

# Beitrag zum flexiblen Greifen in der Demontage

vorgelegt von  
Diplom-Ingenieur  
Alexander Stenzel

Von der Fakultät V – Verkehrs- und Maschinensysteme  
der Technischen Universität Berlin  
zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor der Ingenieurwissenschaften  
- Dr.-Ing. -

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr. Ing. Hans Helmut Pucher

Berichter: Prof. Dr. Ing. Günther Seliger

Berichter: Prof. Dr.-Ing. Klaus Feldmann

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 29.03.2001

Berlin 2001  
D 83

**Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Günther Seliger**

---

**Alexander Stenzel**

# **Beitrag zum flexiblen Greifen in der Demontage**

Produktionstechnisches Zentrum Berlin (PTZ)

 **Fraunhofer**  
Institut  
Produktionsanlagen und  
Konstruktionstechnik

  
Institut für  
Werkzeugmaschinen und  
Fabrikbetrieb  
Technische Universität Berlin

Berlin 2001  
D 83

---

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

**Stenzel, Alexander:**

Beitrag zum flexiblen Greifen in der Demontage / Alexander Stenzel.  
Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb, IWF TU Berlin. - Berlin: IWF TUB, 2001  
(Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin)  
Zugl.: Berlin, Techn. Univ., Diss. 2001  
ISBN 3-8167-5885-1

Für die Dokumentation:

Demontage - Greifen - Greifer - Flexibel - Gewindefurchen - Wirkflächen

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdrucks und der  
Vervielfältigung des Buches oder von Teilen daraus, vorbehalten.

Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Herausgebers in irgendeiner Form (Fotokopie,  
Mikrofilm oder ein anderes Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung, reproduziert, vervielfältigt  
oder verbreitet werden.

© IWF/TU Berlin 2001

Gesamtherstellung: Druckhaus Berlin-Mitte GmbH, Berlin

Printed in Germany

## **Vorwort des Autors**

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb (IWF) der Technischen Universität Berlin im Fachgebiet Montagetechnik und Fabrikbetrieb.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Günther Seliger, dem Leiter des Fachgebietes Montagetechnik und Fabrikbetrieb am IWF, danke ich für die fachliche Betreuung, die konstruktive Kritik und die Ermutigung zur vorliegenden Arbeit.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Feldmann, Inhaber des Lehrstuhls für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik der Universität Erlangen-Nürnberg, danke ich für seine wohlwollende Unterstützung bei der Durchführung dieser Arbeit.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Hans Helmut Pucher, Leiter des Fachgebiets Verbrennungskraftmaschinen am Institut für Maschinenkonstruktion der TU Berlin, danke ich für sein dieser Arbeit entgegengebrachtes Interesse sowie für die Übernahme des Vorsitzes im Promotionsausschuß.

Diese Arbeit entstand in Rahmen des Sonderforschungsbereichs 281 „Demontagefabriken zur Rückgewinnung von Ressourcen in Produkt- und Materialkreisläufen“ der Technischen Universität Berlin. Insbesondere meinen ehemaligen Kollegen und Freunden Dipl.-Ing. Uwe Rebafka und Dipl.-Ing. Waldemar Grudzien gilt mein herzlicher Dank für jahrelange gute und fruchtbare Zusammenarbeit.

Mein Dank gilt ferner allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern im Produktionstechnischen Zentrum Berlin, die durch ihre Hilfsbereitschaft und Unterstützung zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben. Insbesondere Frau Dipl.-Ing Marion Eggenstein und die Herren Dr. Bing-Ran Zuo, Dipl.-Ing. Ingo Lümke und cand.-ing. Andreas Terlunen haben mich tatkräftig unterstützt und zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Ganz besonders danke ich meiner Frau Sylvia Stenzel-Stephan und meinen drei Kindern Philipp, Josephine und Louis, die mir stets den notwendigen Rückhalt gegeben haben und ohne deren Verständnis und Unterstützung die Arbeit nicht möglich gewesen wäre. Ihnen ist diese Arbeit gewidmet.

Berlin, im Mai 2001

Alexander Stenzel

---

**Inhaltsverzeichnis**

<b>0</b>	<b>Verwendete Kurzzeichen.....</b>	<b>3</b>
<b>1</b>	<b>Einleitung.....</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Aufgabenanalyse .....</b>	<b>9</b>
2.1	Begriffe und Grundlagen .....	9
2.1.1	Greifen, Greifer .....	9
2.1.2	Teilsysteme von Greifern.....	10
2.1.3	Wirkflächen .....	13
2.1.4	Physikalische Effekte und Wirkprinzipien.....	13
2.2	Stand der Technik flexible Greifer .....	15
2.3	Randbedingungen der Demontage .....	20
2.4	Auswahl eines Greifprinzips.....	22
2.5	Anwendungsfelder.....	36
2.6	Handlungsbedarf .....	40
<b>3</b>	<b>Modellierung .....</b>	<b>42</b>
3.1	Grundlagen.....	42
3.2	Numerische Modellierung .....	43
3.3	Analytische Modellierung.....	45
3.4	Auswahl der Methode.....	46
3.5	Eindringprozess einer gewindefurchenden Schraube .....	47
3.5.1	Zylinderkoordinatensystem .....	49
3.5.2	Annahmen.....	50
3.5.3	Plastische Zone der Schraubenspitze .....	51
3.5.4	Plastische Zone des Gewindeteils.....	55
3.5.5	Oberes Schrankenverfahren für das Eindringmoment.....	56
3.5.6	Energieänderungen.....	57
3.6	Berechnung des Eindringmoments .....	64
3.7	Berechnung der übertragbaren Normalkräfte.....	65

---

<b>4 Experimentelle Überprüfung .....</b>	<b>67</b>
4.1 Eindringmoment .....	67
4.2 Übertragbare Normalkräfte .....	78
<b>5 Konstruktive Anforderungen und Richtlinien .....</b>	<b>87</b>
<b>6 Anwendungsbeispiele .....</b>	<b>90</b>
6.1 Randbedingungen.....	90
6.2 Auslegung.....	91
6.2.1 Übertragbare Normalkräfte.....	91
6.2.2 Berechnung des Eindringmoments.....	93
6.3 Greifer zum Handhaben von kleinen Kunststoffkomponenten.....	95
6.3.1 Konstruktive Auslegung des Greifers .....	95
6.3.2 Funktionsweise.....	98
6.3.3 Erprobung .....	100
6.4 Greifer zum Handhaben des Schwingsystems einer Waschmaschine.....	101
6.4.1 Konstruktive Auslegung des Greifers .....	101
6.4.2 Funktionsweise.....	106
6.4.3 Erprobung .....	106
<b>7 Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>108</b>
<b>8 Literatur.....</b>	<b>110</b>
<b>9 Anhang .....</b>	<b>119</b>

## 0 Verwendete Kurzzeichen

### Großbuchstaben

Symbole	Einheiten	Beschreibung
$A_Z$	[mm <sup>2</sup> ]	zylinderförmige Abscherfläche
$D$	[mm]	äußerer Durchmesser der Schaftschraube
$D_Z$	[mm]	Durchmesser des abgescherten Materials
$S$	[mm <sup>2</sup> ]	infinitesimale Fläche
$\dot{E}_H$	[J]	Energieänderung durch plastische Verformung an der Schraubenspitze
$\dot{E}_B$	[J]	Energieänderung durch plastische Verformung am Gewindeteil
$\dot{E}_S$	[J]	Energieänderung durch Unstetigkeiten der Geschwindigkeit in der ringförmigen Fläche zwischen Schraubenspitze und Gewindeteil
$\dot{E}_{HO}$	[J]	Energieänderung durch Unstetigkeiten der Geschwindigkeit auf dem äußeren Kegel der Schraubenspitze
$\dot{E}_{BO}$	[J]	Energieänderung durch Unstetigkeiten der Geschwindigkeit auf dem äußeren Zylinder des Gewindeteils
$\dot{E}_{HI}$	[J]	Energieänderung durch Reibung am inneren Kegel der Schraubenspitze
$\dot{E}_{BI}$	[J]	Energieänderung durch Reibung am inneren Zylinder des Gewindeteils
$\dot{E}_{HS}$	[J]	Energieänderung durch Reibung in der Aussparung der Schraube im Bereich der Schraubenspitze
$\dot{E}_{BS}$	[J]	Energieänderung durch Reibung in der Aussparung der Schraube im Bereich des Gewindeteils
$F_N$	[N]	Normalkraft
$\dot{Q}_{in}$	[m/s]	Volumen der eindringenden Schaftschraube
$\dot{Q}_{out}$	[m/s]	Volumen des ausgetragenen Materials
$R_M$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Reißfestigkeit
$S_1, S_2$	[ ]	Sicherheitsbeiwerte
$S_T$	[m <sup>2</sup> ]	Kontaktfläche zwischen dem Werkstück und dem angetriebenen Werkzeug über das Zugbelastungen zugeführt werden
$S_V$	[m <sup>2</sup> ]	Kontaktfläche zwischen dem Werkstück und dem angetriebenen Werkzeug über das die Umformleistung zugeführt wird
$T$	[Nm]	Eindringmoment
$U$	[m/s]	Vertikale Eindringgeschwindigkeit der Schaftschraube
$V$	[m <sup>3</sup> ]	Volumen
$\partial V$	[ ]	Matrix für Umformgeschwindigkeit im kartesischen Koordinatensystem
$\partial W$	[ ]	Matrix für Umformgeschwindigkeit im Zylinderkoordinatensystem

**Kleinbuchstaben**

Symbole	Einheiten	Beschreibung
$b$	[mm]	Koeffizient der Gewindesteigung
$b_s$	[mm]	Spaltbreite des abgescherten Materials
$e_r, e_j, e_z$	[ ]	Einheitsvektoren der Koordinatenachsen in Zylinderkoordinaten
$e_h$	[ ]	Einheitstangentenvektor einer Spirale um einen Kegel
$d$	[mm]	innerer Durchmesser der Schaftschraube
$h$	[mm]	Eindringtiefe
$h_0$	[mm]	Länge der Schraubenspitze
$i_v$	[ ]	Anzahl der variierten Prozesskenngrößen
$j_v$	[ ]	Anzahl der Ausprägungen jeder Prozesskenngröße
$k$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Schubfließspannung
$m_x$	[ ]	Energiekoeffizienten in Bezug auf $\dot{E}_x$ (mit $x = H, B, S, HO, BO, HI, BI, HS, BS$ )
$n_h$	[ ]	Tangentenvektor einer Spirale um einen Kegel
$p$	[mm]	Steigung der Schraube
$v_r, v_j, v_z$	[m/s]	Geschwindigkeitskomponenten im Zylinderkoordinatensystem
$v_x, v_y, v_z$	[m/s]	Geschwindigkeitskomponenten im Kartesischen Koordinatensystem
$u, u_r, u_j, u_z$	[m/s]	Geschwindigkeit der Schaftschraube
$v, v_r, v_j, v_z$	[m/s]	Geschwindigkeit des plastisch verformten Materials
$w, w_r, w_j, w_z$	[m/s]	relative Geschwindigkeit zwischen plastischem Material und der Schaftschraube
$w_h$	[m/s]	relative Geschwindigkeit in tangentialer Richtung der Spirale
$w_R$	[m/s]	relative Geschwindigkeit in radialer Richtung

**Griechische Buchstaben**

Symbole	Einheiten	Beschreibung
$\mathbf{a}$	[°]	innerer Kegelwinkel der Schraubenspitze
$\mathbf{b}$	[°]	äußerer Kegelwinkel der Schraubenspitze
$\dot{\mathbf{e}}_{ij}$	[ ]	Tensor für Umformgeschwindigkeit im kartesischen Koordinatensystem
$\dot{\mathbf{e}}_{ij}$	[ ]	Tensor für Umformgeschwindigkeit im Zylinderkoordinatensystem
$\mathbf{f}$	[ ]	Faktor für Steigung einer Spirale um einen Kegel
$\mathbf{h}$	[°]	aufsteigender Winkel der Spirale um den Zylinder
$\mathbf{h}_H$	[°]	aufsteigender Winkel der Spirale um einen Kegel
$\mathbf{l}_i$	[ ]	Geschwindigkeitskoeffizienten
$\mathbf{q}$	[°]	Kegelwinkel
$\mathbf{r}$	[ ]	Konstante für Geschwindigkeitskoeffizienten
$\sigma$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Schubspannung

**Abkürzungen**

Symbole	Beschreibung
BEM	Boundary-Elemente-Methode
FDM	Finite-Differenzen-Methode
FEM	Finite-Elemente-Methode
IWF	Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb der TU Berlin
KK	Kartesisches Koordinatensystem
MITI	Ministry of International Trade and Industrie
PC	Personal Computer
PE	Polyethylen
PP	Polypropylen
PS	Polystyrol
PTFE	Polytetraflourethylen
Sfb 281	Sonderforschungsbereich 281
ZK	Zylinderkoordinatensystem

## 1 Einleitung

Vor dem Hintergrund der zunehmenden Verknappung natürlicher Ressourcen – wobei die Umwelt gleichermaßen als Rohstofflieferant als auch als Abfallentsorger angesehen wird – und einem ständig wachsenden Umweltbewusstsein kommt neben der umweltgerechten Produktion die umweltgerechte Entsorgung mehr und mehr in den Blickpunkt des industriellen und gesellschaftlichen Interesses.

Die Kreislaufwirtschaft gewinnt aufgrund der Verknappung der Ressourcen aber auch aufgrund der wachsenden Verpflichtungen der Hersteller zunehmend an Bedeutung [KRW94]. Derzeit fehlen größtenteils noch die produktklassenspezifischen Verordnungen, die das am 7. Oktober 1996 in Deutschland in Kraft getretene Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen ergänzen. Diese werden aber in naher Zukunft folgen, um die industrielle Umsetzung der Kreislaufwirtschaft zu forcieren. In einer Studie des Wuppertal Instituts für Klima, Umwelt und Energie mit dem Titel "Zukunftsfähiges Deutschland" werden die Dematerialisierung und die Industrielle Ökologie als Leitgedanken für die zukünftige Ausrichtung der Wirtschaft genannt [LOS96]. Die Studie kommt zu dem Ergebnis, dass die Material- und Energieflüsse, die der Natur entnommen werden, um den Faktor 10 verringert werden müssen und durch Aufbau einer Kreislaufwirtschaft die Integration des Wirtschaftssystems in den Rahmen der natürlichen Kreisläufe gelingen muss. Auch in der Europäischen Union gibt es erste Entwürfe für eine Richtlinie über Abfälle aus elektrischen und elektronischen Geräten, die darauf abzielt, die Entstehung von Abfall zu vermeiden und die Wiederverwendung und Verwertung sowie die umweltschonende Beseitigung zu fördern.

In Japan ist die Verringerung der Ressourcen sowie die beschränkte Aufnahmefähigkeit der Umwelt für Abfälle und Emissionen aufgrund der eingeschränkten nutzbaren Fläche des Landes bereits spürbar. Das MITI in Japan (Ministry of International Trade and Industrie) prognostiziert, dass sich das derzeitige Volumen des Abfallmarktes von 112 Mrd. US\$ bis zum Jahre 2010 auf 277 Mrd. US\$ erhöht. Die Association for Electric Home Appliances (AEHA), in der sich das MITI gemeinsam mit Industriepartnern wie Mitsubishi Electric Corp., Hitachi Ltd., Mitsubishi Materials Corp., Matsushita Electric Industrial Co., Ltd. und Sony Corp. engagiert, hat eine Demontagefabrik mit einem Finanzvolumen von ca. 25 Mio. US\$ errichtet, in der manuelle und automatisierte Demontageprozesse durchgeführt und optimiert werden [PER99]. In den USA werden mit über 350.000 Beschäftigten im Rahmen des Recyclings jährlich mehr als 53 Mrd. US\$ umgesetzt [GUI99, LUN98, EPA97]. Für Europa wird bis 2002 allein für die Recyclingindustrie im Bereich Elektronikschrott eine

Verdreifachung des gegenwärtigen Umsatzes von 144 Mio. US\$ vorhergesagt [UMW96]. Diese Zahlen verdeutlichen die derzeitige und künftige Relevanz der Entsorgung. Diese Umsätze werden vielfach durch manuelle Arbeitskräfte in einem wenig humanen Umfeld und nur bedingt unter den Aspekten einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft erwirtschaftet. Eine wesentliche Voraussetzung für die ökonomische und ökologische Umsetzung der Kreislaufwirtschaft ist die Demontage von Produkten zur Wiederverwendung oder –verwertung und zur Weiterverwendung oder -verwertung [HEN96, VDI2243, FEL93, SEL97, FEL97]. Derzeit verhindern die hohen Kosten für die Demontage, die vor allem aus der großen Vielfalt der Demontageobjekten mit unsicheren Mengen und unbekanntem Eigenschaften resultieren [BOK97, HES98, WAG97, SEL00b], den verstärkten Einsatz dieses Verfahrens. Sowohl bei manuellen als auch bei der automatisierten Demontage kommt es aufgrund der wenig demontagespezifischen Werkzeuge häufig zu Prozessstörungen.

Demontageprozesse können in Anlehnung an die Definition der Montage [VDI2860] in die Hauptfunktionen Trennen [DIN8580] sowie die Nebenfunktionen Handhaben und Kontrollieren unterteilt werden [KAH95]. Kern dieser Arbeit ist die Effizienzsteigerung der Nebenfunktion Handhaben. Die Arbeit beschreibt das Vorgehen zur Entwicklung von flexiblen Demontagegreifern, die bei einem geringen Informationsbedarf eine hohe Flexibilität gegenüber der Geometrie sowie dem Werkstoff des Demontageobjektes aufweisen. Dazu wird der in [WAG97] beschriebene Ansatz zum Erzeugen und Nutzen neuer Wirkflächen verfolgt. Aufgrund der Flexibilität können erhebliche Kostenvorteile erschlossen werden [REC00, SEL00b, STE99c, STE00a].

Im Kapitel zwei werden die in der DIN 8580 beschriebenen Fertigungsverfahren zur Erzeugung und Nutzung von Wirkflächen untersucht, bewertet und ein Greifprinzip ausgewählt. Anwendungsbeispiele für einen flexiblen wirkflächengenerierenden Greifer werden aufgezeigt. Die im dritten Kapitel beschriebene Modellierung des ausgewählten Greifprinzips ermöglicht die Berechnung des handhabbaren Gewichts und des zur Erzeugung der Wirkflächen erforderliche Dreh- bzw. Eindringmoment. Die Gültigkeit der verwendeten und entwickelten Modelle wird in Kapitel vier anhand von experimentellen Untersuchungen verifiziert. Generelle Anforderungen und Konstruktionsrichtlinien für wirkflächenerzeugende, flexible Greifer werden im fünften Kapitel vorgestellt. Auf Grundlage der Modelle und Richtlinien wird ein flexibler Greifer für Kunststoffkomponenten sowie ein Greifer für die Demontage von Schwingsystemen einer Waschmaschine konstruiert und realisiert. Bei der Erprobung in einem hybriden Demontagesystem können die Greifer ihre Flexibilität und Funktionsfähigkeit nachweisen.

## 2 Aufgabenanalyse

### 2.1 Begriffe und Grundlagen

#### 2.1.1 Greifen, Greifer

Für die Funktion Greifen oder den Begriff Greifer existiert keine einheitliche Definition [WAR92]. Das Greifen beschreibt den Prozess zur Herstellung einer festen oder in bestimmten Freiheitsgraden beweglichen Verbindung zwischen einem Bewegungssystem und dem zu bewegenden Bauteil [BTH87]. Nach [CAR81] wird unter Greifen die Grundbewegung verstanden, die ausgeführt werden muss, um mit Fingern oder einer Hand ausreichende Kontrolle über einen Gegenstand zu erhalten. REFA definiert das Bewegungselement Greifen mit dem Schließen der Finger, um einen Arbeitsgegenstand zu fassen [REFA75]. Die Bezeichnung "Greifen" in der Handhabung mit Hilfe einer technischen Einrichtung ist aus dem menschlichen Bewegungsablauf entnommen. Weil Greifeinrichtungen nicht immer zwei Wirkorgane benötigen, da sie auch andere physikalische Effekte ausnutzen, muss die Bezeichnung "Greifen" im technischen Sinne das Herstellen einer Verbindung zwischen einer oder mehreren Wirkflächen des Greifers und des Handhabungsobjektes beinhalten [CAR81]. Analog dazu wird nach [VDI2740] das Greifen im industriellen Handhabungsprozess als das Erfassen des Handhabungsobjektes durch ein oder mehrere Wirkorgane und die Einleitung von Kräften in das zu handhabende Objekt über diese Wirkorgane definiert.

Unter dem Begriff Greifer wird nach [WAR92] das Teilsystem eines Handhabungsgerätes verstanden, das die Kraftübertragung vom Werkstück zum Handhabungsgerät herstellt, um die Position und Orientierung des Werkstückes gegenüber dem Handhabungsgerät zu sichern. Der Greifer hat die Aufgabe, ein Objekt in einer definierten Lage kontrolliert aufzunehmen, zu halten und wieder zu lösen. Das Halten und das Lösen sind nach der VDI 2860 Elementarfunktionen des Sicherns. Dabei ist nach der VDI 2860 das Halten und Lösen wie folgt definiert: Halten ist das vorübergehende Sichern eines Körpers in einer bestimmten Orientierung und Position relativ zu einem Bezugssystem. Lösen ist die Umkehrung des Haltens, also das Aufheben der Sicherungsfunktion. Der Greifer wird durch ein Handhabungsgerät positioniert, orientiert und bewegt [VDI2860].

Von einem Greifer müssen folgende Funktionen erfüllt werden [VDI2740, WAR92]:

- das Ausüben der Kräfte und Momente zum Erfassen des Handhabungsobjekts und zum vorübergehenden Aufrechterhalten einer definierten Zuordnung zwischen Greifer und Handhabungsobjekt,
- das Aufnehmen statischer Kräfte und Momente, die durch das Handhabungsobjekt hervorgerufen werden, z.B. der Gewichtskraft,
- das Aufnehmen dynamischer Kräfte und Momente, die im Zusammenhang mit einer Bewegung auftreten, z.B. Trägheitskräfte und –momente,
- das Aufnehmen äußerer prozessbedingter Kräfte und Momente z.B. Anpress-, Füge- und Bearbeitungskräfte und –momente und
- das Erhalten der Greifkraft bei Energieausfall.

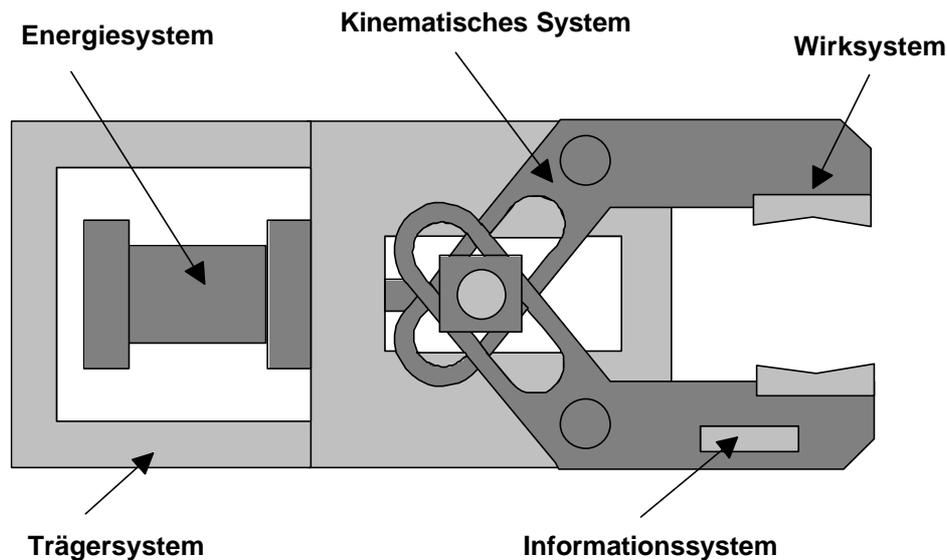
Je nach Anwendungsfall kommen zusätzliche Sonderfunktionen wie:

- Änderung der Position des Werkstücks,
- Änderung der Orientierung des Werkstücks,
- Informationsaufnahme durch Sensoren (Anwesenheitskontrolle und Lageerkennung für Werkstücke, Kraft-, Momenten- und Wegmessung)

### **2.1.2 Teilsysteme von Greifern**

Zum Erfüllen der genannten Funktionen sind verschiedene Komponenten erforderlich, die nach den folgenden Teilsystemen untergliedert werden (Bild 1) [VDI2740, WAR92]:

- Informationssystem,
- Energiesystem,
- Kinematisches System,
- Wirksystem und
- Trägersystem.



**Bild 1:** Teilsysteme eines Greifers in Anlehnung an [VDI2740]

### Informationssystem

Im Informationssystem werden Prozess- und Geometriedaten verarbeitet. Zum Informationssystem gehört neben der Sensorik auch die Steuerung. Diese wird in der Regel vom übergeordneten Handhabungsgerät (z.B. Industrieroboter) ausgeführt. Größe und Aufbau dieses Systems sind im Wesentlichen von der Art und Aufgabe der Sensoren abhängig. Die Sensoren dienen der Überwachung des Prozesses.

### Energiesystem

Das Energiesystem meist in Form eines pneumatischen, elektrischen oder hydraulischen Antriebes dient der Erzeugung der Spannkraft und zur Greifbereichsverstellung. Die Beschaffenheit der Antriebe hängt von der konstruktiven Gestaltung ab.

Pneumatische Antriebe zeichnen sich durch einfache, kleine und kompakte Bauweise aus. Vorteilhaft sind weiterhin die geringen Kosten bei der Anschaffung sowie die Störsicherheit gegen elektrische und magnetische Felder. Nachteilig ist die Geräuschbelästigung durch Abluft. Weiterhin kann die Verfahrgeschwindigkeit in der Regel nicht eingestellt werden.

Elektrische Antriebe besitzen eine sehr gute Regelbarkeit der Bewegungsvorgänge und der Krafterzeugung bei einem guten Wirkungsgrad. Die Antriebe sind geräuscharm und sauber. Allerdings bauen die Geräte zur Übertragung großer Kräfte deutlich größer als Hydrauliksysteme.

Hydraulische Antriebe können große Kräfte bei kleinster Bauweise erzeugen. Diese Antriebe ermöglichen eine stufenlose Einstellung einer gleichförmigen Verfahrgeschwindigkeit über einen großen Stellbereich sowie die Einstellbarkeit der

Greifkräfte über den Weg. Nachteilig ist der relativ hohe Wartungsaufwand zur Verhinderung von Leckagen sowie gesonderte Rückleitungen für den Rückfluss zum Ölbehälter.

### **Kinematisches System**

Im Zusammenhang mit Greifern versteht man unter dem kinematischen System im Wesentlichen die mechanische Grundstruktur, d.h. alle Getriebe-, Übertragungs- und Führungselemente, die benötigt werden, um die Antriebsenergie in die gewünschte Bewegung zu wandeln und in das Wirksystem weiterzuleiten. Wesentliche Merkmale sind die Anzahl und der Aufbau der erforderlichen Übertragungsglieder und die Art der Übertragungsfunktion. Greifer nach den kraftschlüssigen Halteprinzipien durch Unterdruck-, Magnet- oder Molekularkräfte benötigen keine Kinematik, da sie über keine aktiv bewegten Halteelemente verfügen.

### **Wirksystem**

Nach [SPU82] ist das Wirksystem der Teil der Greifeinrichtung, der das Greifobjekt berührt und die Greifkraft überträgt. Es gibt demnach Wirkflächen sowohl am Greifer (Greiffläche, aktive Wirkfläche) als auch am Greifobjekt (Grifffläche, passive Wirkfläche) [CAR81]. Die Wirkflächen des Greifers sind so zu gestalten, dass Position und Orientierung des Handhabungsobjektes gegenüber dem Greifer vorübergehend gesichert werden. Dies kann kraft-, form-, stoffschlüssig oder durch Kombination dieser drei Prinzipien erfolgen.

### **Trägersystem**

Unter dem Trägersystem wird das Teilsystem verstanden, das die Verbindung zwischen dem Greifer und dem Greiferführungsgetriebe, also dem Handhabungsgerät, herstellt. Vielfach werden Greiferwechselsysteme eingesetzt. Dabei wird die Adapterplatte des Wechselsystems mit dem Greifer verbunden. Abhängig von der Häufigkeit kann der Greiferwechsel manuell, nur mit Werkzeug oder automatisch erfolgen.

In Abhängigkeit der Antriebsart des Greifers und der Informationsleitung müssen elektrische, pneumatische oder hydraulische und ggf. auch zusätzliche Informationsleitungen über das Trägersystem dem Greifer zugeführt werden. Bei einem Greiferwechsel muss eine vorübergehende Trennung der Leitungen möglich sein. In der Regel kommen hier am Markt verfügbare Standardsysteme zum Einsatz.

### 2.1.3 Wirkflächen

Greifer benutzen Wirkflächen, um durch physikalische Effekte das Aufnehmen, Halten und Lösen auszuführen. Die Stelle, an der das physikalische Geschehen zur Wirkung kommt, kennzeichnet den Wirkort. Hier wird die Erfüllung der Funktion bei Anwendung des betreffenden physikalischen Effekts durch die Wirkgeometrie, d.h. die Anordnung von Wirkflächen und durch die Wahl von Wirkbewegungen erzwungen. Der Begriff Wirkfläche wird bei RODENACKER [ROD75, ROD91] definiert und im Zusammenhang mit dem "Festlegen des Wirkortes" erläutert. In den Veröffentlichungen von KOLLER [KOL72a, KOL72b] wird die Wirkfläche in folgendem Zusammenhang genannt: Die Gestalt eines Funktionselementes wird im Wesentlichen durch die Form und die Anzahl der Wirkflächen, ihre qualitativen Größenverhältnisse sowie ihre räumliche Zuordnung beschrieben und lässt sich durch Ändern eines dieser Parameter variieren. WIENDAHL [WIE70] gliedert das technische Gebilde für Funktionsbetrachtungen in Gesamt-, Teil- und Elementarfunktionen. Die Elementarfunktionen lassen sich durch das Zusammenwirken von zwei oder mehr Wirkflächen realisieren.

Nach ERSOY [ERS75] sind Wirkflächen die Begrenzungsflächen, Punkte oder Linien auf denen eine Wirkung zum Erfüllen einer gewünschten Funktion zustande kommt. Ein Wirkflächenpaar wird aus zwei sich berührenden Wirkflächen gebildet. Eine ähnlich Definition ist in [BAU91] zu finden. Danach bilden die im Kraftfluss liegenden Kontaktflächen die Wirkflächenpaare der Verbindung und beeinflussen neben den stofflichen Merkmalen der Bauteile und Verbindungselemente entscheidend die Leistungsfähigkeit der Verbindung.

Wirkflächen sind eine Voraussetzung zum Übertragen von Kräften und Momenten. Sie können nach Kriterien wie Form, Lage, Anzahl, Größe der Kontaktflächen und Art des Zusammenhalts unterschieden werden, wobei diese Eigenschaften in der Regel durch die Geometrie des Bauteils und der Verbindungselemente vorgegeben sind [PAH97].

