berührungen zu erklären. Sie verursachen Flächenpressungen oder Partikelkontaminationen. Bessere Ergebnisse liefern bekannte berührungslose Verfahren. Trotzdem erreichen auch diese nicht die Qualität der manuellen Handhabung. Dieses Problem lässt sich folgendermaßen erklären: Berührungslose Verfahren sind in der Lage, die meist vertikale Gewichtskraft der Werkstücke durch aerostatische Lager oder Ultraschall-Luftlager auszugleichen und diese dadurch zum Schweben zu bringen. Berührungslose und kontrollierte Bewegungen der Glasobjektträger können allerdings nicht erreicht werden. Die zum Ausgleich der lateralen Auslenkkräfte und zur Führung der Werkstücke

eingesetzten mechanischen Seitenanschläge können Beschädigungen an den fragilen Seitenkanten oder Partikelkontaminationen verursachen.

Die Definition von Handhabung aus Kapitel 3 wurde durch zusätzliche Kriterien zu einer Definition von berührungsloser Handhabung ergänzt (Kapitel 4.2.1). Diese Ausführungen von Höppner (Höppner 2002) und Schilp (Schilp 2006) müssen allerdings nochmals erweitert werden. Nach ihrer Definition ist es richtig, dass die vorgestellten Verfahren berührungslose Handhabungsvorrichtungen darstellen, obwohl die Kontrolle über die Werkstücke durch mechanische Prinzipien hergestellt wird. Dieses allerdings widerspricht dem im Folgenden aufgeführten Aspekt der Definition:

„Unter berührungsloser Handhabung versteht man das ... *definierte Verändern* ... einer vorgegebenen räumlichen Anordnung von geometrisch bestimmten Körpern in einem Bezugskordinatensystem, wobei die hierfür nötigen Kräfte und/oder Momente *ohne mechanischen Kontakt* übertragen werden“ (Höppner 2002).

Um die vorgegebene räumliche Anordnung eines geometrisch bestimmten Körpers (hier Glasobjektträger) definiert zu verändern, muss dieser also entweder durch eine Greifvorrichtung oder Transportvorrichtung ohne mechanischen Kontakt kontrolliert bewegt werden. Dieses ist bei den vorgestellten Verfahren nicht der Fall. Ein minimaler mechanischer Kontakt reicht aber bereits aus, um die Handhabungsqualität der Glasobjektträger deutlich zu senken.

### 4.3.4 Ansätze zur Entwicklung eines innovativen Handhabungsverfahrens für Glasobjektträger

Nach der Analyse bekannter Technologien ist daher nun die Aufgabe, ein neues, vollautomatisierbares Verfahren zur Handhabung oberflächensensitiver Glasobjektträger zu entwickeln. Dieses muss ausschließlich und vollständig ohne mechanischen Kontakt die lateralen Auslenkkräfte des Werkstückes ausgleichen und kontrollieren. Gleichzeitig muss es dadurch die Möglichkeit bieten, dieses zu bewegen und zu positionieren. Die Definition der berührungslosen Handhabung ist demnach wie folgt zu erweitern:

„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 *ausschließlich und vollständig* ohne mechanischen Kontakt übertragen werden.“

Die Analyse bekannter Handhabungstechnologien hat neben dem beschriebenen Hauptaspekt weitere wichtige Ansätze geliefert. Diese sollten bei der Entwicklung eines neuen Verfahrens zur Handhabung von Glasobjektträgern Beachtung finden. Transportsysteme schaffen durch den Wegfall von vielen einzelnen Pick-and-Place-Vorgängen einen höheren Durchsatz. Durch innovative Prozesse (Kapitel 1) können die Werkstücke bereits online und kontaktlos auf dem Werkstückträger bearbeitet werden und müssen somit nicht auf Haltevorrichtungen abgelegt werden.

Die hohen Anschaffungskosten sind hauptsächlich durch die notwendige Reinraumtauglichkeit der Systeme zu erklären, da die Produktion der Glasobjektträger bisher nur in reinen Umgebungen vor Umwelteinflüssen

ausreichend geschützt werden kann. Bei den Betriebskosten punkten die zur Handhabung von Glasobjektträgern nicht verwendbaren Ultraschallsysteme (Kapitel 4.3.2) durch ihren geringen Energieverbrauch gegenüber aerostatischen Systemen. Abschließend ist durch die Betrachtung und Analyse bekannter Handhabungsverfahren festzuhalten, dass die Aufgabenstellung zur Handhabung oberflächensensitiver Glasobjektträger wie folgt definiert werden kann:

In dieser Arbeit soll ein vollautomatisierbares, berührungsloses und auf aerostatischen Technologien basierendes Transportsystem entwickelt werden. Dieses soll reproduzierbar sein und, unter Beachtung der Anforderungen an Reinheit und Unversehrtheit, die Handhabung oberflächensensitiver Glasobjektträger zwischen und während den einzelnen Prozessschritten ermöglichen. Die schnellen Taktzeiten sowie die hohe Reproduzierbarkeit von Transportverfahren sollen für eine Effizienzsteigerung der Produktion genutzt werden. Der Luftverbrauch ist gegenüber bekannten aerostatischen Technologien hinsichtlich der Betriebskosten zu optimieren.

### Kapitel 5

## Prinzipien zur berührungslosen Kompensation der vertikalen Gewichtskraft

Zur berührungslosen Kompensation der Gewichtskraft eines Werkstückes konnten bei der Analyse bekannter Technologien Prinzipien auf Basis von aerostatischen Lagern gefunden werden, die einer schonenden Handhabung im Sinne der Aufgabenstellung entsprechen könnten. Diese werden in diesem Kapitel analysiert, verglichen sowie auf ihre Einsatzfähigkeit bewertet und weiterentwickelt. Dazu werden die ausgewählten Luftlager in einer Versuchsreihe zu den Kriterien Tragkraft, Steifigkeit, Dämpfung und Luftverbrauch untersucht. Den Abschluss dieses Kapitels bildet ein Vergleich verschiedener Vorrichtungen zum Einsatz von aerostatischen Lagern mit einer Analyse der jeweiligen Vor- und Nachteile.

### 5.1 Freiheitsgrade eines Werkstückes bei Kompensation der Gewichtskraft

Im Fazit der Analyse bekannter Verfahren zur Handhabung von oberflächensensitiven Glasobjektträgern wird die Aufgabenstellung definiert als die Entwicklung eines vollständigen und ausschließlich berührungslosen Transportsystems auf Basis von aerostatischen Lagern. Um vollständig und

## 5 Prinzipien zur berührungslosen Kompensation der Gewichtskraft

---

ausschließlich eine berührungslose Kontrolle auf ein Werkstück auszuüben, gilt es nach Definition aus Kapitel 3 sowohl die drei translatorischen (X, Y, Z) als auch die drei rotatorischen ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ) Freiheitsgrade eines Werkstückes ohne mechanischen Kontakt zu kontrollieren.

Die z-Achse stellt dabei die Richtung der Gewichtskraft des Werkstückes durch die Erdanziehungskraft dar, X und Y die laterale Freiheitsgradebene. Fünf dieser Freiheitsgrade müssen dauerhaft und zuverlässig durch ein Transportsystem kontrolliert werden.

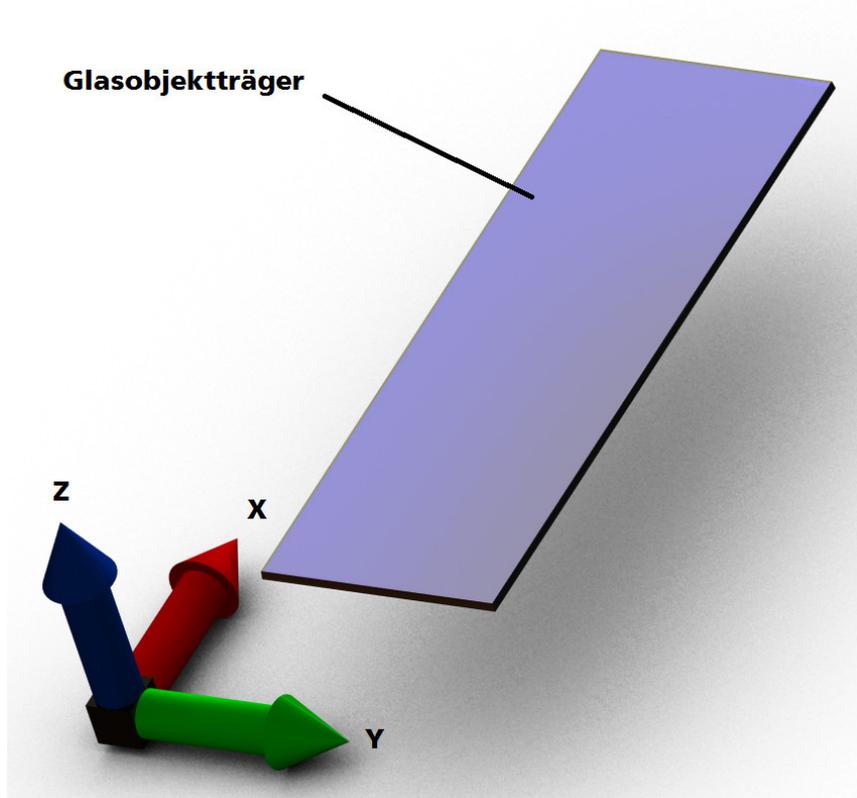


Abbildung 5.1 Freiheitsgrade eines Glasobjektträgers

Dieses entspricht der in Kapitel 3 hergeleitete Ordnungszahl = 3/2 für ein geordnetes Transportsystem. Der sechste Freiheitsgrad ist eine translatorische Gerade, die Bewegungsrichtung der Glasobjektträger, hier entlang der x-Achse.

## 5 Prinzipien zur berührungslosen Kompensation der Gewichtskraft

---

Dieser soll ohne mechanischen Kontakt so kontrolliert werden, dass sich das Werkstück entlang dieser Geraden steuerbar bewegen und positionieren lässt. Die Aufgabe bei der Kompensation der vertikalen Gewichtskraft ist, eine berührungslose Kontrolle über den Freiheitsgrad Z und der Rotationswinkel  $\alpha$  und  $\beta$  zu erlangen. Alle anderen Bewegungen in der x-y-Ebene, auch Rotationen  $\gamma$  um die z-Achse werden im anschließenden Kapitel zur Kompensation der lateralen Auslenkkräfte behandelt. Als Basistechnologie einer berührungslosen Levitationsvorrichtung werden in den folgenden Überlegungen aerostatische Lager im Vordergrund der Betrachtungen stehen.

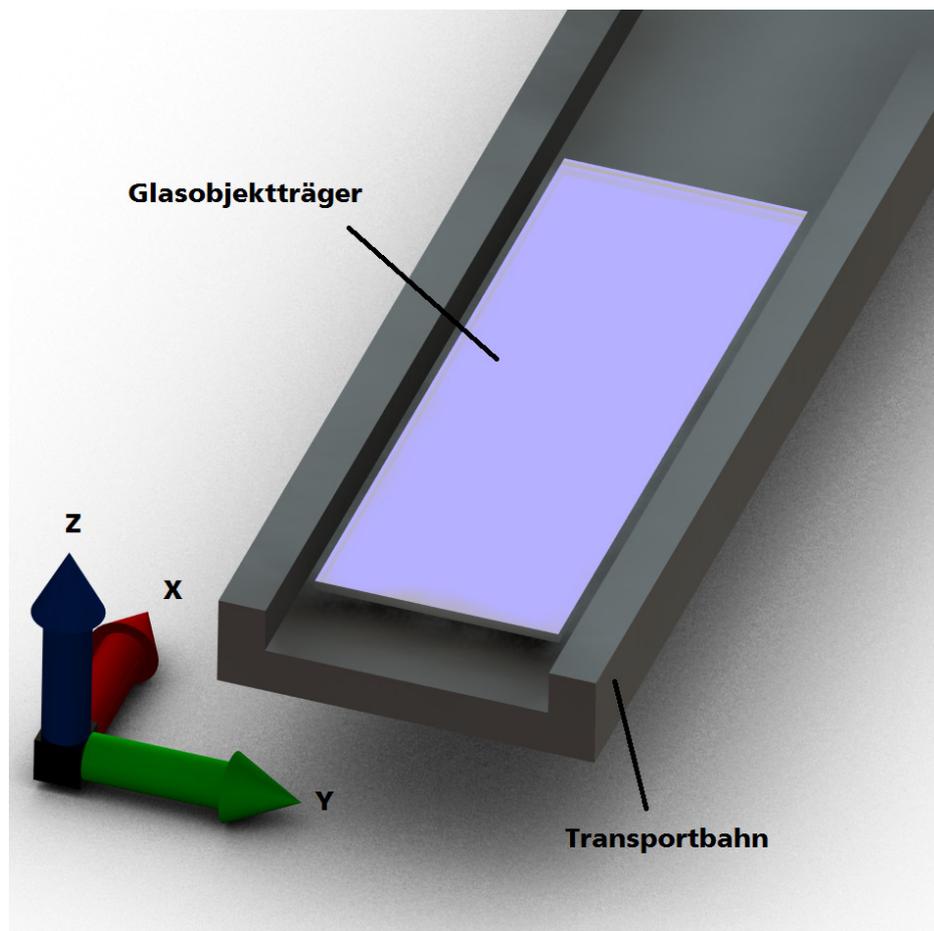


Abbildung 5.2 Freiheitsgrad (x-Richtung) eines Werkstückes in Transportvorrichtung

### 5.2 Eigenschaften von aerostatischen Lagern

Zur Herstellung eines aerostatischen Lagers sind in Kapitel 4 bereits drei grundlegende Technologien vorgestellt worden (Einzeldüse, Einzeldüse mit Vorkammer und Systeme aus diskret verteilten Mikrodüsen bzw. Sintermaterialien). Luftlager sind hauptsächlich durch ihre Eigenschaften Tragkraft, Steifigkeit, Dämpfung und Luftverbrauch charakterisiert. Diese sind zum einen voneinander selbst, zum anderen aber auch vom eingespeisten Betriebsluftdruck abhängig. Zusätzlich haben die Technologie und Form der Lagervorrichtung oder des Werkstückes Einfluss auf diese Eigenschaften. Im Folgenden werden sie zum besseren Verständnis einer anschließenden Versuchsreihe beschrieben. Diese analysiert verschiedene poröse Sintermaterialien, die zur berührungslosen Kompensation der Gewichtskraft eingesetzt werden.

#### 5.2.1 Tragkraft und Lagerspalt

Die Tragkraft eines aerostatischen Lagers wird in **Newton (N)** bemessen. Ein Glasobjektträger besitzt bei Abmaßen von 76 mm x 25 mm x 1 mm eine Masse von 4,725 Gramm. Von Bedeutung ist der durch ein Luftlager erzeugte Lagerspalt zwischen einer Transportvorrichtung und dem Glasobjektträger. Die Tragkraft besitzt dabei als Belastungsgrenze des Luftlagers entscheidenden Einfluss auf den Lagerspalt. Beim Transport von Werkstücken durch ein Luftlager wird meist eine Spalthöhe von 0,1 mm bis 0,3 mm angestrebt.

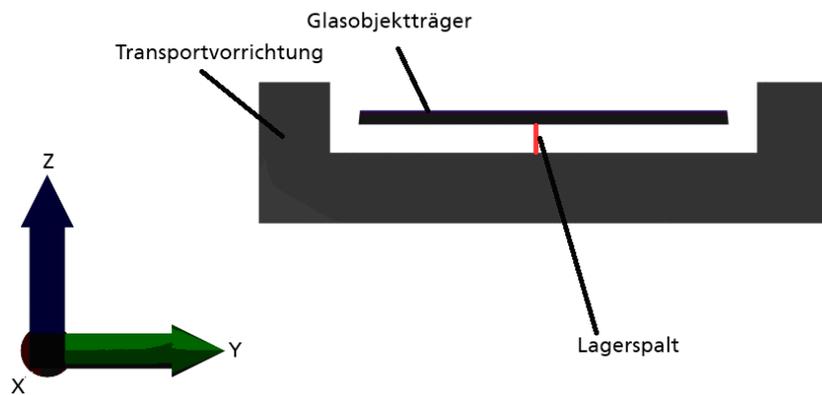


Abbildung 5.3 Lagerspalt zwischen einem Glasobjektträger und einer Transportfläche

Somit ist der Luftlagerspalt groß genug, um auch bei Unebenheiten oder kurzzeitigen Störungen des Systems die Berührungslosigkeit zur Transportvorrichtung sicherzustellen. Andererseits verschlechtern sich bei zunehmender Spaltgröße die Eigenschaften Tragkraft, Steifigkeit und Dämpfung des Werkstückes. Daher wird meist nach einem optimalen Kompromiss gesucht. Der Spalt wird so groß wie nötig, aber so klein wie möglich gewählt. Die Tragkraft des Luftlagers muss demnach die Gewichtskraft des Werkstückes (und somit des Freiheitsgrades Z) bis zu einer bestimmten Position (dem gewünschten Lagerspalt) kompensieren und ist zum größten Teil anhängig vom Betriebsluftdruck und der Technologie und Form des Luftlagers.

### 5.2.2 Steifigkeit und Dämpfung

Die Steifigkeit eines aerostatischen Lagers spiegelt größtenteils die Homogenität seines Luftfilmes wider. Sie ist entscheidend für die Kontrolle über die Freiheitsgrade  $\alpha$  und  $\beta$ , also die Rotationsbewegungen um die x- und y-Achse

## 5 Prinzipien zur berührungslosen Kompensation der Gewichtskraft

des Glasobjektträgers. Diese Rotationsbewegungen werden im Weiteren als Flutterbewegungen des Werkstückes beschrieben. Unter Steifigkeit versteht man den Widerstand eines aerostatischen Lagers gegen Verformung. Wird eine punktuelle Kraft auf einen Randbereich eines Werkstückes gerichtet, ist die Steifigkeit das Maß für das Nachgeben des Luftlagers und damit für die Flutterbewegung des Werkstückes. Die Steifigkeit wird in  $\text{N}/\mu\text{m}$  gemessen.

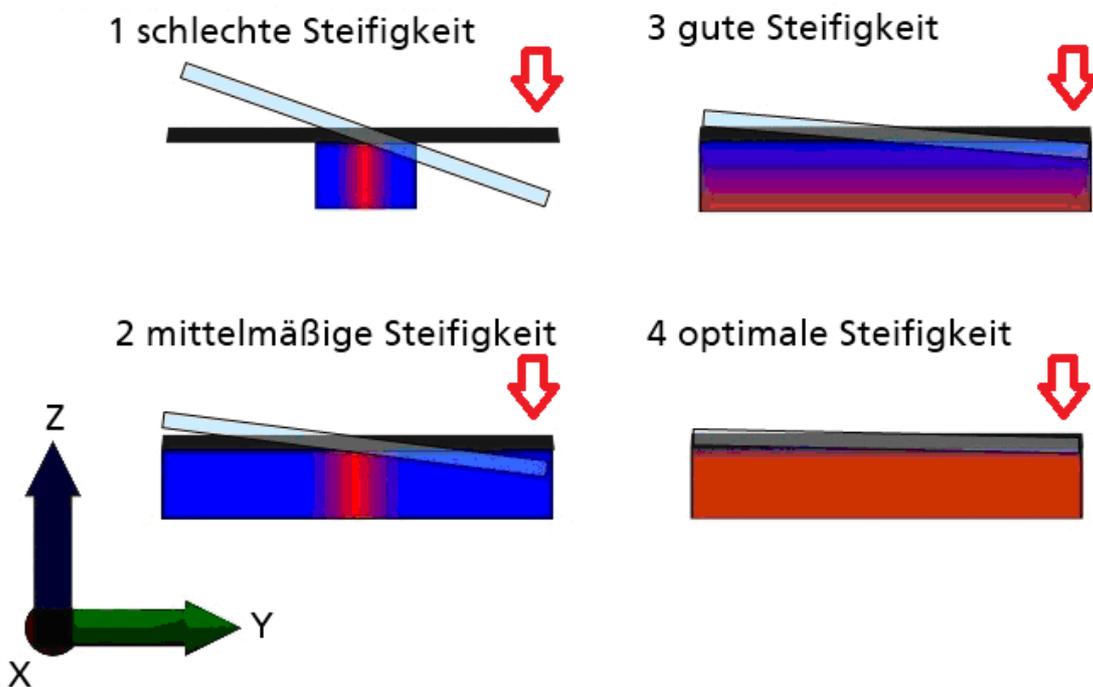


Abbildung 5.4 Bewertungsgrade der Steifigkeit eines aerostatischen Lagers

Handelt es sich wie in Punkt 1 der Abbildung 5.4 um ein zentral angelegtes aerostatisches Lager unter dem Werkstück, reicht schon die kleinste Berührung der Oberfläche am Seitenrand aus, um das Werkstück aus der Ruhelage und zum Kippen zu bringen. Denn an den Seitenrändern ist kein oder nur sehr wenig Luftwiderstand vorhanden. Ist das Luftlager zumindest flächig ausgebildet, ist an den Seitenkanten ein leichter Widerstand (mittelmäßige Steifigkeit) vorhanden. Dieser kann das Werkstück wieder in die eigene Ruheposition drücken. Es wird

hier von der Dämpfungseigenschaft des Systems gesprochen. Im Fall von Punkt 2 der Abbildung 5.4 stellt sich bei einer punktuellen Krafteinwirkung zunächst ein leichtes Aufschaukeln des Werkstückes um die Mittelachse (roter Hochdruckbereich) ein. Das Werkstück wird anschließend langsam wieder in eine Ruhelage zurückversetzt. Dieses wird als schlechtes Dämpfungsverhalten eines aerostatischen Lagers gegen Eigenschwingungen bezeichnet.

Ein deutlich besseres Verhalten zeigt das aerostatische Lager in Punkt 3 der Abbildung 5.4. Hier ist eine homogene Luftverteilung abgebildet. Diese bewirkt eine gute Steifigkeit mit hohem Dämpfungsverhalten gegenüber Flatterbewegungen. Durch den abfallenden Luftdruck in Richtung der Unterseite des Werkstückes, wird von einem weich ausgebildeten, homogenen Luftlager gesprochen. In Punkt 4 der Abbildung 5.4 hingegen ist ein hart ausgebildetes, homogenes Luftlager abgebildet. Dieses besitzt bei gleichmäßiger Luftverteilung zusätzlich einen hohen Luftdruck direkt unter dem Werkstück und sorgt dadurch für eine sehr gute Steifigkeit und Dämpfung. Diese sind also wie die Tragkraft direkt abhängig von der Technologie und Form sowie dem eingespeisten Betriebsluftdruck des aerostatischen Lagers.

### 5.3 Technologien zur Erzeugung von aerostatischen Lagern

In Kapitel 4 wurden die verschiedenen Technologien zur Erzeugung von aerostatischen Lagern bereits miteinander verglichen. Dabei wurde festgestellt, dass Luftlager aus diskret verteilten Mikrodüsen oder porösen Sintermaterialien durch ihre Eigenschaften den Düsenluftlagern überlegen sind. Dieses wird im Folgenden näher betrachtet und analysiert.

### 5.3.1 Aerostatische Düsenlager

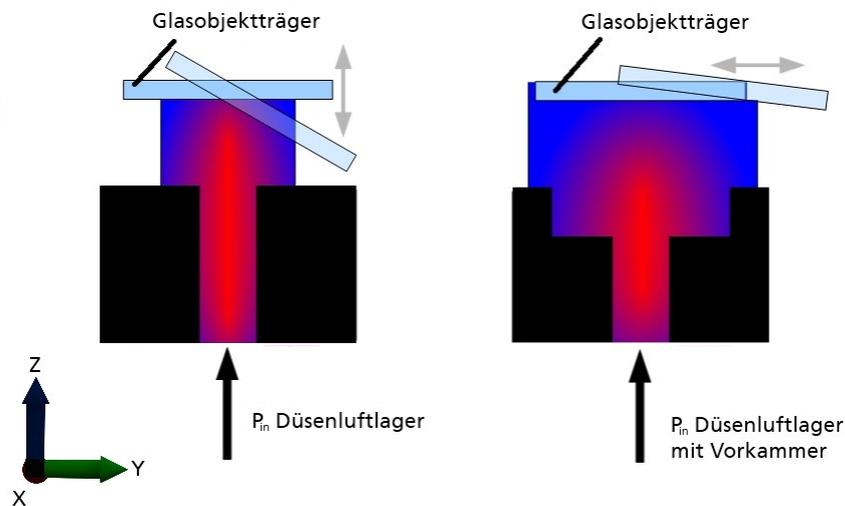


Abbildung 5.5 Luftdruckverteilung im aerostatischen Lager mit Einzeldüse (links) sowie mit Einzeldüse und Vorkammertechnologie (rechts)

In der Abbildung 5.5 ist zu erkennen, dass aus einer einzelnen Düse bestehende aerostatische Lager keinen homogenen Luftfilm unter dem Werkstück bilden. Dadurch erzielen diese in den Eigenschaften Steifigkeit und Dämpfung schlechte Ergebnisse. Es entstehen unkontrollierte Bewegungen in y-Richtung, oft in Form von gleichmäßigen Schwingungen oder Flutterbewegungen. Der Einsatz einer Vorkammer verbessert dieses Verhalten, führt aber trotzdem nicht zu einem zufriedenstellenden Ergebnis, da die Luftverteilung weiterhin nicht homogen ist (Abbildung 5.5, rechts).

Die Tragkraft kann durch einen entsprechenden hohen Betriebsluftdruck zufriedenstellend eingestellt werden. Der Luftverbrauch ist allerdings durch diesen und die im Verhältnis sehr großen Düsenöffnungen sehr hoch und stellt damit einen erheblichen Kostenfaktor bei den Betriebskosten solcher Systeme dar.

### 5.3.2 Aerostatische Sinterlager

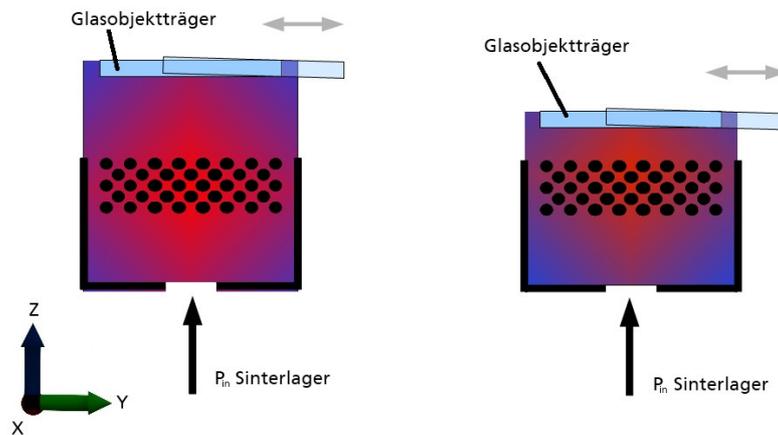


Abbildung 5.6 Vergleich der Luftdruckverteilung von Sinterluftlagern unter verschiedenen Betriebsluftdrücken

Deutlich bessere Ergebnisse in Bezug auf die Luftlagereigenschaften Tragkraft, Steifigkeit, Dämpfung und Verbrauch werden beim Einsatz von porösen Sintermaterialien festgestellt. In Abbildung 5.6 ist links ein aerostatisches Lager mit einer homogenen Luftverteilung zu erkennen. Die eingespeiste Betriebsdruckluft wird zunächst durch den Versorgungsanschluss in eine Vorkammer unter der Sinterfläche geleitet, um sich dort gleichmäßig und flächig zu verteilen. Aus dieser strömt die Druckluft anschließend durch das poröse Material in den Lagerspalt.

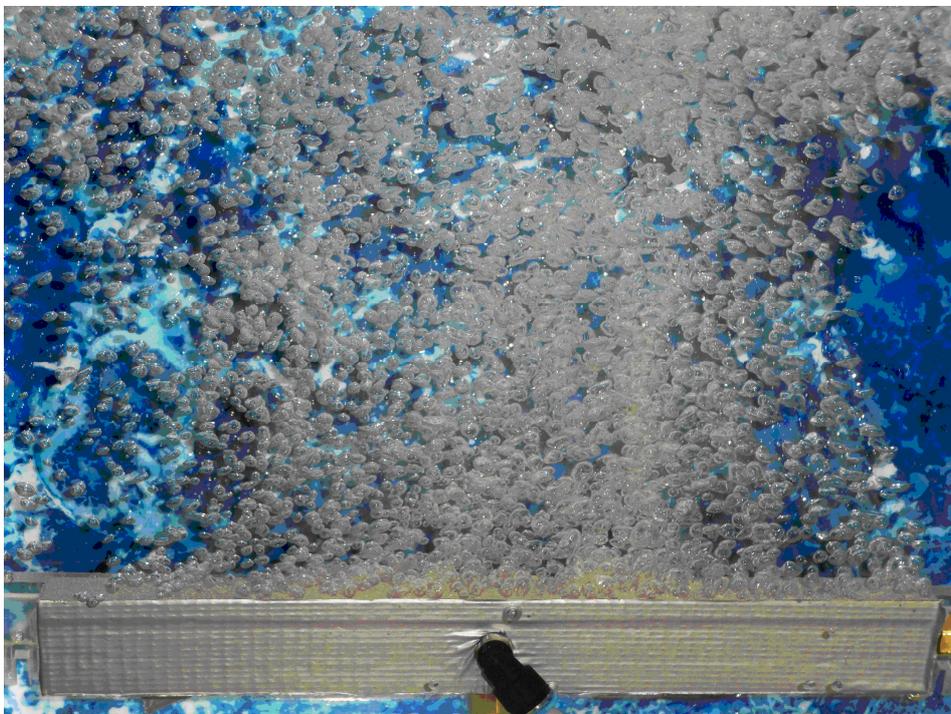
Durch eine Anpassung des Verhältnisses Betriebsluftdruck zu Luftdurchfluss lässt sich der Lagerspalt zusätzlich deutlich reduzieren (Abbildung 5.6, rechts). Dieses hat eine weitere Verbesserung der Homogenität des aerostatischen Lagers unter dem Werkstück zur Folge. Trotzdem kann auch bei einem gut eingestellten herkömmlichen Sinterluftlager festgestellt werden, dass sich in der Lagermitte ein zum Rand hin leicht abfallender Luftdruck einstellt. Somit ist das aerostatische Lager in der Homogenität der Oberfläche noch nicht optimal und

## 5 Prinzipien zur berührungslosen Kompensation der Gewichtskraft

---

kann durch die fehlende Steifigkeit am Seitenrand zu den beschriebenen Flutterbewegungen oder Schwingungen neigen.

