

Verhalten von passiv betriebenen Sauggreifern unter der Krafteinwirkung von Kletterrobotern

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Universität Stuttgart zur Erlangung
der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Florian Simons
aus Stuttgart – Bad Cannstatt

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

Mitberichter: Prof. Dr. Karsten Berns

Tag der Einreichung: 30. September 2005

Tag der mündlichen Prüfung: 26. Juni 2006

IPA-IAO Forschung und Praxis

Berichte aus dem
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und
Automatisierung (IPA), Stuttgart,
Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und
Organisation (IAO), Stuttgart,
Institut für Industrielle Fertigung und
Fabrikbetrieb (IFF), Universität Stuttgart
und Institut für Arbeitswissenschaft und
Technologiemanagement (IAT), Universität Stuttgart

Herausgeber:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper
und

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. E.h. mult. Dr. h.c. mult. Hans-Jörg Bullinger
und

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dieter Spath

Florian Simons

Verhalten von passiv
betriebenen Sauggreifern
unter der Krafteinwirkung
von Kletterrobotern

Nr. 444

Dr.-Ing. Florian Simons

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA), Stuttgart

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper

ord. Professor an der Universität Stuttgart

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA), Stuttgart

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. E.h. mult. Dr. h.c. mult. Hans-Jörg Bullinger

ord. Professor an der Universität Stuttgart

Präsident der Fraunhofer-Gesellschaft, München

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dieter Spath

ord. Professor an der Universität Stuttgart

Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO), Stuttgart

D 93

ISBN 3-936947-97-X Jost Jetter Verlag, Heimsheim

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils gültigen Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

© Jost Jetter Verlag, Heimsheim 2006.

Printed in Germany.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z. B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für die Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

Druck: printsystem GmbH, Heimsheim

Geleitwort der Herausgeber

Über den Erfolg und das Bestehen von Unternehmen in einer marktwirtschaftlichen Ordnung entscheidet letztendlich der Absatzmarkt. Das bedeutet, möglichst frühzeitig absatzmarktorientierte Anforderungen sowie deren Veränderungen zu erkennen und darauf zu reagieren.

Neue Technologien und Werkstoffe ermöglichen neue Produkte und eröffnen neue Märkte. Die neuen Produktions- und Informationstechnologien verwandeln signifikant und nachhaltig unsere industrielle Arbeitswelt. Politische und gesellschaftliche Veränderungen signalisieren und begleiten dabei einen Wertewandel, der auch in unseren Industriebetrieben deutlichen Niederschlag findet.

Die Aufgaben des Produktionsmanagements sind vielfältiger und anspruchsvoller geworden. Die Integration des europäischen Marktes, die Globalisierung vieler Industrien, die zunehmende Innovationsgeschwindigkeit, die Entwicklung zur Freizeitgesellschaft und die übergreifenden ökologischen und sozialen Probleme, zu deren Lösung die Wirtschaft ihren Beitrag leisten muss, erfordern von den Führungskräften erweiterte Perspektiven und Antworten, die über den Fokus traditionellen Produktionsmanagements deutlich hinausgehen.

Neue Formen der Arbeitsorganisation im indirekten und direkten Bereich sind heute schon feste Bestandteile innovativer Unternehmen. Die Entkopplung der Arbeitszeit von der Betriebszeit, integrierte Planungsansätze sowie der Aufbau dezentraler Strukturen sind nur einige der Konzepte, welche die aktuellen Entwicklungsrichtungen kennzeichnen. Erfreulich ist der Trend, immer mehr den Menschen in den Mittelpunkt der Arbeitsgestaltung zu stellen - die traditionell eher technokratisch akzentuierten Ansätze weichen einer stärkeren Human- und Organisationsorientierung. Qualifizierungsprogramme, Training und andere Formen der Mitarbeiterentwicklung gewinnen als Differenzierungsmerkmal und als Zukunftsinvestition in *Human Resources* an strategischer Bedeutung.

Von wissenschaftlicher Seite muss dieses Bemühen durch die Entwicklung von Methoden und Vorgehensweisen zur systematischen Analyse und Verbesserung des Systems Produktionsbetrieb einschließlich der erforderlichen Dienstleistungsfunktionen unterstützt werden. Die Ingenieure sind hier gefordert, in enger Zusammenarbeit mit anderen Disziplinen, z. B. der Informatik, der Wirtschaftswissenschaften und der Arbeitswissenschaft, Lösungen zu erarbeiten, die den veränderten Randbedingungen Rechnung tragen.

Die von den Herausgebern langjährig geleiteten Institute, das

- Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA),
- Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO),
- Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb (IFF), Universität Stuttgart,
- Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement (IAT), Universität Stuttgart

arbeiten in grundlegender und angewandter Forschung intensiv an den oben aufgezeigten Entwicklungen mit. Die Ausstattung der Labors und die Qualifikation der Mitarbeiter haben bereits in der Vergangenheit zu Forschungsergebnissen geführt, die für die Praxis von großem Wert waren. Zur Umsetzung gewonnener Erkenntnisse wird die Schriftenreihe „IPA-IAO - Forschung und Praxis“ herausgegeben. Der vorliegende Band setzt diese Reihe fort. Eine Übersicht über bisher erschienene Titel wird am Schluss dieses Buches gegeben.

Dem Verfasser sei für die geleistete Arbeit gedankt, dem Jost Jetter Verlag für die Aufnahme dieser Schriftenreihe in seine Angebotspalette und der Druckerei für saubere und zügige Ausführung. Möge das Buch von der Fachwelt gut aufgenommen werden.

Engelbert Westkämper Hans-Jörg Bullinger Dieter Spath

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA) in Stuttgart.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Prof. e.h. Dr.-Ing. e.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper danke ich für seine wohlwollende Unterstützung und Förderung.

Herrn Prof. Dr. Karsten Berns danke ich für die Durchsicht meiner Arbeit und für die Übernahme des Mitberichts.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Rolf Dieter Schraft und Herrn Dipl.-Ing. Martin Hägele M.S. danke ich für die organisatorische Unterstützung.

Für die Durchsicht der Arbeit und ihre kritischen Anregungen danke ich Herrn Dr.-Ing. Manfred Schweizer sowie Herrn Dr.-Ing. Kai Modrich, Herrn Dr.-Ing. Johannes Wössner, Herrn Dr.-Ing. Uwe Bräuning und Herrn Dr.-Ing. Alexander Meissner.

Darüber hinaus danke ich Herrn Dr.-Ing. Gernot Schmierer für die grundlegenden fachlichen Diskussionen, Herrn Dr.-Ing. Walter Schaaf für die methodischen Anregungen zur Erstellung einer Doktorarbeit sowie Frau Luzia Schuhmacher M.A. für ihre Lektor-Arbeiten, die weit über die von mir erwarteten Rechtschreibungs- und Grammatikprüfungen hinausgingen.

Als Sparringspartner über sieben heldenhafte IPA-Jahre hinweg gilt mein besonderer Dank Herrn Dipl.-Ing. Kai Wegener für die gute Zusammenarbeit sowie für alle Gespräche und Diskussionen fachlicher, philosophischer und strategischer Natur zur Bewältigung der Promotionsprozedur.

Herrn Klaus Killmann danke ich für seine zu beliebigen Uhrzeiten abrufbare technische Unterstützung beim Aufbau des in dieser Arbeit realisierten Roboters. Herrn Dipl.-Ing. Peter Schmidt und Herrn Dipl.-Ing. Maximilian von Kleinsorgen sowie allen beteiligten Studenten danke ich für die unzähligen Stunden im Versuchsfeld, wo wir einem wohlgestalteten Haufen Aluminium, Silikon und Elektronik das Klettern beibrachten.

Meinen Eltern Prof. Detlev Simons und Dipl.-Ing. Barbara Simons danke ich für ihre Förderung, Motivation und Unterstützung, welche die Voraussetzung für die Durchführung meiner Dissertation darstellten. Meiner Schwester Laura Simons, die zur gleichen Zeit ein ähnlich umfangreiches Werk schuf, danke ich für die zahlreichen Gespräche, in denen wir die für die Vollendung solcher Schriftstücke notwendige Motivation immer wieder neu erfanden.

Widmen möchte ich dieses Buch meiner lieben Frau Dipl.-Ing. Isabelle Simons, die mir bei allen Fragen und Sorgen stets beratend und motivierend zur Seite stand und mir für die konsequente Umsetzung meiner Arbeit bedingungslos den Rücken frei gehalten hat. Ich hoffe, dass mir dies nun für die Fertigstellung ihrer eigenen Doktorarbeit ebenso gut gelingt.

Weinsberg, im August 2006

Florian Simons

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen und Formelzeichen	12
1 Einleitung	19
1.1 Problemstellung	19
1.2 Zielsetzung	20
2 Ausgangssituation	21
2.1 Begriffe und Definitionen	21
2.2 Stand der Technik	25
2.2.1 Allgemeine Anwendungsgebiete von Kletterrobotern	25
2.2.2 Aufgaben von Kletterrobotern	26
2.2.3 Allgemeine Vortriebsprinzipien von Kletterrobotern	26
2.2.4 Halteprinzipien von Kletterrobotern für die Befahrung von Glasfassaden	28
2.2.5 Durchgeführte Untersuchungen an Sauggreifern	29
2.2.6 Bauarten von Fassadenkletterrobotern	31
2.2.7 Glaseigenschaften und Verglasungsarten	32
2.3 Entwicklungstendenzen bei Kletterrobotern für Glasfassaden	33
2.4 Schlussfolgerungen aus dem Stand der Technik	34
3 Analyse von potenziellen Einsatzszenarien, des Produktspektrums passiv betriebener Sauggreifer sowie des Bewegungsablaufes von Kletterrobotern und Ableitung von Anforderungen	36
3.1 Analyse des Einsatzszenarios der Glasfassade für den Einsatz von Kletterrobotern	36
3.2 Analyse der Funktionsweise von aktiv und passiv betriebenen Sauggreifern	38
3.2.1 Funktionsweise eines aktiv betriebenen Sauggreifers	39
3.2.2 Funktionsweise eines passiv betriebenen Sauggreifers	40
3.2.3 Vergleich des Energiebedarfs bei aktiv und passiv betriebenen Sauggreifern	42
3.3 Analyse des Produktspektrums von Sauggreifern hinsichtlich eines passiven Einsatzes	43
3.3.1 Bauarten von Sauggreifern und ihre Tauglichkeit hinsichtlich eines passiven Einsatzes	43
3.3.2 Versagensarten bei Sauggreifern mit Dichtlippe	44
3.4 Analyse der Vortriebsprinzipien von Kletterrobotern hinsichtlich ihrer Eignung zum Einsatz auf Glasfassaden	46
3.4.1 Analyse der Bewegungsmuster von Kletterrobotern bei der Befahrung von Glasfassaden	46
3.4.2 Analyse unterschiedlicher Varianten des Raupenprinzips	48
3.4.3 Analyse des Bewegungsablaufes einer Raupe mit aktiv oder passiv betriebenen Sauggreifern	50
3.4.4 Ablöseproblematik bei dem Bewegungsablauf der Raupe mit passiv betriebenen Sauggreifern	51
3.5 Analyse der Varianten zur Vakuumherzeugung und ihrer Einflussfaktoren auf das Klettersystem	52
3.5.1 Aufstellung der Varianten zur Vakuumherzeugung	52
3.5.2 Analyse des technischen Aufwandes	54

3.5.3	Analyse des Gewichtes und des Energiebedarfs	54
3.5.4	Verteilung der nach dem Stand der Technik bestehenden Kletterroboter auf die Varianten	54
3.5.5	Folgerungen	55
3.6	Analyse von Glaselementen und -Befestigungen	56
3.6.1	Toleranzen bei Fertigung und Einbau von Glaselementen	56
3.6.2	Geometrien und Hindernistypen von Glaselementbefestigungen	58
3.6.3	Geometrien und Hindernistypen von Fugen zwischen Glaselementen	60
3.6.4	Einfluss der Hindernistypen auf Glasfassaden auf die Funktionalität von passiv betriebenen Sauggreifern mit Dichtlippe	61
3.6.5	Einfluss der Fassadengeometrie auf die Geometrie der Raupe mit passiv betriebenen Sauggreifern	63
3.6.6	Windlast auf Kletterroboter an Gebäudefassaden	66
3.7	Folgerungen aus den Analyseergebnissen	67
3.8	Anforderungen an Kletterroboter nach dem Raupenprinzip zur Befahrung von Glasfassaden	68
3.8.1	Definition der Teilsysteme	68
3.8.2	Anforderungen an das Klettersystem	70
3.8.3	Anforderungen an die Teilsysteme des Klettersystems	70
4	Konzeption eines Kletterroboters nach dem Raupenprinzip mit passiv betriebenen Sauggreifern	72
4.1	Konzeption des Haltesystems	72
4.1.1	Lösungsvarianten für das Haltesystem	72
4.1.2	Bewertung der Lösungsvarianten für das Haltesystem	73
4.2	Konzeption des Vortriebssystems	75
4.2.1	Darstellung der Lösungsvarianten für das Vortriebssystem	75
4.2.2	Bewertung der Lösungsvarianten für das Vortriebssystem	77
4.3	Konzeption des Lenksystems	77
4.3.1	Darstellung der Lösungsvarianten für das Lenksystem	77
4.3.2	Bewertung der Lösungsvarianten für das Lenksystem	79
4.4	Integration der Teilsysteme zu einer Klettersystemvariante	79
5	Entwicklung eines Verfahrens zur Berechnung der Kräfte auf die passiv betriebenen Sauggreifer eines Kletterroboters nach dem Raupenprinzip	81
5.1	Funktionsweise der Raupe mit passiv betriebenen Sauggreifern und Spacer	81
5.2	Ermittlung der Einflussfaktoren auf die an den passiv betriebenen Sauggreifern angreifenden Kräfte	82
5.2.1	Federsteifigkeit der Sauggreifer	83
5.2.2	Vertikale Position der Applikation	83
5.2.3	Vertikaler Abstand der Sauggreifer voneinander	83
5.2.4	Spacereinstellungen	83
5.2.5	Anordnung der Sauggreifer	84
5.3	Mechanisches Ersatzmodell für einen Kletterroboter nach dem Raupenprinzip	85
5.4	Verfahren zur Berechnung der Kräfte auf die passiv betriebenen Sauggreifer eines Kletterroboters nach dem Raupenprinzip	86
5.4.1	Mechanische Grundgleichungen für einen Kletterroboter nach dem Raupenprinzip	87
5.4.2	Gleichungen zur Projektion der Raupengeometrie auf die Oberfläche	87

5.4.3	Ableitung der Lösungsgleichungen zur Berechnung des Neigungswinkels α	89
5.4.4	Lösungsgleichungen und Verfahren zur Berechnung der Kräfte auf die passiv betriebenen Sauggreifer	91
5.5	Experimentelle Ermittlung der Federsteifigkeit eines Sauggreifers	91
5.6	Modellrechnung und Ergebnisse	92
5.7	Folgerungen	94
6	Entwicklung von Berechnungsgrundlagen zur Ermittlung des Schlupfverhaltens von passiv betriebenen Sauggreifern	95
6.1	Aufbau eines Sauggreifers mit Dichtlippe	95
6.2	Phasenmodell des Schlupfprozesses	96
6.3	Aufstellung eines mechanischen Ersatzmodells für den Schlupfprozess	98
6.4	Iterationsverfahren für die Simulation des Schlupfprozesses	99
6.5	Mathematisches Modell für die Simulation des Schlupfprozess	101
6.5.1	Bildung einer geeigneten Netzstruktur	101
6.5.2	Berechnung der Koordinaten der Knotenpunkte	102
6.5.3	Berechnung der Reibungskraftverteilung auf die Knoten der Netzstruktur	103
6.5.4	Berechnung des am mittleren Knoten angreifenden Kraft- und Verschiebungsvektors	105
6.5.5	Aufstellung der Gesamtsteifigkeitsmatrix	106
6.5.6	Berechnung von Netzkraft und Verschiebung des mittleren Knotens	107
6.6	Ermittlung der Parameter des Ersatzmodells	109
6.7	Modellrechnung und Ergebnisse	111
6.8	Verifikation im Versuch	114
6.8.1	Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung	114
6.8.2	Interpretation der Ergebnisse	114
6.9	Folgerungen	116
7	Realisierung und Erprobung einer Gesamtsystemvariante	117
7.1	Aufbau des Gesamtsystems	117
7.1.1	Aufbau des Vortriebssystems	118
7.1.2	Aufbau des Haltesystems	119
7.1.3	Aufbau des Lenksystems	120
7.2	Erprobung des Gesamtsystems	121
7.2.1	Versuchsaufbau	121
7.2.2	Durchführung von Fahrversuchen zur Ermittlung der Lastaufnahme der Raupe	122
7.2.3	Erkenntnisse aus den Fahrversuchen auf die Lastaufnahme der Sauggreifer	124
7.3	Folgerungen aus den Versuchen	126
8	Zusammenfassung und Ausblick	128
9	Summary	130
10	Literaturverzeichnis	133

Abkürzungen und Formelzeichen

Abkürzungen

ESG	Einscheibensicherheitsglas
ES	Akkumulator
M	Motor
P _V	Vakuumpumpe
P _D	Kompressor
R	Restliche Roboterkomponenten
SSG	Structural Sealant Glazing
TVG	Teilvorgespanntes Glas
U	Externe Spannungsquelle
VG	Verbundglas
WLZ	Windlastzone

Große Buchstaben

\underline{A}_N		Inzidenzmatrix
A_{AD}	$[mm^2]$	Grundfläche des Adapters (starre Fläche) eines Sauggreifers
A_{DL}	$[mm^2]$	aufliegende Fläche der Dichteinheit eines Sauggreifers
A_e	$[mm^2]$	Fläche eines Dreieckselementes
A_{RE}	$[mm^2]$	Fläche der Reibungseinheit eines Sauggreifers
A_{SA}	$[mm^2]$	Auflagefläche eines Sauggreifers
A_{SG}	$[mm^2]$	Grundfläche eines Sauggreifers
A_{SW}	$[mm^2]$	Wirkfläche eines Sauggreifers
$B_{Fassade}$	$[m]$	Gesamtbreite der Fassade
B_{Raupe}	$[m]$	Gesamtbreite der Raupe
$B_{Scheibe}$	$[m]$	Lichte Breite eines Glaselementes
D_{SG}	$[mm]$	Sauggreiferdurchmesser
E	$[N/mm^2]$	Elastizitätsmodul
E_{Halte}	$[J]$	Energie des Haltesystems zum Anpressen der vorderen Sauggreifer
E_{Lenk}	$[J]$	Energie des Lenksystems zur Durchführung einer Lenkbewegung
E_{WLZ}	-	Windlastzonenexponent
$E_{Vortrieb}$	$[J]$	Energie des Vortriebssystems für die Vorwärtsbewegung

$F_{Adhäsion}$	[N]	Haltekraft eines Adhäsionsgreifers unter Zuglast
F_{DL}	[N]	Federkraft der Dichtlippe eines Sauggreifers in Zugrichtung
F_{eG}	[N]	maximal aufnehmbare Gleitreibungskraft auf einen Netzknoten
F_{eH}	[N]	maximal aufnehmbare Haftreibungskraft auf einen Netzknoten
F_{eN}	[N]	Oberflächenparallele Netzkraft auf einen Netzknoten
F_{eZ}	[N]	Normalkraft auf einen Netzknoten
\underline{F}_{eN}	[N]	Oberflächenparalleler Netzkraftvektor für einen Netzknoten
F_{Hi}	[N]	Zugkraft des Kletterroboters auf einen Sauggreifer i
$F_{H,max}$	[N]	maximal aufnehmbare Zuglast eines Sauggreifers der Raupe
$F_{H,Soll}$	[N]	minimale Kraft zum Anpressen der vorderen Sauggreifer
F_{Halte}	[N]	Kraft des Haltesystems zum Anpressen der vorderen Sauggreifer
F_{Magnet}	[N]	Haltekraft eines Magnetgreifers unter Zuglast
\underline{F}_N	[N]	Oberflächenparalleler Netzkraftvektor für sieben Netzknoten (sechs Knoten um einen siebten Knoten herum angeordnet)
$\underline{F}_{N,A}$	[N]	Oberflächenparalleler Netzkraftvektor aller sechs Netzknoten, welche um einen siebten zentralen Netzknoten angeordnet sind
$\underline{F}_{N,M}$	[N]	Netzkraftvektor des siebten zentralen Netzknotens
F_S	[N]	Scherkraft am Adapter eines Sauggreifers
F_{SG}	[N]	Scherkraft bei Erreichen der Betriebsgrenze
$F_{SÜ}$	[N]	Scherkraft bei Erreichen der Überlastgrenze
F_{Schub}	[N]	Haltekraft eines Halteelementes mit dem Prinzip des Vertikalschubes
$F_{Trommel}$	[N]	Zugkraft der Kabeltrommel des Sicherungsseils
F_V	[N]	Scherkraft des Kletterroboters auf einen beliebigen Sauggreifer
$F_{V,max}$	[N]	maximal aufnehmbare Scherlast eines Sauggreifers der Raupe
F_W	[N]	Saugkraft eines Kletterroboters
F_Z	[N]	Normalkraft auf Flansch eines Sauggreifers
H_{Raupe}	[m]	Gesamthöhe der Raupe
\underline{K}_N	[N/mm]	Gesamtsteifigkeitsmatrix der gebundenen Struktur
$\underline{K}_{N,MM}$	[N/mm]	Untermatrix von \underline{K}_N (links oben)
$\underline{K}_{N,MA}$	[N/mm]	Untermatrix von \underline{K}_N (rechts oben)
$\underline{K}_{N,AM}$	[N/mm]	Untermatrix von \underline{K}_N (links unten)

$\underline{K}_{N,AA}$	$[N/mm]$	Untermatrix von \underline{K}_N (rechts unten)
$Knoten_akt$		Nummer des aktuellen Knotens
L_{Haft}	$[m]$	Länge des Riemenabschnittes mit im Haftzustand befindlichen Sauggreifern
L_{Raupe}	$[m]$	Gesamtlänge der Raupe
$L_{Scheibe}$	$[m]$	Lichte Länge eines Glaselementes
$Ring_akt$		Nummer des aktuellen Rings
S_{Ho}	$[N]$	horizontale Kraft auf vorderes Reinigungssystem
S_{Hu}	$[N]$	horizontale Kraft auf Spacer/hinteres Reinigungssystem
S_{Vo}	$[N]$	vertikale Kraft auf vorderes Reinigungssystem
S_{Vu}	$[N]$	vertikale Kraft auf Spacer/unteres Reinigungssystem
$\underline{U}_{N,A}$	$[mm]$	Oberflächenparalleler Verschiebungsvektor aller sechs Netzknoten, welche um einen siebten zentralen Netzknoten angeordnet sind
\underline{U}_{eN}	$[mm]$	Oberflächenparalleler Verschiebungsvektor für einen Netzknoten
\underline{U}_N	$[mm]$	Oberflächenparalleler Verschiebungsvektor für sieben Netzknoten (sechs Knoten um einen siebten Knoten herum angeordnet)
$\underline{U}_{N,M}$	$[mm]$	Verschiebungsvektor des siebten zentralen Netzknotens
$V_{0...2}$	$[mm^3]$	Vakuumkammervolumina eines Sauggreifers

Kleine Buchstaben

Δa	[mm]	vertikaler Abstand der Sauggreifer voneinander
$2a$	[mm]	projizierter Achsabstand zwischen zwei Umlenkrollen
a_i	[mm]	Oberflächenprojizierter Abstand des Sauggreifers i von der Hinterachse
$2a_{N,i}$	[mm]	Knotenabstand zweier Knoten auf Ring i
$2a_R$	[mm]	Achsabstand der Raupe
a_{SG}	[mm]	Abstand zwischen den Symmetrieachsen zweier Sauggreifer
$a_{SG,max}$	[mm]	Abstand zwischen den Symmetrieachsen der äußersten Sauggreifer
b_i	[mm]	y-Differenz zwischen zwei Knotenpunkten eines Dreieckelementes
c_A	[mm]	vertikaler Abstand: Schwerpunkt des Außenrahmens - Hinterachse
c_f	-	Aerodynamischer Kraftbeiwert
c_i	[mm]	x-Differenz zwischen zwei Knotenpunkten eines Dreieckelementes
c_R	[mm]	vertikaler Abstand: Schwerpunkt der Raupe - Hinterachse
d_{Fuge}	[mm]	Fugenbreite zwischen zwei Glaselementen
$d_{Hindernis}$	[mm]	Breite eines Hindernisses
d_o	[mm]	vertikaler Abstand: vorderes Reinigungssystem - Vorderachse
d_{PH}	[mm]	Durchmesser einer Punkthalterung
d_{SG40}	[mm]	Durchmesser des Sauggreifers SG40
$d_{Scheibe}$	[mm]	Dicke eines Glaselementes
d_{LAo}	[mm]	Abstand der vorderen Applikation zur Vorderachse der Raupe
d_u	[mm]	vertikaler Abstand: Spacers - Hinterachse
e_i	[mm]	Einfederung von Sauggreifer i
f	[mm]	horizontaler Abstand: Hinterachse - Oberfläche
f_N		Faktor zur Berechnung der Ringradien
$f_{N,korr}$		korrigierter Faktor zur Berechnung der Ringradien
f_{x_eN}	[N]	x-Komponente des Nettkraftvektors auf einen Nettknoten
f_{y_eN}	[N]	y-Komponente des Nettkraftvektors auf einen Nettknoten
f_{WLZ}	-	Windlastzonenfaktor
g	[m/s ²]	Erdbeschleunigung
$h_{0...2}$	[mm]	Höhe eines Sauggreifers im entspannten und belasteten Zustand

h_A	[mm]	horizontaler Abstand: Schwerpunkt Außenrahmen - Hinterachse
$h_{Dichtung}$	[mm]	Absenkungsmaß einer Fugendichtung
h_G	[mm]	horizontale Spacereinstellung
Δh_G	[mm]	Abstufung der Einstellungen der horizontalen Spacereinstellung
h_{KH}	[mm]	Höhe eines Klemmhalters
h_{PH}	[mm]	Höhe einer Punkthalterung
h_R	[mm]	horizontaler Abstand: Schwerpunkt Raupe - Hinterachse
i_Ring		Ringindex
i_Sauger		Sauggreiferindex
\underline{k}_N		Gesamtsteifigkeitsmatrix der ungebundenen Struktur
$\underline{k}_{11} \dots \underline{k}_{33}$		Untermatrizen der Elementsteifigkeitsmatrix für ein ebenes Dreieckselement i
k_{dHi}	[N/mm]	Federkonstante von Sauggreifer i bei Druckkraft
k_{Hi}	[N/mm]	Federkonstante von Sauggreifer i bei Zugkraft
$\underline{k}_{eN,\Omega}$		Elementsteifigkeitsmatrix für ein ebenes Dreieckselement i
k_{So}	[N/mm]	Federkonstante des vorderen Reinigungssystems
l_{Ao}	[mm]	vertikaler Abstand: Schwerpunkt Außenrahmen – vorderes Reinigungssystem
l_{Au}	[mm]	vertikale Spacereinstellung
l_i	[mm]	Länge eines angesaugten Sauggreifers ohne äußere Krafteinwirkung
$l_{i,0}$	[mm]	Länge eines unangesaugten Sauggreifers
l_{KH}	[mm]	größte Seitenlänge eines Klemmhalters
m		Anzahl NetZRinge pro Sauggreiferfläche
m_A	[kg]	Masse des Außenrahmens
m_{ges}	[kg]	Masse des Roboter-Gesamtsystems
m_R	[kg]	Masse der Raupe
$m_{Z-Gewicht}$	[kg]	Masse der Zusatzgewichte
$\Delta m_{Z-Gewicht}$	[kg]	Abstufung der Massen der Zusatzgewichte
n		Anzahl der Sauggreifer über der Oberfläche
$n_{Hindernis,max}$		maximale Anzahl an Hindernissen über der Länge einer Raupe
n_{SG}		Gesamtanzahl der Sauggreifer eines Kletterroboters auf der Oberfläche

$n_{SG,min}$		Minimal notwendige Anzahl der Sauggreifer eines Kletterroboters
$n_{SG,aus}$		Anzahl ausgefallener Sauggreifer eines Kletterroboters
$n_{Scheibe}$		Anzahl an übereinander angeordneten Scheiben einer Verbundscheibe
p_0	$[N/mm^2]$	Atmosphärendruck
p_W	$[N/mm^2]$	Druck unter der Wirkfläche eines Sauggreifers
Δp_W	$[N/mm^2]$	Druckdifferenz zwischen Sauggreiferinnerem und Umgebungsdruck
$q_{ref,0}$	$[N/m^2]$	Referenzwindlast
r_a	$[mm]$	Innerer Radius eines Ringsegmentes
r_b	$[mm]$	Äußerer Radius eines Ringsegmentes
$r_{Dichtung}$	$[mm]$	Radius einer Fugendichtung
r_i	$[mm]$	Position der Sauggreifer auf dem Riemen
r_{Kante}	$[mm]$	Radius der Kante eines Glaselementes
$r_{N,i}$	$[mm]$	Radius des Ringes i
$\Delta r_{N,i}$	$[mm]$	Differenz der Radien der beiden Ringe i und $i+1$
r_R	$[mm]$	Radius der Umlenkrollen
r_{SG}	$[mm]$	Radius der Grundfläche eines Sauggreifers
$r_{S,konkav}$	$[mm]$	konkave Wölbung der Sauggreiferlippe
$r_{S,konvex}$	$[mm]$	konvexe Wölbung der Sauggreiferlippe
r_{SS}	$[mm]$	Radius des Adapters (starre Fläche) eines Sauggreifers
r_{SW}	$[mm]$	Radius der Wirkfläche eines Sauggreifers
s	$[mm]$	horizontaler Abstand: Schwerpunkt Außenrahmen - Oberfläche
$s_{e,i}$	$[mm]$	Positionsverschiebung eines Auflagers i
s_{SG}	$[mm]$	Scherweg bei Erreichen der Betriebsgrenze
$s_{SÜ}$	$[mm]$	Scherweg bei Erreichen der Überlastgrenze
$s_{Vortrieb}$	$[mm]$	Zurückgelegte Strecke der Raupe
s_x	$[mm]$	Scherweg am Adapter eines Sauggreifers
s_Z	$[mm]$	Zugweg am Adapter eines Sauggreifers
t	$[mm]$	horizontaler Abstand: Schwerpunkt Raupe - Oberfläche
t_{Einbau}	$[mm]$	Einbautoleranz von Glaselementen in Glasfassaden
t_e	$[mm]$	Dicke eines Dreieckselementes

$t_{HV, Gesamt}$	[mm]	maximaler Höhenversatz zwischen zwei Glaselementen einer Fassade
t_{Kante}	[mm]	Höhe der Kante eines Glaselementes
$t_{Scheibe}$	[mm]	Dickentoleranz eines Glaselementes
$t_{Verbundschiebe}$	[mm]	Dickentoleranz von Verbundscheiben
u	[mm]	vertikaler Abstand: Schwerpunkt Außenrahmen - Ablösepunkt
u_{eN}	[mm]	x-Komponente des Verschiebungsvektors auf einen Netzknoten
v	[mm]	horizontaler Abstand: Schwerpunkt der Raupe -Ablösepunkt
v_{eN}	[mm]	y-Komponente des Verschiebungsvektors auf einen Netzknoten
v_{Raupe}	[m/s]	Geschwindigkeit der Raupe
v_{So}	[mm]	entspannte Federlänge des vorderen Reinigungssystems
w	[mm]	Ausfederung des vorderen Reinigungssystems
w_e		Windlast auf Gebäudefassade
x_N	[mm]	x-Koordinate eines Netzknotens
y_N	[mm]	y-Koordinate eines Netzknotens
$z_{Fassade}$	[m]	Gesamthöhe der Fassade
α	[°]	Schrägstellung des Außenrahmens der Raupe
α_{Kante}	[°]	Kantenwinkel eines Glaselementes
β	[°]	Winkeleinstellung zwischen Außenrahmen und Raupe
λ_{3D}		Normalendehnungsparameter
δ	[°]	Winkel der Oberfläche zur Erdoberfläche
δ_{Lenk}	[°]	Lenkwinkel des Lenksystems
$\delta_{Aufsetz}$	[°]	Aufsetzwinkel eines Sauggreifers auf eine Oberfläche
μ		Allgemeiner Reibungskoeffizient der Roboterapplikation
μ_H		Haftreibungskoeffizient
μ_G		Gleitreibungskoeffizient
σ_Z	[N/mm ²]	Flächenpressung auf die Auflagefläche eines Sauggreifers
ν		Querkontraktionszahl

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Gebäudefassaden stehen durch ihre Eigenschaft als Raumtrennung zwischen Nutzungsbereich und dem Außenbereich im funktionalen und gestalterischen Mittelpunkt der Gebäudekonstruktion (Thele, 2001; Sack, 1999). So wuchsen Fassaden zu multifunktionalen Bauteilen heran, die sowohl die Wirkung als auch die Funktionalität eines Gebäudes wesentlich bestimmen (Giesen, 2004). Hierbei sind Hochhäuser mit großen Glasflächen und teilweise einer fast vollständigen Glashaut, aber auch die immer größer werdenden Fensterfronten an Wohnhäusern charakteristisch für die gegenwärtige und zukünftige Architektur (Doobe, 2003; Preiser, 1998). Dieser Trend wurde möglich durch die starken Entwicklungen der letzten Jahre im Bereich der Glasbearbeitung sowie der hieraus entstandenen neuen Möglichkeiten zur Glasbefestigung (Schittich, 1998). Aufgrund der Material- und der Schmutzempfindlichkeit müssen Glasfassaden zur Erhaltung der Sicherheit (AGI, 1993), des Erscheinungsbildes und für eine hohe Lebensdauer regelmäßig gewartet werden (Schraft, 2003b; Bock, 2002a). Zu den Wartungsmaßnahmen gehören Inspektionen und Reinigungen in definierten und regelmäßigen Intervallen (DIN 1076; Krieger, 1999). Dies geschieht heutzutage vorwiegend durch den Menschen.

Überhänge und schwache Fassadenstrukturen machen Arbeiten an Außenfassaden jedoch besonders in den oberen Bereichen hoher Gebäude für Menschen zu einer komplizierten und gefährlichen Arbeit. Gerade diese Bereiche sind aber der höchsten Beanspruchung durch Witterung und Korrosion ausgesetzt (AGI 1993). Hier bietet sich ein hohes Potenzial für den Einsatz von autonomen oder ferngesteuerten Kletterrobotern. Sie sind bei nahezu jedem Wetter einsetzbar, es können Arbeitskräfte eingespart werden (Bock, 2002b; Seliger, 1994) und es ist denkbar, sie rund um die Uhr in Betrieb zu halten. Die Hauptanwendung bereits bestehender Kletterroboter ist daher die Gebäudeunterhaltung (Yberle, 1999; Gradetsky, 1991). Zusätzlich können sie in ihrer Funktion hierbei als mobiler Werbe- und Informationsträger eingesetzt werden (Fraunhofer, 1999).

Für Gebäudedienstleister wird ein solcher Roboter jedoch erst dann interessant, wenn dieser auf einer möglichst großen Anzahl an Gebäuden einsetzbar ist (Schmierer, 2001; Schraft, 2003b). Potenzial hierfür bieten frei kletternde Roboter, die sich unabhängig von gebäudeseitigen Installationen wie Dachkränen und speziellen notwendigen Kletterstrukturen direkt auf der Glasoberfläche halten und bewegen können. Die Mehrzahl der bestehenden frei kletternden Roboter nutzt für das Halten auf den Oberflächen Sauggreifer, welche über eine Versorgungseinheit aktiv mit Unterdruck versorgt werden (Berns, 2003).

Das bei den aktiv betriebenen Sauggreifern bestehende Hauptproblem ist die für die Erzeugung des Unterdrucks notwendige Energieversorgung, welche zu einer der teuersten Energieformen gehört (NRW, 2003). Geschieht diese über eine Nabelschnur in Form eines Kabels oder eines Schlauches, sind die Reichweite und die Bewegungsvermögen auf die Länge der Nabelschnur begrenzt. Befindet sich der Energiespeicher an Bord des Roboters, bedeutet dies ein erhöhtes Gesamtgewicht, was zu einer höheren Belastung der zu befahrenden Fassade führt und letztendlich das Einsatzgebiet auf entsprechend ausgelegte Fassaden reduziert. Insbesondere in Hinblick auf die aktuellen Entwicklungen im Fassadenleichtbau (Schittich, 1998) besteht entsprechend hoher und stetig steigender Bedarf an Maßnahmen zur Minimierung des Robotergewichtes. Die Steigerung der Leistungsfähigkeit vieler Komponenten durch die Fortschritte in der Mikrotechnik (Westkämper, 2001) ist eine Antwort auf diesen Bedarf. Die Minimierung der Anzahl der Komponenten sowie deren Leistungsbedarf hingegen ist die Grundvoraussetzung für einen flexiblen Einsatz von Fassadenkletterrobotern.

Im Vergleich zu den aktiv betriebenen Sauggreifern bieten passiv betriebene Sauggreifer hier den Vorteil, dass die Haltekraft durch reines mechanisches Andrücken an die Oberfläche erzeugt wird. Dadurch kann auf zusätzliche Komponenten zur Vakuumerzeugung verzichtet werden. Es ist zu erwarten, dass hiermit das Gewicht und die Komplexität reduziert - und dadurch die Einsatzflexibilität und nicht zuletzt die Zuverlässigkeit von frei kletternden Robotern erhöht werden können.

Dadurch dass der Unterdruck und damit die Haltekraft der in sich abgeschlossenen passiv betriebenen Sauggreifer nicht von außen beeinflusst werden kann, ist zu erwarten, dass sich das elastische Verhalten sowie das Versagensverhalten gegenüber den aktiv betriebenen Sauggreifern grundlegend unterscheiden. Für die Auslegung der Sauggreifer und die Steuerung des Gesamtsystems müssen diese Eigenschaften berücksichtigt werden. Bisher liegen jedoch weder ausreichende Erfahrungswerte und wissenschaftliche Untersuchungen über das Verhalten passiv betriebener Sauggreifer noch geeignete Klettersysteme für deren Einsatz vor.

1.2 Zielsetzung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, grundlegende Erkenntnisse über das Verhalten von passiv betriebenen Sauggreifern bei Kletterrobotern für Glasfassaden zu erarbeiten. Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt hierbei bei der Entwicklung von Berechnungsgrundlagen zur Bestimmung der bei geeigneten Klettersystemen an den passiv betriebenen Sauggreifern angreifenden Kräfte sowie der darauf basierenden Entwicklung von Auslegungsvorschriften für passiv betriebene Sauggreifer unter Einwirkung dieser Kräfte.

Die Datenbasis hierfür bildet eine Untersuchung des Standes der Technik im Bereich von Sauggreifern, von Fassadenkletterrobotern, von Glasfassadenbauweisen sowie der Materialeigenschaften des hierbei verwendeten Glases. Hieraus werden potenzielle Einsatzszenarien für den Einsatz von Kletterrobotern mit passiv betriebenen Sauggreifern abgeleitet. Eine anschließende Analyse des Produktspektrums und der Funktionsweise von Sauggreifern, der Vortriebsprinzipien von Kletterrobotern für Glasfassaden, der Glaselemente und Glasbefestigungen an Glasfassaden sowie der Varianten zur Vakuumerzeugung an Sauggreifern bildet die Basis für die Ableitung von Anforderungen an Kletterroboter mit passiv betriebenen Sauggreifern.

Für die Konzeption eines hierfür geeigneten Klettersystems werden Lösungsvarianten konzipiert und mit Hilfe der aufgestellten Anforderungen bewertet. Für die favorisierte Lösungsvariante werden anschließend Berechnungsgrundlagen zur Bestimmung der an den Sauggreifern angreifenden Kräfte entwickelt. Darauf basierend erfolgen die Untersuchung des Verhaltens der Sauggreifer unter diesen Kräften sowie schließlich die Ableitung von Auslegungsvorschriften für passiv betriebene Sauggreifer. Die hierfür notwendigen theoretischen Zusammenhänge zur mathematischen Beschreibung des Verhaltens der Sauggreifer sind vom Stand der Technik nicht ableitbar und müssen entwickelt werden.

Anhand eines prototypischen Aufbaus eines für das betrachtete Anwendungsfeld der Glasfassade entwickelten Gesamtsystems, bestehend aus den Teilsystemen Bewegen, Halten, Energie, Steuerung und Reinigung, werden die theoretischen Ergebnisse verifiziert sowie die technische Machbarkeit nachgewiesen.

2 Ausgangssituation

2.1 Begriffe und Definitionen

Zur Festlegung einer einheitlichen Nomenklatur und zum besseren Verständnis sind im Folgenden die Kernbegriffe der vorliegenden Arbeit zusammengefasst und erläutert:

Kletterroboter

Ein Kletterroboter als Sonderform der mobilen Plattform besteht aus den Teilsystemen *Steuerung, Energie, Halten, Vortrieb, Lenken, und Applikation* (Schmierer, 2001).

Eine mobile Plattform muss dann als Kletterroboter ausgebildet werden, wenn ihre Hangabtriebskraft die über ihre Normalkraft erzeugte Haftreibungskraft im Kontaktbereich zwischen Roboter und Oberfläche übersteigt. Einfluss auf dieses Verhalten haben zum einen die Neigung der Oberfläche und zum anderen der Haftreibungskoeffizient zwischen dem Material der Oberfläche und dem Material der aufliegenden Elemente des Roboters. Das *Haltesystem* hat hier die Aufgabe, einen statischen Kontakt zwischen Roboter und Oberfläche zu gewährleisten. Die Funktion des Haltesystems unterteilt sich hierbei in ein Wirkprinzip und einen Wirkantrieb. Das Wirkprinzip erzeugt entweder die Erhöhung der Normalkraft auf die Oberfläche bei gleichzeitiger Erhaltung der Hangabtriebskraft oder die Bildung einer formschlüssigen Verbindung zwischen dem Haltesystem und der Oberfläche. Der Wirkantrieb führt dem Haltesystem die hierfür notwendige Energie zu und ist in manchen Fällen in das Vortriebssystem integriert.

Das *Vortriebssystem* ist verantwortlich für die Vorwärtsbewegung auf der Oberfläche. Das *Lenksystem* übernimmt die Änderung der Vortriebsrichtung und ist eine Erweiterung des Vortriebssystems um mindestens eine angetriebene Achse. Das Prinzip des Lenksystems hängt von dem gewählten Prinzip des Vortriebssystems ab. Das zentral zu betrachtende System bei der Konzeption der Kinematik eines Kletterroboters ist daher das Vortriebssystem. Das Halte-, Vortriebs- und Lenksystem bilden zusammen das *Klettersystem*.

Mit Hilfe des Steuerungssystems und des Energiesystems kann der Kletterroboter teil- oder vollautonom auf geneigten und senkrechten Oberflächen betrieben werden. Beide Teilsysteme können sich unabhängig voneinander entweder auf dem Roboter befinden oder auf einer Basiseinheit, welche mit dem Roboter über eine Daten- bzw. Energieübertragungseinheit in Verbindung steht.

Die Applikation eines Kletterroboters definiert sich über sein Aufgabengebiet und besteht in der Regel aus Prüf- und Messinstrumenten, Bearbeitungswerkzeugen oder Informationseinheiten.

Glasfassaden

Glasfassaden bestehen aus Glaselementen, einem Tragwerk sowie Befestigungselementen, welche die Glaselemente auf dem Tragwerk fixieren. Diese Befestigungselemente existieren in Form von Glashalteleisten, Punkthaltern oder Klebehalterungen (Schittich, 1998). Der prinzipielle Aufbau einer Glasfassade ist in Abbildung 2-1 dargestellt.

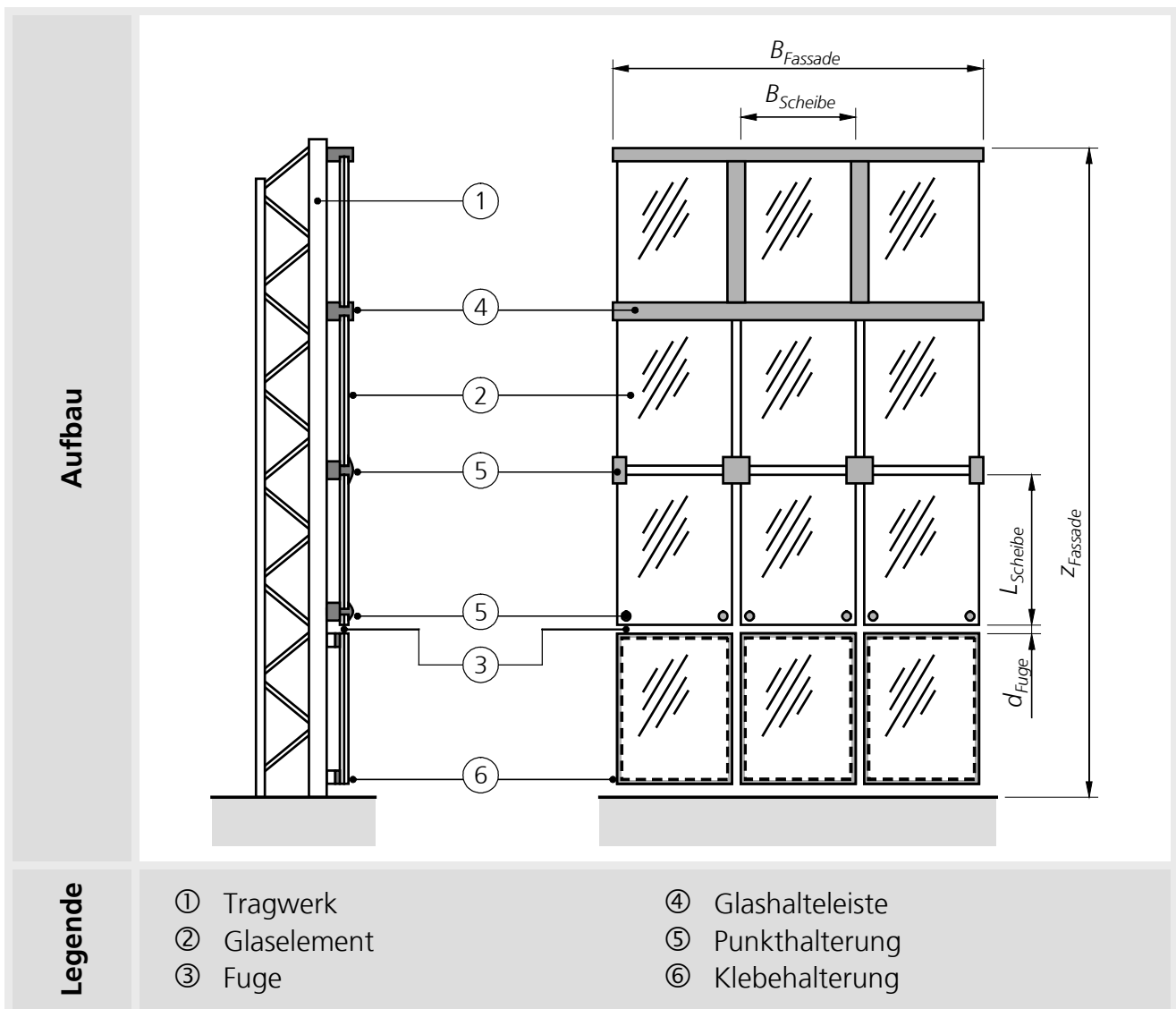


Abbildung 2-1: Grundaufbau einer Fassade mit Tragwerk, Glaselement und Glaselementbefestigung

Glaselemente

Die Glaselemente können eine primäre oder eine sekundäre Tragwerksfunktion erhalten. Glaselemente mit einer sekundären Tragwerksfunktion tragen lediglich ihr Eigengewicht, während das davor- oder dahinter liegende Tragwerk die Gesamtlast der Fassade trägt. Glaselemente mit einer primären Tragwerksfunktion hingegen nehmen – je nachdem, ob es sich um eine auf dem Grund stehende- oder eine von oben abgehängte Vorhangfassade handelt – die Last der darüber oder der darunter installierten Glaselemente auf (DIN 13830, DIN 13119). Bei stehenden Fassaden werden hierzu zusätzliche aussteifende Glaselemente in die Glasstruktur eingebunden.

Tragwerke

Die Tragwerke können als starres Tragwerk durch Pfosten, Riegel oder Fachwerkträgersysteme ausgebildet werden, als weiche bzw. halbweiche Seilsysteme oder als Hybridsysteme aus mit Seilen kombinierten Riegel oder Pfosten (Knaak, 1998). Abbildung 2-2 zeigt eine Übersicht der in der Architektur üblichen Tragwerkskonstruktionen.


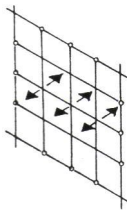
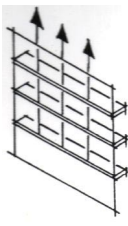
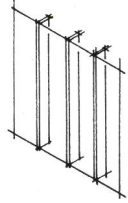
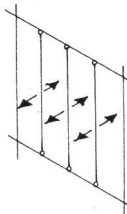
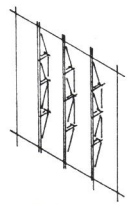
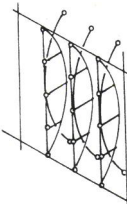

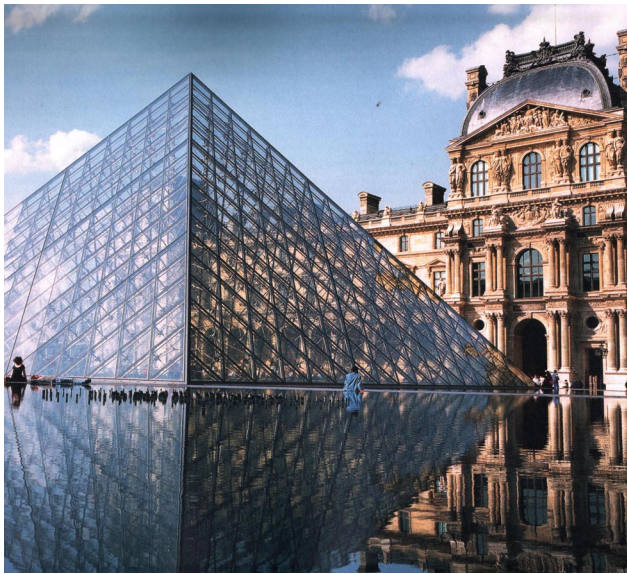
	Starres Tragwerk	Seilsysteme	Hybrid
Horizontal & vertikal			
	Pfosten-Riegel	Seilnetz (weich)	Riegel-Seil
Vertikal			-
	Pfosten	Vertikalseile (weich)	-
Sonderformen			
	Fachwerkträgersystem	Seilsystem (halbweich-weich)	Pfosten-Seil-Krakarm

Abbildung 2-2: Grundformen von Tragwerken für Glasfassaden (Knaak, 1998)

Je nach Geometrie der Fassade sowie statischen, räumlichen und gestalterischen Anforderungen an das Gesamtbauwerk befinden sich die Tragwerkskonstruktionen unter der Glashaut im Inneren des Gebäudes oder auf der Glashaut an der Außenseite des Gebäudes. Abbildung 2-3 zeigt im linken Bild die Glaspypamide des Louvre in Paris als Beispiel für eine innenliegende Tragwerkskonstruktion, das rechte Bild zeigt das Waterloo International Terminal als Beispiel für eine außenliegende Tragwerkskonstruktion (Wigginton, 1997).

Innenliegende Tragwerkskonstruktion



Außenliegende Tragwerkskonstruktion



Abbildung 2-3: Beispiele für eine innenliegende Tragwerkskonstruktion (linkes Bild, Louvre-Pyramide in Paris) und eine außenliegende Tragwerkskonstruktion (rechtes Bild, Waterloo International Terminal) (Wigginton, 1997)

Glaselementbefestigungen

Zur Befestigung der Glaselemente auf den Tragwerken bzw. zur Verbindung der Elemente untereinander gibt es die Linienlagerung und die Punktlagerung. Wie in Abbildung 2-4 dargestellt kann die Linienlagerung über Glashalteleisten oder über Klebeverbindungen erfolgen. Glashalteleisten existieren als formschlüssige Leisten oder als reibschlüssige Pressleisten. Eine Glashalteleiste bildet immer eine linienförmige Erhebung auf der dem Tragwerk gegenüberliegenden Seite des Glaselementes. In Verbindung mit innen liegenden Tragwerkskonstruktionen ermöglichen Klebeverbindungen hingegen eine glatte und nur durch Fugen unterbrochene Ganzglasfassade. Diese Technik wird auch Structural Sealant Glazing (SSG) genannt. Hierbei ist eine Neigung gegen die Vertikale bis 10° , in Sonderfällen bis 20° erlaubt (Wörner, 2001).

Punkthalterungen sind entweder durch eine Bohrung oder eine Fräsung formschlüssig in das Glaselement eingelassen oder als Klemmhalterungen an den Kanten der Glaselemente ausgebildet (Schittich, 1998; Knaak, 1998). Ebenso wie die Klebeverbindung ermöglichen auch Punkthalterungen Ganzglasfassaden, welche nur durch Fugen zwischen den Glaselementen unterbrochen werden.

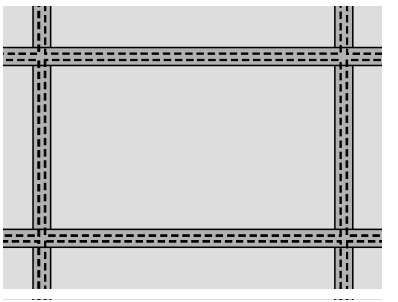
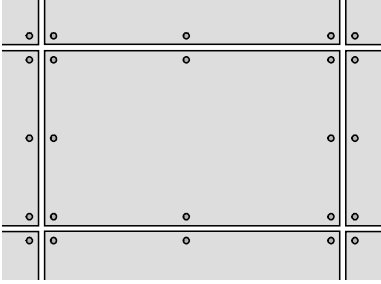
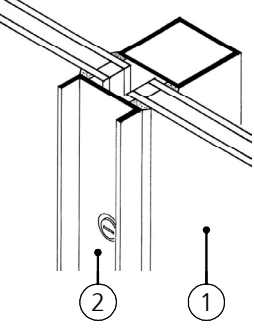
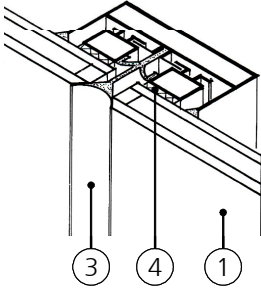
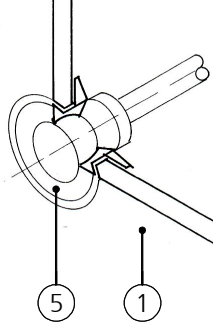
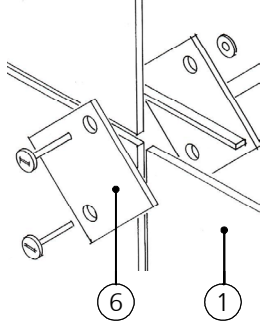
	Linienlagerung		Punktlagerung	
Haltebereich				
	Leiste ¹	Klebung (SSG ²)	In Glasfläche	An Glaskanten
Befestigungsart				
	① Glaselement ② Glashalteleiste (Außenseite) ③ Fugendichtung		④ Klebestelle ⑤ Punkthalterung in Glasfläche	⑥ Klemmhalterung an Glaskanten
	1 Pfosten-Riegel-Fassade 2 Structural Sealant Glazing / Ganzglasfassade			

Abbildung 2-4: Lagerungsarten von Glaselementen (Knaak, 1998)

2.2 Stand der Technik

2.2.1 Allgemeine Anwendungsgebiete von Kletterrobotern

Das linke Diagramm der Abbildung 2-5 zeigt die Verteilung bestehender Kletterroboter auf die einzelnen bestehenden Hauptanwendungsgebiete. Die Anwendungsgebiete teilen sich auf in Bauwerke (Glasfassaden, Brücken, Kernkraftwerke und Öltanks) und Fortbewegungsmittel (Schiffe und Flugzeuge). Die Verteilung basiert auf einer Anzahl von 53 Kletterrobotern. Die Hälfte dieser Kletterroboter wird für den Einsatz auf Glasfassaden gebaut. Dies begründet sich auf

- dem hohen Einsatzpotenzial für Kletterroboter durch die überwiegend regelmäßigen Strukturen der Fassadenoberflächen,
- dem hohen Bedarf an dort durchzuführenden Routinearbeiten (AGI, 1993) sowie
- der großen und stetig steigenden Anzahl an Glasfassaden (Küffner, 2000).

Bei richtungweisenden Architekten sind Glasflächen das dominante Gestaltungselement und werden weltweit in zunehmendem Maße realisiert. Ein Viertel aller Kletterroboter wird derzeit ohne spezielle Zuordnung zu einem Einsatzgebiet gebaut. Hier handelt es sich fast ausschließ-

lich um Forschungsdemonstratoren, die zur Untersuchung neuer Kletter- und Halteprinzipien sowie zur Entwicklung neuer Steuerungsverfahren aufgebaut werden (Schmierer, 2001).

2.2.2 Aufgaben von Kletterrobotern

Abbildung 2-5 zeigt im rechten Diagramm die Verteilung bestehender Kletterroboter auf die in den vorigen Abschnitten dargestellten Anwendungsgebieten zu verrichtenden Aufgaben. Die primären Aufgaben von Kletterrobotern sind die Reinigung und die Inspektion, gefolgt von Wartung und der Unterstützung von Rettung und Bergung. 90 Prozent aller für den Einsatz auf Glasfassaden entwickelten Roboter sind für die Reinigung vorgesehen. 20 Prozent aller für den Einsatz auf Glasfassaden entwickelten Roboter sehen die zusätzliche Integration von Applikationen für Inspektionsarbeiten vor.