Für die Handhabung in der Demontage müssen aufgrund der Vielfalt der Handhabungsobjekte sowie der erforderlichen Handhabungsoperationen die Wirkflächen in der Lage sein, Kräfte und Momente in allen sechs Freiheitsgraden zu übertragen. Im Folgenden werden die physikalischen Effekte und Wirkprinzipien zur Übertragung von Kräften und Momenten über Wirkflächen erläutert.

### 2.1.4 Physikalische Effekte und Wirkprinzipien

Für die Übertragung von Kräften existieren eine Vielzahl von physikalischen Effekten. Vor allem RODENACKER [ROD75] und KOLLER [KOL94] aber auch BAUER [BAU91] haben solche Effekte zusammengestellt. Mit Ausnahme der magnetischen und elektrostatischen Kräfte erfordern die Effekte den direkten stofflichen Kontakt über

Wirkflächen. Die Erfüllung einer Teilfunktion kann möglicherweise erst durch Verknüpfen mehrerer physikalischer Effekte erzielt werden. Die Zuordnung der Effekte zur konkreten Umsetzung einer Teilfunktion ergibt das physikalische Wirkprinzip [DUB97]. Entsprechend der Art der Kraftübertragung kann in drei verschiedene Wirkprinzipien unterteilt werden:

- Kraftschluss,
- Formschluss und
- Stoffschluss.

Kraftschlüssige Verbindungen lassen sich in solche, die durch eine Kraft senkrecht zur Berührungsfläche zwischen Wirkorgan und Handhabungsobjekt (z.B. Magnetkraft) gekennzeichnet sind, und solche, die auf Reibschluss basieren, unterteilen [CAR81]. Bei letztgenanntem wirkt parallel zur Wirkfläche die Reibkraft. Zusätzlich zu den Druckkräften wirken Schubkräfte, die die Wirkflächen in ihrer gegenseitigen Lage halten. Beim Überschreiten der zur Verfügung stehenden Reibkraft kommt es zu einer Bewegung zwischen den Wirkflächen, ohne dass dabei die Verbindung unterbrochen wird. Dieser Effekt kann auch zur Greifkraftregulierung genutzt werden.

Beim Kraftschluss ist die übertragbare Kraft von der Beschaffenheit und Größe der Wirkfläche abhängig. Diese Eigenschaften sind in der Demontage in der Regel nicht vorher bekannt. Wirkflächen müssen zunächst durch den Menschen oder sensorisch erkannt werden, um anschließend ein Wirksystem auszuwählen und den Greifer zu positionieren und zu orientieren. Oftmals sind keine geeigneten oder nur beschädigte und verschmutzte Wirkflächen vorhanden. Damit ist eine rein kraftschlüssige Verbindung für ein flexibles Demontagewerkzeug nur in Einzelfällen geeignet.

Formschluss liegt vor, wenn die das Werkstück in Lage und Orientierung sichernden Kräfte ausschließlich durch Reaktionskräfte der Wirkflächen entstehen. Diese nehmen durch ihre Form und Lage die Gewichts- und Trägheitskräfte des Werkstücks auf. Die Greifkräfte werden als Normalkräfte auf die Wirkfläche übertragen.

In der Montage sind Wirkflächen an Komponenten und Produkten aus der Konstruktion bekannt und jeweils gleich. Sie können von formschlüssigen Greifern zum Einleiten von Kräften und Momenten und somit zur Durchführung von Montagevorgängen genutzt werden. Anders in der Demontage, hier werden nur selten gleiche oder ähnliche Produkte und Komponenten nacheinander demontiert. Die vorhandenen Wirkflächen zeichnen sich durch unterschiedliche Formen und Werkstoffe aus. Damit sind häufige Werkzeugwechsel und ein Anstieg von Sekundärdemontevorgängen unvermeidbar.

Durch das Erzeugen neuer Wirkflächen, die dann für den Formschluss genutzt werden, können diese Vorgänge vermieden werden.

Beim Stoffschluss wird die Verbindung zwischen den berührenden Flächen durch Adhäsions- (Anziehungskräfte zwischen den Molekülen zweier verschiedener Stoffe) und Kohäsionskräfte (Kräfte, die zwischen gleichartigen Atomen oder Molekülen eines Stoffes wirken) hergestellt [HER92]. Hervorgerufen werden sie in der Regel durch ein Bindemittel zwischen den Körpern. Vielfach kommt es beim Stoffschluss zu einer unlösbaren Verbindung, die nicht beschädigungsfrei getrennt werden kann. Sie ist nur dann zerstörungsfrei lösbar, wenn die Grenzflächenkräfte geringer sind als die Kohäsion innerhalb der Greifpartner. Beispiele sind Greifer mit einer Klebeschicht auf der Greiffläche sowie der am IWF entwickelte Gefriergreifer [GOT95, SEL99]. Stoffschlüssige Verbindungen müssen ebenfalls an vorhandenen Wirkflächen angreifen. Schwierigkeiten ergeben sich durch die Vielfalt der Werkstoffe und Geometrien sowie Abnutzungen und Verschmutzungen der Wirkflächen. Die eingesetzten Bindemittel sind häufig werkstoffabhängig und benötigen bestimmte Oberflächeneigenschaften (z.B. elektrische Leitfähigkeit, fett- und rostfreie Oberfläche, bestimmte Oberflächenrauigkeit).

## 2.2 Stand der Technik flexible Greifer

Der Wunsch nach flexiblen Greifern, die in einem breiten Anwendungsbereich eingesetzt werden können, hat zu einer sehr großen Vielfalt von Greifsystemen geführt, die nach unterschiedlichen Kriterien strukturiert werden können. Die Untersuchung und Entwicklung von flexiblen Greifern beschränkt sich dabei im Wesentlichen auf Anwendungsfälle in der Montage. Hier liegen vollständige Informationen über das Produkt bzw. Produktspektrum vor. So sind die Geometrie, Material, vorhandene Wirkflächen und einleitbare Kräfte und Momente bekannt. Diesem Vorteil steht die Einschränkung gegenüber, dass die Objekte besonders sorgfältig behandelt werden müssen, d.h. dass deren geforderte technische Funktionalität und visuelle Qualität vollständig gewährleistet bleiben müssen [WAG97]. Flexible Greifer in der Montage beschränken sich daher auf die Handhabung von Produkten und Komponenten über am Objekt vorhandene Wirkflächen. Greifer und Objekt sind aufeinander abgestimmt, so dass ein flexibler Einsatz nur bedingt möglich ist (Bild 2).

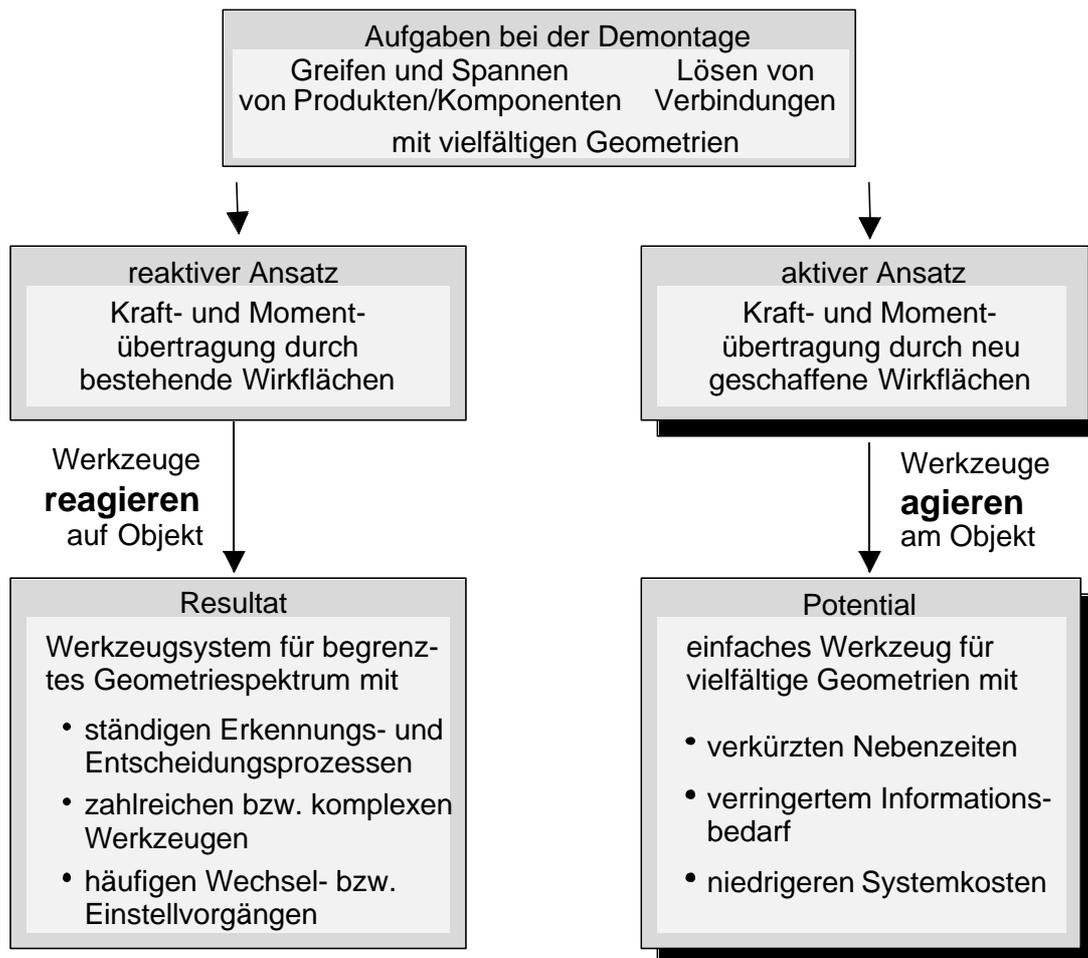
Flexibilität von Greifern wird dabei nach [SIE83] in quantitative und qualitative Erweiterungen einer bestehenden Funktion sowie deren Realisierung mit oder ohne äußeren Eingriff unterschieden. Eine gängige Unterscheidung erfolgt auch in Greifer mit Wechselsystemen und in anpassungsfähige Greifer [WÄT93].

Wechselsysteme verfolgen verschiedene Strategien. So wird entweder der Greifer komplett oder nur ein Greiferfinger ausgewechselt. Ein einheitlicher Standard für die komplexen Schnittstellen der Greiferwechselsysteme [DRE93, MER86] mit zahlreichen Energie-, Kraft- und Informationsflüssen, existiert bisher nicht. Der Austausch von Greiferfingern kann bereits ein weites Spektrum von Geometrien abdecken und vereinfacht die Schnittstellenproblematik erheblich [SCH92]. Zeitaufwendige Leerwege zum Wechseln und zahlreiche, vorzuhaltende Greiferfinger bleiben als Nachteile.

Anpassungsfähige Greifer reagieren mit einer erweiterten Funktionalität auf die Geometrie des Objekts und müssen nicht ausgetauscht werden. Die Wirkflächen passen sich in der Regel passiv durch Abformen von Elastomeren oder elastischen Strukturen [MUS95] an das Objekt an. Eine Übergangsform zwischen Wirkflächen- und Kinematikanpassung ist ein Greifer, dessen Bündel paralleler Stäbe in zwei Lochplatten geführt ist, die sich beim Abformen der Objektoberfläche verbiegen und so in den Lochplatten verklemmen und somit beliebige Geometrien ohne aktive Greifbewegung aufnehmen können [SCH00]. Weiterhin wurde am Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb (IWF) ein sogenannter Igelgreifer entwickelt. Dieser formt mit pneumatisch oder hydraulisch angetriebenen Stößeln die Geometrie des Handhabungsobjektes nach [SEL00b]. Bei Greifern, die der menschlichen Hand nachempfunden sind, werden die Wirkflächen aktiv durch Schwenken des Fingers, an veränderte Geometrien angepasst oder verfügen über kinematische Ketten, die die Funktionalität der menschlichen Hand nachahmen [SAA94, FEL96a]. Der mechanische und steuerungstechnische Aufwand dieser Greifer hat bisher trotz der Flexibilitätsvorteile einen Einsatz in der Industrie verhindert.

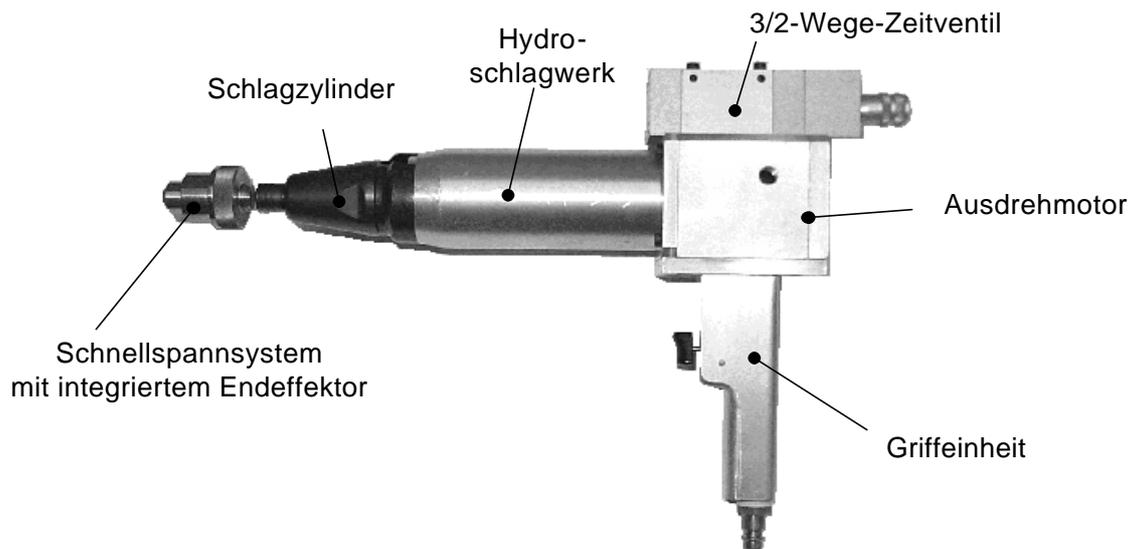
Gegenüber der Montage bestehen Demontageprozesse in der Regel aus einer Kombination zerstörungsfreier und zerstörender Trennverfahren, bei denen nur ausgewählte, wirtschaftlich nutzbare oder toxische Werkstoffe, Bauteile und Baugruppen eines Produktes demontiert und die verbleibenden Materialien verfahrenstechnischen Prozessen zugeführt werden [SPU95, BRI94]. Der Einsatz zerstörender Prinzipien, durch die auf Kosten der Beschädigung eine höhere Flexibilität erreicht werden kann, erscheinen für die Demontage als erstrebenswert [MEE98, REI97]. Mit der zerstörenden Demontage ergeben sich neue Möglichkeiten für flexible wirkflächenerzeugende Greifer, die in der Unterteilung flexibler Greifer bisher nur unzureichend berücksichtigt sind.

Wagner beschreibt dies als aktiven Ansatz [SEL95, WAG97]. Die Kräfte und Momente werden über neu geschaffene Wirkflächen übertragen. Damit müssen die Werkzeuge nicht auf das Objekt reagieren, sondern agieren am Objekt (Bild 2). Werkzeugwechsel können entfallen und erhebliche Zeiten und Kosten eingespart werden.



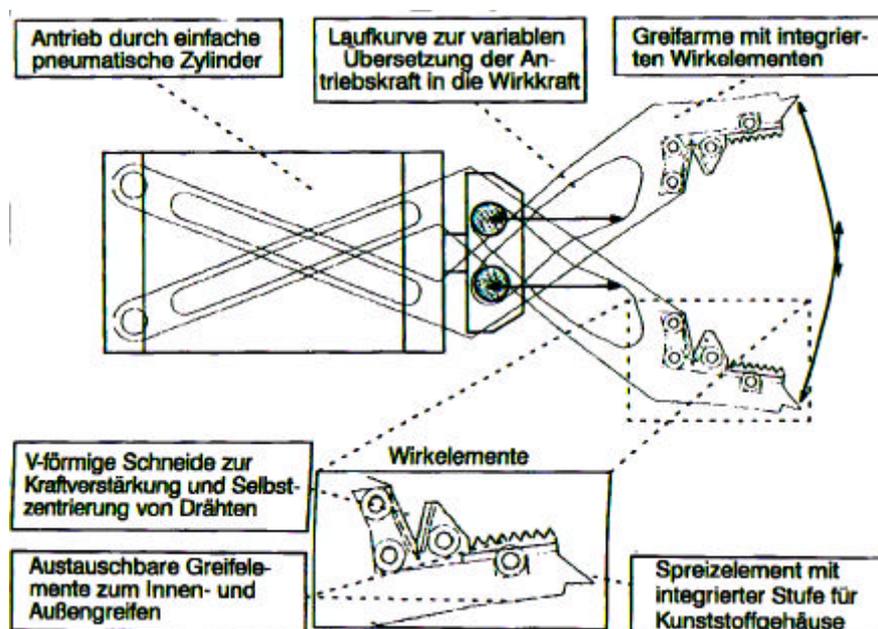
**Bild 2:** Gegenüberstellung von Kraftübertragung über vorhandene und neue Wirkflächen mit Auswirkungen [WAG97]

Dieser Ansatz wurde für das Lösen von Schraubverbindungen in einem prototypischen Entschraubwerkzeug umgesetzt (**Bild 3**). Durch translatorische Schläge wird mit einem keilförmigen Endeffektor eine neue Wirkfläche im Schraubenkopf erzeugt, die anschließend zur Einleitung eines Drehmomentes zum Lösen und Herausdrehen der Schraube genutzt wird [STE00a, STE00b, SEL99a, SEL99b]. Dieses Werkzeug steht kurz vor der Serienreife.



**Bild 3:** Prototypisches Entschraubwerkzeug [STE00a, SEL00b]

Genutzt wird der zerstörende Ansatz auch bei einem sogenannten Multifunktionswerkzeug, welches Gehäuse aufspreizen, Anschluss- und Verbindungsleitungen kappen sowie Objekte durch Innen- und Außengreifen handhaben soll (Bild 4) [FEL99, MEE98]. Das Greifen ist jedoch nur bei Wirkflächen einsetzbar, die ein Greifen von außen oder innen über zwei Backen ermöglichen.

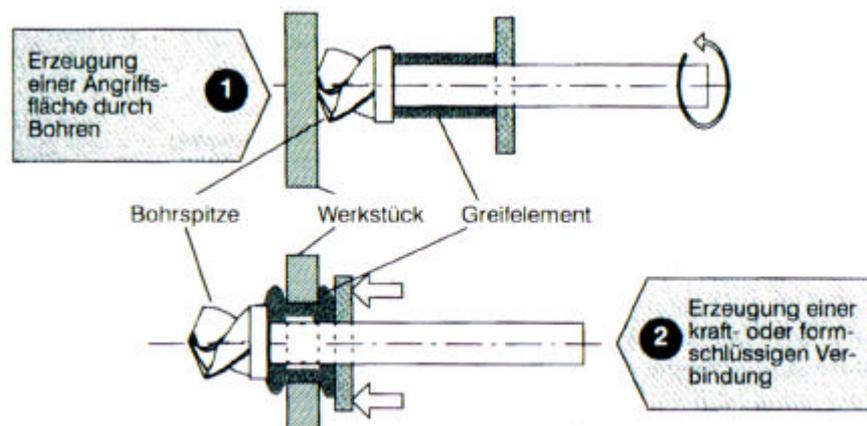


**Bild 4:** Multifunktionswerkzeug [MEE98]

In [FEL96b, FEL96c, FEL96d, MEE98] wird ein Bohrgreifer zur flexiblen Übertragung von Kräften beschrieben. Die Funktion des Bohrgreifers (Bild 5) beruht dabei auf einem 2-stufigen Wirkprinzip: In der ersten Stufe wird ein Durchgangsloch zur

Erzeugung der Angriffsflächen erzeugt, das in der zweiten Stufe zum kraft- und formschlüssigen Verbinden mit Hilfe eines elastischen Greifrings genutzt wird. Die Kraft- und Momentenübertragung wird durch den Greifring, der durch eine Verkürzung in Längsrichtung radial expandiert wird, gewährleistet.

Nachteilig bei diesem Verfahren ist die Entstehung von Spänen, die zu einer Verschmutzung des Handhabungsobjektes beitragen. Weiterhin wird hinter dem Handhabungsobjekt ausreichend Platz benötigt, um die Bohrspitze sowie einen Teil des Greifelements durch die Bohrung zu schieben. Das Greifelement kann durch scharfe Kanten an der Bohrung beschädigt werden und bei auftretenden Kräften und Momenten zwischen Objekt und Greifelement kann das Lösen behindert oder gar vermieden werden.



**Bild 5:** Aufbau und Funktionsprinzip des Bohrgreifens [MEE98]

Ein ebenfalls am Handhabungsobjekt agierendes Werkzeug ist ein teilzerstörendes Spannmakro [DFG96, RUP97]. Dieses in Bild 6 dargestellte Werkzeug fixiert zu demontierende Objekte durch Einwirken mit einem schraubenartigen Eindringkörper über ein mit Granulat gefülltes Kissen. Anschließend können an dem gespannten Objekt Demontageprozesse vorgenommen werden. Die Kräfte und Momente der Prozesse werden durch das Granulatkissen, das sich flexibel den Formen des Spannbektes anpasst sowie den Eindringkörper aufgenommen.

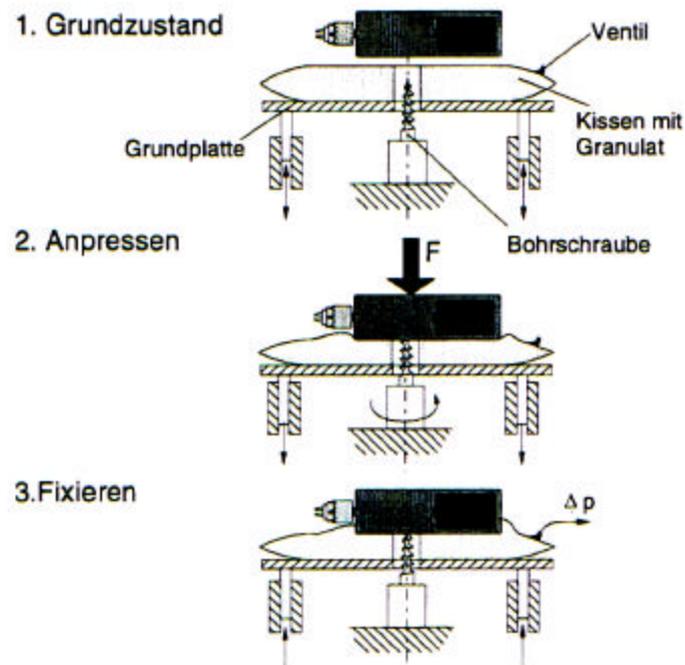


Bild 6: Ablauf beim Spannen eines Altgerätes mit dem Spannmakro [DFG96]

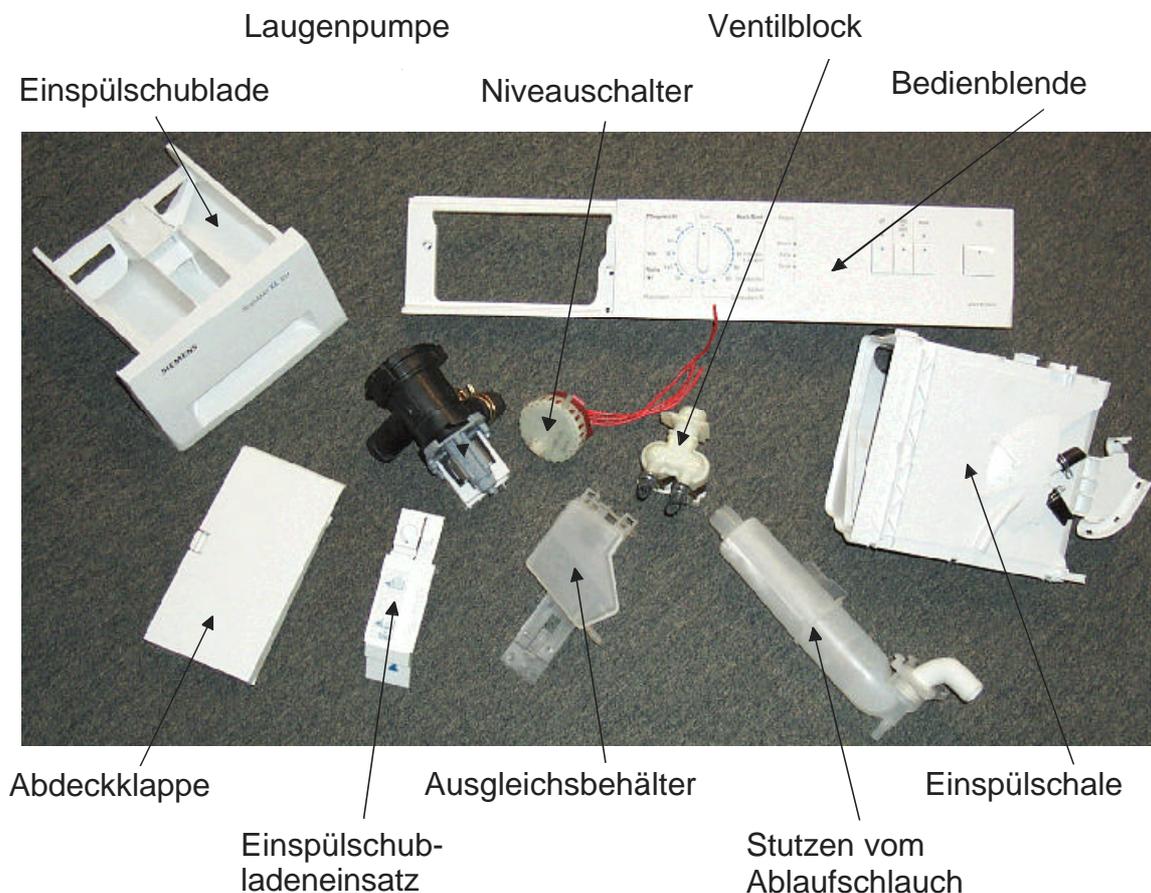
Andere Überlegungen beschränken sich zur Steigerung der Flexibilität des Handhabungsprozesses bei der Demontage auf Verwendung sensorischer Hilfen. Die Sensorinformationen werden durch aufwendige und oftmals störanfällige Steuerungsstrategien in Reaktionen umgewandelt, mit deren Hilfe die Werkzeuge einen Handhabungs- bzw. Demontageprozess ausführen [LAN99, KÖL95, STR97, WAR00, MÖL96, TRI96, WEI98].

### 2.3 Randbedingungen der Demontage

Unter der Demontage wird die Gesamtheit aller geplanten Vorgänge, die der Vereinzelung von Mehrkörpersystemen zu Baugruppen, Bauteilen und/oder formlosem Stoff dienen, verstanden [DUB97]. Die Demontage ermöglicht damit die Verwertung bzw. Verwendung und Entfrachtung von Werkstoffen, Komponenten und umweltgefährdenden Substanzen. Damit können Kreisläufe geschlossen und Ressourcen länger in Produkt- und Materialkreisläufen verbleiben [SEL00b]. Jedoch führt die steigende Vielfalt von Produkten mit stark variierender Nutzungsdauer zu einem sehr breiten Spektrum an zu demontierenden Altprodukten. Die sich daraus ergebenden Flexibilitätsanforderungen an Demontagebetriebsmittel gehen über die Anforderungen in der Produktion hinaus.

Beispielhaft sind in Bild 7 einige Kunststoffkomponenten einer Waschmaschine dargestellt. Dies verdeutlicht die geometrische Vielfalt von Formen und Geometrien, die allein in einem Produkt vorkommen. Umwelteinwirkungen und Gebrauchseinflüsse

wie Reparaturen oder Beschädigungen während der Nutzung wie Korrosion oder Deformation führen zu weiteren Unsicherheiten, so dass die tatsächlich vorliegende Geometrie häufig erst beim Demontieren erkannt werden kann.



**Bild 7:** Kunststoffkomponenten einer Waschmaschine

Dies ist der Grund, warum Demontageprozesse größtenteils manuell mit einem geringen Anteil automatisierter Funktionen erfolgen. Die ständigen Erkennungs-, Entscheidungs- und Wechsel- bzw. Stellprozesse können häufig nur durch sensomotorische, kognitive und schließende Fähigkeiten von Mitarbeitern realisiert werden. Die unterschiedlichen Demontageprozesse und die vielfältigen geometrischen Ausprägungen erfordern zahlreiche Werkzeuge, deren häufiges Wechseln die Demontageprozesse unproduktiv verlängert [WAG97]. Eingesetzt werden derzeit konventionelle Werkzeuge aus der Montage und Fertigung, wie Schraubendreher, Zangen, Hämmer, Blehscheren, Meißel und Trennschleifer [RAD94]. Randbedingungen wie Verschmutzungen, Freisetzungen von Schadstoffen oder die manuelle Handhabung von schweren und unhandlichen Produkten und Komponenten führen zu erschwerten Arbeitsbedingungen für die Demontearbeiter. Es wird daher eine stärkere Automatisierung einzelner Demontageverrichtungen oder ganzer Demontageabläufe angestrebt, um Mitarbeiter zu entlasten und Einsparpotentiale zu nutzen.

Die Herausforderung zur Gestaltung einer wirtschaftlichen Demontage liegt also neben einer intelligenten Planung und Steuerung von Demontageprozessen [HEN96, PER00] in der Entwicklung von flexiblen Betriebsmitteln. Zur Umsetzung dieser Ziele werden flexible und robuste Werkzeuge benötigt, die weitgehend unabhängig von Geometrie und Werkstoff Kräfte und Momente zum Greifen und Spannen sowie zum Lösen von Verbindungen einleiten. Die Entwicklung solcher Werkzeuge führt zu einer Verbesserung der Produktivität der Demontage. Erste Ansätze hierzu sind im Stand der Technik beschrieben.

Zukünftig könnten die Prozesse zusätzlich durch eine demontagegerechte Produktentwicklung erheblich erleichtert oder überflüssig werden [Kri95, SEL00b, VDI2243]. Untersucht werden auch Konzepte zur Integration von Informationsträgern in Produkten, die unter anderem Auskunft über Zustand, Inhaltsstoffe und Demontagepfade geben [SEL00a].

## **2.4 Auswahl eines Greifprinzips**

Wirkflächengenerierende Verfahren, die in der Demontage im Gegensatz zur Montage einsetzbar sind, ermöglichen neue Greifprinzipien mit denen robuste und flexible Werkzeuge für die Demontage entwickelt werden können. Die Wirkfläche wird durch einen Fertigungsprozess erzeugt. Die Kräfte und Momente können rein formschlüssig oder form- und kraftschlüssig über die neuen Wirkflächen vom Greifer in das Handhabungsobjekt eingeleitet werden.

Die Anforderungen an das Greifprinzip ergeben sich aus den Funktionen des Greifens (Aufnehmen, Halten und Lösen) sowie den beschriebenen Randbedingungen der Demontage. Für die Funktion des Greifens wurden die in der DIN 2740 beschriebenen Anforderungen an die Teilsysteme des Greifers und deren Lösungen berücksichtigt [DIN2740]. Durch die in der Demontage erforderliche Flexibilität ergeben sich zusätzliche Anforderungen hinsichtlich Geometrie und Werkstoff, Zugänglichkeit, Prozesszeit aber auch der Höhe der Kräfte und Momente sowie Auswirkungen des Verfahrens auf umliegende Komponenten, die zum Teil auch in [WAG97] beschrieben sind.