Zwar tritt an allen Stellen des porösen Sintermaterials das gleiche Luftvolumen aus, der Luftdruck ist aber in der Mitte der Vorkammer stärker ausgeprägt. Dieses ist hauptsächlich durch die Druckluftzuführung der Vorkammer zu erklären. Die Druckluft trifft als linienförmige Kraft in der Mitte der Vorkammer auf das Sintermaterial und verteilt sich anschließend unter einem Druckverlust. In der Mitte der Vorkammer dringt dadurch zunächst nicht mehr Luftvolumen durch das poröse Material. Allerdings gelangt es mit einem größeren Arbeitsdruck und einer höheren Strömungsgeschwindigkeit in den Lagerspalt. Durch diesen Effekt wird eine Inhomogenität des Luftfilms trotz Sintermaterials mit gleichmäßiger Luftvolumenverteilung verursacht. Ein zur Analyse dieses Problems durchgeführter Unterwassertest veranschaulicht dieses Verhalten.



*Abbildung 5.7 Unterwassertest zur Luftverteilung von porösem Sintermaterial*

In Abbildung 5.7 ist zu erkennen, dass sich die Druckluft zwar über die gesamte Oberfläche des Materials verteilt, aber in der Position der mittigen Versorgungsleitung deutlich vermehrt austritt. Eine genauere Betrachtung und Analyse anhand eines hochauflösenden und schnellen Kamerasystems lässt erkennen, dass dieser Effekt durch die höhere Strömungsgeschwindigkeit der Luft in Folge des stärkeren Luftdruckes zu erklären ist.

### 5.4 Versuchsreihe zur Analyse von Sintermaterialeigenschaften

Um eine hohe Kontrolle über ein Werkstück zu erlangen, sollte das aerostatische Lager möglichst homogen sein und dadurch mit einer hohen Steifigkeit und Dämpfung Werkstücke transportieren. Um dieses Ziel zu erreichen, wurden mithilfe eines Versuchsstandes unterschiedliche Arten von porösem Sintermaterial in Bezug auf ihre Eigenschaften unter verschiedenen Versuchsbedingungen analysiert und bewertet.

Die unterschiedlichen Sintermaterialien wurden dazu abwechselnd in den Versuchsstand integriert. Durch einen mittigen Versorgungsanschluss auf der Unterseite konnte eine Vorkammer mit Druckluft gefüllt werden. Diese trat durch das Sintermaterial an die Oberfläche und versetzte einen Glasobjektträger in einen Levitationszustand. Die laterale Kontrolle über den Glasobjektträger wurde durch mechanische Anschläge sichergestellt. Um den Luftdurchfluss unter den verschiedenen Bedingungen zu messen, befand sich ein Durchflusssensor in der Vorkammerzuleitung. Direkt in der Vorkammer waren zwei Drucksensoren installiert, einer in der Mitte und einer am Seitenrand, um die Druckverteilung in der Kammer zu überwachen. Nur ein nahezu gleicher

## 5 Prinzipien zur berührungslosen Kompensation der Gewichtskraft

Luftdruck an beiden Sensoren bedeutet eine homogene Druckverteilung in der Vorkammer und damit eine gleichmäßige Luftverteilung an der Oberfläche.

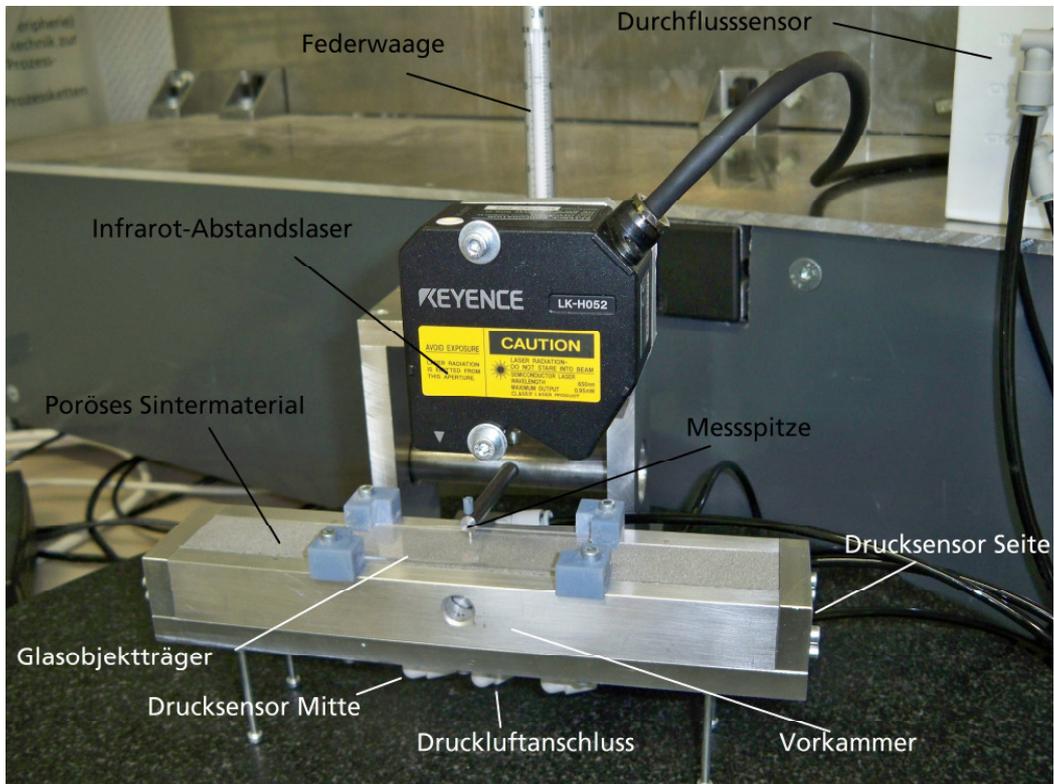


Abbildung 5.8 Versuchsstand zur Analyse verschiedener poröser Sintermaterialien

An der Oberseite der Versuchsvorrichtung waren ein Infrarot-Abstandssensor sowie ein Kraftmesser in Form einer Federwaage installiert. Durch einen einstellbaren Betriebsluftdruck in der Vorkammer wurde nun das Werkstück an der Oberseite des Versuchstandes zum Schweben gebracht. So konnte das Verhältnis von Betriebsdruck und Luftdurchfluss zum Lagerspalt durch eine Messung mit dem Infrarot-Abstandssensor bestimmt werden. Durch eine punktuelle Krafteinwirkung auf die Oberfläche des Werkstückes wurde die Tragkraft (im Mittelpunkt) und Steifigkeit (am Seitenrand) des Luftlagers ebenfalls im Verhältnis zum Betriebsluftdruck gemessen.



*Abbildung 5.9 Sintermaterial nach Feinheitsgrad - von 2  $\mu\text{m}$  (links) bis 120  $\mu\text{m}$  (rechts)*

Die acht gewählten Sintermaterialien aus porösem Stahl unterscheiden sich durch ihre Porengröße und somit der Feinheit ihrer Oberflächenstruktur. Diese erstreckte sich zwischen 2  $\mu\text{m}$  (Abbildung 5.9, links) und 120  $\mu\text{m}$  (Abbildung 5.9, rechts). Die Auswirkungen auf die Eigenschaften Tragkraft, Steifigkeit, Dämpfung und Luftverbrauch (Durchfluss) werden im Folgenden anhand der verschiedenen Testdurchführungen beschrieben und mit Hinblick auf die Handhabung empfindlicher Glasobjektträger bewertet. Die Werte sind dabei auf eine Fläche von 100 mm<sup>2</sup> Sintermaterial skaliert.

### 5.4.1 Analyse des Verhältnisses von Betriebsluftdruck zu Luftdurchfluss

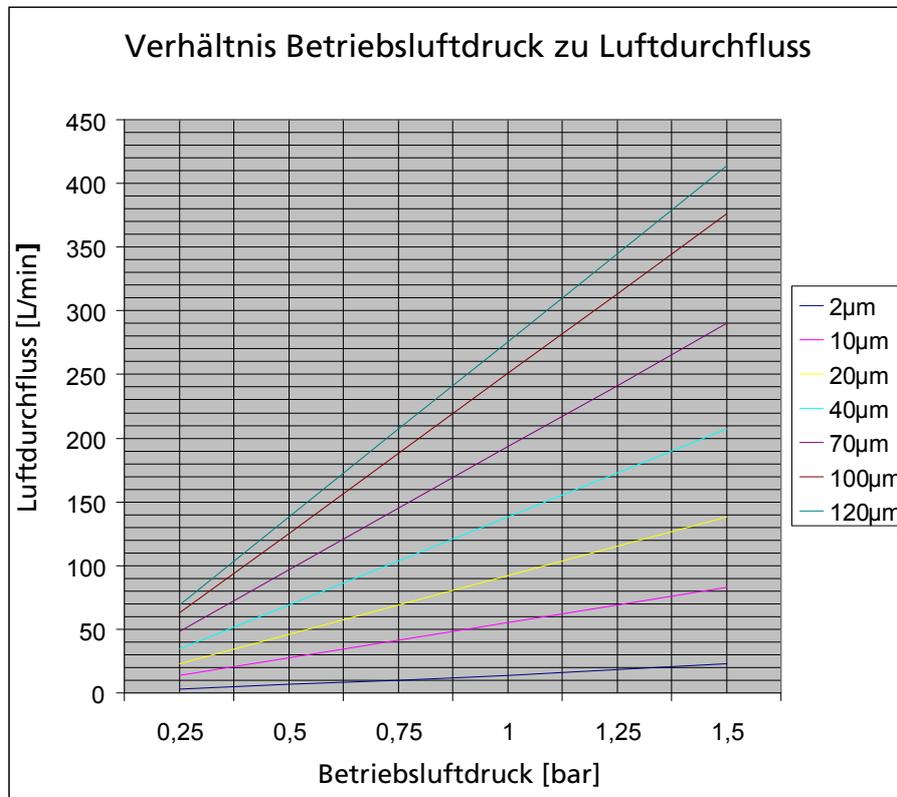


Abbildung 5.10 Ergebnisdiagramm des Versuches Betriebsluftdruck zu Luftdurchfluss

Bei der Betrachtung des Verhältnisses von Betriebsluftdruck zu Luftdurchfluss lässt sich feststellen, dass es sich bei allen Porengrößen um lineare Verläufe handelt. Die kleinste Porengröße von 2 µm hat im Verhältnis den geringsten und die größte Porengröße bei gleichem Druck, gemessen in L/min, den höchsten Verbrauch. Der Verbrauch ist beim größten Material (120 µm) um ungefähr den Faktor 20 höher als beim feinsten Material (2 µm) bei gleichem Luftdruck. Dieses Verhältnis war angesichts der um den Faktor 60 größeren Poren höher zu erwarten.

## 5 Prinzipien zur berührungslosen Kompensation der Gewichtskraft

---

Als Ergebnis bleibt festzuhalten, dass die feinste Porengröße bei gleichem Betriebsluftdruck in der Vorkammer den geringsten Luftdurchfluss verursacht. Dieses ist eine wichtige Erkenntnis unter dem Aspekt, dass der Druckluftverbrauch im Hinblick auf die Betriebskosten minimiert werden soll.

### 5.4.2 Analyse des Verhältnisses von Luftdurchfluss zu Lagerspalt

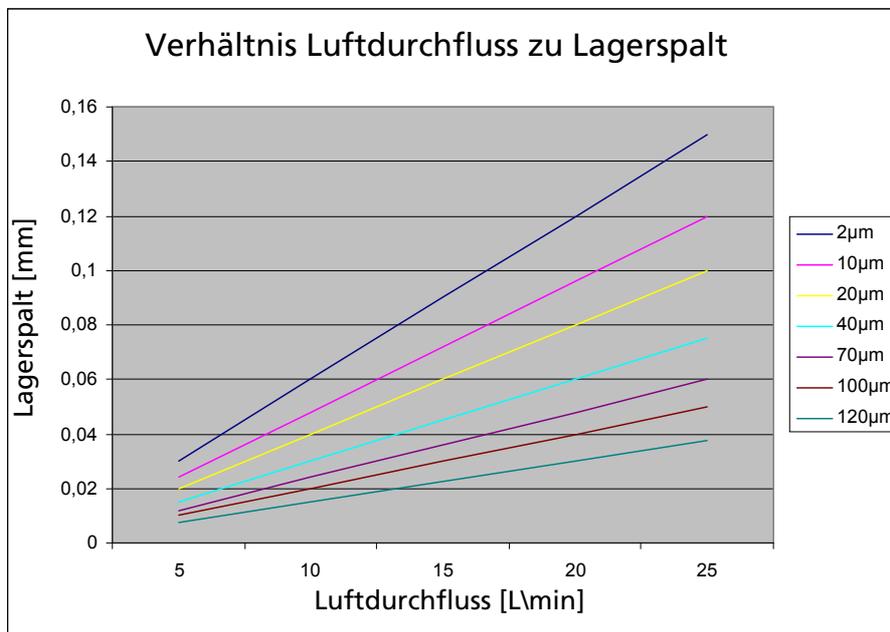


Abbildung 5.11 Ergebnisdiagramm des Versuches Luftdurchfluss zu Lagerspalthöhe

Unter der Berücksichtigung des vorangegangenen Versuches sind die Ergebnisse des Verhältnisses Luftdurchfluss zu einstellbarem Lagerspalt interessant. Für einen Lagerspalt von beispielweise 0,1 mm, was die meist bevorzugte Höhe eines aerostatischen Lagers darstellt, benötigt das feinste Porenmaterial (2 μm) den geringsten Luftdurchfluss. In diesem Fall sind es 17 L/min. Das größte Sintermaterial hingegen erzielt bei einem Verbrauch von 17 L/min einen

Lagerspalt von 0,025 mm. Beim erneut linearen Verlauf lässt sich anhand der Abbildung 5.11 ein Trend zwischen dem feinsten und größten Material erkennen. Das feinere Material bewirkt bei gleichem Luftdurchfluss einen ungefähr um den Faktor 4 größeren Lagerspalt.

Als Zwischenfazit der bisherigen Ergebnisse wird festgestellt, dass die Wahl des Porenmaterials entscheidenden Einfluss auf den Luftdurchfluss und den Lagerspalt besitzt. Es bildet dabei zwischen Vorkammer und Lagerfläche eine Art Widerstand, der direkten Einfluss auf die genannten Größen nimmt. Dieses Prinzip ist vergleichbar mit dem ohmschen Gesetz in der Elektrotechnik. In Zusammenhang mit einem Luftlager aus Sintermaterial lautet die Beziehung dabei: Der Luftdurchfluss [L/min] entspricht einem linearen Verhältnis zwischen Materialbeschaffenheit [Porengröße] und Betriebsluftdruck [bar].

Das bisherige Ergebnis lässt sich wie folgt erklären: Der unterschiedliche Lagerspalt entsteht bei gleichem Luftdurchfluss durch einen größeren Widerstand der kleineren Porengröße des Materials. Bei feinporigerem Material wird für einen gleichen Luftdurchfluss ein höherer Betriebsluftdruck benötigt als bei einem gröberen Material. Dadurch strömt die Druckluft aus der Vorkammer mit einer höheren Geschwindigkeit in den Lagerspalt. Sie verursacht ein härteres aerostatisches Lager, das wiederum eine höhere Tragkraft besitzt (Kapitel 5.2.1) und somit einen größeren Lagerspalt verursacht.

### 5.4.3 Analyse der Luftdruckverteilung in der Vorkammer

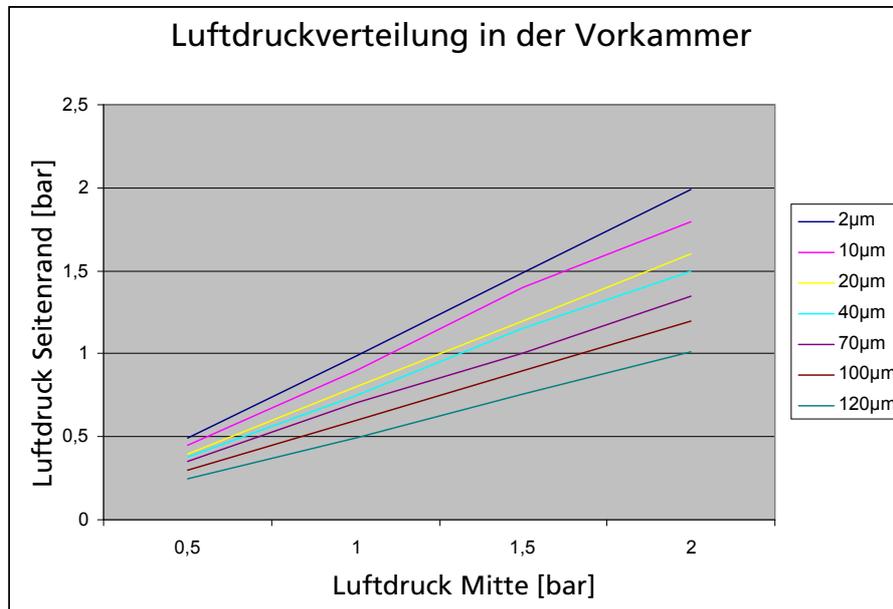


Abbildung 5.12 Ergebnisdiagramm des Versuches zur Analyse der Luftdruckverteilung

Das Diagramm in Abbildung 5.12 bestätigt die bisherigen Ergebnisse. Es zeigt das Druckverhältnis in der Vorkammer an zwei Positionen. In der Mitte (Druckluftzuführung) und am Seitenrand werden jeweils durch installierte Drucksensoren die Werte gemessen. Beim Sintermaterial mit den kleinsten Poren ( $2\ \mu\text{m}$ ) und dem damit höchsten Luftwiderstand ist in der Vorkammer (hier mit einer Größe von  $200\ \text{mm} \times 200\ \text{mm} \times 10\ \text{mm}$ ) kein Druckabfall zu erkennen. Die Luft verteilt sich durch den hohen Widerstand unter gleichmäßigem Druck. Dieses ist bei sinkendem Widerstand nur noch bedingt der Fall. Beim größten Sintermaterial ist ein Druckverlust von ungefähr 50 % zum Seitenrand zu beobachten (Druckabfall von 2 bar nach 1 bar). Die eingespeiste Druckluft gelangt durch den geringen Widerstand des gröberen Materials leichter an die Lageroberfläche und verteilt sich nur noch ungleichmäßig in der Vorkammer.

## 5 Prinzipien zur berührungslosen Kompensation der Gewichtskraft

Dieses Verhalten ist dabei zusätzlich abhängig von ihrer Größe, die möglichst klein zu wählen ist. Bei einer zu großen Vorkammer würde auch beim größten Widerstand der Druck zum Seitenrand abfallen, da sich die Kammer nicht mehr schnell genug mit Druckluft füllen kann. Dieses Verhalten spielt bei den Größenverhältnissen dieser Arbeit aber keine Rolle. Es wird deshalb an dieser Stelle nicht ausführlicher betrachtet.

### 5.4.4 Analyse des Verhältnisses von Lagerspalt zu Tragkraft

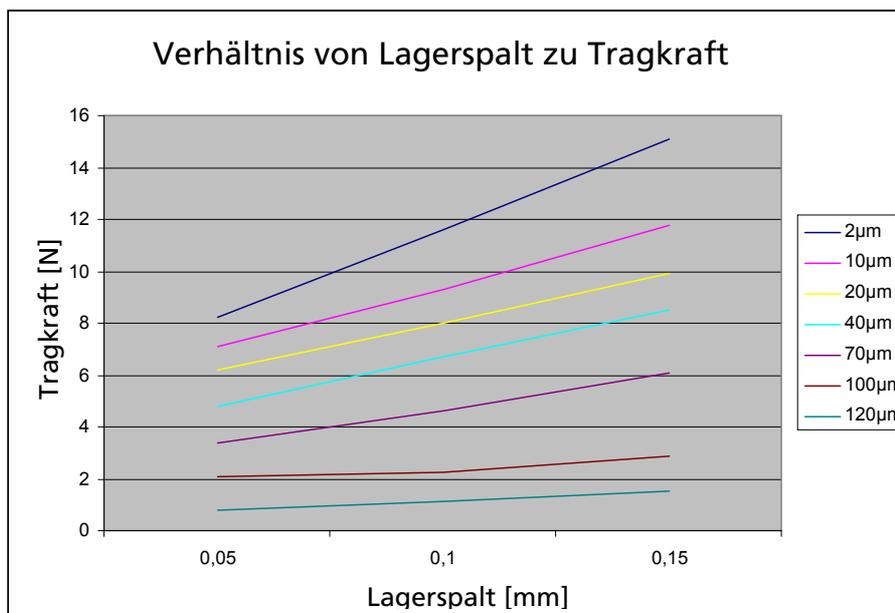


Abbildung 5.13 Ergebnisdiagramm des Versuches Lagerspalt zu Tragkraft

Abbildung 5.13 zeigt das Verhältnis zwischen einem durch den Betriebsluftdruck einstellbaren Lagerspalt und der Tragkraft eines aerostatischen Lagers. Die Vermutung liegt zunächst nahe, dass bei einer gleichen Spalthöhe die Tragkraft des Luftlagers bei allen Sintermaterialien gleich ist. Dieses könnte dadurch begründet werden, dass jeweils das gleiche Werkstück (hier: Glasobjektträger

## 5 Prinzipien zur berührungslosen Kompensation der Gewichtskraft

---

mit ungefähr 0,005 kg) in der gleichen Höhe schwebend gehalten wird. Die Gewichtskraft wird somit jeweils mit der gleichen Gegenkraft ausgeglichen. Diese Vermutung bestätigt sich nach dem Versuch allerdings nicht. Es zeigte sich erneut, dass das Verhältnis Betriebsluftdruck zu Luftdurchfluss entscheidend auch die Tragkraft eines Luftlagers beeinflusst.

Das feinste Porenmaterial bildet bei einem Lagerspalt von 0,1 mm bereits eine Tragkraft von ungefähr 11 Newton aus. Das gröbste Material besitzt unter gleichen Bedingungen lediglich eine Tragkraft von 1 Newton. Um einen gleichen Lagerspalt bei verschiedenen Materialien zu erreichen, muss ein unterschiedlicher Betriebsluftdruck in die Vorkammer eingespeist werden. Die anschließende Tabelle verdeutlicht dieses Ergebnis.

Poren [ $\mu\text{m}$ ]	Tragkraft [N]	Lagerspalt [mm]	Durchfluss [L/min]	Druck [bar]
2	11	0,1	17	1,2
20	8	0,1	25	0,26

*Abbildung 5.14 Tabelle zum Verhältnis Lagerspalt zu Tragkraft*

Die Tabelle in Abbildung 5.14 zeigt das Verhältnis zwischen den Porengrößen 2  $\mu\text{m}$  und 20  $\mu\text{m}$ . Der erforderliche Betriebsluftdruck, um einen Lagerspalt von 0,1 mm zu erreichen, unterscheidet sich dabei fast um Faktor 5. Durch den deutlich größeren Druck beim feineren Material wird eine höhere Strömungsgeschwindigkeit der Luft verursacht. Diese wiederum bildet dadurch ein härteres Luftlager mit einer größeren Tragkraft an der Oberfläche. Durch den geringeren Durchfluss und dem damit geringeren Luftvolumen unter der

Werkstückoberfläche bildet sich allerdings trotz unterschiedlicher Tragkraft ein Lagerspalt gleicher Höhe zwischen Werkstück und Transportfläche aus.

### 5.4.5 Analyse des Verhältnisses von Lagerspalt zu Steifigkeit

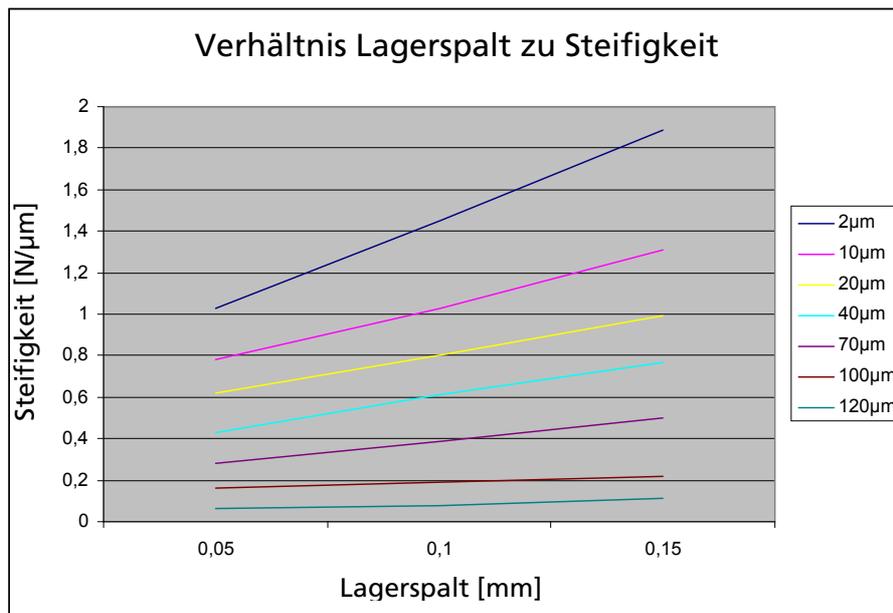


Abbildung 5.15 Ergebnisdiagramm des Versuches Lagerspalt zu Steifigkeit

Das Verhältnis von Lagerspalt zu Steifigkeit auf Abbildung 5.15 ähnelt dem Verhältnis im vorherigen Diagramm mit dem Verhältnis von Lagerspalt zur Tragkraft. Auch hier bestätigt sich, dass das aerostatische Lager durch einen höheren Betriebsluftdruck härter ausgebildet ist und somit eine höhere Steifigkeit besitzt. Eine genauere Betrachtung lässt erkennen, dass das Verhältnis von Steifigkeit zu Tragkraft mit größerer Porengröße aber nochmals schlechter wird.

Die folgende Tabelle veranschaulicht dieses anhand eines Beispiels mit einem Lagerspalt von 0,1 mm:

## 5 Prinzipien zur berührungslosen Kompensation der Gewichtskraft

---

Porengröße [ $\mu\text{m}$ ]	Tragkraft [N]	Steifigkeit [ $\text{N}/\mu\text{m}$ ]	Druckunterschied [%]
2	11	1,5	0
20	8	0,8	20

Abbildung 5.16 Tabelle zum Verhältnis Lagerspalt zu Steifigkeit

Der Tragkraftverlust zwischen den Luftlagern aus verschiedenen Sintermaterialien beträgt bei 10-facher Porengröße ungefähr 37 %. Die Steifigkeit sinkt aber bereits um knapp 50 %. Dieses ist erneut durch die schlechtere Luftdruckverteilung in der Vorkammer zu erklären (Abbildung 5.14). Der Druckverlust am Seitenrand beträgt bei einer Porengröße von 20  $\mu\text{m}$  bereits 20 % des Betriebsluftdruckes. Durch diesen Druckabfall wird direkt die Steifigkeit des Luftlagers beeinflusst (Kapitel 5.2.2).

### 5.4.6 Fazit der Versuchsreihe zur Analyse von Sintermaterial

Die vorangegangenen Versuche haben gezeigt, dass das Sintermaterial in einem wichtigen Verhältnis zu den Qualitätseigenschaften (Durchfluss, Tragkraft, Spalthöhe und Steifigkeit) eines aerostatischen Lagers steht.

Abbildung 5.17 veranschaulicht die bisher beschriebenen und analysierten Ergebnisse. Für einen Lagerspalt gleicher Höhe wird bei einem aerostatischen Lager aus größerem Sintermaterial ein höherer Luftdurchfluss benötigt. Dadurch sinkt der benötigte Betriebsluftdruck, sodass ein weiches Luftlager unter dem Werkstück entsteht. Durch den niedrigeren Druck in Verbindung mit dem geringeren Widerstand ist die Luftverteilung in der Vorkammer des größeren

## 5 Prinzipien zur berührungslosen Kompensation der Gewichtskraft

Materials zusätzlich inhomogener. Dieser Effekt beeinflusst die Steifigkeit, Dämpfung und Tragkraft des aerostatischen Lagers negativ (Abbildung 5.17, links).

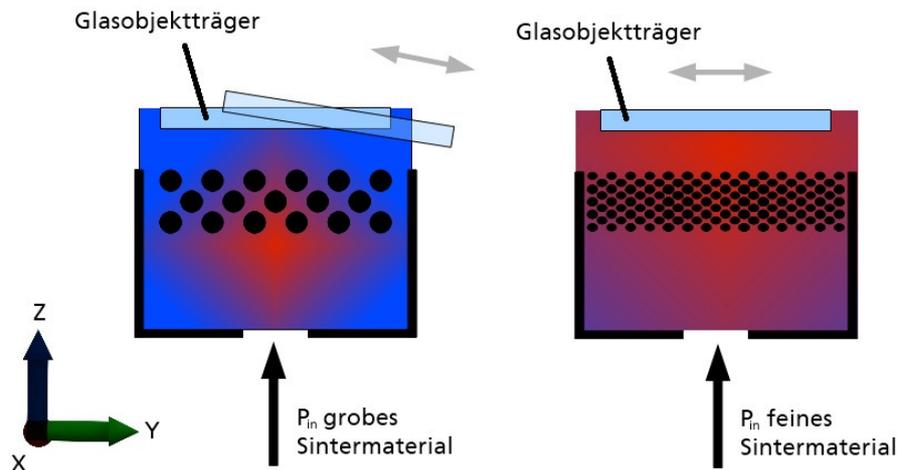


Abbildung 5.17 Luftdruckverteilung von Luftlagern durch verschiedene Sintermaterialien

Entscheidend für die Wahl des Sintermaterials ist die Dichte eines Werkstückes. Die Porengröße sollte so gewählt werden, dass bei einem möglichst hohen Betriebsluftdruck der gewünschte Lagerspalt (hier 0,1 mm) noch erreicht werden kann. Das Sintermaterial ist also so grob wie nötig zu wählen, um das entsprechende Werkstück tragen zu können. Dabei sollte die Wahl aber so fein wie möglich sein, um mit einem möglichst großen Betriebsluftdruck und homogener Luftdruckverteilung die Lagereigenschaften Tragkraft, Steifigkeit, Dämpfung und Durchfluss zu optimieren.