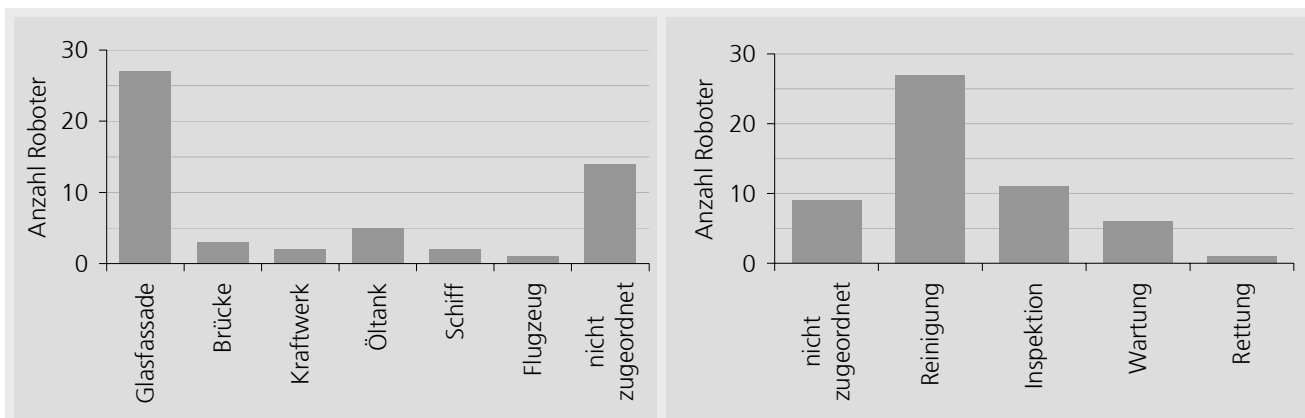


Abbildung 2-5: Verteilung von Kletterrobotern auf die unterschiedlichen Aufgaben auf der Basis einer Anzahl von 53 Kletterrobotern (Simons, 2004)

2.2.3 Allgemeine Vortriebsprinzipien von Kletterrobotern

In Abbildung 2-6 sind die existierenden Vortriebsprinzipien für Kletterroboter zur Befahrung geneigter oder senkrechter Oberflächen dargestellt und beschrieben. Diese Prinzipien sind unabhängig von der Struktur und der materiellen Beschaffenheit der zu befahrenden Oberfläche.

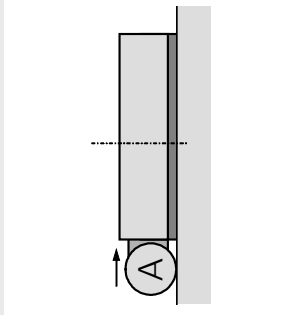
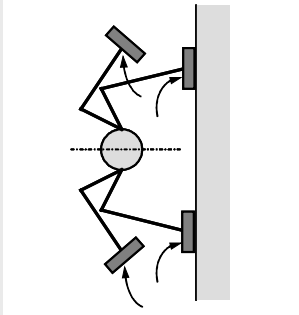
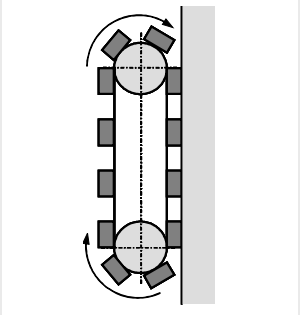
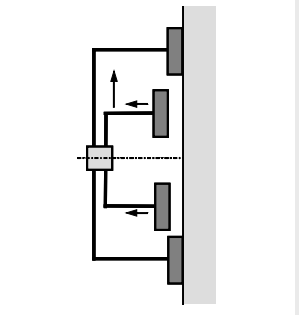
	Gleitender Greifer	Vielbeiner	Umlaufende Greifer (Raupe)	Gleitrahmen
Darstellung				
Beschreibung	Ein Halteelement führt mittels einer Vortriebsseinheit (A) über seine Auflagefläche eine gleitende Bewegung aus (Berns, 2001).	Eine definierte Anzahl an Halte-Modulen (i.d.R. 4, 6 oder 8) an mehrachsigen Beinen erzeugen eine Schrittbewegung (Berns, 1999).	Eine an einer umlaufenden Führungseinheit befestigte definierte Anzahl an Halte-Modulen erzeugt eine Schrittbewegung (Schraft, 2003d; Fraunhofer, 2002).	Zwei gegeneinander verschiebbliche Rahmen mit heb- und absenk- baren Halte-Modulen erzeugen eine Schrittbewegung (Schmierer, 2001).
Eigenschaften	<ul style="list-style-type: none"> • hohe Wendigkeit • kontinuierliche Bewegung möglich • minimaler technischer Aufwand • geringer Steuerungsaufwand • Energiebedarf abhängig von Reibpaarung • schlechte Hindernisüberwindung¹ • Abstand Grundkörper-Fassade ist immer konstant 	<ul style="list-style-type: none"> • hohe Wendigkeit • hohe Bewegun- flexibilität des Grundkörpers • gute Hindernis- überwindung • kontinuierliche Bewegung möglich • hoher Energiebedarf • hoher techn. Aufwand • hoher Steuerungs- aufwand • geringe Geschwindigkeit (Nishi, 1993) 	<ul style="list-style-type: none"> • kontinuierliche Bewegung möglich • geringer techn. Aufwand • geringer Steuerungs- aufwand • Überwindung von niedrigen Hindernissen • geringer Energiebedarf • geringe Wendigkeit • Abstand Grundkörper- Fassade ist immer konstant 	<ul style="list-style-type: none"> • gute Hindernis- überwindung • hohe Wendigkeit • geringer techn. Aufwand • geringer Steuerungs- aufwand • nur schrittweise Bewegung möglich • hoher Energiebedarf
1 Möglichkeiten zur Hindernisüberwindung stark abhängig von eingesetztem Halteprinzip.				

Abbildung 2-6: Vortriebsprinzipien für Kletterroboter zur Befahrung geneigter bzw. senkrechter Oberflächen

2.2.4 Halteprinzipien von Kletterrobotern für die Befahrung von Glasfassaden

Zur Befahrung geneigter oder senkrechter Oberflächen existieren für Kletterroboter je nach Oberflächenbeschaffenheit die Halteprinzipien Formschluss, Kraftschluss, Magnetismus, Unterdruck, Vertikalschub und Adhäsion. Für formschlüssiges und kraftschlüssiges Halten muss die zu befahrende Oberfläche hierbei entsprechend geformte Strukturen aufweisen.

Glasfassaden weisen eine glatte, nicht-magnetische Oberfläche auf. Solche Oberflächen können nur mit den vier in Abbildung 2-7 dargestellten Halteprinzipien Unterdruck, Magnet und Gegenmagnet, Vertikalschub und Adhäsion befahren werden (Bahr, 1994). Hierbei ist der Unterdruck nach dem heutigen Stand der Technik das einzige Halteprinzip mit Praxisrelevanz für die Befahrung von Glasfassaden. Dies begründet sich auf

- dem geringen technischen Aufwand,
- dem großen auf dem Markt vorhandenen und preisgünstigen Produktspektrum an Sauggreifern,
- der hohen Flexibilität bezüglich unterschiedlicher Oberflächen sowie
- der Kombinationsmöglichkeit mit allen existierenden Arten von Vortriebsprinzipien für Kletterroboter (Simons, 2002; Simons, 2003c).

Aufgrund dieser Eigenschaften ist der Unterdruck das bevorzugt eingesetzte Halteprinzip im Bereich der Kletterrobotik (Schmierer, 2001). Die für dieses Prinzip eingesetzten Sauggreifer können aktiv oder passiv betrieben werden. Im aktiven Betrieb wird die Haltekraft durch eine Vakuumpumpe, einen Ejektor, ein Gebläse oder einen Druckspeicher erzeugt. Im passiven Betrieb wird die Haltekraft allein durch Andrücken der elastischen Dichtlippe an die Oberfläche erzeugt.

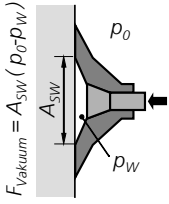
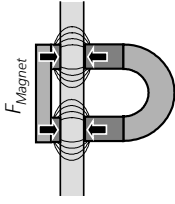
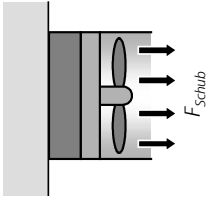
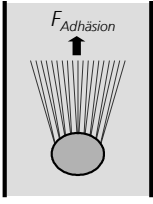
	Druckdifferenz (Sauggreifer)	Gegenmagnet	Vertikalschub	Adhäsion (Geckoeffekt)
Darstellung				
Beschreibung	Über die Druckdifferenz $p_0 - p_1$ zwischen einer Saugkammer und der Umgebung wird über die Fläche A_{SW} die Haltekraft F_{Vakuum} erzeugt.	Ein Magnet und ein ferromagnetisches Element sind auf gegenüberliegenden Seiten der Oberfläche angeordnet. Ihre magnetischen Anziehungskräfte erzeugen die Haltekraft F_{Magnet} .	Ein über eine Düse erzeugter vertikaler Luftstrom senkrecht zur Oberfläche erzeugt die Haltekraft F_{Schub} (Rachkov, 2002; Nishi, 1996).	Mikroskopisch feine Härchen haften über intermolekulare Kräfte an den Oberflächenmolekülen der Oberfläche und erzeugen so die Haltekraft $F_{Adhäsion}$ (Autumn, 1999).
Eigenschaften	<ul style="list-style-type: none"> • geringer technischer Aufwand • geringes Gewicht • aktiver und passiver Betrieb möglich • im aktiven Betrieb auch auf porösen Oberflächen einsetzbar • im passiven Betrieb nur auf sehr glatten Oberflächen einsetzbar 	<ul style="list-style-type: none"> • geringer technischer Aufwand • hohes Gewicht • mit Permanentmagnet oder elektrischem Magnet realisierbar • Betrieb nur mit Gleitbewegung möglich • keine Hindernisse auf beiden Seiten des Glaselementes 	<ul style="list-style-type: none"> • auch auf porösen Oberflächen einsetzbar • hohes Gewicht • hoher technischer Aufwand • hoher Energiebedarf 	<ul style="list-style-type: none"> • auch auf porösen Oberflächen einsetzbar • geringer Energiebedarf • geringes Gewicht • Halteprinzip im Forschungsstadium und derzeit nicht käuflich erwerbbar

Abbildung 2-7: Halteprinzipien für Kletterroboter zur Befahrung glatter, geneigter Oberflächen

2.2.5 Durchgeführte Untersuchungen an Sauggreifern

Milberg leitet allgemeine Regeln für die Auslegung und Auswahl von Sauggreifern her (Milberg, 1992). Hierbei werden die wichtigen zu berücksichtigenden Parameter dargestellt sowie technische Maßnahmen zum Ausgleich von Leckströmen hergeleitet.

Detaillierte Untersuchungen und Berechnungsgrundlagen existieren insbesondere für das Verhalten von Sauggreifern unter Zuglast. Das von Becker entwickelte Kräftemodell erlaubt die

Ermittlung der maximalen Kraftaufnahme von Einzelsauggreifern für unterschiedliche Oberflächenrauigkeiten und -formen (Becker, 1993). Untersuchungen zur Bestimmung der unter Zuglast auftretenden Verformungen der Dichtungslippe wurden mit Hilfe der Finiten Elemente Methode am Querschnitt eines Sauggreifers durchgeführt (Horak, 2002; Horak, 2003; Liu, 2002; Schleth, 2002). Letztere beiden leiten Optimierungspotenziale für die Gestaltung von Sauggreifern ab. Schumann untersucht den in der Druckindustrie auftretenden Prozess der pneumatischen Weitergabe eines Papierbogens von einem rotierenden Zylinder zum nächsten (Schumann, 1996). Hierbei springt der Papierbogen von einem Sauggreifer zu einem gegenüber angeordneten Sauggreifer. Die Anhaftvorgänge werden jedoch nicht näher betrachtet und analysiert.

Radtke stellt erste Untersuchungen des Verhaltens von Sauggreifern unter Kippung, Torsion, Zug und Schub vor (Radtke, 1992). Das Ziel der Untersuchungen ist die Aufstellung von Berechnungsgrundlagen zur Ermittlung des Schwingungsverhaltens unter den einzelnen Lastfällen. Hierzu werden die experimentell ermittelten Kraft-Weg-Verläufe der entsprechenden Lastfälle in Form von Federkonstanten zugrunde gelegt. Überlagerungen von Lastfällen wie beispielsweise Zug-Schub werden nicht betrachtet.

Die in diesem Zusammenhang von Schmierer entwickelten Berechnungsgrundlagen zur Ermittlung der Reibungskraft von aktiv betriebenen Sauggreifern mit Reibungseinlage und Dichtkante ermöglichen die Berechnung der maximal aufnehmbaren Schublast unter gegebener Zuglast (Schmierer, 2001).

	Untersuchter Lastfall			Untersuchung		Ergebnisse		Sauggreifer-Betrieb	
	Zug	Schub	Zug + Schub	Experimentell	Berechnungsmodell	Abrissverhalten	Kraft-Weg-Charakteristik	aktiv	passiv
(Becker, 1993)	●			●	●	●		●	
(Horak, 2002)	●			●	●	●		●	
(Liu, 2002)	●			●	●	●	●	●	
(Milberg, 1992)								●	
(Radtke, 1992)	●	●		●		●	●	●	
(Schleth, 2002)	●			●	●	●	●	●	
(Schmierer, 2001)			●	●	●	●		●	
(Schumann, 1996)	●			●				●	
	● Untersuchungen durchgeführt								

Abbildung 2-8: Durchgeführte Untersuchungen an Sauggreifern

Abbildung 2-8 zeigt eine Übersicht der oben beschriebenen durchgeführten Untersuchungen an Sauggreifern. Ein durch Experimente verifiziertes Berechnungsmodell zur Ermittlung der Kraft-Weg-Charakteristik unter Schublast in Abhängigkeit einer sich überlagernden Zuglast existiert demnach insbesondere für passiv betriebene Sauggreifer nicht.

2.2.6 Bauarten von Fassadenkletterrobotern

Kletterroboter für den Einsatz auf Glasfassaden unterscheiden sich in Struktur gebundene Roboter, abgehängte Roboter und frei kletternde Roboter (Bräuning, 2003).

Struktur gebundene Kletterroboter nutzen an der zu befahrenden Oberfläche herausragende Profile und Tragwerkselemente sowie Hinterschneidungen in Fassaden zum form- und kraftschlüssigen Halten. Die Halteelemente des Roboters müssen auf die Geometrie der Fassadenstrukturen angepasst sein. Der Kurs und der auf der Fassade befahrbare Bereich solcher Roboter sind von der Anordnung der Fassadenstrukturen vorgegeben. Ein Beispiel hierfür ist ein von der BeiHang Universität in China für das National Grand Theater of China entwickelter Fassadenreinigungsroboter. Dieser verfährt auf horizontalen durchgehenden Fassadenprofilen und kann über einen Gleitrahmen in vertikaler Richtung von Profil zu Profil wechseln (Liu, 2003).

Abgehängte Roboter werden an Seilen von einem auf dem Dach des Gebäudes installierten Dachkran getragen. Dieser Dachkran ist entweder eine als Teil des Gebäudes fest installierte Einheit oder eine transportierbare, auf unterschiedlichen Gebäuden einsetzbare und zum Roboter zugehörige Einheit. Der Dachkran ist längs der Oberkante der Fassade verfahrbar und kann somit das System in vertikaler und horizontaler Richtung auf der Fassade navigieren. Üblicherweise besitzen die Roboter zusätzlich Vakuumbreifer, um Windlasten und die aus dem entsprechenden Arbeitsvorgang entstehenden Reaktionskräfte aufzunehmen. Der Vorteil dieser Roboter ist die geringe Belastung der Glaselemente einer Fassade, da das gesamte Robotergewicht vom Dachkran getragen wird. Damit sind sie jedoch beschränkt auf Gebäude mit entsprechenden Möglichkeiten zur Installation eines Dachkrans. Mit diesem System bekannte und in der Praxis eingesetzte Roboter sind der von der Universität in New Castle in England entwickelte Arcow, der vom Fraunhofer IFF in Magdeburg entwickelte und erfolgreich an den Fassaden der Messe Leipzig eingesetzte Sirius und der von der israelischen Firma SkyBot entwickelte gleichnamige Roboter (Arcow, 2003; Elkmann, 2001; Elkmann, 2002; SkyBot, 2003).

Frei kletternde Roboter können sich vorzugsweise über Unterdruck mit ihren Halteelementen direkt auf der Fassadenoberfläche festhalten. Auf diese Weise sind sie unabhängig von fest vorgegebenen Strukturen oder Bewegungsgrenzen von Dachkränen und können frei auf der Fassade navigieren. Solche Roboter benötigen demnach keine gebäudeseitigen Modifikationen und lassen sich mit geringem Aufwand vom Boden oder vom Dach des Gebäudes an der Fassade installieren und deinstallieren. Das Gewicht der Roboter muss von den Glaselementen aufgenommen werden, welche die Last in das Fassadentragwerk einleiten. Eine von der japanischen Firma UNIVACS entwickelte Raupe mit aktiv betriebenen Saugelementen wurde bis zum Jahre 2003 eingesetzt, um die Glaspyramide des Louvre in Paris zu reinigen (UNIVACS, 2003). Der von der israelischen Firma SmartRobotics entwickelte WinBot ist der Prototyp eines Roboters zur Befahrung und Reinigung einzelner Fensterscheiben (SmartRobotics, 2002). WinBot hält sich ebenfalls über Unterdruck an der Oberfläche fest und nutzt zum Vortrieb das Prinzip des gleitenden Greifers.

Die pneumatische und elektrische Energieversorgung der Roboter geschieht entweder von einer Basisstation über eine Zuleitung (Nabelschnur) oder über einen an Bord des Roboters befindlichen Energiespeicher.

Name	Firma	Gewicht [kg]	Abmaße (B x H x T) [m]	Vortriebs- prinzip ¹	Halteprinzip ²	Nabelschnur	Klettertyp ³
Auto-Climber	BeiHang Univ. (China)	100*	3,0 x 1,5 x 0,5	GR	FS	ja	Sg
Jatex	UNIVACS (D)	50	1,2 x 1,0 x 0,4	UG	VK _A	ja	Fk
Arcow	Univ. New Castle (GB)	80*	3,0 x 1,5 x 0,8*	UG	FS	ja	Dk
CleanAnt	Niederberger (A)	80	0,8 x 1,6 x 0,6	VB	VK _A	ja	Fk
Comet	Comatec (F)	k.A.	k.A.	UG	VK _A	ja	Fk
DEXTER	Univ. Lübeck (D)	3,7	0,33 x 0,23 x 0,13	VB	VK _P	nein	Fk
Fraunhofer ZV	Fraunhofer IFF (D)	300	3,0 x 1,8 x 0,7	GR	VK _A	ja	Dk
Lehrter Bhf.**	Fraunhofer IPA (D)	1400	14 x 1,5 x 0,5	UG	FS	ja	Sg
Louvre (1)	UNIVACS (J)	40	0,8 x 1,0 x 0,3*	UG	VK _A	ja	Fk
Max V	FH Aalen (D)	25	0,35 x 0,7 x 0,4	UG	VK _A	ja	Fk
Millepede	Fraunhofer IPA (D)	7	0,2 x 0,8 x 0,15	UG	VK _P	ja	Fk
Minicleaner	UNIVACS (J)	6	0,2 x 0,6 x 0,2*	GG	VK _A	ja	Fk
P&C Köln**	Fraunhofer IPA (D)	110	1,2 x 1,8 x 0,4	UG	FS	nein	Sg
Ratio Forem	TITO 500 (ES)	200	1,6 x 1,4 x 0,6	GR	VK _A	ja	Dk
Sirius	Fraunhofer IFF (D)	200	1,5 x 1,5 x 0,35	GR	--	ja	Dk
SkyBot	SkyBot (Israel)	300	2,0 x 1,0 x 0,8*	GR	VK _A	ja	Dk
SkyBoy	BeiHang Univ. (China)	150	1,5 x 0,5 x 1,5	UG	FS	ja	Dk
SkyCleaner3	BeiHang Univ. (China)	45	0,7 x 1,1 x 0,4	GR	VK _A	ja	Fk
WinBot	SmartRobotics (Israel)	4	0,3 x 0,2 x 0,15*	GG	VK _A	ja	Fk
Louvre (2)	Robosoft (F)	50	0,9 x 0,35 x 1,2	UG	VK _A	ja	Fk
* geschätzt ** Konzept k.A. keine Angabe	1 GG Gleitender Greifer UG Umlaufender Greifer GR Gleitrahmen VB Vielbeiner	2 VK _A Vakuum aktiv VK _P Vakuum passiv FS Formschluss	3 Dk Dachkran Sg strukturgebunden Fk frei kletternd				

Abbildung 2-9: Auswahl von Kletterrobotern für den Einsatz auf Glasfassaden (Simons, 2004)

2.2.7 Glaseigenschaften und Verglasungsarten

Floatglas ist das heute am meisten verwendete Bauglas und stellt das Basisprodukt für die Weiterverarbeitung zu vorgespannten Gläsern, wie das Einscheibensicherheitsglas (ESG) und das Teilvorgespannte Glas (TVG), sowie zu Verbundgläsern und Isoliergläsern dar.

ESG und TVG werden durch Wärmebehandlung in einen Eigenspannungszustand versetzt, der im Glasinneren Zugspannung und auf der Glasoberfläche Druckspannung erzeugt. Dies bewirkt, dass ein festigkeitsmindernder Einfluss von Oberflächenschäden erst dann zum Tragen kommt, wenn zusätzliche äußere Lasten die Glasoberfläche vom Druckzustand in den Zugzustand überführen. Dies führt gegenüber unbehandeltem Floatglas auch zu einer erhöhten Temperaturwechselbeständigkeit, Biegefestigkeit und Biegezugfestigkeit (siehe Abbildung 2-10). Bei ESG hat die gegenüber TVG höhere Vorspannung den zusätzlichen Vorteil, dass eine gebrochene Scheibe in viele kleine stumpfe Bruchstücke zerfällt.

Bezeichnung	Einheit	Floatglas	ESG	TVG
Dichte	[kg/m ³]	2500	2500	2500
Härte	[Mohs]	6	-	-
E-Modul	[N/mm ²]	70000	70000	70000
Druckfestigkeit	[N/mm ²]	700 bis 900	700 bis 900	700 bis 900
Biegefestigkeit	[N/mm ²]	45	120	70
Biegezugfestigkeit	[N/mm ²]	120 bis 180	500	290 bis 300
Temperaturwechselbeständigkeit	[°K]	40	200	100

Abbildung 2-10: Materialkennwerte von Floatglas, Einscheibensicherheitsglas und Teilvorgespanntem Glas (AGI, 2003; Schittich, 1998; Xiaofeng, 1997; Techen, 1997)

TVG wird primär zu Verbundsicherheitsglas (VSG) verarbeitet. Dieses besteht aus mindestens zwei Glaselementen mit einer eingeklebten 0,38 mm dicken, elastischen und reißfesten Hochpolymerfolie. Beim Bruch eines Glaselementes aus VSG bleiben die Bruchstücke an der Folie haften, was das Verletzungsrisiko vermindert und insbesondere durch die Verzahnung der Bruchstücke eine Resttragfähigkeit des Glaselementes ermöglicht. Bei Überkopferverglasungen muss VSG eingesetzt werden. Bei punktgelagerten Vertikalverglasungen hält VSG zunehmend Einzug.

Verbundglas (VG) ist eine Variation des VSG. Der Aufbau ist gleich, jedoch werden statt der Hochpolymerfolie bevorzugt Reaktionsharze mit Dicken von 1 bis 4 mm verwendet. VG hat gegenüber VSG Vorteile bei der Verarbeitung und ermöglicht beispielsweise über die Eigenschaften der Harze die Minimierung von Toleranzen bei Bohrungen an langen schmalen Gläsern. Da weiterhin die Harze in ihrer Zusammensetzung auf definierte Frequenzbereiche eingestellt werden können, wird Verbundglas bevorzugt zur Herstellung von Schallschutzgläsern verwendet (Baunetz, 2004).

2.3 Entwicklungstendenzen bei Kletterrobotern für Glasfassaden

Aus dem Stand der Technik wird deutlich, dass die Glasfassade für Kletterroboter das Einsatzszenario mit der höchsten Praxisrelevanz ist. Dies wird unterstrichen durch die Tatsache, dass die Hälfte aller nach dem Stand der Technik bestehenden Kletterroboter für den Einsatz auf der Außenhülle von Glasfassaden entwickelt wurde. Aus Anwendersicht besteht daher aus wirtschaftlichen Gründen großes Interesse an der universellen und flexiblen Einsetzbarkeit solcher Kletterroboter.

Der Grad der Flexibilität und der Universalität für den Einsatz von Kletterrobotern auf Glasfassaden wird vorrangig bestimmt durch die auf den zu befahrenden Oberflächen vorhandenen Strukturen. Glasfassaden unterscheiden sich in den Fassadentyp mit außen liegenden

und den Fassadentyp mit innen liegenden tragenden Strukturen. Fassadentypen mit außen liegenden tragenden Strukturen bieten Konzeptionsraum insbesondere für formschlüssiges Halten und Bewegen für strukturgebundene Kletterroboter. Jedoch unterscheiden sich die Strukturformen, -Anordnungen und -Orientierungen der verschiedenen Fassadentypen voneinander, so dass sowohl das Halte- und Vortriebsprinzip als auch die geometrische Gestaltung der Halteelemente für jede Fassade speziell konzipiert werden muss. Dies gilt in diesem Bereich auch für Roboter an Dachkränen und frei kletternde Roboter. Weiterhin müssen die Fassadenstrukturen ihrerseits auch an die Halte- und Vortriebsysteme des jeweiligen Roboters angepasst werden, was insbesondere bei bereits bestehenden Gebäuden mit hohen Kosten verbunden ist. Der Zeitpunkt der Konzeption insbesondere strukturgebundener Kletterroboter ist deshalb eine elementare Einflussgröße auf die Entwicklungskosten. Vor allem zur lasttechnischen Anpassung und zur Bereitstellung der geeigneten eventuell notwendigen mechanischen und energetischen Schnittstellen ist die konzeptionelle Integration des Roboters an die jeweilige Fassade bereits während der Planungsphase des Gebäudes von zentraler Bedeutung (Simons, 2003a; Weisse, 2001; Küffner, 2000). Daher ist zu erwarten, dass Standardgeräte für den Einsatz auf unterschiedlichen Fassaden und damit ein wirtschaftlicher Einsatz von Kletterrobotern auf Fassaden mit außen liegenden Strukturen somit nur schwer realisierbar sind.

Glasfassaden mit innen liegenden tragenden Strukturen hingegen erzeugen plane und optisch durchgängige Glasflächen ohne Hindernisse. Die einzelnen Glaselemente sind lediglich durch Fugen voneinander getrennt. Die einheitliche Gestalt dieser Fassaden ist die Basis für die Entwicklung standardisierter Kletterroboter. Dies ermöglicht die Realisierung von auf solchen Fassaden universell und damit wirtschaftlich einsetzbaren Fassadenkletterrobotern. Der Einsatz von Kletterrobotern an Dachkränen ist prinzipiell möglich, diese müssen jedoch jeweils an die nicht standardisierten Dachkräne angepasst werden und sind demnach begrenzt auf Gebäude mit dementsprechenden Installationen. Aus diesem Grund zeigt sich eine steigende Tendenz in die Entwicklung frei kletternder und dadurch möglichst universell auf Glasfassaden einsetzbarer Kletterroboter.

2.4 Schlussfolgerungen aus dem Stand der Technik

Für frei kletternde Roboter auf Glasfassaden ist nach dem Stand der Technik der Unterdruck als Halteprinzip die einzige Variante mit Praxisrelevanz, wobei hier Roboter mit aktiv betriebenen Sauggreifern das Feld dominieren (Abbildung 2-9 und Schmierer, 2001). Insbesondere für die Aufbringung der für die aktiv betriebenen Sauggreifer notwendigen pneumatischen Energie zur Überwindung mehrerer Stockwerke besitzen die existierenden Entwicklungen frei kletternder Roboter jedoch immer eine Nabelschnur zu ihrer Bodenstation und sind daher in ihrer Reichweite und Beweglichkeitsflexibilität eingeschränkt.

Beim passiven Betrieb von Sauggreifern kann auf von außen zugeführte pneumatische Energie verzichtet werden. So ist zu erwarten, dass damit die Entwicklung von Kletterrobotern ohne Nabelschnur möglich ist. Zum Einsatz von Kletterrobotern mit einem Haltesystem, das auf dem Wirkprinzip passiv betriebener Sauggreifer basiert, existieren jedoch noch keine ausreichenden wissenschaftliche Erkenntnisse und Berechnungsgrundlagen über

- ein geeignetes Vortriebs- und Lenksystem für den praktischen Einsatz auf Glasfassaden,
- eine für das Wirkprinzip der passiv betriebenen Sauggreifer geeignete Mechanik des Wirkantriebes,
- die bei einem solchen Klettersystem während des Klettervorganges an den passiv betriebenen Sauggreifern angreifenden Schub- und Zugkräfte und

- das Verhalten passiv betriebener Sauggreifer unter Einwirkung dieser Kräfte (siehe Abbildung 2-8).

In den folgenden Kapiteln werden daher die Anforderungen an ein Klettersystem für die Befahrung von Glasfassaden definiert und die Konzeption seiner Teilsysteme Halten, Vortrieb und Lenken durchgeführt. Für dieses Klettersystem wird ein Verfahren zur Berechnung der Kräfte auf die Sauggreifer sowie Berechnungsgrundlagen zur Bestimmung des Verhaltens der Sauggreifer unter diesen Kräften entwickelt.

3 Analyse von potenziellen Einsatzszenarien, des Produktspektrums passiv betriebener Sauggreifer sowie des Bewegungsablaufes von Kletterrobotern und Ableitung von Anforderungen

3.1 Analyse des Einsatzszenarios der Glasfassade für den Einsatz von Kletterrobotern

Je nach Standort sollten die Glasfassaden von Gebäuden alle 2 bis 4 Monate gereinigt werden (Lutz, 1985). Zum einen dient dies der Erhaltung der Transparenz des Glases. Dies wiederum dient der Erhaltung des Erscheinungsbildes und führt in der kalten Jahreszeit durch ungehinderte Sonneneinstrahlung zu einer Verbesserung der Energiebilanz des Gebäudes (Küffner, 2000). Zum anderen trägt die Reinigung zur Verlängerung der Lebensdauer der Fassade bei und gehört somit als Wartungsmaßnahme zur Instandhaltung (AGI, 1993).

Noch vor wenigen Jahren wurde davon ausgegangen, dass Fassaden dauerhaft und wartungsfrei konstruiert sind. Bei einer empfohlenen Nutzungsdauer von 30 bis 50 Jahren waren Wartungsmaßnahmen daher bei Fassaden bisher nicht üblich (Küffner, 2000). Es konnte jedoch nachgewiesen werden, dass Reinigung und Konservierung im Intervall von 1 bis 3 Jahren die Lebensdauer von Glasfassaden erheblich verlängern können. Ein großes Hindernis zur Durchführung dieser Arbeiten stellt jedoch die Unzugänglichkeit vieler Fassaden und einzelner zu wartender Bauteile und der dadurch hohe Aufwand von Wartungsmaßnahmen dar (AGI 1993). Unter der Annahme einer durchschnittlichen Nutzung von 30 Jahren, beträgt der Anteil der Kosten für Reinigung, Instandsetzung, Hausmeisterdienste, Wartung, Sicherheit etc. gemessen an den Gesamtkosten ca. 90 Prozent. Der Anteil der Entstehungskosten beträgt nur 10 Prozent (Getfix, 2003). Nach der DIN 276 beträgt hierbei die Kostenspanne für die durchschnittlichen Außenwandkosten 250 bis 900 Euro pro Quadratmeter Außenwandfläche. Für Reinigungskosten entfallen hier 1,60 bis 3,20 Euro und für Inspektions- und Wartungskosten je nach Ausstattungsgrad bis zu 2,30 Euro pro Quadratmeter Außenwandfläche (Zadow, 2003). Zur Sicherung von Kosten- und Servicevorteilen ist ein ganzheitliches Facility Management Konzept notwendig. In diesem Kontext ist daher insbesondere bei hohen Gebäuden mit großen Fassadenflächen und der in Kapitel 2.2.7 identifizierten Bauweise mit innen liegenden tragenden Strukturen der Einsatz von Kletterrobotern sinnvoll. Weltweit existieren ca. 45.000 Gebäude mit Glasfassaden. Ein Zehntel davon weist eine Höhe von über 200 m auf. Ein Fünftel dieser Gebäude ist zwischen 100 m und 200 m hoch. Der größte Anteil (70 Prozent) liegt zwischen einer Höhe von 20 m bis 100 m (Simons, 2004).

Der im Rahmen der Instandhaltung von Fassaden der Wartung vorgeschaltete Prozess stellt die Inspektion dar. In Abbildung 3-1 sind die Arten der an Fassaden durchzuführenden Prüfungen beschrieben. Neben der Reinigung prädestinieren sich insbesondere die visuelle Prüfung und die bei Bedarf hiermit verbundene zerstörungsfreie Oberflächenprüfung als Aufgabenstellungen für Fassadenkletterroboter: diese beiden Prüfungen müssen flächendeckend sowie in kurzen Zeitintervallen von etwa einem Jahr durchgeführt werden. Weiterhin sind die Arbeitsgänge mit den auf dem Markt erhältlichen Sensoren und Prüfwerkzeugen routineartige und einfach vorprogrammierbare Prozesse.

	Prüfintervall	Prüfbereich	Werkzeug/ Methode	Prüfungsgegenstand
Visuelle Prüfung	Kurze Zeitintervalle von ca. 1 Jahr	Gesamte Fassaden- fläche	<ul style="list-style-type: none"> •Feldstecher •Foto- aufnahmen 	<ul style="list-style-type: none"> •Isolier- und Sonnenschutzverglasung •Korrosion •Fugenschäden
Oberflächen- prüfung	Ergänzung zur visuellen Prüfung	Stichproben- artig	<ul style="list-style-type: none"> •Rückprall- hammer •Schichtdicken- messung 	<ul style="list-style-type: none"> •Festigkeit •Korrosionsschutz •Fugenstruktur
Proben- entnahme	Bei akutem Bedarf (nach zerstörungs- freier Prüfung)	Schadhafte Stellen und Bereiche mit Schadens- potenzial	<ul style="list-style-type: none"> •Entnahme- werkzeuge 	<ul style="list-style-type: none"> •Festigkeit •Werkstoffgüte •Schadstoffanreicherung •Haftverbund
Tragwerks- prüfung	Alle 10 bis 15 Jahre oder bei akutem Bedarf	Stichproben- artig bzw. gezielt	<ul style="list-style-type: none"> •Demontage von Bau- elementen •Endoskopie 	<ul style="list-style-type: none"> •Werkstoffzustand •Korrosionsschutz •Dimensionierung der Unterkonstruktion

Abbildung 3-1: *Wartung von Bauwerken: Prüfintervalle, Prüfbereiche, Werkzeuge und Methoden (AGI 1993)*

In Sichthöhe des Menschen kann ein auf Glasfassaden operierender Roboter mit einem integrierten Display zusätzlich effektiv als mobiler Werbe- und Informationsträger eingesetzt werden (Fraunhofer, 1999). In Abbildung 3-2 wird das Einsatzszenario der Glasfassade mit innen liegenden tragenden Strukturen zusammengefasst.

	Flachbauten	Hochhäuser
Höhe	$z_{\text{Fassade}} \leq 22 \text{ m}$	$22 \text{ m} \leq z_{\text{Fassade}} \leq 500 \text{ m}$
Bevorzugte Applikationen	<ul style="list-style-type: none"> • Reinigung • Wartung • Inspektion • Werbung 	<ul style="list-style-type: none"> • Reinigung • Wartung • Inspektion
Oberfläche	Rechteckige, ebene und glatte Glaselemente aus mindestens 6 mm dickem Einscheibensicherheitsglas (ESG) (Knaak, 1998)	
Hindernisse	<ul style="list-style-type: none"> • Punktuelle Glashalterungen aus Edelstahl und Aluminium • Fugen zwischen den Glaselementen 	
Steigungen	<ul style="list-style-type: none"> • Vertikalverglasungen • geneigte Verglasungen • Überkopfverglasungen (ab 10° gegen die Vertikale) 	
Umgebungseinflüsse	<ul style="list-style-type: none"> • Windkräfte (DIN 1055) • UV-Einstrahlung • Ozon • Spritzwasser (Regen, gegebenenfalls salzhaltig) • Lufttemperatur (-20°C bis +70°C) • Luftverschmutzung 	
Sicherheitsbestimmungen	<ul style="list-style-type: none"> • VBG 70 (VBG 70) • DIN EN 954-1 (DIN 954) 	

Abbildung 3-2: Eigenschaften des Einsatzszenarios der Glasfassade

3.2 Analyse der Funktionsweise von aktiv und passiv betriebenen Sauggreifern

Ein Sauggreifer besteht aus einer starren oder elastischen Dichteinheit, welche an einem in der Regel mittig angeordneten Adapter befestigt ist (siehe Abbildung 3-3). Der Adapter enthält den Absaugflansch, welcher die mechanische Schnittstelle zum Roboter darstellt und die aktive Absaugung des Gases aus dem Inneren des Sauggreifers ermöglicht. Eine Anschlagfläche begrenzt den Sauggreiferhub beim Ansaugvorgang. Bei Sauggreifern mit elastischen Dichteinheiten kann die Anschlagfläche als Reibungseinheit ausgebildet sein, welche im aktiv angesaugten Zustand des Sauggreifers eine Reibpaarung mit der Oberfläche eingeht. Auf diese Weise lassen sich höhere Scherkräfte aufnehmen.

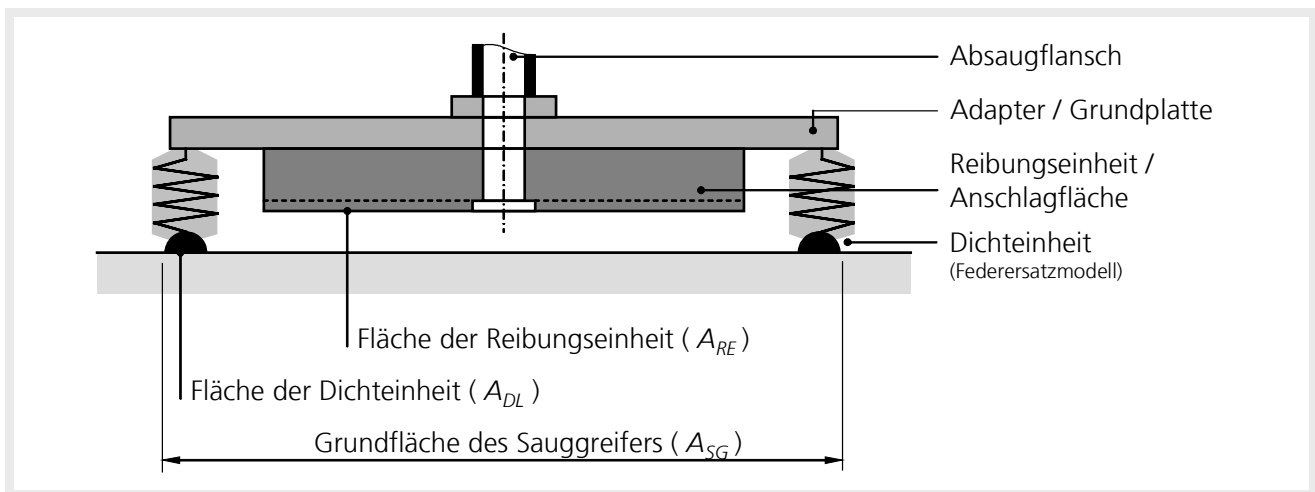


Abbildung 3-3: Modell eines Sauggreifers (Schmierer, 2001)

3.2.1 Funktionsweise eines aktiv betriebenen Sauggreifers

Im aktiven Betrieb wird das Druckniveau im Inneren des Sauggreifers durch eine Pumpe, ein Gebläse, einen Ejektor oder einen Unterdruckspeicher abgesenkt. Diese Wirkungsweise eines Sauggreifers im aktiven Betrieb ist in Abbildung 3-4 dargestellt.

	Darstellung	Beschreibung
Phase 1		<p>Entspannter, unangesaugter Zustand</p> <ul style="list-style-type: none"> • Dichteinheit im entspannten Zustand • Druck im Inneren des Sauggreifers entspricht Umgebungsdruck p_0
Phase 2		<p>Einfedernder, ansaugender Zustand</p> <ul style="list-style-type: none"> • Absaugung von Luft durch den Absaugflansch • Druck erniedrigt sich auf $p_{w1} < p_0$ • Einfedern der Dichteinheit durch entstehenden Druckunterschied Δp_{w1}
Phase 3		<p>Angesaugter Gleichgewichtszustand</p> <ul style="list-style-type: none"> • Absaugung weiterer Luft durch den Absaugflansch • Druck erniedrigt sich weiter auf $p_{w2} < p_{w1}$ • Weiteres Einfedern der Dichteinheit durch Druckunterschied $\Delta p_{w2} > \Delta p_{w1}$ • Kontakt der Anschlagfläche mit der Oberfläche mit der Druckkraft F_N. • Einstellung eines Gleichgewichtes zwischen Druckdifferenz $\Delta p_{w2} = p_0 - p_{w2}$, Federkraft F_{DL} und Druckkraft F_N: $\Delta p_{w2} \cdot (A_{SG} - A_{RE} - A_{DL}) = F_{DL} + F_N$

Abbildung 3-4: Funktionsweise eines aktiv betriebenen Sauggreifers

Im Betriebszustand ist eine an der Grundplatte angreifende Zugkraft stets kleiner als die durch die Druckdifferenz Δp_{w2} erzeugte Druckkraft auf die Anschlagfläche. Entsprechend ist eine an die Grundplatte angreifende Scherkraft stets kleiner als die von der Anschlagfläche aufnehmbare Reibungskraft. Im Betriebszustand hat ein derart ausgebildeter Sauggreifer im aktiven Betrieb also ein annähernd starres Verhalten.

Im aktiven Betrieb ist ein zeitlich unbegrenzter Haftzustand möglich, solange der absaugende Volumenstrom größer ist, als der durch eine Leckage erzeugte Volumenstrom.

3.2.2 Funktionsweise eines passiv betriebenen Sauggreifers

Der passive Betrieb eines Sauggreifers funktioniert nur mit elastischer Dichteinheit. Der Sauggreifer ist eine abgeschlossene Einheit, welche durch eine äußere Druckkraft an die Oberfläche

angedrückt wird. Hierbei entweicht ein Teil des im Inneren des Sauggreifers befindlichen Gases zwischen Dichteinheit und Oberfläche. Nach Wegnahme der Druckkraft federt die Dichteinheit soweit zurück, bis sich der dadurch im Sauggreiferinneren erzeugte Unterdruck im Kräftegleichgewicht mit der Federkraft der Dichteinheit befindet. Durch dieses Rückfedern ist ein Kontakt zwischen einer eventuell integrierten Reibungseinheit und der Oberfläche nicht möglich. Im passiven Betrieb ist der Einsatz von Sauggreifern mit Reibeinheit deshalb nicht sinnvoll. Die Wirkungsweise eines Sauggreifers im passiven Betrieb ist in Abbildung 3-5 dargestellt.

	Darstellung	Beschreibung
Phase 1		<p>Entspannter, unangesaugter Zustand</p> <ul style="list-style-type: none"> • Dichteinheit im entspannten Zustand • Druck im Inneren des Sauggreifers entspricht Umgebungsdruck p_0 • Ursprungsvolumen im Inneren des Sauggreifers ist V_0
Phase 2		<p>Eingefederter, unangesaugter Zustand</p> <ul style="list-style-type: none"> • Einwirkung einer äußeren Andruckkraft F_A • Einfedern der Dichteinheit • Kontakt der Anschlagfläche mit der Oberfläche • Ursprungsvolumen verkleinert sich auf V_1 • Druck erhöht sich auf $p_{w1} > p_0$ • Luft wird dadurch zwischen Oberfläche und Dichteinheit herausgedrückt
Phase 3		<p>Angesaugter Gleichgewichtszustand</p> <ul style="list-style-type: none"> • Wegnahme der äußeren Andruckkraft F_A • Dichteinheit federt zurück • Volumen erhöht sich auf V_2, wobei $V_1 < V_2 < V_0$, Druck vermindert sich dadurch auf $p_{w2} < p_{w1}$ • Einstellung eines Gleichgewichtes zwischen Druckdifferenz $\Delta p_{w2} = p_0 - p_{w2}$ und Federkraft F_{DL} der Dichteinheit • Jede Leckage führt zu Minderung von Δp_{w2}

Abbildung 3-5: Funktionsweise eines passiv betriebenen Sauggreifers

Eine im angesaugten Zustand von außen einwirkende Zugkraft bewirkt durch elastische Verformung eine Erhöhung des Volumens und damit eine weitere Senkung des Druckniveaus im

Sauggreiferinneren. Die Grenze des Betriebszustandes stellt ein durch die Zugkraft erzeugtes Druckniveau dar, bei welchem die Dichteinheit ins Sauggreiferinnere gezogen wird und zum Versagen des Sauggreifers führt. Die an dieser Grenze aufnehmbare Zuglast liegt in jedem Falle niedriger als die maximal aufnehmbare Zuglast des gleichen Sauggreifers im aktiven Betrieb. Bei der Auslegung eines Kletterroboters sollte demnach die Minimierung der Zuglasten auf die einzelnen Sauggreifer angestrebt werden. Eine von außen angreifende Scherkraft wird im Betriebszustand durch die Reibungskraft zwischen Dichteinheit und Oberfläche sowie über die Elastizität der Dichteinheit aufgenommen. Das Verhalten eines Sauggreifers im passiven Betrieb ist also sowohl in Normal- als auch in Scherrichtung elastisch.

Da eine leckagefreie Dichtung zwischen Dichteinheit und Oberfläche in der Realität nicht möglich ist, ist die Haftung von passiv betriebenen Sauggreifern zeitlich begrenzt. Für eine zeitliche unbegrenzte Haftung muss der Sauggreifer in regelmäßigen Abständen durch eine äußere Normalkraft wieder angedrückt werden. Während der Vortriebsbewegung eines Klettersystems wird dieser Vorgang von dem Wirkantrieb des Haltesystems übernommen. Im Stillstand muss ein Klettersystem mit passiv betriebenen Sauggreifern für unbegrenzte Verweildauer auf der Oberfläche eine Vorrichtung besitzen, welche eine zusätzliche aktive Sicherung bietet.

3.2.3 Vergleich des Energiebedarfs bei aktiv und passiv betriebenen Sauggreifern

Sowohl im aktiven als auch im passiven Betrieb bewirkt die im Inneren des Sauggreifers aufzubringende pneumatische Energie die Einfederung der Dichteinheit. Demnach muss bei gleicher Einfederung die zur Erzeugung eines definierten Unterdrucks notwendige Energie sowohl im aktiven als auch im passiven Betrieb den gleichen Betrag haben. Die im passiven Betrieb notwendige Saugkraft kann jedoch direkter erzeugt werden als es der aktive Betrieb zulässt. Daher ist zu erwarten, dass die bereit zu stellende elektrische Energie im passiven Betrieb geringer ist. Abbildung 3-6 verdeutlicht diese Hypothese.

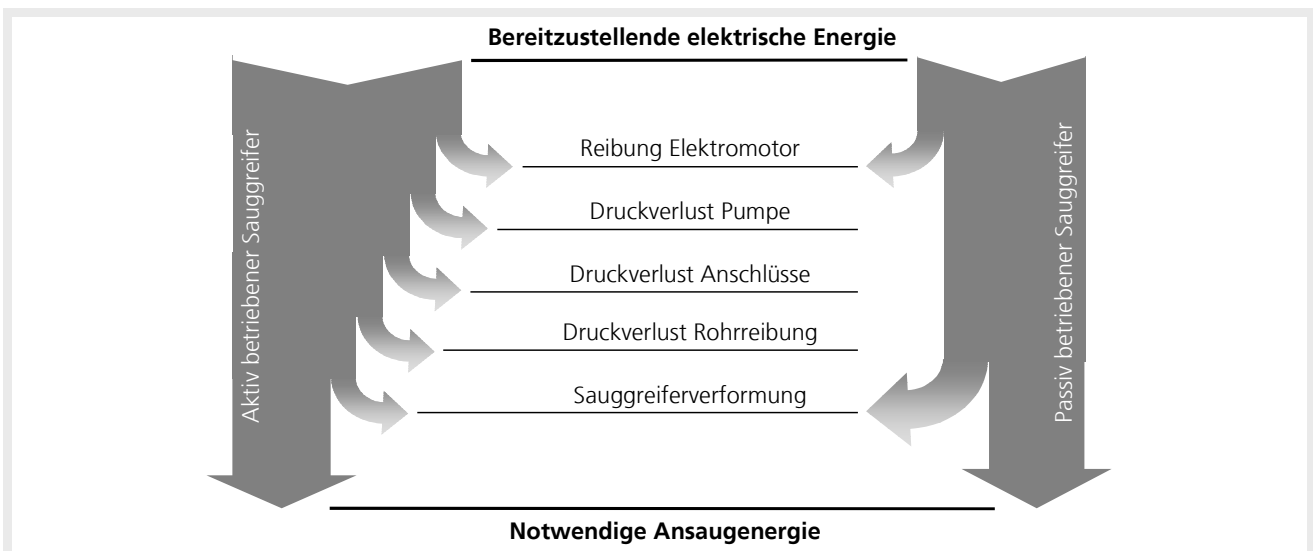


Abbildung 3-6: Vergleich des zur Ansaugung notwendigen Energiebedarfs zwischen aktiv und passiv betriebenen Sauggreifern

Im aktiven Betrieb treibt ein Elektromotor eine Pumpe an, welche das Gas durch Druckleitungen und über pneumatische Anschlüsse aus dem Sauggreifer absaugt. An jeder dieser Einheiten wird ein Teil der bereitgestellten Energie durch Reibung oder Leckage in Wärme umgewandelt und steht somit nicht mehr für das Ansaugen des Sauggreifers zur Verfügung. Im passiven Betrieb kann die Saugkraft direkt über einen elektrischen Aktor erzeugt werden. Der Betrag der notwendigen Energie zum vollständigen Ansaugen eines Sauggreifers richtet sich dabei im aktiven und im passiven Betrieb nach der Federsteifigkeit der Dichteinheit. Für

einen geringen Energiebedarf während des Ansaugprozesses muss eine Dichteinheit mit geringer Federsteifigkeit gewählt werden.

3.3 Analyse des Produktspektrums von Sauggreifern hinsichtlich eines passiven Einsatzes

3.3.1 Bauarten von Sauggreifern und ihre Tauglichkeit hinsichtlich eines passiven Einsatzes

Sauggreifer unterscheiden sich durch Art und Material ihrer Dichteinheit sowie der Geometrie ihrer Grundfläche. Zur Erhöhung der Reibungskraft bei Einwirkung von Scherkräften existieren die meisten Sauggreifer wahlweise mit Reibeinlage (Schmalz, 2000; PIAB, 2004; Sommer, 2000). Eine Übersicht über die verschiedenen Arten von Sauggreifern mit ihren Eigenschaften ist in Abbildung 3-7 dargestellt.

Dichtung	Art	Dichtkante		Dichtlippe		Hybrid
	Eigenschaften	Vollgummi	Moosgummi	einfach	Faltenbalg	-
		<ul style="list-style-type: none"> • Rauhe, strukturierte Oberflächen • Verschleißarm 	<ul style="list-style-type: none"> • Rauhe, strukturierte Oberflächen • Anpassungsfähig 	<ul style="list-style-type: none"> • Glatte, ebene Oberflächen 	<ul style="list-style-type: none"> • Glatte, unebene Oberflächen • Biegeschlaffe Materialien 	<ul style="list-style-type: none"> • Glatte, ebene Oberflächen • Biegeschlaffe Materialien
Reibeinlage	mit				-	
	ohne					
Grundfläche		✓	✓	✓	✓	✓
		✓	✓	✓	✓	
		✓	✓			
		✓	✓			
		✓ Grundflächenform existiert für diesen Sauggreifertyp				

Abbildung 3-7: Typen von Sauggreifern

Als Halteelement für Kletterroboter zur Befahrung von Glasfassaden ist der Sauggreifer mit einfacher Dichtlippe aufgrund seiner guten Einsetzbarkeit auf glatten und ebenen Oberflächen am besten geeignet. Weiterhin ist aus Gründen der Redundanz die runde oder ovale Grundfläche vorzuziehen. Mit einer runden Grundfläche ist auf einer gegebenen rechteckigen Fläche in der Länge und der Breite in jedem Fall die Anordnung einer höheren Anzahl an Sauggreifern möglich als mit einer ovalen Grundfläche.

Runde Sauggreifer mit einfacher Dichtlippe sind in den Durchmessern von 1 bis 200 mm erhältlich. Für den Einsatz auf Außenfassaden sollte das Material der Dichtlippe verschleißfest, witterungs- und ozonbeständig sowie oxidationsunempfindlich sein und einen geringen Abdruck auf der Oberfläche hinterlassen. Für eine geringe Andruckkraft zum vollständigen Anpressen des Sauggreifers an die Oberfläche sollte das Material außerdem eine geringe Steifigkeit bzw. Härte besitzen. Abbildung 3-8 beschreibt die hierzu verfügbaren Materialien und die Materialeigenschaften. Hieraus geht hervor, dass Silikon hinsichtlich der oben aufgestellten Anforderungen das am besten geeignete Material ist.

Material	Temperaturbereich	Shore-Härte	Verschleißfest	Witterungsbeständigkeit	Ozonbeständigkeit	Geringer Abdruck	Oxidation
Neopren	-30°C bis 120°C	65° ± 3°	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Silikon	-70°C bis 200°C	50°	●	●	●	●	●
Konduktives Silikon	-55°C bis 230°C	50°	●	●	●	●	●
Chloropren	-40°C bis 110°C	50°	●	●	●	k.A.	●
Nitril-PVC	0°C bis 90°C	50°	●	●	●	k.A.	●
Perbunan	-10°C bis 70°C	55° ± 5°	●	●	●	○	○
Polyurethan	-30°C bis 100°C	55°	●	●	●	k.A.	○
Fluorkautschuk	-10°C bis 200°C	65° ± 5°	●	●	●	●	k.A.
Legende	● sehr gut ● gut ○ ungeeignet k.A.: keine Angabe						

Abbildung 3-8: Materialien und Materialeigenschaften für runde Sauggreifer mit einfacher Dichtlippe (Schmalz 2000, PIAB 2004, Sommer 2000)

3.3.2 Versagensarten bei Sauggreifern mit Dichtlippe

Leckage

Das Auftreten einer Undichtigkeit in der Dichtlippe führt zu einem Leckagevolumenstrom zwischen Sauggreiferinnerem und der Umgebung. Bei aktiv betriebenen Sauggreifern kann dieser Leckagevolumenstrom bei entsprechender Saugleistung ausgeglichen werden. Damit kann der notwendige Unterdruck im Sauggreiferinneren aufrecht erhalten werden.

Bei passiv betriebenen Sauggreifern führt eine Undichtigkeit zur stetigen Verringerung der Druckdifferenz und damit zur Schwächung der Haltekraft des Sauggreifers. Das Ablösen des Sauggreifers von der Oberfläche ist die unvermeidbare Konsequenz.

Abrutschen infolge von Scherkraft

In der vorangegangenen Analyse konnte gezeigt werden, dass der Einsatz von Reibeinlagen bei passivem Betrieb von Sauggreifern nicht möglich ist. Im angesaugten Zustand müssen daher alle Reibungskräfte allein von der Dichtlippe aufgenommen werden. Im angesaugten und unbelasteten Zustand herrscht Haftreibungszustand zwischen der Oberfläche und dem gesamten an der Oberfläche anliegenden Bereich der Dichtlippe. Durch eine von der Gewichtskraft des Roboters aufgebrachte am Adapter des Sauggreifers angreifende Scherkraft F_S verformt sich die Dichtlippe elastisch. Hierbei erfährt der Roboter über die Elastizität der Sauggreifer eine begrenzte vertikale Verschiebung s_{SG} gegenüber der Oberfläche. Diese Verschiebung muss bei der Steuerung der Aktorik des Kletterroboters berücksichtigt werden, wenn Umsetzvorgänge auf der Oberfläche vorgenommen werden oder am Roboter installierte Werkzeuge positioniert werden sollen.

Bei Überschreiten eines bestimmten Kraftbetrages gerät der gesamte anliegende Teil der Dichtlippe in einen Gleitreibungszustand. Der Unterdruck im Sauggreiferinneren bleibt hierbei erhalten. Die Folge ist ein kontinuierliches Abrutschen des Sauggreifers.

Einrollen der Dichtlippenkante

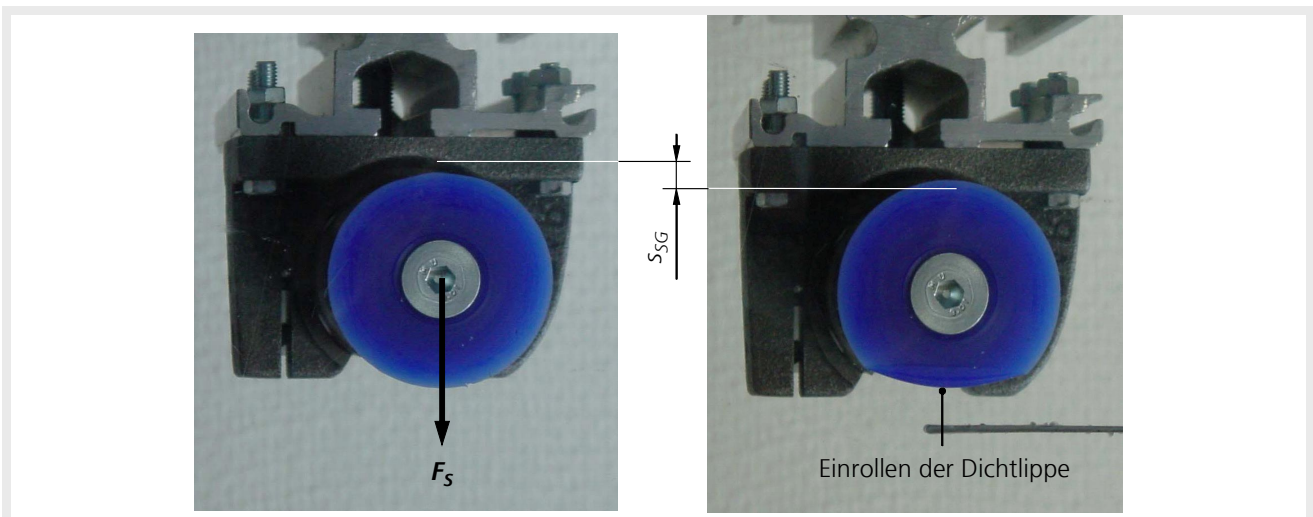


Abbildung 3-9: Einrollen der Dichtlippenkante eines Sauggreifers nach Abrutschen unter Scherkraft

Das Einrollen der Dichtlippenkante ist eine Folge einer partiellen oder vollständigen Gleitbewegung der Dichtlippe oder des falschen Aufsetzens des Sauggreifers. Durch das Einrollen der Dichtlippenkante entsteht ein Spalt in der Dichtfläche, was die Aufhebung des Unterdrucks im Sauggreiferinneren und ein sofortiges Versagen des Sauggreifers zur Folge hat.