Verfahren, die an bestimmte Werkstoffeigenschaften des Objekts z.B. Magnetismus gebunden sind, kommen aufgrund der Werkstoffvielfalt der Altprodukte nicht in Frage. Weiterhin muss das ausgewählte Verfahren geringe Anforderungen an die Zugänglichkeit stellen. Oftmals ist das Handhabungsobjekt aufgrund der Geometrie umliegender Komponenten nur begrenzt und einseitig zugänglich, so daß Verfahren, die ausreichend Platz oder Zugänglichkeit von zwei Seiten erfordern z.B. Walzen, ausscheiden. Die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens hängt, wie in der Montage,

entscheidend von der Prozesszeit, den Prozesskosten sowie dem Aufwand für Sekundäroperationen ab. So ist ein schnelles und kostengünstiges Verfahren zu wählen, das einen geringen Aufwand für Operationen wie das Positionieren und Orientieren erfordert.

Zusätzlich ist bei der Auswahl des Verfahrens auf die entstehenden und erforderlichen Kräfte und Momente zu achten. Zum einen sollen bei der Erzeugung möglichst geringe Reaktionskräfte auftreten, um eine Gefährdung oder Schädigung des Menschen bzw. Handhabungsgerätes zu vermeiden und zum anderen sollen die übertragbaren Kräfte und Momente möglichst groß sein. Damit können z.B. Schnappverbindungen ohne zusätzlichen Trennprozess getrennt und auch schwere Komponenten gehandhabt werden.

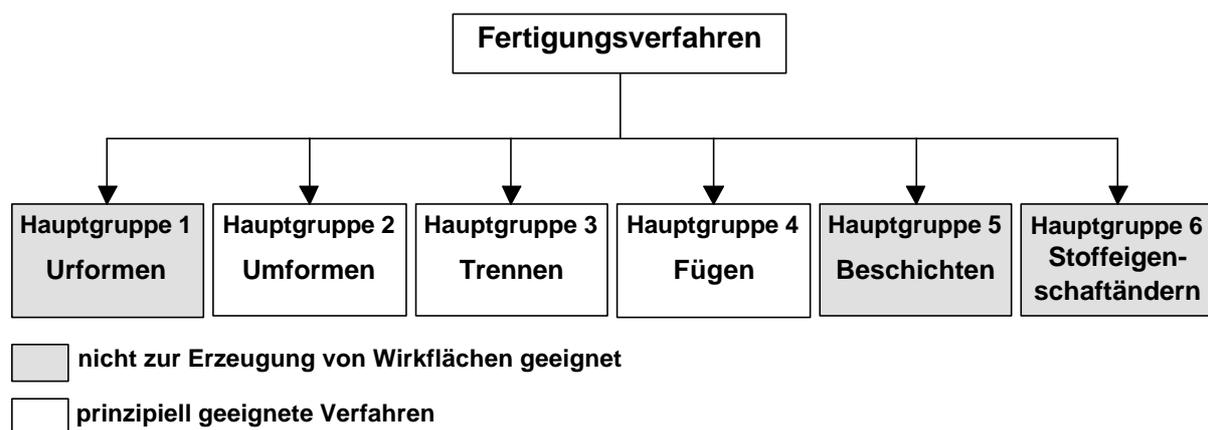
Weiterhin ist darauf zu achten, dass bei der Erzeugung und Nutzung der Wirkflächen umliegende Komponenten nicht durch mechanische, thermische oder chemische Einflüsse beschädigt werden.

Die relevanten Anforderungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Weitgehende Unabhängigkeit von der Geometrie und dem Werkstoff des Objektes
- Greifsicherung bei Energieausfall
- Geringe Baugröße für gute Einsetzbarkeit
- Schnelle Erzeugung der Wirkflächen mit geringen Kräften und/oder Momenten
- Erzeugung und Nutzung der Wirkflächen mit einem Werkzeug (Zeitersparnis und kein doppelter Aufwand für Positionierung und Orientierung)
- Übertragen von großen Kräften und Momenten in möglichst allen sechs Freiheitsgraden
- Möglichst niedrige Reaktionskräfte am Werkzeug
- Minimieren des sensorischen Aufwands zur Positionierung und Orientierung des Objektes und/oder Werkzeugs
- Vermeiden von Beschädigungen von hinter dem Objekt liegenden Komponenten durch Verschmutzung (z.B. Späne, Flüssigkeiten) oder mechanische Einflüsse (z.B. Beschädigung der Oberfläche, plastische Verformung)
- Nur einseitige Zugänglichkeit zur Erzeugung der Wirkflächen erforderlich

Anhand dieser Anforderungen soll ein wirkflächengenerierendes Greifprinzip bestimmt werden. Zur Erzeugung der Wirkflächen können die in der DIN 8580 beschriebenen Fertigungsverfahren eingesetzt werden. Diese sind, wie in

Bild 8 dargestellt, in die Hauptgruppen Urform-, Umform-, Trenn-, Füge- und Beschichtungsverfahren sowie Verfahren zum Stoffeigenschaftändern eingeteilt [DIN8580].



**Bild 8:** Fertigungsverfahren nach DIN 8580 mit relevanten Hauptgruppen

Zur schnellen Eingrenzung der Verfahren wird versucht, auf einer möglichst hohen Ebene der Untergliederung ungeeignete Verfahren auszuschließen. Ist dies nicht möglich, werden die Untersuchungen auf der nächsttieferen Gliederungsebene weitergeführt.

Urformen ist das Fertigen eines Körpers aus formlosem Stoff durch Schaffen des Zusammenhaltes. Die Handhabungsobjekte liegen bereits als geometrisch bestimmte Körper vor, so dass diese Verfahren ausscheiden.

Die Hauptgruppe 2 beschreibt die Umformverfahren. Diese Verfahren rufen eine plastische Änderung eines festen Körpers hervor. Sie können neue Wirkflächen erzeugen und werden im Folgenden näher betrachtet.

Auch durch das Trennen, das durch örtliche Aufhebung des Stoffzusammenhalts eine Änderung der Form eines festen Körpers ermöglicht, können Wirkflächen erzeugt werden.

Auch die in der Hauptgruppe 4 beschriebenen Fügeverfahren können nicht prinzipiell ausgeschlossen werden.

Die in der Hauptgruppe 5 Beschichten genannten Verfahren sind geeignet, dünne Schichten aufzutragen, nicht aber Wirkflächen zur Kraft- und Momenteneinleitung zu erzeugen. Die Verfahren des Stoffeigenschaftänderns bewirken das Umlagern, Aussondern oder Einbringen von Stoffteilchen, wobei eine etwaige unwillkürliche

Formänderung nicht zum Wesen der Verfahren gehört. Somit sind auch diese Verfahren ungeeignet.

Der Lösungsraum lässt sich damit zunächst auf Umform-, Trenn- und Fügeverfahren eingrenzen. Die diesen drei Hauptgruppen untergeordneten Fertigungsverfahren werden im Folgenden näher untersucht. In den Fügeverfahren werden auch Verfahren zum Fügen durch Umformen berücksichtigt. Allerdings werden die Verfahren dort nicht in ihrer ganzen Breite untersucht. Damit ist es sinnvoll, beide Hauptgruppen getrennt zu betrachten, um den Lösungsraum nicht bereits im Vorfeld einzuengen.

### Umformverfahren

Das Umformen lässt sich nach DIN 8582 in die Gruppen Druckumformen, Zugdruckumformen, Zugumformen, Biegeumformen und Schubumformen einteilen (Tabelle 1).

Druckumformen ist Umformen eines festen Körpers, wobei der plastische Zustand im Wesentlichen durch ein- oder mehrachsige Druckbeanspruchung herbeigeführt wird.	DIN 8583
Zugdruckumformen ist Umformen eines festen Körpers, wobei der plastische Zustand im Wesentlichen durch eine zusammengesetzte Zug-Druckbelastung herbeigeführt wird.	DIN 8584
Zugumformen ist Umformen eines festen Körpers, wobei der plastische Zustand im Wesentlichen durch ein- oder mehrachsige Zugbeanspruchung herbeigeführt wird.	DIN 8585
Biegeumformen ist Umformen eines festen Körpers, wobei der plastische Zustand durch eine Biegebeanspruchung herbeigeführt wird.	DIN 8586
Schubumformen ist Umformen eines festen Körpers, wobei der plastische Zustand im Wesentlichen durch Schubbeanspruchung herbeigeführt wird.	DIN 8587

Tabelle 1: Gruppen des Umformens nach DIN 8582 [DIN8582]

Bis auf das Druckumformen müssen bei allen Verfahren des Umformens bereits Wirkflächen vorhanden oder eine Zugänglichkeit von mindestens zwei Seiten gegeben sein. Zum Übertragen von Zugkräften muss bereits eine Verbindung zwischen Werkzeug und Werkstück vorhanden sein. Damit scheidet das Zugdruckumformen und Zugumformen aus.

Das Biegeumformen erfordert die Kraffteinleitung an mindestens zwei Punkten. Dazu kommen in der Regel eine Klemmvorrichtung und ein Stempel zum Einsatz. Die Erzeugung von Wirkflächen, die Kräfte und Momente in sechs Freiheitsgraden übertragen, ist nur mit erheblichem Aufwand möglich.

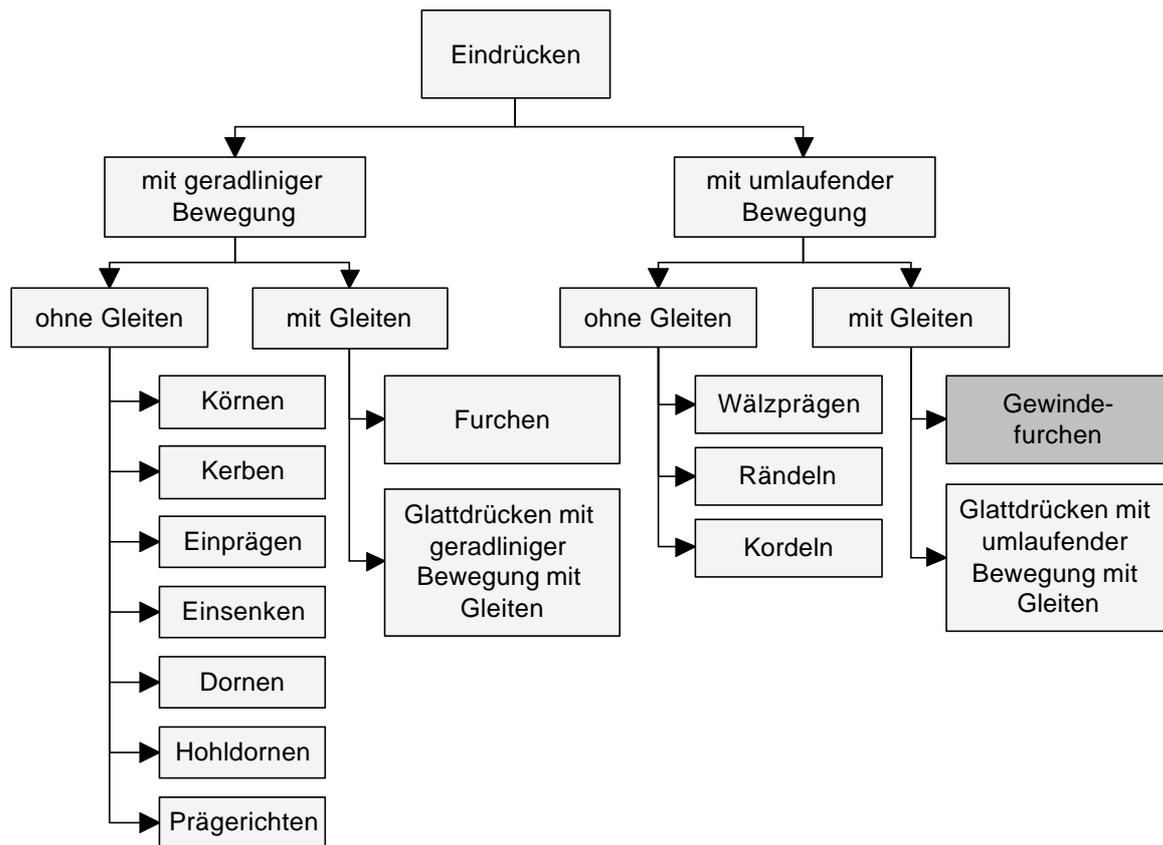
Zum Schubumformen gehören die Verfahren Verschieben und Verdrehen. Bei diesen Verfahren muss das Werkstück von mindestens zwei Seiten zugänglich oder bereits gegriffen sein, um das Drehmoment einzuleiten. Damit ist auch dieses Verfahren nicht für die Wirkflächenerzeugung geeignet.

Das Druckumformen kann weiter in die Gruppen Walzen, Freiformen, Gesenkformen, Eindrücken und Durchdrücken unterteilt werden. Walzen, Gesenkformen und Durchdrücken erfordern ebenfalls Zugänglichkeit von mindestens zwei Seiten somit scheiden diese Verfahren aus. Damit verbleiben das Freiformen sowie das Eindrücken.

Unter Freiformen wird Druckumformen mit nicht oder nur teilweise die Form des Werkstücks enthaltenden, gegeneinander bewegten Werkzeugen verstanden. Die Werkstückform entsteht dabei durch freie oder festgelegte Relativbewegung zwischen Werkzeug und Werkstück. Das Freiformen lässt sich weiter in die Verfahren Recken, Rundkneten, Breiten, Stauchen, Treiben, Schweifen und Dengeln unterteilen. Treiben, Schweifen und Dengeln sind zeitaufwendige Verfahren zur Verformung von Blechen, wobei auch hier keine geeigneten Wirkflächen entstehen. Bei den übrigen Verfahren des Freiformens ist wiederum eine Zugänglichkeit von zwei Seiten erforderlich.

Unter dem Eindrücken ist Druckumformen mit einem Werkzeug, das örtlich in ein Werkstück eindringt, zu verstehen. Das Eindrücken wird nach DIN 8583 in die in Bild 9 dargestellten Verfahren unterteilt.

Zum formunabhängigen Lösen von Schrauben wurde von Wagner aus dieser Untergruppe das schlagartige Kerben, ein Eindruckverfahren mit geradliniger Bewegung, ausgewählt. Die eingebrachte Impulsenergie wird in plastische Verformungsenergie umgewandelt, durch die Kerben im Schraubenkopf erzeugt werden [WAG97]. Voraussetzung ist eine ausreichende Steifigkeit des Handhabungsobjektes am Wirkort, damit die Impulsenergie in plastische Verformungsenergie umgewandelt wird. Dieses Verfahren ist für das Greifen von Gehäusen aufgrund der unzureichenden Steifigkeit nicht geeignet. Eindrücken mit umlaufender Bewegung ohne Gleiten ist nach DIN 8583 Eindrücken mit umlaufender Bewegung, wobei sich das Werkzeug relativ zum Werkstück abwälzt. Damit entstehen auch bei diesem Verfahren keine geeigneten Wirkflächen.



**Bild 9:** Eindrückverfahren nach DIN 8583 mit ausgewähltem Fertigungsverfahren zum Erzeugen der Wirkfläche [DIN8583]

Damit verbleibt noch das Eindrücken mit umlaufender Bewegung mit Gleiten. Die untergeordneten Verfahren sind das Gewindefurchen sowie das Glattdrücken mit umlaufender Bewegung mit Gleiten. Beim Glattdrücken wird ein abgerundetes, poliertes Werkzeug eingesetzt, das zur Verminderung der Oberflächenrauheit beiträgt. Somit ist dieses Verfahren ebenfalls ungeeignet.

Gewindefurchen ist nach DIN 8583 das Eindrücken eines Gewindes in ein Werkstück mit einem Werkzeug mit schraubenförmiger Wirkfläche z.B. Gewindefurchen von Innengewinde. Bei diesem Verfahren entsteht eine feste Verbindung zwischen dem Werkzeug und dem Werkstück. Kräfte und Momente können über den entstehenden Kraft- und Formschluss in allen sechs Freiheitsgraden übertragen werden. Dieses Verfahren ist zur Wirkflächenerzeugung geeignet. Beim Eindringen des Werkzeugs wird plastisch verformtes Material entlang des Gewindes aus der Verformungszone transportiert (Bild 10). Damit sind die Eindringkräfte relativ gering. Das heraustransportierte Material bleibt mit dem Handhabungsobjekt verbunden, so dass es nicht zu einer Verschmutzung kommt. Der Endeffektor kann nach der Erzeugung zur Übertragung der Handhabungskräfte genutzt werden. Die Greifkraftübertragung ist auch bei Energieausfall gewährleistet. Durch eine einfache Überwachung der

Eindringtiefe kann eine Beschädigung anderer Komponenten vermieden werden. Dieses Verfahren ist weitgehend unabhängig vom Werkstoff und der Geometrie des Objektes.



Bild 10: Austragung des Materials durch die Spannut

Der sensorielle Aufwand zur Positionierung und Orientierung des Greifers ist gering. Der Betrag der übertragbaren Kräfte und Momente ist abhängig von der Dicke und dem Material des jeweiligen Handhabungsobjektes. Eine zusätzliche Fixierung des Objektes im Raum, beim Erzeugen der Wirkflächen und beim Lösen des Wirkkörpers aber auch beim Bewegen, kann unter Umständen erforderlich sein. Dies wird bei der konstruktiven Umsetzung der Greifer berücksichtigt und näher erläutert (siehe Kapitel 6). Aus Bild 11 ist die Flexibilität eines gewindefurchenden Greifers gegenüber der Geometrie des Handhabungsobjektes ersichtlich.

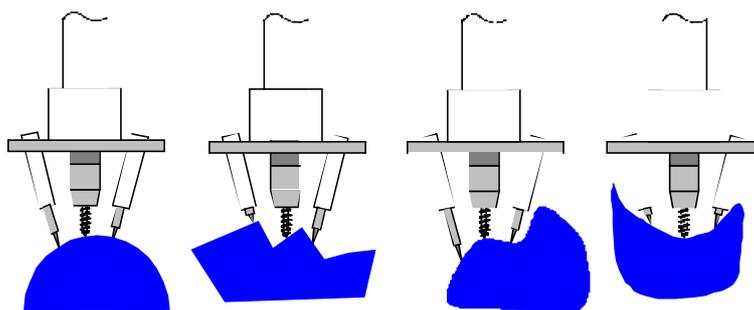


Bild 11: Flexibilität des Greifprinzips [SEL99b, STE00b]

Das Prinzip weist Schwachstellen beim Greifen und Handhaben spröder Werkstoffe auf, die beim Gewindefurchen zerbrechen können. Weiterhin ist eine ausreichende Materialsteifigkeit um die Kräfteinleitungsstelle erforderlich. Grenzen gibt es auch bei festen (z.B. metallischen) Werkstoffen mit größerer Wandstärke.

In Bild 12 ist die Eignung der Umformverfahren noch einmal zusammenfassend dargestellt.

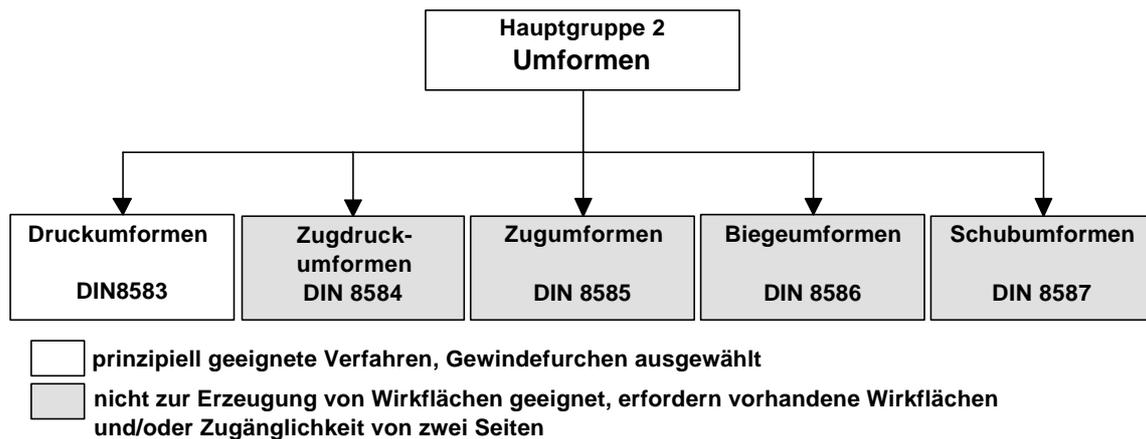


Bild 12: Eignung der Umformverfahren zur Erzeugung und Nutzung von Wirkflächen

### Trennverfahren

Die Hauptgruppe Trennen lässt sich in die Gruppen Zerteilen, Spanen mit geometrisch bestimmter Schneide, Spanen mit geometrisch unbestimmter Schneide, Abtragen, Zerlegen, Reinigen und Evakuieren einteilen [DIN8580].

Zerteilen ist das mechanische Trennen von Werkstücken ohne Entstehen von formlosem Stoff, also auch ohne Späne (spanlos).	DIN 8588
Spanen mit geometrisch bestimmter Schneide ist das Abtrennen von Stoffteilchen (Spänen) auf mechanischem Wege durch Werkzeuge mit geometrisch bestimmten Schneiden, z.B. Drehen, Bohren, Fräsen, Hobeln, Sägen, Feilen.	DIN 8589
Spanen mit geometrisch unbestimmter Schneide ist das Abtrennen von Stoffteilchen (Spänen) auf mechanischem Wege durch Werkzeuge mit geometrisch unbestimmten Schneiden, z.B. Schleifen, Honen, Läppen, Abtrennen mit Schleif- und Strahlmittel, Gleitschleifen, Strahlspanen.	DIN 8589
Abtragen ist das Abtrennen von Stoffteilchen auf nichtmechanischem Wege. Diese Verfahren werden häufig auch „physikalisch-chemische Trennverfahren“ genannt.	DIN 8590
Zerlegen ist das Trennen von vorher gefügten Werkstücken ohne deren Zerstörung. Es ist gleichbedeutend mit Auseinandernehmen, oder Demontieren, z.B. Abschrauben, Auspressen.	
Reinigen dient der Entfernung von unerwünschten Stoffen auf der Oberfläche, z.B. Fettschichten, Flecken, Oxidschichten, Späne, Staub u.a.. Hierzu zählen Verfahren wie Bürsten, Strahlen, Waschen, Beizen u.a..	
Zum Evakuieren zählen alle Verfahren, die dazu dienen, ein hohles Werkstück möglichst luftleer oder gasleer zu machen, z.B. Evakuieren einer Elektronenröhre.	

Tabelle 2: Gruppen des Trennens nach [DIN8580]

Die Verfahren Abtragen, Zerlegen, Reinigen und Evakuieren können nicht genutzt werden, da sie entweder keine oder nur sehr kleine Wirkflächen erzeugen.

Einzelne Verfahren der Gruppen Zerteilen sowie Zerspanen mit geometrisch bestimmter und unbestimmter Schneide sind generell in der Lage, Wirkflächen zu erzeugen. Der Großteil der Verfahren des Zerteilens erfordert jedoch eine Zugänglichkeit von zwei Seiten oder die erzeugten Wirkflächen sind nicht zur Übertragung von Kräften und Momenten in sechs Freiheitsgraden geeignet.

Die Verfahren des Spanens mit geometrisch bestimmter Schneide lassen nach DIN 8589 Teil 1 in die in Bild 13 dargestellten Verfahren unterteilen.

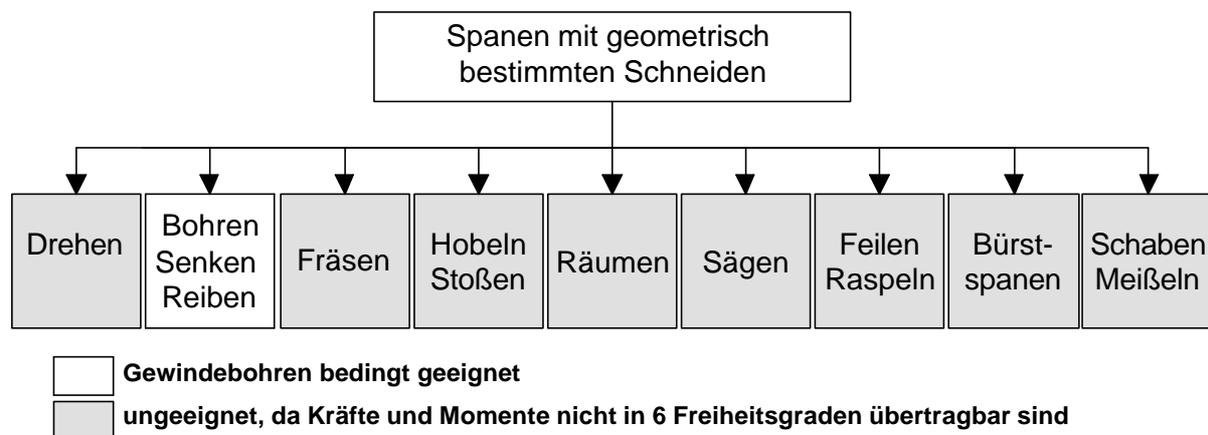


Bild 13: Spanen mit geometrisch bestimmter Schneide nach [DIN8589]

Beim Drehen, Fräsen Hobeln/Stoßen und dem Räumen ist eine definierte Relativbewegung zwischen Werkstück und Werkzeug erforderlich, d.h. das Werkstück muss positioniert und orientiert gespannt sein. Die Verfahren Bohren, Senken und Reiben werden wegen ihrer gleichen Kinematik beim Zerspanvorgang zusammengefasst. Das Bohren ist nach DIN 8589 Teil 2 das Spanen mit kreisförmiger Schnittbewegung, bei dem die Drehachse des Werkzeugs und die Achse der zu erzeugenden Innenfläche identisch sind und die Vorschubbewegung in Richtung dieser Achse verläuft. Somit können beim Bohren aber auch beim Senken und Reiben über das Werkzeug nur Kräfte und Momente in höchstens fünf Freiheitsgraden übertragen werden. Einzige Ausnahme ist das Gewindebohren. Dieses Verfahren erzeugt wie das Gewindefurchen Wirkflächen, die zur Übertragung von Kräften und Momenten in sechs Freiheitsgraden geeignet sind. Allerdings werden durch die entstehenden Späne Verunreinigungen verursacht, die zu einer Schädigung der umliegenden Komponenten führen können. Dieses Verfahren ist für Handhabungsobjekte geeignet, bei denen die Wirkflächen in festen Werkstoffen, wie Metall, mit größerer Wandstärke erzeugt werden müssen. Im Handel sind sogenannte Kombiwerkzeuge erhältlich, die das Bohren mit symmetrisch angeordneten Hauptschneiden mit dem Gewindebohren

kombinieren und damit in einem Arbeitsgang das Kernloch und Gewinde erzeugen. Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt jedoch auf dem Greifen dünnwandiger, meist aus Kunststoff bestehender Bauteile. Dafür ist das bereits beschriebene Gewindefurchen besser geeignet.

Sägen ist Spanen mit kreisförmiger oder gerader Schnittbewegung mit einem vielzahnigen Werkzeug von geringer Schnittbreite, wobei die Schnittbewegung vom Werkzeug ausgeführt wird. Beim Feilen und Raspeln wird mit wiederholter geradliniger Schnittbewegung mit einer Vielzahl von dicht hinter- und nebeneinanderliegenden Schneidzähnen gespart. Auch bei diesen Verfahren können Kräfte und Momente nicht in ausreichend vielen Freiheitsgraden übertragen werden.

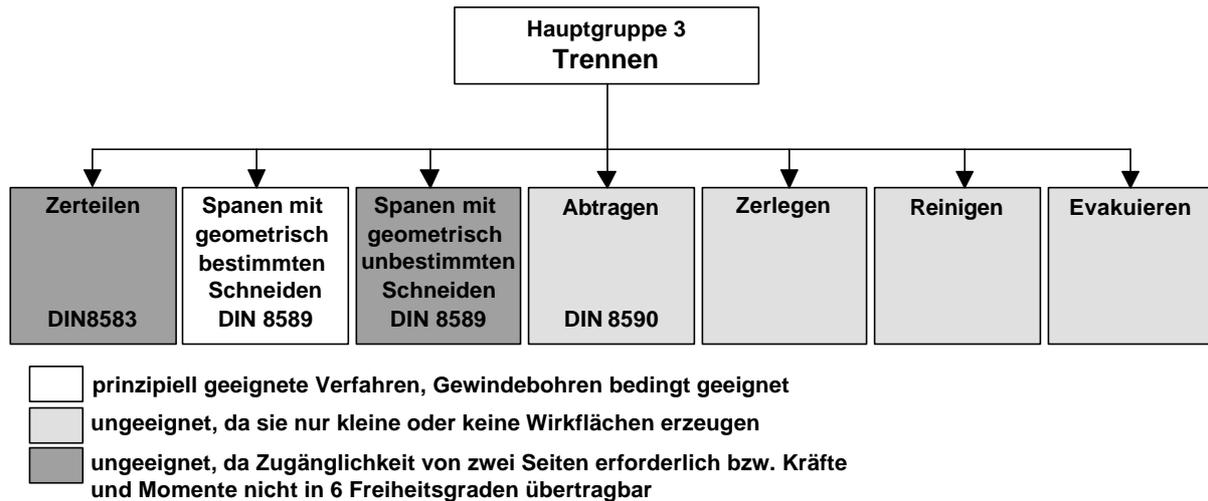
Das Bürstspanen dient im Wesentlichen der Veränderung der Oberflächenstruktur und scheidet ebenfalls aus. Das Schaben dient der Veränderung der Oberfläche, wobei der Schaber entlang dieser Oberfläche geführt wird und die Spanungsdicke durch die Anpresskraft bestimmt wird. Dieses Verfahren ist ebenso wie das Meißeln, bei dem durch Schläge auf das Werkzeug (Meißel) Späne von der Werkstückoberfläche abgetrennt werden, nicht geeignet.

Zu den Spanverfahren mit geometrisch unbestimmten Schneiden zählen das Honen Lappen, Gleitspanen und Hubschleifen, die allerdings nur für geringe Veränderungen der Oberfläche geeignet sind. Beim Bandschleifen wird der Werkstoff durch ein, mindestens über zwei Rollen laufendes, mit Schleifkörnern versehenes Band abgetrennt. Dieses Verfahren erfordert ausreichende Zugänglichkeit. Eine Übertragung von Kräften und Momenten zur Handhabung über das Schleifband ist nicht möglich. Somit kann auch dieses Verfahren ausgeschlossen werden.

Die in der DIN 8200 beschriebenen Verfahren zum Strahlspanen führen in der Regel zu einer starken Verschmutzung des gesamten Handhabungsobjektes. Weiterhin ist auch hier das Werkzeug zur Wirkflächenerzeugung nicht in der Lage, die anschließende Handhabung auszuführen.