Beispielweise besitzt Glas eine Dichte von  $2.500 \text{ kg/m}^3$ , Stahl hingegen eine Dichte von  $7.850 \text{ kg/m}^3$ . Im Fall der Glasobjektträger (mit einer Masse von ungefähr  $0,005 \text{ kg}$ ) ist eine Porengröße von  $2 \mu\text{m}$  zu wählen. Die Wahl des Porenmaterials müsste im Fall von Stahl bei gleicher Werkstückgröße so

angepasst werden, dass sich die Tragkraft des aerostatischen Lagers dementsprechend erhöht.

### 5.5 Vorrichtungen zur Erzeugung einer aerostatischen Transportbahn

Neben der Wahl des Sintermaterials hat auch die Vorrichtungsumform zur Erzeugung eines aerostatischen Lagers entscheidenden Einfluss auf dessen Qualitätskriterien. Diese ist zusätzlich von der Form des Werkstückes abhängig. Somit sind verschiedene Formen von Vorrichtungen als Transportfläche zur Kompensation der vertikalen Gewichtskraft denkbar.

Zusätzlich zur berührungslosen Kontrolle des Freiheitsgrades  $Z$  ist dabei auch das Verhalten des Werkstückes zu den Freiheitsgraden  $\alpha$  und  $\beta$ , also Flatterbewegungen um die  $x$ - und  $y$ -Achse zu beachten (Kapitel 5.1). Diese Flatterbewegungen stehen in direktem Zusammenhang mit den Eigenschaften Steifigkeit und Dämpfung des aerostatischen Lagers. Im Folgenden werden die nach mehreren Versuchen und Analysen zielführendsten drei Formen von Vorrichtungen zur Kompensation der vertikalen Gewichtskraft vorgestellt und bewertet.

#### 5.5.1 Transportbahn aus flächigem Sintermaterial

Eine häufige Bauform aus Sintermaterialien sind flächige, dem Werkstück in der Breite angepasste Vorrichtungen zum berührungslosen Schweben. Das Material erstreckt sich entlang der Transportrichtung des Werkstückes, sodass es berührungslos über das Lager gleitend transportiert werden kann.

## 5 Prinzipien zur berührungslosen Kompensation der Gewichtskraft

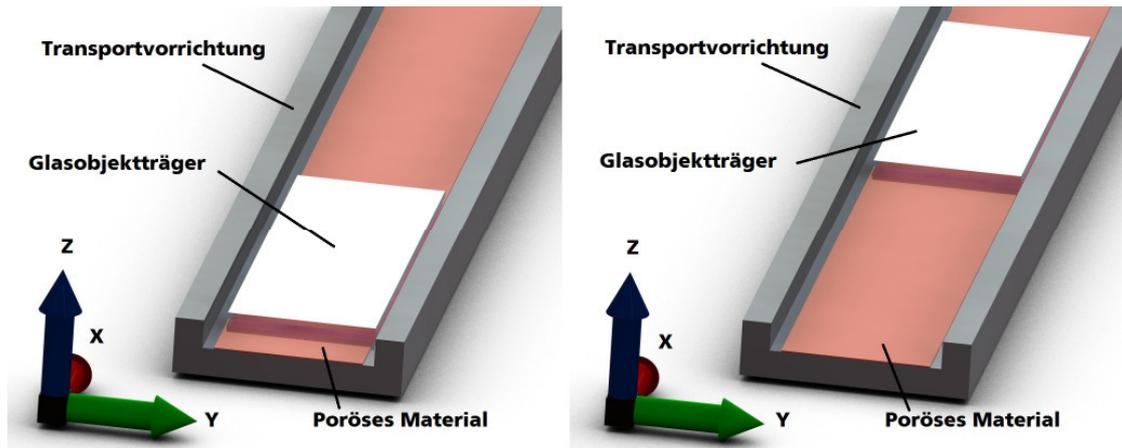


Abbildung 5.18 Transportbahn aus flächigem Sintermaterial

Das flächig ausgebildete Luftlager besitzt durch seine gleichmäßige Verteilung unter dem Werkstück sehr gute Eigenschaften. Tragkraft, Steifigkeit und Dämpfungsverhalten sind nach den Ausführungen aus Kapitel 5.4 optimiert.

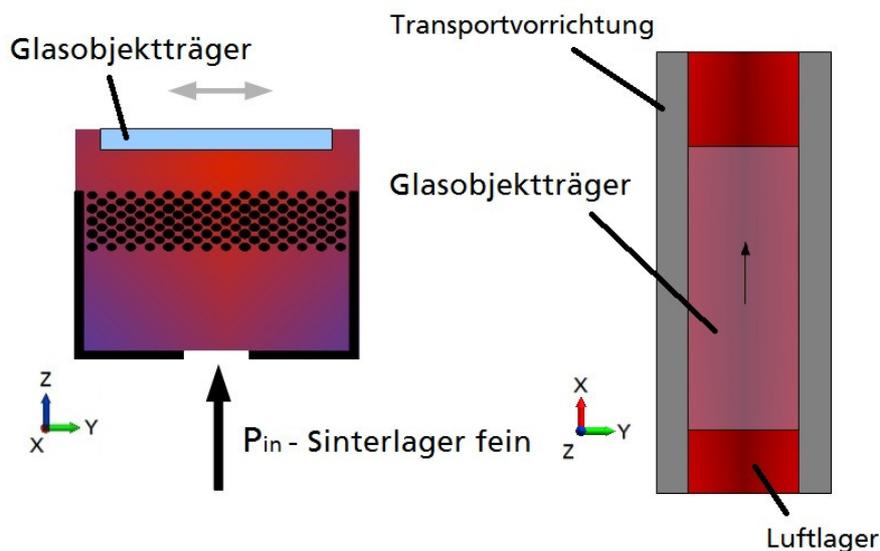


Abbildung 5.19 Luftdruckverteilung bei flächigem Luftlager

Der Luftverbrauch ist durch die große Lagerfläche allerdings eine Größe, die durch eine angepasste Form der Lagervorrichtung verbessert werden kann. In diesem Fall strömt unter der gesamten Fläche des Werkstückes entlang der

## 5 Prinzipien zur berührungslosen Kompensation der Gewichtskraft

---

Transportbahn gleichmäßig und dauerhaft Druckluft zum Erhalt des aerostatischen Lagers aus.

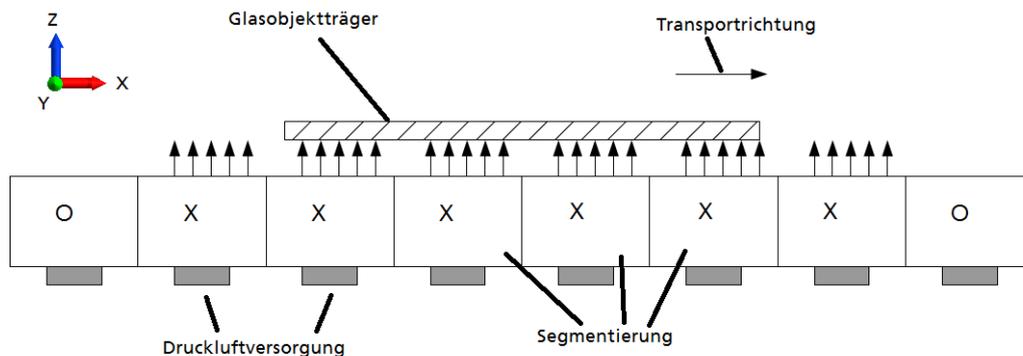


Abbildung 5.20 Segmentierung der Transportfläche in Transportrichtung

Durch eine Segmentierung der Luftlagerfläche in viele kleine Abschnitte entlang der Transportrichtung ist es möglich, nur die Bereiche der Transportbahn mit Druckluft zu versorgen, in denen sich ein Werkstück momentan befindet. Durch eine intelligente Steuerung mithilfe von Sensoren zur Objekterkennung und Ventilen als Aktoren wird sichergestellt, dass nur die Druckluft verbraucht wird, die tatsächlich zum Transport des Werkstückes benötigt wird.

### 5.5.2 Transportbahn aus rundem Sintermaterial

Um den Druckluftverbrauch neben der Segmentierung weiter zu senken, kann das flächige Sintermaterial durch partielle Anordnungen und Formen ersetzt werden. Durch die Reduzierung von Luftausströmfläche in jedem einzelnen Segment wird der Durchfluss nochmals verringert. Rundes Sintermaterial ist in den Herstellungskosten günstig und wird bereits als Filterelement für

## 5 Prinzipien zur berührungslosen Kompensation der Gewichtskraft

verschiedene Anwendungen verwendet. Es bietet sich daher an, die bisher rechteckig angeordneten Segmente jeweils durch rundes Sintermaterial zu ersetzen, um so gleichmäßig die Ausströmfläche zu reduzieren.

Durch eine Versuchsanordnung ähnlich Abbildung 5.21 konnte diese Vermutung nachgewiesen werden. Der Verbrauch verringerte sich um ungefähr 40 % im Vergleich zu einem flächigen Sinterluftlager. In Abbildung 5.21 (links) befindet sich ein Glasobjektträger zentral über zwei Sintermaterialien. Die Luftausströmöffnungen sind gleichmäßig um den Schwerpunkt des Werkstückes verteilt. Dadurch kann der gleiche Lagerspalt mit vergleichbaren Einstellungen erreicht werden, wie bei der flächigen Vorrichtung. Auch die Messwerte für die Steifigkeit und Dämpfung waren in dieser Position mit denen eines flächigen Luftlagers vergleichbar.

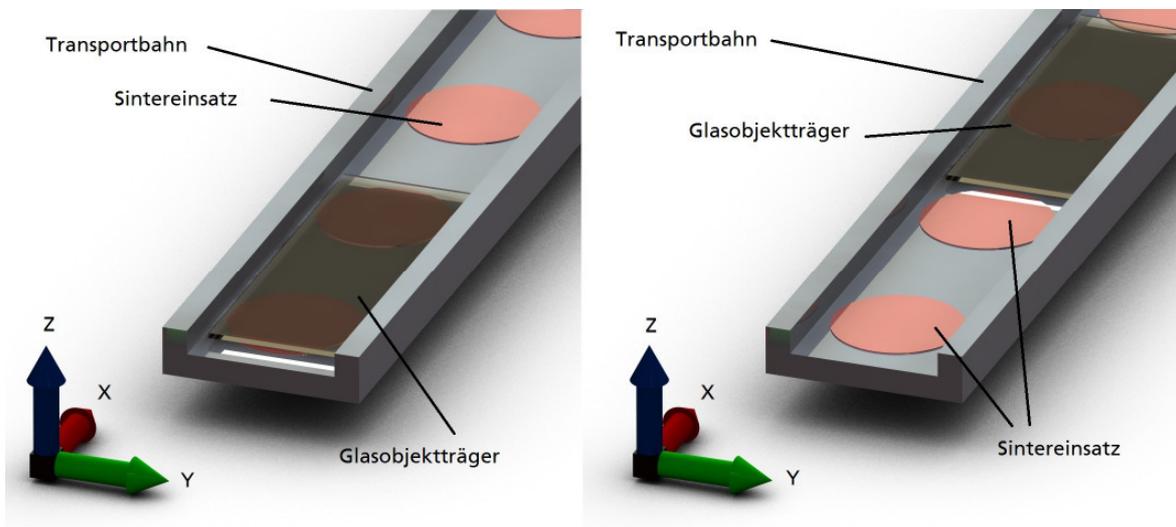


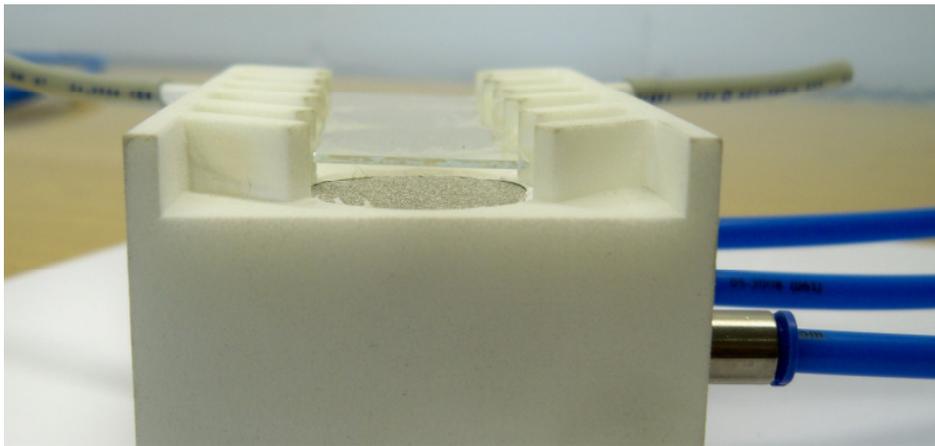
Abbildung 5.21 Einsatz von rundem Sintermaterial als Transportoberfläche

Wenn sich ein Glasobjektträger wie in Abbildung 5.21 (rechts) aber nicht mehr zentral über zwei Luftausströmöffnungen, sondern nur noch mit dem eigenen Schwerpunkt mittig über einem runden Einsatz befindet, wird die Anordnung

## 5 Prinzipien zur berührungslosen Kompensation der Gewichtskraft

---

problematisch. Soll der Glasobjektträger in dieser Position verbleiben oder sich nur mit langsamer Geschwindigkeit bewegen, ist eine erhöhte Neigung zu Flatterbewegungen die Folge. Dieser Effekt ist durch eine schlechte und inhomogene Luftverteilung und einer damit sehr niedrigen Steifigkeit und Dämpfung des Systems zu erklären.



*Abbildung 5.22 Glasobjektträger auf rundem Sinterluftlager mit Flatterbewegungen*

Trotzdem wurde durch diese Versuchsvorrichtung eine Reduzierung des Druckluftverbrauchs erreicht. In einer Ruheposition des Glasobjektträgers zentral über zwei Sintereinsätzen oder bei Bewegungen desselben mit normaler Geschwindigkeit entlang der Transportbahn konnten keine Einschränkungen festgestellt werden. Die Messwerte von Tragkraft, Steifigkeit und Dämpfung bestätigen diesen Zusammenhang. Die beschriebenen Nachteile bei einer ungünstigen Positionierung des Werkstückes entlang der Transportbahn oder bei langsamen Bewegungen mussten allerdings Beachtung finden. Sie führten zur Entwicklung eines Schienensystems als Transportvorrichtung.

### 5.5.3 Schienensystem als Transportbahn

Im vorherigen Kapitel wurde dargestellt, dass eine Reduzierung des Luftverbrauches durch eine Verringerung der Lufteinströmfläche gegenüber einer flächigen Transportvorrichtung möglich ist. Die Variante mit runden Einströmöffnungen führte aber teilweise zu Problemen mit den Eigenschaften und Qualitätskriterien von aerostatischen Lagern. Bei einer Verringerung der Lufteinströmfläche zur Reduzierung des Luftverbrauches ist somit auch eine angepasste Vorrichtungsförm zum Transportieren der Werkstücke entscheidend.

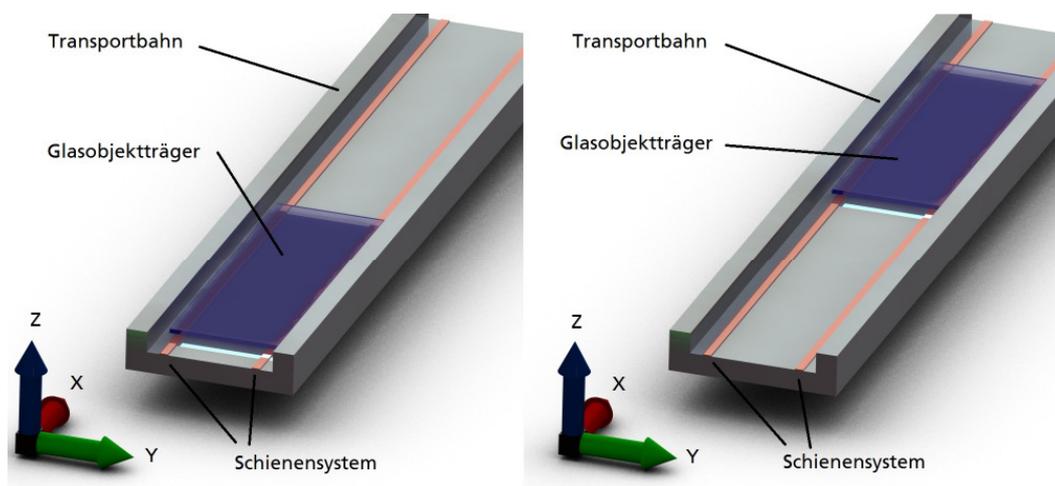


Abbildung 5.23 Schienensystem als Transportfläche für Glasobjektträger

Abbildung 5.23 zeigt die erfolgversprechendste Form einer Transportvorrichtung: einen schienenähnlichen Aufbau in Transportrichtung, symmetrisch um den Schwerpunkt des Glasobjektträgers. Bei dieser Anordnung ist bei gleichem Betriebsluftdruck, die Tragkraft und der Lagerspalt zunächst etwas geringer ausgeprägt als beim vergleichbaren flächigen Vorrichtungsaufbau. Der Verlust betrug ungefähr 20 %. Die Ausströmfläche wurde dabei allerdings um

## 5 Prinzipien zur berührungslosen Kompensation der Gewichtskraft

wurde dabei allerdings um insgesamt 84 % verkleinert, wodurch sich der Luftverbrauch im gleichen Maße verringerte.

Der Tragkraftverlust ist dadurch zu erklären, dass dem aerostatischen Lager erhebliche Lagerfläche und somit ein Teil der Gegenkraft unter dem Werkstück genommen wurde. Mittels einer symmetrischen Anordnung des Schienensystems um den Schwerpunkt des Glasobjektträgers kann dieser Tragkraftverlust aber deutlich verringert werden. Durch eine zusätzliche Erhöhung des Betriebsluftdruckes kann anschließend wieder der gleiche Lagerspalt wie bei der flächigen Transportvorrichtung von 0,1 mm eingestellt werden. Die Druckerhöhung hat wiederum einen Anstieg des Durchflusses und somit des Verbrauches zur Folge. Dieser zusätzliche Verbrauch ist aber deutlich geringer als die Einsparungen durch die Reduzierung der Luftausströmfläche. Gegenüber der flächigen Vorrichtung kann er somit insgesamt um ungefähr 60 % reduziert werden. Durch den höheren Betriebsluftdruck, verteilt auf weniger Oberfläche des Glasobjektträgers, kann der Lagerspalt und die Tragkraft des Luftlagers der flächigen Form nahezu angeglichen werden.

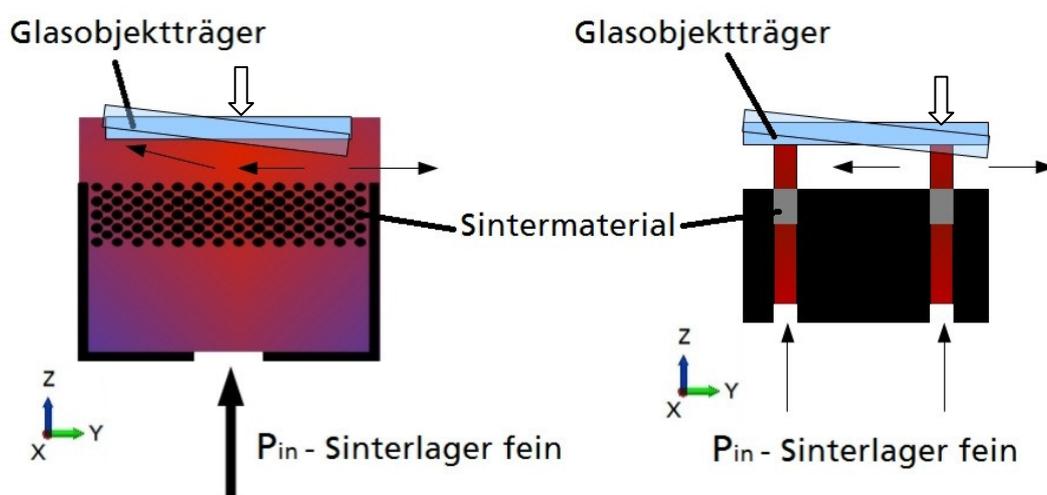


Abbildung 5.24 Steifigkeit bei flächigem (links) und gleisförmigem Sinterlager (rechts)

Bedeutend waren die Ergebnisse bei den anschließenden Messungen zu Steifigkeit und Dämpfung bei dieser Vorrichtungsvariante. Sie waren im Vergleich zum flächigen Sinterluftlager nochmals verbessert worden und werden anhand vorangegangener Abbildung 5.24 im Folgenden erläutert:

Die Steifigkeit wird durch eine punktuelle Krafteinwirkung am Rand des Werkstückes gemessen. Durch den höheren Betriebsluftdruck an dieser Stelle ist beim Schienensystem das aerostatische Lager härter ausgebildet und besitzt somit eine höhere Steifigkeit gegenüber der flächigen Vorrichtungsform. Für das verbesserte Dämpfungsverhalten ist neben dem härter ausgebildeten aerostatischen Lager noch ein weiterer Effekt ausschlaggebend: Wird bei einem flächigen Luftlager eine punktuelle Kraft ausgeübt, so wird das Werkstück seitlich nach unten gedrückt. Die eingespeiste Druckluft wird an dieser Stelle der Lagerfläche zusammengepresst und verteilt sich unter hohem Druck zu den Seiten. Durch die Strömungen der gestauchten Luft nach innen erhöht sich in diesem Teil der Druck (Abbildung 5.24, links). Diese Druckerhöhung unter dem Werkstück begünstigt zusätzlich sein Kippen. Denn die Luft drückt es am gegenüber liegenden Seitenrand zum Entweichen nach oben. Dieses ist bei gleisförmigen Systemen deutlich geringer der Fall, da die Luft dort genug Platz hat, um sich auch mittig unter dem Werkstück auszubreiten und zu entweichen (Abbildung 5.24, rechts). Um den Luftverbrauch zusätzlich zu reduzieren, kann auch bei dieser Vorrichtung die Transportfläche in Segmente unterteilt werden (Abbildung 5.21), sodass sichergestellt wird, dass nur die Bereiche mit Druckluft versorgt werden, über denen sich tatsächlich ein Werkstück befindet.

### 5.5.4 Fazit zur Entwicklung einer Transportvorrichtung

Ebenso wie die Technologie (Düse, poröses Material) und das Sintermaterial (fein, grob) hat auch die Form der Transportvorrichtung einen wichtigen Einfluss auf die Eigenschaften eines aerostatischen Lagers. Die Tragkraft, Spalthöhe, Steifigkeit, Dämpfung und der Luftverbrauch werden dadurch direkt verändert. Die drei vorgestellten Vorrichtungsformen eignen sich jeweils gut für den Einsatz zur Kompensation der vertikalen Gewichtskraft eines Glasobjektträgers. Es wurde zusätzlich dargestellt, dass für die Kontrolle über die Freiheitsgrade  $\alpha$  und  $\beta$  das flächige und das gleisförmige Luftlager bessere Ergebnisse erzielen als die Variante mit den runden Luftauslassöffnungen.

Die erfolgversprechendste Wahl stellt die schienenförmige Variante als berührungslose Transportvorrichtung für Glasobjektträger dar. Sie war in den Versuchen der flächigen Vorrichtung minimal in den Eigenschaften Steifigkeit und Dämpfung überlegen und senkte zusätzlich den Druckluftverbrauch um ungefähr 60 % auf den besten Wert dieser Versuchsreihe. Zusätzlich besitzt diese Form den Vorteil, dass der Platz zwischen den beiden Transportschienen für andere Vorrichtungen zur Bearbeitung oder Detektion der Werkstücke genutzt werden kann.

### Kapitel 6

## Prinzipien zur berührungslosen Kompensation lateraler Auslenkkräfte

Die Analyse bekannter Handhabungstechnologien zeigt, dass eine berührungslose Kontrolle über Glasobjektträger zurzeit nicht möglich ist. Es fehlt ein Verfahren zur Kompensation der lateral im Raum auf ein frei schwebendes Werkstück wirkenden Auslenkkräfte. Zum Ausgleich der vertikalen Gewichtskraft wurden in Kapitel 5 Möglichkeiten auf Basis aerostatischer Lager analysiert, verglichen und bewertet. Zum Abschluss des Kapitels wurden drei Vorrichtungen vorgestellt, die ein Werkstück in einen Levitationszustand versetzen können. Diese kommen in einer Versuchsreihe zur Kompensation der lateralen Auslenkkräfte in diesem Kapitel abwechselnd zur Anwendung. Es werden mögliche Verfahren betrachtet, analysiert und im Hinblick auf die Zielsetzung dieser Arbeit bewertet. Alle Versuche werden dabei nach den folgenden Kriterien ausführlich dargestellt: Grundidee, Aufbau, Durchführung, Ergebnisse sowie Bewertung und Ableitung der nächsten Schritte. Im letzten Unterkapitel folgt ein bewertendes Fazit über die Möglichkeiten der berührungslosen Kompensation lateraler Auslenkkräfte.

### 6.1 Freiheitsgrade eines Werkstückes bei der Kompensation lateraler Auslenkkräfte

Die Kompensation der vertikalen Gewichtskraft wurde in Kapitel 5 definiert als ein Verfahren zur berührungslosen Kontrolle des Freiheitsgrades Z (Richtung der Gewichtskraft) sowie der Rotationsachsen  $\alpha$  und  $\beta$ . Dazu wurden abschließend drei Vorrichtungen vorgestellt und mit ihren Vor- und Nachteilen beschrieben. Diese Verfahren werden als Grundlage für die Versuchsreihe zur Kompensation der lateralen Auslenkkräfte genutzt. Dabei wird vorausgesetzt, dass diese ihre Zielsetzung hinsichtlich einer Kontrolle über die Freiheitsgrade Z,  $\alpha$  und  $\beta$  erfüllen.

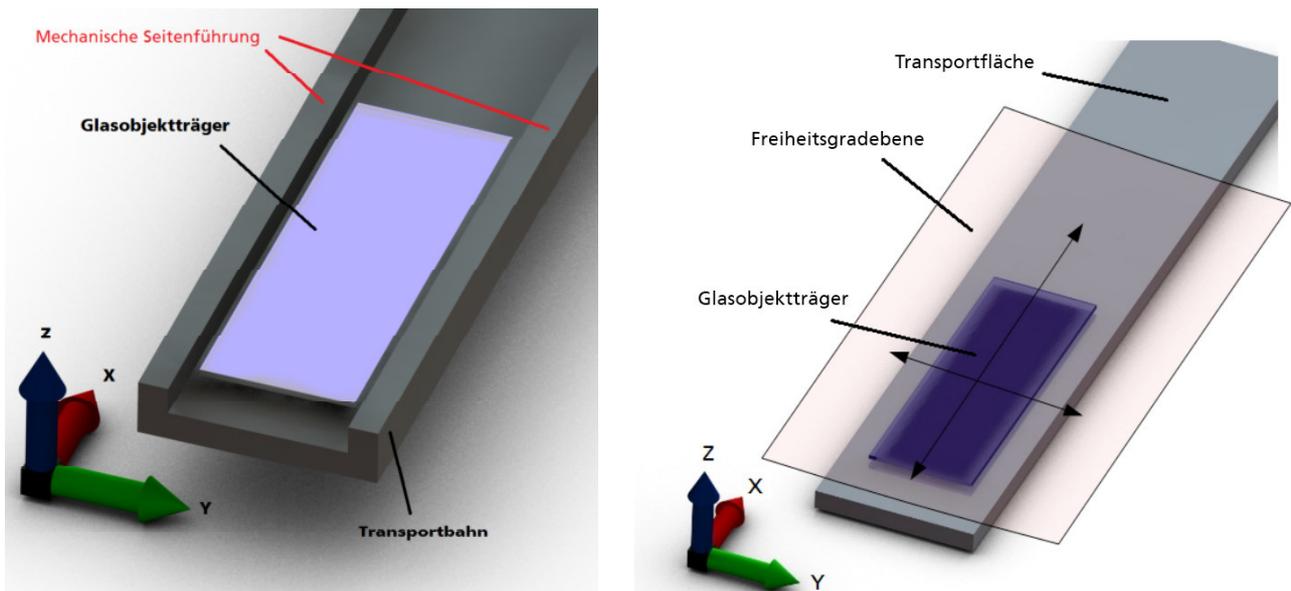


Abbildung 6.1 Freiheitsgrade mit und ohne Seitenführung auf Transportbahn

In Kapitel 5 wurden die Freiheitsgrade X, Y und  $\gamma$  zunächst vernachlässigt und durch eine mechanische Seitenführung dargestellt. Dem Glasobjektträger stand somit lediglich die Transportrichtung X als Freiheitsgrad zur Verfügung (Abbildung 6.1, links).