Beim Aufsetzen kann das Einrollen der Dichtlippenkante auftreten, wenn die in Normalenrichtung zur Oberfläche stattfindende Aufsetzbewegung mit

- einer zur Oberfläche parallelen translatorischen Bewegung oder
- einer um eine zur Oberfläche parallelen Achse rotatorischen Bewegung

überlagert wird.

Während des Abrutschvorganges kann das Einrollen an dem in Gleitrichtung vorderen äußeren Teil der Dichtlippe auftreten. An ihrer äußeren Kante besitzt die Dichtlippe die geringste Stärke und bietet damit an dieser Stelle den geringsten Biege widerstand. Die an der Dichtlippe gegen die Gleitrichtung wirkenden Reibungskräfte erzeugen ein Moment, welches das Einrollen der Dichtlippenkante zur Folge haben kann.

Die Ermittlung der zulässigen Scherkräfte, welche den Haftzustand eines Sauggreifers im passiven Betrieb gewährleisten, erfordert detaillierte Betrachtungen der hierbei auf dem anliegenden Teil der Dichtlippe auftretenden tribologischen Vorgänge. Solche Betrachtungen sind nicht Stand der Technik.

3.4 Analyse der Vortriebsprinzipien von Kletterrobotern hinsichtlich ihrer Eignung zum Einsatz auf Glasfassaden

3.4.1 Analyse der Bewegungsmuster von Kletterrobotern bei der Befahrung von Glasfassaden

Abhängig von der an der Glasfassade zu verrichtenden Aufgabe ergeben sich die zwei in Abbildung 3-10 dargestellten Bewegungsmuster:

- Anfahren einzelner Zielpunkte auf der Fassade (Point-to-Point)
- Flächiges, lineares und bahnenförmiges Abfahren von Fassaden

Für das Point-to-Point-Bewegungsmuster ist der Gleitrahmen wegen seiner Wendigkeit und seiner im Vergleich zum Vielbeiner geringen Komplexität das Vortriebsprinzip mit der höchsten Praxisrelevanz. Insbesondere durch sein hohes Potenzial für einen modularen Aufbau ist der Gleitrahmen eine flexibel einsetzbare Variante für unterschiedliche Szenarien wie Brücken, Kernkraftwerken, Schiffen und Fassaden (Schmierer, 2001).

Im speziellen Fall der Fassadenkletterroboter wurden in Kapitel 2.2.2 jedoch Reinigung, Konservierung sowie visuelle und zerstörungsfreie Inspektion als wichtigste Aufgaben definiert. Diese Aufgaben erfordern ein lineares, flächiges Bewegungsmuster. Im Gegensatz zum Point-to-Point-Bewegungsmuster erfolgt hierbei die Durchführung der Arbeiten auf der Fassadenoberfläche simultan zur Vorwärtsbewegung des Roboters. Um eine über die gesamte Fassadenoberfläche konstante Qualität bzw. Messgenauigkeit zu erhalten, ist eine kontinuierliche Bewegung des Werkzeugkopfes und ein gleich bleibender Abstand zwischen Werkzeugkopf und Fassadenoberfläche notwendig (White, 2004). Zur Einsparung zusätzlicher gesteuerter Achsen sollte der Grundkörper des Roboters diese Bewegung bereits vorgeben, sodass der Werkzeugkopf direkt an diesem installiert werden kann. Für eine kontinuierliche und lineare Bewegungsform ist das Vortriebsprinzip des gleitenden Greifers und der Raupe laut dem Stand der Technik daher am besten geeignet.

Wie in den vorigen Abschnitten beschrieben, kann ein passiv betriebener Sauggreifer zeitlich nur begrenzt belastet werden, bevor er wieder erneut angedrückt werden muss. Dies erfordert demnach Bewegungsabläufe, welche durch einen periodischen Wechsel zwischen Betriebsbelastung und Andruckvorgang der Halteelemente gekennzeichnet sind. Unter oben genannten Voraussetzungen wird deshalb für die folgenden Betrachtungen das Vortriebsprinzip der Raupe verwendet. Wegen ihrer kontinuierlichen, linearen Bewegung über nur eine angetriebene Achse zeichnet sich die Raupe zusätzlich durch einen geringen technischen und steuerungstechnischen Aufwand sowie einen geringen Energiebedarf aus.

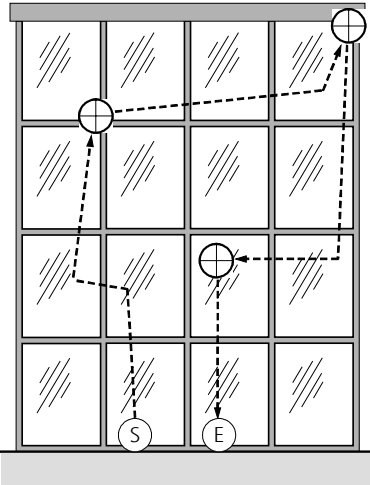
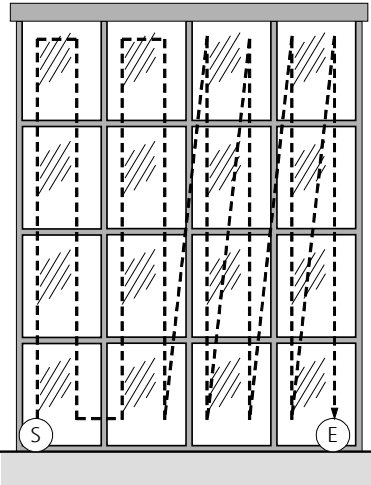
Bewegung	Point-to-Point	Flächig
Darstellung		
Mögliche Aufgaben an Glasfassaden für Kletterroboter	<ul style="list-style-type: none"> • Installationen • Stichprobenartige Prüfungen / Inspektionen • Reparatur oder Deinstallation einzelner Bauteile • Bewegte Werbung • Bergung (Rettung) 	<ul style="list-style-type: none"> • Reinigung • Beschichtung • Flächige Prüfungen / Inspektionen • Linienförmige Manipulationen (z.B. Verlegung von Dichtungen) • Bewegte Werbung
Zeitintervall	<ul style="list-style-type: none"> • Alle 1 bis 15 Jahre (AGI, 1993) 	<ul style="list-style-type: none"> • 2 bis 6 mal pro Jahr¹ (Bräuning, 2003)
Beschreibung des Bewegungsablaufes	<ul style="list-style-type: none"> • Gezieltes Anfahren eines Zielpunktes • Ausführen einer Aufgabe am Zielpunkt 	<ul style="list-style-type: none"> • Vollständiges, flächiges Abfahren einer definierten Fläche
Anforderungen an das Gesamtsystem	<ul style="list-style-type: none"> • Drehung von 0° bis ± 180° auf einem Punkt • Geländegängigkeit • Beweglichkeit des Grundkörpers (zur Positionierung und zur Ausführung der Aufgabe) 	<ul style="list-style-type: none"> • Drehung von 0° bis ± 90° auf einem Punkt • Kontinuierliche Geradeausfahrt • konstanter Abstand zwischen Roboterrahmen und Fassade • geringer Energieverbrauch (Zurücklegung großer Strecken)
Bevorzugte Vortriebsprinzipien	<ul style="list-style-type: none"> • Vielbeiner • Gleitrahmen 	<ul style="list-style-type: none"> • Gleitender Sauggreifer • Umlaufender Sauggreifer (Raupe)
Legende	<p>⊙ Startpunkt ⊙ Endpunkt ⊕ Zielpunkte - - - mögliche Route</p> <p>¹ mit Ausnahme der linienförmigen Manipulationen</p>	

Abbildung 3-10: Darstellung, Eigenschaften und Anwendungen der Point-to-Point-Bewegung und der flächigen Bewegung von Kletterrobotern auf Glasfassaden

3.4.2 Analyse unterschiedlicher Varianten des Raupenprinzips

Das Prinzip der Raupe basiert auf einer um mindestens zwei Umlenkrollen umlaufenden Führungseinheit, welche in bevorzugt regelmäßigen Abständen Greifelemente enthält, um sich an der zu befahrenden Oberfläche festzuhalten. In dem hier betrachteten Fall sind diese Greifelemente als Vakuumelemente ausgeprägt. Die Führungseinheit ist bevorzugt als Riemen oder Kette ausgeführt.

Das Raupenprinzip mit Vakuumelementen existiert in den drei in Abbildung 3-11 dargestellten Varianten. Bei der linken Variante sind die Vakuumelemente als Sauggreifer ausgeführt und werden über eine am Rahmen befestigte Vakuumpumpe mit Unterdruck versorgt (Tso, 2001; FH-Aalen, 2002). Hierfür ist die Vakuumpumpe mit einer pneumatischen Drehdurchführung verbunden, welche in einen geschlossenen und mit der Führungseinheit mitlaufenden Verteilerschlauch mündet, der wiederum mit den einzelnen Sauggreifern verbunden ist. Ein mechanisch oder elektrisch gesteuertes Ventil an jedem Sauggreifer sorgt dafür, dass nur die auf der Oberfläche befindlichen Sauggreifer mit dem Verteilerschlauch verbunden sind.

Bei der mittleren Variante sind die Vakuumelemente in Form einer umlaufenden Perforation in die als Riemen ausgebildete Führungseinheit integriert. Der Riemen wird durch die am Raupenrahmen befestigte und zum Riemen hin offene Vakuumkammer mit Unterdruck versorgt. Über die Perforationen im Riemen wird der Unterdruck auf die Oberfläche übertragen. Bei der Vorwärtsbewegung gleitet die Vakuumkammer über die Innenseite des Riemens, während die Außenseite des Riemens den Reibschluss mit der Oberfläche eingeht (Fraunhofer, 2003c; Bräuning, 2003).

Bei der rechten Variante sind die Vakuumelemente ebenfalls wie bei der linken Variante als Sauggreifer ausgebildet. In diesem Fall sind sie jedoch passiv betrieben, d.h. außer den Sauggreifern werden keine weiteren Vakuumkomponenten wie Pumpe, Drehdurchführung und Zuleitungen benötigt.

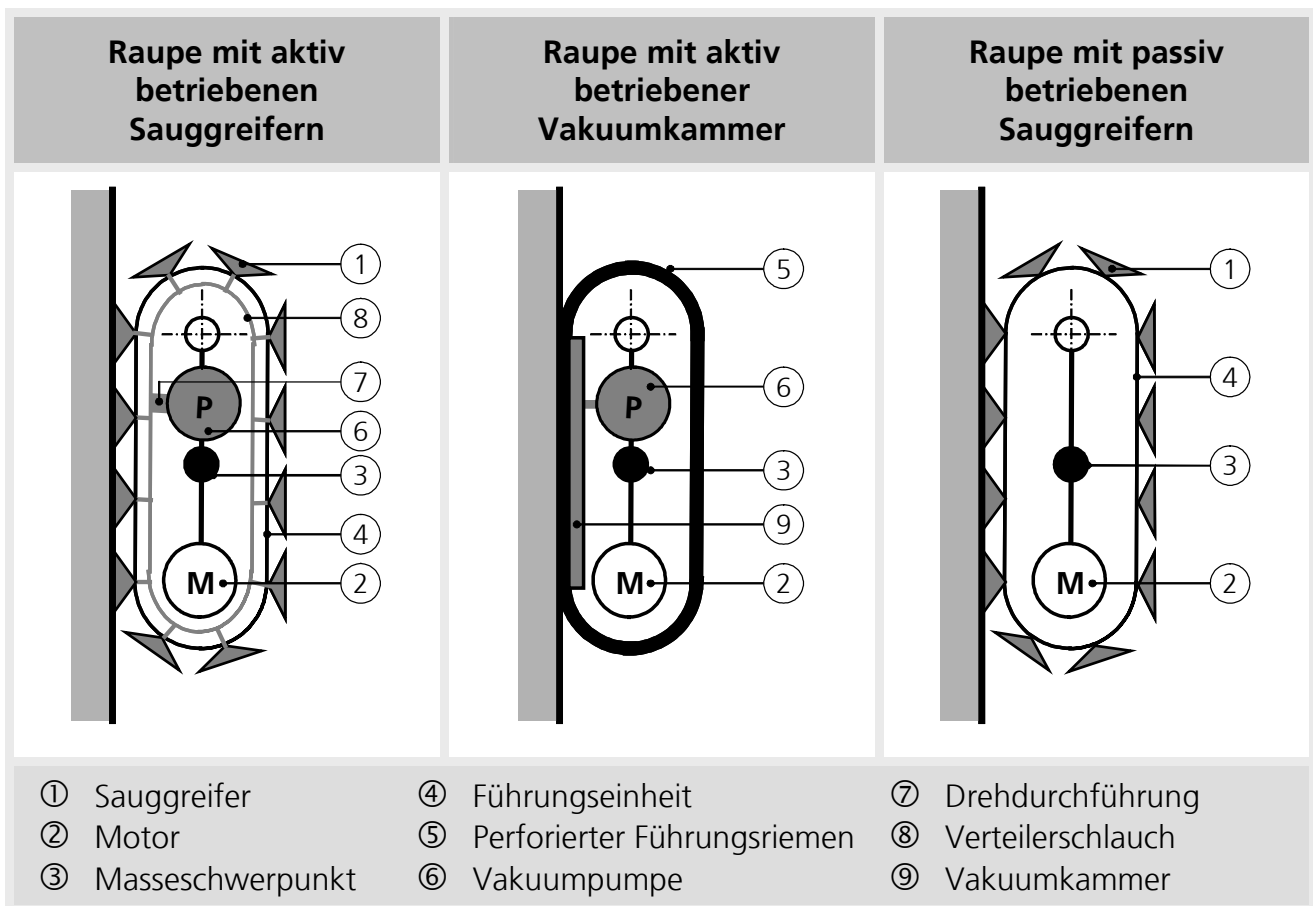


Abbildung 3-11: Darstellung verschiedener Varianten des Raupenprinzips für Kletterroboter

Das System der Raupe mit aktiv betriebenen Sauggreifern bzw. der Raupe mit aktiv betriebener Vakuumpumme ist durch die zusätzliche Vakuumpumpe komplexer und damit sowohl schwerer als auch weniger ausfallsicher als die Raupe mit passiv betriebenen Sauggreifern. Dadurch und aus den in Abbildung 3-6 dargestellten Gründen ist zu erwarten, dass der Energiebedarf einer Raupe mit aktiv betriebenen Sauggreifern höher ist als mit passiv betriebenen Sauggreifern.

Die beiden Raupen mit aktiv erzeugtem Unterdruck besitzen zwar bezüglich verschiedener, auch rauer oder poröser Oberflächen eine höhere Einsatzflexibilität als die Raupe mit passiv betriebenen Sauggreifern, da entstehende Fehlluft durch eine entsprechend leistungsfähige Pumpe ausgeglichen und ein Absturz damit verhindert werden kann. Da das Szenario der Glasfassade sich jedoch auf glatte Oberflächen beschränkt, bildet diese Einsatzflexibilität gegenüber der Raupe mit passiv betriebenen Sauggreifern keinen Vorteil.

Übersteigt hingegen ein Leckstrom die Kapazität der Vakuumpumpen der Raupen mit aktiv erzeugtem Unterdruck, bricht das Vakuum in allen Sauggreifern bzw. der Vakuumpumme zusammen und das System stürzt ab. Eine Leckage in einem Sauggreifer bzw. an einer Perforationsstelle des Riemen kann also den Absturz des gesamten Systems bedingen. Diese fehlende Redundanz kann für die Raupe mit aktiv betriebenen Sauggreifern durch die drei folgenden Maßnahmen ausgeglichen werden. Für die Raupe mit aktiv betriebener Vakuumpumme kann hierbei lediglich die erste dieser drei Maßnahmen verwendet werden:

1. Einsatz einer entsprechend leistungsfähigen Pumpe, welche die entstehende Fehlluft ausgleicht. Dies resultiert in einer Erhöhung sowohl des Gewichtes als auch des Energiebedarfes.
2. Isolierung jedes Sauggreifers direkt nach dem Absaugvorgang durch ein Ventil. Dadurch ist keine nachträgliche Korrektur des Unterdrucks in den Sauggreifern mehr möglich.

Diese Maßnahme reduziert das Einsatzgebiet der Raupe mit aktiv betriebenen Sauggreifern ebenso wie die Raupe mit passiv betriebenen Sauggreifern auf glatte Oberflächen.

3. Aktive Überwachung des Vakuums durch einen Vakuumwächter und ein Ventil an jedem Sauggreifer. Bei Abfall des Vakuums wird das Ventil geöffnet und das Vakuum wiederhergestellt. Bei zu hoher Fehlluft wird das Ventil wieder geschlossen, um einen Druckabfall im gesamten System durch die Verteilerleitung zu vermeiden. Dies resultiert in einer Erhöhung sowohl der Komplexität als auch des Gewichtes des Gesamtsystems.

Jede Maßnahme für den betrachteten Fall der durchgängigen Glasfassade, die Redundanz der komplexeren, schwereren und energieintensiveren Systeme der Raupen mit aktiv erzeugtem Unterdruck dem Niveau der Raupe mit passiv betriebenen Sauggreifern anzugleichen, resultiert in einer weiteren Erhöhung von Komplexität und Gewicht. Der damit verbundene erhöhte Energiebedarf steigert wiederum die Notwendigkeit einer Nabelschnur.

Diese Zusammenhänge verdeutlichen die Vorteile einer Raupe mit passiv betriebenen Sauggreifern für den Einsatz auf Glasfassaden.

3.4.3 Analyse des Bewegungsablaufes einer Raupe mit aktiv oder passiv betriebenen Sauggreifern

Ein Sauggreifer durchläuft während eines vollständigen Umlaufs auf der Führungseinheit vier Phasen (Abbildung 3-12):

1. Aufsetzen des Sauggreifers über die vordere Umlenkrolle auf die zu befahrende Oberfläche. In dieser Phase kann der Sauggreifer noch keine Kräfte aufnehmen.
2. Transport des Sauggreifers an der Unterseite der Raupe von der vorderen zur hinteren Umlenkrolle. In dieser Phase ist der Sauggreifer vollständig angesaugt und kann Scherkräfte F_V und Zugkräfte F_H aufnehmen.
3. Belüften und Ablösen des an der hinteren Umlenkrolle befindlichen Sauggreifers von der zu befahrenden Oberfläche.
4. Rücktransport des Sauggreifers an der Vorderseite der Raupe von der hinteren zur vorderen Umlenkrolle.

Zur Funktionsfähigkeit des Raupenprinzips muss gewährleistet sein, dass sich zu jedem Zeitpunkt eine Mindestanzahl von $n_{SG,min} = 1$ Sauggreifer in vollständig angesaugtem Zustand auf der zu befahrenden Oberfläche befindet. Die Mindestbedingung hierfür ist, dass sich zwei benachbarte Sauggreifer nicht simultan im Anpress- und Ablösezustand befinden. Daraus lässt sich die Bedingung formulieren, dass der Abstand a_{SG} zwischen den Symmetrieachsen zweier Sauggreifer kleiner sein muss als der Achsabstand $2a$ zwischen den beiden Umlenkrollen. Diese Zusammenhänge sind in Abbildung 3-12 zusammengefasst.

Phase	Anpressen eines Sauggreifers	Belüften und Ablösen eines Sauggreifers
Bedingung	Die Geometrie der Raupe muss gewährleisten, dass sich immer mindestens ein Sauggreifer im Haftzustand befindet, d.h. sowohl die Scherkräfte F_V als auch die Zugkräfte F_H aufnehmen kann.	
Darstellung		
Abgeleitete Anforderungen	<ul style="list-style-type: none"> • $n_{SG,min} = 1$ • $a_{SG} < 2a$ 	
Legende	<ul style="list-style-type: none"> ① Glaselement ② Vordere Umlenkrolle ③ Hintere Umlenkrolle ④ Sauggreifer in Anpressphase \Rightarrow kein Haftzustand ⑤ Sauggreifer kurz nach der Anpressphase \Rightarrow Haftzustand ⑥ Sauggreifer kurz vor der Belüftungsphase \Rightarrow Haftzustand ⑦ Sauggreifer bei der Belüftungsphase \Rightarrow kein Haftzustand ⑧ Sauggreifer-Rücktransport zur vorderen Umlenkrolle 	

Abbildung 3-12: Geometrische Mindestbedingungen zur Funktionsweise der Raupe als Vortriebssystem für Kletterroboter

3.4.4 Ablöseproblematik bei dem Bewegungsablauf der Raupe mit passiv betriebenen Sauggreifern

Nach dem Aufsetzen und Anpressen einer Raupe an die zu befahrende Oberfläche befinden sich bis auf den hintersten Sauggreifer alle im Haftzustand befindlichen Sauggreifer in Folge des durch den Masseschwerpunkt erzeugten Kippmomentes in Normalenrichtung unter Zuglast. Dieses Moment wirkt um den hintersten Sauggreifer, der als einziger mit der Kraft F_{H1} auf Druck beansprucht wird. Der längste Hebelarm wirkt auf den vordersten Sauggreifer, der deshalb die höchste Zugkraft F_{Hn} erfährt. Durch die Elastizität der Sauggreifer entsteht so ein Winkel α zwischen der Längsachse des Roboters und der Oberflächenebene.

Bei Raupen mit aktiv betriebenen Sauggreifern wird jeder während der Vorwärtsbewegung vorne auf die Oberfläche auftreffende Sauggreifer durch den aktiv erzeugten Unterdruck an die Oberfläche angesaugt (Bräuning, 2003; FH-Aalen, 2002; UNIVACS, 2003). Diese Ansaugkraft wirkt dem durch die Gewichtskraft erzeugten Kippmoment entgegen und bewirkt, dass die vordere Umlenkrolle der Raupe immer wieder von neuem an die zu befahrende Oberfläche herangezogen wird.

Bei einer wie in Abbildung 3-13 dargestellten und in Form des Millepede von Schmierer beschriebenen Raupe mit passiv betriebenen Sauggreifern wird während einer Aufwärtsfahrt jeder nachfolgende vorne auf die Oberfläche auftreffende Sauggreifer nicht oder schwächer als sein Vorgänger an die Oberfläche angepresst, wodurch sich der Winkel α stetig vergrößert (Schmierer, 2001). Nach einer endlichen Anzahl an Schritten erhalten alle folgenden Sauggreifer, die in Richtung Oberfläche geführt werden, keinen Kontakt mehr mit der Oberfläche und die Raupe stürzt ab.

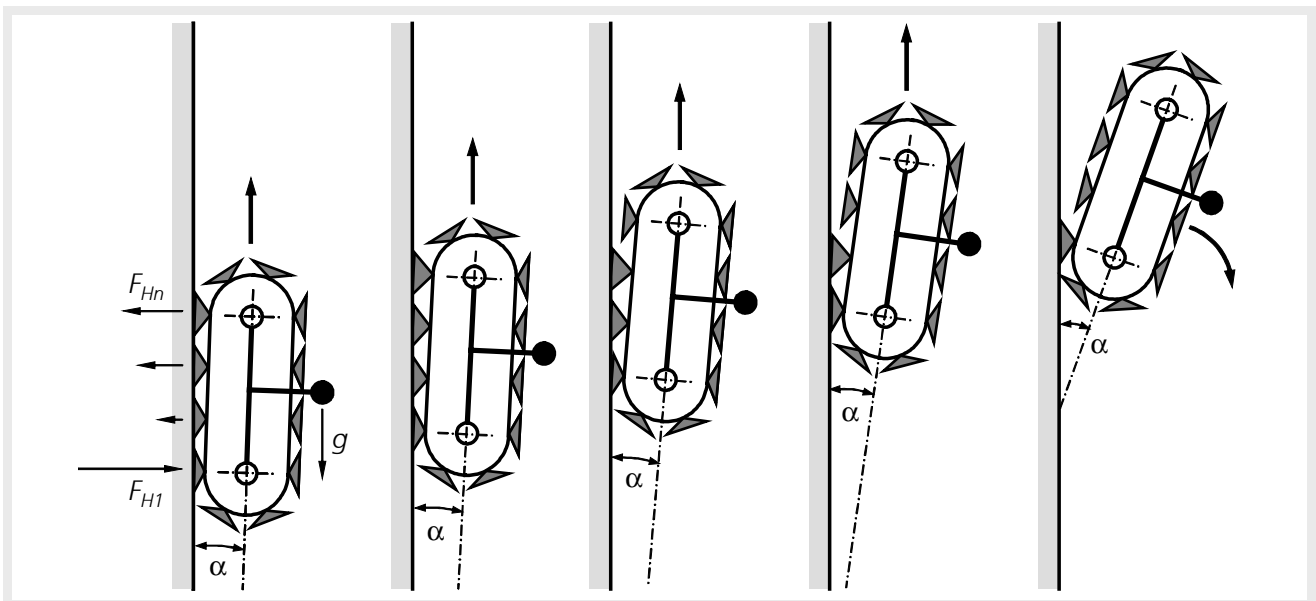


Abbildung 3-13: Bewegungsablauf einer Raupe mit passiv betriebenen Sauggreifern ohne Mechanismus zum Andrücken der vordersten Sauggreifer

Für einen Einsatz auf Fassaden beliebiger Höhe ist eine derart konstruierte Kletterraupe demnach nicht geeignet. Bei der Konzeption einer Kletterraupe mit passiv betriebenen Sauggreifern für den Einsatz auf Glasfassaden ist eine zusätzliche Vorrichtung zum vollständigen Andrücken der vorne auf die Oberfläche auftreffenden Sauggreifer notwendig. Eine solche Vorrichtung existiert nach dem Stand der Technik für passiv betriebene Kletterraupen nicht und muss entwickelt werden.

3.5 Analyse der Varianten zur Vakuumerzeugung und ihrer Einflussfaktoren auf das Klettersystem

3.5.1 Aufstellung der Varianten zur Vakuumerzeugung

Gewicht, Energiebedarf, technischer Aufwand und Steuerungsaufwand eines pneumatischen Systems wird von der jeweiligen Variante zur Erzeugung der Ansaugkraft und der Verteilung der hierzu notwendigen Komponenten beeinflusst (Gießler, 2003). Die Erzeugung des Unterdrucks geschieht

- aktiv über eine Vakuumpumpe bzw. ein Vakuumgebläse,
- aktiv über einen Kompressor mit nachgeschaltetem Ejektor oder

- passiv über Andrücken des Sauggreifers.

Aus den drei oben dargestellten Varianten entstehen weitere Untervarianten durch unterschiedliche Verteilungen von Pumpe, Kompressor und Energieversorgung auf den Roboter (onboard) und die Basisstation (extern). Die Auslagerung verschiedener Komponenten vom Roboter auf die Basisstation ermöglicht die Reduzierung des Robotergewichtes. Ein geringeres Gewicht des Roboters geht einher mit einem geringeren Energiebedarf. Die Auslagerung von Komponenten erfordert jedoch immer eine Nabelschnur, was die Bewegungsflexibilität sowie die Reichweite des Roboters einschränkt. Bei größeren Höhen muss hierbei das durch Auslagerung eingesparte Gewicht dem zusätzlich zu tragenden Gewicht durch die Nabelschnur gegenübergestellt werden. Abbildung 3-14 zeigt die möglichen Varianten zur Anordnung dieser Komponenten.

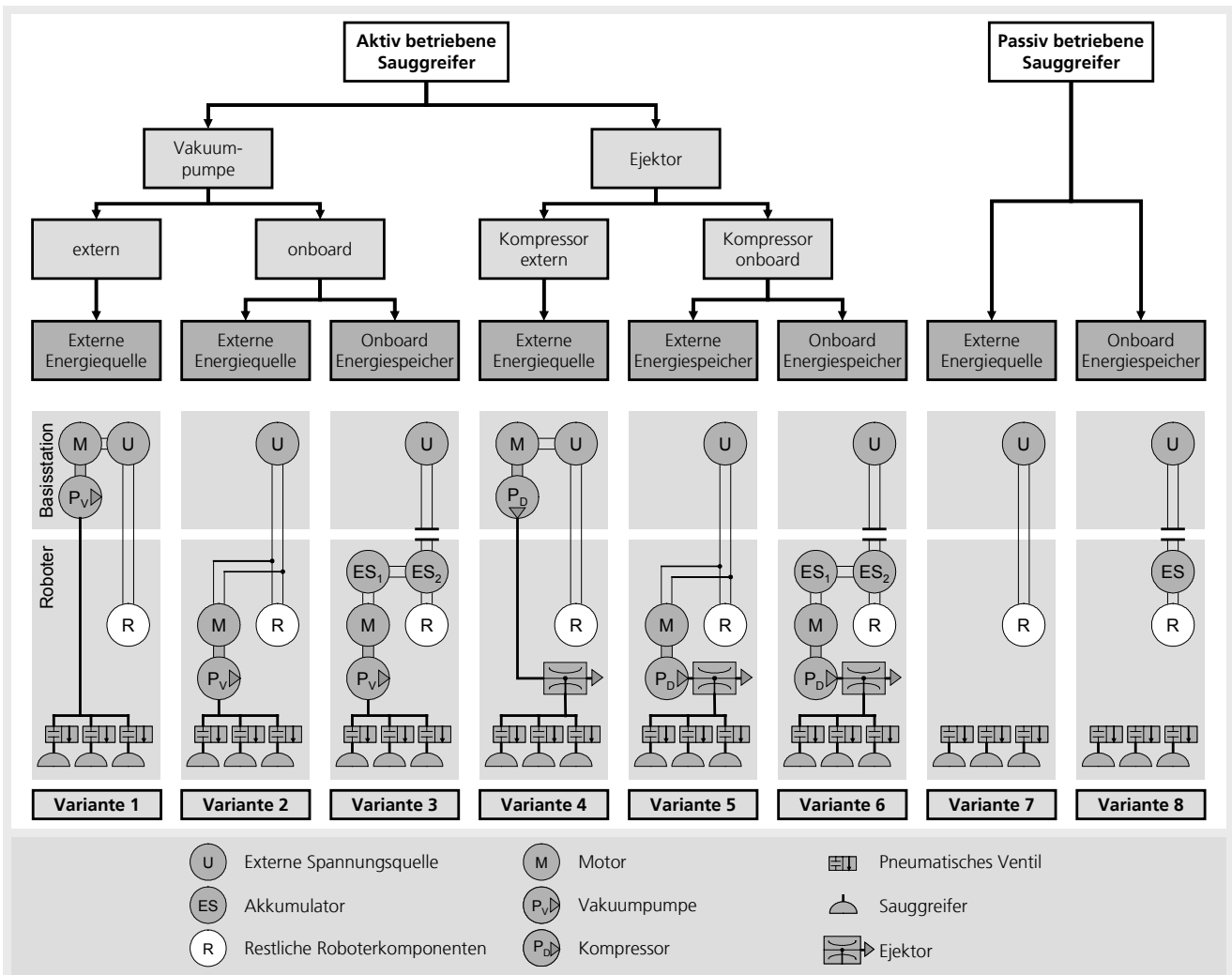


Abbildung 3-14: Varianten zur Anordnung der Vakuumerzeugenden Komponenten

Ein Ejektor hat gegenüber einer Pumpe den Vorteil eines geringeren Gewichtes. Bei externer Druckluftversorgung lassen sich auf diese Weise leichtgewichtige Klettersysteme realisieren (Gießler, 2003; Schmalz, 2001)

Extern angeordnete Vakuumpumpe- oder Druckluftherzeuger mit onboard Energiespeicher werden nicht betrachtet. Da eine Nabelschnur und eine externe Energiequelle in diesem Fall ohnehin vorhanden sein müssen, ist ein zusätzlicher onboard angeordneter Energiespeicher nicht notwendig und aus Gewichtsgründen nicht sinnvoll.

3.5.2 Analyse des technischen Aufwandes

Für die Quantifizierung des technischen Aufwandes bei den verschiedenen Varianten wird die Anzahl der verwendeten Unterdruck erzeugenden Komponenten der gesamten Einheit Roboter-Basisstation betrachtet, inklusive der in den aktiv betriebenen Varianten 1 bis 6 notwendigen pneumatischen Verschlauchung.

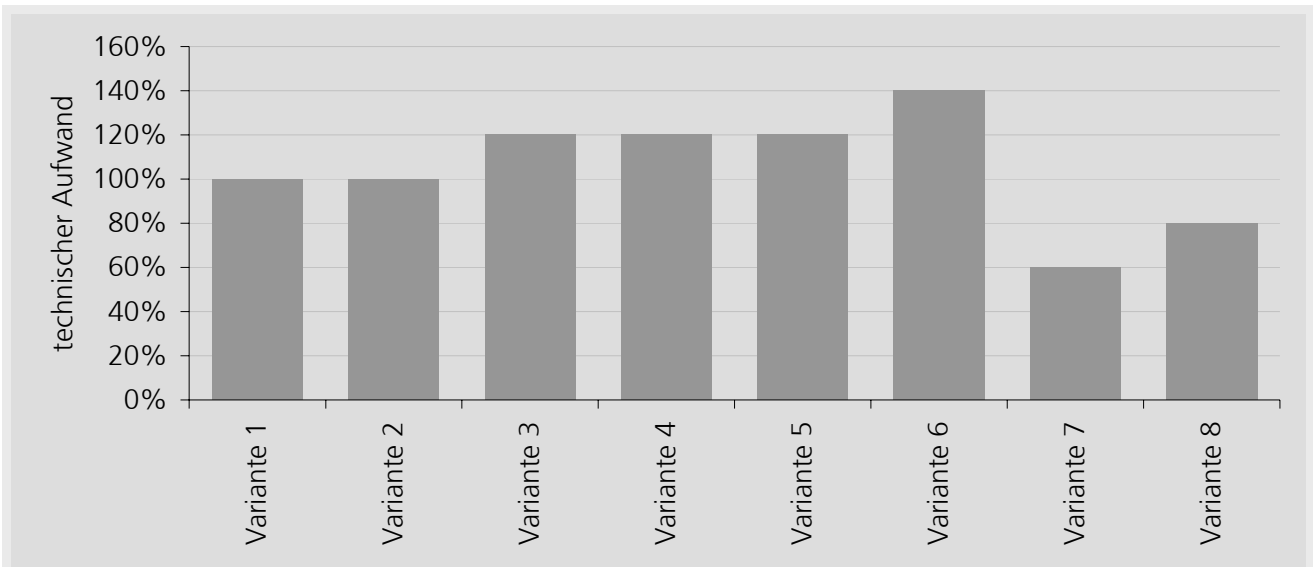


Abbildung 3-15: Vergleich des technischen Aufwandes der verschiedenen Varianten zur Vakuumerzeugung

Wie in Abbildung 3-15 ersichtlich sind die Varianten 7 und 8, welche passiv betriebene Sauggreifer einsetzen, die Systeme mit dem geringsten technischen Aufwand.

3.5.3 Analyse des Gewichtes und des Energiebedarfs

Bei vertikaler Aufwärtsbewegung ist der Energiebedarf eines Kletterroboters zur Fortbewegung proportional zu seinem Gewicht. Weiterhin ist das Gewicht eines Kletterroboters sowohl hinsichtlich der Tragfähigkeit von Glasfassaden als auch hinsichtlich seiner Handhabbarkeit eine ausschlaggebende Größe für den Grad der Flexibilität und Universalität seiner Einsetzbarkeit (Schraft, 2003a). Bei der Betrachtung des Gewichtes der einzelnen Varianten wird daher im Folgenden nur der Roboter ohne die Basisstation betrachtet. Hierbei ist zu beachten, dass das Gewicht eines Akkumulators von der Gebäudehöhe und der Einsatzdauer abhängt.

Bei gegebenen Einsatzbedingungen ist aufgrund ihrer minimalen Anzahl an Komponenten die passiv betriebene Variante sowohl in der Gruppe der Varianten mit Nabelschnur als auch in der Gruppe mit Akkumulator an Bord jeweils die leichteste. Der damit einhergehende geringe Energiebedarf der passiven Varianten wird unterstrichen durch den in Kapitel 3.2.3 beschriebenen energiesparenden Charakter des passiven Ansaugvorganges.

3.5.4 Verteilung der nach dem Stand der Technik bestehenden Kletterroboter auf die Varianten

In Abbildung 3-16 ist die Verteilung der nach dem Stand der Technik bestehenden Kletterroboter für Glasfassaden mit Sauggreifern auf die oben definierten Varianten zur Vakuumerzeugung dargestellt.

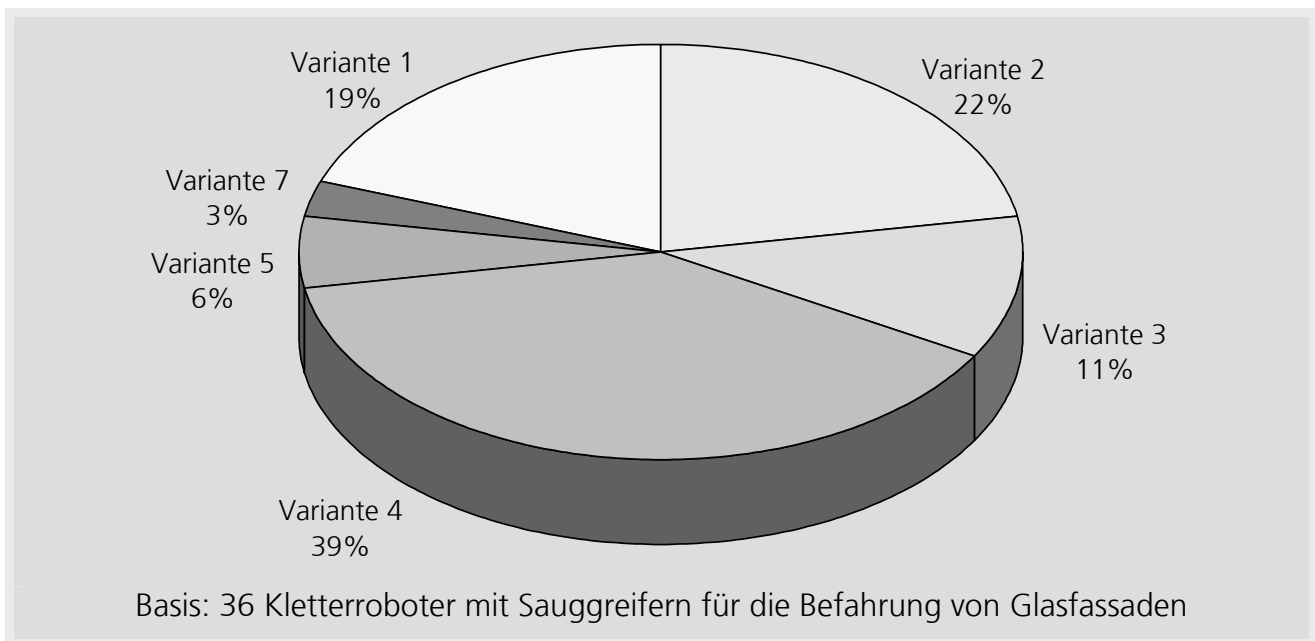


Abbildung 3-16 Häufigkeit der Varianten der Vakuumerzeugung nach dem Stand der Technik

In der Gruppe der Roboter mit Akkumulator (Variante 3, 6 und 8) wird ausschließlich Variante 3 mit onboard angeordneter Vakuumpumpe eingesetzt. Die etwas schwerere Variante 6 mit onboard Kompressor und Ejektor sowie die Variante 8 mit passiv betriebenen Sauggreifern findet sich im Stand der Technik nicht wieder.

In der Gruppe der Roboter ohne Akkumulator mit Nabelschnur (Variante 1, 2, 4 und 7) wird Variante 4 mit externer Druckluftversorgung und onboard Ejektor bevorzugt eingesetzt. Trotz ihrer etwas höheren Komplexität wird sie sowohl der Variante 2 als auch der Variante 5 vorgezogen. Dies begründet sich auf das geringere Gewicht des Roboters der Variante 4, welches durch die Kombination des Ejektors mit der externen Druckluftversorgung ermöglicht wird. Der bevorzugte Einsatz der Variante 4 gegenüber der Variante 1, deren Roboter durch die externe Vakuumpumpe geringfügig leichter ist, lässt sich dadurch erklären dass

- die kurzen Leitungen von Ejektor zu Sauggreifer Leistungsverlust vermeiden und das Vakuum innerhalb von Millisekunden zur Verfügung steht (Schmalz, 2001),
- in vielen Fällen eine externe Druckluftversorgung für den Betrieb diverser Aktorik am Roboter ohnehin zur Verfügung steht und
- viele Gebäude über eine Druckluftversorgung verfügen.

3.5.5 Folgerungen

Kletterroboter mit aktiv betriebenen Sauggreifern weisen unter gleichen Einsatzbedingungen eine höhere Komplexität, ein höheres Gewicht und einen entsprechend höheren Energiebedarf auf als Roboter mit passiv betriebenen Sauggreifern. Insbesondere wenn man aus Gründen der Bewegungsflexibilität auf eine Nabelschnur verzichten möchte, ist durch die zusätzlich an Bord notwendigen Energiespeicher die Angleichung des Gewichtes eines Kletterroboters mit aktiv betriebenen Sauggreifern auf das eines Kletterroboters mit passiv betriebenen Sauggreifern nicht möglich.

Es besteht die Möglichkeit, Energiespeicher sowie die Vakuum erzeugenden Komponenten auf die Basisstation auszulagern, um das Robotergewicht zu reduzieren. Dies reduziert jedoch nicht den technischen Aufwand des Gesamtsystems. Weiterhin kann bei Robotern mit aktiv betriebenen Sauggreifern durch diese Maßnahmen das Gewicht des Roboters nicht unter die

passiv betriebenen Varianten abgesenkt werden. Mögliche zukünftige Entwicklungen, welche eine drahtlose Energieübertragung von einer Basisstation aus zulassen, ermöglichen zwar die Einsparung der Nabelschnur. Roboter mit passiv betriebenen Sauggreifern bieten jedoch auch hier durch ihren geringeren technischen Aufwand Vorteile gegenüber den Robotern mit aktiv betriebenen Sauggreifern.

Die Verteilung der nach dem Stand der Technik bestehenden Kletterroboter auf die unterschiedlichen Varianten zur Vakuumerzeugung beschreibt den Trend zu möglichst leichten Systemen, auch unter Inkaufnahme eines gleichzeitig höheren technischen Aufwandes des Gesamtsystems.

Die Roboter mit passiv betriebenen Sauggreifern ermöglichen Systeme mit dem potenziell geringsten Gewicht, Energiebedarf und technischen Aufwand. Der einzige bisher realisierte Roboter dieser Gruppe ist der von Schmierer beschriebene Millepede, der jedoch nur auf begrenzten Strecken einsatzfähig ist (Schmierer, 2001). Eine wissenschaftliche Untersuchung von Klettersystemen mit passiv betriebenen Sauggreifern für Glasfassaden ist deshalb dringend erforderlich.

3.6 Analyse von Glaselementen und -Befestigungen

3.6.1 Toleranzen bei Fertigung und Einbau von Glaselementen

Bei der Überführung der Fugen zwischen den Glaselementen ist der Höhenversatz der aneinander stoßenden Glaskanten zu beachten. Dieser Höhenversatz ergibt sich aus der Einbautoleranz t_{Einbau} und der Dickentoleranz $t_{Scheibe}$ des jeweils eingesetzten Glases. Die Einbautoleranz liegt üblicherweise bei $t_{Einbau} = \pm 1 \text{ mm}$ (Simons, 2004). Die Dickentoleranz eines Glaselementes hängt von dem Dickenmaß des verwendeten Glases ab. Die Dickentoleranzen des im Glasbau am meisten verbreiteten Floatglas, dem in der Regel etwas dünnwandigeren Fensterglas und dem hitzebeständigen Borsilikatglas sind in Abbildung 3-17 in Abhängigkeit ihrer Standarddickenmaße dargestellt. Die größte Dickentoleranz ergibt sich dabei bei 25 mm dickem Floatglas.

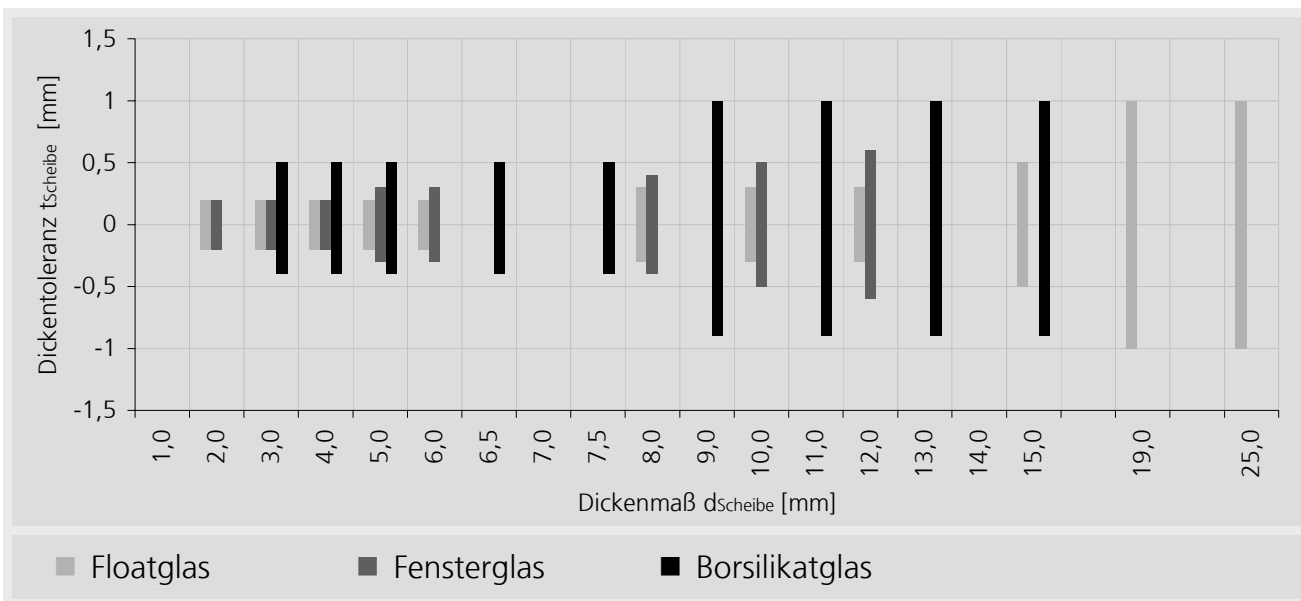


Abbildung 3-17: Dickentoleranzen von Floatglas, Fensterglas und Borsilikatglas

Zur Bestimmung der Dickentoleranz $t_{Verbundscheibe}$ von Verbundscheiben ist die Dickentoleranz der verwendeten Einzelscheibe mit der Anzahl $n_{Scheibe}$ der miteinander verbundenen Glasscheiben

zu multiplizieren. Damit berechnet sich der maximal mögliche Höhenversatz $t_{HV, Gesamt}$ zwischen zwei Glaselementen aus

$$t_{HV, Gesamt} = 2 \cdot t_{Einbau} + 2 \cdot t_{Scheibe, mult} = 2 \cdot t_{Einbau} + 2 \cdot n_{Scheibe} \cdot t_{Scheibe} \quad (3.1)$$

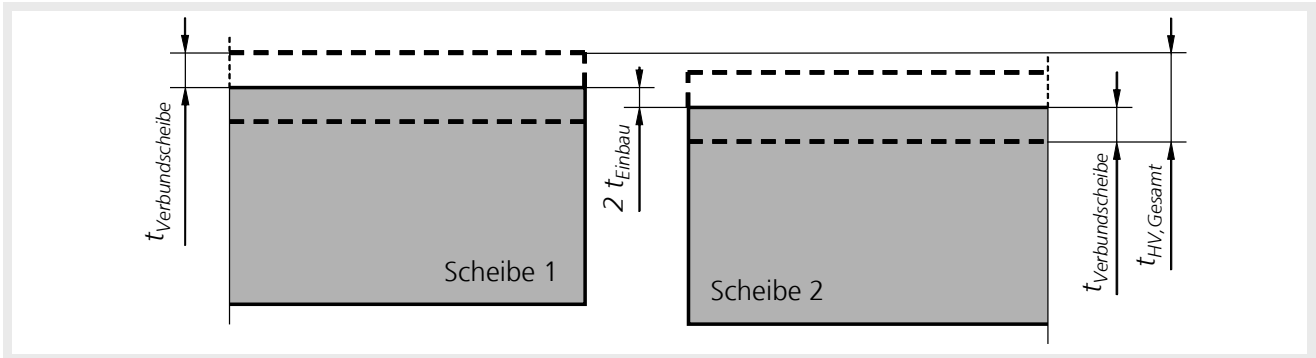


Abbildung 3-18: Höhenversatz zwischen zwei aufeinander stoßenden Glaselementen

Die lieferbaren Dickenmaße von Glaselementen hängen aus Stabilitätsgründen unter anderem von den Abmaßen ihrer jeweiligen Grundfläche ab. Abbildung 3-19 zeigt die lieferbaren Glasdicken für Glasfassaden bei unterschiedlichen Maximallängen (Flachglas, 2004; Gobain, 2004). Hieraus ist ersichtlich, dass 6 m lange Glaselemente eine minimale Dicke von 9 mm haben müssen. Zwischen einer Länge von 3 m und 5,1 m sind die Glaselemente mindestens 5 mm dick, darunter weisen sie eine Dicke von mindestens 4 mm auf.

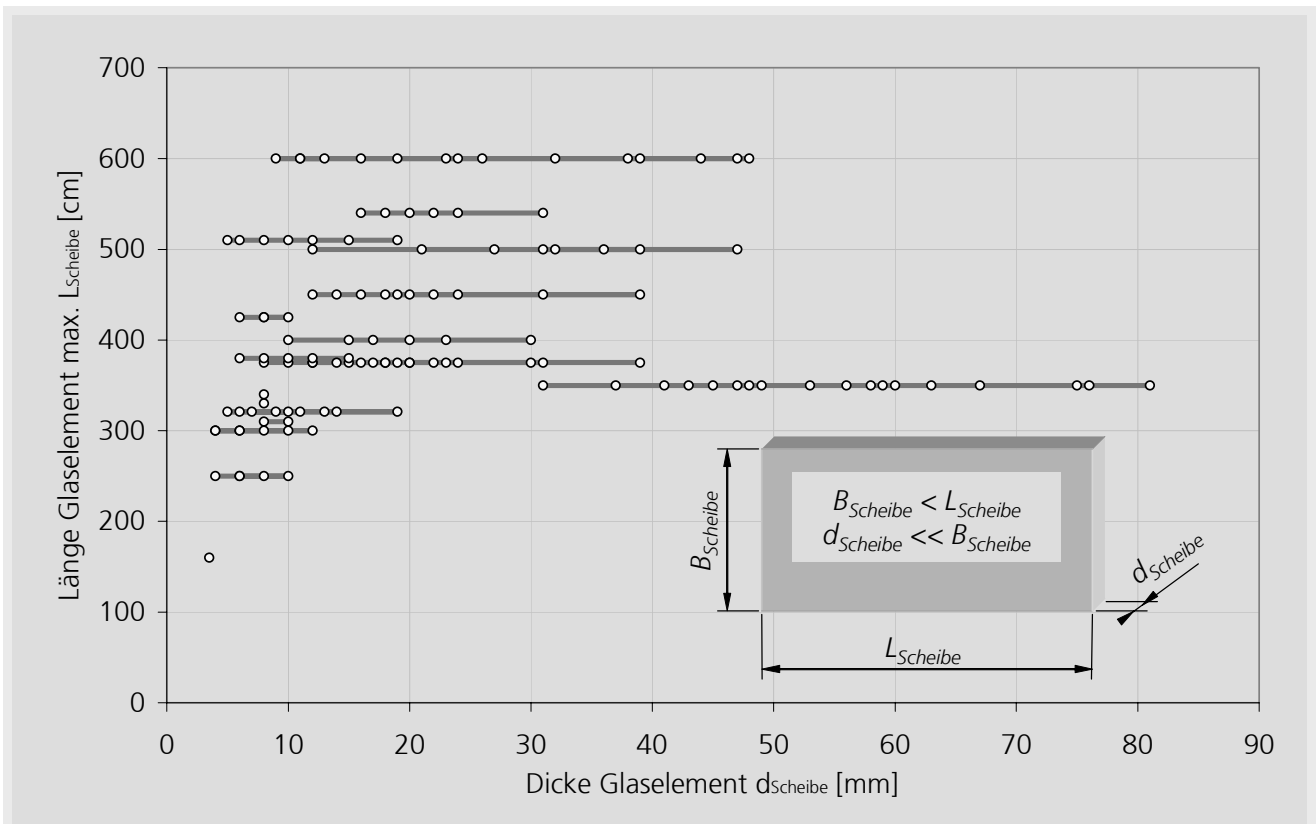


Abbildung 3-19: Lieferbare Dicken der Glaselemente bei unterschiedlichen maximalen Längen (Flachglas, 2004; Gobain, 2004)

3.6.2 Geometrien und Hindernistypen von Glaselementbefestigungen

Je nach Geometrie und Abmaßen der Glaselementbefestigungen können diese vom Roboter entweder überfahren werden oder müssen umfahren werden, um eine Kollision zu vermeiden. Bei der Überfahung der Befestigungen muss bekannt sein, ob ein auftreffender Sauggreifer an dieser Stelle durch Leckage versagt. Abbildung 3-20 zeigt die verschiedenen im Glasbau üblichen Befestigungen und ordnet sie Hindernistypen zu.

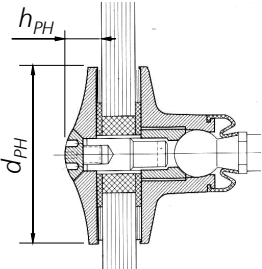
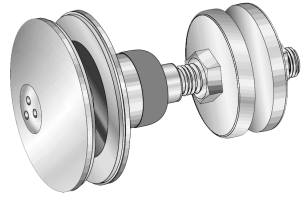

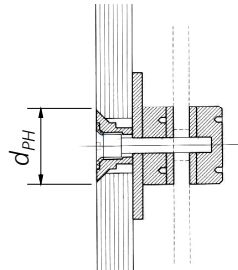
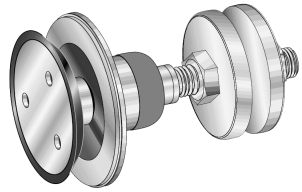

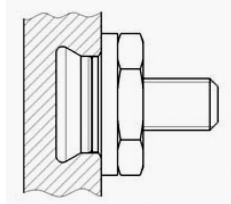


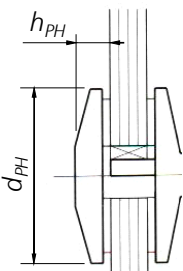


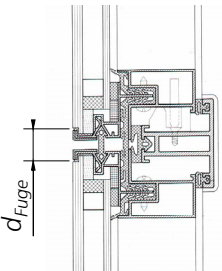
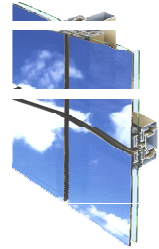

	Schnitt	Ansicht	Parameter	Minimum [mm]	Standard [mm]	Maximum [mm]	Hindernistyp
Punkthalter erhaben		 (Dorma, 2002)	d_{PH}	35	40	80	 konvexe Wölbung
			h_{PH}	8	11	15	
Punkthalter plan		 (Dorma, 2002)	d_{PH}	20	42	45	 Absenkung
			h_{PH}	0	0	0	
Hinterschnittanker		 (Fischer, 2004)	-	-	-	-	 plane Oberfläche
			-	-	-	-	
Klemmhalter		 (Tete, 2004)	l_{KH}	75	75	150	 konvexe Wölbung
			h_{KH}	10	-	30	
Structural Glazing		 (Okna, 2004)	d_{Fuge}	10	20	40	 leere Fuge
			-	-	-	-	

Abbildung 3-20: Geometrien von Befestigungen für Glaselemente und Zuordnung zu Hindernistypen (Pilkington, 2004; Gobain, 2004; Dorma, 2002; Fischer, 2004; Schittich, 1998)

3.6.3 Geometrien und Hindernistypen von Fugen zwischen Glaselementen

Ob ein Sauggreifer beim Auftreffen auf eine Fuge versagt, wird von der spezifischen Geometrie bzw. dem sich daraus ergebenden Hindernistyp bestimmt. Die Geometrie einer Fuge definiert sich über die nach DIN 1249 definierte Kantenform und der Form der in der Fuge befindlichen Dichtung. Die Aufgaben der Dichtung sind Schutz gegen Luft- und Feuchtigkeitseintritt, sowie Eindämmung von Schall und Wärme. Übliche Dichtungsmaterialien sind Silikon, Polysulfide, Polyurethane sowie Acryl-Dispersionen (Wörner, 2001).

Abbildung 3-21 zeigt die möglichen Kombinationen der Kantenformen mit den üblichen Dichtungstypen und ordnet sie Hindernistypen zu.

Dichtungstypen		Kantenformen		Konkaves Dichtprofil	Konkave Verfugung	Konvexes Dichtprofil
		Einfachglas Isolierglas	Verbundglas Isolierglas	Einfachglas		
Kantenformen	<p>$\alpha_{Kante} \approx 90^\circ$ $d_{Scheibe}$</p>					
	<p>$\alpha_{Kante} < 90^\circ$ $d_{Scheibe}$</p>					
	<p>$r_{Kante} = const.$ $d_{Scheibe}$</p>					
	<p>$r_{Kante} = f(d_{Scheibe})$ $d_{Scheibe}$</p>					
Legende		① Glaselement	② Dichtungsprofil	③ Dichtungsmasse		

Abbildung 3-21: Dichtungstypen und Kantenformen in Fugen von Glasfassaden und deren Zuordnung zu Hindernistypen (Wörner, 2001; DIN 1249)

3.6.4 Einfluss der Hindernistypen auf Glasfassaden auf die Funktionalität von passiv betriebenen Sauggreifern mit Dichtlippe

Die Geometrie eines Hindernisses wird wie in Abbildung 3-22 am Beispiel einer Fuge mit der Breite d_{Fuge} dargestellt und durch die Form und Abmaße ihrer Dichtung und ihrer Kante definiert. Die Abmaße einer Dichtung werden dabei über den Dichtungsradius $r_{Dichtung}$ und die Dichtungstiefe $h_{Dichtung}$ angegeben. Die Abmaße einer Kante werden bei einer eckigen Kante über ihren Kantenwinkel α_{Kante} und ihre Kantentiefe t_{Kante} und bei einer runden Kante über ihren Kantenradius r_{Kante} angegeben.