Es verbleibt das Schleifen mit rotierendem Werkzeug, bei dem Werkzeuge mit natürlichen oder synthetischen Schleifmitteln geometrisch unbestimmte Schneiden bilden und mit hoher Geschwindigkeit den Werkstoff abtrennen. Bei diesem Verfahren kommt es durch den Schleifstaub zu einer starken Verschmutzung des gesamten Handhabungsobjektes. Die Erzeugung von Wirkflächen zur Kraftübertragung in sechs Freiheitsgraden und die Handhabung des Objektes mit dem Werkzeug ist nur bedingt möglich.

In Bild 14 ist noch einmal die Eignung der Trennverfahren zum Erzeugen und Nutzen von Wirkflächen zur Handhabung in der Demontage dargestellt.



**Bild 14:** Eignung der Trennverfahren zur Erzeugung und Nutzung von Wirkflächen

### Fügeverfahren

Die Verfahren der Hauptgruppe Fügen lassen sich nach DIN 8593 wie in Tabelle 3 dargestellt weiter in das Zusammensetzen, Füllen, An- und Einpressen, das Fügen Urformen, Umformen, Schweißen und Löten sowie das Kleben und Textile Fügen unterteilen.

Zusammensetzen ist Fügen, bei dem der Zusammenhalt der Fügeteile durch Schwerkraft (Reibung), Formschluss, Federkraft oder eine Kombination davon bewirkt wird.	DIN 8593 Teil 1
Füllen ist eine Sammelbenennung für das Einbringen von gas- oder dampfförmigen, flüssigen, breiigen oder pastenförmigen Stoffen, ferner von pulverigen oder körnigen Stoffen oder kleinen Körpern in hohle oder poröse Körper.	DIN 8593 Teil 2
Anpressen (Einpressen) ist eine Sammelbenennung für die Verfahren, bei denen beim Fügen die Fügeteile sowie etwaige Hilfsfügeteile im Wesentlichen nur elastisch verformt werden und ungewolltes Lösen durch Kraftschluss verhindert wird.	DIN 8593 Teil 3
Fügen durch Urformen ist eine Sammelbenennung für die Verfahren, bei denen entweder zu einem Werkstück ein Ergänzungsstück aus formlosem Stoff gebildet wird, oder bei denen in den formlosen Stoff Metallteile o.ä. (z.B. zur Erhöhung der Festigkeit) eingelegt werden.	DIN 8593 Teil 4
Fügen durch Umformen ist eine Sammelbenennung für Verfahren, bei denen die Fügeteile oder Hilfsfügeteile örtlich – bisweilen auch ganz – umgeformt werden. Die Umformkräfte können mechanischer, hydraulischer, elektromagnetischer oder anderer Art sein. Die Verbindung ist im Allgemeinen durch Formschluss gegen ungewolltes Lösen gesichert.	DIN 8593 Teil 5

Schweißen ist das Vereinigen von Werkstoffen in der Schweißzone unter Anwendung von Wärme und/oder Kraft mit oder ohne Schweißzusatz. Es kann durch Schweißhilfsstoffe, z.B. Schutzgase, Schweißpulver oder Pasten, ermöglicht oder erleichtert werden. Die zum Schweißen notwendige Energie wird von außen zugeführt.	DIN 8593, Teil 6 DIN 1910
Löten ist ein thermisches Verfahren zum stoffschlüssigen Fügen und Beschichten von Werkstoffen, wobei eine flüssige Phase durch Schmelzen eines Lotes (Schmelzlöten) oder durch Diffusion an den Grenzflächen (Diffusionslöten) entsteht. Die Solidustemperatur der Grundwerkstoffe wird nicht erreicht.	DIN 8593, Teil 7 DIN 8505
Kleben ist das Fügen unter Verwendung eines Klebstoffs, d.h. eines nichtmetallischen Werkstoffes, der Füge­teile durch Flächenhaftung und innere Festigkeit (Adhäsion und Kohäsion) verbinden kann.	DIN 8593 Teil 8
Textiles Fügen ist Fügen von textilen Werkstoffen oder Fügen mit textilen Werkstoffen.	DIN 8593 Teil 9

Tabelle 3: Fügeverfahren nach DIN 8593 [DIN 8593]

Bei den Verfahren des Zusammensetzens werden keine neuen Wirkflächen erzeugt, sondern vorgegebene Wirkflächen zur Kraftübertragung genutzt. Damit ist keine ausreichende Flexibilität gegeben. Das Füllen ist ebenfalls ungeeignet.

Das An- und Einpressen lässt sich wie in Bild 15 dargestellt in sieben Gruppen unterteilen. Das Fügen durch Schrauben ist nach DIN 8593 Teil 3 (Anschrauben, Aufschrauben, Einschrauben, Verschrauben und Festschrauben) das Fügen durch Anpressen mittels eines selbsthemmenden Gewindes. Dabei wird ein bereits vorhandenes Gewinde oder eine Mutter verwendet. Ein nutzbares Gewinde ist in der Regel nicht am Handhabungsobjekt vorhanden, so dass dieses zunächst erzeugt werden muss. Möglichkeiten hierzu sind bei den Umform- und Trennverfahren beschrieben.

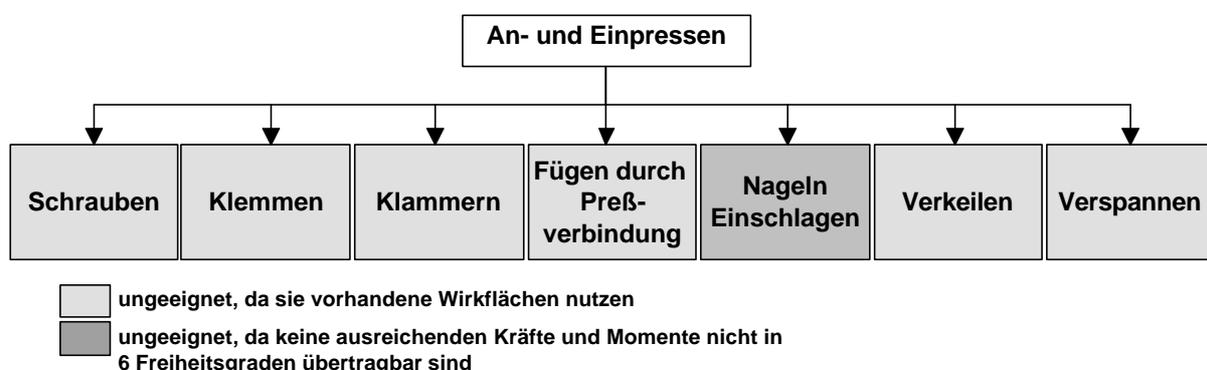


Bild 15: An- und Einpressen nach [DIN8593]

Klemmen ist Fügen durch Anpressen mittels Hilfsteilen (Klemmen), wobei die Füge­teile elastisch oder plastisch verformt werden, während die Hilfsteile starr sind.

Dieses Verfahren ist nur für elastisch verformbare Komponenten geeignet und erfordert eine Anpassung der Hilfsteile an das jeweilige Handhabungsobjekt.

Das Klammern ist Fügen mittels federnder Hilfsteile (Klammern), die die überwiegend starren Fügeteile aneinander pressen. Auch bei diesem Verfahren werden passende Klammern und Wirkflächen vorausgesetzt. Wie auch beim Klemmen werden keine neuen Wirkflächen erzeugt. Ähnliches gilt für das Fügen durch Pressverbindung sowie das Verkeilen und Verspannen.

Beim Nageln, dem Fügen durch Einschlagen oder Einpressen von Nägeln (Drahtstifte) als Hilfsteile in das volle Material werden mehrere Fügeteile durch Aneinanderpressen miteinander verbunden. Der gleiche Ansatz wird beim Einschlagen verfolgt, nur dass hier das eingeschlagene Teil selbst ein Fügeteil ist. So z.B. das Einschlagen eines Hakens (Bild 16). Mit diesem Verfahren werden neue Wirkflächen erzeugt, die zur Kraftübertragung genutzt werden können. Allerdings kann diese Verbindung keine ausreichenden Kräfte und Momente in den sechs Freiheitsgraden übertragen .

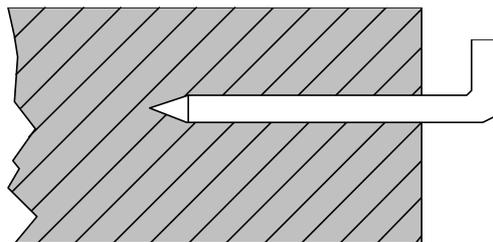


Bild 16: Einschlagen nach [DIN8583]

Die dem Fügen durch Urformen untergeordneten Verfahren bewirken eine nichtlösbare Verbindung zwischen den zu fügenden Partnern. Damit ist zum Lösen des Handhabungsobjektes ein Trennprozess erforderlich. Weiterhin scheiden die Verfahren aufgrund des Zeitaufwandes aus.

Das Fügen durch Umformen ist gegliedert in das Fügen durch Umformen drahtförmiger Körper, durch Umformen bei Blech-, Rohr- und Profiltteilen sowie das Fügen durch Nietverfahren. Die Verfahren zum Fügen durch drahtförmige Körper beschäftigen sich unter anderem mit dem Drahtflechten, dem Knoten oder auch dem Wickeln mit Draht. Allen untergeordneten Verfahren ist gemein, dass keine neuen Wirkflächen entstehen, über die Kräfte und Momente in sechs Freiheitsgraden übertragbar sind.

Beim Umformen von Blech-, Rohr- und Profiltteilen müssen in der Regel bereits zueinander passende Flächen vorhanden sein, die dann z.B. durch Körnen oder Kerben, durch gemeinsames Fließpressen, durch gemeinsames Ziehen oder Ummanteln, durch Weiten, durch Engen oder durch Durchsetzfügen miteinander zu Wirkflächen verbunden werden. Somit ist auch bei diesem Verfahren eine Anpassung

des Endeffektors an das Objekt notwendig. Dies scheidet, wie bereits erwähnt, aufgrund der Geometrievielfalt der Handhabungsobjekte aus.

Als letzte Gruppe des Fügens durch Umformen verbleiben die Nietverfahren. Sie lassen sich in Nieten, Hohnieten, Zapfennieten, Hohlzapfennieten und Zwischenzapfennieten unterscheiden. Für diese Verfahren benötigt man allerdings zunächst eine Bohrung, durch die der Niet gesteckt wird. Außerdem ist für die in der DIN 8593 genannten Verfahren die Zugänglichkeit von zwei Seiten erforderlich.

Das Schweißen ist nach [DIN1910] das Vereinigen von Werkstoffen in der Schweißzone unter Anwendung von Wärme und/oder Kraft mit oder ohne Schweißzusatz. Es kann durch Schweißhilfsstoffe, z.B. Schutzgase, Schweißpulver oder Pasten, ermöglicht oder erleichtert werden. Das Schweißen kann als Widerstandsschweißen oder als Heißluftschweißen mit Kunststoffelektroden ausgeführt werden. Das Trennen der Verbindungen ist aber nicht oder nur mit erheblichem Zusatzaufwand wie z.B. Wegwerfelektroden möglich. Darüber hinaus ist das Verfahren werkstoffabhängig und kann durch Verschmutzungen wie Staub oder Öl beeinträchtigt werden.

Die Lötverfahren lassen sich in die Verfahren zum Hart-, Weich- und Hochtemperlöten unterteilen. Für den vorliegenden Anwendungsfall kommen aufgrund der Temperaturen nur Weichlötverfahren in Frage. Beim Löten wird ein Lotwerkstoff zugeführt und die zu benetzenden Oberflächen müssen metallisch rein sein [DUB97]. Die Reinheit der Oberflächen kann in der Demontage nicht gewährleistet werden. Zusätzlich spricht der Aufwand für die Zuführung des Lotes und die aufwendige Trennung der Fügepartner gegen dieses Verfahren.

Die Kräfte zwischen den Fügepartnern werden beim Kleben durch die Kohäsionskräfte im Klebstoff selbst und die Adhäsionskräfte zwischen Klebstoff und Fügepartner übertragen. Voraussetzung für die Übertragung hoher Kräfte ist eine gute Benetzung der Klebflächen. Aufgrund der Verschmutzung der Handhabungsobjekte in der Demontage ist dies nur in Einzelfällen gewährleistet. Kommt es zu einer Verbindung, so muss diese beim Ablegen wieder zerstörend getrennt werden, bzw. ein Teil des Greifers am Objekt verbleiben. Bei diesem Verfahren werden keine neuen Wirkflächen erzeugt.

In Bild 17 ist noch einmal die Eignung der Fügeverfahren zum Erzeugen und Nutzen von Wirkflächen zur Handhabung in der Demontage dargestellt.

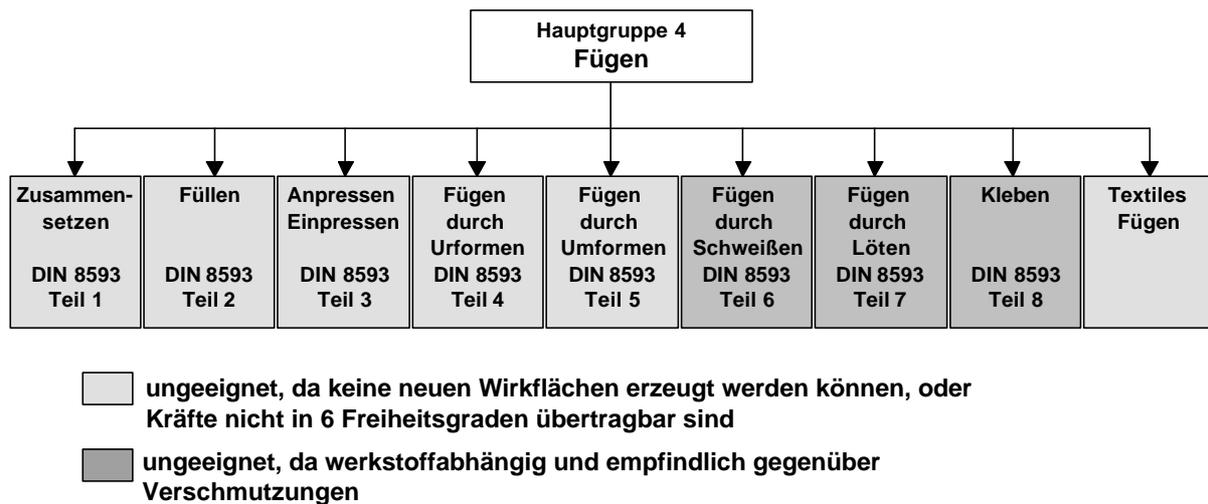


Bild 17: Eignung der Fügeverfahren zur Erzeugung und Nutzung von Wirkflächen

### Zusammenfassung

Anhand der Anforderungen an einen flexiblen Demontagegreifer, der die Wirkflächen zur Einleitung von Kräften und Momenten zum Greifen generiert, werden die in der DIN 8580 genannten Fertigungsverfahren auf ihre Eignung untersucht. Das in der DIN 8583 beschriebene Verfahren des Gewindefurchens wird ausgewählt.

Als Werkzeug zum Furchen des Gewindes werden gewindeformende Schrauben eingesetzt. Diese erfüllen stets zwei Funktionen:

- als Werkzeug zum Formen des Gewindes und
- als Verbindungselement in dem von ihnen geformten Mutterngewinde [BAU91].

Gewindeformende Schrauben werden unter anderem in Form von Blechschauben [DIN267] im Automobilbau oder in Form von Holzschrauben [DIN571] für Möbel eingesetzt. Für das Verbinden von Blechen bis zu 10 mm Stärke werden sogenannte Bohrschrauben [ISO10666] eingesetzt. Je nach Anwendungsfeld können diese Schrauben auch als Endeffektoren für wirkflächenerzeugende Greifer eingesetzt werden.

### 2.5 Anwendungsfelder

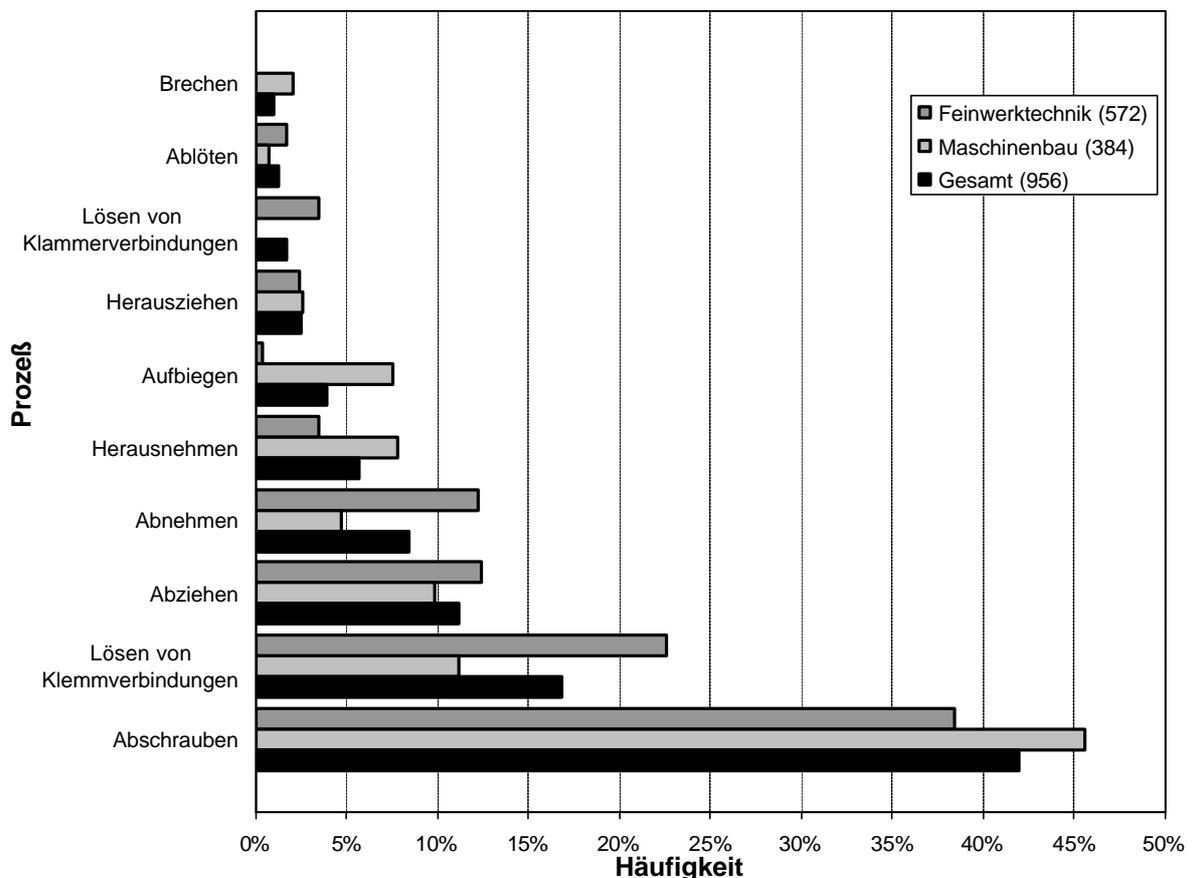
Der ausgewählte Ansatz kann für die Übertragung von Kräften und Momenten überall dort eingesetzt werden, wo die Zugänglichkeit gewährleistet und eine lokale Verformung und damit Beschädigung des zu handhabenden Objektes in Kauf genommen werden kann. Weiterhin müssen ein ausreichendes Werkstoffvolumen sowie eine ausreichende Steifigkeit des Gesamtobjektes zum Aufnehmen der Prozesskräfte vorhanden sein. Das ausgewählte Verfahren ist nicht einsetzbar bei spröden oder auch Werkstoffen mit hoher Reißfestigkeit und großer Materialstärke.

Für das zweitgenannte können, wie bereits erwähnt, Werkzeuge eingesetzt werden, die das Bohren mit dem Gewindebohren kombinieren. Nachteilig ist jedoch die Erzeugung von Spänen.

Häufig ist in der Demontage die Handhabung schwerer und unhandlicher Komponenten, die zusätzlich verschmutzt sind und nicht immer vorhersehbare Gefahrenpotentiale bergen, erforderlich. Der Anspruch der Flexibilität gewinnt dabei eine besondere Bedeutung. Zusätzlich zur vielfältigen Geometrie der Demontageobjekte müssen Veränderungen, die während des Gebrauchs oder Transports entstanden sind, Berücksichtigung finden. Erforderlich sind Werkzeuge, die weitgehend unabhängig von Geometrie und Werkstoff einen mechanisierten oder automatisierten Prozess ermöglichen. Diese Werkzeuge können durch Applikation in Hebehilfen oder Robotern manuelle Werker erheblich entlasten und vor Gefährdungen schützen.

Der generelle Trend für den Werkstoffeinsatz geht deutlich in Richtung Kunststoffe. Der deutsche aber auch die europäischen und weltweiten Märkte für Kunststoffe wachsen mit einem Trend von 4-5% p.a. [KUN98]. Mit einem weltweiten Verbrauch von 9,5 Mio. t zählt Polystyrol (PS) zu den mengenmäßig wichtigsten Thermoplasten. Allein zwischen 1995 und 1997 wuchs der Weltverbrauch um 1,3 Mio. t. Neben dem Verpackungssektor wird PS im Wesentlichen als Gehäusewerkstoff im Bereich der Büro- und Informationstechnik, aber auch für Fernseherrückwände eingesetzt. In diesem Bereich fielen, bei steigender Tendenz nach Angaben des Zentralverbandes der Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V. (ZVEI), bereits 1998 über 1,8 Mio. Tonnen Elektronikschrott mit einem hohen Kunststoffanteil an [ZVEI99]. Auch in anderen Branchen, wie z.B. der Spielwarenindustrie, findet eine partielle Ablösung von technischen Kunststoffen durch PS statt. Ein weiterer wichtiger Kunststoff ist das Polyethylen (PE). Der stetige Absatzzuwachs bekräftigt, dass PE nach wie vor ein innovativer und wachstumsstarker Werkstoff ist. Wesentliche Anwendungsfelder sind der Spritzguss, Blasformteile, Rohre aber auch Folien. Beim Kunststoffrecycling steht Deutschland an der Spitze. Auch europaweit sind deutliche Fortschritte bei der Kunststoffverwertung zu beobachten. Aber neue Herausforderungen warten. Die ökologisch nicht begründbare Bevorzugung einer bestimmten Verwertungsart, z.B. der stofflichen Verwertung, wie sie in der deutschen Verpackungsordnung zu finden ist, behindert Innovationen, Marktchancen und den Wettbewerb [KUN98]. Die sortenreine Trennung der Kunststoffe zum einen und die Wiederverwendung von Komponenten zum anderen erfordern neue Technologien in der Entsorgung. Große Potentiale birgt die Demontage. Diese ist derzeit durch manuelle, vielfach zerstörende Demontageverrichtungen geprägt. Durch ein robustes und weitgehend

formunabhängiges Verfahren zum Greifen werden Möglichkeiten eröffnet, zukünftige Demontage zunehmend in hybriden oder gar automatisierten Prozessen zu realisieren.



**Bild 18:** Häufigkeit ausgewählter Demontageprozesse nach [DFG96]

Vielfach bieten zu demontierende Kunststoffgehäuse oder Verkleidungen nur unzureichende Angriffsflächen zum Einbringen der erforderlichen Kräfte. Durch die verstärkte Verwendung von Schnappverbindungen, die häufig nur schwer zugänglich oder nicht erkennbar sind, wird die Demontage zusätzlich erschwert. So ließe sich zum Beispiel die Demontage von Innenverkleidungen im PKW oder auch die derzeit manuell durchgeführte Demontage von Fernsehgeräten durch ein geeignetes Werkzeug erheblich erleichtern. Dazu muss das Werkzeug in der Lage sein, die Kräfte und Momente zur Handhabung sowie die Kräfte zum Lösen der Verbindungselemente (z.B. Schnapp- oder Pressverbindungen) in das Handhabungsobjekt einzuleiten.

Durch einen solchen Greifer können Prozesse wie das Lösen von Schnapp- und Klemmverbindungen, das Abnehmen, das Herausnehmen oder auch das Herausziehen bewerkstelligt werden. All diese Prozesse treten, wie in Bild 18 dargestellt, sehr häufig in der Demontage auf.

In einem interdisziplinären Forschungsprojekt werden Konzepte für die zukünftige Demontage entwickelt [SEL00b]. Im Rahmen dieser Arbeiten wird ein hybrides

Demontagesystem für Waschmaschinen entwickelt. Vielfach fehlen hierbei flexible Greifer, die eine sichere Handhabung unterschiedlicher Komponenten ermöglichen.

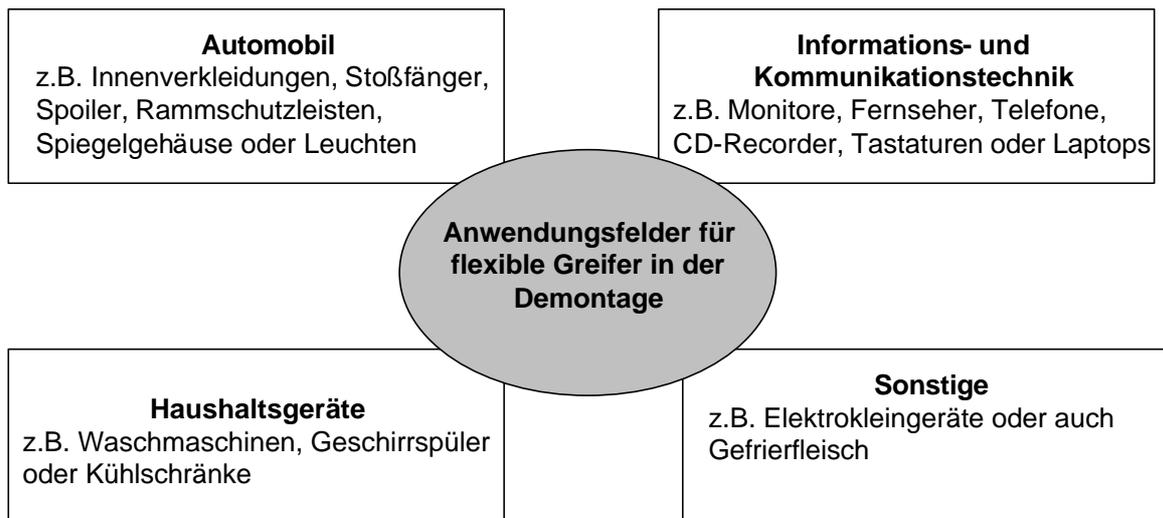
Nach [ERH99] werden im Fahrzeugbau zukünftig im Motorbereich aber auch im Bereich der Karosserieteile verstärkt Kunststoffteile eingesetzt. Außenanwendungen im Karosseriebereich aus Thermoplasten wie Stoßfänger, Spoiler, Rammschutzleisten, Spiegelgehäuse, Leuchten u.a. sind seit langem bekannt. Ganze Karosserien oder zumindestens Teile aus Thermoplasten für Großserienfahrzeuge sind in Entwicklung. Der Durchbruch für eingefärbte, thermoplastische Polymerwerkstoffe im Karosseriebereich wird mit sogenannten Blends bei den Citycars erwartet. Beispielsweise besitzt der Smart eine komplette Außenhaut aus einem PBT/PC-Blend, die nur noch mit einem Klarlack überzogen wird. Ferner wird die Mercedes A-Klasse als erstes Großserienfahrzeug mit einer Hecktür aus einem thermoplastischen PPE+PA-Blend gebaut [KUN97]. Damit ergeben sich zukünftig noch mehr Anwendungsfelder im Bereich Automobil.

Die Entsorgung von Altfahrzeugen ist vorwiegend auf die Verwertung von Metallen abgestimmt. Nach der Entnahme der Betriebsstoffe werden Ersatzteile und Reifen demontiert. Anschließend wird das Automobil vorwiegend mit Shreddern zerkleinert und in eine Schrottfraktion, eine Schwerfraktion und in die Shredderleichtfraktion getrennt [GRO98]. Während die Metallfraktionen sehr gut wiederverwendbar sind, stellt die Behandlung der Shredderleichtfraktion – derzeit ca. 25% des aufgegebenen Shreddergutes – eines der Hauptprobleme beim Altfahrzeugrecycling dar. Sie besteht vorwiegend aus Kunststoffen, die vielfach mit Resten von Betriebs- und anderen Schadstoffen (z.B. Blei, PCB) versetzt sind. Diese Shredderrückstände, die ca. 600.000 t/a betragen, müssen aufgrund des Schadstoffgehaltes kostenintensiv behandelt und/oder deponiert werden [SCH95]. Durch Erhöhung der Demontagetiefe und die Entnahme von Kunststoffen und Schadstoffen kann diese Fraktion erheblich verringert werden.

Zusammenfassend lassen sich Produkte und Komponenten aus den Bereichen:

- Automobil,
- Haushaltsgeräte und
- Geräte der Informations- und Kommunikationstechnik

als Anwendungsfelder für flexible Demontagegreifer benennen. Diese sind in Bild 19 mit Anwendungsbeispielen dargestellt.



**Bild 19:** Anwendungsfelder für flexible Demontagegreifer

Das Einsatzfeld ist jedoch nahezu beliebig erweiterbar auf alle Aufgaben, bei denen Kräfte und Momente übertragen werden und eine partielle Beschädigung des Handhabungsobjektes in Kauf genommen werden kann. Weitere Anwendungsfelder ergeben sich zum Beispiel auch bei der Handhabung von Gefrierfleisch, beim Rückbau von Plattenbauten.

## 2.6 Handlungsbedarf

Die Entwicklung und Umsetzung von flexiblen Greifern für die Demontage trägt zur Erleichterung von Demontageprozessen, zur Humanisierung der Arbeitsbedingungen sowie zur Rationalisierung der Demontage bei. Das ausgewählte Greifprinzip des Erzeugens von Wirkflächen durch einen gewindefurchenden Endeffektor erfüllt die Anforderungen an ein flexibles Verfahren. Allerdings fehlen Untersuchungen zum Prozess der Wirkflächenerzeugung und Nutzung, die Aufschluss über die bei diesem Prozess benötigten Kräfte und Momente liefern. Dies ist jedoch eine Voraussetzung, um die Teilsysteme eines Greifers auszulegen. Insbesondere gilt dies für das Energiesystem, das ein entsprechendes Drehmoment bei der Erzeugung bereitstellen muss.

Weiterhin fehlen Informationen über die mit diesem Verfahren übertragbaren Kräfte. Der Greifer wird in der Regel die Kräfte in Gegenrichtung zur linearen Eindringbewegung des Endeffektors einbringen. Ausschlaggebend ist damit die übertragbare Normalkraft. Eine Aussage über die Kraft ist erforderlich, um die Eignung des Verfahrens für ein Anwendungsfeld abzuschätzen sowie einen sicheren Prozess zu gewährleisten. Damit lassen sich aus der Aufgabenanalyse folgende Defizite für die Umsetzung von wirkflächengenerierenden flexiblen Greifern ableiten:

- Modelle zur Berechnung des Eindringmomentes eines gewindefurchenden Endeffektors sind nicht verfügbar. Bisher kann das Eindringmoment nur über experimentelle Untersuchungen festgestellt werden. Dazu müssen für jeden Endeffektor und Werkstoff Untersuchungen durchgeführt werden.
- Die übertragbare Gewichtskraft, die über einen auf dem benannten Prinzip beruhenden Greifer übertragen werden kann, ist bisher nicht bekannt. Damit kann die Sicherheit des Greifprinzips nicht garantiert und es können keine detaillierten Aussagen über die Anwendungsbreite des Prinzips getroffen werden.
- Die Umsetzung von wirkflächengenerierenden flexiblen Greifern, die zur Erleichterung und Rationalisierung einer mechanisierten und/oder automatisierten Demontage beitragen, ist bisher nicht oder nur unzureichend erfolgt.