## 6 Prinzipien zur berührungslosen Kompensation lateraler Auslenkkräfte

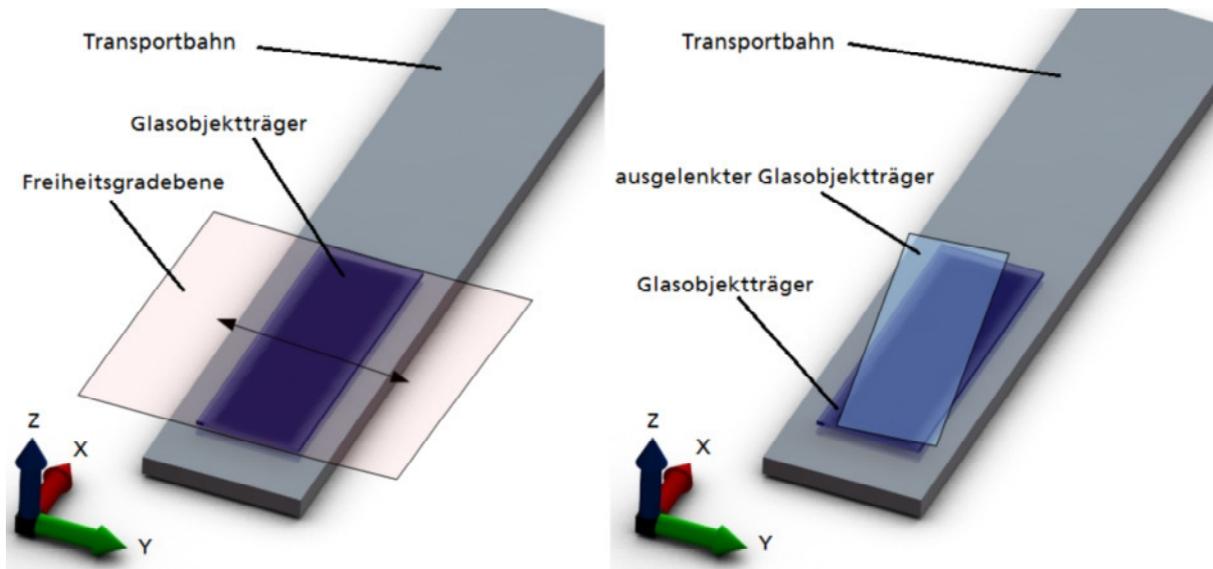


Abbildung 6.2 Freiheitsgrade der lateralen Auslenkkräfte

Gleitet nun ein Werkstück ohne mechanische Seitenführungen schwebend auf einem Luftfilm, besitzt es zwei weitere Freiheitsgrade (Abbildung 6.1, rechts). Der Freiheitsgrad in x-Richtung stellt erneut die Transportrichtung dar. Dieser wird in Kapitel 6.3 gesondert betrachtet. Er soll zwar ebenfalls kontrolliert werden, aber zur Fortbewegung des Werkstückes zusätzlich steuerbar sein. Zunächst wird in Kapitel 6.2 eine Versuchsreihe mit dem Ziel vorgestellt, die zwei verbleibenden Freiheitsgrade berührungslos sowie dauerhaft zu kompensieren. Der Freiheitsgrad Y ist eine laterale Auslenkmöglichkeit der Glasobjektträger, im Folgenden y-Schwingung genannt (Abbildung 6.2, links). Der Rotationswinkel  $\gamma$  stellt eine Drehung um die z-Achse dar und wird als Verkantung des Werkstückes in der Transportbahn beschrieben (Abbildung 6.2, rechts).

### 6.2 Versuchsreihe zur Kompensation lateraler Auslenkkräfte

Im Folgenden wird eine Auswahl durchgeführter Versuche vorgestellt. Dabei werden die zur Entwicklung eines Verfahrens zur berührungslosen Handhabung beitragenden Vorrichtungen ausführlich beschrieben. Grundlage eines Versuchsaufbaus bilden die Erkenntnisse und Analysen der jeweils vorangegangenen Versuche. Die im CAD entworfenen Entwicklungsideen wurden zunächst mit einer Software zur Darstellung von Fluidströmungen (Solid Works Flow Sim) simuliert. Die Seitenführungen, bei denen die Simulationen der Luftströmungen die erhoffte Kontrolle über die lateralen Auslenkkräfte der Glasobjektträger versprachen, wurden anschließend hergestellt, getestet und bewertet. Diese computergestützten Simulationen waren allerdings nur statisch. Es wurden keine Bewegungen des Werkstückes durch die Software beachtet und somit wurde stets von einer optimalen Mittellage ausgegangen. Dadurch fallen die Ergebnisse von Theorie und Praxis sehr unterschiedlich aus. Bei jedem Versuch werden zunächst die Grundidee des Versuchsaufbaus und das dadurch erhoffte Ergebnis beschrieben. Anschließend folgen jeweils eine detaillierte Versuchsbeschreibung sowie eine Analyse der beobachteten Ergebnisse. Im abschließenden Fazit werden diese bewertet. Die nächsten Schritte und Versuche werden anhand dieser Bewertungen vorgestellt und erläutert.

### 6.2.1 Transportbahn mit verschiedenen Seitenführungsprinzipien

Für die ersten Versuche wurde ein multifunktionaler Versuchsstand entwickelt. Die Transportbahn mit einer Gesamtlänge von 600 mm bestand aus runden, porösen Sintermaterialien zum Erzeugen einer aerostatischen Lagerfläche (Abbildung 6.3). Sie bot die Möglichkeit, verschiedene Seitenführungen zu untersuchen und zu analysieren.

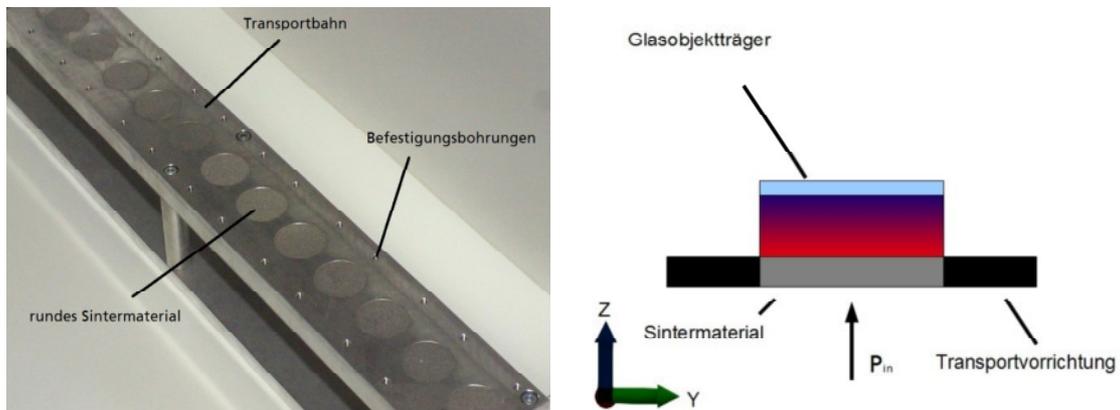


Abbildung 6.3 Transportbahn für verschiedene Seitenführungen

#### 6.2.1.1 Geschlossene Führungsschienen

##### Versuchsidee und Aufbau

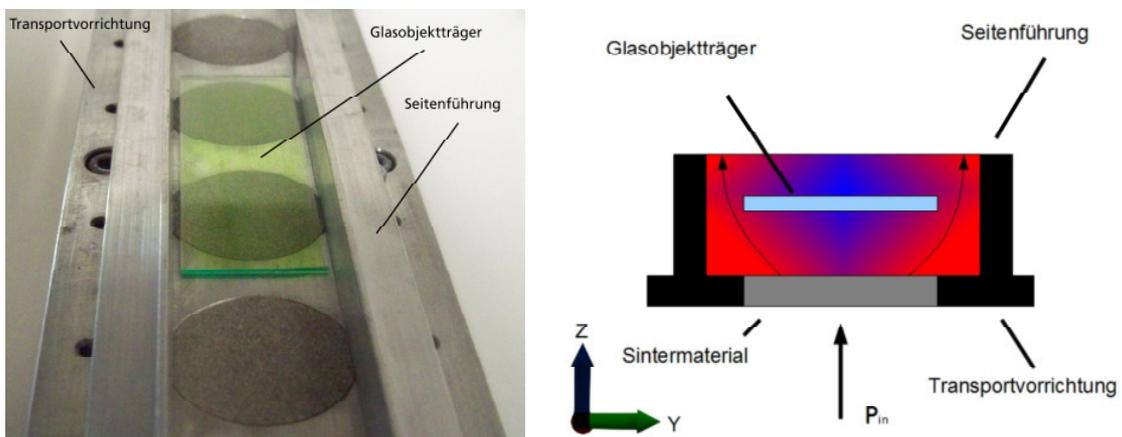


Abbildung 6.4 Transportbahn mit Seitenführungsschiene

## 6 Prinzipien zur berührungslosen Kompensation lateraler Auslenkkräfte

Mit verschiedenen Abständen von einem bis 5 mm zum Werkstück wurden geschlossene Führungsschienen auf der Transportvorrichtung installiert. Die Druckluft des aerostatischen Lagers sollte sich von der Unterseite gleichmäßig zwischen den Seitenkanten des Glasobjektträgers und der Führungswand nach oben in die Atmosphäre drücken. Dadurch hätte sich auf beiden Seiten ein haltendes und zentrierendes Luftpolster ausbilden können.

### Beobachtungen und Analyse

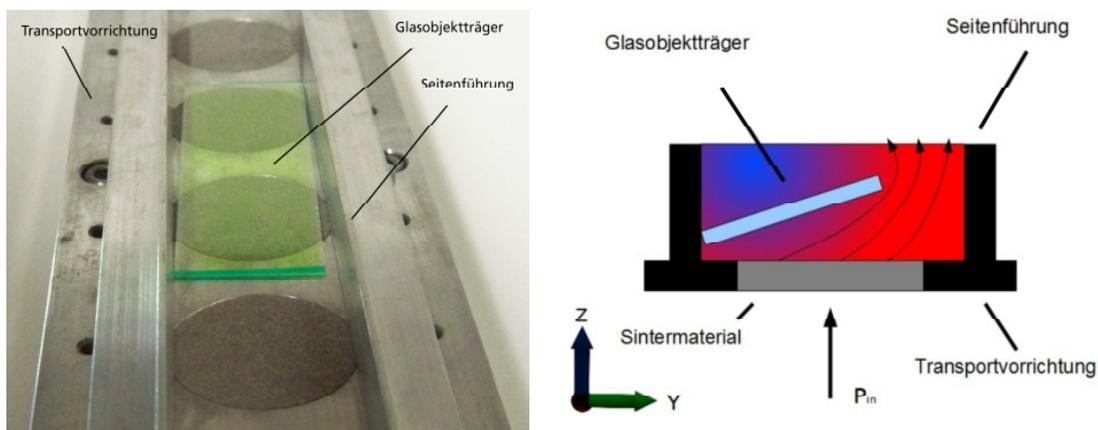


Abbildung 6.5 Verkanteter (links) und gekippter (rechts) Glasobjektträger

Zu beobachten waren starke Flatterbewegungen des Glasobjektträgers. Er verharrte zu keinem Moment in einer Mittelposition, sondern schaukelte sich durch Schwingungen auf und berührte unkontrolliert die Seitenwände. Umso größer der Spalt zwischen der Seitenkante und Führungsschiene gewählt wurde, um der Druckluft die Möglichkeit zum Entweichen zu geben, desto häufiger verkeilte sich das Werkstück (Abbildung 6.5, links). Bei kleinen Spalten wurde der Glasobjektträger durch den hohen Luftvolumenstrom gekippt, denn so konnte die Druckluft durch einen größeren Spalt entweichen (Abbildung 6.5, rechts).

### Bewertung und Fazit

Der hohe Luftvolumenstrom unter dem Glasobjektträger muss gleichmäßig und stetig abtransportiert werden. Er verursacht ansonsten unkontrollierte Flatterbewegungen. Dieses funktionierte in der statischen Simulation sehr gut. Die Luft verteilte sich gleichmäßig um das Werkstück und bildete somit einen tragenden und zentrierenden Luftfilm. In der Praxis war allerdings zu beobachten, dass das Werkstück zu keiner Zeit in einer ruhigen und stabilen Position verweilte. Steifigkeit und Dämpfungsverhalten waren schlecht ausgeprägt. Es fehlte eine Möglichkeit, den überschüssigen Luftvolumenstrom ohne Einfluss auf das Werkstück abzutransportieren und eine ruhige Lage desselben zu erreichen.

#### 6.2.1.2 Rillenschienenführung

##### Versuchs idee und Aufbau

Der Grundgedanke des vorangegangenen Versuchsaufbaus blieb erhalten. Durch zusätzliche Auslassöffnungen in den Seitenführungen sollte der hohe Luftvolumenstrom verringert werden.

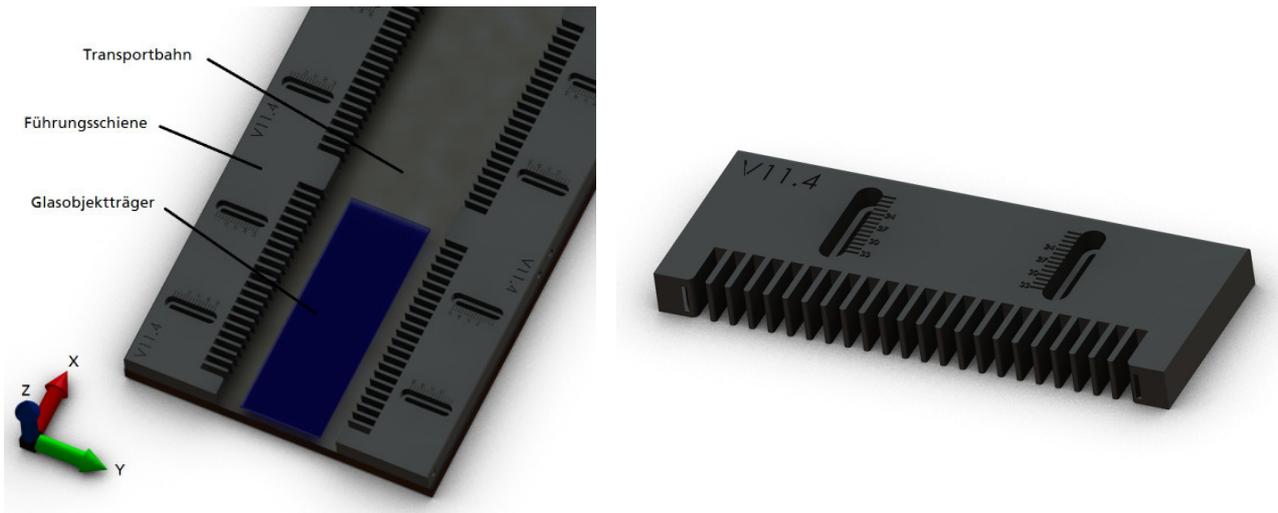


Abbildung 6.6 Seitenführungsschiene mit Rillen

### Beobachtungen und Analyse

Dieses funktionierte wie erwartet und das Aufschaukeln der Glasobjektträger wurde verhindert. Wenn nun die Führungsschienen mit einem Abstand von  $\leq 1$  mm sehr nah an die Seitenkanten gebracht wurden, konnte ein ruhiger Transport entlang der Führungsstrecke festgestellt werden. Allerdings war durch das Entweichen der Luft an den Auslassöffnungen auch der Effekt der Luftpolsterbildung zwischen Seitenkante und Führungsschiene nicht mehr vorhanden. Ein stetiger Kontakt war die Folge. Dieses konnte durch abgetragene Partikel auf dem Glasobjektträger bestätigt werden.

### Bewertung und Fazit

Alleine durch passive, mechanische Lösungen kann kein ruhiger und kontrollierter Transport erreicht werden. Es müssen zusätzlich auch aktive, berührungslose Kräfte auf das Werkstück wirken, um es kontrolliert in einer zentrierten Position halten zu können.

### 6.2.1.3 Rillenschienenführung mit zusätzlichem Luftlager

#### Versuchsreihe und Aufbau

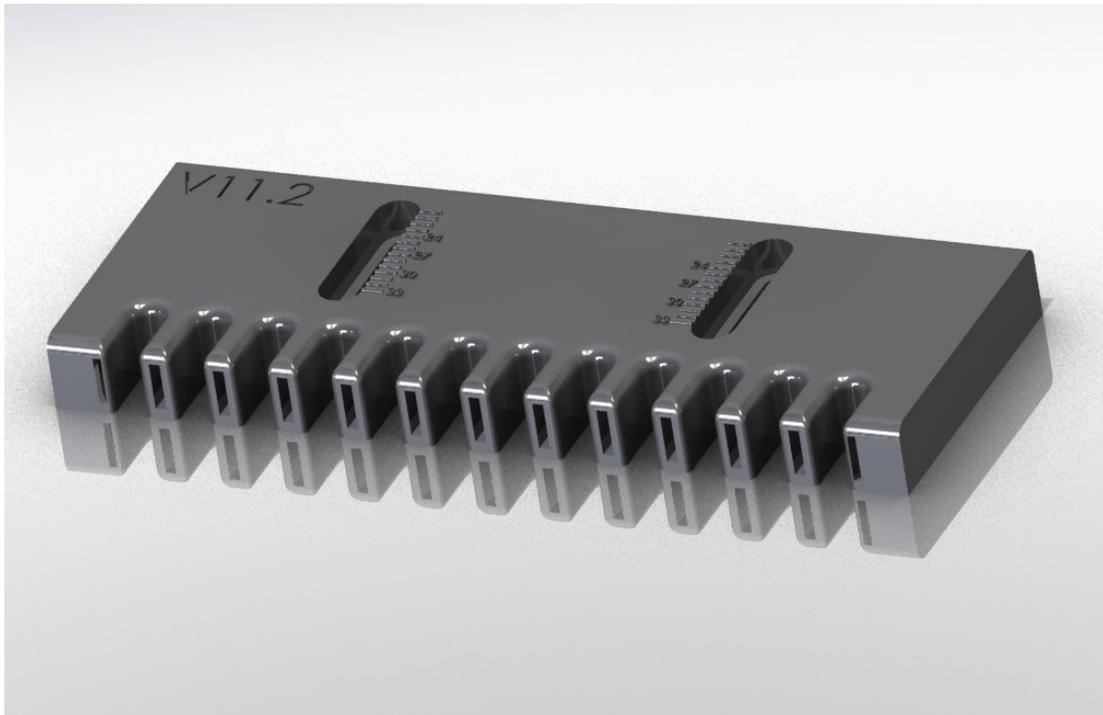


Abbildung 6.7 Führungsschiene mit Rillen und Düsen

Der vorangegangene Versuch zeigte, dass ein ruhiger und kontrollierter Transport von Werkstücken (allerdings mit einer Berührung der Führungskante) möglich ist. Um diese zu vermeiden, wurden nun an den Seitenführungen Luftauslässe in Düsenform integriert. Diese sollten ein gleichmäßiges Luftpolster zwischen Seitenkante und Führungsschiene aufbauen. Dadurch sollte ein ruhiger und kontrollierbarer Transport durch Berührungen des aktiven Luftpolsters an den Seitenführungen erreicht werden.

### Beobachtungen und Analyse

Es wurden zunächst ähnliche Beobachtungen wie beim Versuch mit geschlossenen Seitenführungen gemacht. Die zusätzlichen Düsen zwischen den Ausströmöffnungen entwickelten erneut einen zu hohen Luftvolumenstrom. Dieser wiederum führte zu starken, unkontrollierten Schwingungen des Glasobjektträgers mit Berührungen der Führungsschienen. Durch Versuche mit unterschiedlichen Einstellungen des Luftdruckes sowie des Seitenführungsabstandes konnte eine Einstellung gefunden werden, in der ein Glasobjektträger berührungslos verweilte. Wurden aber nun auf das Werkstück weitere Kräfte, beispielsweise zur Fortbewegung in Transportrichtung, ausgeübt, bewegte es sich bei kleinsten Inhomogenitäten zusätzlich in lateraler Richtung zur Führungsschiene hin. Durch das aktive Luftpolster an dieser wurde das Werkstück, wie beabsichtigt, berührungslos wieder weggedrückt. Dadurch erfuhr es allerdings eine laterale Kraftwirkung zur gegenüber liegenden Führungsschiene. Diese beidseitigen, lateralen Krafteinwirkungen auf die Seitenkante führten zu nicht kontrollierbaren, periodischen Schwingungen und Flatterbewegungen des Werkstückes.

### Bewertung und Fazit

Durch Führungsschienen mit seitlichen Luftdüsen konnte kein kontrollierter Transport erzeugt werden. Dieses lag unter anderem an den zu schmalen Seitenkanten des Werkstückes und den damit verbundenen sehr schlechten Dämpfungseigenschaften der Transportvorrichtung. Die Krafteinwirkung auf die

Seitenkante ist zu klein, um das Werkstück durch dieses Verfahren zu kontrollieren.

### 6.2.1.4 Schräge Luftdüsen auf Werkstückoberfläche

#### Versuchs idee und Aufbau

Um an die Ergebnisse des Versuches mit Rillenführungen anzuknüpfen, bei dem ein stabiler Transport durch Berührungen der Seitenführungsschienen erreicht worden ist, wurde der Aufbau der vorangegangenen Versuchsvorrichtung nochmals verändert. In die Führungsschienen integrierte Düsen wurden in verschiedenen Winkeln auf die Oberfläche des Glasobjektträgers gerichtet, um diesen gleichmäßig von beiden Seitenführungen wegzudrücken. Er sollte dadurch mittig zentriert werden. Die größere Oberfläche anstelle der schmalen Seitenkanten sollte eine höhere Kontrolle und ein besseres Dämpfungsverhalten des Werkstückes ermöglichen.

#### Beobachtungen und Analyse

Zunächst zentrierte sich das Werkstück wie gewünscht. Durch die Ausströmöffnungen an den Führungsschienen entstand diesmal kein zu hoher Luftvolumenstrom unter dem Werkstück, sodass dieses in einer ruhigen, mittigen Position verweilte. Sobald es einen Vorschub in Transportrichtung erfuhr, konnten die schrägen Düsen den Glasobjektträger aber nicht mehr in der

## 6 Prinzipien zur berührungslosen Kompensation lateraler Auslenkkräfte

---

mittigen Position zentrieren. Dieser stieß in der Folge unkontrolliert an die Seitenkanten. Die Erhöhung des Luftdruckes der Führungsdüsen mit dem Ziel, die Kraft auf den Glasobjektträger zu erhöhen, bewirkte lediglich das Runterdrücken des Werkstückes auf die Transportfläche.

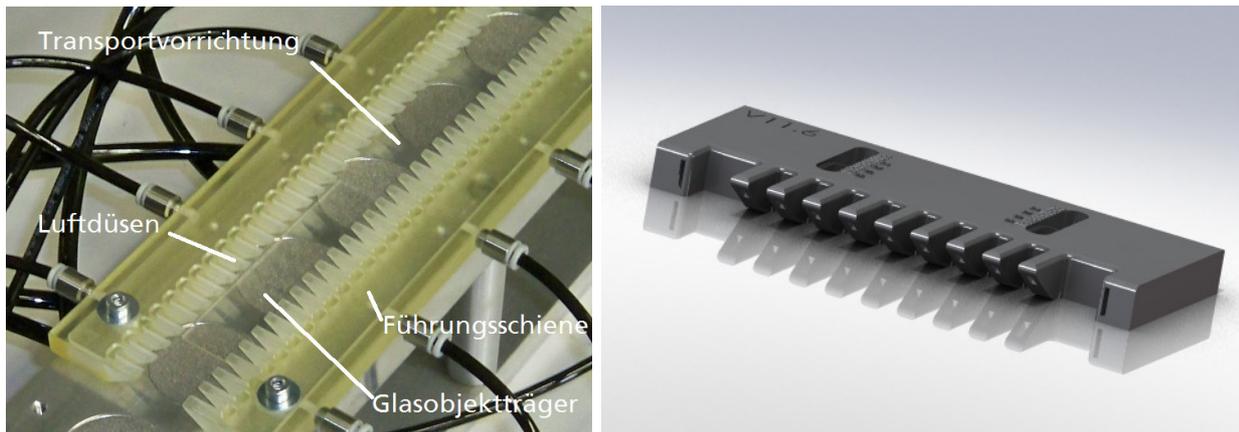


Abbildung 6.8 Schräge Seitenführungsdüsen auf die Werkstückoberfläche

### Bewertung und Fazit

Die schräg auf die Oberfläche des Glasobjektträgers wirkenden Kräfte waren zu klein, um diesen beim Transportieren in einer Mittelposition zu halten. Zusätzlich bewirkten sie bei einem ersten Auslenken des Werkstückes aus der Mittelposition unerwünschte laterale Bewegungen. Zu starke Druckluftkräfte auf die Oberfläche drückten es nach unten auf die Transportfläche. Das gewünschte Dämpfungsverhalten des Systems stellte sich nicht ein. Zusätzlich zeigte sich, dass die funktionale Oberfläche durch den hohen Druckluftaufprall Schaden nahm. Somit können aktive Luftströmungen auf die Oberfläche der Werkstücke als ungeeignetes Führungsmittel ausgeschlossen werden.

### 6.2.1.5 Zwischenfazit nach Versuchsreihe mit flexibler Transportbahn

Es folgten weitere Versuche mit aktiven und passiven Luftführungsschienen auf der Basis des vorgestellten Transportstandes. Durch mechanische Seitenführungen und verschiedene Formen von gerichteten Düsen auf die Oberseite, Unterseite und Seitenkante wurde versucht, den schwebenden Glasobjektträger in eine kontrollierte, zentrierte Position zu bringen. Diese Versuche führten allerdings ebenfalls nicht zum erwünschten Ergebnis. Alle Vorrichtungformen ermöglichten nur wenig Kontrolle und zeigten ein schlechtes Dämpfungsverhalten beim Auslenken der Werkstücke. Es kam sogar zu Beschädigungen der Glasobjektträger durch verschiedene Seitenführungen. Bisher wurde bei den Versuchen beobachtet, dass sich der Glasobjektträger (stets nicht reproduzierbar) in viele verschiedene laterale Richtungen auf der xy-Ebene bewegte. Um diese Bewegungen zu verursachen, reichten schon kleinste Unregelmäßigkeiten im Luftpolster, eine minimal in lateraler Richtung schief ausgerichtete Transportfläche oder Luftströmungen in der Umgebungsatmosphäre aus. Diese vielfältigen Faktoren machten das Werkstück in seinen lateralen Bewegungen nicht kontrollierbar. Daher sollten sie im nächsten Entwicklungsschritt auf eine vorgegebene Richtung beschränkt werden. Durch eine transversale Neigung der Transportfläche gegen die Querachse wurde eine gerichtete Hangabtriebskraft verursacht.

Das Werkstück wird dadurch in die vorgegebene, laterale Richtung beschleunigt. Der Bewegungsfreiraum des Werkstückes wurde von drei auf einen unerwünschten Freiheitsgrad in y-Richtung eingeschränkt. Die nachfolgenden Versuche konzentrierten sich somit auf die Entwicklung einer kontrollierbaren Gegenkraft zur verursachten Hangabtriebskraft.

## 6 Prinzipien zur berührungslosen Kompensation lateraler Auslenkkräfte

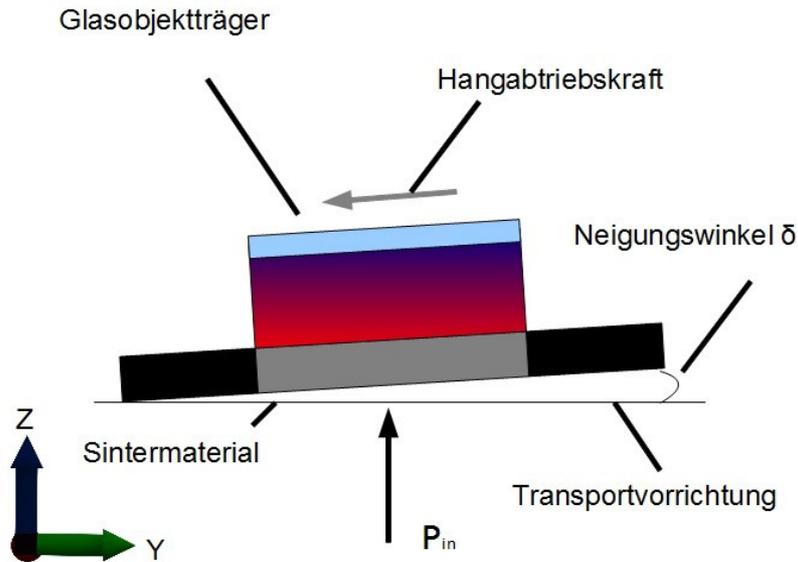


Abbildung 6.9 Transversale Neigung der Transportfläche gegen die Querachse

### 6.2.2 V-Verfahren

#### Versuchsreihe und Aufbau

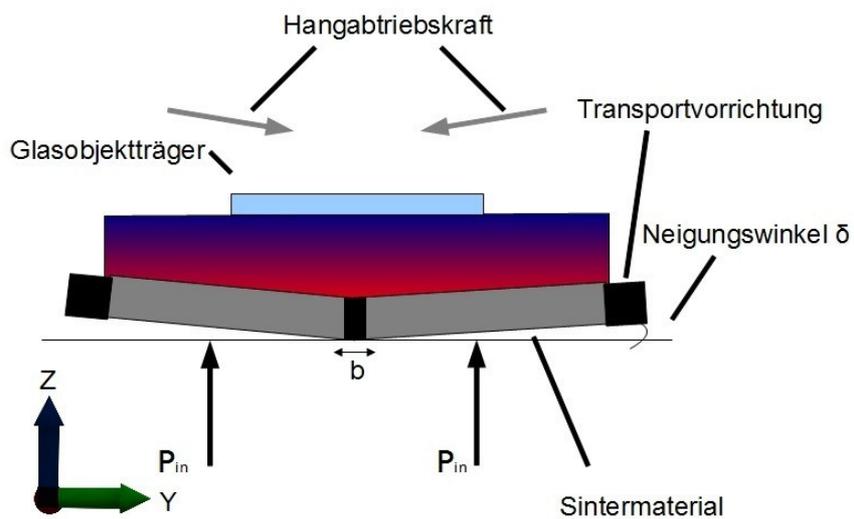


Abbildung 6.10 V-Verfahren zum Ausgleich entgegengesetzter Hangabtriebskräfte

## 6 Prinzipien zur berührungslosen Kompensation lateraler Auslenkkräfte

Eine erste Entwicklungsidee zum kontrollierten Ausgleich der Hangabtriebskraft war, die Transportfläche mittig zu teilen und beide Teile im selben Winkel ähnlich eines flachen V gegenüberzustellen. Durch diese Anordnung sollten sich die entgegengerichteten Hangabtriebskräfte aufheben und das Werkstück sollte in der Mitte der Transportbahn zentriert werden. Neben dem Winkel  $\delta$  und dem Druck  $P$  konnte auch der Abstand  $b$  der beiden Transportflächen variiert werden. Anhand dieser Parameter wurden viele Testversuche durchgeführt. Sie werden im Folgenden beschrieben.