Beim Auftreffen auf eine Fuge bilden sich an der Dichtlippe abhängig von den Abmaßen und dem Material des Sauggreifers spezifische konkave und konvexe Wölbungen mit den Radien $r_{S,konkav}$ und $r_{S,konvex}$.

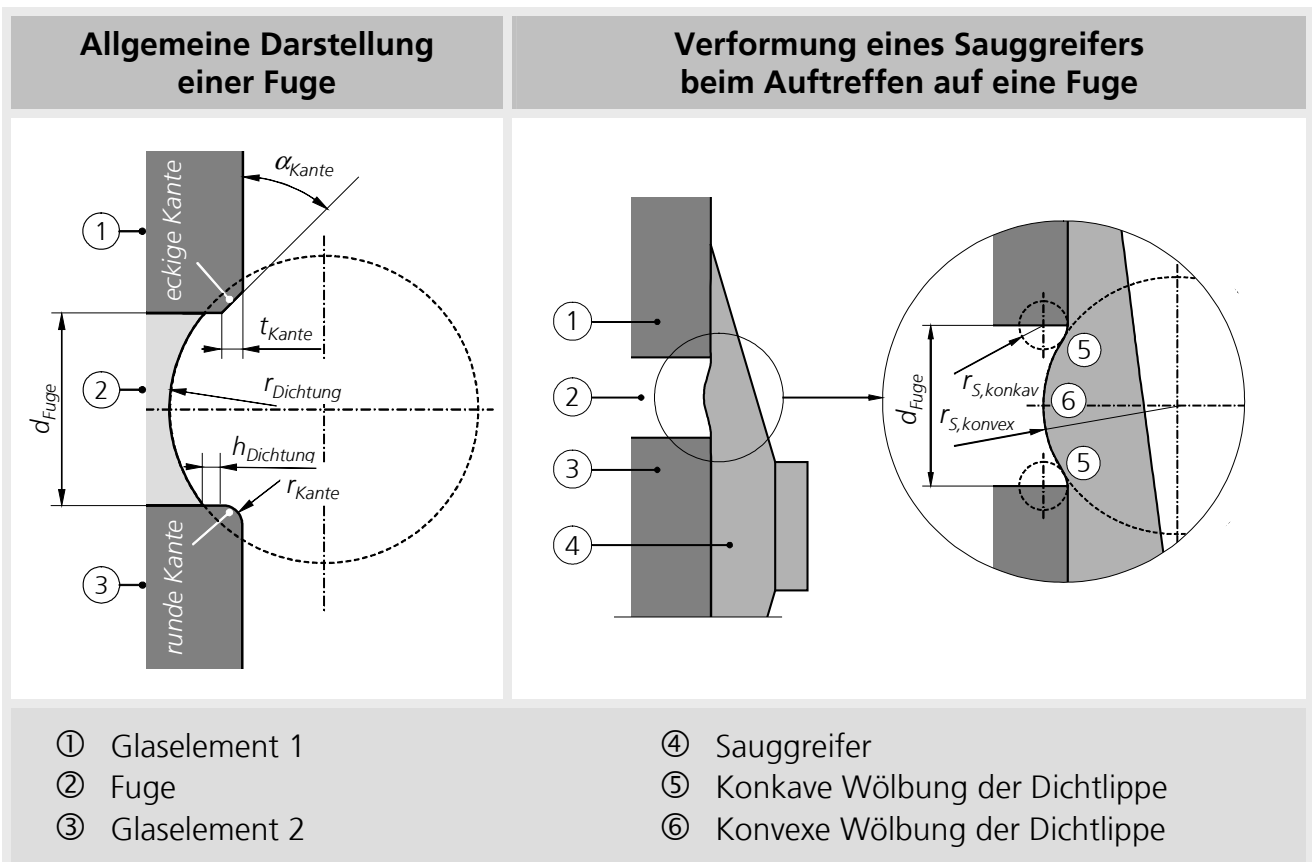


Abbildung 3-22: Darstellung des Verformungsverhaltens eines Sauggreifers beim Auftreffen auf eine Fuge

Ein Versagen des Sauggreifers durch Leckage in Folge einer Spaltbildung zwischen Dichtlippe des Sauggreifers und Oberfläche entsteht, wenn die Dichtlippe sich nicht vollständig und durchgängig an die Kanten- und Dichtungsgeometrie der Fuge anlegen kann. Ein Versagen kann also ausgeschlossen werden, wenn

- der minimal mögliche konkave Radius $r_{S,konkav}$ der Dichtlippe kleiner als der Kantenradius r_{Kante} ist,
- der minimal mögliche konvexe Radius $r_{S,konvex}$ der Dichtlippe kleiner als der Dichtungsradius $r_{Dichtung}$ ist und

- keine eckige Innenkante zwischen Dichtung und Glaselementstirnseite besteht, also $h_{Dichtung} = 0$ ist.

In Abbildung 3-23 werden alle an Fugen und Glasbefestigungen entstehenden Hindernistypen dargestellt und auf Basis der oben definierten geometrischen Anforderungen untersucht, ob ein auftreffender Sauggreifer versagt. Die bei dem Hinterschnittanker auftretende plane Glasoberfläche stellt kein Hindernis dar und wird hier deshalb nicht betrachtet.

Hindernistyp	konkave Wölbung mit rechtwinkliger Einleitung		konkave Wölbung mit gefaster Einleitung		konkave Wölbung mit runder Einleitung		konvexe Wölbung	Absenkung	Leere Fuge
Darstellung									
1. $h_{Dichtung} = 0$	●	○	●	○	●	○	○	◐	○
2. $r_{Kante} \geq r_{S,konkav}$	○	○	○	○	◐	◐	◐	◐ ²	◐ ³
3. $r_{Dichtung} \geq r_{S,konvex}$	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐ ¹	●	○
Abdichtung	○	○	○	○	◐	○	○	◐	○
Legende	<p>● erfüllt ◐ erfüllbar ○ nicht erfüllt</p> <p>1 Sonderfall: $r_{Dichtung} \geq r_{S,konkav}$</p> <p>2 wenn Bedingung 1 zutrifft</p> <p>3 Erfüllbar für runden Kantentyp; hier nicht separat dargestellt.</p>								

Abbildung 3-23: Untersuchung des Abdichtungsverhaltens zwischen Hindernistyp und Sauggreifer

Eine vollständige Abdichtung und damit Funktionsfähigkeit eines Sauggreifers ist also bei einer konkaven Wölbung mit runder Einleitung, sowie bei einer Absenkung bei dargestellten Randbedingungen möglich.

Beim Auftreffen auf die anders gearteten Hindernistypen muss mit einem Versagen des jeweiligen Sauggreifers gerechnet werden. Hierbei ist die pneumatische Abgeschlossenheit jedes Sauggreifers gegenüber allen anderen notwendig. Bei passiv betriebenen Sauggreifern ist dies generell gegeben. Aktiv betriebene Sauggreifer sind in der Regel zentral an einer gemeinsamen Unterdruckquelle angeschlossen und können nur mit technisch und meistens auch steuerungstechnisch aufwendigen Ventileinheiten pneumatisch voneinander getrennt werden.

3.6.5 Einfluss der Fassadengeometrie auf die Geometrie der Raupe mit passiv betriebenen Sauggreifern

Im Unterschied zum Gleitrahmen und zum Vielbeiner ist bei der Raupe der Abstand zwischen den Sauggreifern fest vorgegeben. Das hat zur Folge, dass das Auftreffen eines Sauggreifers auf einen Hindernistyp, der ein Versagen des Sauggreifers verursacht, nicht durch Variation der Schrittweite vermieden werden kann. Diese Tatsache muss bei der Auslegung einer Raupe mit passiv betriebenen Sauggreifern berücksichtigt werden.

Hieraus ergeben sich zwei Bedingungen:

- *Sauggreiferabstand:*
Um die Möglichkeit auszuschließen, dass eine Raupe mit allen an der Glasoberfläche befindlichen Sauggreifern jeweils auf einem Hindernis steht, muss der Sauggreiferabstand a_{SG} und der Sauggreiferdurchmesser D_{SG} so gewählt werden, dass von zwei vertikal benachbarten Sauggreifern mindestens ein Sauggreifer vollständig (d.h. ohne Überlappung mit einem Hindernis) auf der Glasoberfläche aufliegen kann.
- *Minimale Anzahl der Sauggreifer:*
Nach Ausfall der maximal möglichen Anzahl an Sauggreifern durch Auftreffen auf Hindernisse müssen die restlichen im Haftzustand verbleibenden Sauggreifer die Funktionalität der Raupe gewährleisten.

Sauggreiferabstand

Für die erste Bedingung ergeben sich zwei Fälle:

1. Ein Sauggreifer versagt durch Überlappen mit einem Hindernis an seiner hinteren Dichtlippenkante. Damit der nachfolgende davor aufsetzende Sauggreifer ohne Überlappen mit dem folgenden Hindernis aufsetzen kann, müssen Sauggreiferabstand a_{SG} und Sauggreiferdurchmesser D_{SG} bei gegebener minimaler Länge $L_{Scheibe}$ eines Glaselementes derart gewählt werden, dass beide Sauggreifer vollständig auf dem Glaselement Platz finden können:

$$a_{SG} \stackrel{!}{\leq} L_{Scheibe} - D_{SG} \quad (3.2)$$

2. Ein Sauggreifer versagt durch Überlappen mit einem Hindernis an seiner vorderen Dichtlippenkante. Damit der nachfolgende davor aufsetzende Sauggreifer ohne schneiden desselben Hindernisses aufsetzen kann, muss die Hindernisbreite $d_{Hindernis}$ kleiner sein, als der Abstand der beiden benachbarten Sauggreiferaußenkanten:

$$d_{Hindernis} \stackrel{!}{<} a_{SG} - D_{SG} \quad (3.3)$$

Minimal notwendige Anzahl an Sauggreifern

Bei bekanntem Achsabstand $2a$ zwischen den beiden äußeren Umlenkrollen der Raupe, bekannter minimaler Länge $L_{Scheibe}$ der zu befahrenden Glaselemente sowie bekannter minimaler Hindernisbreite $d_{Hindernis}$ zwischen den Glaselementen steht die Raupe im ungünstigsten Fall auf einer maximalen Anzahl von $n_{Hindernis,max}$ Hindernissen, die durch

$$n_{Hindernis,max} = \text{int}\left(\frac{2a}{L_{Scheibe} + d_{Hindernis}}\right) \quad (3.4)$$

berechnet werden kann. Unter Voraussetzung von Gleichung (3.3) entspricht diese Anzahl an Hindernissen der maximal möglichen Anzahl $n_{SG,aus}$ an durch Überfahren von Hindernissen ausgefallener Sauggreifer. Zusammen mit der Bedingung aus Abbildung 3-12 für die minimale Sauggreiferanzahl $n_{SG,min}$ berechnet sich die für die Funktion der Raupe notwendige Anzahl n_{SG} an Sauggreifern zwischen den beiden Achsen der Umlenkrollen damit zu:

$$n_{SG} = n_{SG,min} + n_{SG,aus} = n_{SG,min} + n_{Hindernis,max} \quad (3.5)$$

Je geringer die Länge der Glaselemente bei gegebenem Achsabstand $2a$ ist, desto höher wird die Anzahl an potenziell ausfallenden Sauggreifern. Im Fall, dass die verbleibenden im Haftzustand befindlichen Sauggreifer nicht mehr ausreichen, um die Last des Kletterroboters aufzunehmen, muss der Achsabstand vergrößert werden, um die entsprechende Anzahl an Sauggreifern unterbringen zu können. Bei sehr kurzen Hindernisabständen ergibt sich dadurch für eine Raupe mit passiv betriebenen Sauggreifern eine lange und schmale Geometrie.

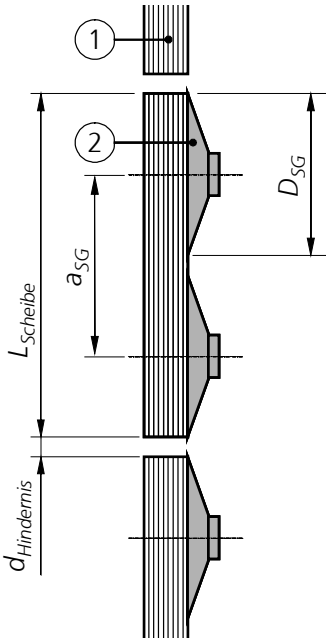
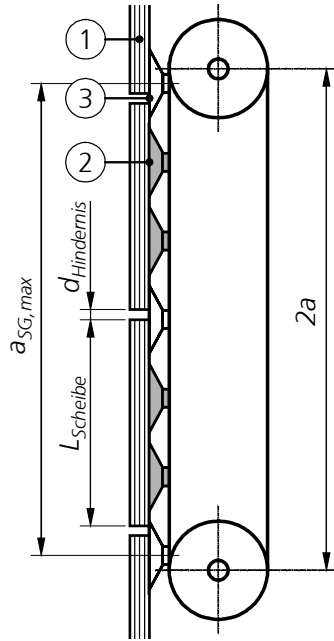
	Maximaler Sauggreiferabstand	Zusätzliche Anzahl an Sauggreifern
Bedingungen	Von zwei vertikal benachbarten Sauggreifern muss mindestens ein Sauggreifer vollständig (d.h. ohne Überlappung mit einem Hindernis) auf einem Glaselement aufliegen können.	Nach Ausfall der maximal möglichen Anzahl an Sauggreifern durch Auftreffen auf Hindernisse müssen die restlichen im Haftzustand verbleibenden Sauggreifer die Funktionalität der Raupe gewährleisten.
Darstellung		
Abgeleitete Anforderungen	$a_{SG} \leq L_{Scheibe} - D_{SG}$ $d_{Hindernis} < a_{SG} - D_{SG}$	$n_{SG} = n_{SG,min} + \text{int} \left(\frac{2a}{L_{Scheibe} + d_{Hindernis}} \right)$
Legende	① Glaselement ② Sauggreifer im Haftzustand durch vollständiges Aufliegen ③ ausgefallener Sauggreifer durch Auftreffen auf ein Hindernis	

Abbildung 3-24: Zusammenhang zwischen Abmessungen der Glaselemente und Abstand und Anzahl der Sauggreifer

Abbildung 3-25 zeigt die im Glasbau üblichen Abmaße der Glaselemente. Die Standardlängen liegen hier zwischen 1 und 6 Metern. Die nach dem Stand der Technik vorhandenen Fassadenkletterroboter haben eine maximale Länge von 1,8 Metern. In den meisten Fällen überfährt ein Roboter zu einem bestimmten Zeitpunkt also maximal zwei Fugen. Die lange und schmale Raupegeometrie wird von der Glaselementgeometrie daher nur im Bereich des an Glasfassaden selten in Erscheinung tretenden minimalen Fertigungsmaßes von 20 Zentimetern gefordert. Maßgebend ist diese Länge bei der Berechnung des minimalen Sauggreiferabstandes.

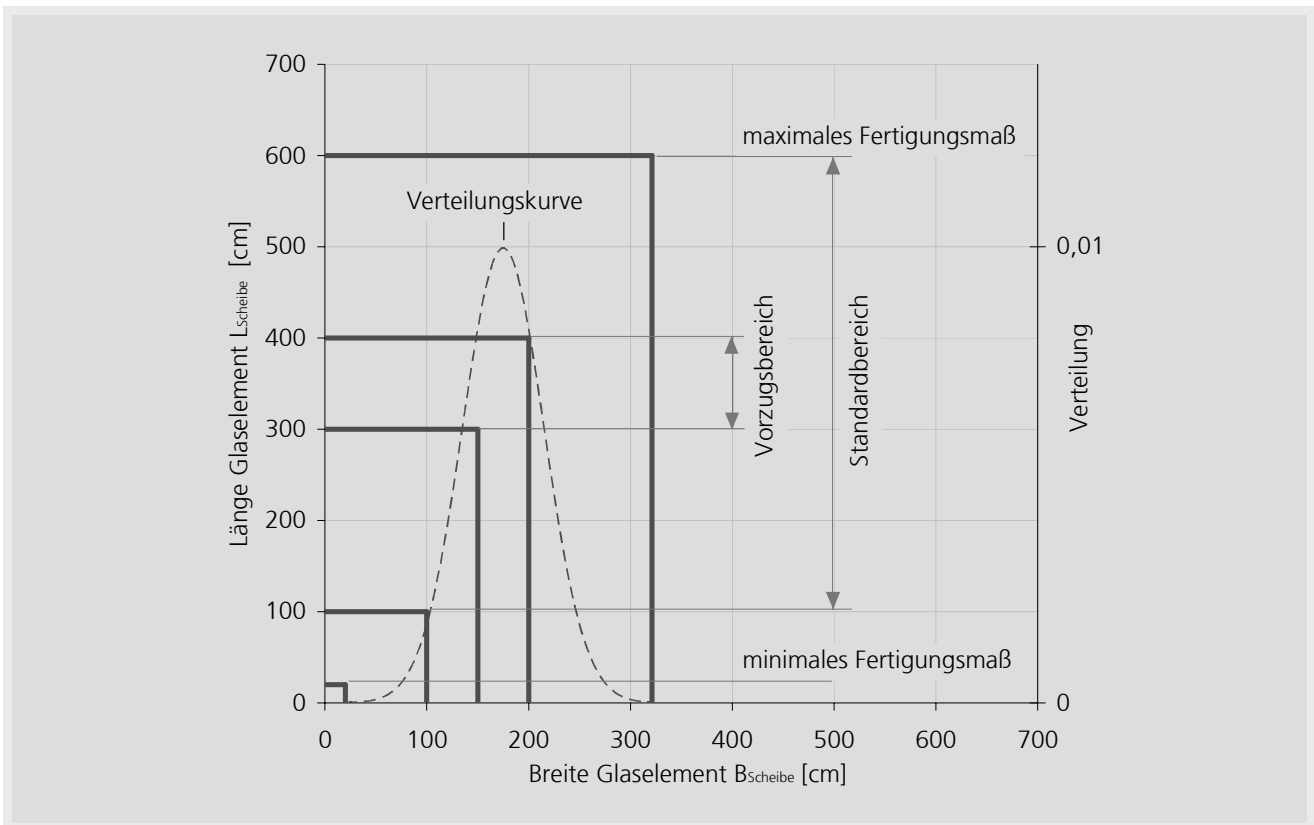


Abbildung 3-25: Im Glasbau übliche Längen und Breiten von Glaselementen (Flachglas, 2004; Gobain, 2004)

3.6.6 Windlast auf Kletterroboter an Gebäudefassaden

Für die universelle Einsetzbarkeit eines Kletterroboters auf Fassaden muss bei der Windlastbetrachtung von den ungünstigsten Windverhältnissen ausgegangen werden. Deutschland ist nach DIN 1055 in vier Windlastzonen aufgeteilt. Die höchsten Windkräfte treten in Windlastzone IV auf. Für beliebige Gebäudehöhen $z_{\text{Gebäude}}$ berechnet sich danach die Windlast wie folgt:

$$w_e = c_f \cdot f_{WLZ} \cdot q_{ref,0} \cdot \left(\frac{z_{\text{Gebäude}}}{10} \right)^{E_{WLZ}} \quad (3.6)$$

Die in dieser Berechnung enthaltenen Parameter sind in Abbildung 3-26 beschrieben.

Beschreibung des Parameters	Variable	Einheit	Wert
Aerodynamischer Kraftbeiwert	c_f	-	Abhängig von der Gebäudegeometrie
Windlastzone	WLZ	-	IV
Windlastzonenfaktor	f_{WLZ}	-	2,6
Windlastzonenexponent	E_{WLZ}	-	0,19
Referenzwindlast	$q_{ref,0}$	$[N/m^2]$	0,64

Abbildung 3-26: Parameter zur Berechnung der Windlast nach DIN 1055 für die Windlastzone IV (DIN 1055)

3.7 Folgerungen aus den Analyseergebnissen

Die in der Analyse durchgeführten Untersuchungen von Sauggreifern und von Varianten zur Unterdruckerzeugung bei Kletterrobotern zeigen, dass der passive Einsatz von Sauggreifern an Kletterrobotern für Glasfassaden Systeme mit niedrigerem technischen Aufwand, Gewicht und Energiebedarf ermöglicht als dies bei Systemen mit aktiv betriebenen Sauggreifern möglich ist. Die Minimierung des technischen Aufwandes ermöglicht die Reduzierung der Herstellkosten sowie die Steigerung der Zuverlässigkeit des Systems und damit die Verringerung des Wartungsaufwandes.

Da bei passiv betriebenen Sauggreifern keine Reibeinlagen verwendet werden können, werden die für das Versagen der Sauggreifer als kritisch identifizierten Scherkräfte alleine von der Dichtlippe aufgenommen. Der durch die hier auftretenden elastischen Verformungen und Schlupfprozesse verursachte Versatz parallel zur Oberfläche muss bei der Steuerung des Kletterroboters berücksichtigt werden. Durch die Abhängigkeit des Unterdrucks im Sauggreiferinneren von der angreifenden Zuglast unterscheidet sich das Schlupfverhalten passiv betriebener Sauggreifer grundlegend von dem Verhalten aktiv betriebener Sauggreifer. Aus dem Stand der Technik und insbesondere der Abbildung 2-8 wird jedoch deutlich, dass es noch keine wissenschaftlichen Erkenntnisse und Berechnungsgrundlagen über dieses Schlupfverhalten von passiv betriebenen Sauggreifern an Kletterrobotern für den Einsatz auf Glasfassaden gibt.

Weiterhin konnte gezeigt werden, dass das Vortriebsprinzip des umlaufenden Greifers bzw. der Raupe für den Einsatz auf Glasfassaden insbesondere hinsichtlich Applikationsführung, Gewicht und Energiebedarf am besten geeignet ist. Die Analyseergebnisse zeigten jedoch auch, dass bisher realisierte Raupen bei passivem Betrieb der Sauggreifer auch bei unbegrenzter Energieversorgung nur eine begrenzte vertikale Strecke zurücklegen können, bevor sie von der zu befahrenden Oberfläche fallen.

Die folgenden Schritte sind also nun

- die Aufstellung der aus den Analyseergebnissen resultierenden Anforderungen an einen Kletterroboter nach dem Vortriebsprinzip der Raupe mit passiv betriebenen Sauggreifern,
- die Konzeption eines Kletterroboters auf Basis des Raupenprinzips mit passiv betriebenen Sauggreifern für unbegrenzte vertikale Strecken,

- die Entwicklung eines Verfahrens zur Ermittlung der Zug- und Scherkräfte auf die passiv betriebenen Sauggreifer der Raupe sowie
- die Entwicklung von Berechnungsgrundlagen zur Ermittlung des Schlupfverhaltens von passiv betriebenen Sauggreifern unter der Einwirkung der oben genannten Kräfte

beinhalten.

3.8 Anforderungen an Kletterroboter nach dem Raupenprinzip zur Befahrung von Glasfassaden

3.8.1 Definition der Teilsysteme

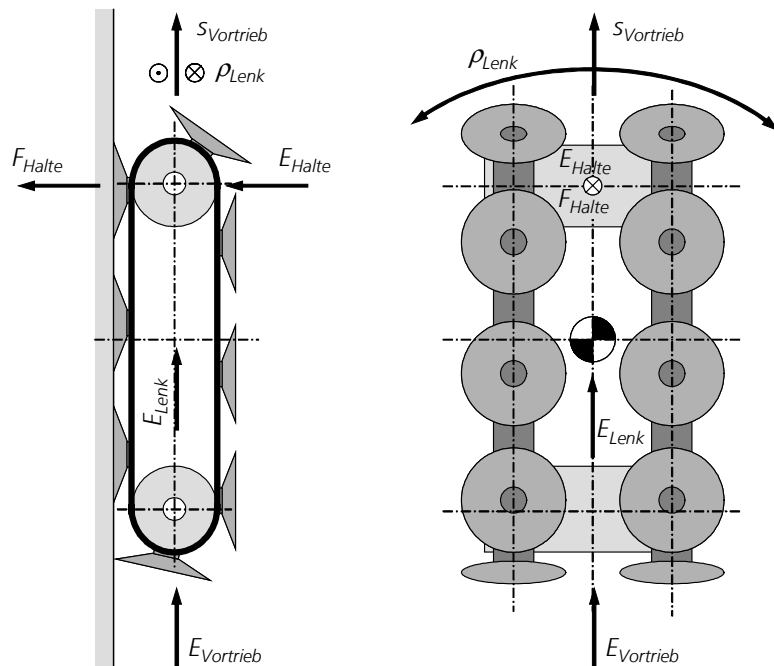
Das Gesamtsystem eines Kletterroboters besteht aus den Teilsystemen Vortrieb, Lenken, Halten, Energie, Steuerung, dem Rahmen sowie der jeweiligen Applikation.

Die Art der Applikation, der Typ und die Dimensionierung des Energiesystems, die Komponenten und der Aufbau des Steuerungssystems sowie die Auslegung des Rahmens ergeben sich direkt aus den äußeren Randbedingungen, den Anforderungen der übrigen Teilsysteme sowie den Anforderungen des jeweiligen Einsatzzweckes des Roboters. Hierbei kann direkt auf Lösungen aus dem Stand der Technik zurückgegriffen werden.

Das Vortriebssystem, das Lenksystem und das Haltesystem bilden zusammen das Klettersystem, welches in den vorangegangenen Abschnitten für diese Arbeit als relevant identifiziert wurde.

**Darstellung und Beschreibung des Klettersystems
(basierend auf dem Raupenprinzip mit passiv betriebenen Sauggreifern)**

Darstellung der Kräfte und Energien auf das Klettersystem



Beschreibung Haltesystem

- Kraftschlüssige Schnittstelle zwischen Roboter und Fassade
- Kernkomponenten oder mehrere Sauggreifer sowie eine Vorrichtung, welche durch Aufbringung der Energie E_{Halte} die Haltekraft F_{Halte} zur kraftschlüssigen Verbindung zwischen dem Haltesystem und der Fassade aufbringt.

Beschreibung Vortriebssystem

- Dient zur bevorzugt linearen Fortbewegung des Roboters.
- Kernkomponenten sind eine umlaufende Führungseinheit und eine Antriebseinheit zur Erzeugung der Vorwärtsbewegung.
- Die Führungseinheit dient zum Aufsetzen bzw. Ablösen der Greifeinheiten auf die bzw. von der Oberfläche und zur Führung der Haltemodule.
- Die Antriebseinheit erzeugt über die Vortriebsenergie $E_{Vortrieb}$ die Vorwärtsbewegung $s_{Vortrieb}$.

Beschreibung Lenksystem

- Zuständig für Richtungswechsel des Roboters.
- Kernkomponenten sind eine Aktorik zur Erzeugung eines Lenkwinkels δ_{Lenk} mittels der Lenkenergie E_{Lenk} sowie eine Kinematik zur entsprechenden Führung der Greifeinheiten des Haltesystems.
- Richtungswechsel finden je nach Konzeptvariante entweder durch eine Orientierungsänderung im stehenden Zustand des Roboters statt oder durch eine stetige Drehung des Systems während der Vorwärtsbewegung.

Abbildung 3-27: Beschreibung des Klettersystems und seiner Teilsysteme

3.8.2 Anforderungen an das Klettersystem

Die einzelnen Punkte der in Abbildung 3-28 dargestellten Zusammenstellung teilen sich auf in Anforderungen an die Beständigkeit der einzelnen Komponenten gegen bestimmte Umgebungsbedingungen, in Anforderungen an den konzeptionellen Aufbau des Klettersystems und in sonstige Anforderungen.

Anforderungen an das Klettersystem	
Beständigkeit	Einsatz bei Umgebungstemperaturen von -20°C bis +70°C
	Schutzklasse IP 65
	UV- und Ozonbeständigkeit aller außen liegenden Komponenten
Aufbau	Geringer technischer Aufwand durch minimale Anzahl an Teilen
	Kompakte Bauform durch minimale Grundfläche auf der Fassade
	Keine Nabelschnur zur Energie- oder Informationsübertragung
Sonstiges	Reinigungsintervall von 2 bis 6 Monaten
	Geringes Gewicht (Tragbarkeit durch einen Menschen: max. 30 kg)
	Geringe mechanische Verlustleistung

Abbildung 3-28: Anforderungen an das Gesamtsystem des Fassadenkletterroboters

3.8.3 Anforderungen an die Teilsysteme des Klettersystems

In Abbildung 3-29 sind die sich aus der vorangegangenen Analyse ergebenden Anforderungen für die Teilsysteme Halten, Vortrieb und Lenken zusammengefasst.

Anforderungen an die Teilsysteme	
Haltesystem	Kraftschlüssige Verbindung durch Sauggreifer mit folgenden Spezifikationen: <ul style="list-style-type: none"> • passiver Betrieb • Dichtungseinheit: Dichtlippe • Material der Dichtungseinheit: Silikon • Keine Reibeinlage • runde Sauggreifergrundfläche
	Aufnahme einer Windlast von maximal $w_e = 3,499 N/m^2 \cdot c_f$
	Geringe Belastung der Sauggreifer in Zug-Normalenrichtung
	Geringe pneumatische Verlustleistung
	Halten auf vertikalen und um bis zu 20° gegen die Vertikale geneigten Fassaden
Vortriebssystem	Aufbringung der notwendigen Druckkraft zum Andrücken der Sauggreifer
	Abstand der Sauggreifer $a_{SG} \leq 20 \text{ cm} - D_{SG}$
	Überwindung von Absätzen von $t_{HV, Gesamt} = 2 \text{ mm} \cdot (1 + n_{Scheibe})$
	Mindestanzahl an Sauggreifern von $n_{SG} = 1 + \text{int} \left(\frac{2a}{L_{Scheibe} + 40 \text{ mm}} \right)$
	Befahrung von Gebäuden mit einer Höhe von bis zu 500 m
	Lineare, kontinuierliche Bewegungsform des Roboterrahmens
	Überwindung von Hindernissen mit maximaler Höhe von 30 mm (Wunsch)
Lenksystem	Aufsetzen und Führung der Sauggreifer mit minimaler Gefahr des Einrollens der Dichtlippe
	Orientierungswechsel in der Oberflächenebene im Stillstand von 0° bis ± 90°
	Zusätzliche aktive Vorrichtung zur unbegrenzten Sicherung des Roboters auf der Glasoberfläche während des Stillstandes
	Führung der Sauggreifer mit minimaler Gefahr des Einrollens der Dichtlippe

Abbildung 3-29: Anforderungen an die Teilsysteme Halten, Vortrieb und Lenken

4 Konzeption eines Kletterroboters nach dem Raupenprinzip mit passiv betriebenen Sauggreifern

4.1 Konzeption des Haltesystems

4.1.1 Lösungsvarianten für das Haltesystem

Das Wirkprinzip des Haltesystems ist der in Kapitel 3 analysierte passiv betriebene Sauggreifer. Die konzeptionell noch zu betrachtende Komponente des Haltesystems ist der Wirkantrieb. In Abschnitt 3.4.2 wurde die Problematik der auf den vordersten Sauggreifer wirkenden Zugkraft festgestellt. Der Wirkantrieb hat hier die Aufgabe der Anpressung des Sauggreifers auf die Oberfläche. Die hier der Zugkraft entgegenwirkende notwendige Druckkraft wird erreicht, wenn das durch den Masseschwerpunkt um den hintersten Sauggreifer wirkende Kippmoment kompensiert wird. Diese Kompensation wird erreicht, indem ein Teil der hinter dem vordersten Sauggreifer im Haftzustand befindlichen Sauggreifer auf Zug beansprucht werden. Dies wiederum geschieht durch eine Riemen- bzw. Kettenführung, welche eine lokale Anhebung des Niveaus der Sauggreiferführung gegenüber der vorderen Umlenkrolle bewirkt (Schaft, 2002).

Im Folgenden sind fünf Varianten für solch eine Führung beschrieben und in Abbildung 4-1 dargestellt:

1. Jeweils ein Umlenkritzel unmittelbar hinter bzw. vor der vorderen bzw. hinteren Umlenkrolle hebt das Niveau der Sauggreiferführung gleichmäßig an. Alle zwischen der vorderen und der hinteren Umlenkrolle befindlichen Sauggreifer werden dadurch gleichmäßig auf Zug beansprucht.
2. Ein Umlenkritzel unmittelbar hinter der vorderen Umlenkrolle hebt das Niveau der Sauggreiferführung an und lässt es zur hinteren Umlenkrolle linear abfallen. Alle zwischen der vorderen und der hinteren Umlenkrolle befindlichen Sauggreifer werden auf Zug beansprucht. Die Zugkraft nimmt von vorne nach hinten linear ab.
3. Ein Umlenkritzel unmittelbar vor der hinteren Umlenkrolle hebt das Niveau der Sauggreiferführung an und lässt es zur vorderen Umlenkrolle linear abfallen. Alle zwischen der vorderen und der hinteren Umlenkrolle befindlichen Sauggreifer werden auf Zug beansprucht. Die Zugkraft nimmt von vorne nach hinten linear zu.
4. Ein hinter der hinteren Umlenkrolle und am Rahmen befestigter Niederhalter (Spacer) sowie ein unmittelbar hinter der vorderen Umlenkrolle angebrachtes Umlenkritzel heben das Niveau der Sauggreiferführung gleichmäßig an. Alle hinter der vorderen Umlenkrolle befindlichen Sauggreifer werden dadurch gleichmäßig auf Zug beansprucht.
5. Ein hinter der hinteren Umlenkrolle und am Rahmen befestigter Niederhalter (Spacer) hebt das Niveau der Sauggreiferführung an und lässt es zur vorderen Umlenkrolle linear abfallen. Alle hinter der vorderen Umlenkrolle befindlichen Sauggreifer werden dadurch gleichmäßig auf Zug beansprucht. Die Zugkraft nimmt von vorne nach hinten linear zu.

In den Varianten 1 bis 3 entsteht das Kompensationsmoment um den an der hinteren Umlenkrolle befindlichen und auf Druck beanspruchten Sauggreifer. In Variante 4 und 5 entsteht das Kompensationsmoment um den Aufsetzpunkt des Spacers.

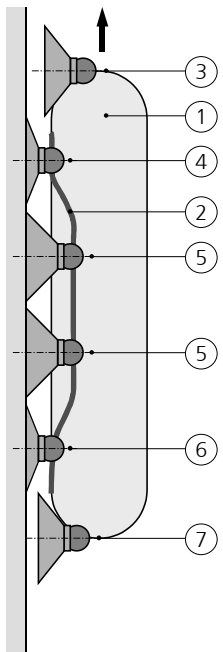
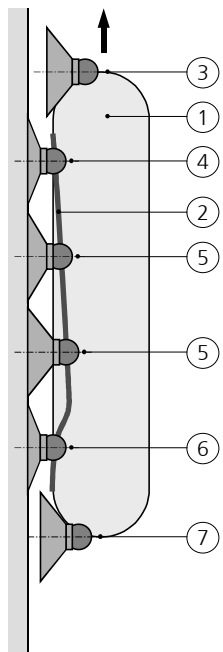
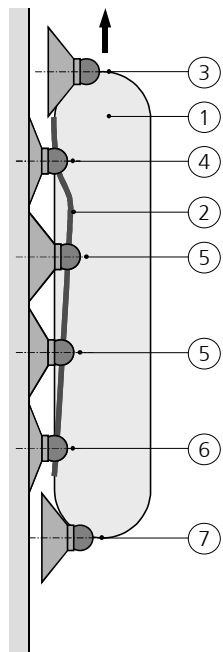
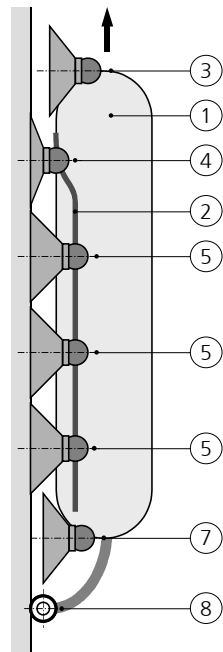
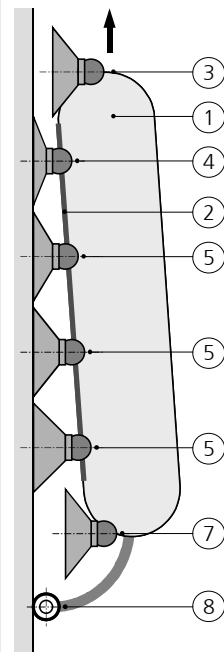
	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4	Variante 5
Beschreibung	Doppelt gekrümmte, vertikale Führung	Einfach gekrümmte, ansteigende Führung	Einfach gekrümmte, abfallende Führung	Einfach gekrümmte, vertikale Führung mit Spacer ¹	Ungekrümmte, ansteigende Führung mit Spacer ¹
Seitenansicht					
Legende	<ul style="list-style-type: none"> ① Roboterrahmen ② Führungsschiene ③ Sauggreifer in Absenkungsphase ④ Sauggreifer in Anpressphase 		<ul style="list-style-type: none"> ⑤ Sauggreifer in Zugphase ⑥ Sauggreifer in Entspannungsphase ⑦ Sauggreifer in Ablösephase ⑧ Spacer 		
	¹ (Fraunhofer, 2003a; Fraunhofer, 2003b)				

Abbildung 4-1: Lösungsvarianten für das Haltesystem

4.1.2 Bewertung der Lösungsvarianten für das Haltesystem

Der technische Aufwand wird anhand der an der Führungsschiene befindlichen Krümmungen und der Anzahl zusätzlicher Komponenten bewertet. Eine gekrümmte Führungsschiene bedeutet entweder einen zusätzlichen Freiheitsgrad an den Sauggreiferaufhängungen oder zusätzliche Ritzel zur dementsprechenden Umlenkung der Riemen- oder Kettenführung. Da beide Möglichkeiten das Hinzufügen von bewegten Teilen bedeutet, wird hinsichtlich eines geringen technischen Aufwandes und demzufolge auch hinsichtlich eines geringen Gewichtes die Variante 5 mit dem Spacer als beste Variante bewertet.

Durch die Anzahl der Krümmungen unterscheiden sich die einzelnen Varianten in ihrer mechanischen Verlustleistung. Dies führt für dieses Kriterium zur Abwertung der Variante 2 bis 4 und insbesondere der Variante 1 gegenüber der Variante 5.

Der nach hinten hinausragende Spacer führt jedoch bei Variante 4 und 5 bei dem kritischen Kriterium der Baugröße zur Abwertung gegenüber den ersten drei Varianten.

Die pneumatische Energie zum Vorspannen der Sauggreifer auf die notwendige Zugbelastung muss von dem für die Vorschubbewegung zuständigen Antriebsmotor aufgebracht werden. Bei den Varianten 1 bis 3 wird diese Energie durch Entspannung der Sauggreifer zur hinteren Umlenkrolle dem Klettersystem wieder zurückgegeben und in Vorschubenergie umgewandelt. Hier entsteht demnach keine Verlustleistung durch Vorspannung der Sauggreifer. Bei Variante 4 und 5 werden die Sauggreifer im vorgespannten Zustand an der hinteren Umlenkrolle belüftet und damit von der Oberfläche abgelöst. Die in dem jeweiligen Sauggreifer gespeicherte pneumatische Energie wird bei der Rückverformung vollständig in Wärme umgewandelt und geht dadurch dem System für seine Vorschubbewegung verloren. Durch entsprechende Einstellungen des Spacer kann diese Verlustenergie minimiert – jedoch niemals eliminiert werden. Dies führt für die pneumatische Verlustleistung bei Variante 4 und 5 gegenüber den ersten drei Varianten zur Abwertung.

Der Verschleiß der Sauggreifer ist bei allen 5 Varianten gleich. Die Belastung und damit die geforderte Dimension der Sauggreifer ist jedoch unterschiedlich. Je gleichmäßiger die Zugkräfte auf die Sauggreifer verteilt sind, je länger der Hebel jeder einzelnen Zugkraft ist und je größer die Zugkräfte bei langen Hebeln – also bei den vorderen Sauggreifern – sind, desto günstiger wirkt sich das auf die durchschnittliche Belastung der Sauggreifer aus. Dementsprechend erhalten die Sauggreifer in Variante 3 die höchste Belastung, gefolgt von Variante 2 und 1. Bei Variante 4 und 5 ist es möglich, den Aufsetzpunkt des Spacers, welcher den Drehpunkt des Kompensationsmomentes darstellt, beliebig weit nach hinten zu verschieben. Dadurch werden die Hebel der Zugkräfte in den Sauggreifern vergrößert und das notwendige Kompensationsmoment durch eine geringere Belastung der Sauggreifer ermöglicht. Die Belastungen bei Variante 4 sind dabei durch seine gleichmäßige Sauggreiferanordnung geringer als bei Variante 5.

Bewertungskriterien für das Haltesystem	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4	Variante 5
Geringer technischer Aufwand	◐	◐	◐	◐	●
Geringes Gewicht	◐	◐	◐	◐	●
Geringe Baugröße	●	●	●	◐	◐
Geringe mechanische Verlustleistung	○	◐	◐	◐	●
Geringe pneumatische Verlustleistung	●	●	●	◐	◐
Geringer Verschleiß der Sauggreifer	●	●	●	●	●
Geringe Belastung der Sauggreifer	◐	○	◐	●	●
Legende:	● gut erfüllt	◐ bedingt erfüllt	○ nicht erfüllt		

Abbildung 4-2: Bewertung der Lösungsvarianten des Haltesystems

In der Gesamtbewertung wird Variante 5 hier als favorisierte Variante ausgewählt. Sie hebt sich von den anderen Varianten durch einen geringen technischen Aufwand, geringes Gewicht, geringe mechanische Verlustleistung und eine geringe Belastung der Sauggreifer ab. Die

gegenüber den Varianten 1 bis 3 etwas höhere pneumatische Verlustleistung kann durch entsprechende Spacereinstellungen minimiert werden. Die größere Baugröße bezieht sich alleine auf die Länge des Systems und kann teilweise durch die geringe Belastung und damit geringe notwendige Dimensionierung der Sauggreifer kompensiert werden.

4.2 Konzeption des Vortriebssystems

4.2.1 Darstellung der Lösungsvarianten für das Vortriebssystem

Die Varianten des Vortriebssystems zur Führung der Haltemodule unterscheiden sich in der Art ihrer Aufhängung an der umlaufenden Führungseinheit. Hier gibt es die drei folgenden Prinzipien:

- feste Aufhängung,
- gelenkige (rotatorische) Aufhängung und
- lineare (translatorische) Aufhängung.

Um die Haltemodule an der Vorderseite der Raupe auf die Oberfläche aufzusetzen und an der Hinterseite wieder abzulösen, ergibt sich für jede Variante der Aufhängung ein spezifisches Konzept zur Führung der Haltemodule.

Bei der festen Aufhängung ist das Haltemodul unbeweglich an der Führungseinheit installiert. Bei der Absenkung des Haltemoduls um die vordere Umlenkrolle wird die in Normalenrichtung zur Oberfläche stattfindende Aufsetzbewegung mit einer rotatorischen Bewegung überlagert. Nach Abschnitt 3.3.2 verursacht dieser Vorgang bei Kontakt der Dichtfläche mit der Oberfläche ein Einrollen der Dichtlippe. Um dies zu vermeiden, muss ein weiteres Umlenkritzel installiert werden, welches ermöglicht, dass die Dichtlippe erst dann Kontakt mit der Oberfläche erhält, wenn die Bewegung um die vordere Umlenkrolle weitgehend abgeschlossen ist. Die sich hieraus ergebende Führungseinheit entspricht dem Prinzip der Panzerkettenführung.

Die gelenkige Aufhängung ermöglicht eine translatorische Bewegung der Haltemodule, so dass ein senkrecht Aufsetzen und Ablösen der Haltemodule direkt über die vordere und die hintere Umlenkrolle möglich ist.

Bei der linearen Aufhängung sind die Haltemodule senkrecht zur Oberfläche verschiebbar an der Führungseinheit befestigt. Beim Aufsetzen und Ablösen gleiten die Haltemodule entlang einer Führungsschiene, welche die entsprechenden Bewegungen einleitet. Die Umlenkrollen müssen hierzu gegenüber den anderen beiden Varianten um 90° gekippt werden. Die Rückführung der abgelösten Haltemodule nach vorne erfolgt damit seitlich und nicht oberhalb der Raupe.

	Variante 1 Feste Aufhängung (Panzerkettenführung)	Variante 2 Gelenkige Aufhängung (Translatorische Führung)	Variante 3 Lineare Aufhängung (Lateralführung)
Beschreibung	Über ein zusätzliches Umlenkritzel werden die Sauggreifer unter einem Aufsetzwinkel δ_{Aufsetz} auf die Oberfläche geführt	Über Gelenke am Führungsriemen werden die Sauggreifer senkrecht auf die Oberfläche geführt	Sauggreifer werden über Lineareinheiten an seitlich (lateral) angeordneten Führungsriemen senkrecht auf die Oberfläche geführt
Seitensansicht			
Draufsicht (verkleinert)			
Legende	<ul style="list-style-type: none"> ① Sauggreifer vor Aufsetzen ② Sauggreifer im Haftzustand ③ Führungseinheit ④ Umlenkrolle 	<ul style="list-style-type: none"> ⑤ Umlenkritzel ⑥ Sauggreiferkonsole ⑦ Gelenk ⑧ Führungsschiene 	<ul style="list-style-type: none"> B_{Raupe} Raupenbreite H_{Raupe} Raupenhöhe L_{Raupe} Raupenlänge L_{Haft} Länge Haftzustand

Abbildung 4-3: Lösungsvarianten für das Vortriebssystem

4.2.2 Bewertung der Lösungsvarianten für das Vortriebssystem

Der Vorteil der Variante der festen Aufhängung gegenüber den beiden anderen Varianten ist der geringe notwendige technische Aufwand. Zur Abwertung führt die größere Bauhöhe, was den Abstand des Schwerpunktes zur Oberfläche vergrößert und die auf die Sauggreifer wirkenden Normalkräfte erhöht. Die Ausscheidungskriterien sind der hohe zu erwartende Verschleiß der Sauggreifer und die hohe Einrollwahrscheinlichkeit der Dichtlippe bei der abrollenden Aufsetzbewegung um das vordere Umlenkritzel.

Die gelenkige und die lineare Aufhängung zeichnen sich gegenüber der festen Aufhängung gleichermaßen durch geringe Baugröße in der Länge und der Höhe aus sowie durch geringen Verschleiß der Sauggreifer und die geringe Einrollwahrscheinlichkeit der Dichtlippe. Die ausladende Breite der linearen Aufhängung, der etwas höhere notwendige technische Aufwand und das daraus resultierende höhere Gewicht führen hier jedoch zur Abwertung gegenüber der gelenkigen Aufhängung. Aus diesem Grund ist die gelenkige Aufhängung die favorisierte Variante für das Vortriebssystem.

Bewertungskriterien für das Vortriebssystem	Feste Aufhängung	Gelenkige Aufhängung	Lineare Aufhängung
Geringer technischer Aufwand	●	◐	○
Geringes Gewicht	●	◐	○
Geringe Baugröße (Länge)	○	●	●
Geringe Baugröße (Breite)	●	●	○
Geringe Baugröße (Höhe)	◐	●	●
Geringe mechanische Verlustleistung	●	●	●
Geringer Verschleiß der Sauggreifer	○	●	●
Geringe Einrollwahrscheinlichkeit der Dichtlippe	○	●	●
Legende:	● gut erfüllt	◐ bedingt erfüllt	○ nicht erfüllt

Abbildung 4-4: Bewertung der Lösungsvarianten für das Vortriebssystem

4.3 Konzeption des Lenksystems

4.3.1 Darstellung der Lösungsvarianten für das Lenksystem

Die Lenkung der Raupe zur Durchführung von Richtungswechseln kann durch einen Differentialantrieb, einen Umsetzrahmen oder lenkbare Haltemodule realisiert werden.

Der Differentialantrieb wird auch bei Kettenpanzern und Planiertraupen verwendet und ist das bevorzugt eingesetzte Lenkprinzip bei über Räder angetriebenen mobilen Plattformen. Bei der

Raupe mit passiv betriebenen Sauggreifern sind hierzu zwei unabhängig voneinander angetriebene und parallel angeordnete umlaufende Einheiten mit Sauggreifern notwendig. Bei gleicher Geschwindigkeit beider umlaufender Einheiten führt das System eine lineare Vorwärtsbewegung aus. Unterschiedliche Geschwindigkeiten der beiden Einheiten bewirken zusätzliche Scherkräfte in den einzelnen Sauggreifern. Dies führt zu elastischen, oberflächenparallel wirkenden Verformungen in den Sauggreifern oder sogar kleinen Gleitbewegungen auf der Oberfläche, wodurch eine Kurvenfahrt eingeleitet wird.

Kettenpanzer und Planierraupen können durch gegensätzliche Drehbewegungen der beiden Raupeneinheiten eine Drehung auf der Stelle ausführen. Bei einer Raupe mit Sauggreifern ist dies nicht möglich, da die hierzu notwendigen Gleitwege der einzelnen Sauggreifer ein hohes Gefahrenpotenzial zum Einrollen der Dichtlippen bedeuten würden oder zum Abrutschen des gesamten Systems führen würden.

Die Variante des Umsetzrahmens enthält separate auf die Oberfläche absenkbare Sauggreifer, welche die Raupeneinheit komplett von der Oberfläche abziehen. Über eine angetriebene Achse zwischen Rahmen und Raupeneinheit wird diese anschließend in eine neue Orientierung gedreht und wieder auf der Oberfläche abgesetzt.

Bei der Variante mit lenkbaren Haltemodulen sind die einzelnen Sauggreifer um angetriebene Gelenke gegenüber ihren Nachbarn nach rechts oder links schwenkbar, wodurch die Raupeneinheit ähnlich einer Schlange Kurvenbewegungen ausführen kann.

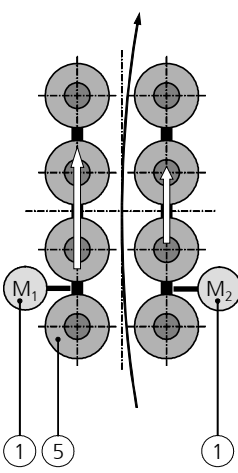
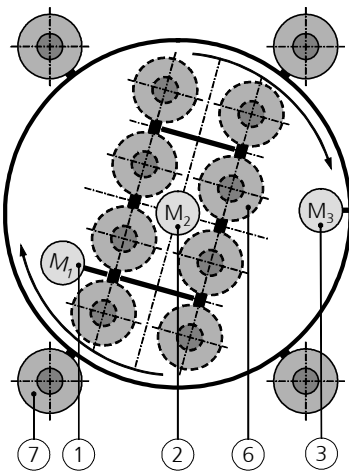
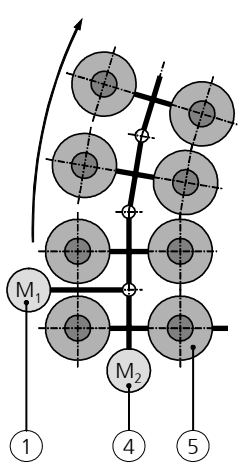
	Variante 1 Differentialantrieb	Variante 2 Umsetzrahmen	Variante 3 Lenkbare Haltemodule
Beschreibung	Zwei unabhängig voneinander angetriebene, parallel angeordnete umlaufende Einheiten mit Sauggreifern	Absenkbare Sauggreifer halten das System während der Neuorientierung der Raupe an der Oberfläche	Lenkung durch Änderung der Orientierung einzelner Sauggreifer während der Vorwärtsbewegung
Seitenansicht			
Legende	<ul style="list-style-type: none"> ① Vortriebsmotor ② Rotationsmotor ③ Hubmotor ④ Aktor für Knickgelenke 	<ul style="list-style-type: none"> ⑤ Sauggreifer der Raupe im Haftzustand ⑥ Sauggreifer der Raupe gelöst ⑦ Sauggreifer des Umsetzrahmens 	

Abbildung 4-5: Varianten für das Lenksystem

4.3.2 Bewertung der Lösungsvarianten für das Lenksystem

Der Verschleiß der Dichtlippen der Sauggreifer und ihre Einrollwahrscheinlichkeit sind bei der Lösungsvariante des Umsetzrahmens am geringsten. Der technische Aufwand und demzufolge auch das Gewicht sind mit drei Antrieben hier jedoch etwas höher als der Differentialantrieb. Auch die Baugröße ist größer als bei dem Differentialantrieb und den lenkbaren Sauggreifern.

Der Umsetzrahmen ist jedoch die einzige Variante, welche sowohl die Anforderung eines Orientierungswechsels auf der Stelle zwischen einem Winkel von 0° bis 90° erfüllt als auch eine Vorrichtung in Form von aktiv betriebenen Sauggreifer für einen zeitlich unbegrenzten Stillstand des Roboters auf der Glasoberfläche enthält. Daher wird der Umsetzrahmen als Lenksystem favorisiert.

Bewertungskriterien für das Lenksystem	Variante 1	Variante 2	Variante 3
Geringer technischer Aufwand	●	◐	◐
Geringes Gewicht	●	◐	◐
Geringe Baugröße	●	◐	●
Geringe mechanische Verlustleistung	●	●	●
Geringer Verschleiß der Sauggreifer	○	●	◐
Geringe Einrollwahrscheinlichkeit der Dichtlippe	○	●	◐
Orientierungswechsel auf der Stelle um 180°	○	●	○
Zusätzliche aktive Sicherung des Klettersystems	○	●	○
Legende:	● gut erfüllt	◐ bedingt erfüllt	○ nicht erfüllt

Abbildung 4-6: Bewertung der Lösungsvarianten für das Lenksystem

4.4 Integration der Teilsysteme zu einer Klettersystemvariante

Das aus den ausgewählten Varianten der Teilsysteme aufgebaute Klettersystem ist in Abbildung 4-7 dargestellt. Die Raupeneinheit ist mit Spacer ohne zusätzliche Umlenkritzel ausgebildet. Die Haltemodule sind gelenkig an der Führungseinheit befestigt. Drehfedern in den Gelenken der Haltemodule gewährleisten den Kontakt mit der Oberfläche bei einem aufsetzenden Sauggreifer. Führungsschienen an der Unterseite der Raupe (nicht eingezeichnet) halten die Sauggreifer an den Haltemodulen in einer zur Oberfläche parallelen Orientierung.

Die Raupeneinheit umgibt ein Umsetzrahmen mit je einer Sauggreifereinheit in jeder Ecke. Diese Sauggreifer, die nur bei einem Wechsel der Fahrtrichtung im Einsatz sind, sind bevorzugt aktiv betrieben. So ist während eines Wartevorganges des Roboters an der Fassade ein zeitlich unbegrenzter Stillstand möglich. Über zwei Antriebe ist die Raupeneinheit in dem Umsetzrahmen drehbar und längs der Normalen zur Oberfläche linear verschiebbar. Beim Anheben der Raupeneinheit durch den Umsetzrahmen müssen alle an der Oberfläche befindlichen Saug-

greifer abgelöst werden. Um diesen Vorgang zu erleichtern, kann optional ein weiterer Antrieb vorgesehen werden, welcher über eine entsprechende Mechanik alle Sauggreifer belüftet.

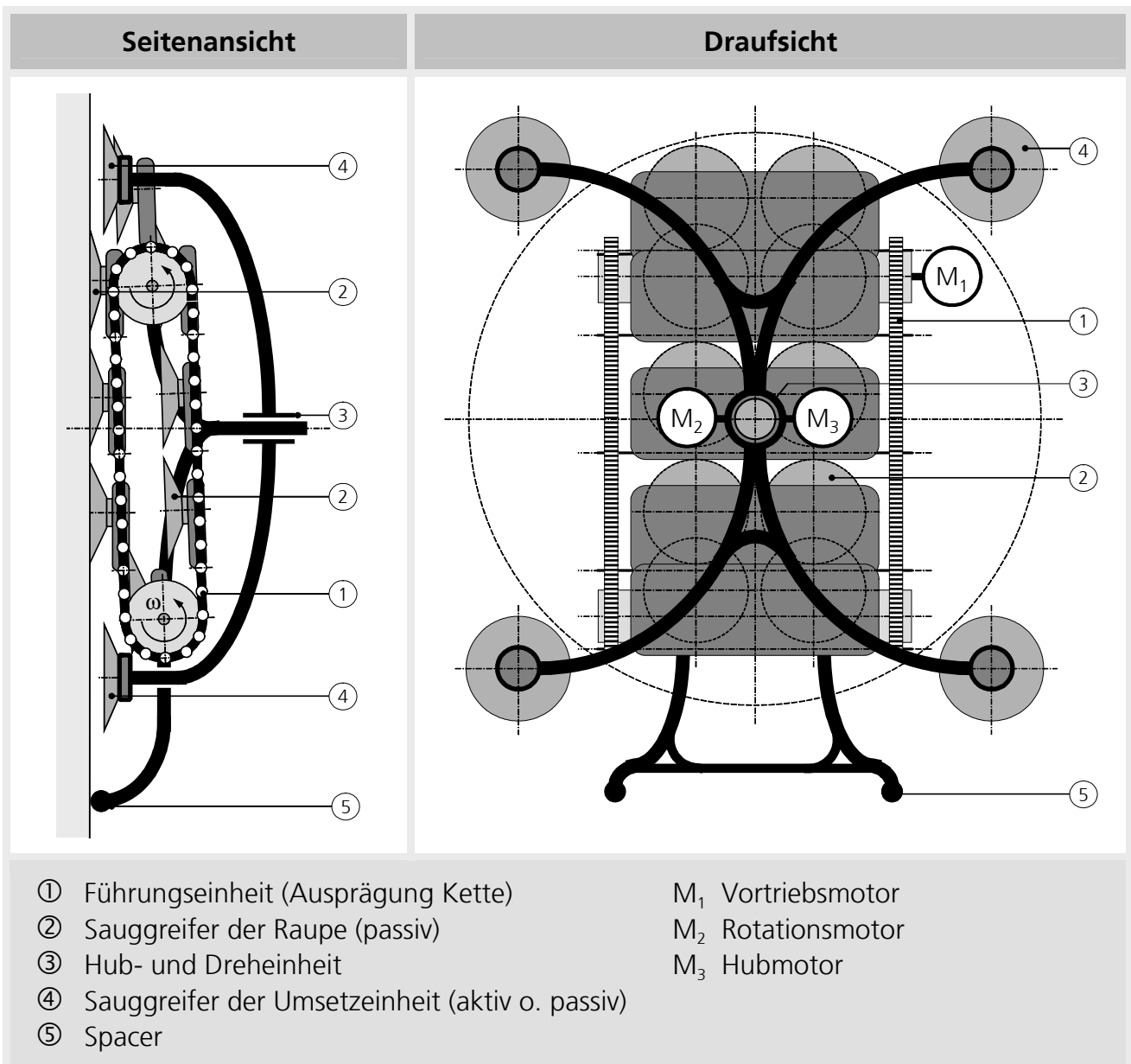


Abbildung 4-7: Darstellung des Klettersystems basierend auf dem Vortriebsprinzip der Raupe mit passiv betriebenen Sauggreifern

5 Entwicklung eines Verfahrens zur Berechnung der Kräfte auf die passiv betriebenen Sauggreifer eines Kletterroboters nach dem Raupenprinzip

5.1 Funktionsweise der Raupe mit passiv betriebenen Sauggreifern und Spacer

Ein im Haftzustand befindlicher Sauggreifer bei der Raupe mit passiv betriebenen Sauggreifern durchläuft zwischen dem Ansetzen auf die Oberfläche und dem Ablösen von der Oberfläche die in Abschnitt 3.4.3 beschriebenen Phasen. Unter Berücksichtigung des in Form des Spacers konzipierten Wirkantriebes des Haltesystems muss dieser Vorgang nun detaillierter betrachtet werden:

1. In der Andruckphase wird der Sauggreifer über die vordere Umlenkrolle auf der Oberfläche positioniert und über das Kompensationsmoment an die Oberfläche angeedrückt. Mit Abschluss dieser Phase hat sich der Sauggreifer vollständig an der Oberfläche festgesaugt.
2. Unmittelbar hinter der vorderen Umlenkrolle wird der Sauggreifer durch die Sauggreiferführung ausgelenkt und dadurch auf Zug beansprucht. In dieser Ansaugphase nimmt der Sauggreifer an der Erzeugung des Kompensationsmomentes teil und bewirkt damit das Andrücken der nachfolgend auf die Oberfläche aufsetzenden Sauggreifer.
3. In der Ablösephase wird der Sauggreifer an der hinteren Umlenkrolle durch ein Ventil belüftet und durch diese Umlenkrolle von der Oberfläche wieder abgezogen.