Ziel dieser Arbeit ist daher die Entwicklung eines Modells zur Berechnung des Eindringmomentes eines gewindefurchenden Endeffektors in Abhängigkeit der Form des Endeffektors, der Eindringtiefe sowie des Materials des zu handhabenden Objektes. Dazu werden die aus der Literatur bekannten Modellierungstechniken erläutert, auf ihre Eignung überprüft und ein Verfahren ausgewählt. Über das Eindringmoment können Komponenten für Demontagewerkzeuge ausgelegt, Reaktionskräfte auf Menschen oder Handhabungseinrichtungen abgeschätzt sowie eine Prozessüberwachung oder Simulation des Prozesses durchgeführt werden.

Weiterhin werden vorhandene Abschermodelle aus der Schraubenberechnung auf ihre Eignung zur Berechnung der Nutzlast untersucht, validiert und modifiziert. Ergebnisse sollen ein Modell zur Berechnung des Eindringmomentes und ein Modell zur Berechnung der mit dem Prinzip handhabbaren Gewichtskraft sein. Durch softwaretechnische Implementierung sollen diese Modelle einfach, schnell und mit geringem Aufwand verwendbar werden. Die Modelle sind durch experimentelle Untersuchungen zu verifizieren.

Konstruktive Anforderungen an auf diesem Prinzip beruhende Greifer werden dargestellt und mit Hilfe der Modelle anhand von zwei Anwendungsbeispielen umgesetzt. Die Funktionsfähigkeit der Greifer soll in einem hybriden Demontagesystem nachgewiesen werden. Für die Arbeit ergeben sich damit Aspekte der Prozeßmodellierung, ihrer experimentellen Überprüfung und der konstruktiven Auslegung von Betriebsmitteln für spezifische Anwendungen.

### 3 Modellierung

#### 3.1 Grundlagen

Nach [DIN19226] ist ein Prozess die Gesamtheit von aufeinander wirkenden Vorgängen in einem System, durch die Materie, Energie oder Information umgeformt, transportiert oder gespeichert wird. Der Prozess wird durch seine Eingangs-, Ausgangs- und Zustandsgrößen beschrieben. Beeinflussbare Eingangsgrößen werden Einstellgrößen genannt. Diese beziehen sich auf das Schraubwerkzeug, den Wirkkörper sowie das Material des zu handhabenden Objektes. Der Zusammenhang zwischen den Eingangsgrößen und den Ausgangsgrößen wird durch ein Modell beschrieben. In einem Modell wird ein begriffliches oder gegenständliches System entsprechend der vorliegenden Fragestellung abstrahiert, um hinreichend genaue Ergebnisse mit einem geringeren Aufwand zu erhalten [DEG93, SPU72].

Nach [DIN66201] unterteilt man in ereignis- und verfahrensorientierte Modelle. Ereignisorientierte Modelle geben den Zustand zu diskreten Zeitpunkten wieder und können z.B. zur Produktivitätsanalyse von Fertigungsanlagen eingesetzt werden. Für die Modellierung des hier vorliegenden Prozesses sind sie nicht geeignet. Hierzu eignen sich verfahrensorientierte Modelle, die den Verlauf des Prozesses zwischen den einzelnen Zuständen und Ereignissen abbilden.

Die verfahrensorientierten Modelle können weiter in gegenständliche und mathematische Modelle unterteilt werden. Gegenständliche Modelle bilden die am realen Objekt vorhandenen physikalischen Größen in materieller Form ab, wie z.B. ein Dampfmaschinenmodell.

Mathematische unparametrische Modelle werden in der Regel durch die Auswertung von experimentellen Ergebnisse generiert. Regressionsverfahren passen Kurvenverläufe in eine große Anzahl von Messwerten ein oder es werden durch Identifizierungsmethoden Übertragungsfunktionen aus den Verläufen der Eingangs- und Ausgangsgrößen gewonnen [ISE88].

Bei unparametrischen Modellen können die Koeffizienten der Gleichungen nicht aus den Kenngrößen des Prozesses hergeleitet werden. Eine Veränderung dieser Größen bedingt eine Überarbeitung des Modells. Aufgrund der Vielfalt der Werkstoffe der Handhabungsobjekte sowie der vom Anwendungsfall abhängigen Endeffektoren sind diese Modelle für den hier vorliegenden Anwendungsfall nicht geeignet.

Die parametrischen Modelle werden in analytische und numerische Modelle unterschieden [DIN66201]. Diese bauen auf einer physikalisch fundierten Beschreibung des Prozesses auf und stellen physikalische Zusammenhänge in mathematischen

Gleichungen dar. Die Koeffizienten der Gleichungen ergeben sich aus den Prozesskenngrößen. In Bild 20 sind die Prozessmodellierungstechniken und analytischen Modelle bezogen auf die Plastomechanik dargestellt. Diese werden im Folgenden vorgestellt.

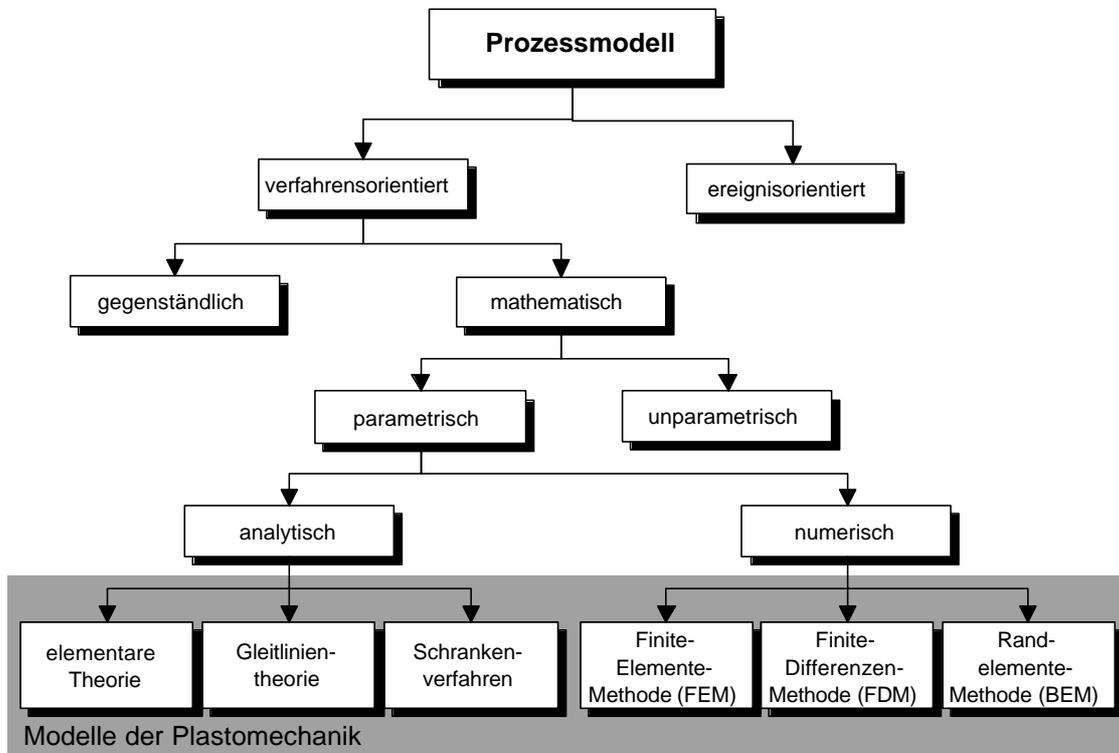


Bild 20: Übersicht der Prozessmodellierungstechniken und der analytischen Modelle der Plastomechanik in Anlehnung an [DIN66201, KOP98]

### 3.2 Numerische Modellierung

Numerische Modelle bieten die Möglichkeit, das Systemverhalten auch bei Prozessen, die für eine vollständige analytische Betrachtung zu aufwendig sind, zu beschreiben. Das System wird dazu in kleine Elemente unterteilt, für die Näherungslösungen berechnet werden können. Die numerische Verfahren unterscheiden sich durch unterschiedliche Ansatzfunktionen sowie die Art und Weise der Bestimmung der Koeffizienten. Zur Berechnung des Verhaltens des Systems werden diese unter Berücksichtigung der Randbedingungen zusammengesetzt. Drei dieser Verfahren besitzen einen hohen Entwicklungsstand und sind in universellen Programmen implementiert [MAY93, IND84]:

- die Finite-Differenzen-Methode (FDM),
- die Finite-Elemente-Methode (FEM) und
- die Boundary Elemente Methode (BEM).

Diese Verfahren sind zusammenfassend im Bild 21 dargestellt [NIE98].

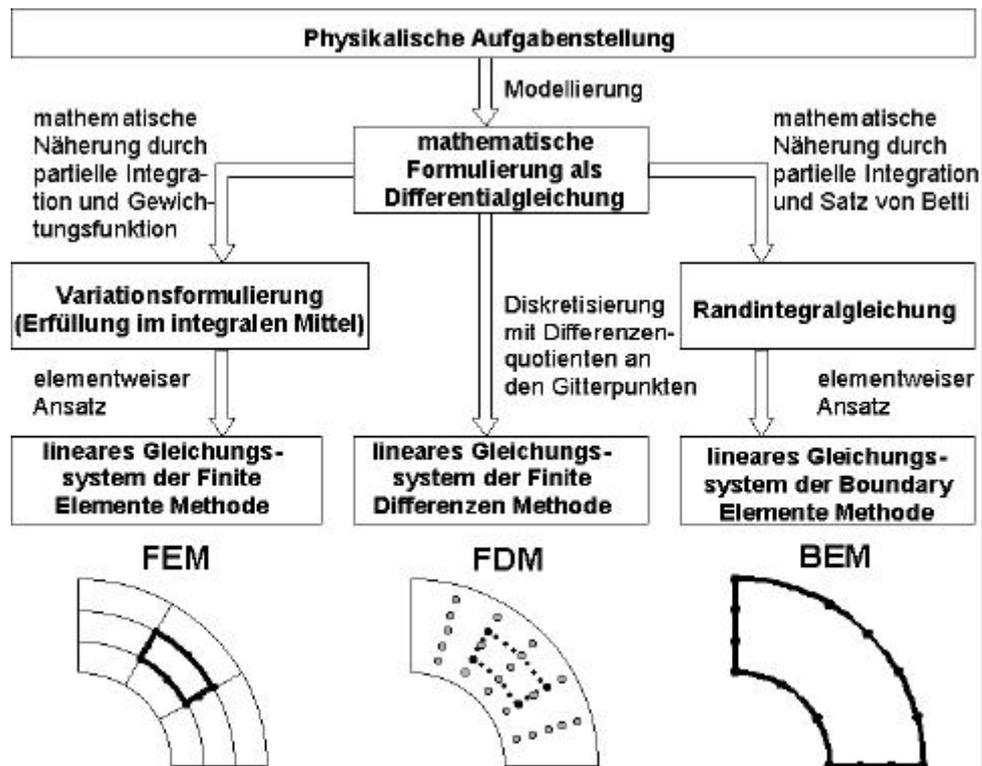


Bild 21: Vorgehensweise bei der Berechnung durch FEM, FDM und BEM [NIE98]

Die Finite-Differenzen-Methode ist die älteste der drei numerischen Berechnungsverfahren (FDM). Die zu untersuchende Funktion muss zweifach differenzierbar sein und ist somit in der Regel auf exakt lösbare Differentialgleichungen beschränkt [NEU95].

Der Begriff der finiten Elemente wurde um 1960 von CLOUGH und TURNER geprägt. Bei der Finite-Elemente-Methode wird von der Integralform der zu lösenden Differentialgleichung ausgegangen [BAT 86]. Das bedeutet, dass ein Integralausdruck minimiert wird. Die vollständige Diskretisierung des Systems erfordert hohe Rechenleistungen und Speicherkapazitäten.

Bei der BEM werden nur die Ränder und die Oberflächen des Bauteils beschrieben. Auch sie geht von der Differentialgleichung der zu lösenden Aufgabe aus. Mit dem Satz von BETTI wird die Differentialgleichung in die Integralform transformiert. Die BEM ist auf Anwendungen beschränkt, für die Fundamentallösungen der Differentialgleichungen existieren, und erfordern durch die vollbesetzten Systemmatrizen aufwendige Lösungsverfahren. Weiterhin sind im Gegensatz zur 15 Jahre älteren Finite-Elemente-Methode Softwarelösungen für die BEM noch wenig verbreitet [NEU95].

### 3.3 Analytische Modellierung

Mit analytischen Modellen kann das Systemverhalten in der Regel direkt ermittelt werden. Aufgrund der kompakten Darstellung des Prozesses in Gleichungssystemen ist dazu nur eine einfache rechentechnische Unterstützung notwendig, womit die Anwendung erheblich erleichtert wird.

Für die Plastomechanik kommen folgende Methoden in Frage:

- die elementare Theorie,
- die Gleitlinientheorie und
- das Schrankenverfahren.

Die elementare Theorie ist ein Sammelbegriff für Lösungsansätze unter vereinfachten Annahmen, die von der Anwenderseite für die Grundumformverfahren (Schmieden, Walzen, Durchziehen und Durchdrücken) entwickelt wurden [KOP98]. Sie geht im Wesentlichen auf Arbeiten von FINK, SIEBEL und KARMAN zu Beginn des 20. Jahrhunderts zurück und wurde von LIPPMANN und MAHRENHOLTZ auf die heutige Form vereinheitlicht. Man unterscheidet drei charakteristische, dem umzuformenden Werkstück angepasste Volumenelemente, Streifen, Scheiben, und Röhren. Entsprechend spricht man von Streifen-, Scheiben- und Röhrenmodellen. Abweichungen der realen Körper von diesen Geometrien äußern sich in Fehlern der berechneten Spannungen.

Die Theorie der Gleitlinienfelder geht auf LÉVY (1871), HENCKY(1923), PRANDTL (1923), HILL (1950) und PRAGER/HODGE (1951) zurück. Die Gleichgewichtsbedingungen werden auf ein hyperbolisches System partieller Differentialgleichungen zurückgeführt, deren Lösungen orthogonale Kurvenscharen, sogenannte Charakteristiken sind. Der Werkstoff gleitet entlang der Kurven mit der maximalen Schubspannung ab. Die Gleitlinientheorie ist jedoch bis auf wenige axialsymmetrische Anwendungsfälle nur für eine ebene Formänderung einsetzbar.

Bei schwierigen, nicht exakt lösbaren Aufgaben strebt der Ingenieur oft Näherungslösungen an, bei denen versucht wird, die exakte Lösung mit einer oberen und/oder unteren Schranke einzugrenzen. Für plastische Probleme wurden um 1951 von PRAGER und HODGE Schrankenaussagen aus den Extremalprinzipien der von MISESSchen Theorie abgeleitet [PRA51]. Vorteile des Verfahrens sind neben der flexiblen Einsatzmöglichkeit der vertretbare Modellerstellungs- und Rechenaufwand, bei niedrigen Hard- und Softwarekosten. Weiterhin bietet das obere Schrankenverfahren die Möglichkeit, nicht nur Rechenergebnisse in kürzester Zeit zu liefern, sondern auch die später beim Einsatz in der Praxis notwendigen Hard- und

Softwarekosten sowie den Personalbedarf zur Handhabung und Pflege der Simulationsprogramme niedrig zu halten [FAN95].

### 3.4 Auswahl der Methode

Die Modellierung des Eindringprozesses der Schraube soll eine überschlägige Berechnung des erforderlichen Eindringmoments liefern. Die numerischen Verfahren erfüllen diese Anforderungen nur unzureichend. Die FDM wird überwiegend für die Lösung von Feldproblemen verwendet und ist zur Abbildung des vorliegenden Prozesses nicht geeignet. Die FEM ist prinzipiell geeignet, scheidet aber aufgrund des hohen Modellieraufwandes, der sich durch die Geometrie der Schraube sowie die rotatorische und translatorische Eindringbewegung ergibt, aus. Weiterhin ergäben sich hohe Kosten für leistungsfähige Rechner und spezielle FEM-Programme sowie ein erheblicher Zeitbedarf für einzelne Simulationsläufe. Bei der BEM werden die Vorgänge im Inneren des Werkstoffs nicht modelliert. Allgemein lässt sich sagen, dass die BEM dann vorteilhaft sein kann, wenn bei einem zweidimensionalen Problem das Verhältnis Umrandung des betrachteten Körpers zur eingeschlossenen Fläche klein ist [IND84]. Analog gilt beim dreidimensionalen Körper, dass das Verhältnis Oberfläche zu eingeschlossenem Volumen klein sein sollte. Diese Voraussetzungen werden beim Eindringen eines schraubenförmigen Endeffektors nicht erfüllt. Die numerischen Modelle sind also aufgrund der genannten Nachteile nicht für die Modellierung des Eindringprozesses geeignet.

Die genannten Vorteile analytischer Modelle sprechen dafür, diese für die Modellerstellung zu nutzen. Allerdings scheidet die Verwendung der elementaren Theorie aufgrund der komplexen Geometrie des Endeffektors aus. Die Aufteilung dieser Geometrien in Streifen, Scheiben oder Röhren ist ohne erhebliche Vereinfachungen der Geometrie nicht möglich. Diese Vereinfachungen führen jedoch zur Verfälschung des Ergebnisses.

Gleitlinienmodelle sind nur für zweidimensionales plastisches Fließen geeignet. Beim Einsatz einer Schraube ergeben sich dreidimensionale plastische Verformungen, die nicht oder nur mit erheblichem Aufwand exakt modelliert werden können. Deshalb wird der Ansatz verfolgt, das obere Schrankenverfahren nach PRAGER und HODGE [PRA54] einzusetzen. Dieses ist aus den Extremalprinzipien der von MISESchen Theorie abgeleitet [KOP98].

Für das Modell zur Berechnung der Abscherkräfte soll auf ein vorhandenes numerisches Modell von Erhardt [ERH97] zurückgegriffen werden.

### 3.5 Eindringprozess einer gewindefurchenden Schraube

Für das Übertragen von Kräften und Momenten wird das Generieren von Wirkflächen durch einen schraubenförmigen Endeffektor ausgewählt [STE00a, STE00b, REC00, SEL99a, SEL99b, SEL00b]. Zur Verwendung kommen Schrauben ohne Kopf, die im Folgenden als Schaftschrauben bezeichnet werden. Die verwendeten Bezeichnungen für die Teile der Schraube sind in Bild 22 erläutert.

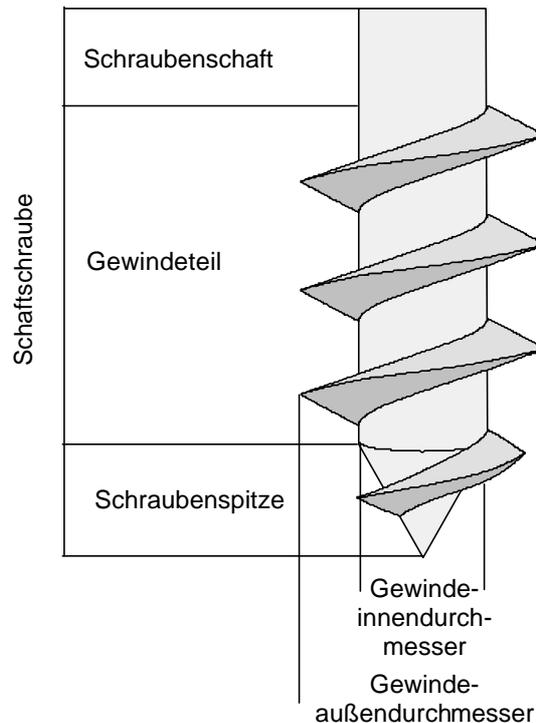
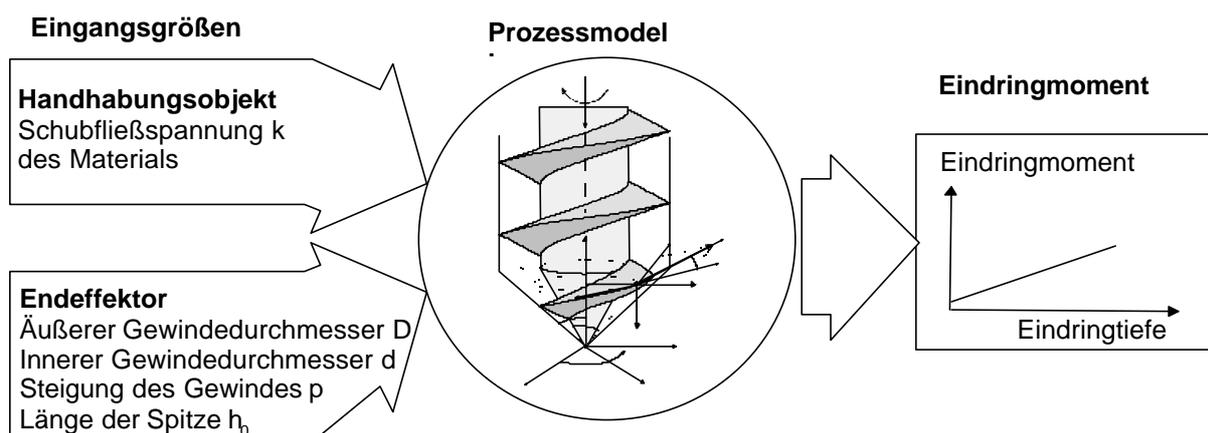


Bild 22: Bezeichnung der Teile einer Schaftschraube

Durch die Modellierung des Eindringvorgangs kann das Eindringmoment für den Endeffektor Schaftschraube berechnet werden. Die Eingangsgrößen werden durch die Schubfließspannung  $k$  des Handhabungsobjektes und die geometrischen Größen des Endeffektors festgelegt. Ausschlaggebend sind der Innen- und Außendurchmesser, die Steigung und die Länge der Schraubenspitze. Ausgangsgröße des Modells ist das Eindringmoment (Bild 23). Diese Größe kann zur Auslegung der auf diesem Prinzip beruhenden Werkzeuge, zur Berechnung der Reaktionskräfte auf den Roboter bzw. den Demontearbeiter, zur Auslegung der Werkzeugkomponenten sowie zur Simulation und Überwachung des Eindringprozesses verwendet werden.



**Bild 23:** Prozessmodell für den Eindringprozess einer Schraube

Ausgangspunkt des Schrankenverfahrens ist die Leistungsbilanz für den sich ganz im plastischen Zustand befindenden Körper. Die über der Oberfläche in den Körper eingebrachte äußere Leistung ist gleich der im Volumen umgesetzten inneren Formänderungsleistung. Oder anders ausgedrückt: Unter allen Geschwindigkeitsfeldern, die kinematisch zulässig sind, d.h., dass die Randbedingungen für Geschwindigkeiten und die Inkompressibilität nirgendwo in der Umformzone verletzt werden, liefert das reale Geschwindigkeitsfeld den kleinsten Wert für die über die Verformungszone summierte innere Leistung  $\dot{E}_i$  (Satz von der oberen Schranke) [STE67]. Zur Anwendung dieses Verfahrens muss zunächst ein kinematisch zulässiges Geschwindigkeitsfeld aufgestellt werden, mit dessen Hilfe die innere Formänderungsleistung berechnet werden kann. Beim Aufbau des Geschwindigkeitsfeldes wird ein starr-plastisches Fließmodell zugrunde gelegt. Dieses ist durch die Aufteilung der Umformzone in Volumenelemente und Einführung mehrerer Gleichungssysteme in die Geschwindigkeitsfelder gekennzeichnet. Dadurch sind die Geschwindigkeiten in jedem Volumenelement kontinuierlich, aber zwischen den Elementen diskontinuierlich. Das heißt, die Diskontinuität der Geschwindigkeiten tritt nur an den Grenzflächen zwischen den Elementen auf.

Die Auswahl des Koordinatensystems spielt sowohl bei der Reduzierung des Rechenaufwandes als auch bei der Lösung komplexer Probleme eine sehr wichtige Rolle. Aufgrund der vorliegenden Geometrie der Schraube bietet sich für den Eindringvorgang ein zylindrisches Koordinatensystem an.

Der Eindringprozess einer Schraube ist ein typisches Anwendungsfeld für dreidimensionale plastische Verformung. Das erforderliche Drehmoment kann mit dem Verfahren für die obere Schranke basierend auf Geschwindigkeitsfeldern abgeschätzt werden. Die klassischen Schrankenverfahren sind bisher nur für kartesische Koordinatensysteme (KK) vorhanden. Für das hier zu erstellende Modell wäre ein Zylinderkoordinatensystem (ZK) deutlich komfortabler und einfacher. Zur Umwandlung

der bekannten Modelle in ein Zylinderkoordinatensystem sind einige Grundlagen erforderlich, die im Anhang A erläutert werden.

Zunächst wird die Matrix für die Umformgeschwindigkeit eingeführt, mit deren Hilfe der Umformgeschwindigkeitstensor und sein Produkt dargestellt werden können. Die äquivalenten Ausdrücke für die Inkompressibilität und das Produkt des Umformgeschwindigkeitstensors werden hergeleitet. Abschließend werden einige geometrische Eigenschaften von Spiralen um Zylinder sowie um einen Kegel beschrieben. All diese Grundlagen werden später genutzt, um das Geschwindigkeitsfeld aufzustellen und eine obere Grenze für das benötigte Drehmoment abzuschätzen.

### 3.5.1 Zylinderkoordinatensystem

Für jeden Punkt P ist die Beziehung zwischen dem kartesischen und dem Zylinderkoordinatensystem durch folgende Gleichung gegeben:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r \cos \mathbf{j} \\ r \sin \mathbf{j} \\ z \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Durch Ableitung erhält man die Geschwindigkeitskomponenten:

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \mathbf{j} & -\sin \mathbf{j} & 0 \\ \sin \mathbf{j} & \cos \mathbf{j} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_r \\ v_j \\ v_z \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Die Gleichung (2) gibt die Beziehung zwischen den Geschwindigkeitskomponenten im kartesischen und Zylinderkoordinatensystem wieder.

Die Definition der Matrix für die Umformgeschwindigkeit in KK und ZK lautet wie folgt:

$$\partial \mathbf{V} = \begin{bmatrix} \frac{\partial v_x}{\partial x} & \frac{\partial v_x}{\partial y} & \frac{\partial v_x}{\partial z} \\ \frac{\partial v_y}{\partial x} & \frac{\partial v_y}{\partial y} & \frac{\partial v_y}{\partial z} \\ \frac{\partial v_z}{\partial x} & \frac{\partial v_z}{\partial y} & \frac{\partial v_z}{\partial z} \end{bmatrix} \text{ und} \quad (3)$$

$$\partial \mathbf{W} = \begin{bmatrix} \frac{\partial v_r}{\partial r} & \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial v_r}{\partial \mathbf{j}} & \frac{\partial v_r}{\partial z} \\ \frac{\partial v_j}{\partial r} & \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial v_j}{\partial \mathbf{j}} & \frac{\partial v_j}{\partial z} \\ \frac{\partial v_z}{\partial r} & \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial v_z}{\partial \mathbf{j}} & \frac{\partial v_z}{\partial z} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Der Tensor für die Umformgeschwindigkeit in KK und ZK ergibt sich zu:

$$\dot{\mathbf{e}}_{ij} = \frac{\partial \mathbf{V} + \partial \mathbf{V}^T}{2} \quad \text{und} \quad (5)$$

$$\dot{\mathbf{e}}_{ij} = \frac{\partial \mathbf{W} + \partial \mathbf{W}^T}{2}. \quad (6)$$

Die Normale der Umformgeschwindigkeit in den Koordinatenachsen ist gegeben durch

$$\dot{\mathbf{e}}_x = \frac{\partial v_x}{\partial x}, \quad \dot{\mathbf{e}}_y = \frac{\partial v_y}{\partial y}, \quad \dot{\mathbf{e}}_z = \frac{\partial v_z}{\partial z} \quad (7)$$

Das Produkt der Tensoren der Umformgeschwindigkeit in KK und ZK lässt sich wie folgt darstellen:

$$\dot{\mathbf{e}}_{ij} \dot{\mathbf{e}}_{ij} = \text{tr} \left\{ \left( \frac{\partial \mathbf{V} + \partial \mathbf{V}^T}{2} \right)^2 \right\} \quad \text{und} \quad (8)$$

$$\dot{\mathbf{e}}_{ij} \dot{\mathbf{e}}_{ij} = \text{tr} \left\{ \left( \frac{\partial \mathbf{W} + \partial \mathbf{W}^T}{2} \right)^2 \right\}. \quad (9)$$

Wobei  $\text{tr}\{\}$  die Spur einer Matrix ist.

### 3.5.2 Annahmen

Um das obere Schrankenverfahren durchzuführen, muss zunächst ein kinematisch zulässiges Geschwindigkeitsfeld verfügbar sein. Dazu wird ein Modell entwickelt, das die Bedingung der Inkompressibilität sowie die weiteren Randbedingungen (s. Formel 18,19) erfüllt. Zur Vereinfachung des Modells werden folgende Annahmen getroffen:

- das Handhabungsobjekt ist idealplastisch,
- die Schaftschraube ist starr,
- die Schaftschraube bleibt in einer rotatorischen Bewegung während des Eindringprozesses,
- das Volumen des Gewindes der Schraube ist gleich Null und
- plastisches Fließen findet nur im Gewindegang der Schraube statt.

Als Ergebnis wird erwartet, dass sich das Material in einer schraubenförmigen Bewegung in der Aussparung der Schraube nach oben bewegt. Das genaue Geschwindigkeitsfeld wird im Folgenden unter Nutzung der bereits erläuterten theoretischen Grundlagen hergeleitet (siehe auch Anhang A).

### 3.5.3 Plastische Zone der Schraubenspitze

#### Kinematische Analyse

Sei die Schaftschraube ein Referenzkoordinatensystem. Für jeden Punkt P in der plastischen Region der Schraubenspitze ergibt sich die absolute Geschwindigkeit  $\mathbf{v}$  als die Resultierende der Referenzgeschwindigkeit  $\mathbf{u}$  der Schraube und der relativen Geschwindigkeit  $\mathbf{w}$  zwischen dem plastischen Material und der Schaftschraube. Bei schraubenförmiger Bewegung der Schaftschraube ist die Geschwindigkeit  $\mathbf{u}$  gegeben durch

$$\begin{bmatrix} u_r \\ u_j \\ u_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{r}{b} \\ -1 \end{bmatrix} \cdot U, \quad (10)$$

mit  $b = \frac{p}{2p}$ , dem Koeffizienten der Steigung.

Die absolute Geschwindigkeit ist gegeben durch

$$\mathbf{v} = \mathbf{u} + \mathbf{w}. \quad (11)$$

Aus (1), folgt

$$\mathbf{u} = u_j \mathbf{e}_j + u_z \mathbf{e}_z. \quad (12)$$

Für einen Punkt P auf der Grenzfläche gibt es nur eine relative Bewegung entlang einer zum Gewinde der Schraube tangentialen Fläche. Daraus folgt, dass die relative Geschwindigkeit in zwei Komponenten zerlegt werden kann: eine entlang der tangentialen Richtung der Spirale um den Kegel und eine weitere entlang der radialen Richtung, siehe [Bild 24](#) (a). Dies gilt auch für jeden beliebigen Punkt in der plastischen Region des Kegels, siehe [Bild 24](#) (b).