### Beobachtung und Analyse

Die folgende Tabelle zeigt die Ergebnisse zu den Versuchen zum V-Verfahren:

**Skala:** 0 = sehr schlechtes Verhalten bis 10 = sehr gutes Verhalten

Abstand $b$ [mm]	Winkel $\delta$ [°]	Betriebsdruck [Verhältnis]	Steifigkeit	Zentrierung	Dämpfung	mechanischer Kontakt	Bewertung
0	1	gering	8	5	3	10	26
0	5	mittel	4	3	3	10	20
0	10	mittel	4	1	0	10	15
3	1	mittel	4	3	2	10	19
3	5	mittel	3	2	1	10	16
3	10	hoch	2	1	0	5	8
6	1	hoch	3	0	0	5	8
6	5	hoch	2	0	0	5	7
6	10	hoch	0	0	0	0	0

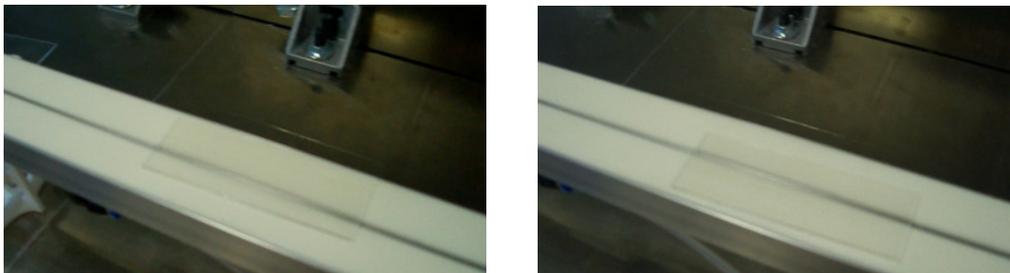
Abbildung 6.11 Ergebnisse der Versuchsreihe des V-Verfahrens

## 6 Prinzipien zur berührungslosen Kompensation lateraler Auslenkkräfte

---

Es zeigte sich, dass der Winkel  $\delta$  möglichst klein, aber bei mindestens 1 Grad gehalten werden sollte. Ein kleinerer Winkel hatte zeitweise ein Ausbrechen des Glasobjektträgers seitlich von der Transportbahn zur Folge. Bei einem zu großen Winkel  $\delta$  konnte die Gewichtskraft des Werkstückes nicht mehr ausgeglichen werden und es lag zeitweise, wie beispielsweise bei Schwingungen, oder vollständig mit den Seitenkanten auf der Transportbahn auf.

Bei einem Winkel  $\delta$  von  $\approx 1$  Grad konnte eine gewünschte berührungslose Zentrierung des Werkstückes festgestellt werden. Das Dämpfungsverhalten des Verfahrens war allerdings so schlecht, dass das Werkstück beim ersten Auslenken aus der Mittelposition in periodische Schwingungen versetzt wurde. Diese hatten zwar keine mechanischen Berührungen zur Folge, aber eine Kontrolle und Bearbeitung der Werkstücke während des Transportes war nicht möglich. Bei Vergrößerung des Winkels  $\delta$  wurde dieses Verhalten zusätzlich verstärkt.



*Abbildung 6.12 V-Verfahren mit nach rechts und links verschobenem Glasobjektträger*

Durch Vergrößerung des Abstandes  $b$  sollte ein zu hoher Luftdruck unter dem Glasobjektträger abgebaut werden können, in der Hoffnung, diese Schwingungen zu unterdrücken. Das war allerdings nicht der Fall. Es zeigte sich, dass eine Vergrößerung des Abstandes  $b$  lediglich zu einer Erhöhung des

Betriebsluftdruckes führte. Dieser war zur Aufrechterhaltung des Luftpolsters und damit zur Kompensation der Gewichtskraft nötig. Das Werkstück neigte dadurch aber vermehrt zu periodischen Schwingungen.

### **Bewertung und Fazit**

Nach vielen Versuchen konnte eine Einstellung gefunden werden, in der die Werkstücke ruhig und kontrolliert in einer zentralen Position verweilten. Problematisch waren allerdings die Reproduzierbarkeit und die Schwingungsdämpfung des Verfahrens bei Bewegungen des Werkstückes in Transportrichtung. Beim ersten Auftreten von Schwingungen konnte das Werkstück nicht wieder kontrolliert werden. Die Folge waren anhaltende periodische Schwingungen während der Transportbewegung.

Durch das V-Verfahren ist es aber erstmals gelungen, Werkstücke berührungslos entlang einer Transportbahn zu bewegen. Allerdings fehlt weiter ein Verfahren zur vollständigen berührungslosen Kontrolle über ein Werkstück. Das Prinzip der lateralen Richtungsvorgabe durch eine minimale Hangabtriebskraft erschien zu diesem Zeitpunkt weiterhin vielversprechend und wurde als Basis beibehalten.

### **6.2.3 Differenzdruckverfahren**

#### **Versuchs idee und Aufbau**

Eine weitere Möglichkeit, die Hangabtriebskraft auszugleichen, bestand durch eine laterale Druckluftdifferenz auf der Transportebene. In Richtung der

## 6 Prinzipien zur berührungslosen Kompensation lateraler Auslenkkräfte

Hangabtriebskraft wurde der Betriebsluftdruck deutlich erhöht ( $P_{in2} > P_{in}$ ), sodass der Glasobjektträger als Gegenkraft einen Auftrieb erfahren sollte, um über diesen Druckpunkt wegzuschweben. Dazu wurde ein weiterer Druckluftanschluss  $P_{in2}$  installiert, um somit die Druckdifferenz  $P_{in2} > P_{in}$  herstellen zu können.

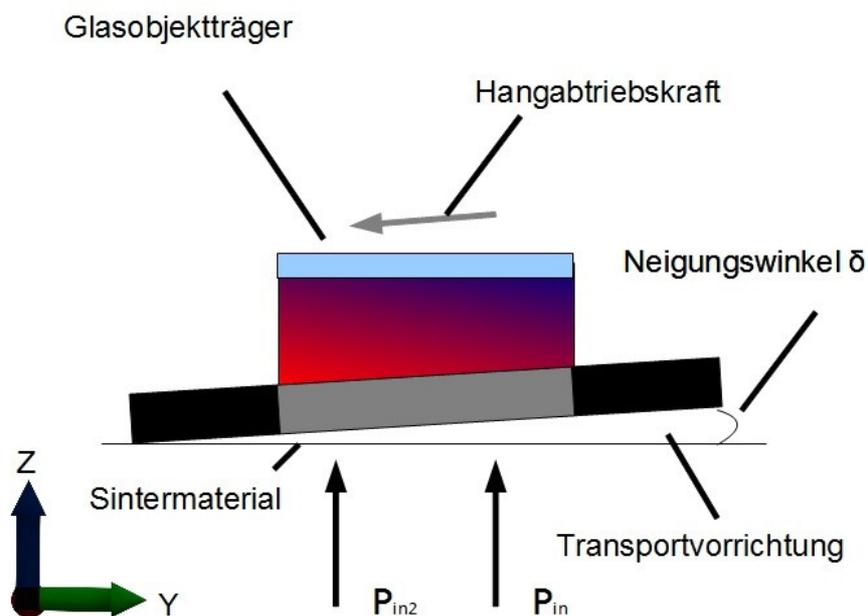


Abbildung 6.13 Differenzdruckverfahren

### Beobachtung und Analyse

Das Verfahren wurde mit Glasprobenträgern verschiedener Größen getestet. Für sehr kleine Werkstücke funktionierte es, wenn sich das Werkstück in einer Ruhelage befand oder nur mit geringer Geschwindigkeit bewegte. Durch präzise Einstellungen des Neigungswinkels  $\delta$  und des Differenzluftdruckes zwischen den Druckluftanschlüssen konnten geringe laterale Zentrierkräfte aufgebaut werden. Kleine Bauteile konnten mit einem guten Dämpfungsverhalten somit erstmals

kontrolliert werden. Bei höheren Transportgeschwindigkeiten oder einer größeren Masse der Werkstücke, speziell bei den Zielobjekten Glasobjektträger, waren die lateralen Kräfte der Druckdifferenz für den Ausgleich der Hangabtriebskraft aber nicht ausreichend. Die Bauteile lenkten über den höchsten Druckpunkt  $P_{in2}$  hinaus und verließen seitlich die Transportfläche.

### Bewertung und Fazit

Trotz der nicht zufriedenstellenden Ergebnisse schien das Prinzip einer transversalen Neigung der Transportfläche gegen die Querachse richtig zu sein. Mit kleineren, formstabilen Werkstücken konnten bereits Erfolge erzielt werden, diese kontrolliert und langsam zu transportieren. Es musste aber weiterhin ein Verfahren gefunden werden, mit dem die lateralen Ausgleichskräfte auf das Werkstück erhöht werden können.

### 6.2.4 90°-Verfahren

#### Aufbau und Idee

Der nachfolgende Versuchsaufbau sollte dazu dienen, auch für größere Werkstücke die Hangabtriebskraft auszugleichen. Die vorangegangenen Versuche zeigten, dass gezielte Luftströmungen auf die Unterseite der Glasobjektträger keine Möglichkeit zur reproduzierbaren Kontrolle bieten. Die zwar sehr empfindliche, aber dennoch relativ dicke Seitenkante der Glasobjektträger stellte eine weitere Möglichkeit dar, der Hangabtriebskraft

## 6 Prinzipien zur berührungslosen Kompensation lateraler Auslenkkräfte

entgegenwirken zu können. Die Gewichtskraft des Werkstückes wird trotz leichter transversaler Neigung der Transportbahn weiterhin hauptsächlich von der Transportfläche kompensiert. Die Hangabtriebskraft des Glasobjektträgers ist im Verhältnis dazu sehr gering. Daher sollte in der Versuchsanordnung erreicht werden, dieser Hangabtriebskraft durch ein Luftlager auf die Seitenkante entgegenzuwirken.

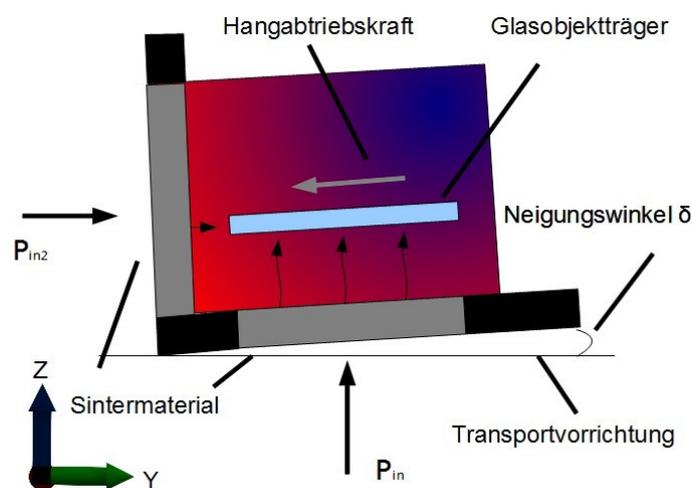


Abbildung 6.14 90°- Verfahren in der Theorie

Dazu wurde ein weiteres Luftlager in einem Winkel von 90° zur Transportfläche entgegen der Hangabtriebskraft aufgebaut ( $P_{in2}$ ). Es sollte durch ein gleichmäßiges Luftpolster an der Seitenkante des Werkstückes die Hangabtriebskraft ausgleichen und das Werkstück in einer definierten Position berührungslos halten. Der Winkel  $\delta$  stellt erneut den Neigungswinkel für die Hangabtriebskraft dar.

### Beobachtung und Analyse

Die ersten Versuche dieses Aufbaus zeigten nicht die erwarteten Ergebnisse. Durch einen zu hohen Luftvolumenstrom unterhalb des Werkstückes staute sich die Druckluft und bildete einen starken Überdruck zwischen den beiden Lufteinströmöffnungen.

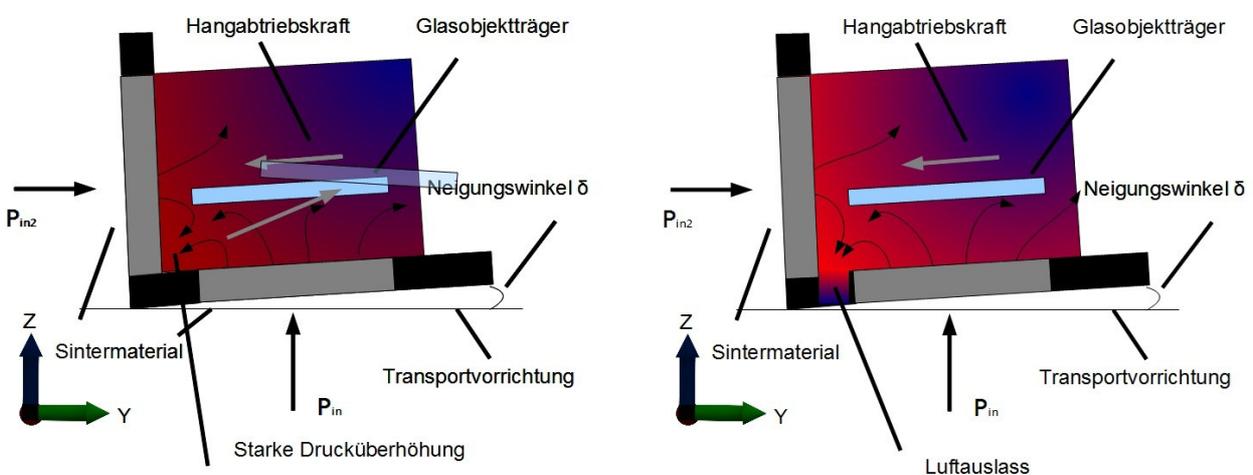


Abbildung 6.15 Starke Drucküberhöhung (links) durch Luftauslass (rechts) beseitigt

Damit dieser in die Atmosphäre entweichen konnte, wurde der Glasobjektträger seitlich von der Transportbahn gedrückt (Abbildung 6.15, links). Da dieses Verhalten bereits bei minimalen Luftdruckeinstellungen beobachtet wurde, musste der Versuchsstand nochmals modifiziert werden. Es wurde eine zusätzliche Luftausströmöffnung zwischen den beiden aerostatischen Lagern zum gezielten Druckabbau unterhalb des Werkstückes eingefügt (Abbildung 6.15, rechts).

## 6 Prinzipien zur berührungslosen Kompensation lateraler Auslenkkräfte

---

Auf dem so modifizierten Versuchsstand konnte erstmals ein Glasobjektträger in einer ruhigen und berührungslos kontrollierten Lage beobachtet werden. Neben den Einstellmöglichkeiten für den Betriebsluftdruck, waren der Neigungswinkel  $\delta$  und die Spaltbreite  $b$  des Luftauslasses die variablen Parameter dieses Versuchsaufbaus.

Es wurde festgestellt, dass der Neigungswinkel  $\delta$  möglichst klein gewählt werden sollte, um die Hangabtriebskraft so klein wie möglich zu halten. Dadurch minimiert sich auch die erforderliche Gegenkraft. Ein Winkel von circa 1 Grad hat sich in den Versuchen als sehr gut herausgestellt. Dieser kleine Winkel ist auch vorteilhaft für die Bearbeitung der Glasobjektträger auf der Transportbahn. Ein zu schräg stehendes Werkstück könnte bei der Oberflächenbeschichtung die Homogenität derselben beeinflussen.

Am sensibelsten bei dieser Versuchsanordnung war die Einstellung der Spaltbreite  $b$ . Wurde diese zu klein gewählt, war der Luftvolumenstrom unter dem Glasobjektträger so groß, dass das Werkstück gegen die Hangabtriebskraft von der Transportfläche rutschte. War der Abstand zu breit, lag das Werkstück auf der Transportfläche auf. Es konnte zu viel Druckluft entweichen und das Luftpolster besaß dadurch keine ausreichende Tragkraft mehr. Als erfolgversprechend stellte sich ein Wert von circa 3 mm für die Spaltbreite heraus. Parallel dazu wurde der Luftdruck nach den Vorgaben aus Kapitel 5 so eingestellt, dass sich ein optimiertes Verhältnis zwischen Luftdurchfluss, Tragkraft und Steifigkeit einstellte. Dadurch konnte eine Einstellung gefunden werden, in der erstmals ein Glasobjektträger vollständig berührungslos durch einen Vorschub mittels Luftdüsen auf die Glasobjektträgeroberfläche kontrolliert transportiert werden konnte.



*Abbildung 6.16 90°-Verfahren mit Vorschub des Werkstückes durch Luftdüse*

Auch das Dämpfungsverhalten der Transportbahn war gut. Es wurde kein größeres laterales Ausbrechen der Werkstücke festgestellt. Diese ließen sich reproduzierbar und mit guten Geschwindigkeiten entlang des Freiheitsgrades X (Transportrichtung) durch horizontal wirkende Luftdüsen transportieren. Bei genauerer Betrachtung und Analyse von hochauflösenden Videosequenzen konnten allerdings leichte periodische und homogene Schwingungen in lateraler y-Richtung festgestellt werden.

### **Bewertung und Fazit**

Durch den Ausgleich der vertikalen Gewichtskraft durch ein aerostatisches Lager, der Erzeugung einer gerichteten Hangabtriebskraft und einer Luftführungsschiene entgegen dieser Hangabtriebskraft wurde erstmals erreicht, dass sich ein Werkstück vollständig berührungslos und kontrolliert entlang einer Transportbahn bewegt.

Aufgrund periodischer Drucküberhöhungen, durch einen trotz einer Luftauslassöffnung zu hohen Luftvolumenstrom, musste die eingepresste Druckluft seitlich der Werkstücke in die Atmosphäre entweichen und verursachte dadurch minimale, periodische Schwingungen. Dieser Vorgang konnte auch durch eine Vergrößerung des Spaltes  $b$  nicht kompensiert werden. Dieses hatte im Gegensatz zur Folge, dass die Tragkraft des Luftlagers der

## 6 Prinzipien zur berührungslosen Kompensation lateraler Auslenkkräfte

---

Transportfläche zu gering wurde und die Glasobjektträger auflagen. Problematisch war daher nicht mehr der Bereich direkt zwischen den beiden Lufteinströmöffnungen, sondern der Bereich mittig unter dem Werkstück. Dort konnte eine Drucküberhöhung festgestellt werden. Sie beeinflusste das Dämpfungsverhalten der Transportvorrichtung negativ und verursachte die beobachteten Schwingungen. Daher sollte anschließend eine Möglichkeit gefunden werden, den Luftvolumenstrom im Transportsystem zu verkleinern und gleichzeitig der Luft die Möglichkeit zu geben, gezielt und ohne das Verursachen von unerwünschten Schwingungen zu entweichen.

### 6.2.5 Schienentransportverfahren

#### Versuchs idee und Aufbau

Das im vorangegangenen Unterkapitel vorgestellte 90°-Verfahren erfüllt bereits in vielen Aspekten die Anforderungen an ein berührungsloses Transportsystem. Es bot eine sehr gute Basis zur Weiterentwicklung. Die leichten periodischen Schwingungen wurden durch einen zu hohen Luftvolumenstrom unterhalb des Werkstückes verursacht. Beim 90°-Verfahren wurde die Transportfläche durch flächiges Sintermaterial gebildet. In Kapitel 5 wurden dazu alternative Verfahren vorgestellt und bewertet. Das Schienensystem bietet als Transportfläche sehr gute Eigenschaften in Bezug auf Luftdurchfluss, Tragkraft, Steifigkeit und Dämpfung. Für die Reduzierung der periodischen Schwingungen besitzt es aber einen weiteren, entscheidenden Vorteil.

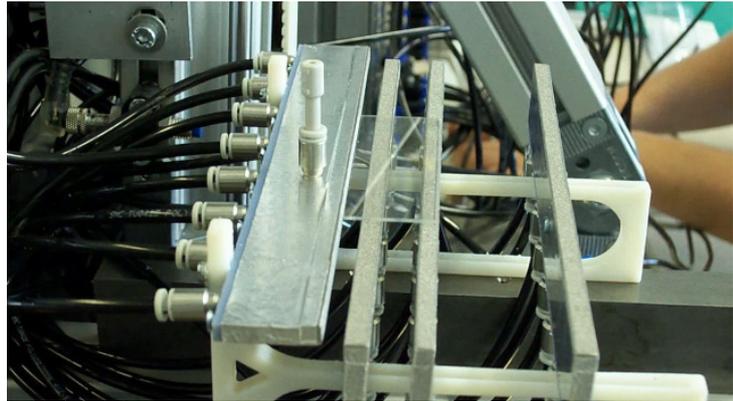
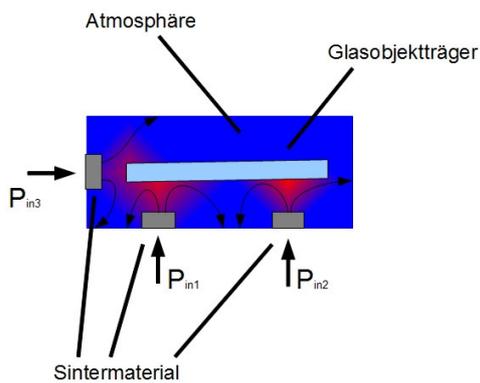


Abbildung 6.17 Schienentransportverfahren zum berührungslosen Transport

Durch die massive Verkleinerung der Luftausströmöffnungen der Transportfläche (Kapitel 5.5.3) wird der Luftdurchfluss und dadurch der Luftvolumenstrom reduziert. Zusätzlich schafft dies die Möglichkeit, die einströmende Luft zwischen den einzelnen Transportgleisen entweichen zu lassen. Durch die Umwandlung der Transportfläche in ein Schienensystem sollen die störenden periodischen Schwingungen beseitigt werden.

### Beobachtungen und Analyse

Es konnte ein stabiler Transport mit nur noch leichten, unregelmäßigen Störungen in der  $xy$ -Ebene beobachtet werden. Diese wurden durch ein sehr gutes Dämpfungsverhalten des Transportsystems jeweils schnell reguliert. Die leichten periodischen Schwingungen, verursacht durch den zu hohen Luftvolumenstrom unterhalb des Werkstückes, konnten allerdings vollständig behoben werden. Durch das Schienentransportverfahren ist es ebenfalls möglich, die mechanische Neigung zum Erzeugen einer Hangabtriebskraft, durch eine Schrägstellung mittels Druckdifferenz zu ersetzen. Diese kann an den Transportschienen durch  $P_{in1} < P_{in2}$  eingestellt und flexibel angepasst werden.

### Bewertung und Fazit

Durch die Verringerung der Einströmfläche unterhalb des Werkstückes und die dadurch resultierende Reduzierung des Durchflusses wird auch der Luftvolumenstrom deutlich verringert. Die restliche, überschüssige Druckluft entweicht über die Auslassöffnungen zwischen den Transportschienen. Es ist damit gelungen, einen reproduzierbaren und kontrollierten berührungslosen Transport oberflächensensitiver Glasobjektträger durchzuführen. Problematisch waren lediglich noch unregelmäßige Schwingungen in alle lateralen Richtungen. Es konnte festgestellt werden, dass diese Störungen nicht durch das Transportsystem, sondern durch die umgebende Atmosphäre verursacht wurden. Durch das Fehlen mechanischer Reibung an den Seitenkanten, wie es bei Systemen mit Führungsanschlügen der Fall ist, reagiert das Verfahren sensibel auf äußere Einflüsse. Dieses können sogar kurze Windstöße durch vorbeigehende Personen sein, welche die Störungen verursachen. Das Problem konnte nicht ignoriert werden, da ansonsten während der Produktion der Werkstücktransport durch verschiedene Luftströmungen negativ beeinflusst werden könnte.

### 6.2.6 Geschlossenes Schienentransportverfahren

#### Versuchs idee und Aufbau

Das Schienentransportverfahren hat gezeigt, dass ein berührungsloser Transport von Glasobjektträgern möglich ist. Um das Verfahren unanfällig für äußere, störende Einflüsse zu machen, wurde ein neuer Versuchstand auf dessen

## 6 Prinzipien zur berührungslosen Kompensation lateraler Auslenkkräfte

Grundlage in einer geschlossenen Schutzhülle entworfen. Diese sollte das Transportsystem vor äußeren Einflüssen bewahren und unregelmäßige Störungen beseitigen.

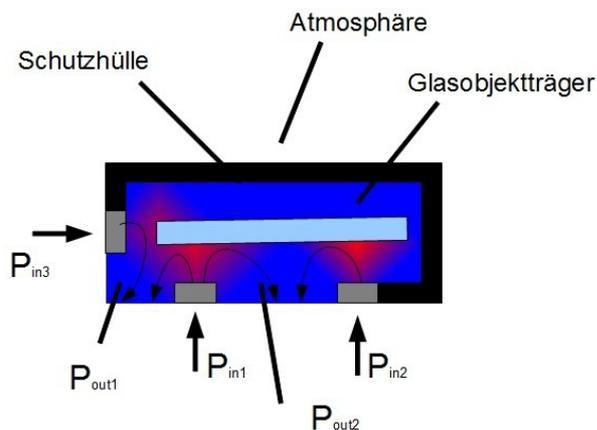


Abbildung 6.18 Schienentransportverfahren in geschlossener Schutzhülle

### Beobachtungen und Analyse

Die ersten Versuche brachten nicht den erhofften Erfolg eines vollständig ruhigen und stabilen Verfahrens. Der Glasobjektträger zeigte starke periodische Schwingungen sowie Flatterbewegungen und war nicht zu kontrollieren. Teilweise wurden die Werkstücke, abhängig von den Betriebsdruckeinstellungen, nach unten gegen die Transportfläche oder nach oben gegen die Schutzhülle gedrückt.

Die beim Schienensystem noch seitlich in die Atmosphäre entweichende Luft (Abbildung 6.17), drückte nun in den Bereich unter die geschlossene Schutzhülle. Dadurch entwickelte sich ein nicht kontrollierbarer Überdruck oberhalb des Glasobjektträgers (Abbildung 6.19, links).

## 6 Prinzipien zur berührungslosen Kompensation lateraler Auslenkkräfte

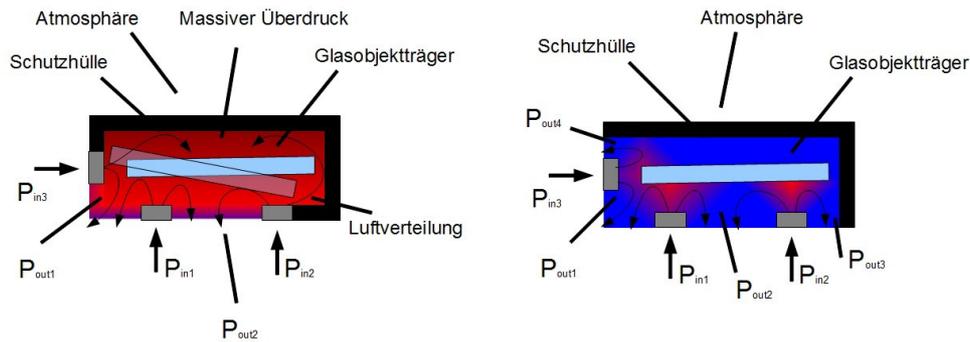


Abbildung 6.19 Ein Überdruck in der Schutzhülle (links) wird durch zusätzliche Luftauslassöffnungen an den Seitenrändern verhindert (rechts)

Daraufhin wurde der Versuchsstand modifiziert. Durch Hinzufügen weiterer Luftauslässe an den Seitenrändern konnte wieder ein stabiles Verhalten der Werkstücke erreicht werden. Dieses funktioniert reproduzierbar und zusätzlich unabhängig von äußeren Störgrößen. Die in der Schutzhülle gestaute Druckluft kann nun durch die zusätzlichen Luftausströmöffnungen in die Atmosphäre (Abbildung 6.19, rechts) entweichen.

### Bewertung und Fazit

Die Aufgabe, ein kontrollierbares und vollständig berührungsloses Verfahren zum Transport oberflächensensitiver Werkstücke zu entwickeln, war erfüllt. Das geschlossene Schienensystem ermöglicht einen berührungslosen Transport mit geringem Luftdurchfluss und sehr guten Dämpfungseigenschaften. Die Schutzhülle macht das System zusätzlich unanfällig gegen Störungen aus der äußeren Umgebung.

Bei weiteren Entwicklungsversuchen stellte sich aber heraus, dass die Abstimmung der vielen Einstellungsparameter sehr komplex ist. Um das Schienentransportsystem mit seinen bestmöglichen Eigenschaften Tragkraft,

Steifigkeit und Dämpfung betreiben zu können, muss das Luftpolster optimal eingestellt werden. Das Verhältnis des Luftdruckes der Einlassöffnungen zu den Spaltgrößen und Anordnungen der Ausströmöffnungen spielt dabei eine tragende Rolle. Die optimalen Einstellungen für den Betriebsluftdruck zum Transport der Werkstücke wurden in Kapitel 5 ermittelt und sind damit vorgegeben. Ein ausgeglichenes Volumenverhältnis zwischen der einströmenden und ausströmenden Luft war demnach abhängig von der Spaltgröße und Anordnung der Ausströmöffnungen. Diese konnten durch ihre mechanische Form allerdings nur aufwendig verändert und somit auf die einströmende Luft angepasst werden. Konnte nicht ausreichend Luftmasse gleichzeitig aus der Schutzhülle ausströmen, waren unkontrollierbare Schwingungen die Folge. Bei zu hohem Luftmassenverlust wurde das tragende Luftpolster und damit die Eigenschaften Tragkraft, Steifigkeit und Dämpfung negativ beeinflusst.