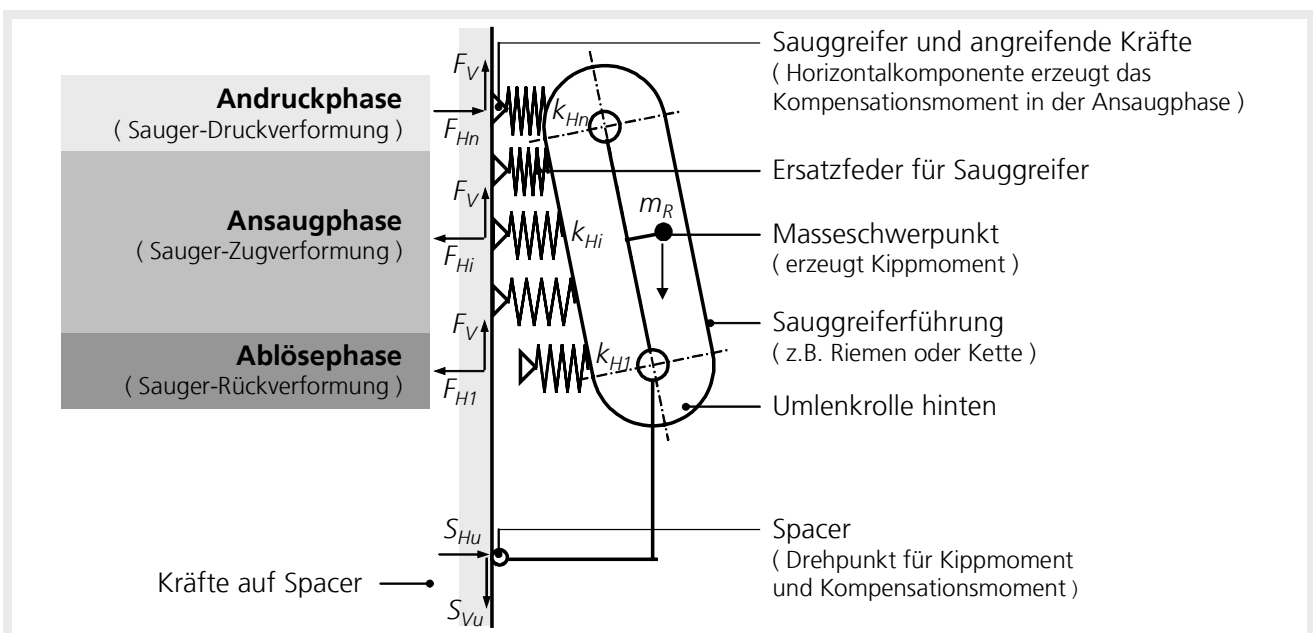


Abbildung 5-1: Prinzip der Raupe mit passiv betriebenen Sauggreifern mit Spacer und Darstellung der verschiedenen Phasen der Sauggreifer während der Vorwärtsbewegung

Die Scherkräftkomponente F_V der auf die Sauggreifer wirkenden Kräfte wird durch die Gewichtskraft und die vertikale Kraft auf den Spacer erzeugt und verteilt sich in gleichen Anteilen auf die Sauggreifer. Die Zugkräftkomponente F_{Hi} der Kräfte auf die Sauggreifer wird durch das Kompensationsmoment erzeugt. Die durch den Spacer verursachte Schrägstellung der Raupe bewirkt ein stetiges Ansteigen der Zugkräftkomponente auf die elastischen Sauggreifer

von der vorderen bis zur hinteren Umlenkrolle. Die Elastizität eines Sauggreifer i ist mit einer Ersatzfeder der Federsteifigkeit k_{Hi} dargestellt. Die höchste Kraft erfährt ein passiv betriebener Sauggreifer an einem Kletterroboter nach dem Raupenprinzip demnach an der hinteren Umlenkrolle unmittelbar vor dem Eintritt in die Ablösephase. Bei der Dimensionierung der Sauggreifer muss also von der angreifenden Kraft in dieser Position ausgegangen werden.

Gemäß den im Kapitel 3 aufgestellten Anforderungen muss die Raupe hinsichtlich einer geringen Belastung der einzelnen Sauggreifer ausgelegt werden. Für die Minimierung der Last auf die Sauggreifer muss die Last auf den hintersten Sauggreifer in Abhängigkeit der geometrischen Parameter der Raupe bestimmt werden. Im Folgenden bedeutet dies:

- Ermittlung von Einflussfaktoren auf die an den passiv betriebenen Sauggreifern angreifenden Kräfte,
- Bildung eines mechanischen Ersatzmodells und
- Ableitung eines Verfahrens zur Berechnung der Kräfte auf die passiv betriebenen Sauggreifer einer Raupe

5.2 Ermittlung der Einflussfaktoren auf die an den passiv betriebenen Sauggreifern angreifenden Kräfte

Zur Ermittlung der Einflussfaktoren auf die an den passiv betriebenen Sauggreifern angreifenden Kräfte müssen zunächst die aus dem jeweiligen Einsatzszenario vorgegebenen unveränderbaren sowie die veränderbaren Größen definiert werden und der Einfluss der veränderbaren Größen auf die Raupe untersucht werden.

Die vorgegebenen und nicht veränderbaren Größen für die Auslegung der Raupe sind

- die Sollgeschwindigkeit v_{Raupe} des Kletterroboters,
- die notwendige Soll-Druckkraft $F_{H,soll}$ (negativer Wert) auf einen Sauggreifer zum vollständigen Andruck auf die zu befahrende Oberfläche in der Andruckphase,
- die maximale Zuglastaufnahme eines einzelnen Sauggreifers $F_{H,max}$ (positiver Wert),
- die maximale Scherlastaufnahme eines einzelnen Sauggreifers $F_{V,max}$,
- der zur Ausführung der jeweiligen Aufgabe (wie z.B. Oberflächenreinigung) notwendige horizontale und vertikale Kraftbetrag S_{Ho} und S_{Vo} auf die am Roboter installierte Applikation,
- die Reibungsbeiwerte μ der Applikation und des Spacers,
- die Roboter Massen des Kletterroboters, bestehend aus der Masse m_R der Raupe und der Masse m_A des umgebenden Rahmens, sowie
- die erforderliche Redundanz und damit die Anzahl der im Haftzustand befindlichen Sauggreifer.

Die skalierbaren Größen des Kletterroboters sind

- die Federsteifigkeit k_{Hi} der einzelnen Sauggreifer,
- der vertikale Abstand l_{Ao} zwischen der Applikation und der Achse der hinten Umlenkrolle,
- der vertikale Abstand Δa der Sauggreifer voneinander,

- der vertikale Abstand l_{Au} zwischen dem Spacer und der Achse der hinteren Umlenkrolle,
- die Höhe h_G des Spacers sowie
- die Anordnung in Zeilen und Spalten der im Haftzustand befindlichen Sauggreifer.

5.2.1 Federsteifigkeit der Sauggreifer

Die Federsteifigkeit eines Sauggreifers beeinflusst den Energiebedarf des Ansaugvorganges. Bei gleichem Kraftbetrag bewirkt eine höhere Federsteifigkeit einen kürzeren Federweg und damit eine geringere Energieaufnahme des Sauggreifers. Die Federsteifigkeit eines Sauggreifers ist abhängig von seiner Geometrie und seinem Material. Sowohl Geometrie als auch Material bestimmen ihrerseits die Saug-, Dichtungs- und Schlupfeigenschaften des Sauggreifers. Diese Eigenschaften stellen somit die Randbedingungen für die Gestaltung von Sauggreifern dar. Die Federkennlinien für die eingesetzten Sauggreifer müssen jeweils bestimmt werden.

5.2.2 Vertikale Position der Applikation

Befindet sich die Applikation des Roboters auf gleicher Position oder vor den anzudrückenden Sauggreifern, wirkt die horizontale Kraftkomponente auf die Applikation der notwendigen Andruckkraft der vorderen Sauggreifer entgegen. Je größer Abstand und damit der Hebelweg zwischen den Sauggreifern und der Applikation ist, umso ungünstiger wirkt sich dies auf den Andruckvorgang aus. Eine auf diese Weise abgeschwächte Andruckkraft auf die anzudrückenden Sauggreifer muss durch entsprechende Spacereinstellungen kompensiert werden, was wiederum die Zugkraft auf die restlichen im Haftzustand befindlichen Sauggreifer erhöht. In diesem Fall sollte der Abstand zwischen Applikation und Spacer deshalb minimal sein. Befindet sich die Applikation hinter der vorderen Umlenkrolle, unterstützt die horizontale Kraftkomponente der Applikation das Andrücken der vorderen Greifer.

5.2.3 Vertikaler Abstand der Sauggreifer voneinander

Hinsichtlich einer kompakten Bauweise sollte der vertikale Abstand Δa der Sauggreifer untereinander im Rahmen ihrer Baugröße minimal gehalten werden. Der minimal mögliche Abstand ergibt sich aus der Baugröße der Sauggreifer.

5.2.4 Spacereinstellungen

Durch die Verlängerung des Spacerhebels wird der Spacer in der horizontalen Komponente S_{Hu} seiner Kraft entlastet. Bei gleichzeitiger entsprechender Anpassung der Spacerhöhe h_G kann der Neigungswinkel der Raupe für jeden Wert des Spacerhebels beibehalten werden. Damit ergibt sich keine Veränderung des Zugweges und der Zugkraft auf die im Haftzustand befindlichen Sauggreifer. Die horizontale Komponente der Druckkraft wird also vom Spacer auf den vordersten Sauggreifer verlagert.

Durch Verringerung allein der Spacerhöhe verringert sich auch der Neigungswinkel der Raupe, wodurch auch die Zugkraft auf die im Haftzustand befindlichen Sauggreifer verringert wird. Dadurch verringert sich sowohl die Druckkraft auf den Spacer als auch die Andruckkraft auf den vordersten Sauggreifer. Über die Spacerhöhe lässt sich also diese Andruckkraft direkt regulieren.

Durch Verlängerung des Spacerhebels (Spacerposition) und entsprechende Verringerung der Spacerhöhe ist also ein konstantes Beibehalten der Andruckkraft auf den vordersten Sauggreifer möglich bei gleichzeitiger Verringerung der Last auf die dahinter befindlichen und auf Zug belasteten Sauggreifer (Schraft, 2004).

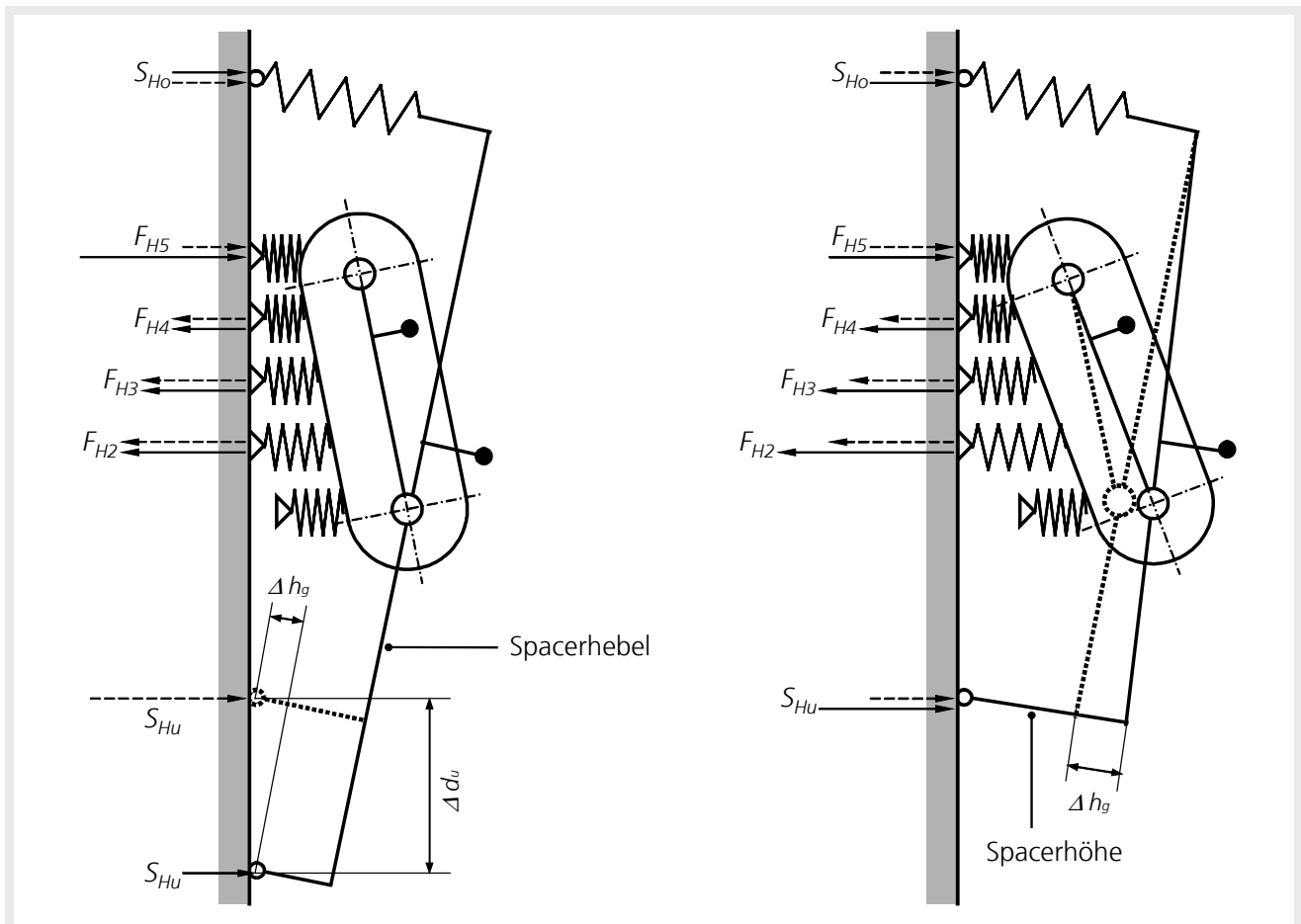


Abbildung 5-2: Veränderung der Zugkräfte auf die Sauggreifer bei Veränderung des Spacerhebels (linkes Bild) bzw. bei Veränderung der Spacerhöhe (rechtes Bild)

5.2.5 Anordnung der Sauggreifer

Eine gegebene Anzahl an Sauggreifern kann in unterschiedlichen Kombinationen von Spalten- und Zeilenanzahlen auf der Grundfläche der Raupe angeordnet werden und dadurch die angreifenden Kräfte beeinflussen. Die Anzahl der Spalten entspricht hierbei der Anzahl der simultan vorne anzudrückenden Sauggreifer (siehe Abbildung 5-3). Je mehr Sauggreiferspalten eine Raupe besitzt, desto höher ist dementsprechend auch die notwendige Kraft zum Andrücken dieser Sauggreifer. Dies wiederum bedingt eine höhere Zugkraft auf die im Zugbereich befindlichen Sauggreifer. Für die Minimierung der Belastung der Sauggreifer ist also zu erwarten, dass eine Verteilung der Sauggreifer auf wenige Spalten und eine dementsprechend höhere Anzahl an Zeilen von Vorteil ist.

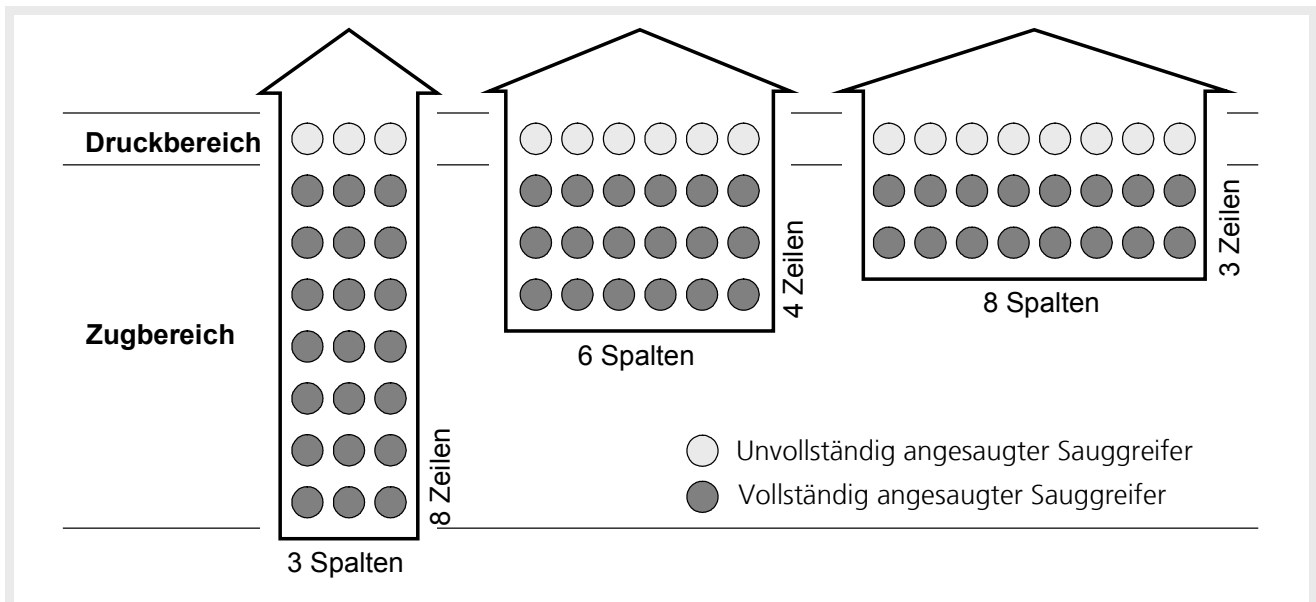


Abbildung 5-3: Anordnung einer konstanten Anzahl von Sauggreifern auf der zu befahrenden Oberfläche in drei verschiedenen Varianten am Beispiel von 24 Sauggreifern

5.3 Mechanisches Ersatzmodell für einen Kletterroboter nach dem Raupenprinzip

Abbildung 5-4 zeigt das mechanische Ersatzmodell der Raupe mit passiv betriebenen Sauggreifern. Die Raupe besteht aus der umlaufenden Sauggreiferführung, den Sauggreifern, dem umgebenden Rahmen sowie einer am Rahmen befestigten Applikation, welche über eine Feder eine vorgegebene Andruckkraft auf die Oberfläche erfährt. In der linken Abbildung sind die an der Raupe von außen angreifenden Kräfte dargestellt. Die mittlere Abbildung zeigt die auf die Raupe bezogenen bekannten geometrischen Größen, während die rechte Abbildung die auf die Oberflächenebene projizierten und noch unbekannt geometrischen Größen der Raupe beschreibt.

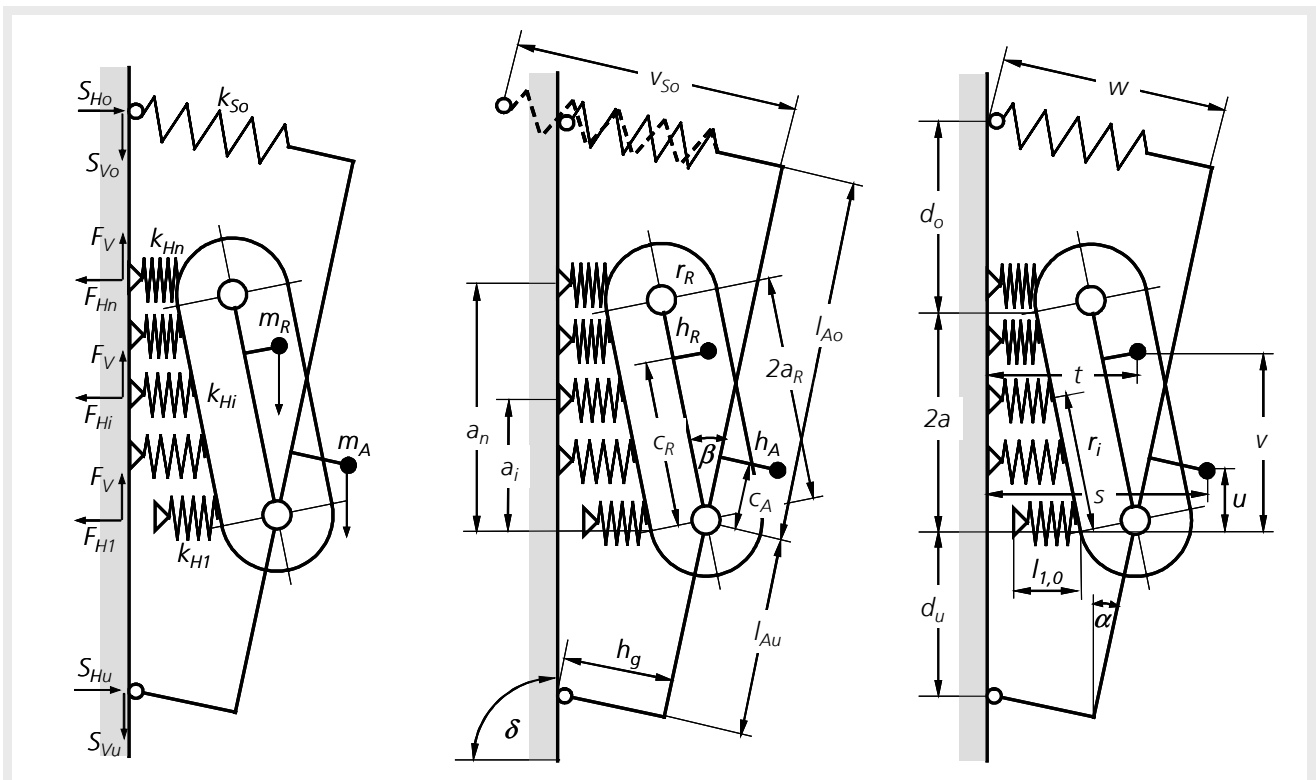


Abbildung 5-4: Darstellung der äußeren Kräfte, der raupenseitigen geometrischen Parameter sowie der auf die Oberfläche projizierten geometrischen Parameter

Die an der Raupe angreifenden Kräfte sind die von der Oberfläche auf den Spacer, die vordere Applikation und die Sauggreifer wirkenden horizontalen und vertikalen Kräfte sowie die Massenkräfte aus den Masseschwerpunkten des Außenrahmens und der Raupeneinheit selbst. Für eine Kräfteberechnung unter verschiedenen Oberflächenneigungen sind die Massenkräfte unter einem bestimmten Winkel δ zur Oberflächennormalenrichtung eingezeichnet. Ein Winkel von $\delta = 90^\circ$ entspricht einer senkrechten Oberfläche.

5.4 Verfahren zur Berechnung der Kräfte auf die passiv betriebenen Sauggreifer eines Kletterroboters nach dem Raupenprinzip

Die Längsachsen der Raupe und des umgebenden Rahmens bilden zusammen den einstellbaren Winkel β . Über die in den vorangehenden Abschnitten beschriebene funktionsbedingte Neigung der Raupenlängsachse zur Oberflächeebene entsteht zwischen der Längsachse des umgebenden Rahmens und der Oberflächeebene der Winkel α . Bei einer gegebenen Raupengeometrie stellt sich dieser Winkel abhängig von der Sauggreiferstellung sowie den Federsteifigkeiten k_{Hi} und k_{So} der Sauggreifer und der vorderen Applikation ein. Über die Berechnung des Winkels α sind alle an der Raupe angreifenden Kräfte direkt aus den mechanischen Grundgleichungen und den geometrischen Zusammenhängen berechenbar.

Zur Berechnung der auf die Sauggreifer der Raupe wirkenden Kräfte wird deshalb folgendermaßen vorgegangen:

- Aufstellung der mechanischen Grundgleichungen auf Basis der auf die Oberflächeebene projizierten geometrischen Parameter,
- Aufstellung der Gleichungen zur Projektion der geometrischen Parameter der Oberfläche auf die Raupe

- Ableitung der Lösungsgleichung zur Berechnung des Winkels α auf Basis der auf die Oberfläche projizierten geometrischen Parameter
- Aufstellung der Lösungsgleichungen zur Berechnung der auf die Raupe wirkenden Kräfte

5.4.1 Mechanische Grundgleichungen für einen Kletterroboter nach dem Raupenprinzip

Auf Basis der in Abbildung 5-4 dargestellten geometrischen Parameter werden nun die mechanischen Grundgleichungen zur Berechnung der äußeren Kräfte auf die Raupe aufgestellt.

Horizontales Kräftegleichgewicht:

$$\sum_{i=1}^n F_{Hi} + g \cdot (m_R + m_A) \cdot \cos \delta - S_{Ho} - S_{Hu} = 0 \quad (5.1)$$

Vertikales Kräftegleichgewicht:

$$n \cdot F_V - g \cdot (m_R + m_A) \cdot \sin \delta - S_{Vo} - S_{Vu} = 0 \quad (5.2)$$

Momentengleichgewicht um den Aufsetzpunkt des Spacers:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n a_i \cdot F_{Hi} - S_{Ho} \cdot (d_o + 2a) + S_{Hu} \cdot d_u - \\ - g \cdot (m_R \cdot t + m_A \cdot s) \cdot \sin \delta + g \cdot (m_R \cdot v + m_A \cdot u) \cdot \cos \delta = 0 \end{aligned} \quad (5.3)$$

Beschreibung der horizontalen Kräfte auf die Sauggreifer und die vordere Applikation in Abhängigkeit der Federsteifigkeiten:

$$F_{Hi} = e_i \cdot k_{Hi} \quad (5.4)$$

$$S_{Ho} = k_{So} \cdot (v_{So} - w) \cdot \cos \alpha \quad (5.5)$$

Beschreibung der vertikalen Kräfte auf die vordere Applikation und den Spacer in Abhängigkeit der Reibungskoeffizienten:

$$S_{Vo} = S_{Ho} \cdot \mu \quad (5.6)$$

$$S_{Vu} = S_{Hu} \cdot \mu \quad (5.7)$$

5.4.2 Gleichungen zur Projektion der Raupengeometrie auf die Oberfläche

Die im rechten Bild der Abbildung 5-4 dargestellten und in den Gleichungen (5.24) - (5.26) enthaltenen auf die Oberflächenebene projizierten Parameter müssen nun in Abhängigkeit der geometrischen Parameter der Raupe dargestellt werden. Sie ergeben sich aus den im mittleren Bild dargestellten geometrischen Parametern der Raupe in Abhängigkeit des oben berechneten Winkels α .

Für die Aufstellung der Gleichungen zur Berechnung der Sauggreiferauslenkungen muss die Position des Sauggreifers auf dem Riemen und der Zustand jedes Sauggreifers berücksichtigt werden: Jeder im Haftzustand befindliche Sauggreifer kann sich am linearen Teil des Riemens,

d.h. zwischen Vorder- und Hinterachse oder am rotatorischen Teil des Riemens, d.h. auf dem Umfang der vorderen Umlenkrolle befinden. Weiterhin kann sich jeder Sauggreifer im Zug- oder im Druckzustand befinden. Im Druckzustand ergibt sich seine Auslenkung aus der Differenz zwischen seiner Höhe $l_{i,0}$ im unangesaugten, unbelasteten Zustand und seiner tatsächlichen eingefederten momentanen Höhe. Im Zugzustand ergibt sich seine Auslenkung aus der Differenz zwischen seiner Höhe im angesaugten, aber unbelasteten Zustand und seiner tatsächlichen ausgefederten momentanen Höhe.

Dementsprechend ergeben sich für den Federweg eines Sauggreifers die folgenden vier Gleichungen:

für Sauggreifer am linearen Riementeil unter Druckkraft:

$$e_{i,lin} = h_G \cdot \cos \alpha + l_{Au} \cdot \sin \alpha - r_R \cdot \cos(\beta - \alpha) - r_i \cdot \sin(\beta - \alpha) - l_{i,0} \quad (5.8)$$

für Sauggreifer am linearen Riementeil unter Zugkraft:

$$e_{i,lin} = h_G \cdot \cos \alpha + l_{Au} \cdot \sin \alpha - r_R \cdot \cos(\beta - \alpha) - r_i \cdot \sin(\beta - \alpha) - l_i \quad (5.9)$$

für Sauggreifer an vorderer Umlenkrolle unter Druckkraft:

$$e_{i,rot} = h_G \cdot \cos \alpha + l_{Au} \cdot \sin \alpha - 2a_R \cdot \sin(\beta - \alpha) - r_R \cdot \cos\left(\frac{r_i - 2a_R}{r_R} \cdot \frac{180^\circ}{\pi} - \beta + \alpha\right) - l_{i,0} \quad (5.10)$$

für Sauggreifer an vorderer Umlenkrolle unter Zugkraft:

$$e_{i,rot} = h_G \cdot \cos \alpha + l_{Au} \cdot \sin \alpha - 2a_R \cdot \sin(\beta - \alpha) - r_R \cdot \cos\left(\frac{r_i - 2a_R}{r_R} \cdot \frac{180^\circ}{\pi} - \beta + \alpha\right) - l_i \quad (5.11)$$

Die Position eines Sauggreifers i , ausgehend vom hintersten Sauggreifer, ist auf dem Umfang des Riemens durch den Parameter r_i definiert. Bei der Projektion dieser Position von der Oberflächenebene auf die Raupe muss wieder zwischen dem linearen und dem rotatorischen Teil des Riemens unterschieden werden.

für Sauggreifer am linearen Riementeil:

$$a_{i,lin} = r_i \cdot \cos(\beta - \alpha) \quad (5.12)$$

für Sauggreifer an vorderer Umlenkrolle:

$$a_{i,rot} = 2a_R \cdot \cos(\beta - \alpha) + r_R \left(\sin(\beta - \alpha) + \sin\left(\frac{r_i - 2a_R}{r_R} \cdot \frac{180^\circ}{\pi} - \beta + \alpha\right) \right) \quad (5.13)$$

Die Projektion der übrigen geometrischen Parameter von der Oberflächenebene auf die Raupe ergibt sich wie folgt:

$$s = (h_G + h_A) \cdot \cos \alpha + (l_{Au} + c_A) \cdot \sin \alpha \quad (5.14)$$

$$t = h_G \cdot \cos \alpha + l_{Au} \cdot \sin \alpha - c_R \cdot \sin(\beta - \alpha) + h_R \cdot \cos(\beta - \alpha) \quad (5.15)$$

$$u = r_R \cdot \sin(\beta - \alpha) + c_A \cdot \cos \alpha - h_A \cdot \sin \alpha \quad (5.16)$$

$$v = r_R \cdot \sin(\beta - \alpha) + c_R \cdot \cos(\beta - \alpha) + h_R \cdot \sin(\beta - \alpha) \quad (5.17)$$

$$2a = 2a_R \cdot \cos(\beta - \alpha) \quad (5.18)$$

$$d_u = l_{Au} \cdot \cos \alpha - r_R \cdot \sin(\beta - \alpha) - h_G \cdot \sin \alpha \quad (5.19)$$

$$d_o = l_{Ao} \cdot \cos \alpha + w \cdot \sin \alpha - 2a_R \cdot \cos(\beta - \alpha) + r_R \cdot \sin(\beta - \alpha) \quad (5.20)$$

$$w = (l_{Ao} + l_{Au}) \cdot \tan \alpha + h_G \quad (5.21)$$

5.4.3 Ableitung der Lösungsgleichungen zur Berechnung des Neigungswinkels α

Der gesuchte Winkel α errechnet sich bei gegebenen geometrischen Größen aus der Einfederung e_n des vordersten anzudrückenden Sauggreifers n . Diese Einfederung hängt wiederum ab von der Druckkraft F_{Hn} auf diesen Sauggreifer. Ist die Druckkraft gleich oder größer als die notwendige Kraft $F_{Hn, \max}$, um den Sauggreifer vollständig an die Oberfläche zu pressen, befindet sich der Sauggreifer im Blockzustand und es gilt:

$$e_n = 0 \text{ bei } \alpha = \alpha_{Block} \quad (5.22)$$

Die Einfederung des vordersten Sauggreifers ist jedoch erst nach Berechnung des Winkels α bekannt. Daher muss der berechnete Betrag von α nach seiner Berechnung mit dem Betrag von α_{Block} verglichen werden und die folgende Fallunterscheidung durchgeführt werden:

Fall 1: $\alpha \leq \alpha_{Block} \quad e_n \leq 0$

Der vorderste Sauggreifer befindet sich im Blockzustand. Die von außen angreifenden Kräfte werden im Folgenden über den Winkel α_{Block} berechnet. Es muss also gelten:

$$\alpha = \alpha_{Block} \quad (5.23)$$

Fall 2: $\alpha > \alpha_{Block} \quad e_n > 0$

Der vorderste Sauggreifer befindet sich nicht im Blockzustand. Die von außen angreifenden Kräfte werden über den errechneten Winkel α berechnet.

Nachfolgend werden aus den oben aufgestellten mechanischen Grundgleichungen die Lösungsgleichungen zur Bestimmung von α und α_{Block} hergeleitet.

Ermittlung des Neigungswinkels α zwischen der Oberfläche und der Raupenlängsachse

Die Lösungsgleichung zur Bestimmung von α ergibt sich aus dem Momentengleichgewicht (5.3) und Elimination von S_{Hu} und $F_{H,i}$ mit den beiden Gleichungen (5.1) und (5.4).

$$f(\alpha) = \sum_{i=1}^j a_{i,lin} \cdot e_{i,lin} \cdot k_{Hi} + \sum_{i=j+1}^n a_{i,rot} \cdot e_{i,rot} \cdot k_{Hi} + d_u \cdot \left(\sum_{i=1}^j e_{i,lin} \cdot k_{Hi} + \sum_{i=j+1}^n e_{i,rot} \cdot k_{Hi} \right) - S_{Ho} \cdot (d_o + d_u + 2a) - g \cdot (m_R \cdot t + m_A \cdot s) \cdot \sin \delta + g \cdot (m_R \cdot v + m_A \cdot u) \cdot \cos \delta = 0 \quad (5.24)$$

Alle in der Lösungsgleichung (5.24) vorkommenden Größen sind damit entweder bekannte Konstanten oder lassen sich aus den auf die Oberfläche projizierten geometrischen Parametern der Raupe direkt über den Winkel α bestimmen. So ist α die einzige Unbekannte. Da sich die Lösungsgleichung jedoch nicht direkt nach α auflösen lässt, wird der Winkel durch das Newton'sche Iterationsverfahren bestimmt:

$$\alpha_{k+1} = \alpha_k - \frac{f(\alpha_k)}{f'(\alpha_k)} \quad (5.25)$$

Die hierzu noch fehlende Ableitung der Lösungsgleichung ergibt sich zu

$$f'(\alpha) = \sum_{i=1}^j k_{Hi} \cdot (a'_{i,lin} \cdot e_{i,lin} + a_{i,lin} \cdot e'_{i,lin}) + \sum_{i=j+1}^n k_{Hi} \cdot (a'_{i,rot} \cdot e_{i,rot} + a_{i,rot} \cdot e'_{i,rot}) + d_u \cdot \left(\sum_{i=1}^j k_{Hi} \cdot e'_{i,lin} + \sum_{i=j+1}^n e'_{i,rot} \cdot k_{Hi} \right) + d'_u \cdot \left(\sum_{i=1}^j e_{i,lin} \cdot k_{Hi} + \sum_{i=j+1}^n e_{i,rot} \cdot k_{Hi} \right) - g \cdot (m_R \cdot t' + m_A \cdot s') \cdot \sin \delta + g \cdot (m_R \cdot v' + m_A \cdot u') \cdot \cos \delta - S'_{Ho} \cdot (d_o + d_u + 2a) - S_{Ho} \cdot (d'_o + d'_u + 2a') = 0 \quad (5.26)$$

Ermittlung des Neigungswinkels α_{Block} zwischen der Oberfläche und der Raupenlängsachse

Der Winkel α_{Block} ergibt sich durch Einsetzen von Gleichung (5.22) in Gleichung (5.10):

$$f(\alpha_{Block}) = h_G \cdot \cos \alpha_{Block} + l_{Au} \cdot \sin \alpha_{Block} - 2a_R \cdot \sin(\beta - \alpha_{Block}) - r_R \cdot \cos \left(\frac{r_n - 2a_R}{r_R} \cdot \frac{180^\circ}{\pi} - \beta + \alpha_{Block} \right) - l_n = 0 \quad (5.27)$$

Auch hier lässt sich die Lösung nicht direkt aus der Lösungsgleichung bestimmen und muss über das Newton'sche Iterationsverfahren aus Gleichung (5.25) bestimmt werden. Die Ableitung ergibt sich hierbei zu

$$f'(\alpha_{Block}) = -h_G \cdot \sin \alpha_{Block} + l_{Au} \cdot \cos \alpha_{Block} + 2a_R \cdot \cos(\beta - \alpha_{Block}) - r_R \cdot \sin \left(\frac{r_n - 2a_R}{r_R} \cdot \frac{180^\circ}{\pi} - \beta + \alpha_{Block} \right) = 0 \quad (5.28)$$

5.4.4 Lösungsgleichungen und Verfahren zur Berechnung der Kräfte auf die passiv betriebenen Sauggreifer

Nach der Bestimmung des Neigungswinkels α lassen sich die geometrischen Parameter mit Hilfe der Gleichungen (5.8) bis (5.21) von der Oberflächenebene auf die Raupe projizieren. Abbildung 5-5 beschreibt die Reihenfolge des Verfahrens zur Berechnung der Zug- und Scherkräfte auf die Sauggreifer, den Spacer und die vordere Applikation:

	Beschreibung der Kraft	Gleichung zur Bestimmung der Kraft	Aus Gleichungen
horizontal	Applikation	$S_{Ho} = k_{So} [(v_{So} - h_G) \cdot \cos \alpha - (l_{Ao} + l_{Au}) \cdot \sin \alpha]$	(5.5); (5.21)
	Alle n-1 Sauggreifer	$F_{Hi} = e_i \cdot k_{Hi} \quad i = 1 \dots n-1$	(5.4); (5.8) bis (5.11)
	Sauggreifer n	$F_{Hn} = -\sum_{i=1}^{n-1} F_{Hi} \cdot k_{Hi} - d_u \cdot \sum_{i=1}^{n-1} F_{Hi} + S_{Ho} \cdot (d_o + d_u + 2a) + g \cdot (m_R \cdot t + m_A \cdot s) \cdot \sin \delta - g \cdot (m_R \cdot v + m_A \cdot u) \cdot \cos \delta$	(5.3); (5.14) bis (5.20)
	Spacer	$S_{Hu} = \sum_{i=1}^n F_{Hi} + g \cdot (m_R + m_A) \cdot \cos \delta - S_{Ho}$	(5.1)
vertikal	Vordere Applikation	$S_{Vo} = S_{Ho} \cdot \mu$	(5.6)
	Spacer	$S_{Vu} = S_{Hu} \cdot \mu$	(5.7)
	Alle n Sauggreifer	$F_V = \frac{1}{n} \cdot [g \cdot (m_R + m_A) \cdot \sin \delta + S_{Vo} + S_{Vu}]$	(5.2)

Abbildung 5-5: Zusammenfassung der Formeln zur Berechnung der Sauggreiferkräfte

5.5 Experimentelle Ermittlung der Federsteifigkeit eines Sauggreifers

Die zur Bestimmung der Kräfte noch unbekannte Größe ist die Federsteifigkeit k_{Hi} der Sauggreifer im vollständig angesaugten Zustand unter Einwirkung einer Zugkraft F_{Hi} als Funktion des Zugweges s . Abbildung 5-6 zeigt eine Versuchsreihe zur experimentellen Bestimmung dieser Federsteifigkeit anhand des exemplarisch ausgewählten Sauggreifers SG40 SI der Firma Sommer Automatic als Haltekomponente eines potenzielles Einsatzszenarios für einen Kletterroboter für den Einsatz auf Glasfassaden.

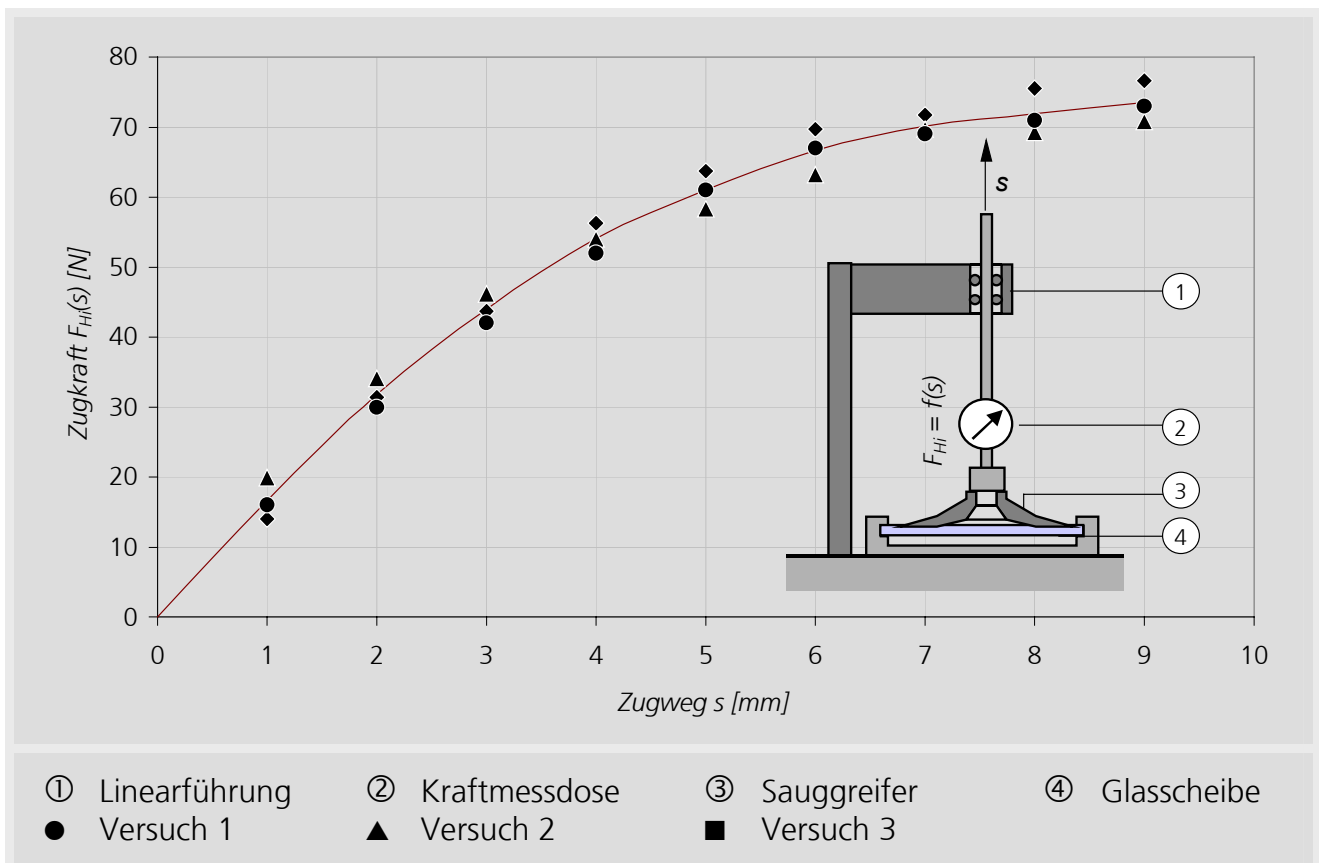


Abbildung 5-6: Experimentelle Ermittlung der Federsteifigkeit eines Sauggreifers in Normalenrichtung bei Zugkraft für den ausgewählten Sauggreifer

Der nichtlineare Verlauf der Kraft F_{Hi} beschreibt die Abhängigkeit der Federsteifigkeit k_{Hi} des Sauggreifers von dem Zugweg s . Unter Berücksichtigung dieses Zusammenhangs können nun die Kräfte auf die passiv betriebenen Sauggreifer eines Kletterroboters nach dem Raupenprinzip in Abhängigkeit ihrer geometrischen Parameter bestimmt werden.

5.6 Modellrechnung und Ergebnisse

Wie oben beschrieben wird angenommen, dass die Last auf den hintersten Sauggreifer durch Variation der Anordnung der Sauggreifer und durch Einstellungen des Spacerhebels sowie der Spacerhöhe beeinflusst werden kann. Durch eine Modellrechnung mit einer exemplarischen Gesamtanzahl von 120 Sauggreifern soll dies verifiziert werden.

Mit Hilfe der hergeleiteten Lösungsgleichungen wird hier für verschiedene Spaltenanzahlen und verschiedene Spacerpositionen die auf den hintersten Sauggreifer wirkende Kraft berechnet. Die Ausgangsdaten für diese Berechnung sind in Abbildung 5-7 zusammengefasst und basieren auf dem im vorangegangenen Abschnitt ausgewählten Sauggreifer.

Beschreibung	Wert		
Gesamtanzahl an Sauggreifern	n	120	-
Spaltenanzahl	p	1 bis 60	-
Spacerposition	l_{Au}	100 bis 6000	[mm]
Gesamtgewicht Roboter	m_{ges}	100	[kg]
Ersatzfederkonstante Sauggreifer bei Druck	$k_{dH,i}$	2	[N/mm]
Druckkraft der Applikation	S_{Ho}	20	[N]
Sauggreiferdurchmesser	d_{SG40}	40	[mm]
Sauggreiferabstand	Δa_i	50	[mm]
Abstand zwischen Vorderachse und Applikation	d_{LAo}	200	[mm]
Radius der Umlenkrollen	r_R	10	[mm]
Sauggreiferhöhe	l_{i0}	10	[mm]

Abbildung 5-7: Werte zur Berechnung der Ansaugleistung der Raupe mit passiv betriebenen Sauggreifern

Abbildung 5-8 zeigt die Kraftaufnahme des hintersten Sauggreifers als Funktion der Spacerposition und der Spaltenanzahl. Für jede Variante wurde die Höhe h_G des Spacers jeweils so eingestellt, dass die Druckkraft auf die vorne anzudrückenden Sauggreifer der minimal notwendigen Druckkraft entspricht, um diese vollständig an die Oberfläche anzudrücken. Der Kraftverlauf zeigt, dass die in den hintersten Sauggreifern aufgenommene Kraft sowohl mit sinkender Spaltenanzahl als auch mit größer werdender Spacerlänge sinkt.

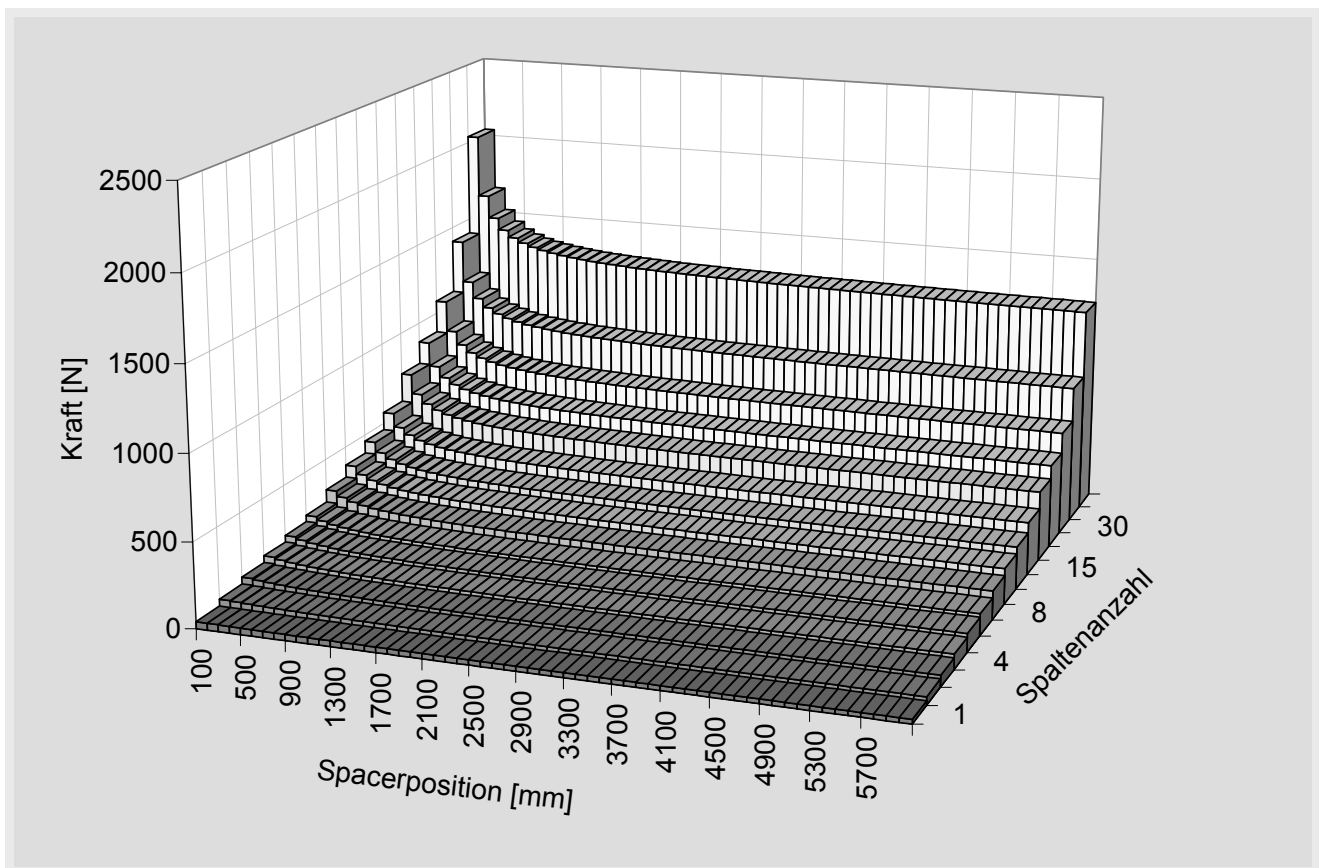


Abbildung 5-8: Erforderliche Ansaugkraft durch Sauggreiferspannung bei der Raupe mit passiv betriebenen Sauggreifern in Abhängigkeit der vertikalen Spacerposition und der Anzahl der Sauggreiferspalten

Hinsichtlich einer geringen Belastung der Sauggreifer ist es demnach ideal, alle Sauggreifer in einer Spalte anzuordnen und die Länge des Spacers so groß wie möglich zu wählen. Daraus folgt die ideale Form einer langen und schmalen Raupe. Hiermit konnte die Gültigkeit der erwarteten Einflüsse der in Abschnitt 5.2 aufgestellten Parameter nachgewiesen werden.

5.7 Folgerungen

Zur Ermittlung der Zug- und Scherkräfte auf die passiv betriebenen Sauggreifer einer Raupe wurden die Lösungsgleichungen hergeleitet sowie ein Berechnungsverfahren entwickelt. Die Berechnung dieser Kräfte ist eine notwendige Grundlage

- zur Dimensionierung der Sauggreifer hinsichtlich ihrer kritischen Versagensart des Abrutschens sowie
- zur Ermittlung des vertikalen Versatzes des Klettersystems gegenüber der Oberfläche als Folge des elastischen Verhaltens der Sauggreifer.

Die Gültigkeit des Verfahrens und der Lösungsgleichungen wurde anhand einer Modellrechnung verifiziert. Die in dem Berechnungsverfahren noch unbekannte Federsteifigkeit in Normalenrichtung wurde anhand von Zugversuchen beispielhaft an dem Sauggreifer des Typs SG40 SI der Firma Sommer Automatic bestimmt. Damit stehen die Grundlagen zur Berechnung der Kräfte auf die Sauggreifer an Kletterrobotern nach dem Raupenprinzip zur Verfügung.

6 Entwicklung von Berechnungsgrundlagen zur Ermittlung des Schlupfverhaltens von passiv betriebenen Sauggreifern

Zur Dimensionierung von Sauggreifern müssen die angreifenden Kräfte mit den entsprechenden Belastungskapazitäten verglichen werden. Als wichtigste Kenngrößen wurden hier die maximal zulässige Scherkraft, welche einen versagensfreien Betrieb erlaubt sowie der Grad der elastischen Verformung unter dieser Scherkraft identifiziert. Dazu wird im Folgenden das Schlupfverhalten passiv betriebener Sauggreifer unter Scherkraftbelastung und simultan angreifender Zuglast untersucht.

6.1 Aufbau eines Sauggreifers mit Dichtlippe

In Abbildung 6-1 ist der im Kapitel 3.3 ausgewählte Sauggreifer im angesaugten und unter Zugkraft stehenden Zustand dargestellt. Die Sauggreiferfläche teilt sich hierbei in einen anliegenden und einen nicht anliegenden Teil auf. Der nicht anliegende Teil stellt die Wirkfläche dar. Sie entspricht der auf die Oberfläche projizierten Fläche des Hohlraumes zwischen Sauggreifer und Oberfläche und unterteilt sich in eine elastische Fläche und eine starre Fläche. Letztere entspricht dem im Zentrum des Sauggreifers befindlichen Adapter. Sowohl zwischen Wirkfläche und Oberfläche als auch zwischen anliegender Fläche und Oberfläche stellt sich eine Druckdifferenz zum Umgebungsdruck ein (Schmierer, 2001). Beide Flächen bestimmen damit entsprechend anteilig den Betrag der Saugkraft. Der anliegende Teil der Fläche übernimmt außerdem die pneumatische Abdichtung des Sauggreiferinneren zur Umgebung und die Aufnahme von Scherkräften.

Die Wechselwirkungen zwischen der starren Fläche und den elastischen Flächen der Wirk- und der Auflagefläche bestimmen maßgeblich das hier zu untersuchende Schlupfverhalten des Sauggreifers.

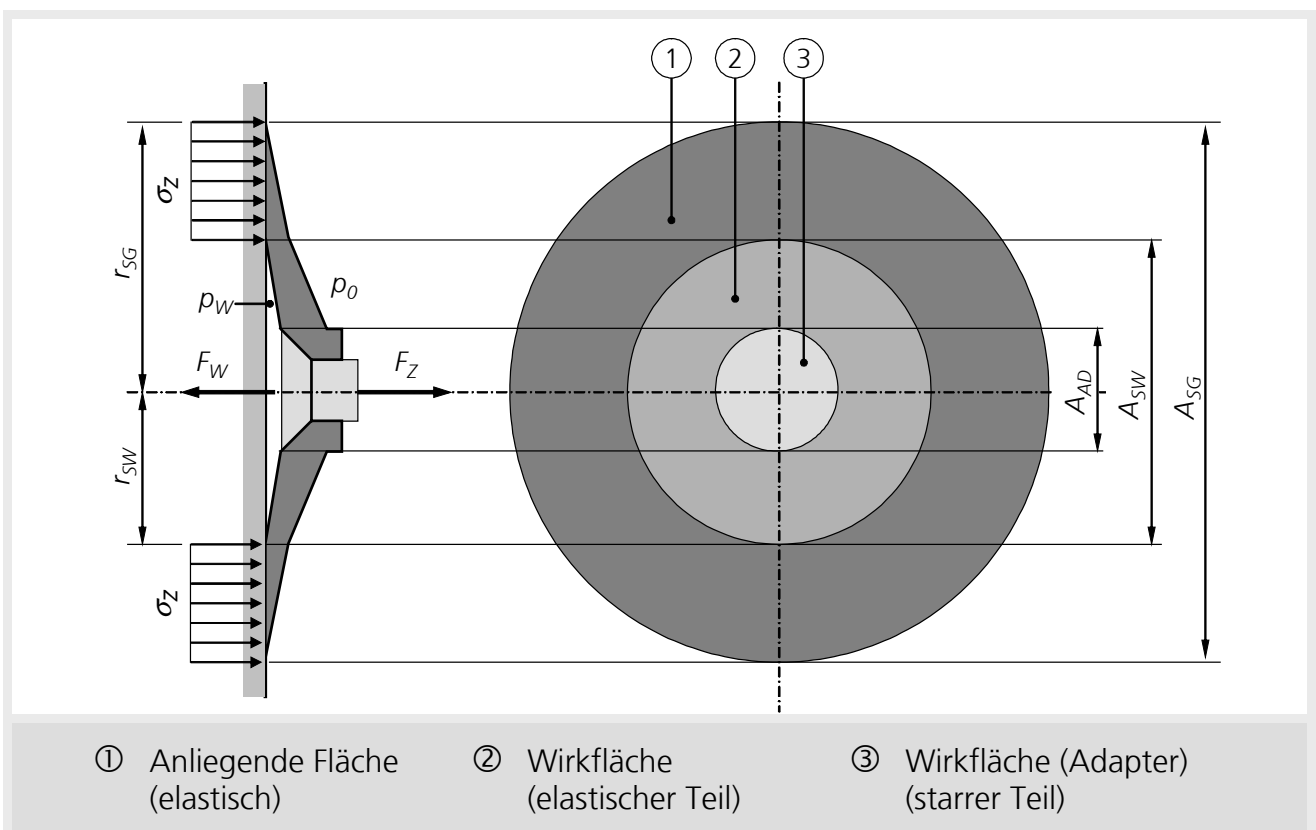


Abbildung 6-1: Darstellung eines passiv betriebenen Sauggreifers und seiner Bereiche im angesaugten Zustand

Der Flächeninhalt der Wirkfläche berechnet sich wie folgt:

$$A_{SW} = \pi \cdot r_{SW}^2 \quad (6.1)$$

Die Auflagefläche entspricht der Kontaktfläche zwischen Sauggreifergummi und Oberfläche nach der Anpressphase des Sauggreifers. Ihr Flächeninhalt ergibt sich zu

$$A_{SA} = \pi \cdot (r_{SG}^2 - r_{SW}^2) \quad (6.2)$$

6.2 Phasenmodell des Schlupfprozesses

Bei Einwirkung einer Scherkkraft F_S auf den Adapter verformt sich das Sauggreifergummi elastisch und der Adapter verschiebt sich je nach Betrag der Kraft um eine Strecke s_x in Richtung des Kraftvektors. Der elastische Teil der Wirkfläche verformt sich hierbei vollständig. Über der Auflagefläche verformt sich nur der Bereich, an der die durch die Scherkkraft hervorgerufene Scherspannung im Elastomer die Haftreibung überschreiten kann und dadurch die Sauggreiferoberfläche in den Gleitreibungszustand überführt wird. Unter der Annahme, dass die Scherspannung bei Einwirkung der Scherkkraft über den Radius der elastischen Fläche der Grundfläche von innen nach außen abnimmt, bildet sich an der Auflagefläche eine scharfe Grenze, außerhalb der keine elastische Verformung auftritt. Bei einem gegebenen Sauggreifer stellt sich diese Grenze abhängig von der aufgebrachten Scherkkraft F_S bzw. dem Scherweg s_x ein. Diese Grenze wird im Folgenden als *Schlupfgrenze* bezeichnet. Abhängig von ihrer Position können sich die drei verschiedenen Zustände *Betriebszustand*, *Grenzzustand* bzw. *Überlastzustand* einstellen (siehe dazu Abbildung 6-2).