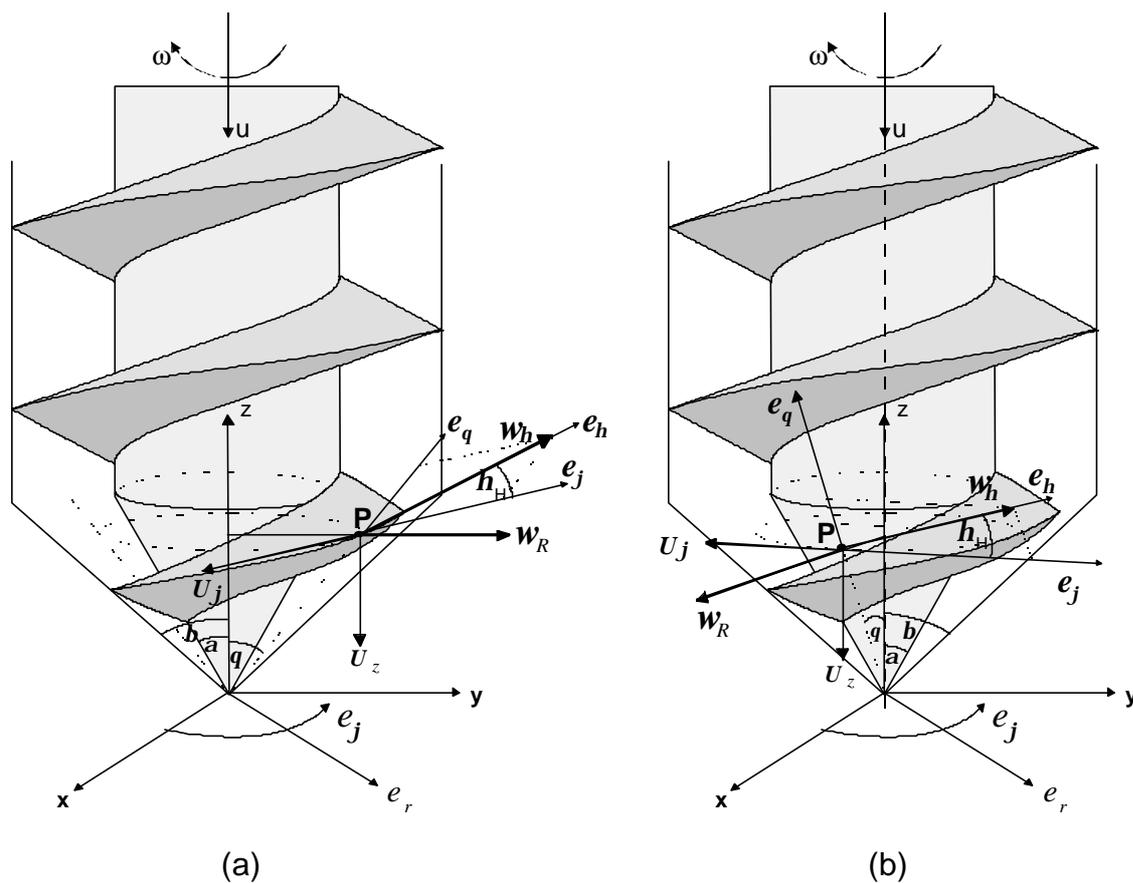


Bild 24: (a) Geschwindigkeit eines Punktes auf der Grenzfläche; (b) Geschwindigkeit eines Punktes in der plastischen Region

Folglich ergibt sich für die relative Geschwindigkeit

$$\mathbf{w} = w_h \mathbf{e}_h + w_R \mathbf{e}_r. \quad (13)$$

Weiterhin können  $\mathbf{w}$  und  $\mathbf{v}$  ausgedrückt werden als

$$\begin{bmatrix} w_r \\ w_j \\ w_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_h \sinh_H \sin q + w_R \\ w_h \cosh_H \\ w_h \sinh_H \cos q \end{bmatrix}, \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} v_r \\ v_j \\ v_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_h \sinh_H \sin q + w_R \\ w_h \cosh_H + u_j \\ w_h \sinh_H \cos q + u_z \end{bmatrix}. \quad (15)$$

### Geschwindigkeitsfeld

Für das absolute Geschwindigkeitsfeld in der plastischen Zone der Spitze der Schaftschraube gilt

$$\begin{bmatrix} v_r \\ v_j \\ v_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_3 \cdot \frac{z}{r} + I_4 \\ \left( I_1 \cdot \frac{z}{r} + I_2 \right) \cdot \frac{r}{b} \\ I_1 \cdot \frac{z}{r} + I_2 \end{bmatrix} \cdot U. \quad (16)$$

Damit ergibt sich das relative Geschwindigkeitsfeld zu:

$$\begin{bmatrix} w_r \\ w_j \\ w_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_3 \cdot \frac{z}{r} + I_4 \\ \left( I_1 \cdot \frac{z}{r} + I_2 + 1 \right) \cdot \frac{r}{b} \\ I_1 \cdot \frac{z}{r} + I_2 + 1 \end{bmatrix} \cdot U, \quad (17)$$

mit  $I_i (i = 1, \dots, 4)$ , als Geschwindigkeitskoeffizienten.

### Geschwindigkeitskoeffizienten

Das Geschwindigkeitsfeld muss die folgenden Bedingungen erfüllen:

(1) Randbedingungen

$$(i) \quad \mathbf{q} = \mathbf{a}, \quad w_R = 0; \quad (18)$$

$$(ii) \quad \mathbf{q} = \mathbf{b}, \quad w_R \cos \mathbf{b} + u_z \sin \mathbf{b} = 0, \quad \text{i.e., } w_R = -U \tan \mathbf{b}. \quad (19)$$

(2) Inkompressibilität

(a) Das Volumen der eindringenden Schaftschraube ist gleich dem Volumen des herausgepressten Materials

$$\dot{Q}_{\text{in}} = \dot{Q}_{\text{out}}. \quad (20)$$

(b) Die Gleichung für die Inkompressibilität

$$\frac{v_r}{r} + \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial v_j}{\partial j} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0. \quad (21)$$

Es gilt,  $\cot \mathbf{q} = z/r$ . Aus (15) und (18)-(19), erhalten wir

$$I_3 \cot \mathbf{a} - (I_2 + 1) \tan \mathbf{a} + (I_4 - I_1) = 0 \quad (22)$$

$$I_3 \cot \mathbf{a} - (I_2 + 1) \tan \mathbf{a} + (I_4 - I_1) = -\tan \mathbf{b}. \quad (23)$$

Das Volumen der eindringenden Schaftschraube ist

$$\dot{Q}_{\text{in}} = U \sin \mathbf{a} \cdot \left( \mathbf{p} \cdot z \tan \mathbf{a} \cdot \frac{z}{\cos \mathbf{a}} \right) = \mathbf{p} U z^2 \cdot \tan^2 \mathbf{a}. \quad (24)$$

Das Volumen des ausgetragenen Materials ist

$$\dot{Q}_{\text{out}} = \int_0^{2p} d\mathbf{j} \int_{z \tan \mathbf{a}}^{z \tan \mathbf{b}} v_z \cdot r \, dr = \mathbf{p} U z^2 \cdot [2(\tan \mathbf{b} - \tan \mathbf{a}) \mathbf{I}_1 + (\tan^2 \mathbf{b} - \tan^2 \mathbf{a}) \mathbf{I}_2]. \quad (25)$$

Aus (20) und (24)-(25), ergibt sich

$$2(\tan \mathbf{b} - \tan \mathbf{a}) \mathbf{I}_1 + (\tan^2 \mathbf{b} - \tan^2 \mathbf{a}) \mathbf{I}_2 = \tan^2 \mathbf{a}. \quad (26)$$

Aus (16) und (21), erhält man

$$\mathbf{I}_1 + \mathbf{I}_4 = 0. \quad (27)$$

Aus (22)-(23), (26)-(27), erhält man

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_1 \\ \mathbf{I}_2 \\ \mathbf{I}_3 \\ \mathbf{I}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{r} \\ -\frac{2\mathbf{r}}{\tan \mathbf{b} + \tan \mathbf{a}} + \frac{\tan^2 \mathbf{a}}{\tan^2 \mathbf{b} - \tan^2 \mathbf{a}} \\ \frac{2\mathbf{r} \tan \mathbf{b} \tan \mathbf{a}}{\tan \mathbf{b} + \tan \mathbf{a}} + \frac{\tan^2 \mathbf{b} \tan^2 \mathbf{a}}{\tan^2 \mathbf{b} - \tan^2 \mathbf{a}} \\ -\mathbf{r} \end{bmatrix}, \quad (28)$$

mit  $\mathbf{r}$  als Konstante.

Die Inkompressibilität wird durch die Gleichungen (20) und (21) redundant wiedergegeben. Dies führt zu unendlich vielen Geschwindigkeitsfeldern. Das optimale Geschwindigkeitsfeld muss so gewählt werden, dass der Energieverbrauch beim Eindringprozess minimal ist.

### Wertebereich von $\mathbf{r}$

Während des Eindringprozesses wird intuitiv erwartet, dass das Material einer Druck- und keiner Zugbelastung unterworfen ist. Damit gilt für die Geschwindigkeit

$$v_{r,j,z} \geq 0. \quad (29)$$

Dies führt zu

$$\begin{cases} \mathbf{I}_1 \cot \mathbf{q} + \mathbf{I}_2 \geq 0 \\ \mathbf{I}_3 \cot \mathbf{q} + \mathbf{I}_4 \geq 0 \end{cases}, \quad \text{mit } \mathbf{q} \in [\mathbf{a}, \mathbf{b}]. \quad (30)$$

Durch Lösen dieser Ungleichungen, erhält man

$$\mathbf{r} \in [\mathbf{r}_{\min}, \mathbf{r}_{\max}], \quad (31)$$

$$\text{mit } \mathbf{r}_{\min} = -\frac{\tan^3 \mathbf{a}}{(\tan \mathbf{b} - \tan \mathbf{a})^2}, \quad \mathbf{r}_{\max} = \frac{\tan \mathbf{b} \cdot \tan^2 \mathbf{a}}{(\tan \mathbf{b} - \tan \mathbf{a})^2}.$$

Es wird angemerkt, dass aufgrund des Wertebereichs von  $r$  unendlich viele mögliche Geschwindigkeitsfelder existieren.

### 3.5.4 Plastische Zone des Gewindeteils

Gleichzeitig wird angenommen, dass das plastische Material im Gewindegang der Schraube spiralförmig entlang dem Zylinder nach oben ausgetragen wird. Die Geschwindigkeitskomponenten in vertikaler und radialer Richtung bilden den Winkel  $h$ .

In der ringförmigen Fläche zwischen Schraubenspitze und Gewindeteil muss die Geschwindigkeit in vertikaler Richtung konstant bleiben. Basierend auf dieser Erkenntnis kann das Geschwindigkeitsfeld für den gesamten Bereich wie folgt ausgedrückt werden

$$\begin{bmatrix} v_r \\ v_j \\ v_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \left( I_1 \cdot \frac{h_0}{r} + I_2 \right) \cdot \frac{r}{b} \\ I_1 \cdot \frac{h_0}{r} + I_2 \end{bmatrix} \cdot U. \quad (32)$$

Damit ist das relative Geschwindigkeitsfeld gegeben durch

$$\begin{bmatrix} w_r \\ w_j \\ w_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \left( I_1 \cdot \frac{h_0}{r} + I_2 + 1 \right) \cdot \frac{r}{b} \\ I_1 \cdot \frac{h_0}{r} + I_2 + 1 \end{bmatrix} \cdot U. \quad (33)$$

Gleichung (16) und (32) beschreiben das absolute Geschwindigkeitsfeld des plastischen Materials im Gewindegang der Schraube, während Gleichung (17) und (33) das relative Geschwindigkeitsfeld zwischen dem plastischen Material und der Schaftschraube wiedergeben. Diese Ergebnisse bilden die Basis für die Abschätzung der oberen Schranke des zum Eindringen erforderlichen Drehmomentes.

Basierend auf dem aufgestellten Geschwindigkeitsfeld und der plastischen Verformungsenergie, werden die Reibungskräfte sowie Unstetigkeiten in den Geschwindigkeitsfeldern berechnet.

Im Detail enthalten diese:

- den Energieverbrauch durch plastisches Fließen in den Gewindegängen der Schraube,
- die Energieänderung, die durch Unstetigkeiten im Geschwindigkeitsfeld entlang der ringförmigen Fläche zwischen Schraubenspitze und Gewindeteil sowie entlang des äußeren Kegels und Zylinders von Spitze und Gewindeteil entsteht und
- die Reibungsenergie entlang des inneren Kegels und Zylinders von Schraubenspitze und Gewindeteil sowie entlang des Gewindes der Schraube.

Plastische Verformungsenergie wird im Gewindegang der Schraubenspitze und des Gewindeteils verbraucht. Weitere Energieänderungen ergeben sich durch Diskontinuitäten im Geschwindigkeitsfeld entlang den Flächen I-III sowie Reibungsenergie entlang der Flächen IV-VII Bild 25. Die errechnete Energieänderung ist äquivalent zur Leistung, die durch das Eindringmoment eingebracht wird.

### 3.5.5 Oberes Schrankenverfahren für das Eindringmoment

#### Theoretisches oberes Schrankenverfahren

Die Gleichung für den oberen Schrankenwert [PRA51, DRU51] ist gegeben durch

$$\dot{E} = \sqrt{2k} \int_V \sqrt{\dot{\mathbf{e}}_{ij} \dot{\mathbf{e}}_{ij}} dV + \int_{S_V} \mathbf{t} \cdot |\Delta \mathbf{v}| dS - \int_{S_T} T_i \cdot v_i dS, \quad (34)$$

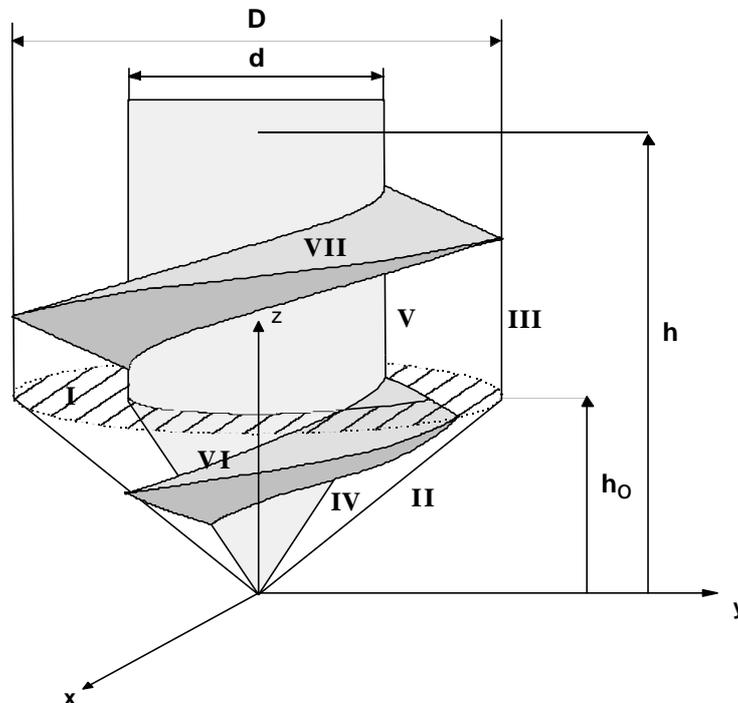
wobei  $\dot{E}$  die gesamte Energieänderung im Werkstück beschreibt. Der erste Term der Gleichung (34) gibt den Anteil der Energie wieder, die in plastisches Fließen umgewandelt wird. Der zweite Term steht für die Energieänderung durch Reibung an den äußeren Grenzflächen und durch Unstetigkeiten der Geschwindigkeit an den inneren Grenzflächen. Der letzte Term beinhaltet Energieänderungen, die durch Zugbelastungen hervorgerufen werden, und ist bei diesem Prozess gleich Null.

Die Änderung der Gesamtenergie setzt sich aus neun Teilen zusammen.

$$\dot{E} = \dot{E}_H + \dot{E}_B + \dot{E}_S + \dot{E}_{HO} + \dot{E}_{BO} + \dot{E}_{HI} + \dot{E}_{BI} + \dot{E}_{HS} + \dot{E}_{BS} \quad (35)$$

$\dot{E}_H$  und  $\dot{E}_B$  beschreiben die Energieänderung, durch plastisches Fließen des Materials zwischen den Gewindegängen an der Schraubenspitze und am Gewindeteil.  $\dot{E}_S$ ,  $\dot{E}_{HO}$  und  $\dot{E}_{BO}$  beschreiben die durch Unstetigkeiten der Geschwindigkeit hervorgerufenen Energieänderungen im Bereich der ringförmigen Fläche zwischen Schraubenspitze und Gewindeteil (I), entlang der äußeren kegelförmigen Grenzfläche der Schraubenspitze (II) sowie der zylinderförmigen äußeren Grenzfläche des Gewindeteils (III).

$\dot{E}_{HI}$ ,  $\dot{E}_{BI}$ ,  $\dot{E}_{HS}$  und  $\dot{E}_{BS}$  sind Energieänderungen durch Reibung entlang der inneren kegelförmigen Grenzfläche (IV) und an den Gewindegängen der Schraubenspitze (VI) sowie an der inneren zylinderförmigen Grenzfläche (V) und den Gewindegängen des Gewindeteils (VII). Bild 25 zeigt die geometrischen Grenzflächen. Im Weiteren werden die einzelnen Terme berechnet.



- I Ringförmige Fläche zwischen Gewindeteil und Schraubenspitze
- II Äußere kegelförmige Fläche der Schraubenspitze (HO)
- III Äußere zylinderförmige Fläche des Gewindeteils (BO)
- IV Innere kegelförmige Fläche der Schraubenspitze (HI)
- V Innere zylinderförmige Fläche des Gewindeteils (BI)
- VI Grenzfläche der Gewindegänge an der Schraubenspitze
- VII Grenzfläche der Gewindegänge am Gewindeteil

Bild 25: Äußere Grenzflächen mit Diskontinuitäten der Geschwindigkeit (I-III) und innere Grenzflächen mit Reibung (IV-VII).

### 3.5.6 Energieänderungen

**Energieänderung durch plastisches Fließen im Schraubengang der Schraubenspitze  $\dot{E}_H$**

Ausgehend vom Geschwindigkeitsfeld im Bereich der Schraubenspitze, ergibt sich für das Produkt der Tensoren

$$\dot{\mathbf{e}}_{ij} \dot{\mathbf{e}}_{ij} = \left[ \frac{1}{r^2} \cdot f_1(\mathbf{q}) + f_2(\mathbf{q}) \right] \cdot U^2, \quad (36)$$

mit

$$f_1(\mathbf{q}) = (\mathbf{I}_3 \cot \mathbf{q} + \mathbf{I}_4)^2 + (\mathbf{I}_3 \cot \mathbf{q})^2 + \mathbf{I}_1^2 + \frac{1}{2} \cdot (\mathbf{I}_1 \cot \mathbf{q} - \mathbf{I}_3)^2 \quad \text{und} \quad (37)$$

$$f_2(\mathbf{q}) = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{\mathbf{I}_1}{b} \right)^2 \cdot (\cot^2 \mathbf{q} + 1). \quad (38)$$

Das Volumenelement des plastischen Materials ist

$$dV = \left( \frac{r}{\sin \mathbf{q}} \right)^2 dr d\mathbf{j} d\mathbf{q}. \quad (39)$$

Die Energieänderung durch plastische Verformung ist gegeben durch

$$\dot{E}_H = \sqrt{2k} \int_0^{2p} d\mathbf{j} \int_a^b d\mathbf{q} \int_0^{h_0 \tan \mathbf{q}} \sqrt{\left[ \frac{1}{r^2} \cdot f_1(\mathbf{q}) + f_2(\mathbf{q}) \right] \cdot U^2} \cdot \left( \frac{r}{\sin \mathbf{q}} \right)^2 dr. \quad (40)$$

Es gilt,

$$\dot{E}_H = kU \cdot m_H, \quad (41)$$

dabei ist  $m_H$  der zugehörige Koeffizient für die Energieänderung  $\dot{E}_H$ .

Es gibt zwei Fälle für den Wert von  $m_H$ :

(1) Wenn  $\mathbf{I}_1 = 0$ , dann

$$m_H = 2p \mathbf{I}_3 h_0^2 \cdot I_H, \quad (42)$$

mit

$$I_H = \ln \frac{2 \cot \mathbf{a} + \sqrt{1 + 4 \cot^2 \mathbf{a}}}{2 \cot \mathbf{b} + \sqrt{1 + 4 \cot^2 \mathbf{b}}} + \frac{\sqrt{1 + 4 \cot^2 \mathbf{b}}}{2 \cot \mathbf{b}} - \frac{\sqrt{1 + 4 \cot^2 \mathbf{a}}}{2 \cot \mathbf{a}}. \quad (43)$$

(2) Wenn  $\mathbf{I}_1 \neq 0$ , dann

$$m_H = \frac{4\sqrt{2}pb^2}{3\mathbf{I}_1^2} \cdot \bar{I}_H, \quad (44)$$

mit

$$\bar{I}_H = \int_a^b \left\{ [f_1(\mathbf{q}) + f_2(\mathbf{q}) \cdot (h_0 \tan \mathbf{q})^2]^{\frac{3}{2}} - [f_1(\mathbf{q})]^{\frac{3}{2}} \right\} d\mathbf{q}. \quad (45)$$

$\bar{I}_H$  kann mit numerischen Methoden kalkuliert werden (z.B. Newton-Verfahren).

### Energieänderung durch plastisches Fließen in der Aussparung des Gewindeteils $\dot{E}_B$

Für das Geschwindigkeitsfeld am Gewindeteil ist das Produkt der Tensoren gegeben durch

$$\dot{\mathbf{e}}_{ij} \dot{\mathbf{e}}_{ij} = \frac{1}{2} \cdot \left[ \left( \frac{?_1}{b} \cdot \frac{h_0}{r} \right)^2 + \left( \frac{?_1 h_0}{r^2} \right)^2 \right] \cdot U^2. \quad (46)$$

Für das Volumenelement gilt,

$$dV = r dr d\mathbf{j} dz. \quad (47)$$

Damit ergibt sich für die Energieänderung in der Aussparung des Gewindeteils

$$\dot{E}_B = \sqrt{2k} \int_0^{2p} d\mathbf{j} \int_{h_0}^h dz \int_{d/2}^{D/2} \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \left[ \left( \frac{I_1}{b} \cdot \frac{h_0}{r} \right)^2 + \left( \frac{I_1 h_0}{r^2} \right)^2 \right]} \cdot U^2 \cdot r dr. \quad (48)$$

Sei

$$\dot{E}_B = kU \cdot m_B \quad (49)$$

mit  $m_B$  als Energiekoeffizient von  $\dot{E}_B$ . Es gilt,

$$m_B = 2p |I_1 h_0| (h - h_0) \cdot I_B \quad \text{und} \quad (50)$$

$$I_B = \frac{\sqrt{D^2 + 4b^2} - \sqrt{d^2 + 4b^2}}{2b} - \ln \frac{d \cdot (2b + \sqrt{D^2 + 4b^2})}{D \cdot (2b + \sqrt{d^2 + 4b^2})}. \quad (51)$$

### Betrag der Energieänderung durch Unstetigkeiten der Geschwindigkeit in der ringförmigen Fläche zwischen Schraubenspitze und Gewindeteil $\dot{E}_S$ ( $z = h_0$ )

In der ringförmigen Schnittfläche  $z = h_0$ , gilt für die Geschwindigkeitsänderung

$$\Delta v = \sqrt{(\Delta v_r)^2 + (\Delta v_j)^2 + (\Delta v_z)^2} \Big|_{z=h_0} = \left( I_3 \cdot \frac{h_0}{r} + I_4 \right) \cdot U. \quad (52)$$

Die infinitesimale Fläche ist gegeben durch

$$dS = r dr d\mathbf{j}. \quad (53)$$

Für die Energieänderung ergibt sich damit

$$\dot{E}_S = \int_0^{2p} d\mathbf{j} \int_{d/2}^{D/2} k \cdot \left( I_3 \cdot \frac{h_0}{r} + I_4 \right) \cdot U \cdot r dr. \quad (54)$$

Sei

$$\dot{E}_S = kU \cdot m_S, \quad (55)$$

mit  $m_S$  als Koeffizient für  $\dot{E}_S$ . Es gilt

$$m_S = 2pI_S \text{ und} \quad (56)$$

$$I_S = \frac{I_3 h_0 (D-d)}{2} + \frac{I_4 (D^2 - d^2)}{8}. \quad (57)$$

**Energieänderung durch Geschwindigkeitsdiskontinuität auf der äußeren Kegelfläche der Schraubenspitze  $\dot{E}_{HO}$  ( $q = b$ )**

Auf der äußeren Kegelfläche gilt für die Geschwindigkeitsdiskontinuität

$$\Delta v = \sqrt{v_r^2 + v_j^2 + v_z^2} \Big|_{q=b} = \sqrt{(I_3 \cot b + I_4)^2 + (I_1 \cot b + I_2)^2 \cdot \left( \frac{r^2}{b^2} + 1 \right)} \cdot U. \quad (58)$$

Dabei sind  $r, j$  die Parameter. Die infinitesimale Fläche ist gegeben durch

$$dS = \frac{r}{\sin b} dr dj. \quad (59)$$

Daraus ergibt sich für die Energieänderung

$$\cdot \quad (60)$$

Sei

$$\dot{E}_{HO} = kU \cdot m_{HO}, \quad (61)$$

mit  $m_{HO}$  dem Koeffizienten für  $\dot{E}_{HO}$ .

Aufgrund des möglichen Wertebereichs von  $r$ , ergeben sich zwei Fälle für den Wert von  $m_{HO}$ :

(1) wenn  $r = r_{\max}$ , dann  $I_1 \cot b + I_2 = I_3 \cot b + I_4 = 0$ . Daraus folgt

$$m_{HO} = 0. \quad (62)$$

(2) wenn  $r \in [r_{\min}, r_{\max})$ , dann

$$m_{HO} = \frac{2p(I_1 \cot b + I_2)}{b \sin b} \cdot I_{HO} \quad (63)$$

mit

$$I_{\text{HO}} = \frac{1}{3} \cdot \left[ (c_1^2 + h_0^2 \tan^2 \mathbf{b})^{\frac{3}{2}} - c_1^3 \right] \text{ und} \quad (64)$$

$$c_1 = b \cdot \sqrt{\left( \frac{I_3 \cot \mathbf{b} + I_4}{I_1 \cot \mathbf{b} + I_2} \right)^2 + 1}. \quad (65)$$

**Energieänderung durch Geschwindigkeitsdiskontinuität auf der äußeren zylindrischen Oberfläche des Gewindeteils  $\dot{E}_{\text{BO}}$  ( $r = 0.5D$ )**

Für die Geschwindigkeitsdiskontinuität gilt

$$\Delta v = \sqrt{v_r^2 + v_j^2 + v_z^2} \Big|_{r=0.5D} = \left( I_1 \cdot \frac{2h_0}{D} + I_2 \right) \cdot \sqrt{1 + \left( \frac{D}{2b} \right)^2} \cdot U. \quad (66)$$

Die infinitesimale Fläche ist

$$dS = \frac{D}{2} d\mathbf{j} dz. \quad (67)$$

Damit gilt für die Energieänderung

$$\dot{E}_{\text{BO}} = \int_0^{2p} d\mathbf{j} \int_{h_0}^h k \cdot \left( I_1 \cdot \frac{2h_0}{D} + I_2 \right) \cdot \sqrt{1 + \left( \frac{D}{2b} \right)^2} \cdot U \cdot \frac{D}{2} dz. \quad (68)$$

Sei

$$\dot{E}_{\text{BO}} = kU \cdot m_{\text{BO}}, \quad (69)$$

mit  $m_{\text{BO}}$  dem Koeffizienten von  $\dot{E}_{\text{BO}}$ . Es gilt

$$m_{\text{BO}} = \mathbf{p}(h - h_0) \cdot (2I_1 h_0 + I_2 D) \cdot \sqrt{1 + \left( \frac{D}{2b} \right)^2}. \quad (70)$$

**Energieänderung durch Reibung an der inneren konusförmigen Oberfläche des Schraubenkopfes  $\dot{E}_{\text{HI}}$  ( $q = a$ )**

Für die Geschwindigkeitsdiskontinuität gilt

$$\Delta v = \sqrt{w_r^2 + w_j^2 + w_z^2} \Big|_{q=a} = \sqrt{(I_3 \cot \mathbf{a} + I_4)^2 + (I_1 \cot \mathbf{a} + I_2 + 1)^2} \cdot \left( \frac{r^2}{b^2} + 1 \right) \cdot U. \quad (71)$$

Die infinitesimale Fläche ist

$$dS = \frac{r}{\sin \mathbf{a}} dr d\mathbf{j} . \quad (72)$$

Damit gilt für die Energieänderung

$$\dot{E}_{\text{HI}} = \int_0^{2p} d\mathbf{j} \int_0^{h_0 \tan \mathbf{a}} k \cdot \sqrt{(\mathbf{I}_3 \cot \mathbf{a} + \mathbf{I}_4)^2 + (\mathbf{I}_1 \cot \mathbf{a} + \mathbf{I}_2 + 1)^2 \left( \frac{r^2}{b^2} + 1 \right)} \cdot U \cdot \frac{r}{\sin \mathbf{a}} dr . \quad (73)$$

Sei

$$\dot{E}_{\text{HI}} = kU \cdot m_{\text{HI}} , \quad (74)$$

mit  $m_{\text{HI}}$  dem Koeffizienten von  $\dot{E}_{\text{HI}}$ . Es gilt

$$m_{\text{HI}} = \frac{2p(\mathbf{I}_1 \cot \mathbf{a} + \mathbf{I}_2 + 1)}{b \sin \mathbf{a}} \cdot \mathbf{I}_{\text{HI}} , \quad (75)$$

$$\mathbf{I}_{\text{HI}} = \frac{1}{3} \cdot \left[ (c_2^2 + h_0^2 \tan^2 \mathbf{a})^{\frac{3}{2}} - c_2^3 \right] \text{ und} \quad (76)$$

$$c_2 = b \cdot \sqrt{\left( \frac{\mathbf{I}_3 \cot \mathbf{a} + \mathbf{I}_4}{\mathbf{I}_1 \cot \mathbf{a} + \mathbf{I}_2 + 1} \right)^2 + 1} . \quad (77)$$

**Energieänderung durch Reibung an der inneren zylindrischen Oberfläche des Gewindeteils  $\dot{E}_{\text{BI}}$  ( $r = 0.5d$ )**

Für die Unstetigkeit der Geschwindigkeit gilt

$$\Delta v = \sqrt{w_r^2 + w_j^2 + w_z^2} \Big|_{r=0.5d} = \left( \mathbf{I}_1 \cdot \frac{2h_0}{d} + \mathbf{I}_2 + 1 \right) \cdot \sqrt{1 + \left( \frac{d}{2b} \right)^2} \cdot U . \quad (78)$$

Die infinitesimale Fläche ist

$$dS = \frac{d}{2} d\mathbf{j} dz . \quad (79)$$

Damit gilt für die Energieänderung

$$\dot{E}_{\text{BI}} = \int_0^{2p} d\mathbf{j} \int_{h_0}^h k \cdot \left( \mathbf{I}_1 \cdot \frac{2h_0}{d} + \mathbf{I}_2 + 1 \right) \cdot \sqrt{1 + \left( \frac{d}{2b} \right)^2} \cdot U \cdot \frac{d}{2} dz . \quad (80)$$

Sei

$$\dot{E}_{\text{BI}} = kU \cdot m_{\text{BI}} , \quad (81)$$

mit  $m_{\text{BI}}$  dem Koeffizienten für  $\dot{E}_{\text{BI}}$ . Es gilt

$$m_{\text{BI}} = \mathbf{p}(h - h_0) \cdot [2I_1 h_0 + (I_2 + 1)d] \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{d}{2b}\right)^2}. \quad (82)$$

### Energieänderung durch Reibung an der Gewindeoberfläche des Schraubenkopfes $\dot{E}_{\text{HS}}$

Für die Unstetigkeit der Geschwindigkeit gilt

$$\Delta v = \sqrt{w_r^2 + w_j^2 + w_z^2} = \sqrt{(I_3 \cot \mathbf{q} + I_4)^2 + (I_1 \cot \mathbf{q} + I_2 + 1)^2 \cdot \left(\frac{r^2}{b^2} + 1\right)} \cdot U. \quad (83)$$

Die infinitesimale Fläche ist

$$dS = b^2 \mathbf{f} \sec^2 \mathbf{q} \cdot \sqrt{1 + (\mathbf{f} \tan \mathbf{q})^2} d\mathbf{f} d\mathbf{q}. \quad (84)$$

Damit gilt für die Energieänderung

$$\begin{aligned} \dot{E}_{\text{HS}} = 2 \int_a^b d\mathbf{q} \int_0^{h_0/b} k \cdot \sqrt{(I_3 \cot \mathbf{q} + I_4)^2 + (I_1 \cot \mathbf{q} + I_2 + 1)^2 (1 + \mathbf{f}^2 \tan^2 \mathbf{q})} \cdot U \cdot \\ b^2 \mathbf{f} \sec^2 \mathbf{q} \sqrt{1 + \mathbf{f}^2 \tan^2 \mathbf{q}} d\mathbf{f} \end{aligned} \quad (85)$$

Sei

$$\dot{E}_{\text{HS}} = kU \cdot m_{\text{HS}}, \quad (86)$$

mit  $m_{\text{HS}}$  dem Koeffizienten für  $\dot{E}_{\text{HS}}$ .