Zusätzlich waren weitere Vorteile eines geschlossenen Transportsystems noch nicht vollständig genutzt worden. Zum Schutz der empfindlichen Werkstücke findet die Produktion heutzutage in Reinräumen oder sogar unter Schutzgasatmosphäre mit hohen Betriebskosten statt (Kapitel 1). Ein vollständig geschlossenes Verfahren könnte durch die eigene Schutzatmosphäre solche Produktionen nun außerhalb von Reinräumen kostengünstig ermöglichen. Es könnten dadurch Kapazitäten gespart sowie das produzierende Personal entlastet und die Betriebskosten gesenkt werden. Das geschlossene Schienentransportsystem besitzt allerdings den Nachteil, dass die Luftausströmöffnungen, bestehend aus einfachen Bohrungen, nicht gegen Partikeleinfall von außen geschützt sind. Bei ausgeschalteter Betriebsdruckluft kann dadurch ungehindert partikelhaltige Atmosphärenluft in das geschlossene System gelangen. Diese Erkenntnisse führten zur Entwicklung des Transport-

## 6 Prinzipien zur berührungslosen Kompensation lateraler Auslenkkräfte

---

Flow-Pipe-Verfahrens, einem berührungslosen Transportsystem in einer geschlossenen Schutzatmosphäre.

### 6.2.7 Transport-Flow-Pipe-Verfahren

#### Versuchsreihe und Aufbau

Zur Weiterentwicklung des geschlossenen Schienensystems wurden die düsenförmigen Ausströmöffnungen durch Luftauslässe aus Sintermaterialien ersetzt. Die Druckluft sollte dadurch homogener und ohne Verwirbelungen wieder aus dem Gehäuse strömen.

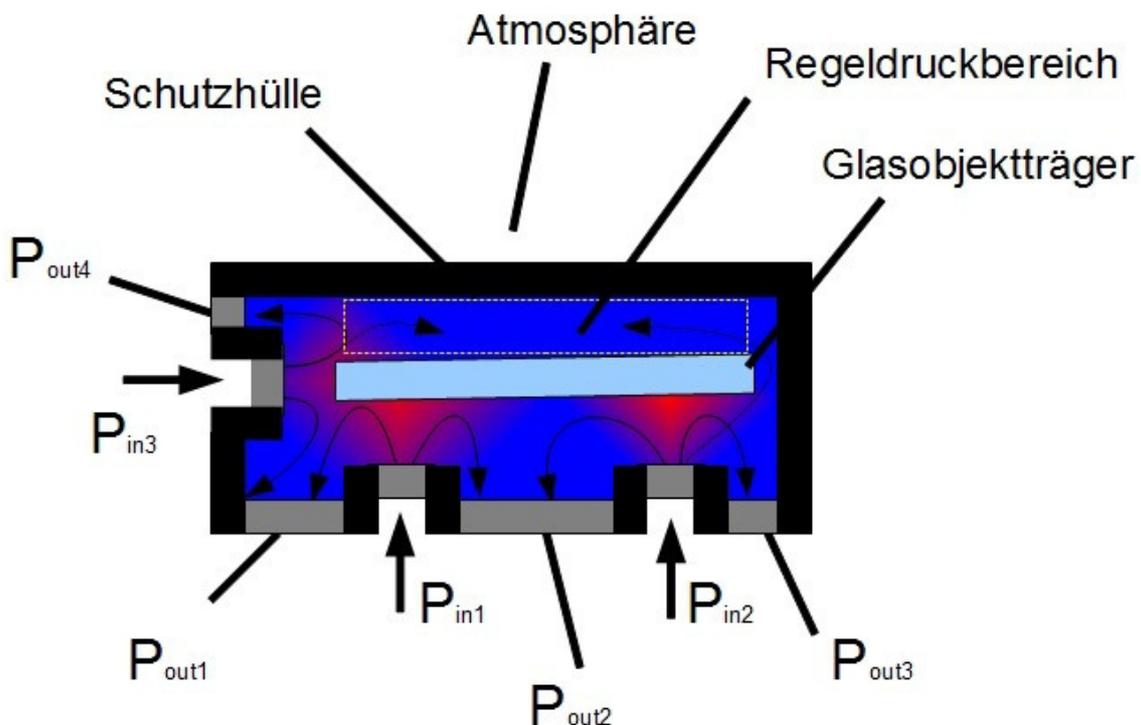


Abbildung 6.20 Querschnitt des Transport-Flow-Pipe-Verfahrens

Um die komplexen Einstellungen beim Verhältnis Luftzufuhr zu Luftabfuhr zu vereinfachen, wurden an den Ausströmöffnungen ( $P_{out1-4}$ ) Vakuumerzeuger angeschlossen. Es sollte ein regelbares System mit den Parametern  $P_{in1-3}$  und  $P_{out1-4}$  entstehen. Die Beschaffenheit des Sintermaterials wurde, im Gegensatz zu den Einströmöffnungen, an den Ausströmöffnungen möglichst grob, im aufgebauten Versuchsstand mit einer Porengröße von  $120\ \mu\text{m}$ , gewählt. Dieses ist durch die Druckverhältnisse der einströmenden und ausströmenden Luft zu erklären. Luft kann mit einem erheblich höheren Betriebsdruck in ein System gepresst werden, als sie durch Vakuumerzeuger abtransportiert werden kann. Um das Luftdurchflussverhältnis im geschlossenen Transportsystem auszugleichen, musste nach Definition aus Kapitel 5 die Porengröße also möglichst groß gewählt werden. Nach dieser entspricht der Luftdurchfluss [L/min] einem linearen Verhältnis zwischen der Materialbeschaffenheit [Porengröße in  $\mu\text{m}$ ] und dem Betriebsdruck [bar].

### Beobachtungen und Analyse

Durch die Vakuumerzeuger an den Ausströmöffnungen  $P_{out1-4}$  wurde die Einstellbarkeit des Druckverhältnisses erheblich erleichtert. Nach dem Einstellen eines ausgeglichenen Luftdurchflussverhältnisses verweilt das Werkstück in einer berührungslosen Ruheposition. Es konnten keine erkennbaren Schwingungen oder Flatterbewegungen festgestellt werden. Auch Störungen aus der äußeren Umgebung hatten keinen Einfluss mehr auf das Werkstück im geschlossenen Transportsystem.

### Bewertung und Fazit

Durch das Transport-Flow-Pipe-Verfahren ist es gelungen, die Anforderungen an die Handhabung von oberflächensensitiven Glasobjektträgern zu erfüllen und durch zusätzliche Entwicklungen zu erweitern. Das automatisierbare und berührungslose Transportverfahren ist mit einer eigenen Schutzhülle versehen und somit unabhängig von äußeren Einflüssen.

In diesem geschlossenen System können sämtliche Luftströmungen eingestellt, geregelt und überwacht werden. Durch die getestete Sintertechnologie wird eine homogene Luftzu- und Luftabfuhr gewährleistet. Störende Luftverwirbelungen werden vermieden. Zusätzlich entstehen weitere Vorteile für die Produktion von empfindlichen Werkstücken. Oberhalb dieser ist ein Regeldruckbereich entstanden, der durch ein gezieltes Verhältnis zwischen einströmender und ausströmender Luft eingestellt werden kann (Abbildung 6.20). So ist es möglich, in diesem Bereich einen leichten Unterdruck zu schaffen. Dieser kann beispielsweise in der Mikroproduktion von Vorteil sein. Zusätzlich bietet das geschlossene System die Möglichkeit, in einem Kreislauf nicht nur reinste Luft, sondern auch Schutzgase wie Stickstoff als Transportmedium kostengünstig zu nutzen.

Das Schienensystem der Transportfläche und die schmale Führungsschiene zum Ausgleich der Hangabtriebskraft ermöglichen ein Verfahren mit sehr guten Werten für die Eigenschaften Tragkraft, Steifigkeit und Dämpfung bei einem optimiertem Luftdurchfluss und somit sparsamen Betriebskosten.

### 6.3 Prinzipien zur berührungslosen und steuerbaren Kontrolle über den Freiheitsgrad X (Transportrichtung)

Das Transport-Flow-Pipe-Verfahren ermöglicht ein hohes Maß an Kontrolle über fünf Freiheitsgrade eines Werkstückes. Durch eine berührungslose Kontrolle des transversalen Freiheitsgrades X (Transportrichtung) wäre die letzte Bedingung an eine berührungslose Transportvorrichtung erfüllt. Im vorangegangenen Kapitel wurde beschrieben, dass ein Glasobjektträger ohne äußere Atmosphäreneinflüsse im Transportsystem ruhig an einer vorgegebenen Position verweilt. Das sehr gute Dämpfungsverhalten des Verfahrens absorbiert auch kleinste Störungen oder Luftströmungsveränderungen. Der verbleibende Freiheitsgrad in x-Richtung soll nunmehr nicht nur zur Ruhelage, sondern auch zur Bewegung des Werkstückes kontrolliert werden. Dazu sind zwei verschiedene Methoden entwickelt und getestet worden.

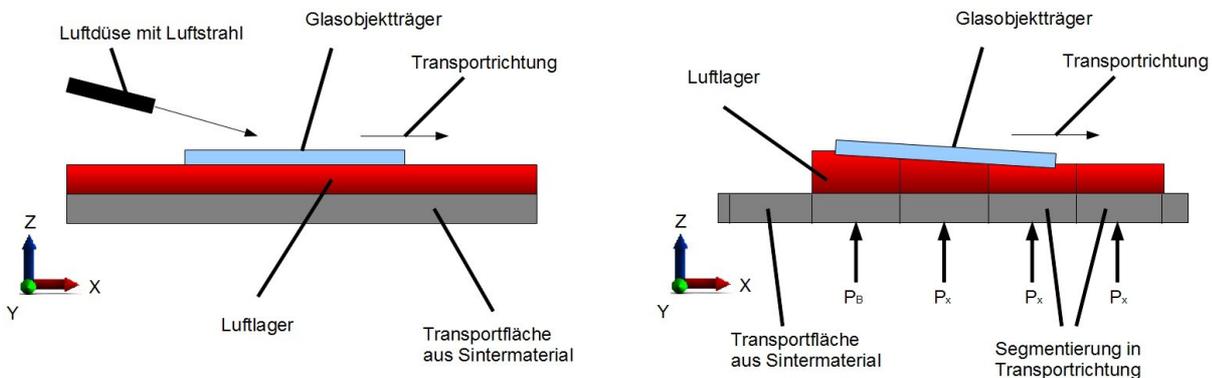


Abbildung 6.21 Beschleunigung eines Werkstückes in Transportrichtung

Die erste Methode sieht vor, dass in einer erhöhten Position angebrachte Luftdüsen einen nahezu horizontalen sowie sanften Luftstrahl auf die Oberfläche der Werkstücke leiten und somit eine Beschleunigung in

## 6 Prinzipien zur berührungslosen Kompensation lateraler Auslenkkräfte

---

Transportrichtung verursachen (Abbildung 6.21, links). Die zweite Methode nutzt die in Kapitel 5 beschriebene Segmentierung der Transportfläche in x-Richtung (Abbildung 6.21, rechts). Wird beim Segment am Ende des Werkstückes kurzzeitig der Betriebsluftdruck erhöht ( $P_B > P_X$ ), wird das Werkstück leicht in Transportrichtung geneigt und erfährt durch die resultierende Hangabtriebskraft eine Beschleunigung.

Beide Verfahren wurden getestet und funktionieren ohne weitere Störungen. Bei der Düsenttechnologie bilden der Lufteinflusswinkel und der Luftdruck die Einstellgrößen. Beim Segmentierungsverfahren sind es der Luftdruck sowie die Segmentgröße. Es konnte festgestellt werden, dass durch die Düsenttechnologie größere Kräfte und somit höhere Beschleunigungen auf das Werkstück wirken können. Für präzise und langsame Positionsbewegungen eignet sich vorrangig die Segmentierungstechnologie. Die Kombination aus beiden Methoden kann in einer Anlage jedoch auch sinnvoll sein.

Eine gegenwirkende Kraft zum Abbremsen der Werkstücke kann äquivalent durch beide Technologien erfolgen. Auch hier wurde festgestellt, dass durch die Düsenttechnologie größere Kräfte auf ein Werkstück ausgeübt werden können.

### 6.4 Zusammenfassung zur Kompensation lateraler Auslenkkräfte

In diesem Kapitel wurden unterschiedliche Versuche zur berührungslosen Kompensation der lateralen Auslenkkräfte eines schwebenden Werkstückes beschrieben. Auf der Basis eines entwickelten und in Kapitel 5 beschriebenen Schienensystems als Transportfläche wurde das Transport-Flow-Pipe-Verfahren entwickelt. Dieses ermöglicht eine berührungslose Kontrolle über die sechs

Freiheitsgrade eines Werkstückes. Die Qualitätseigenschaften eines aerostatischen Lagers in Bezug auf Tragkraft, Steifigkeit und Dämpfung erfüllen dabei hohe Ansprüche. Durch zusätzliche Technologien kann ein Freiheitsgrad berührungslos so kontrolliert werden, dass diese Bewegungen eines Glasobjektträgers entlang einer Geraden ermöglichen. Das Verfahren stellt somit eine automatisierte Transportvorrichtung dar.

Durch die zusätzliche Schutzhülle ist ein regelbares Verfahren entwickelt worden, das unabhängig von äußeren Einflüssen funktioniert. Die Produktion kann dadurch außerhalb eines Reinraumes stattfinden. Auch der Einsatz von Gasen wie Stickstoff zum Schutz der Werkstücke ist durch einen Kreislauf in dem geschlossenen System möglich. Durch die schmalen Einströmöffnungen aus hochfeinen Sintermaterialien und einer Segmentierung der Transportfläche in Transportrichtung kann der Luftdurchfluss reduziert und die Betriebskosten zusätzlich gesenkt werden.

Zur Validierung dieser Ergebnisse wurde eine weitere Versuchsanlage, das Transport-Flow-Pipe-System, entwickelt. Es wird in Kapitel 7 beschrieben. Die Ergebnisse werden im Folgenden analysiert und bewertet.

### Kapitel 7

## Konzeption und Umsetzung des Transport-Flow-Pipe-Verfahrens

Zur Validierung des entwickelten Verfahrens wird in diesem Kapitel zunächst der Aufbau eines weiteren Versuchstandes (Transport-Flow-Pipe-System) beschrieben. Die Einsatzfähigkeit zur Handhabung von Glasobjektträgern wird an diesem analysiert und abschließend bewertet. Im nachfolgenden Unterkapitel wird ein Modell zum Einsatz des Handhabungsverfahrens und die resultierenden Veränderungen bei der Produktion von Glasobjektträgern mit Vor- und Nachteilen vorgestellt. Abschließend werden weitere Einsatzmöglichkeiten des Transport-Flow-Pipe-Verfahrens präzisiert. Dafür werden unterschiedliche Bauteile und Werkstücke verschiedener Produktionen im Hinblick auf ihre Form und Empfindlichkeit diskutiert.

### 7.1 Versuchsstand Transport-Flow-Pipe-System

Durch das entwickelte Verfahren ist es gelungen, oberflächensensitive Werkstücke in einem eigenen, abgeschlossenen Schutzraum vollständig berührungslos und kontrolliert zu transportieren. Zur Validierung und Demonstration der Entwicklung wurde ein Laborversuchsstand für eine Transportstrecke von 600 mm aufgebaut. Zusätzlich sollte durch den Versuchsstand anhand von präziser Druck- und Durchflusssensoren der

Nachweis für ein automatisier- und reproduzierbares Verfahren erbracht werden.

### Aufbau des Transport-Flow-Pipe-Systems

Die Betriebsdruckluft wird der Anlage über zwei Industrieleitungen zugeführt. Zunächst wird diese in der Wartungsebene zu reiner Luft gefiltert und es werden sowohl der Druck als auch der Durchfluss überwacht. Anschließend wird sie in der Verteilungsebene auf sieben Leitungen verteilt. Diese sind in der Regelungsebene jeweils separat mit elektrischen Druckreglern verbunden. Dadurch kann der Betriebsluftdruck jeder Leitung einzeln durch eine Steuerungssoftware geregelt werden. Drei Leitungen bilden die Zuleitungen für die Transport- und Führungsschiene. An den anderen vier Leitungen sind zur Luftabführung leistungsstarke Vakuumerzeuger angeschlossen.



Abbildung 7.1 Versuchsstand Transport-Flow-Pipe-System

## 7 Konzeption und Umsetzung des Transport-Flow-Pipe-Verfahrens

---

Die Transport- und Führungsschienen wurden aus Sintermaterial mit  $2\ \mu\text{m}$  großen Poren ausgestattet. Die Ausströmöffnungen wurden ebenfalls mit porösem Material versehen, allerdings mit einer Porengröße von  $120\ \mu\text{m}$ . Die größeren Poren stellen sicher, dass bei deutlich weniger (Unter-)Druck die in das System eingepresste Luftmasse wieder abgeführt werden kann. Durch das Sintermaterial an den Ausströmöffnungen wird die Luft gezielt und homogen aus dem Gehäuse abgezogen. Hierdurch wird der Luftverbrauch reduziert und Störungen beim Transport der Werkstücke werden vermieden.

Die Transportstrecke wurde in acht gleiche Bereiche zu je  $75\ \text{mm}$  Länge segmentiert. In der Steuerungsebene befindet sich ein Ventilarray, um sicherzustellen, dass lediglich die Segmente mit Luft versorgt werden, an denen sich das Werkstück jeweils befindet. Infrarotsensoren erkennen dabei zuverlässig dessen Position.

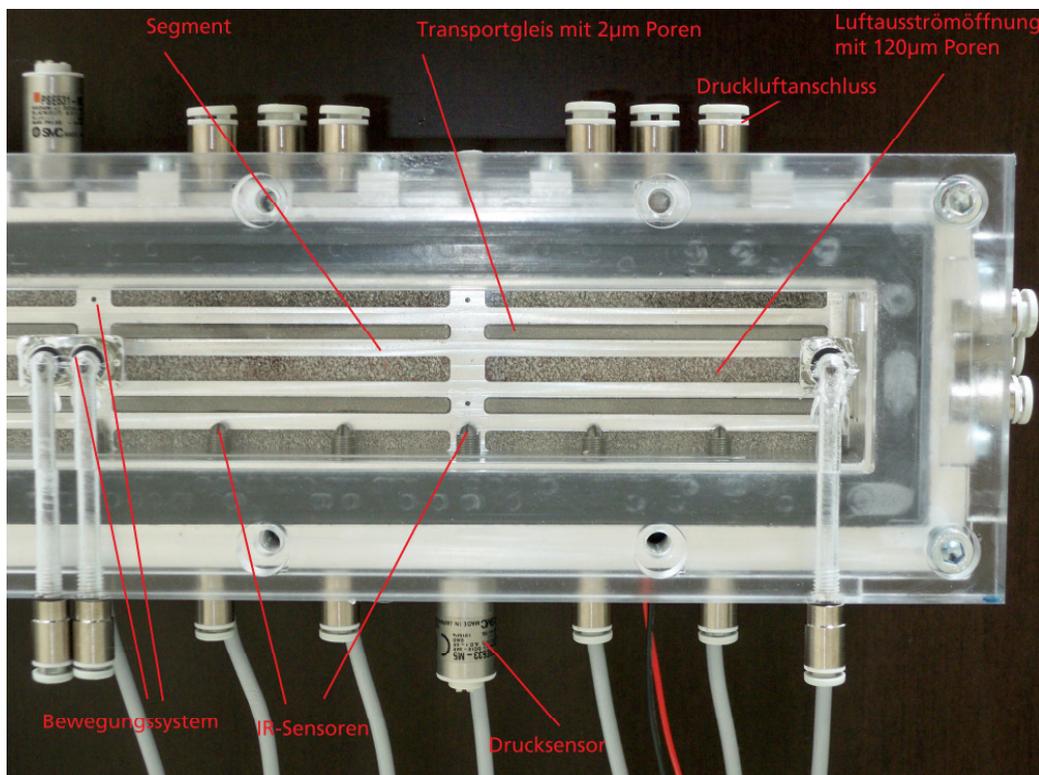


Abbildung 7.2 Segmentierung der Transportbahn

## 7 Konzeption und Umsetzung des Transport-Flow-Pipe-Verfahrens

---

Ein Mikrocontroller realisiert die automatische Betriebsdruckregelung der sieben Leitungen mithilfe von Druckreglern, die Sensorüberwachung der Werkstückpositionen, die Ventilschaltungen für die segmentierte Ansteuerung der Transportbahn sowie die Drucküberwachung in der Transportkammer. Das Steuerungsprogramm überwacht, speichert und analysiert zusätzlich die Messdaten. Zur kontrollierten Bewegung werden die Glasobjektträger durch gezielte Luftströmungen der Bewegungssysteme auf die Ober- oder alternativ auf die Unterseite beschleunigt, verzögert oder positioniert.

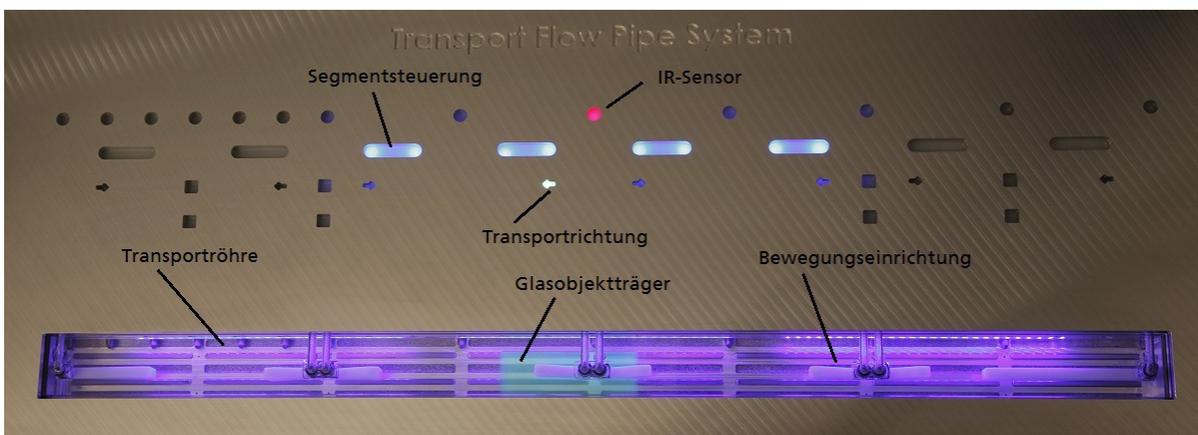


Abbildung 7.3 Das Transport-Flow-Pipe-System – die Transportröhre

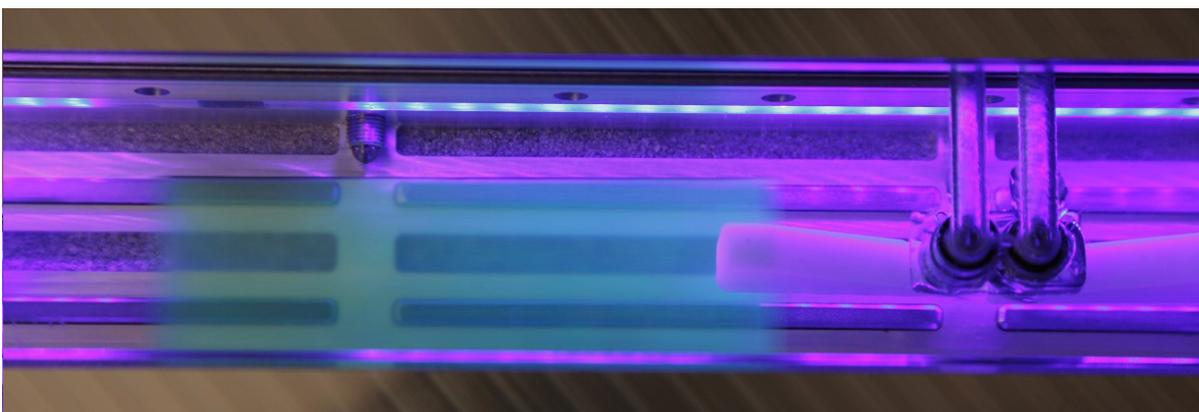


Abbildung 7.4 Ein Glasobjektträger wird durch eine Bewegungsvorrichtung berührungslos beschleunigt oder verzögert



*Abbildung 7.5 Ein Glasobjektträger wird im Transportsystem berührungslos positioniert*

### 7.2 Versuche und Ergebnisse

Der Versuchstand „geschlossenes Schienentransportsystem“ führte zur Entwicklung des Transport-Flow-Pipe-Verfahrens (Kapitel 6). Zur Validierung wurde ein speziell auf dieses Verfahren abgestimmter, neuer Versuchstand aufgebaut (Transport-Flow-Pipe-System). Dieser konnte die vorangegangenen Ergebnisse und Erkenntnisse bestätigen und nochmals verbessern. Durch den Einsatz von präziser Sensorik und Druckreglern ist ein automatisierbares Verfahren zum berührungslosen Transportieren empfindlicher Werkstücke unabhängig von atmosphärischen Einflüssen entstanden. Die Überwachung eines gleichmäßigen Lufteinström-zu-Luftausström-Verhältnisses sowie geführte Strömungen gewährleisteten den schonenden Transport von Werkstücken in einer druckstabilen Schutzkammer.

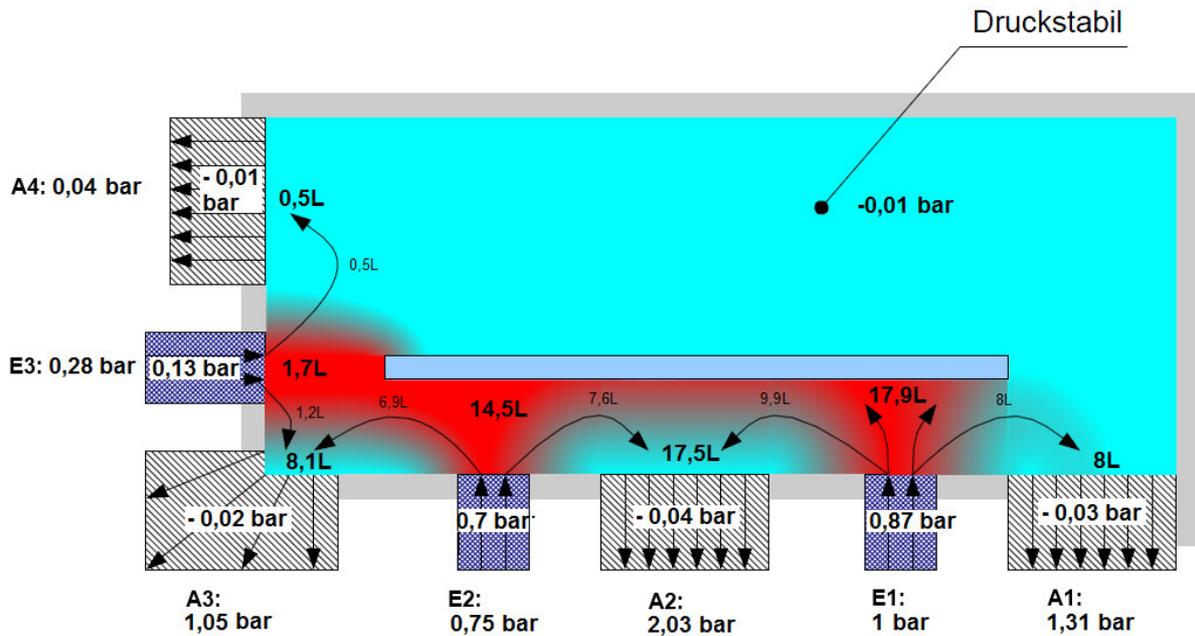


Abbildung 7.6 Messwerte im Transport-Flow-Pipe-System

### Nachweis 1: Bestätigung der Messwerte zu aerostatischen Lagern aus Kapitel 5

In Abbildung 7.6 sind die Messwerte für Luftdruck und Durchfluss zum Transport von oberflächensensitiven Glasobjektträgern im Transport-Flow-Pipe-System dargestellt. Die äußeren Werte (A1–A4, E1–E3 in bar) geben die Betriebsdruckeinstellungen der Versorgungsleitungen an den Druckreglern an. Die Werte [bar] in den Kammern sind durch Sensoren in der Vorkammer des Sintermaterials gemessen worden. Die negativen Werte entsprechen dem Unterdruck der Vakuumerzeuger, die durch einen Überdruck an ihren Versorgungsanschlüssen diesen regelbar erzeugen. An der Oberseite des Gehäuses befindet sich ein Sensor zur Überwachung des Kammerdruckes.

Um eine Hangabtriebskraft des Werkstückes zur Führungsschiene zu erzeugen, werden an den Transportschienen unterschiedliche Betriebsluftdrücke

eingestellt. Diese sind in den Vorkammern der Sintereinsätze 0,7 bar und 0,87 bar hoch. Sie verursachen eine transversale Neigung des Glasobjektträgers in einem kontrollierten Winkel von ungefähr 1 Grad. Die Levitationshöhe des Werkstückes konnte mit 0,12 mm gemessen werden. Bei den dargestellten Versuchseinstellungen wurden eine Tragkraft des Luftlagers von 12 N und eine Steifigkeit von 1,8 N/ $\mu\text{m}$  festgestellt. Diese Werte stimmen mit den Ergebnissen aus Kapitel 5 überein. Das Transport-Flow-Pipe-System bestätigt demnach die Messwerte dieser Versuchsreihe.

### **Nachweis 2: Verhältnis des Luftein-zu-Luftauströmvolumens**

Durch eine Steuerungssoftware und präzisen Reglern konnten die Druckeinstellungen hinsichtlich Tragkraft, Steifigkeit, Dämpfung und Durchfluss anhand der Ausführungen aus Kapitel 5 optimiert werden. Nach Einstellung eines optimalen und störungsfreien Levitationszustandes des Werkstückes lagen an den durchflussüberwachten Ein- und Ausströmöffnungen der Transportkammer die auf Abbildung 7.6 dargestellten Messwerte [L/min] vor. Diese stellen den an den Leitungen gemessenen Luftdurchfluss dar. Das Einströmvolumen entsprach exakt dem Ausströmvolumen von 34,1 L/min. Dieses ist ein Hauptmerkmal für den Funktionsnachweis des Transport-Flow-Pipe-Verfahrens. Die Luft wird in einem Kreislauf durch das Gehäuse geführt. Durch das ausgeglichene sowie geregelte Strömungsverhältnis bleibt ein konstanter Kammerdruck erhalten, der auch als leichter Unterdruck eingestellt werden kann.