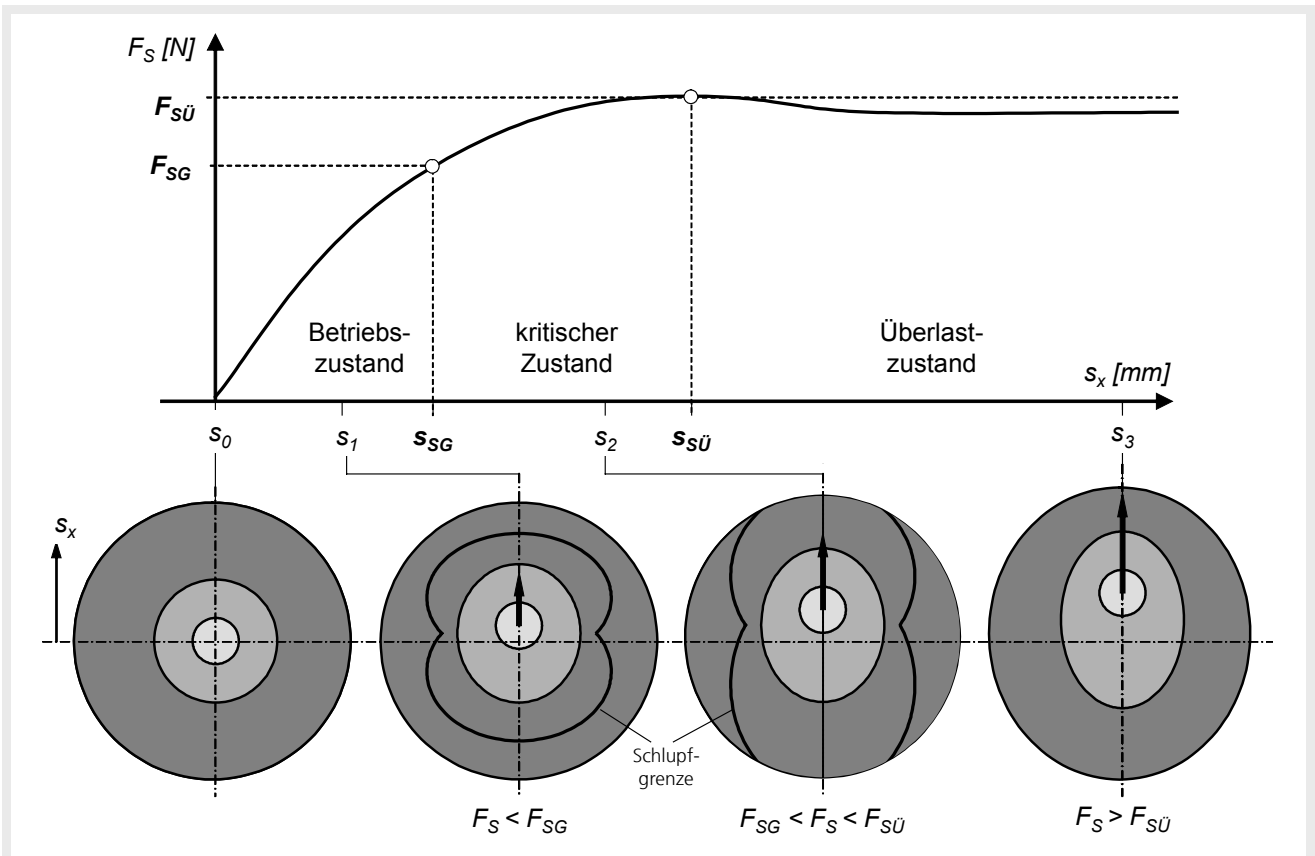


Abbildung 6-2: Darstellung des Scherkraftverlaufes sowie des Verhaltens der Schlupfgrenze über dem Scherweg eines passiv betriebenen Sauggreifers

Betriebszustand

Im Betriebszustand treten Verformungen innerhalb des elastischen Bereiches der Sauggreiferfläche auf. Die Schlupfgrenze befindet sich damit vollständig innerhalb der Auflagefläche. In diesem Zustand befindet sich der Sauggreifer in einem für den Betrieb optimalen Zustand.

Kritischer Zustand

Bei Überschreitung der kritischen Scherkraft F_{SG} schneidet die Schlupfgrenze die Außenkontur der Auflagefläche. Durch den verbleibenden Haftreibungsbereich befindet sich der Sauggreifer noch in einem stabilen Zustand. Durch das Gleiten von Abschnitten der äußeren Sauggreiferkante ist jedoch ein Aufrollen der Dichtlippe möglich, was das unmittelbare Versagen des Sauggreifers zur Folge hätte.

Überlastzustand

Bei Überschreitung der Überlast-Scherkraft $F_{SÜ}$ befindet sich die Schlupfgrenze vollständig außerhalb der Auflagefläche. Der gesamte elastische Bereich des Sauggreifers verformt sich und resultiert in einer Gleitreibung über die gesamte Auflagefläche. Der Sauggreifer rutscht ab.

Für den Scherkraftverlauf über dem Scherweg wird daher die in Abbildung 6-2 dargestellte Charakteristik erwartet. Diese Charakteristik erklärt sich aus drei zu erwartenden Phänomenen:

- Das elastische Verhalten des Elastomers bewirkt das Ansteigen der Kraft über den Scherweg bis zu dem spezifischen maximalen Wert.
- Vor dem Angreifen der Scherlast befindet sich die gesamte anliegende Fläche des Sauggreifers in Haftreibungskontakt mit der Oberfläche. Bei angreifender Scherlast teilt sich die anliegende Fläche in einen Gleitreibungsbereich innerhalb der Schlupfgrenze und einen Haftreibungsbereich außerhalb der Schlupfgrenze. Mit zunehmendem Scherweg nimmt, wie oben beschrieben, der Gleitreibungsbereich zu und der Haftreibungsbereich entsprechend ab. Mit Zunahme des Gleitreibungsbereiches nimmt auch der sich elastisch verformende Bereich zu. Da diese Zunahme in Krafrichtung stattfindet, reduziert sich die Gesamtfedersteifigkeit des Sauggreifers kontinuierlich über den Scherweg. So wird ein Abfall der Steigung des Kraftverlaufes bis zu dem spezifischen maximalen Wert erwartet.
- Der maximale Wert des Kraftverlaufes tritt auf kurz bevor der letzte verbleibende und infinitesimal kleine Haftbereich in den Gleitbereich übergeht. Da die Gleitreibungskraft geringer ist als die Haftreibungskraft, wird hier ein geringer Abfall der Scherkraft erwartet, bevor sich der Kraftverlauf einem konstanten Wert nähert. Dieser konstante Wert entspricht der Kraft, die während des kontinuierlichen Abrutschens des Sauggreifers auftritt. Die maximale Kraft entspricht der Überlastgrenze und kann auf diese Weise als Maximum des Kraftverlaufes direkt aus dem Diagramm ermittelt werden.

Anhand eines Berechnungsmodells soll die oben aufgestellte Theorie nun nachgewiesen werden und mit anschließenden Versuchen verifiziert werden. Ziel der Betrachtungen ist

- die Bestimmung der kritischen Scherkraft F_{SG} und der Überlastscherkraft $F_{SÜ}$ sowie
- die Untersuchung der Abhängigkeit des Scherweges s_x von der Scherkraft F_S sowie die Bestimmung der dabei auftretenden kritischen Verschiebungsstrecke s_{SG} und der Überlastverschiebungsstrecke $s_{SÜ}$ des Adapters.

6.3 Aufstellung eines mechanischen Ersatzmodells für den Schlupprozess

Das Schlupverhalten eines Sauggreifers kann mit Hilfe einer endlichen Anzahl an Auflagern zwischen aufliegender Sauggreiferfläche und Oberfläche modelliert werden. Jedes dieser Auflager definiert sich dabei durch folgende Eigenschaften.

- Jedes Auflager i erfährt im angesaugten Zustand des Sauggreifers eine spezifische Druckkraft $F_{eZ,i}$ senkrecht zur Oberflächenebene und bildet über einen Haftreibungs- bzw. Gleitreibungskoeffizienten μ_H bzw. μ_G eine Reibpaarung mit der Oberfläche. Für die übertragbaren Haft- bzw. Gleitreibungskräfte $F_{eH,i}$ bzw. $F_{eG,i}$ gilt der Zusammenhang:

$$\begin{aligned} F_{eH,i} &= \mu_H \cdot F_{eZ,i} \\ F_{eG,i} &= \mu_G \cdot F_{eZ,i} \end{aligned} \tag{6.3}$$

- Jedes Auflager kann sich im Haftzustand oder im Gleitzustand befinden. Im Gleitzustand ist jedes Auflager auf der Oberflächenebene beweglich.
- Eine Krafteinleitung auf ein statisches Auflager i mit Krafrichtungsvektor parallel zur Oberflächenebene und Kraftbetrag größer als die Haftreibungskraft $F_{eH,i}$ des jeweiligen Auflagers versetzt dieses in den Gleitzustand. Das Auflager verändert seine Position in Richtung des Krafrichtungsvektors.
- Unterschreitet der Betrag der Krafteinleitung auf ein gleitendes Auflager n die Gleitreibungskraft $F_{eG,n}$ des jeweiligen Auflagers wird dieses wieder in den Haftzustand zurück versetzt.
- Eine Positionsänderung $s_{e,n}$ eines Auflagers n leitet Netzkräfte $F_{eN,i}$ parallel zur Oberflächenebene in alle direkt benachbarten Auflager i ein.

Abbildung 6-3 zeigt diese Eigenschaften in eindimensionaler Darstellung als Federmodell (links) und in zweidimensionaler Darstellung als Netzstruktur (rechts).

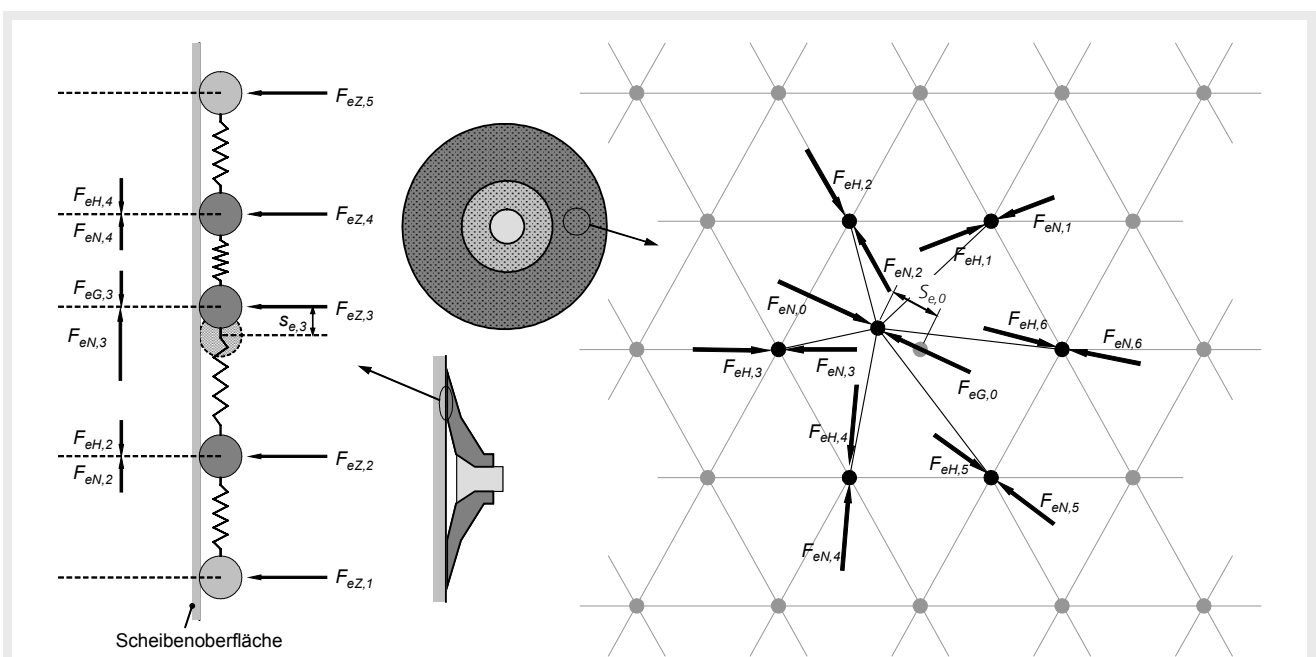


Abbildung 6-3: Modellbildung zur Anordnung und Verknüpfung von Auflagerpunkten der Dichtlippe eines Sauggreifers

Im hier zu berechnenden Lastfall greift eine Scherkraft am Adapter an. Hierdurch werden alle am Innenradius befindlichen Auflager gleichzeitig um eine definierte Strecke in die Richtung des Kraftvektors verschoben. Die dadurch hervorgerufene Krafteinleitung auf die jeweiligen direkt benachbarten Auflager bewirkt bei Überschreitung der Haftkräfte ebenfalls eine Überführung in den Gleitzustand und dadurch Positionsänderungen dieser Auflager. Diese Kettenreaktion breitet sich von den Haftpunkten am Innendurchmesser des Sauggreifers in Richtung des Außendurchmessers aus.

Die Kettenreaktion stoppt, sobald die Krafteinleitungen in alle Auflager durch die Positionsänderungen aller direkt benachbarten Auflager kleiner sind als die aufnehmbaren Gleitreibungskräfte aller Auflager.

6.4 Iterationsverfahren für die Simulation des Schlupfprozesses

Zur Simulation der Verformungen der Grundfläche des Sauggreifers verfährt das Iterationsverfahren realitätsgetreu von innen nach außen. Im Anfangszustand befindet sich jeder Knoten im Haftzustand. Bei Start der Simulation werden alle Knoten des inneren Rings (Ring 0) um eine vorgegebene Strecke vertikal verschoben. Dies bewirkt Krafteinleitungen in die direkten Nachbarknoten im nächsten Ring. Für jeden einzelnen Knoten dieses Ringes wird nun geprüft, ob die jeweilige Haftreibungskraft $F_{eH,0}$ durch die von den benachbarten Knoten verursachte Netzkräfteinleitung $F_{eN,0}$ über- oder unterschritten wird. Bei Überschreitung wird der jeweilige Knoten in den Gleitzustand versetzt und seine neue Position über die angreifende Gleitreibungskraft $F_{eG,0}$ berechnet, so dass ein Kräftegleichgewicht zwischen Gleitreibungskraft und Netzkräften hergestellt wird. Dieser Durchlauf auf dem jeweiligen Ring wird so oft wiederholt, bis sich alle Knoten dieses Ringes im Kräftegleichgewicht befinden. Dieser Vorgang wird nacheinander für alle Ringe von innen nach außen durchgeführt. Nach Beendigung des Vorganges für den äußeren Ring wird wieder mit dem innersten Ring begonnen. Die Simulation stoppt, sobald sich alle Knoten der Grundfläche im Kräftegleichgewicht befinden.

Abbildung 6-4 zeigt das Flussdiagramm des Simulationsablaufes. Die darin enthaltenen Variablen haben folgende Bedeutungen:

<i>Knoten_akt</i>	Nummer des aktuellen Knotens
<i>Ring_akt</i>	Nummer des aktuellen Rings
<i>i_Ring</i>	Ringindex. <i>i_Ring</i> steht am Anfang jedes Durchlaufes eines Ringes auf 0. <i>i_Ring</i> wird auf 1 gesetzt, wenn ein Knoten innerhalb eines Ringdurchlaufes eine Positionsänderung erfährt. Steht <i>i_Ring</i> am Ende eines Durchlaufes eines Ringes auf 1, wurde mindestens ein Knoten dieses Ringes verschoben und der Durchlauf startet erneut am selben Ring. Steht <i>i_Ring</i> am Ende eines Durchlaufes eines Ringes auf 0, wurde kein Knoten verschoben. In diesem Fall wird zum nächsten Ring gewechselt.
<i>i_Sauger</i>	Sauggreiferindex. <i>i_Sauger</i> steht am Anfang jedes Durchlaufes der Grundfläche des elastischen Teils des Sauggreifers auf 0. <i>i_Sauger</i> wird auf 1 gesetzt, wenn ein Knoten innerhalb eines Sauggreiferdurchlaufes eine Positionsänderung erfährt. Steht <i>i_Sauger</i> am Ende eines Durchlaufes der Grundfläche auf 1, wurde mindestens ein Knoten auf der Grundfläche verschoben und der Durchlauf startet erneut an Ring 1. Steht <i>i_Sauger</i> am Ende eines Durchlaufes der Grundfläche auf 0, wurde kein Knoten verschoben und die Simulation wird beendet.

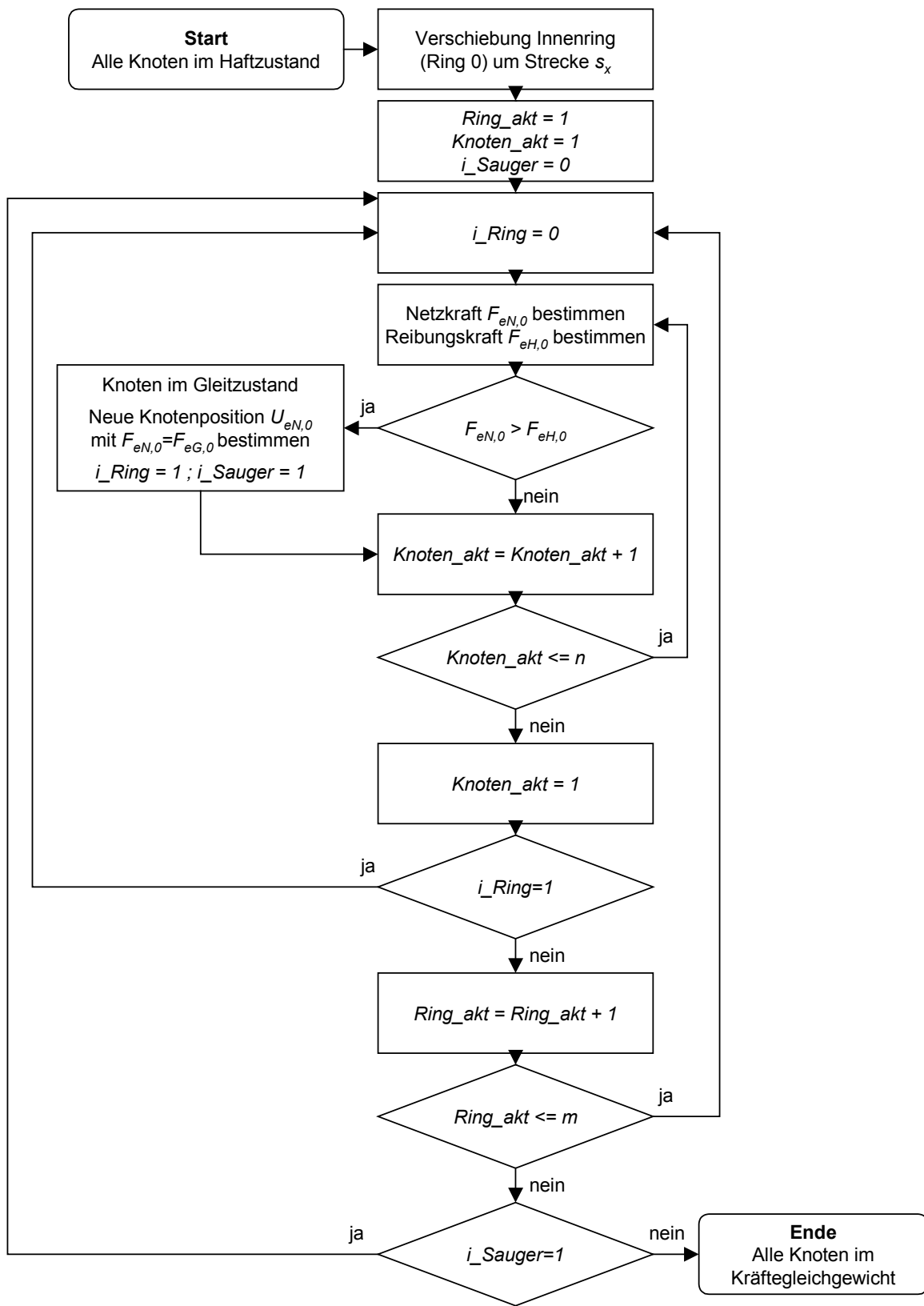


Abbildung 6-4: Flussdiagramm zur Berechnung der Scherkraft an einem passiv betriebenen Sauggreifer über dem Scherweg

6.5 Mathematisches Modell für die Simulation des Schlupfprozess

Zur Berechnung der im Iterationsverfahren des vorigen Abschnittes benötigten Größen Netz- kraft F_{eN} , Gleit- bzw. Haftreibungskraft F_{eG} bzw. F_{eH} sowie Knotenverschiebung s_e müssen nun die folgenden Schritte durchgeführt werden:

1. Bildung einer geeigneten Netzstruktur
2. Berechnung der Reibungskraft auf einen beliebigen Knoten der Netzstruktur
3. Berechnung der Netz- kraft auf einen beliebigen Knoten bei bekannten Positionen dieses Knotens und aller Nachbarknoten
4. Berechnung der Verschiebung eines Knotens bei bekannter Reibungskraft auf diesen Knoten

6.5.1 Bildung einer geeigneten Netzstruktur

In den vorangegangenen Unterkapiteln wurde die Grundfläche des Sauggreifers durch eine endliche Anzahl von Auflagerpunkten diskretisiert. Die Interaktionen zwischen direkt benachbarten Auflagern können durch die Methode der Finiten Elemente (FEM) beschrieben werden.

Das linke Bild der Abbildung 6-3 zeigt einen linearen Spannungszustand (LSZ). In dieser Darstellung sind die Zusammenhänge zwischen zwei direkt benachbarten Knoten über ein Feder- ersatzmodell beschreibbar. Da hier von einem ebenen Problem ausgegangen werden kann, wird den folgenden Berechnungen ein ebener Spannungszustand (ESZ) zugrunde gelegt. Für die Idealisierung solcher Beanspruchungszustände werden zum Aufbau eines Finite Elemente Netzes gewöhnlich Dreiecks- oder Viereckselemente herangezogen. Wegen ihrer guten Eignung zur Erfassung von Randkonturen werden im Folgenden Dreieckselemente verwendet (Klein, 1999).

Die aus Dreieckselementen aufgebaute Grundfläche eines Sauggreifers ist in Abbildung 6-5 dargestellt. Die Grundfläche besteht aus m konzentrischen Ringen, auf denen sich jeweils n Knoten befinden, die sich gleichmäßig über den Umfang des jeweiligen Ringes verteilen. Jeder Knoten bildet ein Auflager.

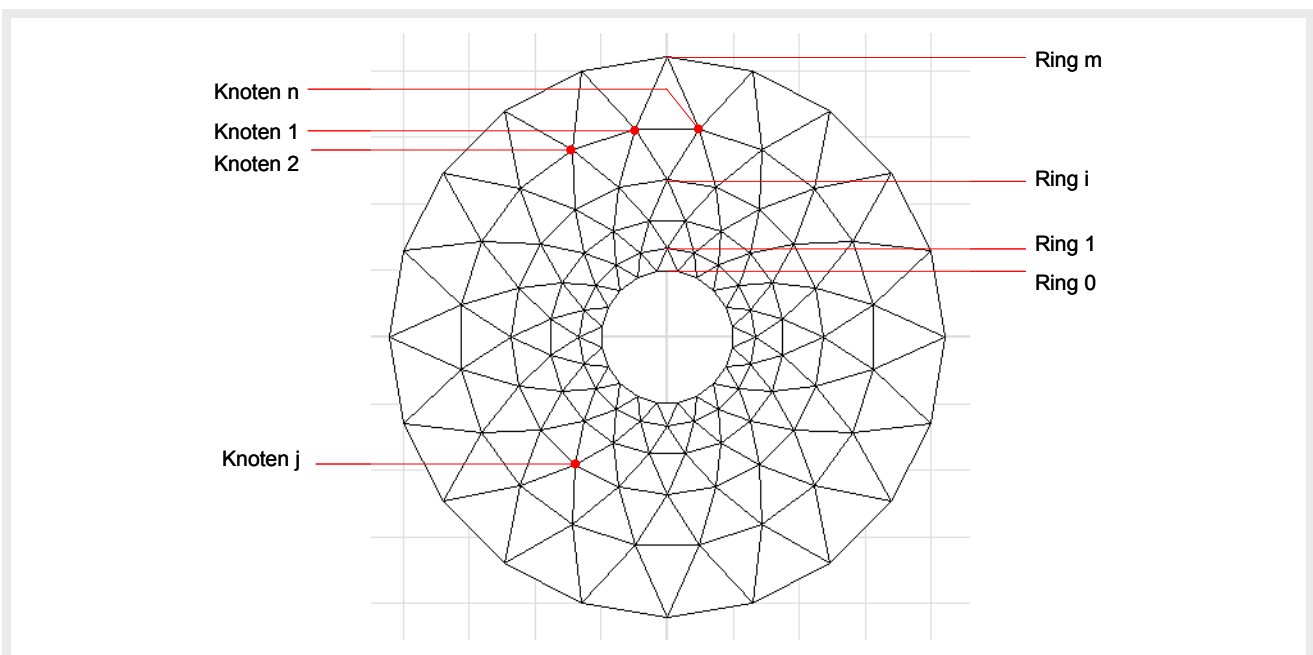


Abbildung 6-5: Anordnung der Knotenpunkte über die elastische Fläche eines passiv betriebenen Sauggreifers

6.5.2 Berechnung der Koordinaten der Knotenpunkte

Bei einem gegebenen Radius $r_{N,i}$ eines Ringes berechnen sich die Koordinaten $x_{N,ij}$ und $y_{N,ij}$ der darauf befindlichen Knoten j aus

$$\begin{aligned} x_{N,ij} &= -r_{N,i} \cdot \sin\left(2\pi \cdot \frac{j-1}{n}\right) \\ y_{N,ij} &= r_{N,i} \cdot \cos\left(2\pi \cdot \frac{j-1}{n}\right) \end{aligned} \quad \text{bei } i \text{ gerade} \quad (6.4)$$

$$\begin{aligned} x_{N,ij} &= -r_{N,i} \cdot \sin\left(2\pi \cdot \frac{j-0,5}{n}\right) \\ y_{N,ij} &= r_{N,i} \cdot \cos\left(2\pi \cdot \frac{j-0,5}{n}\right) \end{aligned} \quad \text{bei } i \text{ ungerade.} \quad (6.5)$$

Um über die gesamte Netzfläche geometrisch ähnliche, gleichseitige Dreiecke zu erhalten, muss der Abstand $\Delta r_{N,i}$ eines Ringes $i+1$ zu einem Ring i auf Basis des Knotenabstandes $2 \cdot a_{N,i}$ auf dem Ring i berechnet werden. Gemäß Abbildung 6-6 und mit

$$a_{N,i} = r_{N,i} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{n}\right) \quad (6.6)$$

berechnet sich demnach der Radius $r_{N,i+1}$ aus

$$r_{N,i+1} = r_{N,i} + \Delta r_{N,i} = r_{N,i} \cdot \left(\sqrt{3} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{n}\right) + \cos\left(\frac{\pi}{n}\right) \right) \quad (6.7)$$

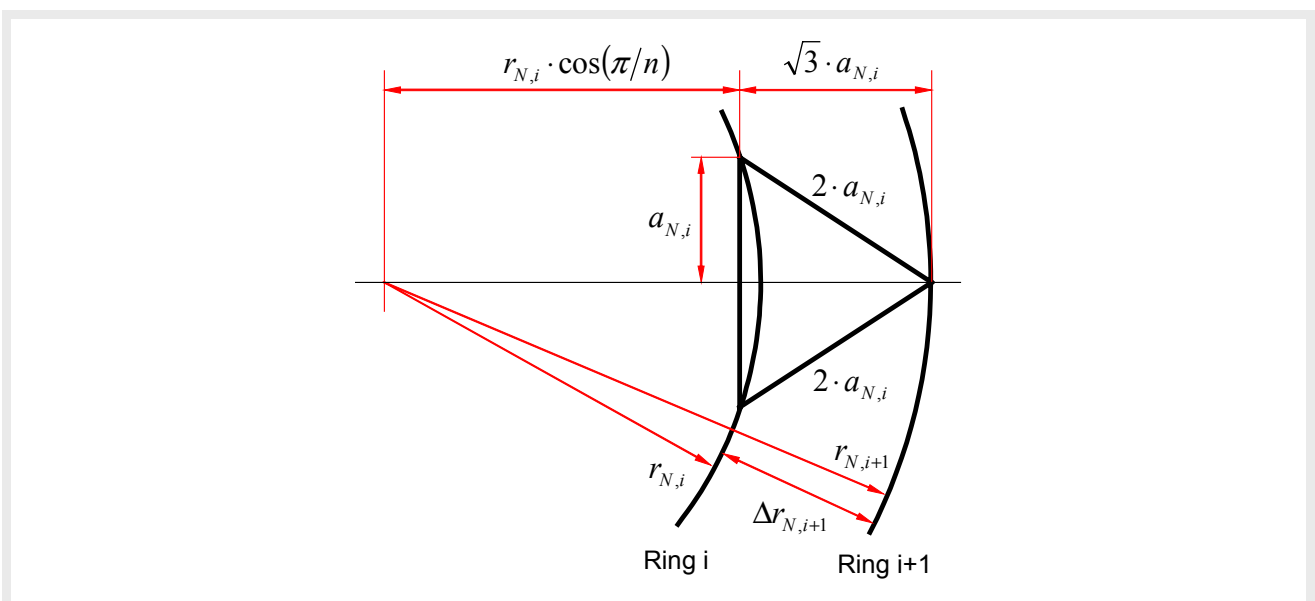


Abbildung 6-6: Geometrisches Modell zur Berechnung der Koordinaten aller Knoten eines Dreieckelementes

Ausgehend vom Innenradius $r_{N,0}$ kann daraus jeder Radius $r_{N,i}$ berechnet werden:

$$r_{N,i} = r_{N,0} \cdot f_N^i \quad \text{mit} \quad f_N = \sqrt{3} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{n}\right) + \cos\left(\frac{\pi}{n}\right) \quad (6.8)$$

Setzt man in Gleichung (6.8) den Außenradius $r_{N,m}$ ein, so erhält man durch geeignete Umformung und Abrundung die Anzahl m der Netzringe

$$m = \text{int} \left[\log_{f_N} \left(\frac{r_{N,m}}{r_{N,0}} \right) \right] \quad (6.9)$$

Durch die Abrundungsfunktion in Gleichung (6.9) muss nun der Faktor f_N korrigiert werden:

$$f_{N,korr} = \left(\frac{r_{N,m}}{r_{N,0}} \right)^{1/m} \quad (6.10)$$

Daraus folgt zur Berechnung der Radien:

$$r_{N,i} = r_{N,0} \cdot \left(\frac{r_{N,m}}{r_{N,0}} \right)^{i/m} \quad (6.11)$$

Damit ergeben sich die endgültigen Gleichungen zur Berechnung der Knotenkoordinaten:

$$\begin{aligned} x_{N,ij} &= -r_{N,0} \cdot \left(\frac{r_{N,m}}{r_{N,0}} \right)^{i/m} \cdot \sin\left(2\pi \cdot \frac{j-1}{n}\right) \\ y_{N,ij} &= r_{N,0} \cdot \left(\frac{r_{N,m}}{r_{N,0}} \right)^{i/m} \cdot \cos\left(2\pi \cdot \frac{j-1}{n}\right) \end{aligned} \quad \begin{array}{l} \text{bei } i \text{ gerade} \\ \text{bei } i \text{ ungerade} \end{array} \quad (6.12)$$

$$\begin{aligned} x_{N,ij} &= -r_{N,0} \cdot \left(\frac{r_{N,m}}{r_{N,0}} \right)^{i/m} \cdot \sin\left(2\pi \cdot \frac{j-0,5}{n}\right) \\ y_{N,ij} &= r_{N,0} \cdot \left(\frac{r_{N,m}}{r_{N,0}} \right)^{i/m} \cdot \cos\left(2\pi \cdot \frac{j-0,5}{n}\right) \end{aligned} \quad \begin{array}{l} \text{bei } i \text{ gerade} \\ \text{bei } i \text{ ungerade} \end{array} \quad (6.13)$$

6.5.3 Berechnung der Reibungskraftverteilung auf die Knoten der Netzstruktur

Die Haftreibungskraft $F_{eH,ij}$ und die Gleitreibungskraft $F_{eG,ij}$ eines Elementknotens i auf einem Netzring j berechnet sich über seine Druckkraft $F_{eZ,ij}$ gemäß Gleichung (6.3) zu

$$\begin{aligned} F_{eH,ij} &= F_{eZ,ij} \cdot \mu_H \\ F_{eG,ij} &= F_{eZ,ij} \cdot \mu_G \end{aligned} \quad (6.14)$$

Zur Bestimmung dieser Reibungskräfte muss zunächst die Druckkraftverteilung über die Fläche des Sauggreifers bestimmt werden. Die Druckkraft berechnet sich hierbei aus dem Integral der

Flächenpressung σ_z über der unmittelbar um den Knoten befindlichen Ringsegmentfläche $A_{e,ij}$ zwischen r_a und r_b (Abbildung 6-7):

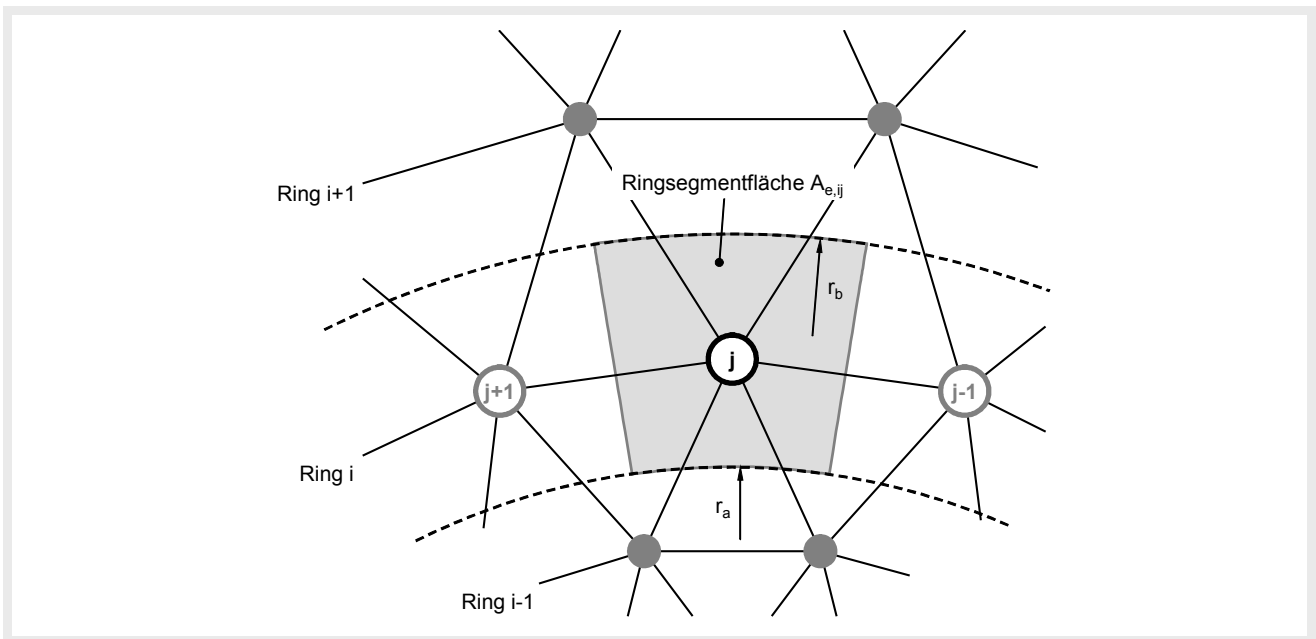


Abbildung 6-7: Darstellung des zu einem Knoten zugehörigen Flächensegmentes der Sauggreifergrundfläche

Unter der Annahme einer Gleichverteilung über die gesamte anliegende Fläche ergibt sich die Flächenpressung σ_z an einem wie in Abbildung 6-1 dargestellten Sauggreifer aus der Differenz zwischen der Saugkraft F_w , welche aus der Druckdifferenz $p_0 - p_w$ resultiert, und der entgegenwirkenden Zugkraft F_z .

Das von Schmierer zur Berechnung der Reibungskräfte an Sauggreifern verwendete Modell beschreibt in diesem Zusammenhang die Oberfläche von Glas als eine aus mikroskopisch kleinen Halbkugeln bestehende Ebene (Schmierer, 2001). Das Elastomer der Reibeinlage oder der Dichtungslippe eines Sauggreifers liegt auf den Oberseiten der Halbkugeln auf, so dass darunter ein Raum verbleibt, in welchem ebenfalls die am Sauggreifer anliegende Druckdifferenz wirkt und somit Einfluss auf die Saugkraft hat. Da der bei passiv betriebenen Sauggreifern sich einstellende Unterdruck im Vergleich zu den aktiv betriebenen Sauggreifern gering ist, liegt das Elastomer nur punktförmig auf den Halbkugeln der Glasoberfläche auf. So kann zur Berechnung der Saugkraft die gesamte Fläche des Sauggreifers A_{SG} angenommen werden.

$$\sigma_z \cdot (A_{SG} - A_{SW}) = F_w - F_z = (p_0 - p_w) \cdot A_{SG} - F_z \quad (6.15)$$

Also ergibt sich unter Verwendung der Gleichungen (6.1) und (6.2) für die Flächenpressung

$$\sigma_z = \frac{(p_0 - p_w) \cdot \pi \cdot r_{SG}^2 - F_z}{\pi \cdot (r_{SG}^2 - r_{SW}^2)} \quad (6.16)$$

Damit berechnet sich die Druckkraft auf einen Knoten wie folgt:

$$F_{eZ,ij} = \int_{r_a}^{r_b} \frac{2 \cdot \pi \cdot r}{n} \cdot \lambda_{3D} \cdot \sigma_Z \cdot dr \quad \text{mit} \quad \begin{aligned} r_a &= \frac{1}{2} \cdot (r_{N,i-1} + r_{N,i}) \\ r_b &= \frac{1}{2} \cdot (r_{N,i} + r_{N,i+1}) \end{aligned} \quad (6.17)$$

Der Normaldehnungsparameter λ_{3D} berücksichtigt hierbei die bei Einwirkung von Scherkräften senkrecht zur Oberflächenebene wirkenden Verformungen des Sauggreifergummis, welche die Normalkräfte zusätzlich erhöhen.

So kann aus den Gleichungen (6.14), (6.16) und (6.17) die endgültige Formel für die Berechnung der Haft- bzw. Gleitkraft auf jeden Knoten hergeleitet werden:

$$F_{eH,ij} = \frac{(p_0 - p_W) \cdot \pi \cdot r_{SG}^2 - F_Z}{4 \cdot n \cdot (r_{SG}^2 - r_{SW}^2)} \cdot [r_{N,i+1}^2 + 2r_{N,i} \cdot (r_{N,i+1} - r_{N,i-1}) - r_{N,i-1}^2] \cdot \lambda_{3D} \cdot \mu_H$$

$$F_{eG,ij} = \frac{(p_0 - p_W) \cdot \pi \cdot r_{SG}^2 - F_Z}{4 \cdot n \cdot (r_{SG}^2 - r_{SW}^2)} \cdot [r_{N,i+1}^2 + 2r_{N,i} \cdot (r_{N,i+1} - r_{N,i-1}) - r_{N,i-1}^2] \cdot \lambda_{3D} \cdot \mu_G \quad (6.18)$$

6.5.4 Berechnung des am mittleren Knoten angreifenden Kraft- und Verschiebungsvektors

Ausgehend von den oben aufgestellten Zusammenhängen sind nun die Berechnungsvorschriften herzuleiten für

- die Berechnung der Kraft auf einen Knoten bei bekannter Position dieses Knotens sowie aller benachbarter Knoten
- die Berechnung der Verschiebung eines Knotens bei bekannter, von außen einwirkender Reibungskraft auf diesen Knoten sowie bei bekannter Position aller direkt benachbarten Knoten.

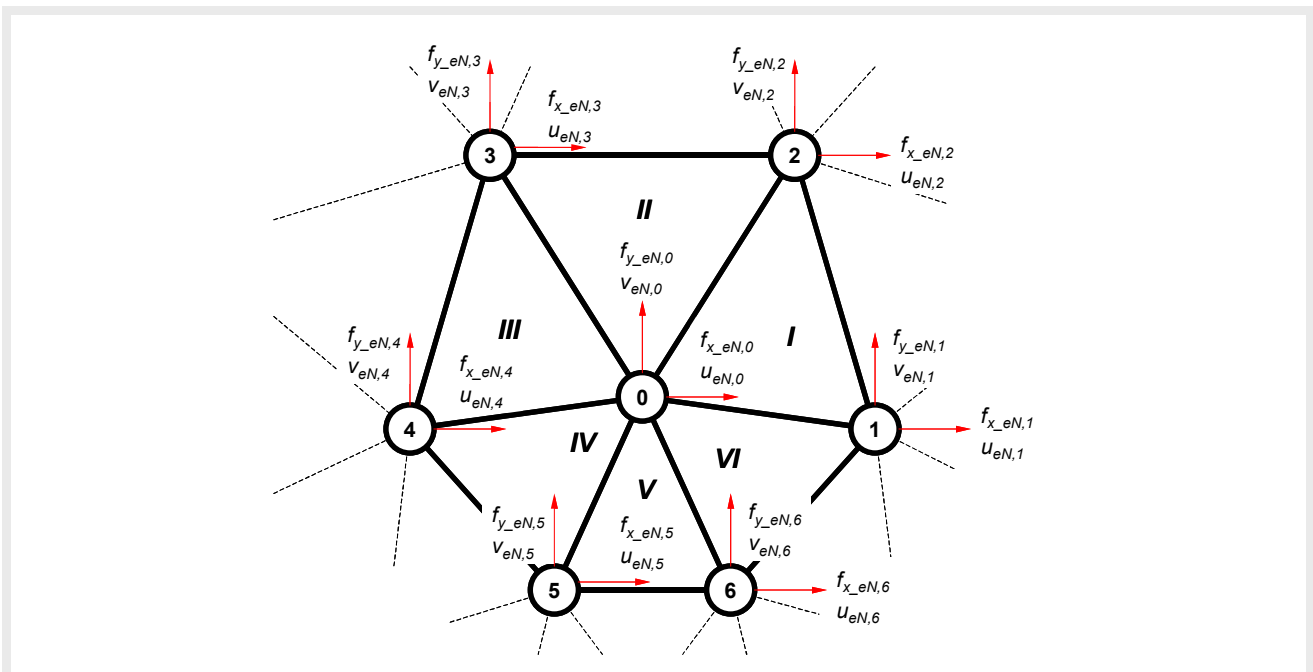


Abbildung 6-8: Darstellung einer Einheit von sechs Dreieckselementen mit einem gemeinsamen zentralen Knoten

Die aus der Position der direkt benachbarten Knoten resultierenden Netzkräfte $f_{x_{eN,0}}$ und $f_{y_{eN,0}}$ sowie seine Verschiebungen $u_{eN,0}$ und $v_{eN,0}$ können berechnet werden, wenn die Positionen aller direkt benachbarter Knoten bekannt sind. Der hierzu zu betrachtende Netzausschnitt umfasst also sieben Knoten an sechs um den mittleren Knoten angeordneten Dreiecken (siehe Abbildung 6-8). Jeder Knoten i erfährt den Netz Kraftvektor $\underline{F}_{eN,i}$ und ist um den Verschiebungsvektor $\underline{U}_{eN,i}$ beweglich.

$$\underline{F}_{eN,i} = \begin{bmatrix} f_{x_{eN,i}} \\ f_{y_{eN,i}} \end{bmatrix} \quad \underline{U}_{eN,i} = \begin{bmatrix} u_{eN,i} \\ v_{eN,i} \end{bmatrix} \quad (6.19)$$

Der Zusammenhang zwischen den Netzkräften und den Verschiebungen aller Knoten dieses Netzausschnittes lässt sich so mit Hilfe der Gesamtsteifigkeitsmatrix \underline{K}_N der gebundenen Struktur über den Ausdruck

$$\underline{F}_N = \underline{K}_N \cdot \underline{U}_N \quad (6.20)$$

beschreiben. Hierbei stellt \underline{F}_N den Kraftvektor und \underline{U}_N den Verschiebungsvektor für alle sieben Knoten dar:

$$\underline{F}_N^t = \left[\underline{F}_{eN,0}^t \quad \underline{F}_{eN,1}^t \quad \underline{F}_{eN,2}^t \quad \underline{F}_{eN,3}^t \quad \underline{F}_{eN,4}^t \quad \underline{F}_{eN,5}^t \quad \underline{F}_{eN,6}^t \right] \quad (6.21)$$

$$\underline{U}_N^t = \left[\underline{U}_{eN,0}^t \quad \underline{U}_{eN,1}^t \quad \underline{U}_{eN,2}^t \quad \underline{U}_{eN,3}^t \quad \underline{U}_{eN,4}^t \quad \underline{U}_{eN,5}^t \quad \underline{U}_{eN,6}^t \right] \quad (6.22)$$

Im Folgenden wird nun die Gesamtsteifigkeitsmatrix \underline{K}_N der gebundenen Struktur aufgestellt, um daraus schließlich die gewünschten Gleichungen zur Bestimmung von Kraft und Verschiebung des mittleren Knotens zu bestimmen.

6.5.5 Aufstellung der Gesamtsteifigkeitsmatrix

Die Gesamtsteifigkeitsmatrix \underline{K}_N der gebundenen Struktur für alle sechs Dreieckselemente lässt sich nach Klein direkt aus der Gesamtsteifigkeitsmatrix der ungebundenen Struktur \underline{k}_N bestimmen (Klein, 1999):

$$\underline{K}_N = \underline{A}_N^t \cdot \underline{k}_N \cdot \underline{A}_N \quad (6.23)$$

Hierbei ist \underline{A}_N die Inzidenzmatrix zur Transformation der ungebundenen Struktur in die gebundene. Der Inhalt der Inzidenzmatrix ist abhängig von Anzahl, Geometrie und Anordnung der zu verbindenden Elemente.

Die Gesamtsteifigkeitsmatrix der ungebundenen Struktur ergibt sich hierbei aus den Elementsteifigkeitsmatrizen der einzelnen Dreieckselemente $\underline{k}_{eN,\Omega}$:

$$\underline{k}_N = \begin{bmatrix} \underline{k}_{eN,I} & & & & & \underline{0} \\ & \underline{k}_{eN,II} & & & & \\ & & \underline{k}_{eN,III} & & & \\ & & & \underline{k}_{eN,IV} & & \\ & & & & \underline{k}_{eN,V} & \\ \underline{0} & & & & & \underline{k}_{eN,VI} \end{bmatrix} \quad (6.24)$$

Auf Basis der Ansatzfunktion

$$\begin{aligned} u(x,y) &= \alpha_1 + \alpha_2 \cdot x + \alpha_3 \cdot y \\ v(x,y) &= \alpha_4 + \alpha_5 \cdot x + \alpha_6 \cdot y \end{aligned} \quad (6.25)$$

erhält man nach Klein die Elementsteifigkeitsmatrizen für ein einzelnes ebenes Dreieckselement i :

$$\underline{k}_{eN,\Omega} = \begin{bmatrix} \underline{k}_{eN,11} & \underline{k}_{eN,12} & \underline{k}_{eN,13} \\ \underline{k}_{eN,21} & \underline{k}_{eN,22} & \underline{k}_{eN,23} \\ \underline{k}_{eN,31} & \underline{k}_{eN,32} & \underline{k}_{eN,32} \end{bmatrix} \quad (6.26)$$

wobei

$$\underline{k}_{eN,mn} = \frac{E \cdot t_e}{4 \cdot A_e \cdot (1-\nu^2)} \cdot \begin{bmatrix} b_m \cdot b_n + \frac{1-\nu}{2} \cdot c_m \cdot c_n & \nu \cdot b_m \cdot c_n + \frac{1-\nu}{2} \cdot c_m \cdot b_n \\ \nu \cdot c_m \cdot b_n + \frac{1-\nu}{2} \cdot b_m \cdot c_n & c_m \cdot c_n + \frac{1-\nu}{2} \cdot b_m \cdot b_n \end{bmatrix} \quad (6.27)$$

Hier geht der Elastizitätsmodul E und die Querkontraktionszahl ν des Elastomers sowie die Höhe t_e und Grundfläche A_e des jeweiligen Dreieckselements ein. Die in dieser Matrix befindlichen Variablen berechnen sich aus den Koordinaten x_i und y_i der Knotenpunkte des jeweiligen Dreieckselements:

$$\begin{aligned} b_k &= y_m - y_n \\ c_k &= x_n - x_m \end{aligned} \quad k, m, n = (1,2,3), (2,3,1), (3,1,2) \quad (6.28)$$

Der hier betrachtete Netzausschnitt besteht aus sechs benachbarten Dreieckselementen. Zwei benachbarte Dreiecke haben immer jeweils zwei Knoten gemeinsam, wobei einer der Knoten immer der zentrale Knoten 0 ist (siehe Abbildung 6-8). Damit sind alle Gleichungen zur Berechnung der Gesamtsteifigkeitsmatrix \underline{K}_N der gebundenen Struktur vorhanden.

6.5.6 Berechnung von Netzkräft und Verschiebung des mittleren Knotens

Zur Herleitung der gesuchten Lösungsgleichungen muss das Gleichungssystem der Gleichung (6.20) nun aufgespaltet werden in Netzkräfte bzw. Verschiebungen des mittleren Knotens ($\underline{F}_{N,M}$ bzw. $\underline{U}_{N,M}$) und in Netzkräfte bzw. Verschiebungen der sechs direkt benachbarten Knoten ($\underline{F}_{N,A}$ bzw. $\underline{U}_{N,A}$):

$$\underline{F}_{N,M}^t = \underline{F}_{eN,0}^t \quad (6.29)$$

$$\underline{F}_{N,A}^t = \left[\underline{F}_{eN,1}^t \quad \underline{F}_{eN,2}^t \quad \underline{F}_{eN,3}^t \quad \underline{F}_{eN,4}^t \quad \underline{F}_{eN,5}^t \quad \underline{F}_{eN,6}^t \right] \quad (6.30)$$

$$\underline{U}_{N,M}^t = \underline{U}_{eN,0}^t \quad (6.31)$$

$$\underline{U}_{N,A}^t = \left[\underline{U}_{eN,1}^t \quad \underline{U}_{eN,2}^t \quad \underline{U}_{eN,3}^t \quad \underline{U}_{eN,4}^t \quad \underline{U}_{eN,5}^t \quad \underline{U}_{eN,6}^t \right] \quad (6.32)$$

Dadurch spaltet sich die Gesamtsteifigkeitsmatrix \underline{K} in vier Untermatrizen auf. Das Gleichungssystem der Gleichung (6.20) schreibt sich dann wie folgt:

$$\begin{bmatrix} \underline{F}_{N,M} \\ \underline{F}_{N,A} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{K}_{N,MM} & \underline{K}_{N,MA} \\ \underline{K}_{N,AM} & \underline{K}_{N,AA} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_{N,M} \\ \underline{U}_{N,A} \end{bmatrix} \quad (6.33)$$

Die Netzkraft $\underline{F}_{eN,0}$ auf den Knoten 0 bei bekannten Verschiebungen $\underline{U}_{eN,0}$ und $\underline{U}_{N,A}$ aller sieben Knoten ergibt sich nach Einsetzen von Gleichung (6.29) und Gleichung (6.31) in Gleichung (6.33):

$$\underline{F}_{eN,0} = \underline{K}_{N,MM} \cdot \underline{U}_{eN,0} + \underline{K}_{N,MA} \cdot \underline{U}_{N,A} \quad (6.34)$$

Die Verschiebung $\underline{U}_{eN,0}$ auf den Knoten 0 bei bekannten Verschiebungen $\underline{U}_{N,A}$ aller sechs benachbarter Knoten und bekannter einwirkender Kraft $\underline{F}_{eN,0}$ ergibt sich durch einfaches Umformen von Gleichung (6.34):

$$\underline{U}_{eN,0} = \underline{K}_{N,MM}^{-1} \cdot \underline{K}_{N,MA} \cdot \underline{U}_{N,A} - \underline{K}_{N,MM}^{-1} \cdot \underline{F}_{eN,0} \quad (6.35)$$

Die Untermatrizen $\underline{K}_{N,MM}$ und $\underline{K}_{N,MA}$ erhält man aus der Gesamtsteifigkeitsmatrix \underline{K}_N aus den Gleichungen (6.23) bis (6.28). So erhält man aus Gleichung (6.34) bzw. (6.35) die endgültigen Lösungsgleichungssysteme:

$$\begin{bmatrix} f_{x_{eN,0}} \\ f_{y_{eN,0}} \end{bmatrix} = \underline{K}_{N,MM} \cdot \begin{bmatrix} u_{eN,0} \\ v_{eN,0} \end{bmatrix} + \underline{K}_{N,MA} \cdot \begin{bmatrix} u_{eN,1} \\ v_{eN,1} \\ u_{eN,2} \\ v_{eN,2} \\ u_{eN,3} \\ v_{eN,3} \\ u_{eN,4} \\ v_{eN,4} \\ u_{eN,5} \\ v_{eN,5} \\ u_{eN,6} \\ v_{eN,6} \end{bmatrix}; \quad \begin{bmatrix} u_{eN,0} \\ v_{eN,0} \end{bmatrix} = \underline{K}_{N,MM}^{-1} \cdot \underline{K}_{N,MA} \cdot \begin{bmatrix} u_{eN,1} \\ v_{eN,1} \\ u_{eN,2} \\ v_{eN,2} \\ u_{eN,3} \\ v_{eN,3} \\ u_{eN,4} \\ v_{eN,4} \\ u_{eN,5} \\ v_{eN,5} \\ u_{eN,6} \\ v_{eN,6} \end{bmatrix} - \underline{K}_{N,MM}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} f_{x_{eN,0}} \\ f_{y_{eN,0}} \end{bmatrix} \quad (6.36)$$

In Gleichung (6.36) wird die von den benachbarten Knoten auf den mittleren Knoten einwirkende Kraft $\underline{F}_{eN,0}$ berechnet. Hierzu sind die Verschiebungen $\underline{U}_{eN,0}$ des mittleren Knotens sowie der benachbarten Knoten $\underline{U}_{N,A}$ bekannt.

In Gleichung (6.37) wird die Verschiebung des mittleren Knotens bei bekannter von außen einwirkender Nettokraft $\underline{F}_{eN,0}$ und bekannten Verschiebungen $\underline{U}_{N,A}$ aller Nachbarknoten berechnet. Da der Knoten sich während seiner Verschiebung in Bewegung befindet, handelt es sich bei der Nettokraft $\underline{F}_{eN,0}$ immer um die Gleitreibungskraft $\underline{F}_{eG,0}$ (siehe Abbildung 6-3).

6.6 Ermittlung der Parameter des Ersatzmodells

Die zur Durchführung einer Simulation des Schlupfprozesses notwendigen Materialwerte sowie die geometrischen Parameter für den in Kapitel 4 ausgewählten Sauggreifer sind in Abbildung 6-9 zusammengefasst.

Geometrische Größen für Sauggreifer SG40 SI	Wert		
Radius der Außenkontur des Sauggreifers	r_{SG}	21	[mm]
Radius der Außenkontur der Wirkfläche	r_{SW}	14	[mm]
Radius der Außenkontur des Adapters	r_{SS}	6	[mm]
Dicke des Sauggreifergummis am Radius r_{SS}	t_e	5	[mm]
Verlauf der Dicke von außen nach innen	-	linear	-
Elastizitätsmodul Silikon	E	1,5	[N/mm ²]
Querkontraktionszahl Silikon	ν	0,45	-
Haftreibungskoeffizient Silikon-Sicherheitsglas	μ_H	0,8	-
Gleitreibungskoeffizient Silikon-Sicherheitsglas	μ_G	0,7	-

Abbildung 6-9: Materialwerte für den Sauggreifer SG40 SI der Firma Sommer Automatic

Die geometrischen Werte des Sauggreifers sowie das Elastizitätsmodul und die Querkontraktionszahl sind den entsprechenden Produktkatalogen zu entnehmen. Die Reibungskoeffizienten des speziellen Silikons des Sauggreifers sind Ergebnisse von Vorversuchen.