Sei  $t = \cot \mathbf{q}$ , dann ist

$$m_{\text{HS}} = 2b^2 I_{\text{HS}} \text{ und} \quad (87)$$

$$I_{\text{HS}} = \int_{\cot b}^{\cot a} g(t) dt, \quad (88)$$

mit

$$\begin{aligned} g_1(t) &= \frac{I_1 t + I_2 + 1}{t^4}, & g_2(t) &= \frac{I_3 t + I_4}{I_1 t + I_2 + 1}, \\ g_3(t) &= \sqrt{1 + \left[\frac{g_2(t)}{\sqrt{2}}\right]^2} \cdot t, & g_4(t) &= \frac{g_2(t)}{\sqrt{2}} \cdot t, & g_5(t) &= \sqrt{g_3^2(t) + \left(\frac{h_0}{b}\right)^2}, \\ g_6(t) &= \sqrt{g_5^4(t) - g_4^4(t)}, & g_7(t) &= \sqrt{g_3^4(t) - g_4^4(t)}, \\ g_8(t) &= \frac{1}{4} \cdot \left[ g_5^2(t) \cdot g_6(t) - g_3^2(t) \cdot g_7(t) - g_4^4(t) \cdot \ln \frac{g_5^2(t) + g_6(t)}{g_3^2(t) + g_7(t)} \right] \text{ und} \\ g(t) &= g_1(t) \cdot g_8(t). \end{aligned} \quad (89)$$

## Energieänderung durch Reibung entlang der Gewindeoberfläche des Gewindeteils

Die Unstetigkeit im Geschwindigkeitsfeld ist

$$\Delta v = \sqrt{w_r^2 + w_j^2 + w_z^2} = \left( I_1 \cdot \frac{h_0}{r} + I_2 + 1 \right) \cdot \sqrt{1 + \left( \frac{r}{b} \right)^2} \cdot U. \quad (90)$$

Die infinitesimale Fläche des Gewindes am Gewindeteil ist

$$dS = \sqrt{r^2 + b^2} dr d\mathbf{f}. \quad (91)$$

Für die Energieänderung gilt

$$\dot{E}_{BS} = 2 \int_{h_0/b}^{h/b} d\mathbf{f} \int_{d/2}^{D/2} k \cdot \left( I_1 \cdot \frac{h_0}{r} + I_2 + 1 \right) \cdot \sqrt{1 + \left( \frac{r}{b} \right)^2} \cdot U \cdot \sqrt{r^2 + b^2} dr. \quad (92)$$

Sei

$$\dot{E}_{BS} = kU \cdot m_{BS}, \quad (93)$$

mit  $m_{BS}$  dem Koeffizienten von  $\dot{E}_{BS}$ . Es gilt

$$m_{BS} = \frac{2(h - h_0)}{b^2} \cdot I_{BS} \text{ und} \quad (94)$$

$$I_{BS} = \frac{I_2 + 1}{24} \cdot (D^3 - d^3) + \frac{I_1 h_0}{8} \cdot (D^2 - d^2) + \frac{(I_2 + 1)b^2}{2} \cdot (D - d) + I_1 h_0 b^2 \cdot \ln \frac{D}{d}. \quad (95)$$

### 3.6 Berechnung des Eindringmoments

Es sind nun alle Anteile der durch plastische Verformung, Reibung und Unstetigkeiten hervorgerufenen Energieänderungen berechnet. Daraus ergibt sich die Änderung der Gesamtenergie zu

$$\dot{E} = kU \cdot (m_H + m_B + m_S + m_{HO} + m_{BO} + m_{HI} + m_{BI} + m_{HS} + m_{BS}). \quad (96)$$

Die Energieänderung für das Eindringmoment ergibt sich zu

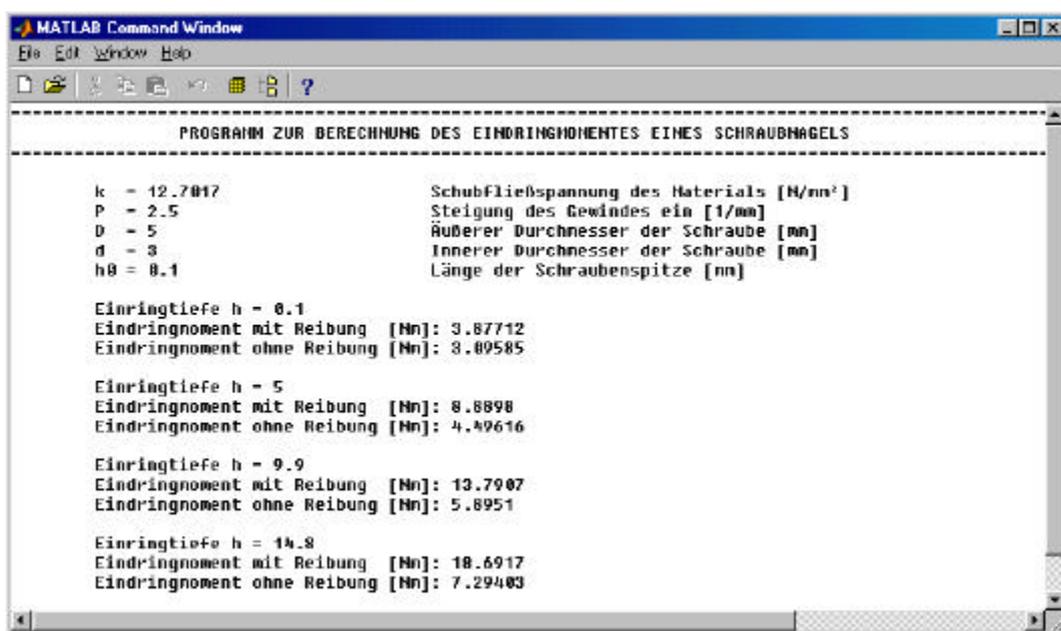
$$\dot{E} = T \cdot \frac{U}{b}. \quad (97)$$

Aus (96) und (97), erhalten wir

$$T = kb \cdot (m_H + m_B + m_S + m_{HO} + m_{BO} + m_{HI} + m_{BI} + m_{HS} + m_{BS}). \quad (98)$$

Die Gleichung (98) beschreibt die obere Grenze für das Eindringmoment einer Schaftschraube.

Das entwickelte Modell zur Ermittlung der oberen Schranke des Eindringmomentes einer Schaftschraube in einen plastischen Werkstoff wurde in MATLAB implementiert (Bild 26). Nach Eingabe der Schraubenparameter  $d$  (innerer Durchmesser der Schraube),  $D$  (äußerer Durchmesser der Schraube),  $p$  (Steigung der Schraube) und  $h_0$  (Länge der Schraubenspitze) sowie der Schubfließspannung  $k$  des Materials und der maximalen Eindringtiefe  $h$ , wird die obere Schranke für das erforderliche Eindringmoment für die jeweilige Eindringtiefe berechnet. Mit Hilfe dieser Software ist eine schnelle und einfache überschlägige Berechnung möglich. Das Modell wird im Folgenden genutzt, um abhängig vom Einsatzfeld das Energiesystem für zwei flexible Demontagegreifer auszuwählen.



```

MATLAB Command Window
-----
PROGRAMM ZUR BERECHNUNG DES EINDRINGMOMENTES EINES SCHRAUBNAGELS
-----
k = 12.7#17          Schubfließspannung des Materials [N/mm²]
P = 2.5             Steigung des Gewindes ein [1/mm]
D = 5               Äußerer Durchmesser der Schraube [mm]
d = 3               Innerer Durchmesser der Schraube [mm]
h0 = 0.1            Länge der Schraubenspitze [mm]

Eindringtiefe h = 0.1
Eindringmoment mit Reibung [Nm]: 3.87712
Eindringmoment ohne Reibung [Nm]: 3.89585

Eindringtiefe h = 5
Eindringmoment mit Reibung [Nm]: 8.8898
Eindringmoment ohne Reibung [Nm]: 4.49616

Eindringtiefe h = 9.9
Eindringmoment mit Reibung [Nm]: 13.7907
Eindringmoment ohne Reibung [Nm]: 5.8951

Eindringtiefe h = 14.8
Eindringmoment mit Reibung [Nm]: 18.6917
Eindringmoment ohne Reibung [Nm]: 7.29403

```

Bild 26: Implementierung in MATLAB

### 3.7 Berechnung der übertragbaren Normalkräfte

Die erzeugten schraubenförmigen Wirkflächen können je nach Werkstoff Eindringtiefe und Schraubengeometrie verschiedene Kräfte und Momente übertragen. Die Belastbarkeit von Schraubverbindungen, mit durch die Schrauben selbst geformten Gewinden, werden als Verbindungen eigener Art klassifiziert. Erkenntnisse und Regeln normaler Schraubverbindungen sind hier nicht anwendbar. Es fehlen Informationen über die Belastbarkeit dieser Schraubverbindungen, die weniger von der Festigkeit der Schraube, als vielmehr vom Material, in dem das Muttergewinde erzeugt wird, abhängig sind [BAU91].

Versagenskriterium für die Verbindung ist die Abscherung des durch den Endeffektor erzeugten Gewindes. Die Gewindgänge werden zylinderförmig abgeschert und bleiben im Endeffektor hängen (Bild 27).



Bild 27: Schraube mit abgescherten Gewindegängen

In diesem Moment löst sich das Handhabungsobjekt. Der Prozess wird nicht ausgeführt, statt dessen kommt es zu einer Gefährdung für Mensch und Maschine. Zur Vermeidung dieser Gefährdung werden vorhandene Modelle genutzt, um die jeweilige übertragbare Normalkraft überschlägig abschätzen zu können. Durch die Einbeziehung von Sicherheitsfaktoren kann diese Gefährdung ausgeschlossen werden.

Die Normalkraft wird über die Fläche der Gewindeflanken in das Material eingebracht. Bei übermäßiger Belastung schert das Material ab. Im Handhabungsobjekt entsteht ein zylinderförmiges Loch. Zur überschlägigen Berechnung dieser Normalkraft wird in [ERH99] ein einfaches analytisches Modell vorgestellt. Dabei wird zugrunde gelegt, dass ein Zylinder, der dem Außendurchmesser der Schraube entspricht, abgeschert wird. Nach TRESCA [TRE68] kann beim einachsigen Spannungszustand aus der Reißfestigkeit  $R_M$  die Schubfließspannung  $k$  zu:

$$k = \frac{1}{2} R_M \quad (99)$$

berechnet werden.

Die Normalkraft  $F_N$  zum Abscheren der Schraube aus dem erzeugten Gewinde ergibt sich nach ERHARD [ERH99] aus dem Produkt der abgescherten Fläche und der Schubfließspannung  $k$  zu:

$$F_N = p * D * h * k, \quad (100)$$

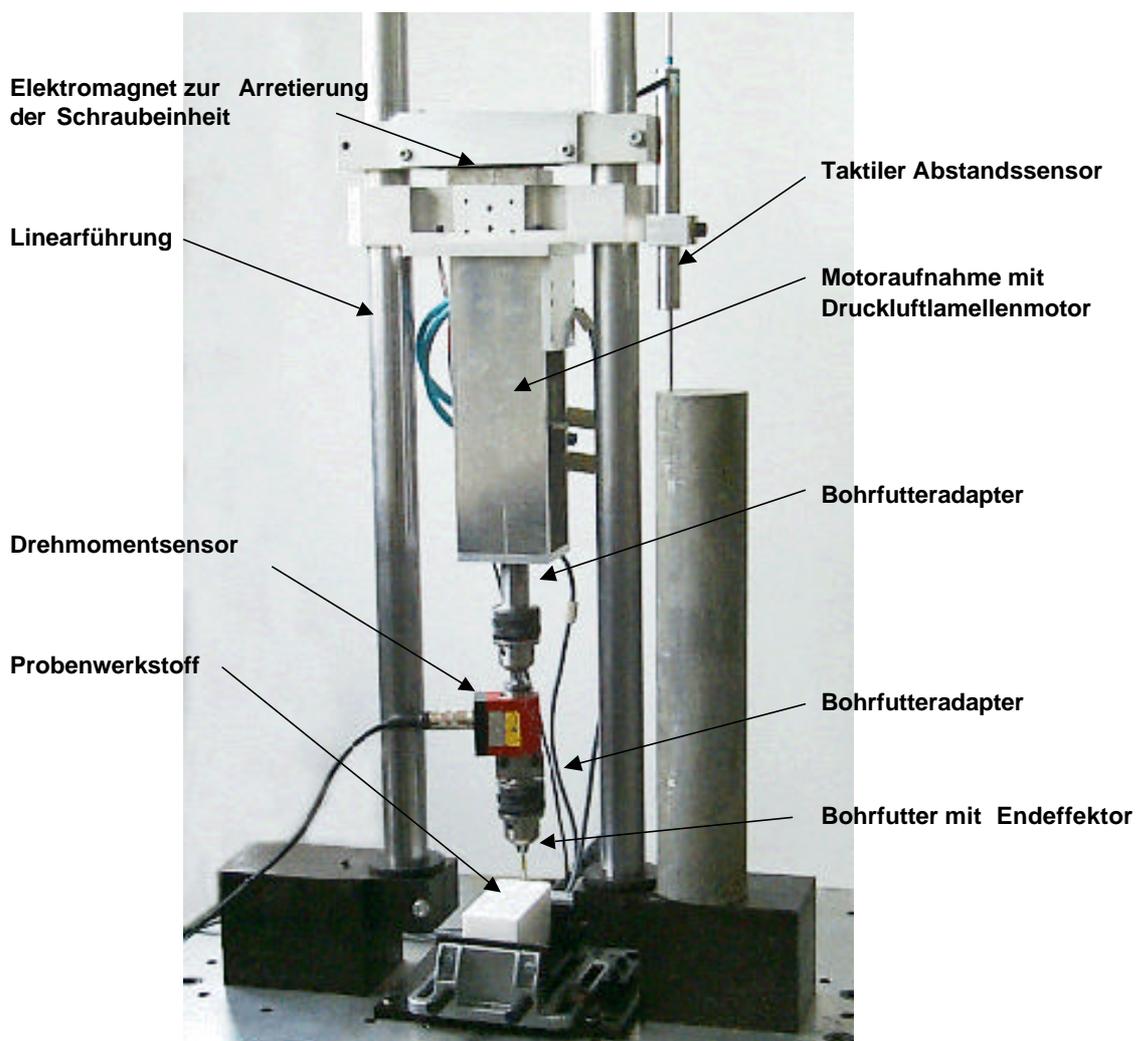
wobei  $D$  dem Außendurchmesser der Schraube und  $h$  der Eindringtiefe der Schraube entspricht.

Kräfte und Momente, die z.B. durch Verbindungselemente oder Gewichtskräfte nicht in Richtung der Normalkraft wirken, können mit diesem Modell nicht berechnet werden. Diese sind in der Regel abhängig vom jeweiligen Handhabungsobjekt, so dass sie vorab nicht berechnet werden können. In der Regel wird man den Greifer jedoch so einsetzen, dass die größten auftretenden Kräfte parallel zum Endeffektor verlaufen. Somit ist das Modell ausreichend, um die übertragbaren Kräfte zum Lösen und Handhaben bei gewindefurchenden Greifern abzuschätzen.

## 4 Experimentelle Überprüfung

### 4.1 Eindringmoment

Zur experimentellen Überprüfung des analytischen Modells ist die Messung des Eindringmoments einer Schraube in Abhängigkeit der Eindringtiefe erforderlich. Dazu wird ein Messstand konzipiert und umgesetzt. Die Messung erfolgte entsprechend den Werkstoffkennwerten bei einer Umgebungstemperatur von 20°C (Bild 28).



**Bild 28:** Experimenteller Aufbau zur Messung von Drehmoment und Eindringtiefe

Zur Erzeugung des Drehmomentes wird ein Druckluftlamellenmotor der Firma Deprag und Schulz GmbH des Typs 67-066 verwendet. Die Nennleistung des Motors liegt bei 600 Watt. Er verfügt über ein maximales Drehmoment von 57 Nm und einer Leerlaufdrehzahl von 300 U/min. Der Luftverbrauch beträgt ca. 0,85 m<sup>3</sup>/min. Der Motor befindet sich in einer Aufnahme, die mit Gleitlagern aus Spezialkunststoff auf

zwei Linearachsen geführt. Über eine Hülse mit Passfeder wird die Welle des Motors mit einem Bohrfutter verbunden. In dieses Bohrfutter wird die Antriebsseite des Drehmomentsensors eingespannt. An der Abtriebsseite ist über einen Adapter wiederum ein Bohrfutter befestigt, in das die verschiedenen Endeffektoren eingespannt werden können. Ein taktile Sensor ist höhenverstellbar an der Aufnahme des Motors befestigt.

Der Motor wird über ein 3/2-Wege-Ventil der Firma Festo mit Druckluft versorgt. Zum Schalten des elektrisch steuerbaren Ventils werden Relais verwendet, die durch eine AD Wanklerkarte des Typs BMC STR-PC16 gesteuert werden. Somit kann der Motor am Rechner durch Betätigen des entsprechenden Buttons auf der Benutzeroberfläche, in Rechts- und Linkslauf versetzt oder gestoppt werden.

### **Sensorik**

Der eingesetzte Drehmomentsensor der Firma Newport Omega Electronics des Typs TQ503-63 hat einen Messbereich von 0-63 Nm bei einer Genauigkeit von 0,002 %. Die vom Drehmomentsensor aufgenommenen Messwerte werden zunächst an das Newport Panel Meter vom Type IFNS 1000-1/E und dann über eine serielle Schnittstelle an einen Rechner weitergeleitet.

Bei dem taktilen Abstandsmesssystem handelt es sich um einen Sensor vom Typ IVT 25 der Firma Megatron. Der Abstandssensor hat einen Messbereich von -25mm bis +25mm bei einer Nichtlinearität von 0,5%. Er wird durch ein stabilisiertes Netzteil versorgt. Die Ausgangsspannung wird durch eine AD-Wanklerkarte (BMC STR-PC16) aufgenommen. Die Messkarte hat 16 Kanäle, eine Auflösung von 12 Bit und ermöglicht hoch genaue und schnelle Messungen (Summenabtastrate 100kHz). Ein eigener DC/DC Wandler sorgt für eine störungsfreie Stromversorgung der Messelektronik.

### **Steuerung**

Für die Steuerung des Versuchsablaufs sowie die Erfassung, Verarbeitung, Auswertung und Speicherung der Messwerte wird mit Hilfe von Delphi 4.0 (Borland) eine Steuerungssoftware entwickelt. Diese objektorientierte Programmiersprache erlaubt es, mit geringem Aufwand eine benutzerfreundliche Oberfläche sowie eine graphische Darstellung der Messwerte zu implementieren. Die erzeugte Oberfläche besteht im Wesentlichen aus einer graphischen Darstellung der Eindringtiefe zum Eindringmoment und den Buttons zur Motorsteuerung (Bild 30). Durch die Software werden die entsprechenden Aus- und Eingänge der AD Wanklerkarte gesetzt bzw. ausgelesen.

## Probenwerkstoffe

Zur experimentellen Überprüfung des Modells werden verschiedene Kunststoffe und Schrauben unterschiedlichen Durchmessers untersucht. Die Kunststoffe werden anhand der Werkstoffkennwerte und aufgrund ihrer Verbreitung ausgewählt. Wie bereits erwähnt, kommen am häufigsten Polyethylene und Polystyrol zum Einsatz. Zusätzlich zu diesen Werkstoffen, deren Schubspannung relativ ähnlich ist, wird der Werkstoff Teflon mit einer geringen Schubspannung hinzugezogen. Damit ist das Werkstoffspektrum der Handhabungsobjekte sowie eine breite Streuung der Eingangsgrößen gegeben. Weiterhin werden Proben aus Komponenten einer Waschmaschine untersucht. Je nach Herstellungsprozess, Werkstoffzusätzen und Umgebungseinflüssen ergeben sich für Kunststoffe verschiedene mechanische, elektrische und thermische Eigenschaften. In Tabelle 4 sind die verwendeten Werkstoffe sowie Reißfestigkeit angegeben.

Werkstoffnummer	Bezeichnung	Reißfestigkeit $R_M$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Bemerkung
1	Polyethylen (PE)	44	Hersteller Murfeldt Kunststoffe GmbH (Bezeichnung Werkstoff "S"® grün)
2	Polystyrol (PS)	53	Hersteller Kern GmbH Technische Kunststoffteile (Werkstoffnr.: 2101)
3	Teflon (PTFE)	27	Hersteller Grünberg Kunststoffe GmbH (Bezeichnung Lubriflon rein)
4	Polypropylen (PP)	48	Laugenbehälter Waschmaschine (Eurowasher Bosch/Siemens)
5	Polystyrol (PS)	54	Bedienblende Waschmaschine (Eurowasher Bosch/Siemens)

Tabelle 4: Verwendete Werkstoffe mit Kennwerten

Entscheidend für die Höhe des Eindringmoments sowie die übertragbaren Normalkräfte ist die Schubfließspannung  $k$  des Werkstoffs, die sich nach TRESKA [TRE68] auch aus der Reißfestigkeit  $R_M$  ermitteln lässt (s. Gleichung 99).

## Endeffektoren

In Vorversuchen mit verschiedenen Schraubentypen von verschiedenen Herstellern werden geeignete Schrauben ausgewählt, mit denen die experimentellen Untersuchungen durchgeführt werden (Bild 29).



Bild 29: Selbstschneidende Schrauben (v.o.n.u. 12 mm Holzschraube DIN 571, SPAX<sup>®</sup>-Schraube 6 mm, 5 mm, 4,5 mm)

Am geeignetsten erwiesen sich sogenannte SPAX<sup>®</sup>-Schrauben von der Firma Altenloh, Brinck & Co. (ABC Verbindungstechnik). Diese Schrauben sind dafür ausgelegt, ohne Kernloch mit geringem Eindringmoment in verschiedene Materialien eingeschraubt zu werden. Derzeit existiert jedoch keine über die Firma hinausgehende Norm für diese Schrauben. Die Versuche werden mit drei verschiedenen Schrauben mit den Durchmessern 4,5 mm, 5 mm und 6 mm durchgeführt (Tabelle 5). Zusätzlich wurden Versuche mit einer 12 mm Holzschraube nach DIN 571 vorgenommen. Für das Modell werden wie bereits erwähnt der Außendurchmesser  $D$ , der Innendurchmesser  $d$ , die Länge der Schraubenspitze  $h_0$  sowie die Steigung  $p$  benötigt.

Schraubennummer	$D$ [mm]	$d$ [mm]	$P$ [mm]	$h_0$ [mm]	Bemerkung
1	4,5	2,8	2	5	SPAX <sup>®</sup> -Schraube
2	5	3	2,5	6	SPAX <sup>®</sup> -Schraube
3	6	3,7	3	8	SPAX <sup>®</sup> -Schraube
4	12	8,5	5	12	Holzschraube DIN 571

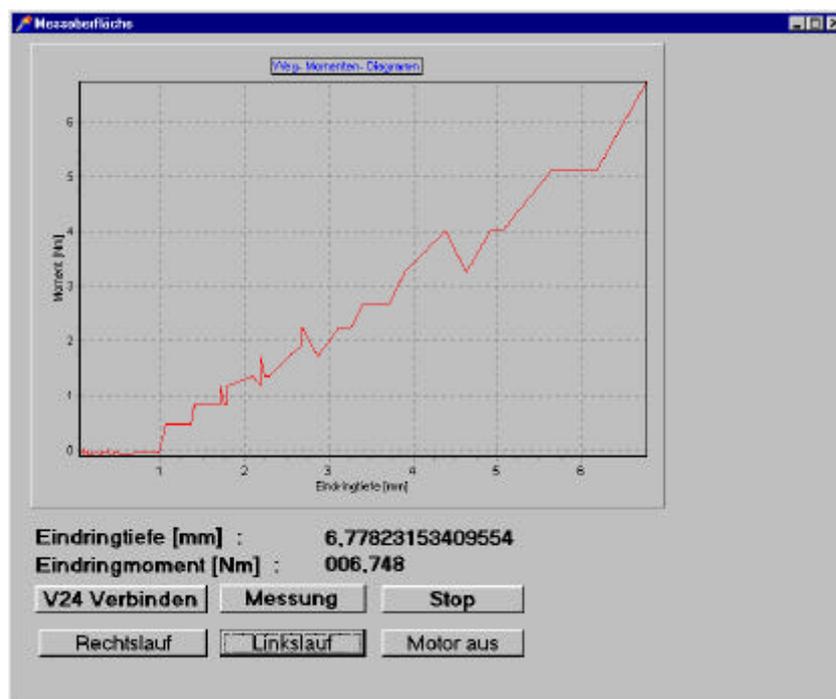
Tabelle 5: Eingesetzte Endeffektoren

Für den Anwendungsfall Schwingsystem einer Waschmaschine waren die maximal erhältlichen Durchmesser von SPAX<sup>®</sup>-Schrauben nicht ausreichend. Somit werden Holzschrauben nach der DIN 571 ausgewählt, die eine ähnliche Geometrie aufweisen. Diese sind in größeren Durchmessern erhältlich. Somit können ausreichende Kräfte zur Handhabung der 45 kg bis 80 kg schweren Schwingsysteme von Waschmaschinen

übertragen werden. Eigene Endeffektoren wurden bisher aufgrund des Fertigungsaufwandes sowie der Kosten nicht hergestellt.

### Versuchsdurchführung

Für die Versuchsdurchführung wird der gewünschte Endeffektor in das untere Bohrfutter eingespannt. Der Probenwerkstoff wird in den Schraubstock eingelegt und ebenfalls gespannt. Der Endeffektor wird nach Lösen des in [Bild 28](#) beschriebenen Elektromagneten auf dem Probenwerkstoff abgesetzt. Die Schnittstellen zwischen Sensoren, Messkarte und PC werden initialisiert.



[Bild 30](#): Implementierte Benutzeroberfläche der Software zur Messwertaufnahme

Am PC werden über die Benutzeroberfläche die Messwertaufnahme und anschließend der Motor im Rechtslauf gestartet ([Bild 30](#)). In einer Datei wird das Eindringmoment in Abhängigkeit der Eindringtiefe gespeichert. Anschließend werden die Daten mit Microsoft Excel ausgewertet und graphisch aufbereitet. Eindringtiefe und Moment werden außerdem online auf dem Bildschirm dargestellt. Bei Erreichen der gewünschten Eindringtiefe wird der Vorgang durch Klicken des Stoppbuttons beendet.

Die Anzahl der Experimente einer Versuchsreihe ergibt sich aus der Anzahl der variierten Prozesskenngrößen  $i_v$ , der Anzahl der Ausprägungen jeder Prozesskenngröße  $j_v$  sowie durch die Anzahl der Versuchswiederholungen  $n_v$ , die erforderlich sind, um die gewünschte Aussagesicherheit zu bekommen:

$$\text{Anzahl der Experimente} = n_v \cdot [j_v]^{i_v}. \quad (101)$$

Zur Überprüfung des Modells für das Eindringmoment und für die übertragbaren Normalkräfte werden vollständige faktorielle Versuchsreihen durchgeführt. Für die Prozesskenngröße Schraube werden insgesamt vier Ausprägungen untersucht (Tabelle 5). Für die Prozesskenngröße Werkstoff werden insgesamt 5 Ausprägungen betrachtet. Die Anzahl der Versuchswiederholungen betrug für die Werkstoffe 1-3  $n_V = 10$ . Bei der zusätzlichen Durchführung von Messungen an Komponenten eines Beispielproduktes, die mit den Werkstoffen 4 und 5 bezeichnet sind, wurden jeweils 3 Versuchswiederholungen durchgeführt.

## Ergebnis

In den Diagrammen ist jeweils der errechnete Mittelwert aus den experimentell aufgenommenen Kurven sowie die mit dem Modell rechnerisch ermittelte Kurve dargestellt. Die maximale Eindringtiefe beträgt jeweils  $h = 10$  mm. Erwartungsgemäß steigt das erforderliche Eindringmoment mit steigender Schubspannung des Werkstoffs und steigendem Durchmesser der Schrauben an. In den folgenden Diagrammen sind die Ergebnisse für die Schraube 1, eine SPAX®-Schraube mit 4,5 mm Durchmesser, dargestellt (Bild 31, Bild 32, Bild 33).