### Nachweis 3: Die Führung der Luftströmungen im Gehäuse

Neben dem übereinstimmenden Strömungsverhältnis des gesamten Luftvolumens ist eine ausgeglichene Strömungsverteilung von großer Bedeutung für den Nachweis einer kontrollierbaren Levitationsvorrichtung. Die geführten Strömungen müssen so im Gehäuse verteilt werden, dass ein berührungsloser und störungsfreier Transport von Werkstücken gewährleistet ist. Dieser Nachweis wird im Folgenden anhand von Abbildung 7.6 geführt. Am Auslass A1 wurde ein Durchfluss von 8 L/min Druckluft gemessen. Die angrenzende Transportschiene E1 verursacht ein einströmendes Volumen von 17,9 L/min. Die Differenz von 9,9 L/min müsste demnach durch Luftauslass A2 wieder abfließen, um keine unkontrollierten Strömungen im Gehäuse zu verursachen. Denn einströmende Druckluft sollte sich durch gezielte Strömungen zu den benachbarten Ausgängen wieder abbauen und sich somit nicht unkontrolliert verteilen (Abbildung 7.6, Strömungspfeile). Die Messwerte bestätigen in der Praxis die theoretischen Vorgaben. Bei Luftauslass A2 strömen insgesamt 17,5 L/min Druckluft wieder aus dem Transportgehäuse. Die restlichen 7,6 L/min (17,5 L/min abzüglich der 9,9 L/min aus E1) dieses Volumens müssten dementsprechend aus Transportschiene E2 gekommen sein. Diese verursacht ein Gesamtvolumen von 14,5 L/min Druckluft. Die Differenz von 6,9 L/min sollte somit an Luftauslass A3 wieder abgebaut werden. Dieser weist einen Messwert von 8,1 L/min transportiertem Luftvolumen auf. Die restlichen 1,2 L/min Druckluft strömen diesem aus der seitlichen Führungsschiene E3 zu. Diese benötigt insgesamt 1,7 L/min zur Kompensation der lateralen Hangabtriebskraft des Werkstückes. Somit verbleibt ein Restluftvolumen von 0,5 L/min im System. Dieses entspricht dem Messwert der letzten Ausströmöffnung A4 und wird

somit an dieser Stelle aus dem Transportgehäuse geführt. Dadurch ist der Nachweis erbracht, dass beim Transport-Flow-Pipe-Verfahren die Werkstücke nicht alleine durch das geregelte Gesamtluftdruckverhältnis, sondern auch durch Kontrolle der einzelnen Luftströmungen berührungslos und ohne Störungen transportiert werden.

### **Nachweis 4: Kontrolle der Qualitätsanforderungen durch Dauerversuche**

Durch Kamera- und Mikroskopkontrollen konnten nach mehreren Dauerversuchen keine Beschädigungen oder Verunreinigungen an den Glasobjektträgern gemäß den Qualitätsanforderungen festgestellt werden. Ein vollständiger Nachweis der Funktionserfüllung des Transport-Flow-Pipe-Verfahrens ist somit am vorgestellten Versuchsstand geführt und abgeschlossen worden. Es entspricht den Anforderungen an die Handhabung von oberflächensensitiven Glasobjektträgern.

### **7.3 Produktion von Glasobjektträgern**

Die derzeitige Produktion von oberflächensensitiven Glasobjektträgern ist in Kapitel 1 ausführlich anhand von Abbildung 1.2 beschrieben worden.

Durch die Entwicklung des Transport-Flow-Pipe-Verfahrens, in Kombination mit den vorgestellten berührungslosen und automatisierbaren Produktionsprozessen, beispielsweise die digitale Drucktechnik und eine durch Kamerasysteme unterstützte Qualitätskontrolle, könnte die bisher größtenteils manuelle Produktion nun hauptsächlich automatisiert durchgeführt werden.

## 7 Konzeption und Umsetzung des Transport-Flow-Pipe-Verfahrens

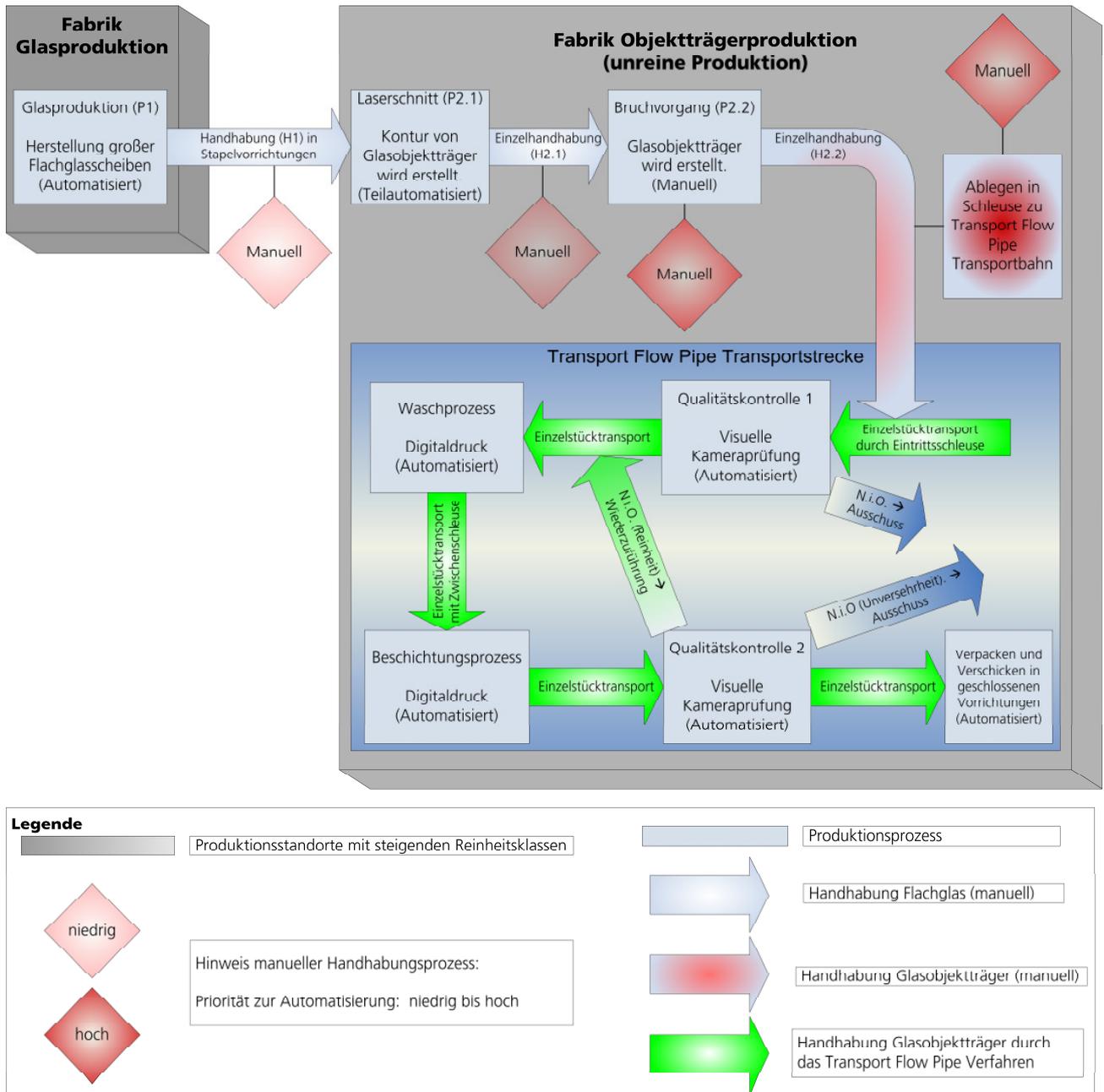


Abbildung 7.7 Mögliche automatisierte Glasobjektträgerproduktion mithilfe des Transport-Flow-Pipe-Verfahrens sowie innovativen Fertigungsprozessen

Dieses scheiterte bislang unter anderem an einer schonenden Handhabungsmethode für die Glasobjektträger. Nun ist es möglich, die Produktion grundlegend zu verändern und damit viele Vorteile zu schaffen. Diese werden im Folgenden anhand Abbildung 7.7 dargestellt.

## 7 Konzeption und Umsetzung des Transport-Flow-Pipe-Verfahrens

---

Bereits nach der Herstellung der Glasobjektträger aus großen Flachglasscheiben (P2.2) können diese manuell der Transportstrecke einzeln zugeführt werden (H2.2). Durch eine Schleuse gelangen sie danach automatisiert und vollständig berührungslos in den geschlossenen Schutzbereich. Die Vorrichtung transportiert die Werkstücke in einer gleichmäßigen Geschwindigkeit von ungefähr 100 mm / Sek. und einer Taktzeit von 2 Sekunden entlang der Produktionsstrecke. Die kontaktfreien Prozesse bearbeiten diese während des Transportierens im Single-Pass-Modus ohne Verzögerungen. Bei der letzten Qualitätskontrolle werden verunreinigte Glasobjektträger dem Produktionsablauf vor dem Reinigungsprozess erneut zugeführt. Nur mechanisch beschädigte Werkstücke werden automatisch aussortiert.

Durch das Transport-Flow-Pipe-Verfahren ist es somit gelungen, die vielen manuellen Handhabungsvorgänge zwischen den einzelnen Prozessen zu automatisieren und durch ein einziges Transportsystem zu ersetzen. Der bislang als Produktionshilfe eingesetzte Mensch, mit seinem Gefahrenpotenzial für Beschädigungen und Verunreinigungen der Glasobjektträger, könnte dadurch zukünftig für qualifiziertere Aufgaben, beispielsweise der Prozessüberwachung, eingesetzt werden. Durch das eigene Schutzsystem kann die Produktion in normaler Fabrikumgebung stattfinden. Dieses spart logistischen Aufwand, Betriebskosten und ermöglicht freie Kapazitäten der kostenintensiven Reinräume. Zusätzlich würden für das produzierende Personal bessere Arbeitsbedingungen außerhalb der schutzanzugspflichtigen Bereiche entstehen.

### 7.4 Bauelemente und Werkstücke anderer Produktionen

In der Mikromontage und Mikrosystemtechnik sind häufig flache oder zylinderförmige Bauteile während der Produktion zu handhaben. Aber auch regelmäßige und unregelmäßige Formteile werden immer zahlreicher und müssen zukünftig ebenfalls schonend gehandhabt werden. Neue Entwicklungen in der Bio- und Medizintechnik lassen die Variantenvielfalt hinsichtlich der Form der Produkte auch in dieser Branche stetig ansteigen. Einen Überblick über Formen und Häufigkeiten von Werkstücken in der Mikrosystemtechnik gibt nachfolgende Tabelle.

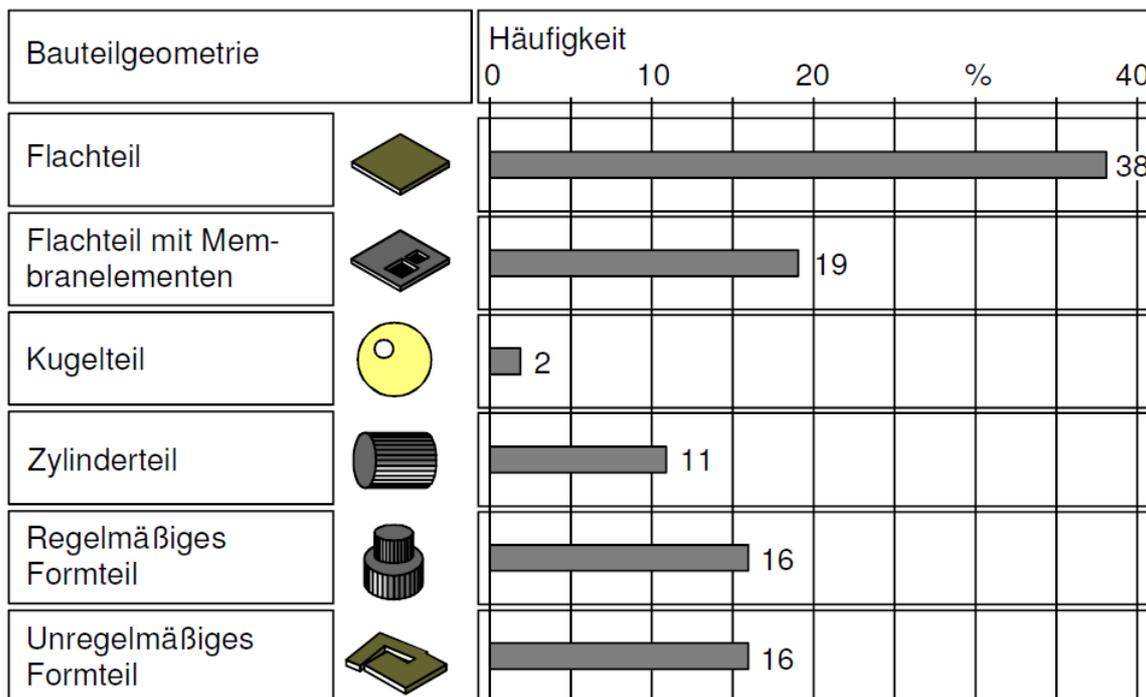


Abbildung 7.8 Teilespektrum in der Mikrosystemtechnik (Bark 1998)

Speziell für Flachteile mit oder ohne zusätzlichen Elementen, wie einer Membran, eignet sich das Transport-Flow-Pipe-Verfahren. Diese machen aber nur noch knapp die Hälfte des Teilespektrums heutiger Mikromontageprozesse

## 7 Konzeption und Umsetzung des Transport-Flow-Pipe-Verfahrens

aus. In der Bio- und Medizintechnik ist der Trend zu unregelmäßigen Werkstückformen ebenfalls zu beobachten. Formteile aller Art (Zylinder, Wattestäbchen) oder formlabile, sehr dünne Werkstücke (etwa Wafer) werden immer häufiger produziert.

Auch hier bietet sich der Einsatz des entwickelten Verfahrens an. Durch die schienenartigen Transport- und Führungsflächen kann der Aufbau fast beliebig variiert und dem Bauteil angepasst werden. So können auch zylindrische Teile (Abbildung 7.9, links) durch eine Formveränderung der Luftein- und Luftausströmöffnungen in einer geschlossenen Schutzhülle transportiert und bearbeitet werden.

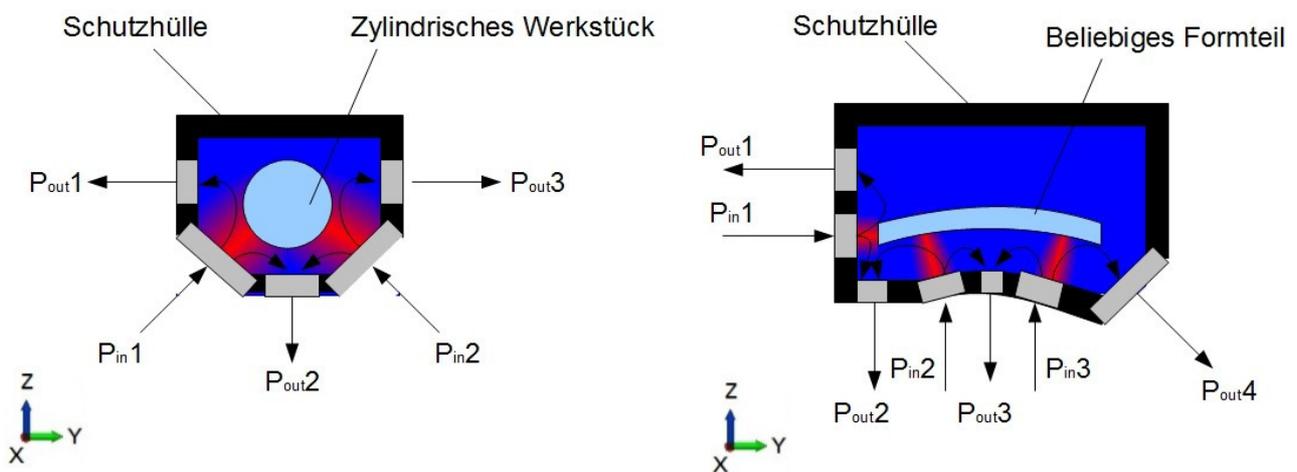


Abbildung 7.9 Werkstücke unterschiedlicher Form transportiert durch das Transport-Flow-Pipe-Verfahren

Nach dem gleichen Prinzip kann das Verfahren für viele unterschiedliche Formteile angepasst werden. Beispielsweise können die Transport- und Führungsschienen zur besseren Formanpassung schräg positioniert werden (Abbildung 7.9, rechts). Zur Handhabung von formlabilen Werkstücken besteht

## 7 Konzeption und Umsetzung des Transport-Flow-Pipe-Verfahrens

die Möglichkeit, zusätzliche Lufteinströmöffnungen (Abbildung 7.10,  $P_{in3}$ ) zur Formstabilität zu installieren.

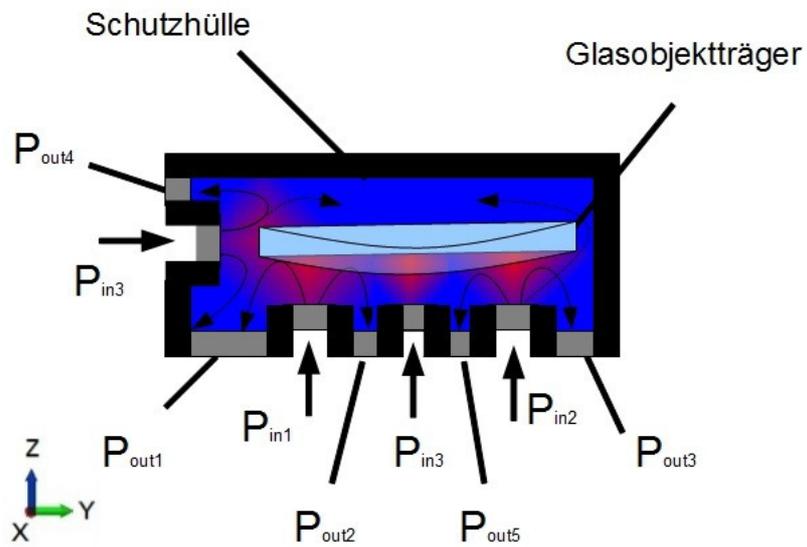


Abbildung 7.10 Formlabile Werkstücke transportiert im Transport-Flow-Pipe-Verfahren

### Kapitel 8

#### Zusammenfassung und Fazit

Das abschließende Kapitel beinhaltet die Zusammenfassung dieser Arbeit. Es gibt einen Überblick, beginnend bei der Ausgangssituation bis hin zur Entwicklung sowie Validierung des Transport-Flow-Pipe-Verfahrens und seinen Anwendungsmöglichkeiten. Anschließend wird die Entwicklung zur Handhabung empfindlicher Werkstücke sowohl in technischer als auch wirtschaftlicher Hinsicht diskutiert und bewertet. Technologiegrenzen und zukünftiges Entwicklungspotenzial werden aufgezeigt.

#### 8.1 Zusammenfassung

##### Ausgangssituation

Deutschland befindet sich neben den USA in einer Vorreiterrolle für technische Entwicklungen. Die Branchen der Biotechnologie und Medizintechnik erleben durch diesen Fortschritt zurzeit einen rasanten Wandel. Die technische Unterstützung im medizinischen Alltag steht im Mittelpunkt aktueller Forschungsarbeiten. Ständig befinden sich neue Produkte auf dem Weg vom Labor zur Marktreife, wie etwa molekulare Diagnostikchips (Biochips, Biosensoren), neue Analyseverfahren (etwa für Zellkulturen) oder Prozesse (wie funktionale Oberflächenbeschichtungen) (Kapitel 1).

Die individualisierte Krebstherapie ist ein Beispiel solcher Entwicklungen. Trotz großer Fortschritte in der Behandlung von Krebszellen versagen Therapien oder verursachen häufig starke Nebenwirkungen bei den Patienten. Um eine Therapie optimal auf den einzelnen Patienten abzustimmen, kann mithilfe von sogenannten Biomarkern, das sind beispielsweise messbare Indikatoren für Krankheitsbilder, jedem Patienten eine individuelle Therapieform zugeordnet werden. Auf oberflächenfunktionalisierten Glasobjektträgern basierende Biochips, auch Mikroarrays genannt, sind eine vielversprechende Methode zur Auswertung entwickelter Biomarker. Sie bilden sozusagen das Messverfahren. Weitere Anwendungsbeispiele der Biochip-Technologie auf Basis von Glasobjektträgern finden sich in der Auswertung von Signalproteinen zu Melanomen, Leukämie, Brust-, Lungen- oder Eierstockkrebs (Kapitel 1).

### **Problemstellung**

Um die technischen Hilfen im Bereich der Bio-/Medizintechnik nutzen zu können, ist es zwingend erforderlich, dass die oberflächenfunktionalisierten Glasobjektträger von sehr hoher Qualität sind. Diese besitzen daher während und nach der Produktion folgende Anforderungen und Merkmale an eine Handhabungstechnologie:

Sie sollten frei von Farbverfälschungen und hochtransparent sein (Reinheit). Zusätzlich ist eine sehr planare und homogene Oberfläche erforderlich (Unversehrtheit). Um diese Qualität zu erreichen, findet die Herstellung größtenteils in Reinräumen statt (Abbildung 1.2). Selbst minimale Beschädigungen oder Verunreinigungen können fatale Folgen haben. Sie führen zu einem schlechten Signal-/Rauschverhältnis und somit im schlimmsten Fall zu

## 8 Zusammenfassung und Fazit

---

falschen Erkenntnissen und Therapieformen. Häufige Fehler sind Partikelkontamination durch Fingerabdrücke (Abbildung 2.1) oder mechanische Beschädigungen der Seitenkanten (Abbildung 2.2). Als Kennziffer ist zurzeit eine Erkennungsgenauigkeit von Unreinheiten und Beschädigungen im Bereich von 1-2  $\mu\text{m}$  während der Qualitätskontrolle ausschlaggebend (Kapitel 2).

Zusätzlich steigen durch den bio-/medizintechnischen Fortschritt die Variantenvielfalt der Glasobjektträger sowie deren benötigte Stückzahlen stetig an. Die heutige Produktion stößt dabei schnell an ihre Grenzen. Denn manuelle Arbeitsabläufe besitzen derzeit einen großen Anteil an den Herstellungsprozessen und Handhabungsaufgaben. Der Mensch ist ein entscheidender Faktor bei der Herstellung von funktionalisierten Glasobjektträgern. Ohne sein Einwirken ist die Handhabung und dadurch die Produktion nicht möglich. Allerdings kann der Mensch sowohl bei manuellen Prozessen als auch bei der Handhabung, durch anstrengende und monotone Arbeitsabläufe beispielsweise, unter Zeitdruck Fehler verursachen. Die Folgen sind Oberflächenkontaminationen durch den Menschen selbst verursachte Partikel oder durch Partikelverschleppung. Außerdem treten häufig Beschädigungen wie Abplatzer oder Mikrorisse bei den nicht reproduzierbaren, manuellen Handhabungsvorgängen auf (Kapitel 1).

Zusätzlich ist der Mensch höheren Taktzeiten zur Steigerung der Produktionskapazitäten nicht gewachsen. Die manuelle Produktion im Reinraum ist für den stetig steigenden Durchsatz somit weder effizient noch zuverlässig möglich. Um den ansteigenden Stückzahlen und der hohen Variantenvielfalt unter den gegebenen Qualitätsanforderungen gerecht zu werden, sind vollautomatisierte Prozesse und Handhabungsvorrichtungen erforderlich. Diese

sollen den Menschen als Teil des Herstellungsprozesses ersetzen, um ihn in der Folge mit qualifizierteren Aufgaben zu betrauen (Kapitel 1).

### **Aufgabenstellung und Zielsetzung**

Das Ziel dieser Arbeit war die Entwicklung eines automatisierbaren Verfahrens zur Handhabung oberflächensensitiver Glasobjektträger. Zur Formulierung der daraus resultierenden Aufgabenstellung wurde zunächst der Begriff Handhabung anhand bestehender VDI-Richtlinien definiert. Dabei wurden zwei grundlegende Methoden der Handhabung verglichen und mit ihren Vor- und Nachteilen gegeneinander abgegrenzt. Das zu entwickelnde Verfahren konnte daraufhin auf eine Greif- oder Transportvorrichtung eingeschränkt werden (Kapitel 3). Anschließend wurden bei der Analyse bekannter Handhabungstechnologien diese Methoden in den Vordergrund gestellt. Es wurden Verfahren aus den Bereichen der manuellen, taktilen und berührungslosen Handhabung betrachtet. Bei den berührungslosen Prinzipien konnten zusätzlich aerostatische Verfahren und Ultraschallsysteme unterschieden werden. Es wurde festgestellt, dass derzeit keine Handhabungsvorrichtung während der Produktion den Anforderungen an Reinheit und Unversehrt entspricht. Nach einer Bewertung der verschiedenen Verfahren konnte durch eine Analyse der jeweiligen Vor- und Nachteile die präzise Aufgabenstellung formuliert werden:

Es sollte ein vollautomatisierbares, berührungsloses und auf aerostatischen Technologien basierendes Transportsystem entwickelt werden. Dieses sollte reproduzierbar sein und, unter Beachtung der Anforderungen an Reinheit und Unversehrtheit, die Handhabung oberflächensensitiver Glasobjektträger

## 8 Zusammenfassung und Fazit

---

zwischen und während den einzelnen Prozessschritten ermöglichen. Die schnellen Taktzeiten sowie die hohe Reproduzierbarkeit von Transportverfahren sollten für eine Effizienzsteigerung der Produktion genutzt werden. Dazu sollte der Luftverbrauch gegenüber bekannten aerostatischen Technologien hinsichtlich der Betriebskosten optimiert werden (Kapitel 4). Die erschwerten Herstellungsbedingungen außerhalb und innerhalb von Reinräumen sowie die Möglichkeit, flexibel und mit einem hohen Durchsatz zu fertigen, sollten dabei zusätzlich Beachtung finden. Angestrebt sind bei einer automatisierten Anlage 3 Millionen Stück pro Jahr, was bei 250 Produktionstagen und 10 Stunden Fertigung pro Tag 3 Sekunden pro Glasobjektträger ergibt.

### Entwicklung des Transport-Flow-Pipe-Verfahrens

Das Hauptaugenmerk bei der Entwicklung eines berührungslosen Transportsystems lag darauf, dass alle, das Werkstück beeinflussende Kräfte ohne mechanischen Kontakt übertragen werden. Um dabei eine berührungslose Kontrolle über das Werkstück zu erlangen, sind zwei grundlegende Prinzipien nötig: Die Kompensation der meist vertikal auf das Werkstück wirkenden Gewichtskraft (Kapitel 5) und das Erzeugen lateraler Zentrierkräfte, um freien Bewegungen im Raum entgegenzuwirken (Kapitel 6).

Dazu wurden zunächst die Eigenschaften und Technologien zur Erzeugung von aerostatischen Lagern analysiert und bewertet. Es wurde festgestellt, dass Luftlager aus porösen Sintermaterialien in den Eigenschaften Steifigkeit, Dämpfung, Tragkraft und Luftverbrauch vergleichbaren Düsenluftlagern überlegen sind. Eine anschließende Versuchsreihe mit unterschiedlichen Sintermaterialien zeigte, dass die Wahl des porösen Materials zusätzlich

entscheidenden Einfluss auf die Eigenschaften eines aerostatischen Lagers besitzt. Der Luftdurchfluss [L/min] entspricht demnach einem linearen Verhältnis zwischen der Materialbeschaffenheit [Porengröße] und dem Betriebsluftdruck [bar]. Sowohl der Luftdurchfluss als auch der Betriebsluftdruck besitzen dabei unterschiedliche Einflüsse auf die Eigenschaften eines aerostatischen Lagers. Sie müssen in Bezug auf den Werkstücktransport in ein optimiertes Verhältnis zueinander gebracht werden. Das Sintermaterial sollte nach seiner Beschaffenheit (Porengröße) dementsprechend gewählt werden. Diese Faktoren hängen aber auch primär von der Form und dem spezifischen Gewicht des Werkstückes ab (Kapitel 5).

Im Anschluss an diese Analysen wurden verschiedene Vorrichtungformen zur Kompensation der vertikalen Gewichtskraft untersucht und bewertet. Es konnte festgestellt werden, dass auch die Wahl der Aufbauform entscheidenden Einfluss auf die Eigenschaften des aerostatischen Lagers besitzt. Bei einer flächigen Ausführung wird ein Werkstück durch ein aerostatisches Lager in einen Levitationszustand gebracht. Die Vorrichtungsfläche wird dabei der Größe des Werkstückes angepasst (Abbildung 5.18). Als erfolgversprechendste Wahl stellte sich aber eine schienenförmige Variante als Levitationsvorrichtung für Glasobjektträger zur Kompensation der Gewichtskraft dar. Dabei wird dieser durch zwei schmale, linienförmige aerostatische Lager entlang seiner Randbereiche in einen Schwebezustand versetzt. Sie werden dabei symmetrisch um den Werkstückschwerpunkt angeordnet (Abbildung 5.23). Diese Variante ist einer flächigen Ausführung in den Eigenschaften Steifigkeit und Dämpfung weit überlegen. Zudem senkt sie den Druckluftverbrauch um ungefähr 60 % auf den niedrigsten Verbrauchswert der gesamten Versuchsreihe. Die schienenartige Form besitzt zusätzlich den Vorteil, dass der Platz zwischen den beiden

## 8 Zusammenfassung und Fazit

---

Transportschienen für andere Vorrichtungen zur Bearbeitung oder Detektion der Glasobjektträger genutzt werden kann (Kapitel 5).