Zur Ermittlung der Reibungskräfte $F_{eH,ij}$ bzw. $F_{eG,ij}$ auf die einzelnen Auflager an der anliegenden Fläche des Sauggreifers müssen gemäß Gleichung (6.18)

- die am Sauggreifer wirkende Zugkraft F_Z ,
- die sich dabei einstellende Druckdifferenz $p_0 - p_w$ sowie
- der Normaldehnungsparameter λ_{3D}

in Abhängigkeit des Zugweges s_Z experimentell bestimmt werden.

Der Normaldehnungsparameter λ_{3D} wird dabei aus dem Quotient zwischen der an der Überlastgrenze tatsächlich wirkenden Scherkraft F_{UG} und der aus Gleichung (6.15) ermittelbaren Haftreibungskraft bestimmt:

$$\lambda_{3D}(s_Z) = \frac{1}{\mu_H} \cdot \frac{F_{UG}(s_Z)}{[p_0 - p_w(s_Z)] \cdot A_{SG} - F_Z(s_Z)} \quad (6.38)$$

Die Versuchseinrichtung zur Ermittlung der Zugkraft F_Z und der Druckdifferenz $p_0 - p_w$ in Abhängigkeit des Zugweges s_Z besteht aus einer angetriebenen und vertikal verfahrbaren Lineareinheit sowie einer darunter befindlichen waagrecht installierten Scheibe. Am unteren Ende der Lineareinheit ist der zu untersuchende Sauggreifer befestigt. Eine in die Lineareinheit integrierte Kraftmessdose misst die auf den Sauggreifer wirkende Zugkraft F_Z . Ein Druckmesser misst über eine Bohrung in der Scheibe den im Sauggreifer herrschenden Druck p_w . Zur Versuchsdurchführung wurde der Sauggreifer jeweils vollständig an die Scheibe angedrückt und anschließend in den in Abbildung 3-4 beschriebenen angesaugten Gleichgewichtszustand überführt. Von dieser Position wurde der Sauggreifer millimeterweise in senkrechter Richtung zur Glasoberfläche verfahren und jeweils Zugkraft und Unterdruck gemessen.

Zur Ermittlung des Normaldehnungsparameters wurde eine senkrecht orientierte Scheibe an der Lineareinheit installiert und gegen den an der Konsole der Versuchseinrichtung befestigten Sauggreifer abgeschert. Der senkrecht zur Scheibe stehende Zugweg s_Z konnte über ein horizontal angeordnetes Gewinde eingestellt werden. Zur Versuchsdurchführung wurde der Sauggreifer auch hier jeweils vollständig an die Scheibe angedrückt, in den angesaugten Gleichgewichtszustand überführt und anschließend über das horizontal angeordnete Gewinde in Millimeterschritten unter Zuglast versetzt. Aus dieser Position wurde die Scheibe über die vertikale Lineareinheit nach oben abgeschert und die beim jeweils eingestellten Zugweg s_Z auftretende maximale Kraft bestimmt, welche der an der Überlastgrenze tatsächlich wirkenden Scherkraft $F_{UG}(s_Z)$ entspricht.

Abbildung 6-10 zeigt die Ergebnisse der Versuche. Der Normaldehnungsparameter λ_{3D} ergibt sich hierbei als Konstante über den Zugweg s_Z .

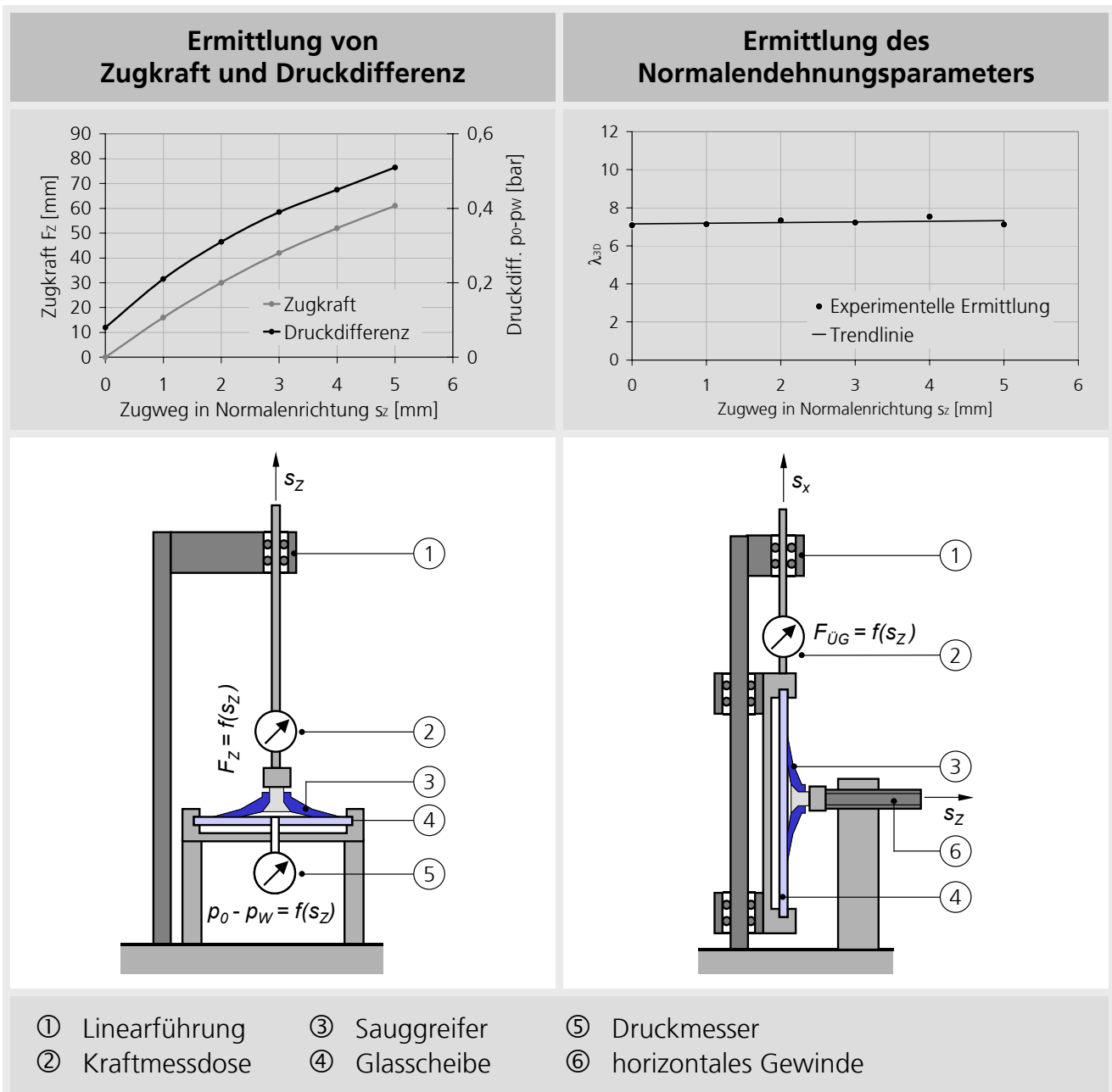


Abbildung 6-10: Darstellung der Versuchsergebnisse und der Versuchsaufbauten zur Ermittlung der für die Simulation notwendigen Parameterwerte

6.7 Modellrechnung und Ergebnisse

Auf Basis der in den vorangegangenen Abschnitten hergeleiteten mathematischen Grundlagen kann nun mit dem in Abbildung 6-4 dargestellten Iterationsverfahren eine Simulation des Schlupfverhaltens aller Geometrien von passiv betriebenen Sauggreifern durchgeführt werden. Hierzu werden alle Knoten des innersten Rings um eine vorgegebene Strecke parallel zur Oberfläche verschoben und gemäß dem Ablauf in Abbildung 6-4 die Scherkraft auf das Adapterstück berechnet. Die Verschiebungen der einzelnen Knoten resultieren in inneren Spannungen der Dreieckselemente. Die Schlupfgrenze ergibt sich damit dort, wo entspannte Dreieckselemente an unter Spannung stehende Dreieckselemente angrenzen.

Ausgehend von einer vorgegebenen Startverschiebung des Innenrings berechnet die Simulation die hierbei auftretenden Scherkräfte auf den Innenring für ansteigende Verschiebungen in diskreten Stufen. Die Simulationsergebnisse sind in Abbildung 6-12 dargestellt.

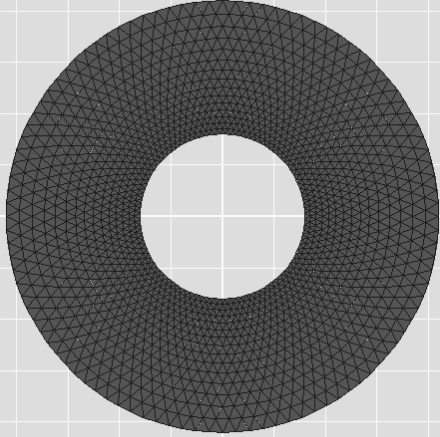
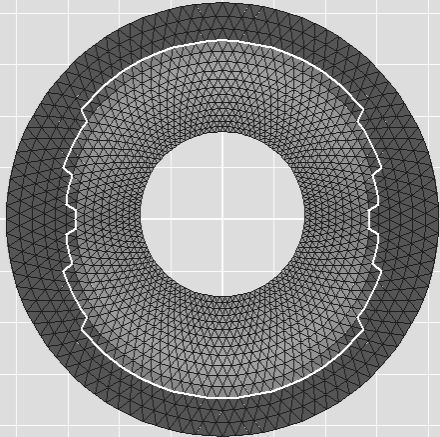
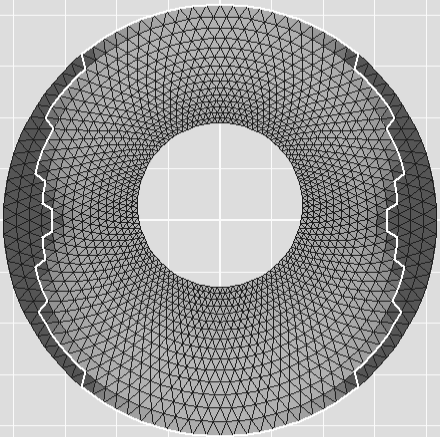
Zustand	Darstellung	Beschreibung
Unbelasteter Zustand $s_x = 0,0 \text{ mm} ; F_s = 0,0 \text{ N}$		<p>Der Sauggreifer befindet sich im unbelasteten Zustand. Alle Knotenpunkte der anliegenden Fläche des Sauggreifers befinden sich im Haftreibungszustand. Alle Knotenpunkte des elastischen Bereiches sind in ihrer Ausgangsposition.</p>
Betriebszustand $s_x = 0,5 \text{ mm} ; F_s = 18,2 \text{ N}$		<p>Ein Teil der Knotenpunkte gehen vom Haft- in den Gleitreibungszustand über und erfahren eine Verschiebung. Die hellgraue Linie markiert hierbei die Schlupfgrenze. Alle Knoten außerhalb dieser Grenze befinden sich noch im Haftreibungszustand und erfahren keine Verschiebung. Die Schlupfgrenze befindet sich vollständig innerhalb der Außenkontur des Sauggreifers. Der Sauggreifer befindet sich im Betriebszustand.</p>
Betriebsgrenze $s_x = 2,0 \text{ mm} ; F_s = 43,6 \text{ N}$		<p>Die Schlupfgrenze erreicht die Außenkontur des Sauggreifers, durchbricht sie jedoch noch nicht. Die auf der Außenkontur liegenden Knotenpunkte erfahren daher noch keine Verschiebung. Der Sauggreifer hat damit die Betriebsgrenze erreicht, befindet aber noch im Betriebszustand.</p>

Abbildung 6-11: Scherlastsimulation an einem Sauggreifer mit dem Zugweg $s_z = 0,0 \text{ mm}$

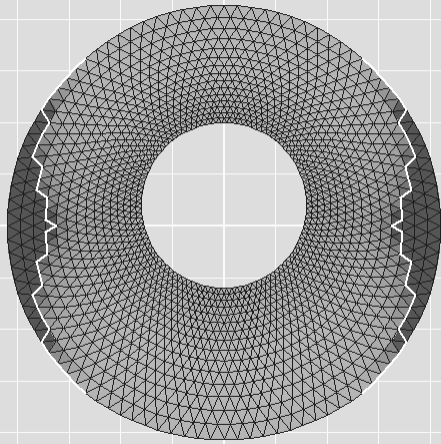
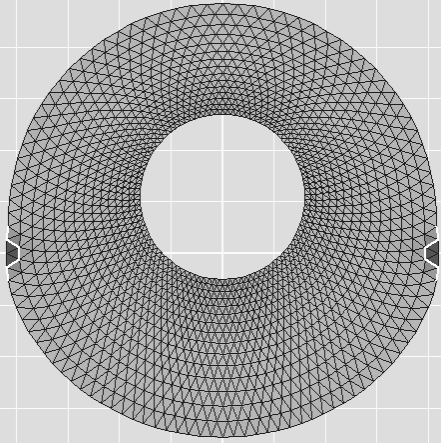
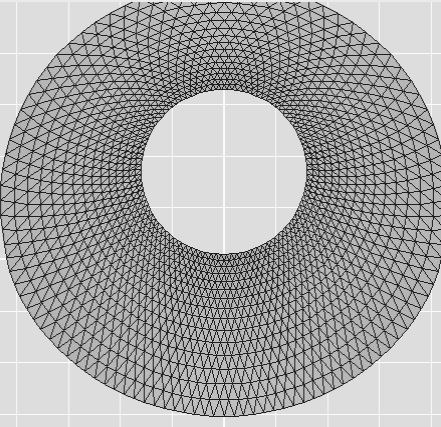
Zustand	Darstellung	Beschreibung
Kritischer Zustand $s_x = 3,0 \text{ mm}$; $F_s = 49,1 \text{ N}$		<p>Die Schlupfgrenze durchbricht die Außenkontur der Dichtlippe. Ein Teil der auf der Dichtlippe liegenden Knotenpunkte erfährt dadurch eine Verschiebung. Hierbei können die in Abschnitt 3.3.2 beschriebenen Phänomene zum Versagen des Sauggreifers führen. Der Sauggreifer tritt damit in den kritischen Zustand ein.</p>
Überlastgrenze $s_x = 8,5 \text{ mm}$; $F_s = 60,7 \text{ N}$		<p>Die Schlupfgrenze schneidet lediglich noch die Ränder der Außenkontur des Sauggreifers. Bis auf zwei Knotenpunkte befindet sich der gesamte anliegende elastische Bereich des Sauggreifers im Gleitzustand. Der Sauggreifer hat damit die Überlastgrenze erreicht, befindet sich jedoch noch im kritischen Zustand.</p>
Überlastzustand $s_x = 9,0 \text{ mm}$; $F_s = 60,5 \text{ N}$		<p>Die Schlupfgrenze befindet sich vollständig außerhalb der Außenkontur des Sauggreifers. Alle anliegenden Knotenpunkte des Sauggreifers befinden sich im Gleitreibungszustand. Der Sauggreifer befindet sich im Überlastzustand und rutscht ab.</p>

Abbildung 6-12: Scherlastsimulation an einem Sauggreifer mit dem Zugweg $s_z = 0,0 \text{ mm}$

6.8 Verifikation im Versuch

6.8.1 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Scherkraftversuche am ausgewählten Sauggreifer des Typs SG40SI der Firma Sommer Automatic sollen die Ergebnisse der oben durchgeführten Simulation bestätigen. Hierzu wird die rechte in Abbildung 6-10 dargestellte Versuchseinrichtung verwendet.

Ein an dem Rahmen fixierter Sauggreifer wird an ein senkrecht stehendes Sicherheitsglas ange-
setzt, das seinerseits über eine von einem Motor getriebene Vorrichtung in vertikaler Richtung
verschoben werden kann. Nach Überführung in den angesaugten Gleichgewichtszustand wird
über das horizontale Gewinde der jeweilige Zugweg s_z eingestellt. Die Versuche wurden für
alle Zugwege zwischen 0 und 5 mm in diskreten Abständen von 1 mm durchgeführt. Eine
Messeinrichtung protokolliert die während des Zugversuches auftretende Scherkraft F_s in
Abhängigkeit des in Scherrichtung zurückgelegten Weges s_x . Für jeden Zugweg s_z wurde der
Scherkraftversuch sechsmal hintereinander unter gleichen Bedingungen durchgeführt.

6.8.2 Interpretation der Ergebnisse

Der Verlauf der Scherkraft auf den Adapter des Sauggreifers in Abhängigkeit des Weges für
einen Zugweg von $s_z = 0$ ist in Abbildung 6-13 zu sehen. Jede Linie repräsentiert einen der
sechs Versuche dieser Versuchsreihe. Der mit Punkten dargestellte Verlauf repräsentiert das mit
den Versuchsparametern korrespondierende Simulationsergebnis.

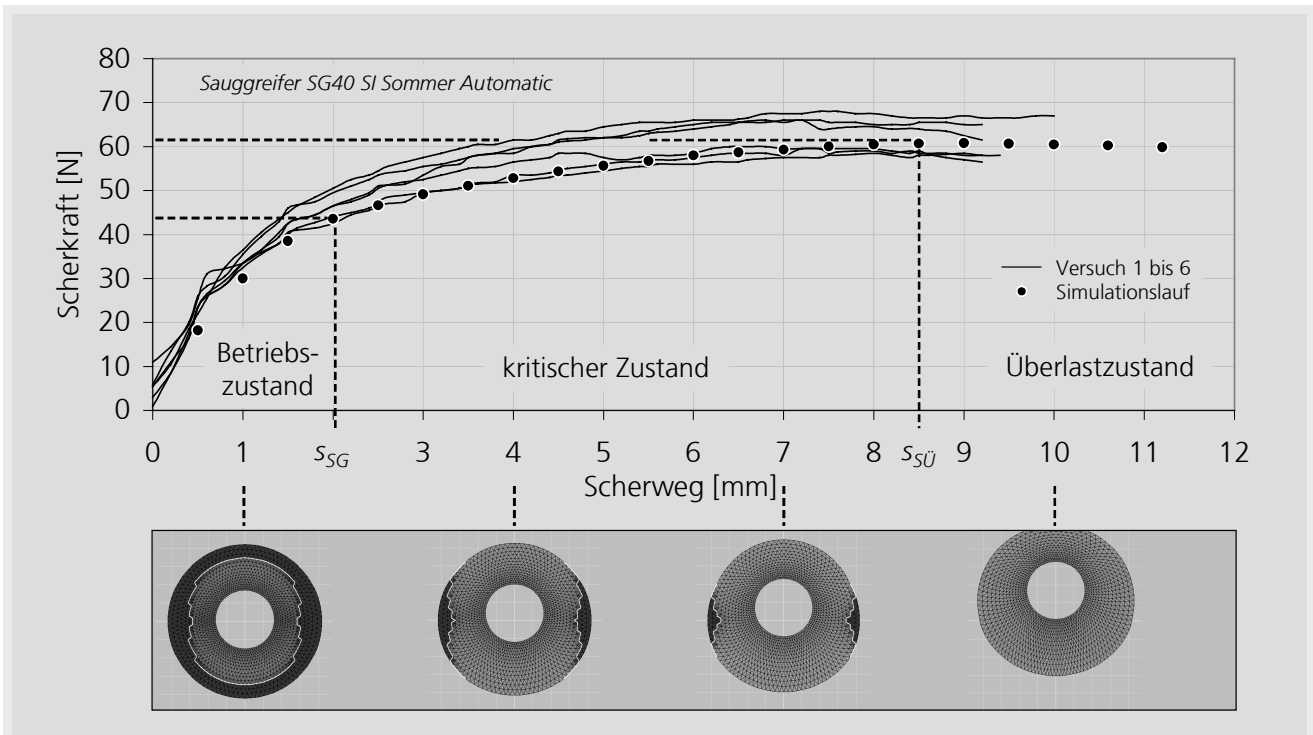


Abbildung 6-13: Versuchs- und Simulationsergebnisse des Scherkraftverlaufs über den Scherweg

Das Diagramm zeigt, dass die größte Steigung der Kraft unmittelbar nach Versuchsstart auftritt und von dort an stetig abfällt. Nach einem spezifischen Scherweg hat die Kraft einen maximalen Wert erreicht, von dem aus die Kraft für größere Scherwege leicht abfällt und sich einem konstanten Wert annähert. Das Maximum des Kraftverlaufs entspricht der Überlastgrenze und kann als charakteristische Größe für das Scherverhalten eines Sauggreifers direkt aus dem Diagramm ermittelt werden.

Die an der Überlastgrenze herrschende Scherkraft $F_{ÜG}$ und der dabei zurückgelegte Scherweg $s_{ÜG}$ für verschiedene Zugwege ist in Abbildung 6-14 dargestellt. Die Abbildung zeigt die Übereinstimmung der experimentell ermittelten Werte mit den Ergebnissen der Simulation. Sowohl Scherkraft als auch Scherweg weisen ein Maximum bei dem Zugweg $s_z = 2\text{ mm}$ auf. Durch die Steigerung des Zugweges erhöht sich durch Volumenvergrößerung der Unterdruck im Sauggreiferinneren, was letztendlich eine Steigerung der Flächenpressung und damit der Reibungskraft des Sauggreifers bewirkt. Gleichzeitig verringert sich jedoch die anliegende Fläche, was die durch alle anliegenden Knoten übertragbare Reibungskraft des Sauggreifers verringert. Bis zu dem Maximum beider Kurven dominiert der Einfluss der sich erhöhenden Flächenpressung, danach dominiert der Einfluss der sich verringern den anliegenden Fläche.

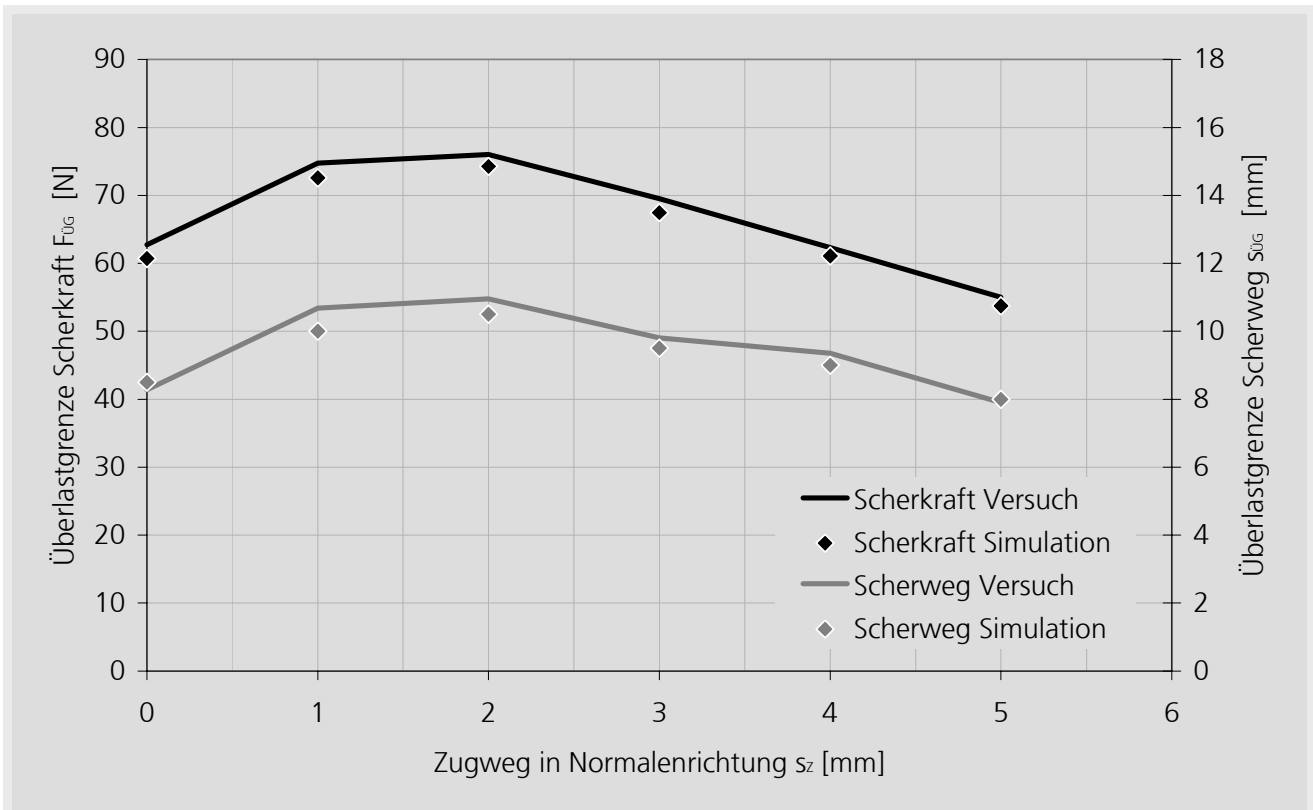


Abbildung 6-14: Ermittlung der Überlastgrenze durch Versuche und Vergleich mit den Ergebnissen der Simulation

Die für die Auslegung eines Sauggreifers wichtige Größe ist die bis zur Betriebsgrenze aufnehmbare Scherkraft F_{SG} sowie der dabei zurückgelegte Scherweg s_{SG} in Abhängigkeit des Zugweges.

Abbildung 6-15 zeigt das Verhältnis zwischen der Betriebsgrenze und der Überlastgrenze von Scherkraft sowie Scherweg in Abhängigkeit des Zugweges s_z für den ausgewählten Sauggreifer. Nach Ermittlung der Scherkraft und des Scherweges an der Überlastgrenze können über dieses Verhältnis die Werte für die Betriebsgrenze ermittelt werden. Die Abbildung zeigt, dass die Verhältnisse des Schlupfweges und der Schlupfkraft nahezu unabhängig vom Zugweg s_z sind.

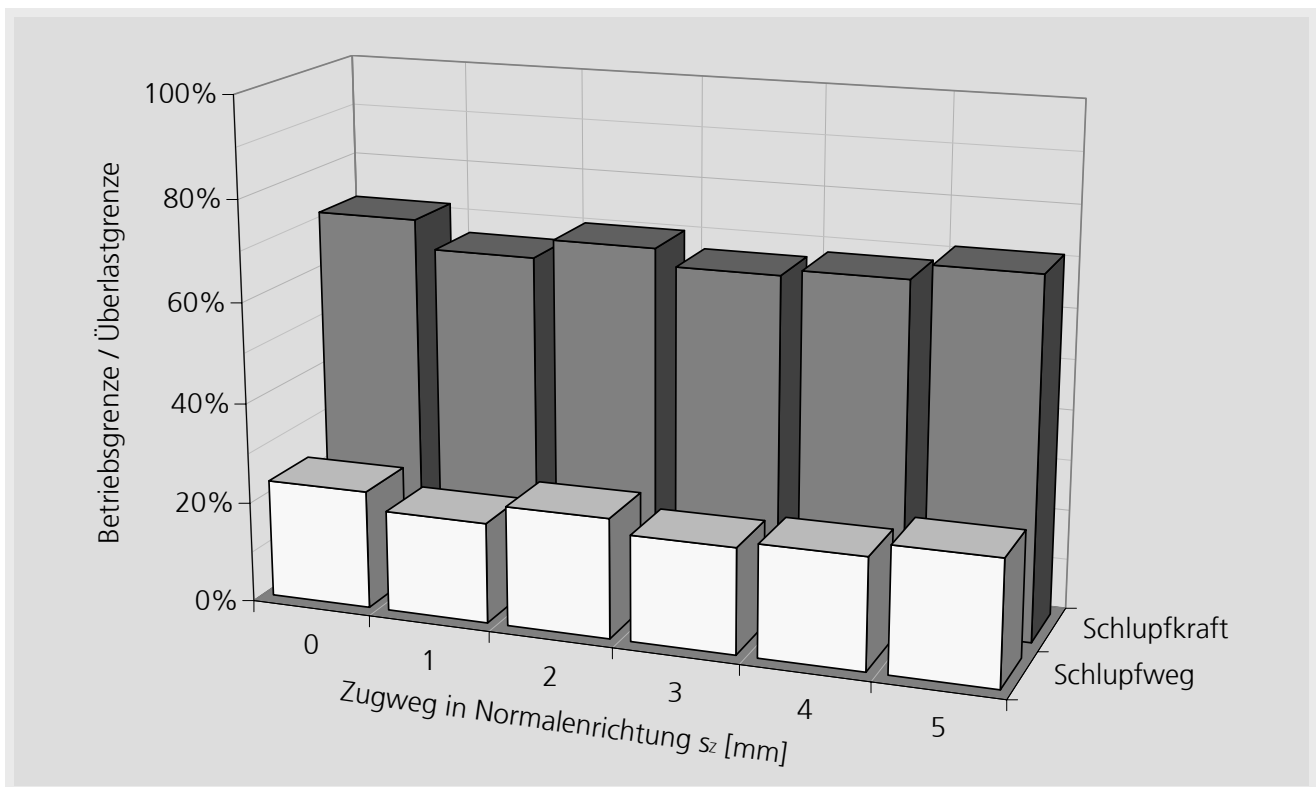


Abbildung 6-15: Verhältnis der Schlupfkraft und des Schlupfweges zwischen der Betriebsgrenze und der Überlastgrenze

6.9 Folgerungen

Auf Basis der durchgeführten Versuche an dem exemplarisch ausgewählten Sauggreifer konnten die in den vorangegangenen Abschnitten aufgestellten Hypothesen zum Verhalten eines Sauggreifers bei Einwirkung von Scherkraft verifiziert werden. In diesem Zusammenhang bildet das hergeleitete zweidimensionale Reibungsmodell mit dem erstmals eingeführten Normalendehnungsparameter die realen Bedingungen hinreichend genau nach.

Diese Grundlagen stehen damit in der Praxis für die Auslegung von Sauggreifern für Kletterroboter unter variierenden Anforderungen bezüglich ihrer aufnehmbaren Scherkraft und des unter definierten Lasten zurückgelegten Scherweges zur Verfügung.

7 Realisierung und Erprobung einer Gesamtsystemvariante

Zur Verifizierung des aufgestellten Modells und der Funktionsweise eines auf dem Prinzip der Raupe mit passiv betriebenen Sauggreifern basierenden Klettersystems wurde das ein Kletterroboter in der Variante des „RACCOON“ als Gesamtsystem aufgebaut und erprobt. „RACCOON“ besteht aus dem konzipierten Klettersystem, einer Steuer- und Energieeinheit und einem Reinigungssystem.

7.1 Aufbau des Gesamtsystems

Das Gesamtsystem besteht aus einem Aluminium-Außenrahmen, in dessen Mitte die Raupe um ihre Hochachse über einen Elektromotor drehbar angeordnet ist. Am Außenrahmen befindet sich der Energiespeicher in Form von Akkumulatoren, das für eine Richtungsänderung notwendige Umsetzsystem, das Reinigungssystem sowie die Steuerungseinheit in Form eines Mikrocontrollers.

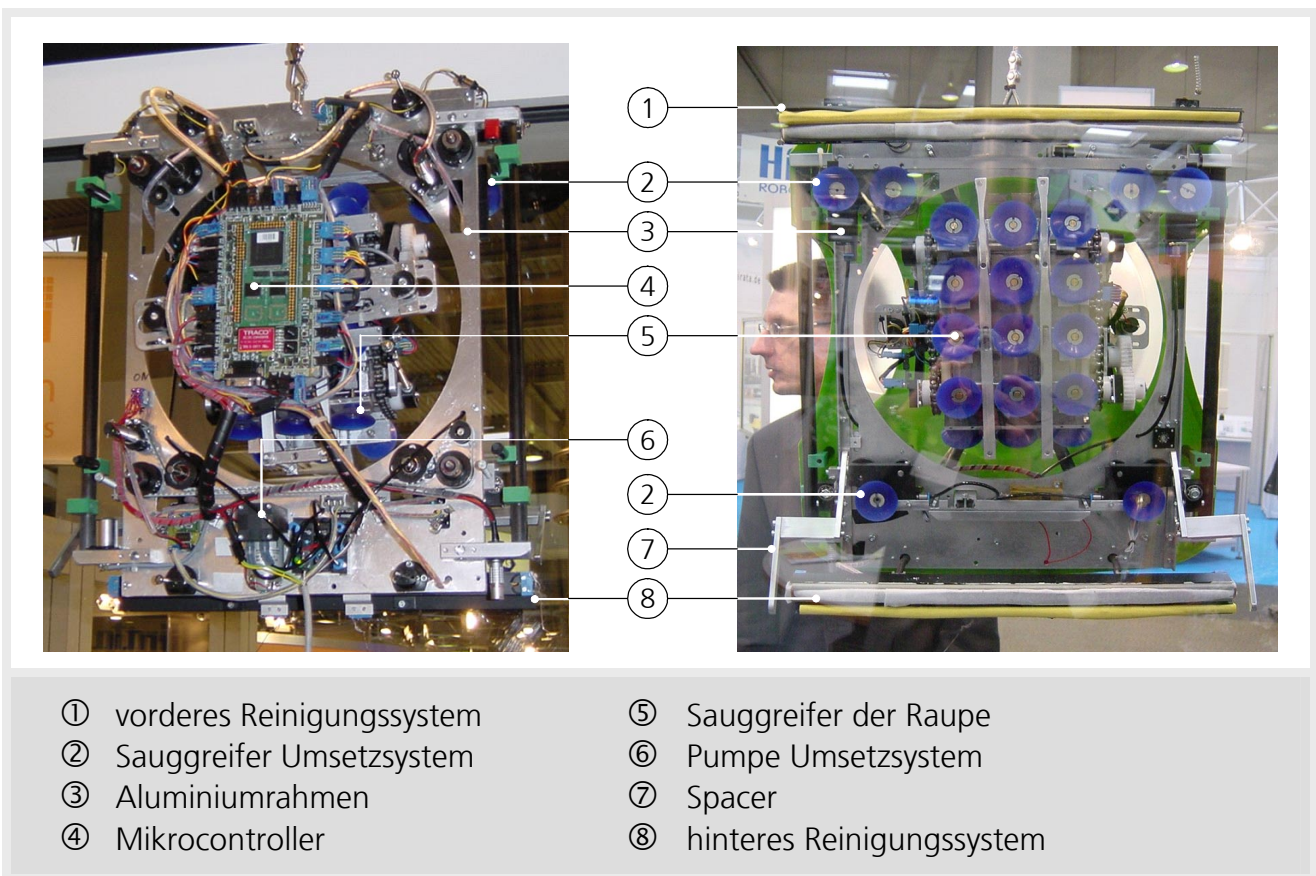


Abbildung 7-1: Draufsicht und Rückansicht des Gesamtsystems

Das Reinigungssystem besteht aus zwei jeweils vorne und hinten am Außenrahmen installierten Reinigungsmodulen. Jedes dieser beiden Module besteht aus einem feuchten, wechselbaren Tuch zum Anlösen des Schmutzes sowie aus einem trockenen Mikrofasertuch zur Aufnahme der Feuchtigkeit und des angelösten Schmutzes. In Abbildung 7-2 sind die geometrischen Hauptmaße des Roboters zusammengefasst.

Eckdaten des Gesamtsystems	Wert	
Länge	440	[mm]
Breite	420	[mm]
Höhe	160	[mm]
Gesamtgewicht	6,3	[kg]
Fahrgeschwindigkeit des Vortriebssystems	17	[mm/s]
Achsabstand der Kettenblätter	105	[mm]
Abstand der Saugmodule	50	[mm]
Anzahl der Sauggreiferspalten	3	-
Maximal im Haftzustand befindliche Sauggreifer pro Spalte	3	-
Minimal im Haftzustand befindliche Sauggreifer pro Spalte	2	-

Abbildung 7-2: Geometrische Eckdaten des Gesamtsystems

7.1.1 Aufbau des Vortriebssystems

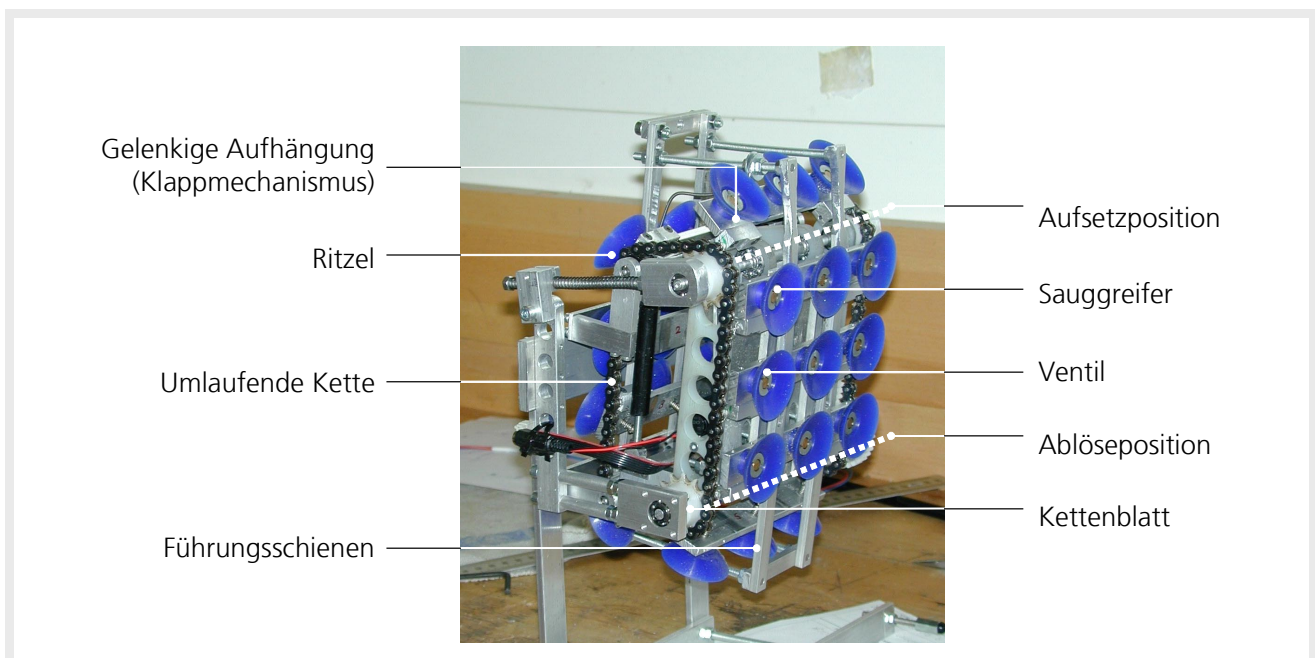


Abbildung 7-3: Ansicht der Raupe

Das Vortriebssystem besteht aus einem elektrischen Antriebsmotor, zwei parallel angeordneten, umlaufenden Ketten und neun daran befestigten Haltemodulen. Die beiden Ketten werden über jeweils zwei Kettenblätter und zwei Ritzel geführt und über einen gemeinsamen Elektromotor angetrieben. Jedes Haltemodul enthält drei passiv betriebene Sauggreifer, welche über jeweils ein integriertes Ventil an der Ablöseposition belüftet werden können. Die Haltemodule werden zwischen Aufsetzposition auf die Oberfläche und Ablöseposition über ein Führungsschienensystem in der für den Bewegungsablauf notwendigen Orientierung gehalten.

Ein vollständiges Aufsetzen eines Haltemoduls erfolgt direkt unter der Achse des vorderen Kettenblattes. Das Ablösen eines Haltemoduls erfolgt direkt unter der Achse des hinteren Kettenblattes. Unter Berücksichtigung des Achsabstandes der Kettenblätter und des Abstandes

der Haltemodule voneinander ergibt sich hierbei, abhängig von der Position der Haltemodule, eine maximale Anzahl von drei bzw. eine minimale Anzahl von zwei im Haftzustand befindlichen Sauggreifern pro Sauggreiferspalte.

Da die Sauggreifer mit ihrer Unterseite parallel zur Oberfläche an diese angepresst werden müssen, werden die Haltemodule unmittelbar vor dem Aufsetzvorgang in die entsprechende Orientierung gedreht. Hierzu ist jedes Haltemodul gelenkig an den beiden Ketten befestigt. Die Drehung in die notwendige Orientierung erfolgt über Drehfedern in diesen Gelenken. Die Drehung wird durch Auftreffen der Sauggreifer auf die Oberfläche gestoppt. Der Zeitpunkt zum Start dieser Drehbewegung muss so gewählt werden, dass die Grundfläche der Sauggreifer parallel zur Oberfläche auf diese auftrifft.

7.1.2 Aufbau des Haltesystems

Das Haltesystem besteht aus neun Haltemodulen, den Führungsschienen der Haltemodule sowie dem Spacer als Vorrichtung zum Andrücken der vorderen Sauggreifer. Die Führungsschienen und der Spacer sind in Abbildung 7-1 und Abbildung 7-3 dargestellt.

Jedes Haltemodul besteht aus einer Konsole und jeweils drei Sauggreifern. Jeder Sauggreifer wird über einen Flansch, der formschlüssig in der Mittendurchführung des Sauggreifers sitzt, über ein durchgehendes Gewinde unter dem jeweiligen Modul befestigt.

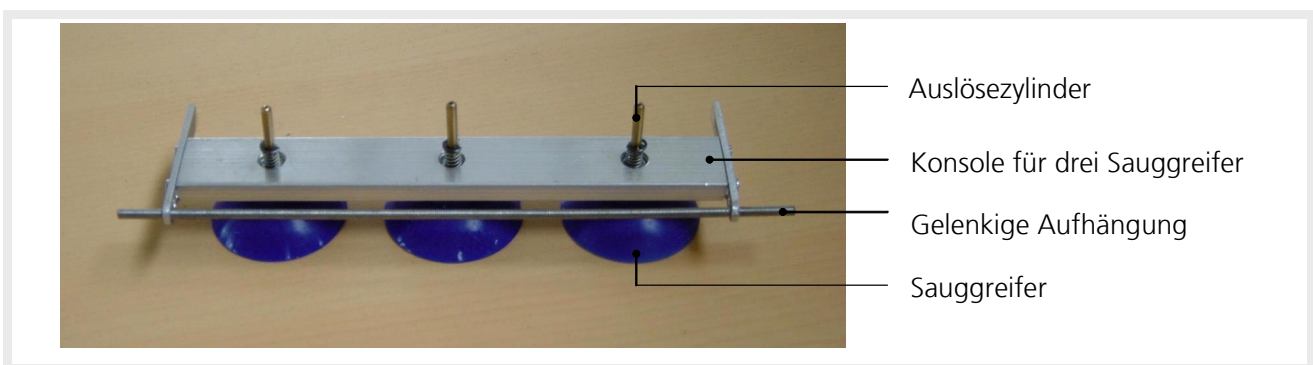


Abbildung 7-4: Ansicht eines Haltemoduls mit drei Sauggreifern

Der Flansch enthält ein mechanisch zu betätigendes Belüftungsventil. Der Auslösemechanismus des Ventils ist ein Hohlzylinder, welcher senkrecht nach oben über das Modul hinausragt. Über eine Feder wird das Ventil im geschlossenen Zustand gehalten. Bei Druck auf den Zylinder löst das Ventil aus und der Sauggreifer wird belüftet.

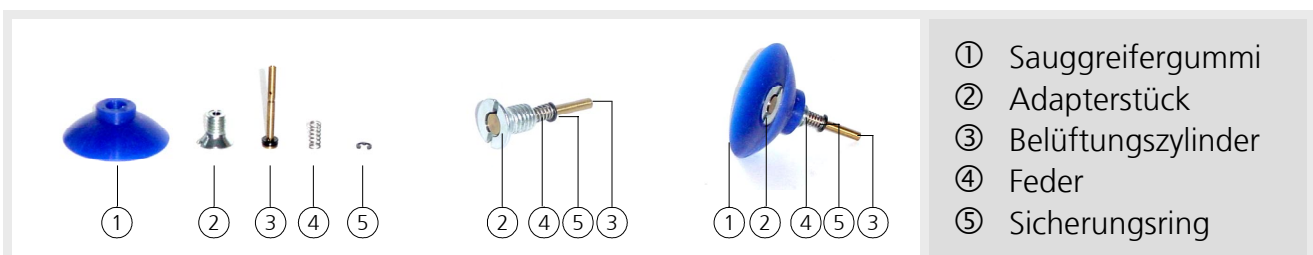


Abbildung 7-5: Aufbau des passiv betriebenen Sauggreifers mit integriertem Ventil

Die Belüftung der Sauggreifer geschieht über eine Belüftungsplatte (siehe Abbildung 7-6). Diese ist nach hinten hin schräg über den im Haftzustand befindlichen Sauggreifern befestigt. Durch Kontakt der Auslösezylinder mit dieser Platte belüften die Ventile die entsprechenden Sauggreifer. Über die Schräge der Platte kann der Belüftungspunkt eingestellt werden (Stellung 1). Im idealen Fall befindet sich der Belüftungspunkt direkt an der hinteren Achse der Raupe.

Für den Umsetzvorgang ist die simultane Belüftung aller auf der Oberfläche im Haftzustand befindlichen Sauggreifer notwendig. Mittels eines Keils, der durch eine elektrisch angetriebene Gewindespindel linear verfahrbar ist, kann die Platte hierzu über den Haltemodulen abgesenkt werden. Dadurch werden die Ventile aller im Haftzustand befindlichen Sauggreifer gleichzeitig betätigt (Stellung 2).

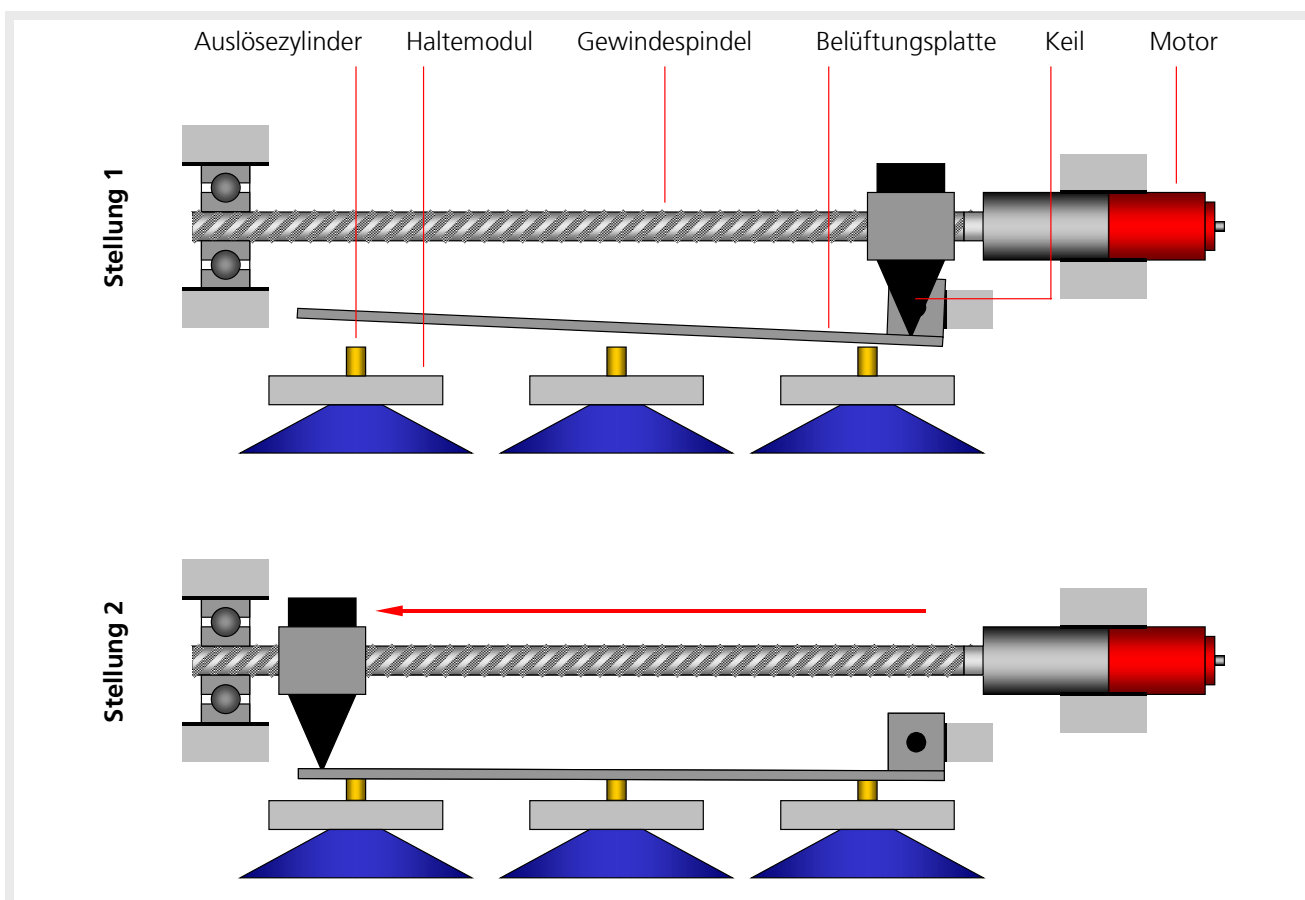


Abbildung 7-6: Prinzip der Belüftung der Sauggreifer durch die Belüftungsplatte

7.1.3 Aufbau des Lenksystems

Das System der Raupe mit passiv betriebenen Sauggreifern in der hier realisierten Form ist ausschließlich für die Geradeausfahrt geeignet. Zur Änderung der Richtung existiert ein Umsetzsystem, mit dessen Hilfe die Raupe von der Oberfläche abgezogen wird, in die neue Orientierung gedreht und erneut an die Oberfläche angesetzt wird.

Die zum Abziehen des Raupe notwendige Belüftung aller passiv betriebener Sauggreifer geschieht wie im vorangegangenen Abschnitt beschrieben (siehe Abbildung 7-6).

Das Umsetzsystem besteht aus sechs über lineare Führungen und zwei Elektromotoren vom Roboterrahmen auf die Oberfläche absenkbarer Sauggreifer, welche mittels einer Vakuumpumpe, vier pneumatischen Ventilen sowie vier Druckwächtern für den gesamten Umsetzvorgang aktiv mit einem konstanten Vakuum versorgt werden. Aufgrund des durch den Masseschwerpunkt des Gesamtsystems verursachten Kippmomentes werden die vorderen Sauggreifer über den gesamten Umsetzvorgang stärker auf Zug belastet als die hinteren Sauggreifer. Aus diesem Grund wurden vorne vier und hinten zwei Sauggreifer angeordnet.

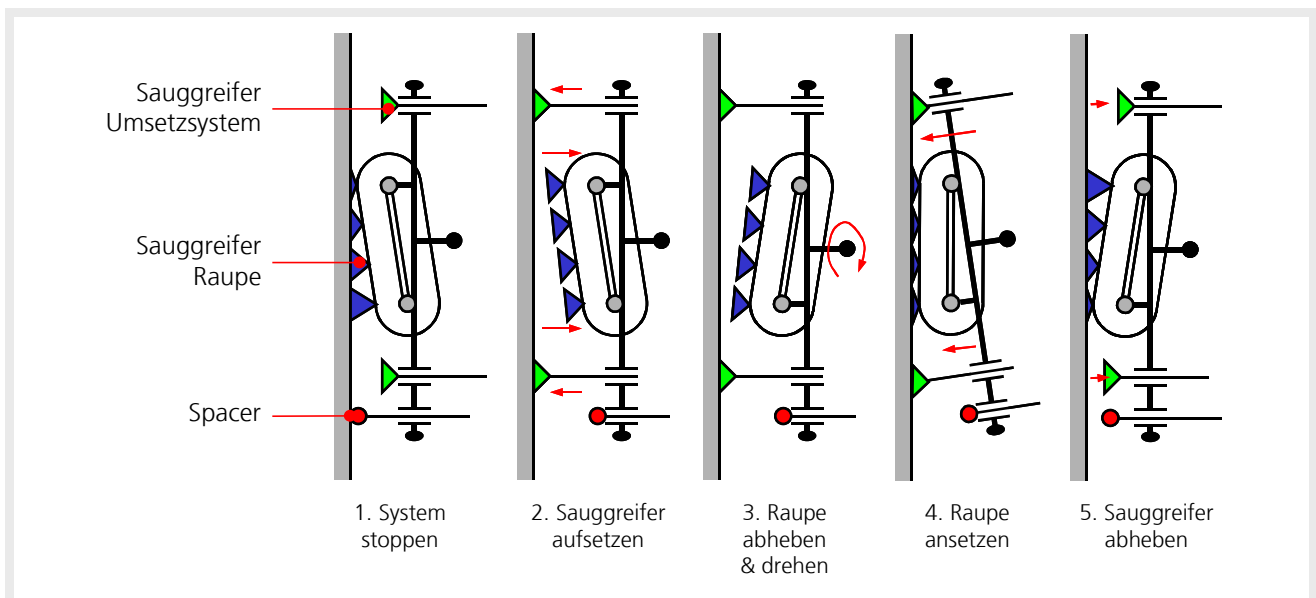


Abbildung 7-7: Ablauf des Umsetzvorganges

Der Umsetzvorgang ist in Abbildung 7-7 dargestellt. Hierfür wird das Gesamtsystem zunächst in seiner Vorwärtsbewegung gestoppt (1), um die aktiv betriebenen Sauggreifer am Außenrahmen vor und hinter der Raupe auf die Oberfläche abzusenken. Der Spacer ist über eine Wippe derart mit den hinteren Sauggreifern gekoppelt, dass dieser sich bei diesem Vorgang von der Oberfläche abhebt. Sobald die Sauggreifer vollständig an die Oberfläche angepresst sind, stoppt der Absenkvorgang, um über die Vakuumpumpe das Vakuum in den Sauggreifern aufzubauen. Bei Erreichen des notwendigen Vakuums werden alle im Haftzustand befindlichen Sauggreifer der Raupe belüftet. Danach wird der Absenkvorgang der aktiv betriebenen Sauggreifer fortgesetzt, wodurch die Raupe vollständig von der Oberfläche abgezogen (2) und in eine neue Orientierung (3) gedreht wird. In dieser neuen Orientierung wird die Raupe durch Anheben der aktiv betriebenen Sauggreifer wieder an die Oberfläche angesetzt (4). Nach dem Ansetzen werden die aktiv betriebenen Sauggreifer belüftet und von der Oberfläche abgezogen (5). Das Gesamtsystem ist in seiner neuen Orientierung fahrbereit.

7.2 Erprobung des Gesamtsystems

7.2.1 Versuchsaufbau

Zur Überprüfung der Übertragbarkeit der in Kapitel 6 entwickelten Berechnungsgrundlagen auf den praktischen Einsatz an einem Kletterroboter wurden Versuche zur Lastaufnahme der Raupe im Betrieb durchgeführt.

Der Versuchsaufbau besteht aus einer senkrecht stehenden Fensterscheibe mit einer Höhe von zwei Metern und einer Breite von einem Meter. Zur Absturzsicherung wird der Roboter in ein Sicherungsseil eingehängt, welches am oberen Ende der Fensterscheibe durch eine dort angebrachte Kabeltrommel aufgewickelt wird. Bei Absturz des Roboters blockiert eine integrierte Fliehkraftkupplung das Abwickeln des Seiles.

Versuchsaufbau	Wert		
Grundgewicht des Raupensystems	m_{Ges}	4,3	[kg]
Lichte Scheibenhöhe	$L_{Scheibe}$	2,0	[m]
Lichte Scheibenbreite	$B_{Scheibe}$	1,0	[m]
Scheibenorientierung	-	vertikal	-
Zugkraft der Kabeltrommel des Sicherungsseils	$F_{Trommel}$	5	[N]

Abbildung 7-8: Eckdaten des Versuchsaufbaus

7.2.2 Durchführung von Fahrversuchen zur Ermittlung der Lastaufnahme der Raupe

Zur Ermittlung der maximalen Lastaufnahme der Raupe wurde diese mit unterschiedlichen Zusatzgewichten behängt und die bis zum Absturz vertikal zurückgelegte Strecke gemessen. Zur Untersuchung des Einflusses der Sauggreiferspaltenanzahl wurden alle Lastversuche mit einer drei- und einer zweiseitigen Raupe durchgeführt.

Die Höhe h_G des Spacers muss hierbei jeweils an das entsprechende Gesamtgewicht der Raupe angepasst werden, um die notwendige Anpresskraft der vorderen Sauggreifer an die Oberfläche aufzubringen. Aus diesem Grund wurden für jedes Zusatzgewicht und jede Spaltenkonfiguration mehrere Fahrversuche mit unterschiedlichen Einstellungen der Spacerhöhe durchgeführt.

Die Eckdaten der durchgeführten Versuche sind in Abbildung 7-9 zusammengefasst.

Versuchsdaten	Wert		
Lastbereich der Zusatzgewichte	$m_{Z-Gewicht}$	0 bis 4	[kg]
Abstufung der Zusatzgewichte	$\Delta m_{Z-Gewicht}$	1	[kg]
Einstellungsbereich der Spacerhöhe	h_G	35 bis 80	[mm]
Abstufung der Einstellungen der Spacerhöhe	Δh_G	5	[mm]
Anzahl Sauggreiferspalten	-	2; 3	-
Anzahl Versuche (pro Gewicht und Spacereinstellung)	-	4	-

Abbildung 7-9: Eckdaten der Versuchsdurchführung

Eine Spacereinstellung mit einem bestimmten Gewicht gilt dann als erfolgreich, wenn jedes aller neun Sauggreifer dreimal über die gesamte Länge der Raupe im Haftzustand war und sich die Raupe anschließend in stabilem Zustand befindet. Bei neun Haltemodulen mit einem Abstand von jeweils 5 cm ergibt sich daraus eine Kletterstrecke von 135 cm. In den Versuchsauswertungen unten wurde eine Fahrt ab einer Kletterstrecke von 140 cm als erfolgreich bewertet.

Jede Konfiguration aus Zusatzgewicht, Spaltenanzahl und Spacereinstellung wurde in vier unmittelbar hintereinander folgenden Versuchsfahrten getestet. Die gemessenen Strecken wurden notiert und der Mittelwert gebildet. Die Ergebnisse für drei bzw. zwei Sauggreiferspalten sind in Abbildung 7-10 bzw. Abbildung 7-11 dargestellt.

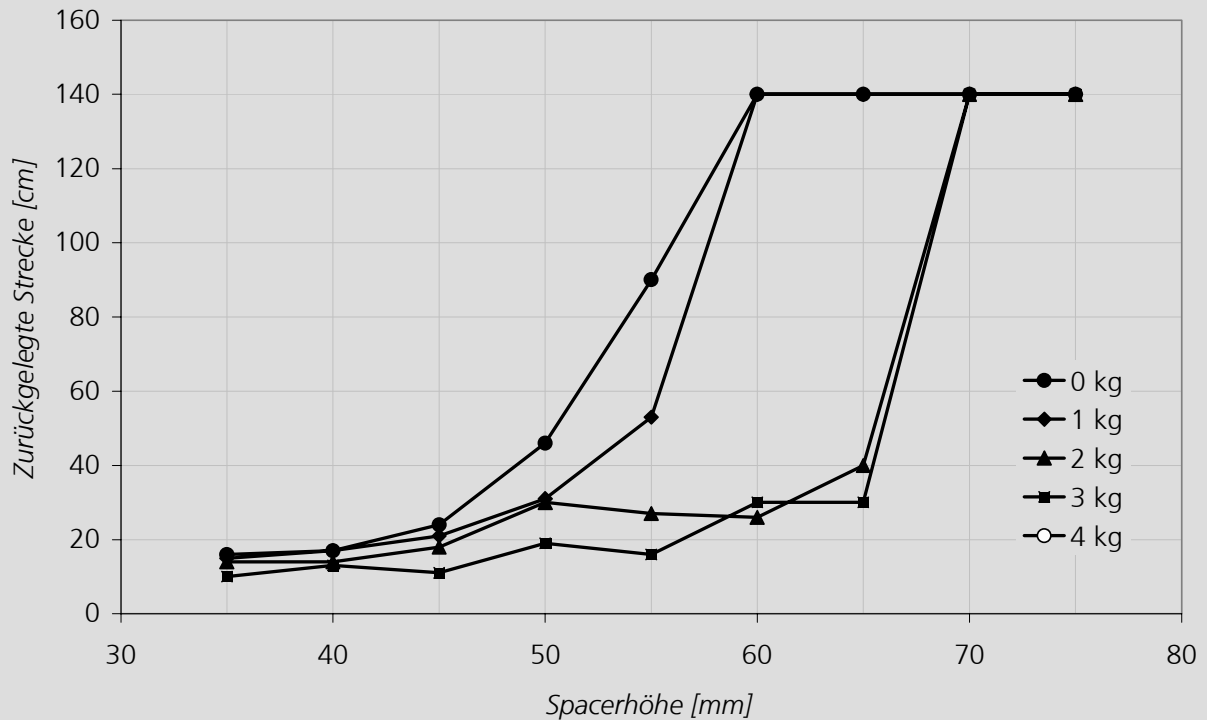


Abbildung 7-10: Ergebnisse der zurückgelegten Kletterstrecken für Lastversuche mit drei Sauggreiferspalten

Bei der dreispaltigen Raupe konnten Zusatzgewichte bis 3 kg angehängt werden. Zusammen mit der Grundlast der Raupe resultiert daraus eine maximale Gesamtlast von 7,4 kg. Ab einem Zusatzgewicht von 4 kg konnte für keine SpacerhöhenEinstellung ein Kletterweg zurückgelegt werden.

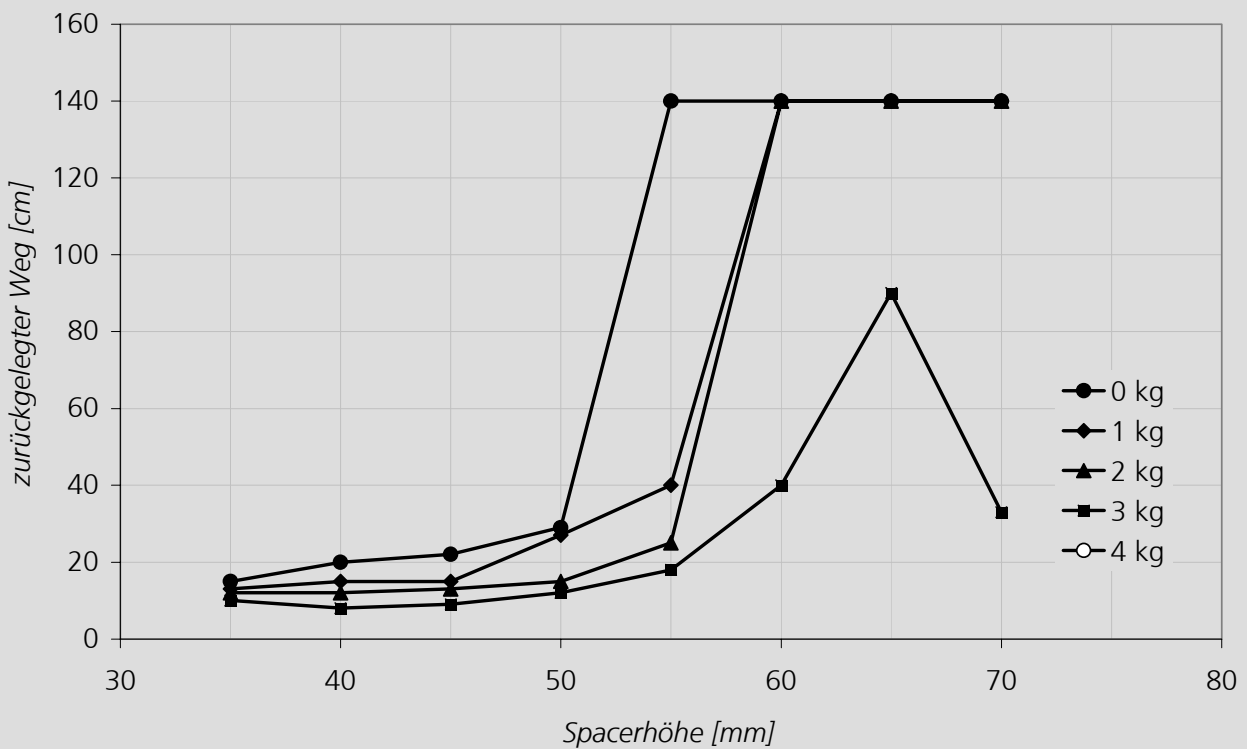


Abbildung 7-11: Ergebnisse der zurückgelegten Kletterstrecken für Lastversuche mit zwei Sauggreiferspalten

Bei der zweispaltigen Raupe konnten Zusatzgewichte bis 2 kg angehängt werden. Zusammen mit der Grundlast der Raupe resultiert daraus eine maximale Gesamtlast von 6,4 kg. Bei dem Zusatzgewicht von 3 kg konnten für alle SpacerhöhenEinstellungen nur begrenzte Kletterwege mit instabiler Fahrt zurückgelegt werden. Ab einem Zusatzgewicht von 4 kg konnte für keine SpacerhöhenEinstellung ein Kletterweg zurückgelegt werden.

In beiden Abbildungen ist zu erkennen, dass die zurückgelegte Kletterstrecke bei einem konstanten Zusatzgewicht von der Spacerhöhe h_G abhängt. Dies bestätigt die in Kapitel 5 beschriebene Hypothese, dass die Anpresskraft auf die vordersten im Haftzustand befindlichen Sauggreifer mit steigendem Gesamtgewicht abnimmt und durch Steigerung der Spacerhöhe wieder erhöht werden kann. Bei einer geringen Spacerhöhe stürzt die Raupe deshalb nach einer endlichen Schrittzahl ab. Die Anzahl dieser Schrittzahl ist wiederum abhängig vom Betrag der Anpresskraft. Dementsprechend steigt die Kletterstrecke bei konstantem Zusatzgewicht mit zunehmender Spacerhöhe und sinkt bei konstanter Spacerhöhe und zunehmendem Zusatzgewicht.

Die Erhöhung der Spacerhöhe h_G bewirkt neben der Erhöhung der Anpresskraft auf die vordersten Sauggreifer auch eine Erhöhung der Zuglast auf die dahinter befindlichen Sauggreifer. Ab einem spezifischen Gesamtgewicht und der dafür erforderlichen Einstellung der Spacerhöhe übersteigt diese Zuglast die Zuglastkapazität der Sauggreifer bei der gegebenen überlagerten Scherlast. Dadurch lösen die Sauggreifer sich frühzeitig von der Oberfläche ab und versetzen die Raupe in einen instabilen Zustand, der gegebenenfalls zum Absturz führt.

Dies ist die Ursache für den Abfall der Kletterstrecke von 90 cm auf 35 cm bei einer Erhöhung der Spacerhöhe von 65 mm auf 70 mm bei der zweispaltigen Raupe mit einem Zusatzgewicht von 3 kg. Weiterhin ist dies die Ursache für die Tatsache, dass ab einem Zusatzgewicht von 4 kg sowohl für die zwei- als auch die dreispaltige Raupe keine Kletterstrecke zurückgelegt werden konnte. Bei einer geringen Spacerhöhe konnte die entsprechende Anpresskraft auf die vordersten Sauggreifer nicht aufgebracht werden. Die SpacerhöhenEinstellung, welche die notwendige Anpresskraft theoretisch erzeugen würde, resultiert hingegen bereits in eine Zuglast auf die hinteren Sauggreifer, welche deren Zuglastkapazität übersteigt.

7.2.3 Erkenntnisse aus den Fahrversuchen auf die Lastaufnahme der Sauggreifer

Die jeweiligen maximal zulässigen Gesamtgewichte für die zwei- und die dreispaltige Raupe ergeben über die jeweils minimale Anzahl der im Haftzustand befindlichen Sauggreifer eine maximal zulässige Scherkraft unter dynamischen Bedingungen auf diese Sauggreifer. Diese maximale Scherkraft wird in Abbildung 7-12 berechnet und im Folgenden mit der in Kapitel 6 berechneten und durch Versuche verifizierten statischen Scherkraft verglichen.

Beschreibung	Einheiten	Versuch	
Anzahl Spalten	-	2	3
Maximales Gesamtgewicht des Kletterroboters	[N]	64	74
Minimal im Haftzustand befindliche Anzahl Sauggreifer	-	4	6
Maximal im Haftzustand befindliche Anzahl Sauggreifer	-	6	9
Minimale Scherkraft auf einen Sauggreifer	[N]	10,7	8,2
Maximale Scherkraft auf einen Sauggreifer	[N]	16,0	12,3
Scherlastkapazität Betriebsgrenze bei $s_n = 5 \text{ mm}$	[N]	53,7	53,7
Scherlastkapazität Überlastgrenze bei $s_n = 5 \text{ mm}$	[N]	38,2	38,2

Abbildung 7-12: Vergleich der Lastwerte der Fahrversuche mit der statischen Lastaufnahme eines Sauggreifers

Mit 38,2 N liegt die aufnehmbare Scherkraft an der Betriebsgrenze um den Faktor 2,39 über der maximal aufgenommenen Scherkraft bei der zweispaltigen Raupe und um den Faktor 3,11 über der maximal aufgenommenen Scherkraft bei der dreispaltigen Raupe. Unter den dynamischen Bedingungen des Klettvorganges bei der hier verwendeten Raupe reagiert ein Sauggreifer demnach zwei- bis dreimal empfindlicher auf Scherlast als unter den statischen Bedingungen eines Scherkraftversuches am einzelnen Sauggreifer.

Zur Analyse dieses Sachverhalts wurde das Verhalten der Sauggreifer während der Fahrversuche beobachtet und dokumentiert. Die zum Absturz führenden Verhalten der Sauggreifer treten vorne an der Aufsetzposition sowie hinten an der Ablöseposition bzw. kurz davor auf. Diese Verhalten konnten wie folgt festgestellt werden:

- Einrollen des Sauggreifergummis über seine Außenkontur durch nicht-paralleles Aufsetzen, durch einen falsch justierten Abklappzeitpunkt des Haltemoduls oder durch langsames Abgleiten des Gesamtsystems an der Oberfläche.
- Zu schwaches Aufsetzen der Sauggreifer an der Aufsetzposition durch falsche Spacerhöhereinstellung.
- Ungleichmäßiges Aufsetzen der am jeweiligen Haltemodul befestigten Sauggreifer durch unexakte Befestigung der Haltemodule oder Schrägstellung der Raupe aufgrund des Ausfalls von im Haftzustand befindlichen Sauggreifern.
- Zu langsame Belüftung der Sauggreifer an der Ablöseposition durch falsche Einstellung des Auslösepunktes der einzelnen Ventile. Eine zu langsame Belüftung bewirkt ein unsanftes Abreißen der Sauggreifer von der Oberfläche durch die hintere Umlenkrolle.
- Ablösen der Sauggreifer vor dem Ablösepunkt durch zu hohe Zuglast auf die Sauggreifer oder falsch eingestellte Auslösepunkte der einzelnen Ventile.
- Abknicken einzelner Sauggreifer durch die Kombination einer hohen Zug- und einer hohen Scherlast. Die Zuglast verformt den Sauggreifer zu einer Trichterform. Bei entsprechender Höhe des Trichters bewirkt eine gleichzeitig wirkende Scherkraft ab einem bestimmten Betrag ein Abknicken dieses Trichters und damit eine sofortige Belüftung des Sauggreifers. Da die Zuglast auf die Sauggreifer im hinteren Bereich der Raupe am größten ist, tritt dieser Effekt vorzüglich an dieser Position auf.

Die aus den Versuchen sich ergebenden prozentualen Häufigkeiten hierzu sind in Abbildung 7-13 dargestellt.

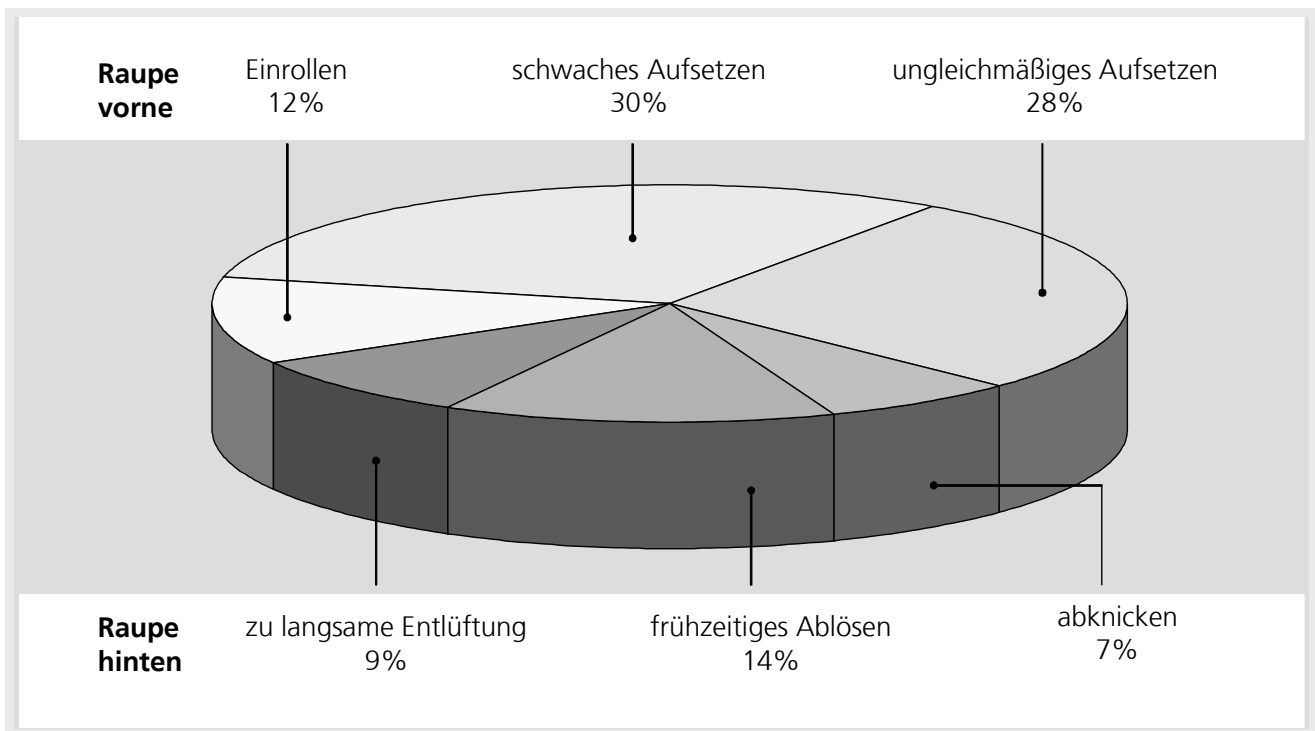


Abbildung 7-13: Prozentuale Häufigkeiten des Fehlerverhaltens der Sauggreifer während der Fahrversuche

Folgende Effekte werden durch das oben beschriebene Fehlerverhalten an der Raupe verursacht:

- Ein frühzeitiges Ablösen einzelner Sauggreifer resultiert in einer Erhöhung der Gesamtlast auf alle übrigen im Haftzustand befindlichen Sauggreifer.
- Ein frühzeitiges Ablösen einzelner Sauggreifer resultiert weiterhin in einer unsymmetrischen Verteilung der Gesamtlast auf die übrigen im Haftzustand befindlichen Sauggreifer.
- Erfolgt das frühzeitige Ablösen durch Abreißen, werden Impulse an das Gesamtsystem übertragen.

Diese Effekte haben wiederum folgende Wirkungen auf den Bewegungsablauf der Raupe:

- Eintritt in einen temporär instabilen Zustand durch erhöhte Belastung der übrigen Sauggreifer und Impulse auf das Gesamtsystem
- Abreißen weiterer Sauggreifer durch Impulse auf das Gesamtsystem.
- Negative Beeinflussung des Andruckvorgangs durch Impulse auf das Gesamtsystem und durch Ausfall einzelner auf Zug belasteter Sauggreifer.
- Beschädigung der Aufhängungen der Haltemodule durch Impulse auf das Gesamtsystem und durch erhöhte Belastung einzelner Sauggreifer
- Kurvenfahrt durch unsymmetrische Lastverteilung der Sauggreifer.

7.3 Folgerungen aus den Versuchen

Die Funktionsfähigkeit sowie das erwartete Verhalten der Raupe mit passiv betriebenen Sauggreifern bei Veränderung der eingeführten Parameter konnte anhand der durchgeführten Versuche nachgewiesen werden. Im Dauerbetrieb konnte eine sehr hohe Zuverlässigkeit des Systems nachgewiesen werden, was auf die niedrige Komplexität des kinematischen Aufbaus der Raupe zurückzuführen ist.

Die Versuche zeigen, dass das zulässige maximale Gesamtgewicht der Raupe um den Faktor 3 unter dem theoretischen Betrag liegt, welcher sich aus der statischen Scherkraftkapazität eines Sauggreifers ergibt. Um das Vortriebssystem der Raupe mit passiv betriebenen Sauggreifern weiter zu optimieren, bieten sich folgende Potenziale:

- Ein unsauberer Aufsetzvorgang der Sauggreifer auf die Oberfläche wird unter anderem durch einen falsch justierten Zeitpunkt zur Drehung des Haltemoduls in die richtige Orientierung verursacht. Das schmale Zeitfenster für den Start der Drehbewegung zum optimalen Aufsetzen des Haltemoduls erschwert diese Justierung und erfordert eine hohe Präzision in der Anfertigung und Aufhängung der Haltemodule. Abhilfe kann hier geschaffen werden durch eine Zwangsführung der Haltemodule während des Aufsetzvorganges. Dies kann beispielsweise durch eine Führung der Haltemodule nach dem Paternosterprinzip erreicht werden. Hierbei wird die Orientierung der Haltemodule durch zwei versetzt nebeneinander angeordnete Führungsketten über dem gesamten Umlauf konstant gehalten.
- Die für die Belüftung eines Sauggreifers auf den Auslösezylinder auszuübende Kraft während des Fahrmodus der Raupe bewirkt eine stetige Abnutzung des Auslösezylinders. Die Abnutzung bewirkt wiederum eine verlangsamte Belüftung und dadurch ein unsanfteres Ablösen des jeweiligen Sauggreifers. Eine Verbesserung wäre hier ein Ventil, dessen Betätigungsmechanismus nicht in Richtung der Kraft der Druckdifferenz wirkt, sondern senkrecht dazu. Dadurch kann die Auslösekraft und damit die Abnutzung auf ein Minimum reduziert werden.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Hochhäuser mit großen Glasflächen und die immer größer werdenden Fensterfronten an Wohnhäusern sind charakteristisch für die gegenwärtige und zukünftige Architektur. Gleichzeitig ist Glas ein schadens- und schmutzempfindliches Material. Die dadurch regelmäßig notwendigen Instandhaltungsmaßnahmen werden heutzutage noch vorwiegend durch den Menschen durchgeführt, obwohl dies insbesondere an den oberen Fassadenbereichen mit einem hohen Sicherheitsrisiko verbunden ist.

Kletterroboter werden in zunehmenden Maße für Routinearbeiten dort eingesetzt, wo es für den Menschen zu gefährlich ist. Für Gebäudedienstleister wird ein Kletterroboter jedoch erst dann interessant, wenn dieser auf einer möglichst großen Anzahl an Gebäuden einsetzbar ist. Potenzial hierfür bieten frei kletternde Roboter, die sich unabhängig von gebäudeseitigen Installationen wie Dachkränen und speziellen notwendigen Kletterstrukturen direkt auf der Glasoberfläche halten und bewegen können.

Das Halten auf der glatten Glasoberfläche bildet hier die kritische Teilfunktion. Das nach dem Stand der Technik unter den Aspekten des technischen Aufwandes, des Energiebedarfes und des finanziellen Aufwandes hierfür am besten geeignete Prinzip sind mit Unterdruck beaufschlagte Sauggreifer. Bestehende frei kletternde Roboter, die sich über dieses Prinzip an der Fassade halten, versorgen ihre Sauggreifer aktiv mit Unterdruck. Für die hierfür notwendige Energie benötigen diese jedoch eine Nabelschnur zu einer Basisstation, welche die Reichweite und die Bewegungskomplexität einschränkt und damit einen vielseitigen Einsatz des Roboters verhindert. Befindet sich der Energiespeicher an Bord des Roboters, resultiert dies in einem erhöhten Gesamtgewicht und schränkt den Einsatz auf Fassaden mit entsprechender Tragfähigkeit ein. Passiv betriebene Sauggreifer hingegen benötigen keine weiteren pneumatischen Komponenten und keine zusätzliche pneumatische Energie. Dies reduziert Gewicht und Komplexität des Kletterroboters und steigert somit seine Einsatzflexibilität und Zuverlässigkeit.

Bisher lagen jedoch weder ausreichende Erfahrungswerte und wissenschaftliche Untersuchungen über das Verhalten passiv betriebener Sauggreifer noch geeignete Klettersysteme für deren Einsatz vor. Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit war daher die Entwicklung von Berechnungsgrundlagen zur Ermittlung des Verhaltens passiv betriebener Sauggreifer unter dem Einfluss der von einem geeigneten Klettersystem ausgehenden Kräfte. Die Basis hierfür bildet eine Untersuchung des Standes der Technik von Kletterrobotern für den Einsatz auf Glasfassaden, von durchgeführten Untersuchungen an Sauggreifern sowie von Fassadenbauweisen.

In der Analyse wurde hierzu ein potenzielles Einsatzszenario für Fassadenkletterroboter definiert, die Teilsysteme des Klettersystems identifiziert sowie die daran bestehenden Anforderungen abgeleitet. Dabei zeigte sich, dass flächig durchzuführende Instandhaltungsaufgaben an durchgehende Glasfassaden (Structural Sealant Glazing) mit innen liegenden tragenden Strukturen die besten Potenziale für die Entwicklung eines vielseitig einsetzbaren Kletterroboters bieten. Unter den hieraus resultierenden Randbedingungen konnte das Raupenprinzip als das hierfür am besten geeignete Vortriebssystem identifiziert werden.

Ausgehend von den Anforderungen der Analyse wurden Konzepte für ein Halte-, Lenk- und Vortriebssystem gebildet, bewertet und ein favorisiertes Gesamtkonzept für ein Klettersystem zur Befahrung durchgehender Glasfassaden ausgewählt. Für die Untersuchung des Verhaltens des kritischen Teilsystems der passiv betriebenen Sauggreifer wurden zunächst die Berechnungsgrundlagen zur Bestimmung der auftretenden Lasten entwickelt und daraus Regeln zur

optimalen Einstellung der geometrischen Systemparameter hinsichtlich der Minimierung dieser Lasten abgeleitet.

Als kritische Last auf die Sauggreifer konnte hierbei die Scherkraft identifiziert werden, welche das Schlupfverhalten der Sauggreifer und damit das elastische Verhalten parallel zur Glasoberfläche sowie das Versagensverhalten bestimmt. Die Kenntnis über das elastische Verhalten ist wichtig für die Steuerung des Kletterroboters auf der Glasoberfläche. Mit Hilfe der Finiten Elemente Methode wurden die theoretischen Grundlagen zur Bestimmung des Zusammenhangs zwischen Scherkraft und Scherweg als Funktion einer simultan in Normalenrichtung zur Oberfläche angreifenden Zugkraft erarbeitet und durch Versuche verifiziert. Es konnte gezeigt werden, dass das zu Grunde gelegte zweidimensionale Reibungsmodell mit dem erstmals eingeführten Normalendehnungsparameter die realen Bedingungen hinreichend genau nachbildet. Die Untersuchungen identifizierten drei Zustandsbereiche, in welchen sich ein unter Scherlast beaufschlagter Sauggreifer befinden kann: Im Betriebsbereich befindet er sich in einem sicheren, an der Oberfläche haftenden Zustand, im Grenzbereich befindet er sich in einem an der Oberfläche haftenden, jedoch versagenskritischen Zustand, im Überlastbereich versagt der Sauggreifer durch Abrutschen. In der Praxis können diese Grundlagen zur Dimensionierung von passiv betriebenen Sauggreifern und damit für die Auslegung von Klettersystemen für die Befahrung von Glasoberflächen herangezogen werden.

Auf Basis dieser Erkenntnisse wurde das Gesamtsystem eines frei kletternden und autonomen Roboters für die Befahrung von Glasfassaden prototypisch aufgebaut und getestet. Die durchgeführten Versuche beinhalteten die Untersuchung sowohl der Funktionsweise des neuen Vortriebssystems auf Basis des Raupenprinzips mit passiv betriebenen Sauggreifern als auch des Verhaltens der im Vortriebssystem integrierten Sauggreifer unter variablen Lasten und Anordnungen im Bewegungszustand und ihrer Interpretation hinsichtlich der erarbeiteten theoretischen Grundlagen. Die Funktionsweise des Vortriebssystems konnte damit nachgewiesen werden. Aus der Interpretation des Verhaltens der Sauggreifer unter Berücksichtigung der erarbeiteten theoretischen Grundlagen zur Auslegung von Sauggreifern konnten wichtige Erkenntnisse zur Optimierung des Vortriebssystems gewonnen werden.

Das Ziel zukünftiger Arbeiten besteht nun in der Umsetzung dieser Optimierungspotenziale und daraus die Entwicklung einer produkttauglichen Variante eines autonomen, frei kletternden Roboters zur Befahrung durchgängiger Glasfassaden. Neben der Auslegung von Klettersystemen können die theoretischen Grundlagen zur Berechnung des Schlupfverhaltens von Sauggreifern als Ausgangspunkt für Verschleißberechnungen dieser hoch beanspruchten Komponente genutzt werden. Darüber hinaus können die erarbeiteten Erkenntnisse über den Zusammenhang zwischen Schlupfverhalten und Scherkraft in der Handhabungstechnik zur exakten Positionierung von mit Sauggreifern gegriffenen Objekten verwendet werden.

9 Summary

Facades of buildings are the structural separation between the interior and the natural environment. In this context the facade is the functional and creative centre of the building construction. In recent years the facade has become a multifunctional item with a critical impact on the functionality of a building. Tall buildings with large and partially continuous glazed surfaces, and the increasing size of window areas of private buildings are characteristic of present and future architecture. This trend has been enabled by elementary developments in the area of glass machining in recent years, enabling new possibilities for glass fastening. For safety reasons, to preserve a proper appearance and to ensure a long life cycle, facades have to be maintained regularly. This is due to their high mechanical sensitivity and their characteristic of being easily soiled. These maintenance procedures consist of inspection and cleanings at defined and constant intervals. Until now, this has been done by human workers.

However, due to overhangs and structurally weak facades, work on outer facades can be a difficult and dangerous job, particularly in the higher areas of buildings. Additionally, weathering and corrosion have maximum impact in these areas. Thus there is a high potential for the deployment of autonomous or remote controlled facade climbing robots. They are usable in almost all weather conditions, manpower can be reduced and it is possible to operate them round the clock. Hence the main application of existing facade climbing robots is facility maintenance. Additionally such climbing systems can be used as mobile advertising and communication media.

But for a facility management provider such a robot only becomes interesting if it is usable across a large number of buildings. In this context free climbing robots are the most appropriate system for an all-purpose deployment as they move directly on the facade surface and do not need roof cranes or other special equipment to attach them to the facade. The majority of existing free climbing robots use suction cups for attachment, which are actively provided with vacuum by an extra vacuum generator.

The problem with actively operated suction cups is the high amount of energy required to generate the vacuum. Compressed air and vacuum respectively are some of the most expensive forms of energy, and above all there is always the question of where to place the energy supply unit. If it is placed on an external base station it is necessary to have a tether running to the robot, which restricts its freedom of movement and its range to the length of the tether. Installing the energy supply unit directly onto the robot means higher load on the facade structures and thus restricts its application to facades with appropriate load bearing dimensions. Particularly in the face of current developments in the area of lightweight facade construction there is a high and steadily increasing demand to minimize the weight of the robot. The ongoing progress in micro technologies is one answer to this demand, leading to an increase in efficiency of many mechanical and electronic components. However, the minimization of the number of components itself, as well as the minimization of the power demand of the components is a basic requirement for the flexible deployment of facade climbing robots.

In this context passively operated suction cups have the advantage that the attaching force is generated simply by mechanically pressing the suction cup onto the surface. Additional components for vacuum generation are therefore not necessary. In the scope of this work it is shown that the weight and the complexity of the robot system can be reduced and thus the flexibility of deployment and the reliability of free climbing robots could be increased by using passively operated suction cups.

However it also came out that the elastic and failure behaviour of actively operated suction cups is generally different from passively operated suction cups. For the dimensioning of the suction cups and the control of the motion of the total system these characteristics must be considered. The state of the art of accomplished investigations on suction cups have been focused only on actively operated suction cups. Furthermore these investigations have not considered elastic behaviour under the strain of a combination of normal force and shear stress, which is characteristic for the strain on suction cups of climbing robots. The focus of this work was the development of a mathematical model for the determination of the elastic and failure behaviour of passively operated suction cups. The pre-condition for this work is a concept of an appropriate climbing system and the development of a mathematical process to calculate the characteristic forces that affect the suction cups.

For this purpose the analysis chapter of this work defines the scenario for a flexible deployable facade climbing robot, the appropriate principles for a climbing system with passively operated suction cups, the appropriate type of suction cups for passive operation as well as the other subsystems of a facade climbing robot. From these definitions the requirements for the total system of a facade climbing robot have been derived.

The state of the art of building construction showed that there are two types of glass facade designs: glass facades with internal supporting structures and glass facades with external supporting structures. As glass facades with internal supporting structures do not have any obstacles on their surface, this facade type could be determined as being most suitable for the development of flexible deployable facade climbing robots. For this development there are four basic climbing principles to consider: the sliding suction cup, the chain track vehicle (caterpillar), the multi legged vehicle and the sliding frame. From the boundary conditions of the scenario of glass facades with internal supporting elements it can be shown that the caterpillar principle is the most appropriate system. For the design of the suction cups analysis indicates that suction cups with a round footprint, single silicon lip and without friction inlay are most suitable for passive operation.

The total system of a climbing robot consists of the subsystems for propulsion, steering, attachment, energy supply, control, the frame and the specific application. The type of application, the type and the dimensions of the energy system, the architecture of the control system and the dimensioning of the frame is a direct result of the requirements of the specific usage intended and of the remaining subsystems. For these subsystems it is possible to use existing state of the art solutions. The subsystems to be considered in this work for the development of a suitable climbing system with passively operated suction cups are the propulsion system, the attachment system and the steering system.

Based on the requirements of this analysis, different concepts for these subsystems have been built, evaluated and a preferred total concept for a climbing system for continuous glass facades with internal supporting structures has been chosen. The chosen system utilises the caterpillar principle for propulsion and an outer frame with six extra actively operated suction cups. For changing the direction of motion these suction cups can be lowered to the climbing surface to "unplug" the caterpillar from the surface, rotate it in another direction and "plug" it back onto the surface. The chosen variant of the caterpillar consists of two chain rings with a certain number of equally distributed suction cups. These cups are simply connected to the chain track in order to enable a parallel movement of the cups while pressing them to the surface one after the other during the robots forward motion.

The attachment system is responsible for producing the force required to press each suction cup to the surface and thus to compensate for the momentum that is caused by the systems self-weight around its rear suction cups. This momentum produces tensile force in the front cups and pressure in the rear cups. So with each step during forward motion up the window

the contact between front cups and surface becomes weaker and weaker until the robot falls off the window. In order to produce suitable pressure at the front suction cups a specific attach system for suction cup suspension has been developed in this work. This suspension has been realized by what has been named a "spacer", consisting of a finger that is mounted below the rear axis of the caterpillar, pointing to the surface. This spacer produces momentum around the lower suction cups and thus compensates for the momentum produced by the caterpillars self-weight.

To calculate the characteristic forces for this climbing system that affect the suction cups the necessary mathematical process has been developed and design rules for the minimization of these forces has been derived. In this context the most important design rule is, within the scope of the boundary conditions, to arrange all necessary suction cups to a minimum number of columns and a maximum number of rows.

Further the shear load has been identified as being the critical load to the suction cups. These forces cause slippage and thus the elastic and failure behavior of the suction cups. The mathematical model for simulating the determination of the coherence between shear forces and slippage drift as a function of the normal force has been worked out on the basis of the finite element method, and has been verified by tests. Therefore a two dimensional friction model has been developed and a new parameter to consider material expansion in the normal direction has been introduced. In an exemplary test series it has been verified that the model reproduces real conditions to an adequate accuracy. The simulations and tests identify three different states that can occur at the suction cup under shear stress: In the *operational state* the suction cup is in a safe condition while being stably fixed to the window. In the *threshold state* the suction cup is still fixed to the window but is in a state of high risk of failure. In the *overload state* the suction cup fails by slipping down the surface. For practical use this basic system can be used for the dimensioning of passively operated suction cups and thus for the dimensioning of climbing robots for glass facades.

On the basis of this knowledge a prototype for a free climbing and autonomous robot for glass facades has been built and tested. The tests have been carried out on the functionality of the new climbing mechanism on the basis of a caterpillar with passively operated suction cups, and of the behaviour of the suction cups with different loads and different patterns of suction cup arrangements. The functionality of the climbing mechanism has been proven. Important knowledge for the optimisation of the climbing mechanism has been obtained from the interpretation of the behaviour of the suction cups during the testing in comparison with the results of the mathematical model.

The goal of future works consists of using the knowledge obtained above for optimisation measures to develop a marketable product variant of a free climbing autonomous robot for glass facades with internal supporting structures. In addition to the dimensioning of climbing systems, the mathematical model for the determination of the shear load behaviour of suction cups can also be used as an initial point for abrasion calculations of this highly stressed component. Further the knowledge gained about the coherence between shear load and slippage drift can be used in the handling technology for the exact positioning of objects gripped by suction cups.

10 Literaturverzeichnis

- Autumn, 1999 Autumn, K.; Sitti, M.; Liang, Y. A.; Peattie, A. M.:
Evidence for van der Waals adhesion in gecko setae.
In: Proceedings of the National Academy of Sciences of the United
States of America 99 (2002) Nr. 19., S. 11993 - 12501
- Arcow, 2003 Arcow: Automated Robot Cleaning Of Windows (2001)
<http://www.cradlerunways.com/Pages/Arcow.html> (30.03.2003)
- AGI, 1993 Arbeitsgemeinschaft Industriebau e.V. (AGI)
AGI Arbeitsblatt W 4 1993-01: Instandhaltung von Fassaden. 1993
- AGI, 2003 Arbeitsgemeinschaft Industriebau e.V. (AGI)
Stahl, Glas und Membranen im Industriebau. Ein Leitfaden für
Architekten, Ingenieure und Unternehmen.
München: Callwey, 2003
- Becker, 1993 Becker, Ralf:
Untersuchungen zum Kraftübertragungsverhalten von Vakuumgreifern.
Dortmund: Verlag Praxiswissen, 1993
Dortmund, Universität, Dissertation, 1993
- Bahr, 1994 Bahr, B.; Yusheng, Y.:
Wall climbing robots for aircraft, ships, nuclear power plants, sky
scrapers, etc.
ISRAM 1994, Proceedings of the 5th International Symposium on
Robotics and Manufacturing, 14.-18. August 1994, Maui, USA /
Jamshidi, Mohammad (Hrsg.). New York : ASME Press, 1994, S. 377-
382
- Baunetz, 2004 Baunetz: Baunetz für Architekten (2004)
<http://www.baunetz.de/baukatalog/> (26. Juli 2004)
- Berns, 1999 Berns, K.; Ilg, W.; Kepplin, V.:
Biologically inspired walking machines.
In: European Journal of Mechanical and Environmental Engineering *
Band 44 (1999) Heft 2, Seite 96-98
- Berns, 2001 Berns, K; Hillenbrand, C.:
In: ISR 2001: Proceedings of the 32nd International Symposium on
Robotics in conjunction with IMS 2001, 1st Intelligent Microsystem
Symposium, April 19-21, 2001, Seoul, Korea.
Seoul, Korea, 2001, Paper-Nr. TA3-2.pdf (CD-ROM)
- Berns, 2003 Berns, K; Hillenbrand, C; Luksch, T:
Climbing robots for commercial applications – a survey.
In: Climbing and Walking Robots - CLAWAR 2003 : Proceedings of the
6th International Conference on Climbing and Walking Robots and the
Support Technologies for Mobile Machines, 17-19 September 2003,
Catania, Italy / Korea Institute of Science and Technology (KIST).
London, UK : Professional Engineering Publishing, 2003

- Bock, 2002a Bock, T; Bulgakow, A; Ashida, S.:
Facade Cleaning Robot for the Skyscraper.
In: 19th International Symposium on Automation and Robotics in
Construction, 23-25 Sept. 2002 Gaithersburg, US. Washington, DC:
2002, S. 229-233
- Bock, 2002b Bock, T; Bulgakow, A; Ashida, S; Hergl, C.:
Roboter zur Fassadenreinigung von Hochhäusern.
In: VDI/VDE-Gesellschaft Meß- und Automatisierungstechnik (GMA)
u.a.: Robotik 2002 : Leistungsstand, Anwendungen, Visionen, Trends.
Tagung Ludwigsburg, 19. und 20. Juni 2002.
Düsseldorf : VDI Verlag, 2002, S. 627-832
(VDI-Berichte 1679)
- Bräuning, 2003 Bräuning, Uwe:
Autonomes Bewegungs- und Reinigungssystem für begrenzte, vertikale
Flächen.
Heimsheim: Jost-Jetter Verlag, 2003
(IPA-IAO Forschung und Praxis 377)
Stuttgart, Univ., Fak. Maschinenbau, 2003
- Brockhaus, 1997 Brockhaus, F. A.
Der Brockhaus, Band 1. Buch Nr. 044891
Leipzig-Mannheim: Brockhaus, 1997
- Brunner, 1998 Brunner, Y; Haas, B. M.:
Unterschiedliche Flachglasarten.
In: Seminar im WS 1998/1999 Baustofflehre 2 „Glaswerkstoffe“
Institut für Baustofflehre, Bauphysik, Technischen Ausbau und
Entwerfen, Universität Stuttgart, Professor Dieter Herrmann
- DIN 13830 Norm DIN EN 13830 2003-11:
Vorhangfassaden – Produktnorm
- DIN 13119 Norm DIN EN 13119 1998-03
Aufbau von Vorhangfassaden
- DIN 1055-1 Norm DIN 1055 Teil 1 2002-06:
Einwirkungen auf Tragwerke -Teil 1: Wichten und Flächenlasten von
Baustoffen, Bauteilen und Lagerstoffen
- DIN 1076 DIN 1076 1999-11
Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen, Überwachung
und Prüfung
- DIN 18056 NORM DIN 18056 1966-06:
Fensterwände - Bemessung und Ausführung
- DIN 1249 NORM DIN 1249 Teil 11: 1986-09
Flachglas im Bauwesen – Glaskanten - Begriff, Kantenformen und
Ausführung
- DIN 572-1 NORM DIN EN 572 Teil 1 1994-11:
Glas im Bauwesen – Basiserzeugnisse aus Kalk-Natronglas – Teil 1:
Definitionen und allgemeine physikalische und mechanische
Eigenschaften

- DIN 572-8 NORM DIN EN 572 Teil 8 2002-02:
Glas im Bauwesen – Basiserzeugnisse aus Kalk-Natronglas – Teil 8:
Liefermaße und Festmaße
- DIN 954 NORM DIN EN 954-1:
Sicherheit von Maschinen - Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen -
Teil 1: Allgemeine Gestaltungsleitsätze;
Deutsche Fassung EN 954-1:1996 (1997-03)
- Doobe, 2003 Doobe, M.; Beyle, H. P.; Giesecke, A.:
Structural Glazing nach allen Regeln der Kunst.
In: Adhäsion – Kleben & Dichten 47 (2003) Nr. 6, S. 16-20
- Dorma, 2002 Dorma: Dorma Produkte (2002)
<http://www.dorma.com/de/Produkte/index.html> (10. Juli 2004)
- Elkmann, 2001 Elkmann, Norbert; Felsch, Torsten; Sack, Mario.:
Sirius: Modular Climbing Robot for Facade Cleaning and other Service
Jobs.
In: FSR 2001 Proceedings : 3rd International Conference on Field and
Service Robotics. June 11-13, 2001, Finland.
Helsinki, 2001, S. 403-407
- Elkmann, 2002 Elkmann, Norbert; Felsch, Torsten; Sack, Mario:
Innovative Service Robot Systems for Facade Cleaning of Difficult-to-
Access Areas.
In: 2002 IEEE/RSJ Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems
EPFL, September 30 - October 4 2002, Lausanne, Switzerland.
Piscataway, NJ: IEEE, 2002, S.756-762
- Fischer, 2004 Artur Fischer GmbH & Co KG:
Fischer Zykon-Plattenanker-Glas FZP-G Kurzinfo.
Waldachtal, 2004 - Firmenschrift
- FH-Aalen, 2002 Fachhochschule Aalen:
MAX V: Fassadenkletterroboter (2002)
<http://141.18.3.35/roboterlabor/kletterroboter.html> (2002)
- Flachglas, 2004 Flachglas Wernberg GmbH
Glashandbuch 2004.
Gelsenkirchen: Copyright Flachglas Markenkreis GmbH, 2004
- Fraunhofer, 1999 DE 198 16 893 A1 (1999-11-04)
Mobiles Robotersystem.
Fraunhofer Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung
Offenlegungsschrift
- Fraunhofer, 2002 DE 101 01 327 A1 (2002-07-25)
Schienengebundene, eigenfortbewegungsfähige Vorrichtung.
Fraunhofer Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung
Offenlegungsschrift
- Fraunhofer, 2003a DE 102 12 964 A1 (2003-10-23)
Kletterroboter für die Bewegung auf einem glatten Untergrund.
Fraunhofer Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung
Offenlegungsschrift

- Fraunhofer, 2003b DE 102 12 965 A1 (2003-10-16)
Kletterroboter für die sichere Bewegung auf einem glatten Untergrund.
Fraunhofer Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung
Offenlegungsschrift
- Fraunhofer, 2003c DE 101 40 990 A1 (2003-03-13)
Halte- und Fortbewegungsmodul für einen Kletterroboter.
Fraunhofer Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung
Offenlegungsschrift
- Getfix, 2003 Getfix:
Facility Management: Mehr Know-How, weniger Kosten (2003)
<http://www.getifix.de/komplett/aufriss/index-knowhow.htm>
(6. Oktober 2004)
- Giesen, 2004 Giesen, J:
EnEV (Energieeinsparverordnung) + DIN 4108 (Wärmeschutz und
Energie-Einsparung in Gebäuden): Einfluss der Normung auf die
Gestaltung der Fassade
In: Innovative Fassaden II, Wechselwirkung Mensch – Fassade, 18. und
19. März 2004, Baden-Baden.
Düsseldorf: VDI-Verlag, 2004, S. 143-165
(VDI-Berichte, 1811)
- Gießler, 2003 Gießler, Albert:
Wirtschaftliche Vakuum-Erzeugung für das rationelle Blechteile-
Handling.
In: Metall, 57 (2003) Nr. 5
- Gobain, 2004 Saint-Gobain: Produktkatalog (2004)
<http://www.saint-gobain-glass.de> (29. Juni 2004)
- Gradetsky, 1991 Gradetsky, V. G.; Rachkov, M. Y.; Uljanov, S. V.; Nandi, G.:
Robots for cleaning and decontamination of building constructions.
In: Fraunhofer IPA:
International Symposium on Automation and Robotics in Construction :
8th International Symposium, 3 - 5 June 1991, Stuttgart.
Stuttgart: 1991, S. 257-266
- Horak, 2002 Horak, M; Novotny, F.:
Numerical Model of Contact Compliant Gripping Element with an
Object of Handling.
In: Proceedings of the 3rd International Carpathian Control Conference
ICCC' 2002, May 27-30, 2002, Malenovice, Czech Republic.
Ostrava, 2002, S. 691-696
- Horak, 2003 Horak, M.; Novotny, F.; Lachman, M.:
Experimental Measurements of thin glass sheet oscillations during
handling for verification of the numerical model.
In: Proceedings of the 4th International Carpathian Control Conference
ICCC' 2003, May 26-29, 2003, Tatranska Lomnica, Slovak Republic.
Kosice, 2003, S. 84-87

- Klein, 1999 Klein, Bernd:
FEM – Grundlagen und Anwendungen der Finite-Elemente-Methode.
3. Auflage
Braunschweig, Wiesbaden: Vieweg, 1999
- Knaak, 1998 Knaak, U., u.a.:
Konstruktiver Glasbau.
Köln: Müller, 1998
- Krieger, 1999 Krieger, J.; Rath, E.; Berthold, G.:
Einsatzmöglichkeiten von Kletterrobotern bei der Bauwerksprüfung
Bremerhaven: Verlag für neue Wissenschaft GmbH, 1999
(Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen – Brücken- und
Ingenieurbau, B26)
- Küffner, 2000 Küffner, P; Lummertzheim, O:
Schäden an Glasfassaden und -dächern.
Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2000
- Liu, 2002 Liu, X.; Hammerle, W.:
Die Entwicklung von Sauggreifern mit Hilfe der Finite-Elemente-
Methode.
In: KGK Kautschuk Gummi Kunststoffe 55 (2002) Nr. 10, S. 529-534
- Liu, 2003 Liu, R; Zong, G; Zhang, H; Li, X:
A cleaning robot for construction out-wall with complicated curve
surface.
In: Climbing and Walking Robots - CLAWAR 2003 : Proceedings of the
6th International Conference on Climbing and Walking Robots and the
Support Technologies for Mobile Machines, 17-19 September 2003,
Catania, Italy / Korea Institute of Science and Technology (KIST).
London, UK : Professional Engineering Publishing, 2003
- Lutz, 1985 Lutz, W:
Lexikon für Reinigungs- und Hygienetechnik.
Dettingen: Lutz, Fachbücher für die Reinigungs- und Hygienetechnik,
1985
- Milberg, 1992 Milberg, Joachim; Götz, Robert:
Sicher greifen mit niedrigem Druck.
SMM Schweizer Maschinenmarkt, 92 (1992) Nr. 7, S. 22-27
- Nishi, 1993 Nishi, A.; Miyagi, H.:
A wall-climbing robot using propulsive force of a propeller (Mechanism
and control in a mild wind).
In: JSME International Journal, Series C 36 (1993) Nr. 3, S. 361-367
- Nishi, 1996 Nishi, A.:
Development of wall-climbing robots.
In: Computers and Electrical Engineering 22 (1996) Nr. 2, S. 123-149
- NRW, 2003 Energieagentur NRW:
Energiekosten und Leckagen: Das Druckluftnetz – ein Energiefresser im
Betrieb.
Duisburg, 2003

- Okna, 2004 Okna Sakhalina: Fassadensysteme (2004)
<http://www.oknasakhalina.dsc.ru/manufac5-3.htm> (18. Oktober 2004)
- Pilkington, 2004 Pilkington: Bauglas (2004)
<http://www.pilkington.com/europe/germany/german/building+products/default.htm> (10. Juli 2004)
- PIAB, 2004 PIAB: Saugnäpfe Produktkatalog
 Friedberg, Jahr - Firmenschrift
- Preiser, 1998 Preiser, C.:
 Natürliches Licht und frische Luft selbst im dreißigsten Stock.
 In: Frankfurter Allgemeine Zeitung (1998) Nr. 190 (18.08.1998), S. T7
- Rachkov, 2002 Rachkov, M; Marques, L; Ameida, A. T. de:
 Climbing Robots for porous and rough surfaces.
 In: Climbing and Walking Robots - CLAWAR 2002: Proceedings of the 5th International Conference 25-27 September, Paris, Frankreich London, UK : Professional Engineering Publishing, 2002, S. 1013-1020
- Radtke, 1992 Radtke, Martin:
 Untersuchungen zur Dimensionierung von Sauggreifern.
 Dresden: Technische Universität Dresden, Diss., 1992
- Sack, 1999 Sack, N.:
 Energiemanagement durch die Gebäudehülle.
 In: Der Rolladen-Jalousiebauer 34 (1999) Nr. 5, S. 64-68
- Schittich, 1998 Schittich, C.; Staib, G.; Balkow, D.:
 Glasbau Atlas.
 Basel u.a.: Birkhäuser, 1998
- Schleth, 2002 Schleth, Andreas:
 Die Berechnung eines „einfachen“ Elastomerbauteils mit ABAQUS.
 In: ABAQUS, 14. deutschsprachiges ABAQUS Anwendertreffen, 23.-24. Sep. 2002, Wiesbaden
 Wiesbaden, 2002, S. 17.1-17.8
- Schmalz, 2000 Schmalz: Gesamtkatalog Ausgabe 2000, Vakuum-Komponenten,
 Vakuum Komplettsysteme
 Glatten, 2000 - Firmenschrift
- Schmalz, 2001 anonym: Fa. Schmalz
 Vakuum verspricht viele Vorteile.
 In: Kunststoffberater 46 (2001) Nr. 10, S. 62-64
- Schmierer, 2001 Schmierer, Gernot:
 Ein modulares Baukastensystem für Kletterroboter nach dem Gleitrahmenprinzip.
 Heimsheim : Jost-Jetter Verlag, 2001
 (IPA-IAO Forschung und Praxis 336).
 Stuttgart, Univ., Fak. Konstruktions- und Fertigungstechnik, Diss. 2001
- Schumann, 1996 Schumann, Frank:
 Bogenübergabevorgänge in Druckmaschinen mittels spezieller Saugvorrichtungen.
 Chemnitz: Techn. Univ. Chemnitz-Zwickau, Diss., 1996

- Schraft, 2002 Schraft, Rolf Dieter; Simons, Florian; Grandi, Gian Piero; u.a.:
Mechanical Design of an Autonomous, Lightweight Robot for Window
Cleaning.
In: 33rd International Symposium on Robotics ISR 2002 / CD-ROM :
Proceedings. October 7-11, 2002, Stockholm, Sweden.
Stockholm, 2002, o. Z.
- Schraft, 2003a Schraft, Rolf Dieter; Simons, Florian; Schäfer, Dieter; u.a.:
Concept of low-cost, window-cleaning robot.
In: Climbing and Walking Robots - CLAWAR 2003 : Proceedings of the
6th International Conference on Climbing and Walking Robots and the
Support Technologies for Mobile Machines, 17-19 September 2003,
Catania, Italy / Korea Institute of Science and Technology (KIST).
London, UK : Professional Engineering Publishing, 2003, S. 785-792
- Schraft, 2003b Schraft, Rolf Dieter; Simons, Florian:
Facade Climbers for Cleaning and Inspection – Potentials for the
development of a unit assembly system.
In: IEEE Robotics and Automation Society u.a.: 1st International
Workshop on Advances in Service Robotics - ASER '03 : Proceedings.
March 13-15, 2003, Bardolino, Italy.
Bardolino, Italien, 2003, S. 46-51
- Schraft, 2003d Schraft, Rolf Dieter; Simons, Florian:
Facade and Window Climbing Robots for Cleaning and Inspection.
In: CLAWAR News (2003), Nr. 11, S. 12-14
- Schraft, 2004 Schraft, Rolf Dieter; Simons, Florian:
Concept of a Miniature Window Cleaning Robot –
Development Potentialities for a Mass Product.
In: International Federation of Robotics:ISR 2004 : 35th International
Symposium on Robotics. Proceedings. March 23-26, 2004, Paris,
France.Paris, Frankreich, 2004, o.Z.
- Seliger, 1994 Seliger, G.; Hsieh L. H.; Müller, H.:
Navigation and control of a mobile climbing robot for shipyards.
In: International Conference on Mechatronics and Robotics,
Proceedings, APS-Mechatronik, 13-15. April 1994, Aachen.
Aachen, 1994, S. 109-120
- Simons, 2002 Simons, Florian:
RACCOON – Autonomer Fensterreinigungsroboter für den Haushalt.
In: Interaktiv (2002) Nr. 3, S. 11-13
- Simons, 2003a Simons, Florian:
Roboter gestütztes Reinigen von Fassaden.
SCOPE (2003), Nr. 3, S. 96-97
- Simons, 2003c Simons, Florian:
Miniaturversion eines Fensterputzroboters.
Interaktiv, (2003) Nr. 3, S.22-24
- Simons, 2004 Simons, F:
Repräsentativerhebung zum Stand der Technik von Kletterrobotern und
deren Einsatzfeldern.
Unveröffentlichte Studie am Fraunhofer IPA. Stuttgart, 2004

- SkyBot, 2003 SkyBot: Fassadenreinigungsroboter (2003)
<http://www.skybot.co.il> (2003)
- SmartRobotics, 2002 SmartRobotics: WinBot (2002)
 WinBot – Ferngesteuerter Fensterreinigungsroboter
<http://www.smartrobotics.co.il> (2002)
- Sommer, 2000 Sommer Automatic GmbH & Co. KG Produktkatalog
 Straubenhardt, 2000 - Firmenschrift
- Techen, 1997 Techen, H:
 Füge-technik für den konstruktiven Glasbau.
 Darmstadt, Techn. Univ. Darmstadt, Institut für Statik, Diss., 1997
- Tete, 2004 Tete-Metall Glastechnik: Klemmhalter (2004)
<http://www.triebenbacher.de/deut/ttmetall/glastechnik.htm>
 (19. Oktober 2004)
- Thele, 2001 Thele, K.H.:
 Entwicklung eines Verfahrens zur Herstellung von Winkelriemchen ohne
 Trägerstein: Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt; gefördert
 unter AZ 16574 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt
 Bad Laer : Klinkerriemchenwerk Feldhaus GmbH & Co KG, 2001
- Tso, 2001 Tso, S.K.; Zhu, J.; Fan, K.L.:
 Development of a Climbing Service Robot using a Chain-Track.
 In: FSR 2001 3rd International Conference on Field and Service Robotics,
 11-13 June 2001, Helsinki, Finland.
 Helsinki, 2001, S. 211-216
- UNIVACS, 2003 UNIVACS Technologies Europe e.L.:
 Reinigungs- und Serviceroboter (2003)
<http://www.univacs.com> (2003)
- VBG 70 VBG 70 Ausgabe 1993-01:
 Bauarbeiten
- Weisse, 2001 Weisse, T.:
 Intelligente und zeitgemäße Höhenzugangsplanung.
 Innovative Fassaden, 7.-8. November 2001, Baden-Baden / VDI-
 Gesellschaft Bautechnik
 Düsseldorf: VDI-Verlag, 2001, S. 203-217 (VDI-Berichte; 1642)
- Westkämper, 2001 Westkämper, E.:
 Mehr Intelligenz in der Maschine.
 In: F & M 109 (2001), Nr. 10, S. 75-77
- White, 2004 White, T. S.; Alexander, R.; Callow, G.; Harris, S.; Sargent, J.:
 A mobile climbing robot for high precision manufacture and inspection
 of aero-structures.
 In: Climbing and Walking Robots - CLAWAR 2003 : Proceedings of the
 6th International Conference on Climbing and Walking Robots and the
 Support Technologies for Mobile Machines, 17-19 September 2003,
 Catania, Italy / Korea Institute of Science and Technology (KIST).
 London, UK : Professional Engineering Publishing, 2003

- Wigginton, 1997 Wigginton, M:
Glas in der Architektur.
Stuttgart: Deutsche Verlags-Anstalt GmbH, 1997
- Wörner, 2001 Wörner, J.-D.; Schneider, J.; Fink, A.:
Glasbau – Grundlagen, Berechnung, Konstruktion.
Berlin u.a.: Springer, 2001
- Xiaofeng, 1997 Xiaofeng, Sheng:
Entwicklung eines Bemessungs- und Sicherheitskonzeptes für den
Glasbau.
Düsseldorf: VDI Verlag 1997
(Fortschrittberichte VDI : Reihe 4, Bauingenieurwesen; 138)
- Yberle, 1998 Yberle, H. J.:
Application of climbing robot RoSy II in the business of building
conservation.
In: Automation and Robotics – Today's Reality in Construction, 15th
International Symposium on Automation and Robotics ISARC, Today's
Reality in Construction, 31.03.-01.04.1998, München.
München, 1998, S. 111-120
- Zadow, 2003 Universität Weimar: Bewertung der Bau und Baunutzungskosten von
Außenwand- und Fassadenkonstruktionen aus Sicht des Facility
Management am Beispiel von Büro- und Verwaltungsgebäuden
[http://www.uni-
weimar.de/architektur/gebaeudetechnik/seiten/betreuun/zadow.pdf](http://www.uni-weimar.de/architektur/gebaeudetechnik/seiten/betreuun/zadow.pdf),
(06. Oktober 2004)

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name	Florian Simons
Geburtstag	08. März 1970
Geburtsort	Stuttgart – Bad Cannstatt
Familienstand	verheiratet

Schulbildung

08.1976 – 07.1980	Grundschule Stuttgart
08.1980 – 05.1990	Königin Katharina Stift Stuttgart Abschluss: Abitur

Zivildienst

08.1990 – 10.1991	Altenpflegeheim Stuttgart-Münster
-------------------	-----------------------------------

Studium

10.1992 – 09.1994	Technische Universität Braunschweig Abschluss: Vordiplom
10.1994 – 03.1999	Technische Hochschule Karlsruhe Abschluss: Hauptdiplom
09.1997 – 06.1998	University of Massachusetts, Amherst Diplomarbeit

Berufstätigkeit

04.1999 – 01.2006	Fraunhofer IPA in Stuttgart Wissenschaftlicher Mitarbeiter
seit 02.2006	Schunk GmbH & Co. KG in Lauffen am Neckar Innovationsmanagement