Befindet sich ein Werkstück durch eine Vorrichtung in einem Levitationszustand, besitzt es drei Freiheitsgrade. Es kann sich lateral in einer Ebene ( $X, Y$ ) bewegen oder drehen ( $\gamma$ ) (Abbildung 6.1). Im nächsten Entwicklungsschritt wurde ein Verfahren entwickelt, das eine berührungslose Krafteinwirkung und somit eine Kontrolle über alle Bewegungsrichtungen des Glasobjektträgers bewirkt. Dieses konnte durch eine Versuchsreihe zur Kompensation der lateralen Auslenkkräfte erreicht werden. Das Transport-Flow-Pipe-Verfahren basiert auf dem zur Kompensation der Gewichtskraft entwickelten Schienensystem (Abbildung 6.20). Um die Bewegungsrichtungen des schwebenden Werkstückes einzugrenzen, wird es mittels einer Druckdifferenz der beiden Transportschienen in einem Winkel von ungefähr 1 Grad transversal gegen die Querachse geneigt. Dadurch entsteht eine Hangabtriebskraft und das Werkstück bewegt sich in eine vorgegebene, laterale Richtung. Dieser Bewegung wirkt ein weiteres aerostatisches Lager (Führungsschiene), das auf die Seitenkante des Glasobjektträgers ausgerichtet ist, entgegen und gleicht die Hangabtriebskraft aus. Das Werkstück befindet sich dadurch in einer Ruheposition. Es kann nun per Luftströmungen auf seine Oberflächen entlang der Transportrichtung kontrolliert bewegt werden (Abbildung 6.21). Durch eine geschlossene Hülle um das Transportsystem werden das Werkstück sowie das Verfahren vor sämtlichen äußeren Einflüssen geschützt. Die Schutzhülle verhindert das Eindringen von Staub oder Partikeln und ermöglicht somit eine Produktion außerhalb von Reinraumumgebungen. Ein weiterer Vorteil der Schutzhülle ist, dass äußere Störfaktoren, beispielweise Luftströmungen, nun keinen negativen Einfluss mehr auf das Transportverhalten des Systems ausüben können. Das durch die

Transport- und Führungsschienen in das geschlossene System eindringende Transportmedium wird gezielt durch Vakuumerzeuger wieder ausgeleitet. Die Luftströmungen werden durch eine definierte Anordnung der Luftein- und Luftausströmöffnungen so beeinflusst, dass dadurch eine berührungslose Kontrolle über das Werkstück gegeben ist. Das Strömungsverhältnis wird derart kontrolliert, dass oberhalb des Werkstückes ein Regeldruckbereich entsteht. In diesem kann auch eine leichte Unterdruckatmosphäre eingestellt werden. Zum weiteren Schutz der Werkstücke kann, durch den geschlossenen Regelkreis, als Transportmedium neben Luft auch ein Schutzgas, wie beispielsweise Stickstoff, verwendet werden (Kapitel 6).

### **Validierung der Ergebnisse durch den Versuchsstand Transport-Flow-Pipe-System**

Zur Validierung des entwickelten Verfahrens wurde ein neuer Versuchsstand aufgebaut, das Transport-Flow-Pipe-System (Abbildung 7.1). Anhand präziser Druck- und Durchflusssensoren wurde der Nachweis eines automatisier- und reproduzierbaren Verfahrens erbracht (Kapitel 7). Die Glasobjektträger werden bei einstellbaren Luftdruck- sowie kontrollierten Strömungsverhältnissen (Abbildung 7.6) vollständig berührungslos transportiert, beschleunigt, verzögert und positioniert (Abbildung 7.3 – 7.5). In der Schutzhülle können sie während des Transportes zusätzlich bearbeitet werden. So können beispielsweise die Produktionsprozesse Reinigung, Beschichtung und Qualitätskontrolle durch digitale Drucktechnik und durch Kamerasysteme kontaktlos erfolgen. Das Transport-Flow-Pipe-Verfahren bietet somit die Möglichkeit, in Kombination mit flexiblen und kontaktlosen Prozessen, die Produktion von oberflächensensitiven

Werkstücken zu automatisieren (Abbildung 7.7). Außerdem können durch den schienenförmigen und anpassungsfähigen Aufbau auch Werkstücke und Bauteile anderer Formen und Ausprägungen transportiert werden. Dieses können unregelmäßige oder sogar formlabile Bauteile sein. Die Luftein- und Luftausströmöffnungen müssen dann jedoch dem Bauteil entsprechend angeordnet und angepasst werden (Abbildung 7.9 und 7.10).

### 8.2 Bewertung und Ausblick

#### Technische Bewertung und Ausblick

Nach Formulierung der Zielsetzung „Handhabung von oberflächensensitiven Glasobjektträgern“ und der Analyse bekannter Handhabungstechnologien wurde folgende technische Aufgabenstellung definiert:

*„Entwicklung eines vollautomatisierbaren, berührungslosen und auf aerostatischen Technologien basierenden Transportsystems. Dieses soll reproduzierbar sein und, unter Beachtung der Anforderungen an Reinheit und Unversehrtheit, die Handhabung oberflächensensitiver Glasobjektträger zwischen und während den einzelnen Prozessschritten ermöglichen. Die erschwerten Herstellungsbedingungen außerhalb und innerhalb von Reinräumen sowie die Möglichkeit, flexibel und mit einem hohen Durchsatz zu fertigen, sollten dabei zusätzlich Beachtung finden“* (Kapitel 4).

Ein berührungsloses Handhabungssystem wurde in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 2860 (VDI 2860 1990) und den Erweiterungen von Höppner (Höppner 2002) wie folgt beschrieben:

*„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 ausschließlich und vollständig ohne mechanischen Kontakt übertragen werden“* (Kapitel 4).

Das zunächst für oberflächensensitive Glasobjektträger entwickelte Transport-Flow-Pipe-Verfahren entspricht dieser technischen Vorgabe. Ein Versuchsstand validiert und demonstriert die entwickelte Technologie. Durch den berührungslosen Transport werden die Glasobjektträger mit einem hohen Maß an Reinheit und Unversehrtheit einzeln und schnell durch die Produktion geleitet. Sie können direkt während des Transportes bearbeitet werden und müssen somit nicht mehr aufwendig und fehleranfällig den verschiedenen Prozessen durch manuelle Handhabung zugeführt werden. Durch die geschlossene Hülle werden zum einen das Werkstück und zum anderen das Verfahren vor äußeren Einflüssen geschützt. Sie verhindert das Eindringen von Staub oder Partikeln und ermöglicht die Produktion außerhalb von Reinraumumgebungen.

Für zukünftige Anwendungen bietet das Verfahren durch seine Flexibilität auch für Formteile verschiedener geometrischer Ausprägung und unterschiedlicher Produktionen aus technischer Sicht großes Potenzial. Um dies zu nutzen, sollte die neue Technologie weiterentwickelt sowie für andere Anwendungen validiert werden. Taktile, industrielle Transportsysteme besitzen Kurven, Ausschleusungen, Positionierungssysteme und Weichen. Die Entwicklung eines Greifsystems zum Drehen oder Be-/Entladen der Werkstücke nach diesem Verfahren ist eine weitere Aufgabe. Zusätzlich sollten die Verfahrensgrenzen

## 8 Zusammenfassung und Fazit

---

noch genauer spezifiziert werden. Dabei stehen die folgenden Fragen im Vordergrund der zukünftigen Entwicklungen:

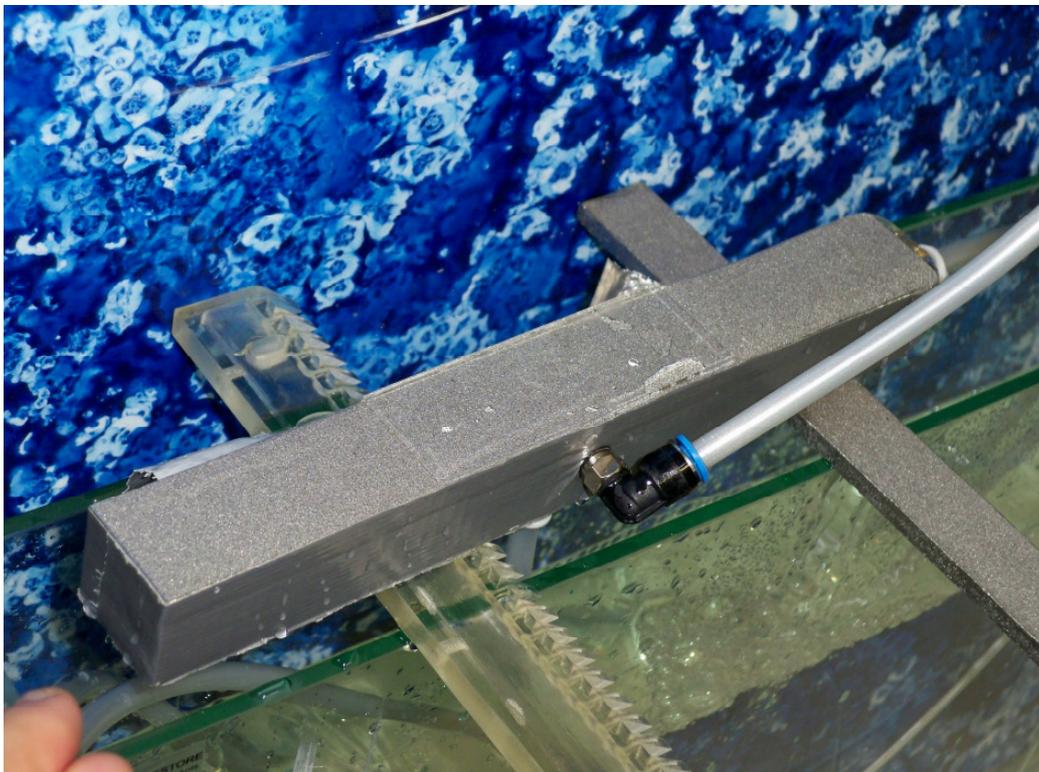
- Welche Geschwindigkeiten der Werkstücke sind möglich und kontrollierbar? Die bisherigen Versuche konzentrierten sich auf Geschwindigkeiten zwischen 100 mm und 200 mm pro Sekunde. Diese sind optimal für den Einsatz digitaler Druckprozesse.
- Welche Mindestanforderungen stellt das Verfahren an verschiedenste Werkstücke? Wie verhält sich die Bauteilgröße sowie die Dicke der Seitenkante in Bezug zur Kontrolle der lateralen Auslenkkräfte? Erste Versuche zeigten, dass auch eine Kontrolle über nur 0,1 mm dicke Seitenkanten möglich sein kann (Glasobjektträger haben eine Dicke von 1 mm). Dies ist jedoch abhängig von der Form und dem spezifischen Gewicht des Werkstückes.
- Mit welcher Präzision können Werkstücke, beispielsweise zum DNA-Spotting, positioniert werden? Können weitere Methoden entwickelt werden, um Werkstücke in Wartepositionen präziser berührungslos zu kontrollieren?

Auch der geschlossene Schutzraum bietet weitere Entwicklungsmöglichkeiten:

- Wie verhält sich der Transport von Werkstücken bei der Nutzung anderer Medien als Luft, beispielsweise Schutzgasen wie Stickstoff, in einem geschlossenen Kreislauf?
- Können Mikropartikel zur Beschichtung der Bauteiloberflächen oder zur Ionisierung von Werkstücken durch das Transportmedium im System

verwendet werden? Wie würde die Verteilung der Partikel im System und auf den Bauteiloberflächen aussehen?

- Können auch Flüssigkeiten, wie beispielsweise Wasser oder Lösungsmittel, als Transportmedium verwendet werden, um eine Reinigung oder Beschichtung auf diese Art in den Transport zu integrieren? Erste Versuche, einen Glasobjektträger über einen Wasserfilm gleiten zu lassen, zeigten erfolgversprechende Ergebnisse.



*Abbildung 8.1 Glasobjektträger gleitet auf Wasser als Transportmedium*

Abschließend ist festzuhalten, dass das entwickelte Transport-Flow-Pipe-Verfahren den technischen Anforderungen zur Handhabung oberflächen-sensitiver Glasobjektträger im Produktionsablauf entspricht. Es besitzt zusätzlich für zukünftige Aufgaben verschiedenster Art großes Entwicklungspotenzial.

### Wirtschaftliche Bewertung und Ausblick

Neben den technischen Anforderungen an ein Verfahren zur Handhabung oberflächensensitiver Glasobjektträger wurde in dieser Arbeit auch eine wirtschaftliche Aufgabenstellung definiert:

*„Die schnellen Taktzeiten und die hohe Reproduzierbarkeit von Transportverfahren sollen für eine Effizienzsteigerung der bisherigen Produktion genutzt werden. Der Luftverbrauch ist gegenüber bekannten aerostatischen Technologien hinsichtlich der Betriebskosten zu optimieren“* (Kapitel 4).

Neben den Investitionskosten sind die Betriebskosten sowie die Effizienz einer Produktionsanlage über einen bestimmten Zeitraum hinweg ein wichtiges Kriterium für den Einsatz einer neuen Technologie. Bei der Betrachtung der Investitionskosten ist bei der Fertigung kleiner Losgrößen mit einer hohen Variantenvielfalt ein manuelles Verfahren häufig im Vorteil gegenüber automatisierten Technologien. Diese Anlagen müssen hoch flexibel und dadurch sehr komplex ausgelegt werden. Produktionen mit sensiblem Prozessgut benötigen häufig auch kostenintensive und komplexe Technologien zur Automatisierung, beispielsweise in Form von berührungslosen Luftlager- oder Ultraschalltechnologien. Die höheren Investitionskosten müssen sich, während des Lebenszyklus einer Anlage, durch niedrigere Betriebskosten oder einer höheren Effizienz der automatisierten Lösung wieder ausgleichen, damit die Gesamtkosten reduziert werden. Aerostatische Verfahren besitzen meist einen Anschaffungskostenvorteil gegenüber vergleichbaren Ultraschallsystemen. Einen Vergleich über die Kosten verschiedener Verfahren und Systeme gibt Zimmermann in seiner Arbeit über „eine Methodik zur Gestaltung berührungsloser arbeitender Handhabungssysteme“ (Zimmermann 2011).

Bewertungskriterien für die Effizienz und somit den Ertrag einer Produktionseinrichtung sind der Durchsatz und die Fehlerhäufigkeit. Je schneller Werkstücke beschädigungslos produziert werden können, desto höher steigt auch der Ertrag. Angestrebt sind in der Produktion von Glasobjektträgern flexible Produktionsanlagen, die eine hohe Variantenvielfalt bieten, mit einer Taktzeit von maximal 3 Sekunden oder kürzer. Beim Transport-Flow-Pipe-System konnten schon Taktzeiten von 2 Sekunden pro Glasobjektträger erreicht werden. Weiteres Optimierungspotenzial war dabei zu erkennen. Wichtig für die Optimierung der Taktzeit sind, neben einer Erhöhung der tatsächlichen Transportgeschwindigkeit, die Sensorik und steuernde Aktorik. Es muss sichergestellt sein, dass die Werkstücke bei jeder Geschwindigkeit ohne Beschädigungen, beispielsweise durch gegenseitige Anschläge, über die Transportbahn geführt werden. Anderenfalls steigen parallel zum Durchsatz auch die Fehlerraten. Die Anzahl verunreinigter oder beschädigter Glasobjektträger kann durch das berührungslose Verfahren gegenüber der manuellen Handhabung deutlich reduziert werden. Zusätzlich können, mittels des neuen Verfahrens, verunreinigte Glasobjektträger der Produktionskette vor dem Reinigungsprozess erneut automatisiert zugeführt werden. Das rentierte sich durch die Verteilung der Produktionsstandorte auf verschiedene Reindräume aus logistischen Gründen bisher nicht. Sie wurden somit bisher als fehlerhafte Werkstücke aussortiert. Durch die Verringerung der Ausschussrate sowie einer höheren Taktgeschwindigkeit kann die Produktionseffizienz durch das Transport-Flow-Pipe-Verfahren deutlich gesteigert werden.

Neben den Kosten für Wartung, Reparatur, Energie und Bedienpersonal ist bei aerostatischen Verfahren zur Handhabung von Werkstücken das Transportmedium ein wichtiger Kostenfaktor. Er stellt einen der Nachteile dieser

## 8 Zusammenfassung und Fazit

---

Technologie dar. Der Vorteil geringerer Investitionskosten gegenüber vergleichbaren Ultraschallverfahren wurde dadurch bisher schon nach kurzer Lebenszykluszeit wieder aufgehoben. Durch das Transport-Flow-Pipe-Verfahren wird der Luftdurchfluss aber um die Hälfte, auf ungefähr 34 L/min für Glasobjektträger, gegenüber vergleichbaren Luftkissen- oder Bernoulligreifern reduziert. Dadurch werden die Betriebskosten merklich gesenkt. Außerdem können im gleichen Zeitraum deutlich mehr Werkstücke verarbeitet werden. Dies bewirkt zusätzlich eine Steigerung der Produktionseffizienz.

Gegenüber der Produktion von Glasobjektträgern im Reinraum ergeben sich durch das abgeschlossene Schutzsystem weitere Möglichkeiten zur Kostenreduzierung. Es schützt das Werkstück vor äußeren Einflüssen und kann somit in normaler Fabrikumgebung betrieben werden. Unerwünschte Partikel, die in das innere Transportgehäuse gelangt sind oder die durch Absplitterung erzeugt wurden, werden durch den Luftstrom über die Ausgänge abtransportiert oder auf dem porösen Material festgesaugt. Durch Abnehmen des Deckels kann das System dann leicht gereinigt werden.

Abschließend kann zur wirtschaftlichen Betrachtung des Transport-Flow-Pipe-Verfahrens festgehalten werden: Wenn die Vorteile eines berührungslosen Verfahrens zur Qualitätssteigerung und Reduzierung von Ausbeuteverlusten genutzt werden können, schafft diese Art der Handhabung Kostenvorteile gegenüber manuellen oder taktile automatisierten Verfahren. Bei der Produktion oberflächensensitiver Glasobjektträger kann das Transport-Flow-Pipe-Verfahren, neben einer steigenden Produktionsqualität durch schonende Handhabung, Kostenvorteile durch eine schnellere Taktzeit sowie geringere Betriebskosten durch Einsparung von Reinraumkapazitäten erreichen.

## Literaturverzeichnis

Arnold 1998

D. Arnold:  
Materialflusslehre.  
2. Auflage  
Braunschweig: Vieweg, 1998

Bark 1998

K.-B. Bark:  
Adhäsives Greifen von kleinen Bauteilen mittels niedrigviskoser  
Flüssigkeiten.  
Berlin: Springer, 1998  
(IPA-IAO Forschung und Praxis, Nr. 286)  
Stuttgart, Univ., Diss., 1998

Bartz 1993

W. J. Bartz:  
Luftlagerungen: Grundlagen und Anwendungen.  
Ehningen bei Böbingen: expert, 1993

Binder 2003

A. Binder; G. Kroupa:  
Novel Technology for handling very thin wafers.  
USA: Solid State Technology, 2003.

Christen 1996

G. Christen; H. Pfefferkorn:  
Greifer mit nachgiebiger Struktur für die Mikromontage.  
In: 41. Internationales wissenschaftliches Kolloquium:  
Wandel im Maschinenbau durch Feinwerktechnik und  
Mikrosystemtechnik: Band 2, 23.-26. Sep. 1996.  
Ilmenau: Technische Universität ,1996, S. 120-125.

Espina 2011

V. Espina; C.Müller:  
Unterwegs zur individuellen Krebstherapie.  
SchottSolutions, No.1/2011, S.18-21  
<http://www.schott.de> (März, 2011)

Fischer 1997

R. Fischer:  
Entwicklung von Greif- und Spannvorrichtungen für die  
automatisierte Montage von Mikrobauteilen.  
In: Fortschritts-Bericht VDI Reihe 1 (1997), Nr. 292.  
Düsseldorf: VDI-Verlag, 1997.

Gerke 1991

M. Gerke:  
Auslegung von ebenen und zylindrischen aerostatischen Lagern bei  
stationärem Betrieb.  
München, TU, Diss., 1991.

Gommel 2005

U. Gommel:  
Reinraumtaugliche Werkstoffe.  
In: wt Werkstattstechnik online (2005), Nr.3, S.150-155.  
Düsseldorf: VDI-Springer Verlag, 2005.

Grutzeck 1996

H. Grutzeck; L. Kiesewetter:  
Greifen mit Kapillarkräften.  
In: 41. Internationales wissenschaftliches Kolloquium:  
Wandel im Maschinenbau durch Feinwerktechnik und  
Mikrosystemtechnik: Band 2, 23.-26. Sep. 1996.  
Ilmenau: Technische Universität ,1996.

Grutzeck 2000

H. Grutzeck:  
Fluidisches Greifen in der Mikrosystemtechnik.  
In: Fortschritts-Bericht VDI Reihe 9 (2000), Nr. 314.  
Düsseldorf: VDI-Verlag, 2000.

Hering 1992

E.Hering:  
Physik für Ingenieure.  
4.Auflage  
Düsseldorf: VDI-Verlag, 1992.

Hesse 1991

S. Hesse:  
Greifer-Praxis: Greifer in der Handhabungstechnik.  
1.Auflage  
Würzburg: Vogel, 1991.

Hesselbach 1996

J. Hesselbach; R. Pittschellis:  
Miniaturgreifer für die Mikromontage.  
In: 41. Internationales wissenschaftliches Kolloquium:  
Wandel im Maschinenbau durch Feinwerktechnik und  
Mikrosystemtechnik: Band 1. 23.-26. Sep. 1996.  
Ilmenau: Technische Universität 1996, S. 115–120.

Hesselbach 2001

J.Hesselbach; S.Büttgenbach; J.Wrege; S.Bütefisch; C.Graf:  
Electrostatic microgripper and magazines for microassembly tasks.  
In: SPIE Proceedings, 4568  
Bellingham, WA, U.S.A.: SPIE, 2001

Hopfner 1991

J. Hopfner:  
Fertigung von aerostatischen Lagern aus poröser Sinterbronze.  
München, TU, Diss., 1991.

Höppner 1999

J. Höppner:  
Berührungslose Handhabung von Bauteilen in der Mikromontage.  
München: Herbert Utz, 1999.  
(iwb Seminarberichte, Nr. 44)  
München, TU, Diss., 1999.

Höppner 2000

J. Höppner; J. Zimmermann:  
Berührungslos mit Ultraschall.  
In: Die neue Fabrik – Produktion im Wandel (2002), S. 86-87.  
Landsberg: mi-Verlag, 2000.

Höppner 2002

J. Höppner:  
Verfahren zur berührungslose Handhabung mittels leistungsstarker  
Schallwandler  
München: Herbert Utz, 2002.  
(iwb Forschungsberichte, Nr. 146)  
München, TU, Diss., 2002

ISO 8255 2011

Norm ISO 8255-1:2011  
Microscopes - Cover glasses - Part 1: Dimensional tolerances,  
thickness and optical properties

ISO 8573-1 2010

Norm ISO 8573-1:2010  
Compressed air -- Part 1: Contaminants and purity classes

Langevin 1924

M.P. Langevin:  
Sondage et detection sousmarine par les ultrasons.  
Monaco: Rev.Hydrograph ,1924.

Lorenz 1999

B.-M. Lorenz:  
Aerodynamische Zuführtechnik.  
In: Fortschritts-Berichte (1999), VDI Reihe 2, Nr.524.  
Düsseldorf: VDI-Verlag, 1999.

Liotta 2011

L. Liotta:  
Unterwegs zur individuellen Krebstherapie.  
In: SchottSolutions No.1/2011, S. 19.  
<http://www.schott.de> (März, 2003)

Lubbadeh 2009

J. Lubbadeh:  
Forensische DNA-Analyse: Schwachstelle Wattestäbchen.  
In: SPIEGEL ONLINE - Wissenschaft (2009).  
<http://www.spiegel.de> (März, 2011)

Milberg 1989

J. Milberg:  
Untersuchungen zur automatischen Montage flächiger Bauteile.  
In: Zwischenbericht zum Forschungsvorhaben, DFG MI 234/16-1  
München: 1989.

Mujiderman 1966

E.A. Mujiderman:  
Spiral Groove Bearings. (1966)  
Delft, TU, Thesis PhD, 1966.

Nappi 1995

J.J. Nappi Jr.:  
Der Mensch als Kontaminationsquelle.  
In: Clean Room Primer. (1985)  
USA: Liberty Industry Inc., 1985.

Niklaus 1998

F. Niklaus:  
Entwicklung einer Vorrichtung zur berührungslosen Handhabung  
und Laminierung von Halbleiterfolien.  
München, TU, Diplomarbeit 97/42, 1998.

Oh 1998

H.-S. Oh:  
Elektrostatische Greifer für die Mikromontage.  
In: Fortschritts-Berichte, Meß-, Steuerungs- und Regelungstechnik,  
Reihe 8, Nr. 702.  
Düsseldorf: VDI-Verlag, 1998.

Oyrer 2005

H. Oyrer:

One at a time.

In: European Semiconductor 27 (2005), S.19–23

Petricoin 2011

E. Petricoin:

Unterwegs zur individuellen Krebstherapie.

In: SchottSolutions No.1/2011, S. 20.

<http://www.schott.de> (März, 2011)

Reinhart 2000

G. Reinhart:

Non-Contact Handling Using High-Intensity Ultrasonics.

In: Annals of the CIRP 49 (2000), S. 5-8.

Reinhart 2001

G. Reinhart; J. Zimmermann:

Berührungslose Handhabung durch Leistungs-Ultraschall.

In: Jahrbuch der Logistik 2002 (2002), S. 247-250.

Düsseldorf: Verlagsgruppe Handelsblatt, 2002

Reinhart 2010

G. Reinhart; T. Kirchmeier; M. Heinz:

Prozessverhalten leicht erlernt.

In: wt Werkstattstechnik online (2010), Ausgabe 11/12.

Düsseldorf: VDI-Springer Verlag, 2010.

Risse 2001

S. Risse:

Ein Beitrag zur Entwicklung eines doppelsphärischen Luftlagers aus Glaskeramik.

Jena, Universität, Diss., 2001.

Rybarczyk 2004

A. Rybarczyk:

Auslegung aktiver aerodynamischer Zuführverfahren.

Hannover, Universität, Diss., 2004.

Schilp 2006

M.Schilp:  
Auslegung und Gestaltung von Werkzeugen zum berührungslosen Greifen kleiner Bauteile in der Mikromontage.  
München: Utz Verlag, 2006.  
(iwb Forschungsberichte, Nr. 199)  
München, TU, Diss., 2006

Siemens 1999

Patentschrift DE 198 06 306 A 1 (1999)

Sinn 2007

H.-W. Sinn:  
Internationaler Vergleich der Arbeitskosten: Warum Deutschland keine starken Lohnerhöhungen verträgt.  
In: ifo Schnelldienst 60 (2007), Nr. 04, S. 54–59

Spath 1996

D. Spath:  
Automatisierte Montage von Mikrostrukturen.  
In: wt - Produktion und Management 86 (1996), S. 588-590.

Spiegel 2009

Ermittlerirrtum Heilbronner Phantom: Das hätte nicht passieren dürfen.  
In: SPIEGEL ONLINE - Panorama (2009).  
<http://www.spiegel.de> (März 2011)

Stadler 2005

P. Stadler:  
Biotechnologie-Boom in Deutschland - Vorreiter bei Entwicklung und Produktion.  
In: **D**eutsche **I**ndustrievereinigung **B**iotechnologie (DIB) (01.09.2005)  
Düsseldorf: Springer, 2005.

Step 2008

Biotechnologie: Boom-Industrie ohne Einsturzgefahr.(2008)  
<http://www.stepstone.de> (März, 2011)

Teichert 2011

A. Teichert; B. Bodry; A. Verl:  
Handhabung empfindlicher Werkstücke.  
In: wt - Werkstattstechnik online (2011), Nr. 10, S. 701-705.  
Düsseldorf: VDI-Springer Verlag, 2011.

VDI 2411 1970

Norm VDI-Richtlinie 2411:  
Begriffe und Erläuterungen im Förderwesen.  
Düsseldorf: VDI-Verlag 1970.

VDI 2860 1990

Norm VDI-Richtlinie 2860:  
Montage- und Handhabungstechnik: Handhabungsfunktionen.  
1. Auflage  
Berlin: Beuth, 1990.

Wiemer 1969

A. Wiemer:  
Luftlagerung.  
Berlin (DDR): VEB Verlag Technik, 1969.

Zäh 2004

M. Zäh; J. Zimmermann:  
Neue Produkte durch Mikrotechnologien – Anforderungen an die  
Montage und Logistik.  
In: 18. Deutscher Montagekongress München (2004)  
Landsberg: Moderne Industrie, 2004.

Zäh 2005

M. Zäh; J. Zimmermann; M. Franzkowiak; M. Harfensteller; A.  
Zitzmann:  
Kostenvorteil durch berührungslose Handhabung.  
In: Industrie Management 21 (2005), S. 29-32.  
Berlin: Gito, 2005.

Zimmermann 2011

J.L. Zimmermann:  
Eine Methodik zur Gestaltung berührungslos arbeitender  
Handhabungssysteme.  
München: Utz Verlag, 2011.  
(iwv Forschungsberichte, Nr. 246. )  
München, TU, Diss., 2011

Zöppig 1997

V. Zöppig; T. Gramsch; H. Pfefferkorn; G. Christen:  
Greifersysteme für die automatisierte Mikromontage.  
In: Proceedings Micro Engineering.  
Stuttgart: Stuttgarter Mess- und Kongressgesellschaft, 1997.

Zühlke 1997

D. Zühlke; R. Fischer; J. Hanks:  
Schrittweise in die automatisierte Mikromontage.  
In: F&M Feinwerktechnik-Mikrotechnik-Mikroelektronik 104 (1996),  
Nr. 9, S. 627 – 630.

Die technische Unterstützung im medizinischen Alltag steht im Mittelpunkt aktueller Forschungsarbeiten. Als Grundlage von mikroskopischen Untersuchungen werden oberflächenfunktionalisierte Glasobjektträger verwendet. Sie müssen dazu nach der Produktion hochrein und unversehrt sein. Das entwickelte Transport-Flow-Pipe-Verfahren zur Handhabung von empfindlichen Werkstücken entspricht dabei allen Anforderungen an die Produktion solcher Glasobjektträger.

ISBN 978-3-8396-0488-5



FRAUNHOFER VERLAG