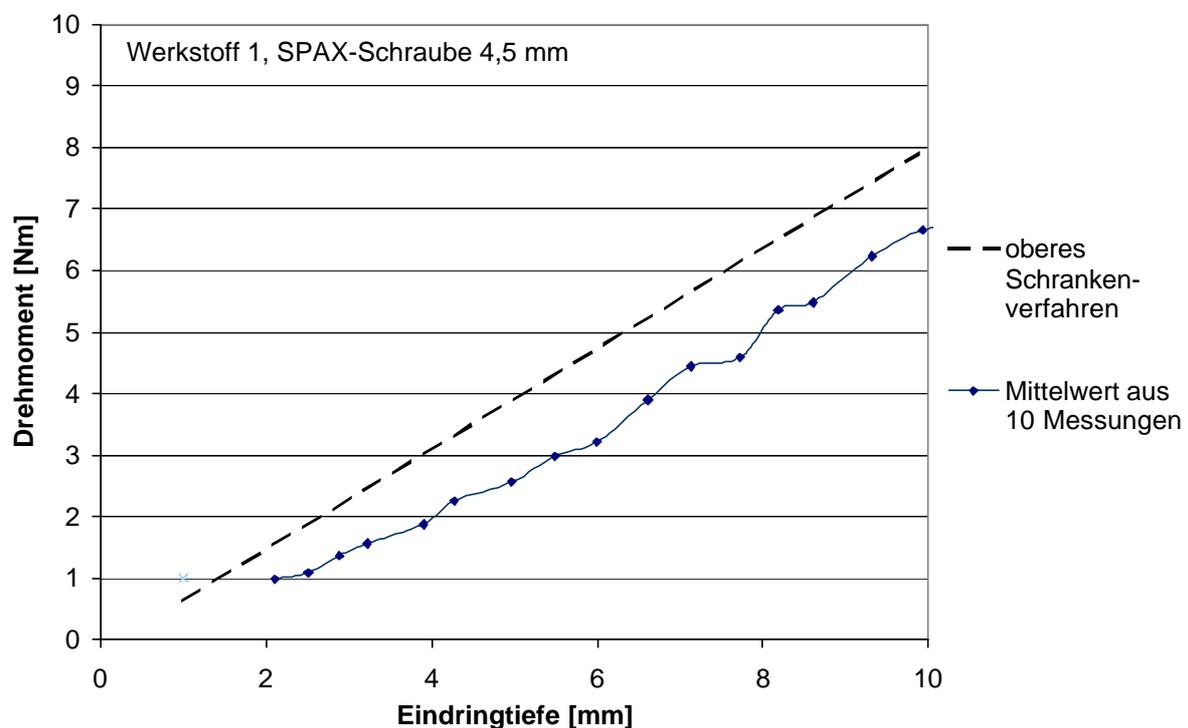


Bild 31: Drehmoment in Abhängigkeit der Eindringtiefe für Werkstoff 1 (PE) und Schraube 1 (4,5 mm)

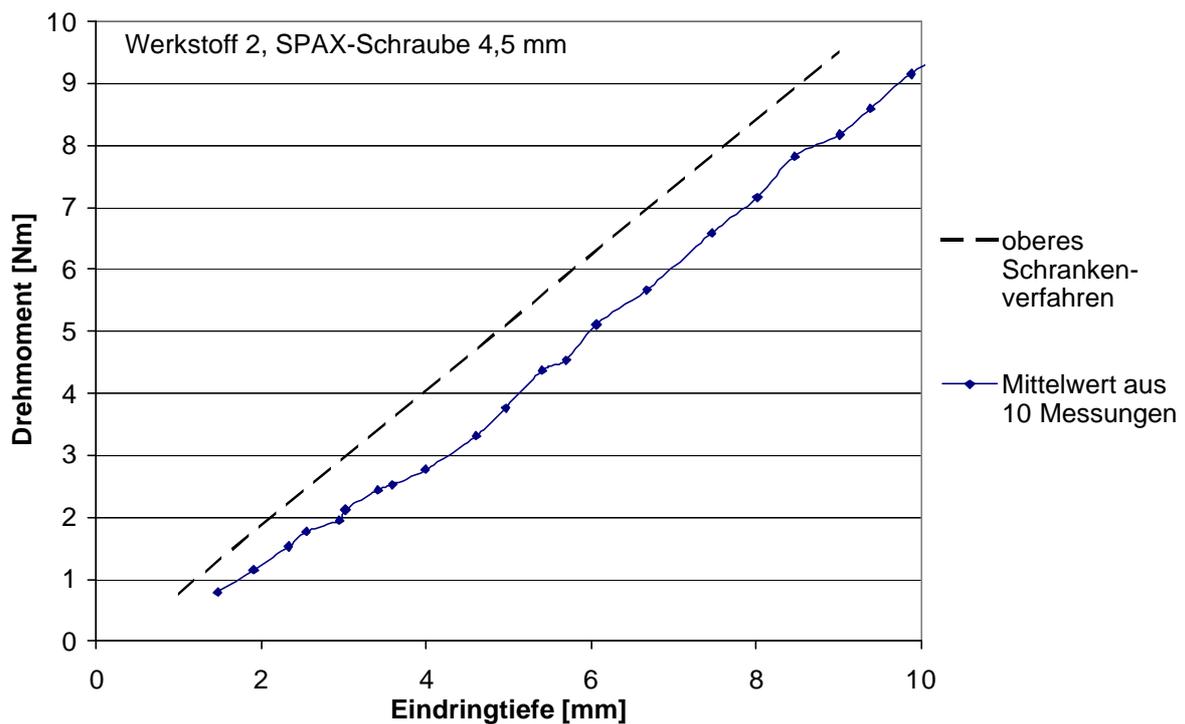


Bild 32: Drehmoment in Abhängigkeit der Eindringtiefe für Werkstoff 2 (PS) und Schraube 1 (4,5 mm)

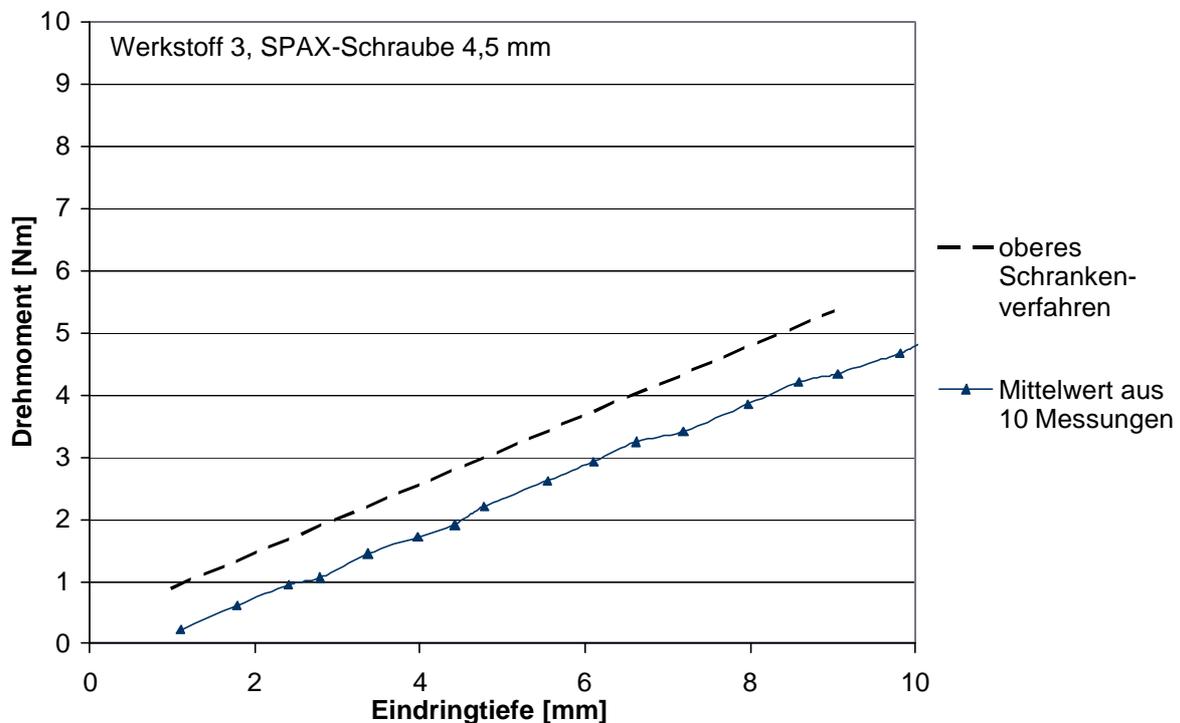


Bild 33: Drehmoment in Abhängigkeit der Eindringtiefe für Werkstoff 3 (PTFE) und Schraube 1 (4,5 mm)

Die folgenden Versuchsreihen werden mit der Schraube 2, einer SPAX<sup>®</sup>-Schraube mit 5 mm Durchmesser, durchgeführt (Bild 34, Bild 35, Bild 36).

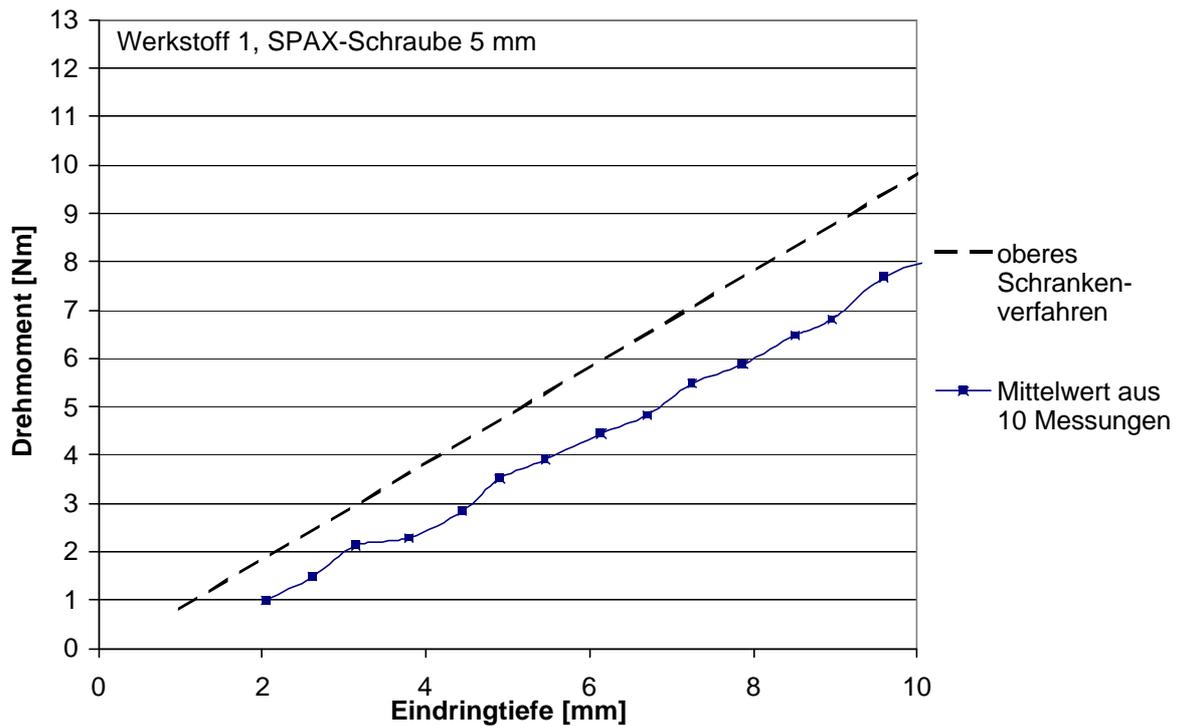


Bild 34: Drehmoment in Abhängigkeit der Eindringtiefe für Werkstoff 1 (PE) und Schraube 2 (5 mm)

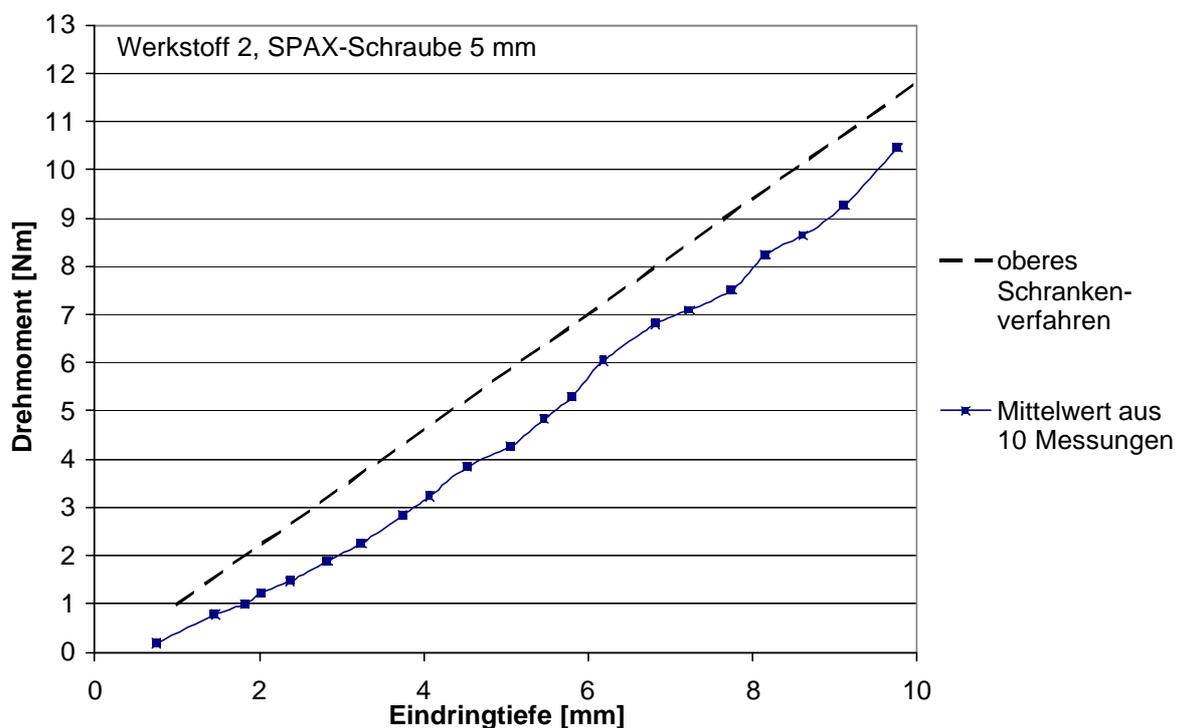
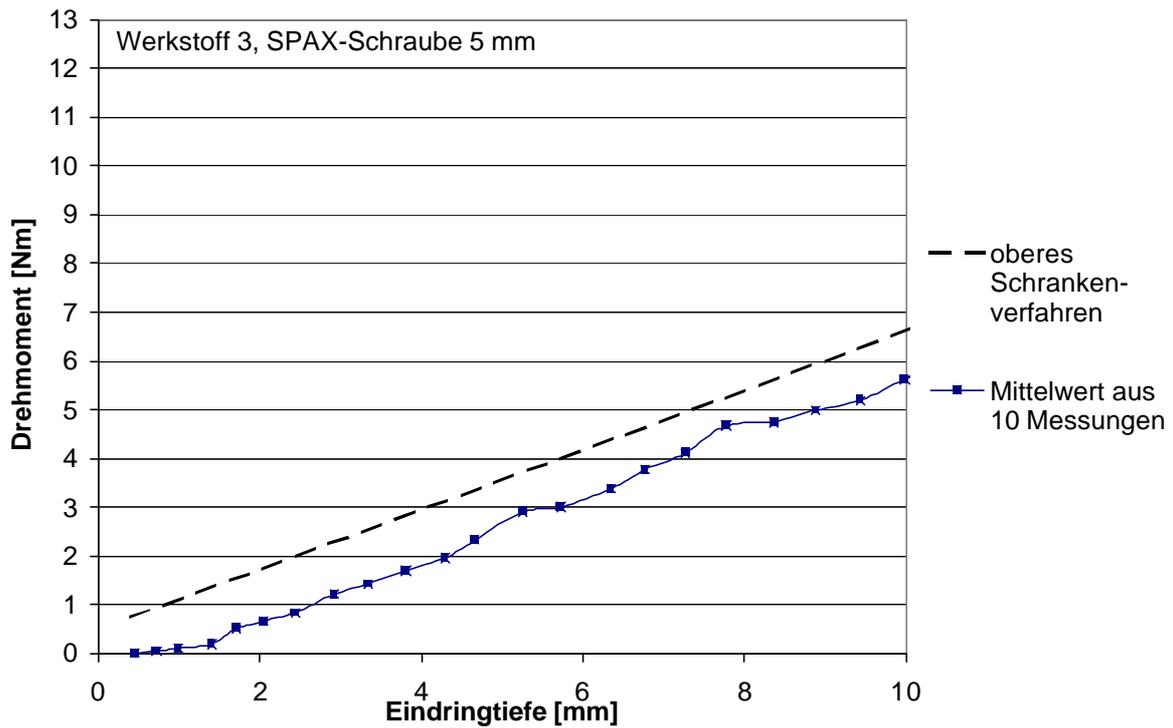
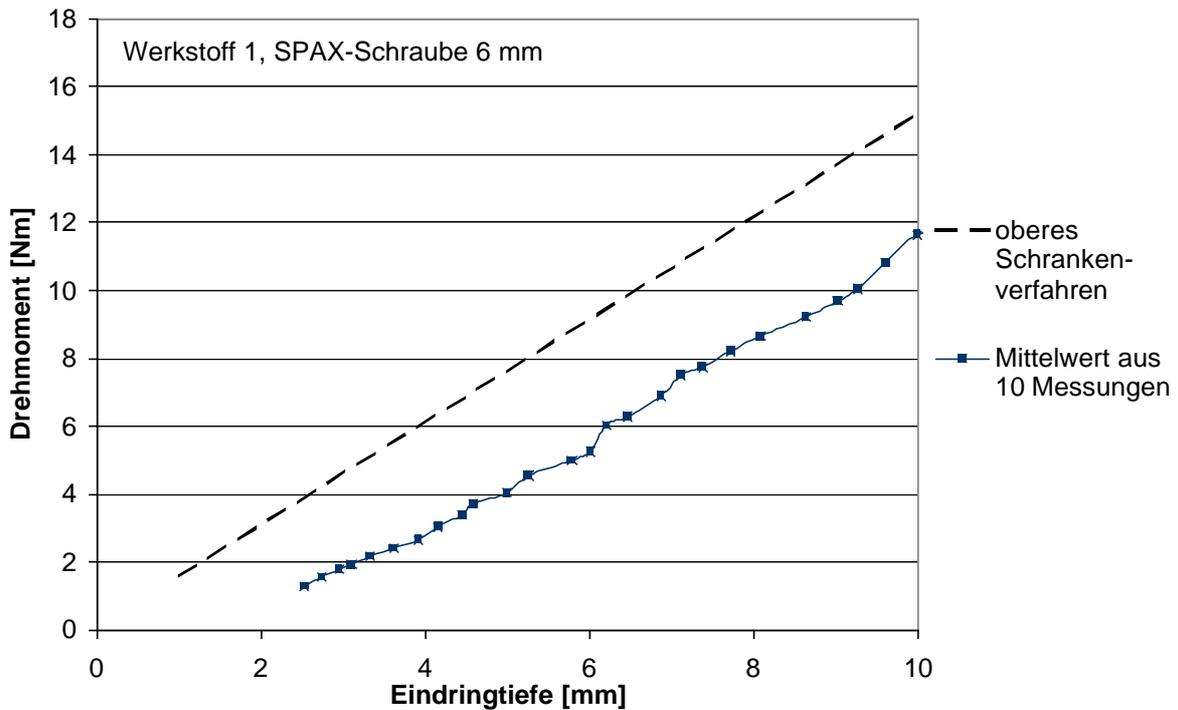


Bild 35: Drehmoment in Abhängigkeit der Eindringtiefe für Werkstoff 2 (PS) und Schraube 2 (5 mm)



**Bild 36:** Drehmoment in Abhängigkeit der Eindringtiefe für Werkstoff 3 (PTFE) und Schraube 2 (5 mm)

Eine weitere Versuchsreihe und Berechnung wird für alle drei Kunststoffe mit der Schraube 3 durchgeführt (Bild 37, Bild 38, Bild 39).



**Bild 37:** Erforderliches Drehmoment in Abhängigkeit der Eindringtiefe für Werkstoff 1 (PE) und Schraube 3 (6 mm)

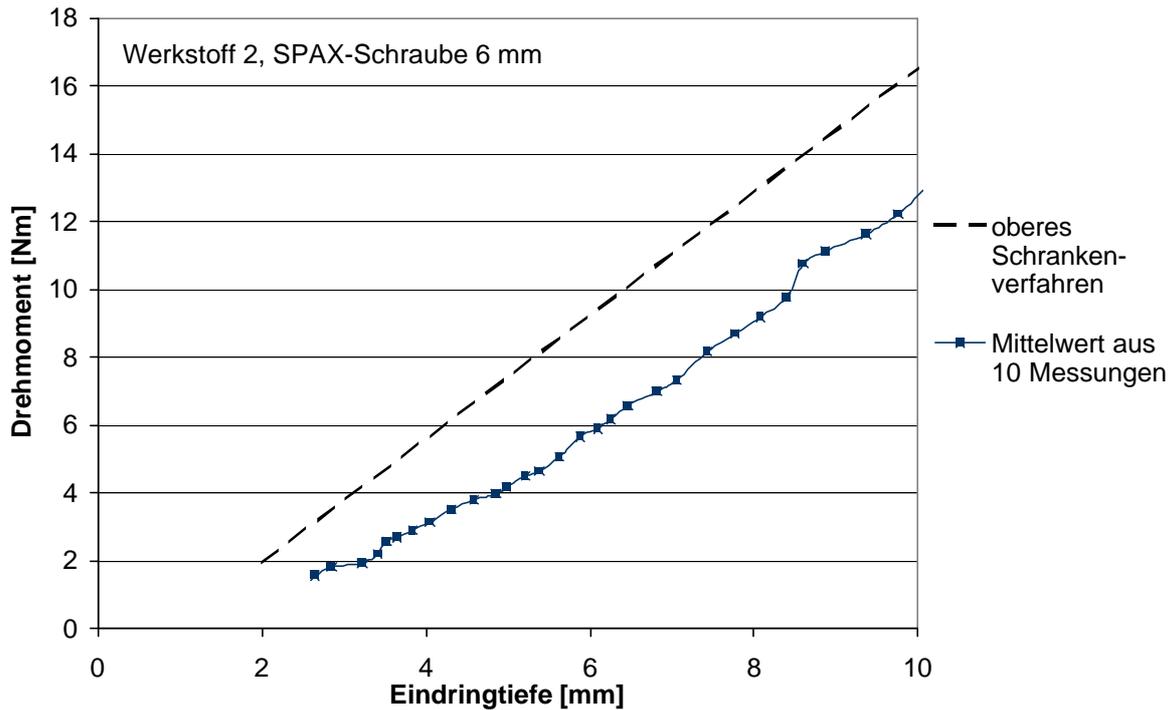


Bild 38: Erforderliches Drehmoment in Abhängigkeit der Eindringtiefe für Werkstoff 2 (PS) und Schraube 3 (6 mm)

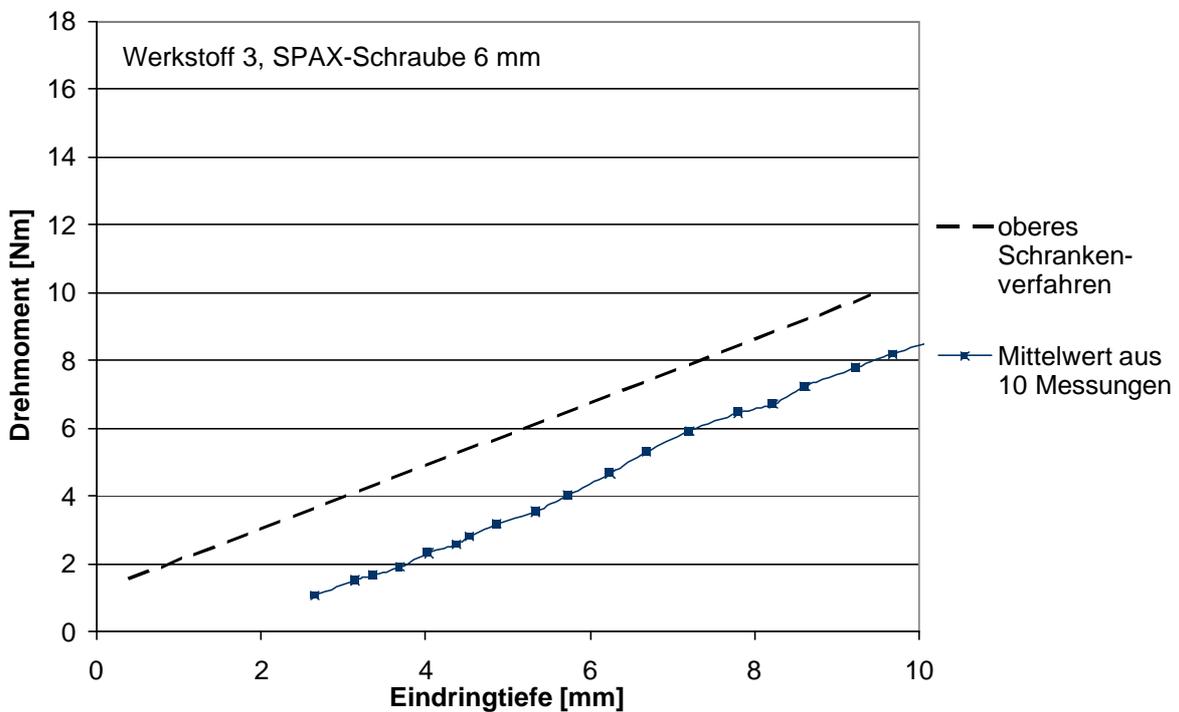
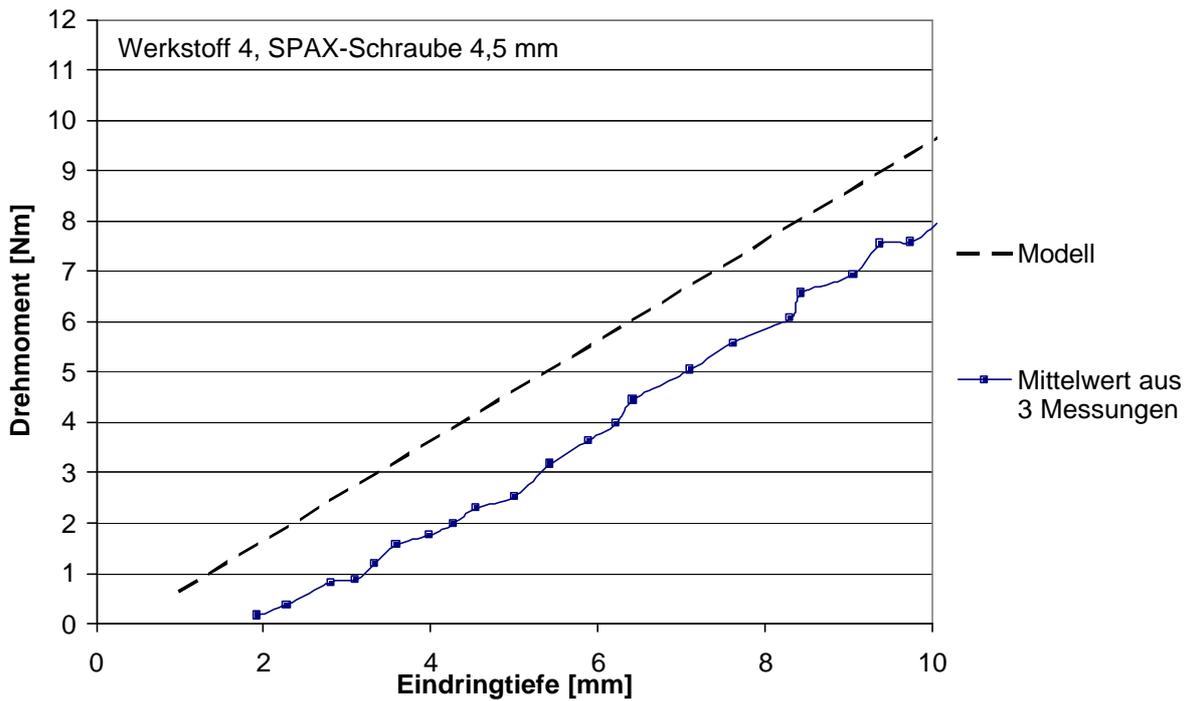
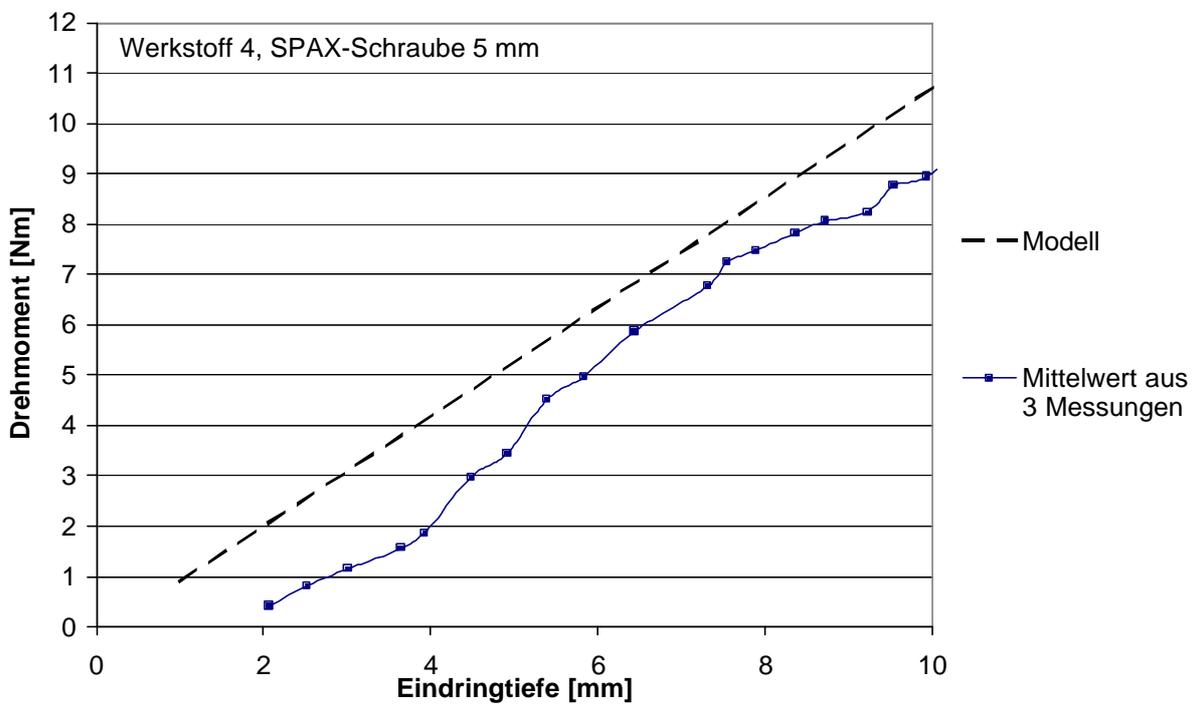


Bild 39: Erforderliches Drehmoment in Abhängigkeit der Eindringtiefe für Werkstoff 3 (PTFE) und Schraube 3 (6 mm)

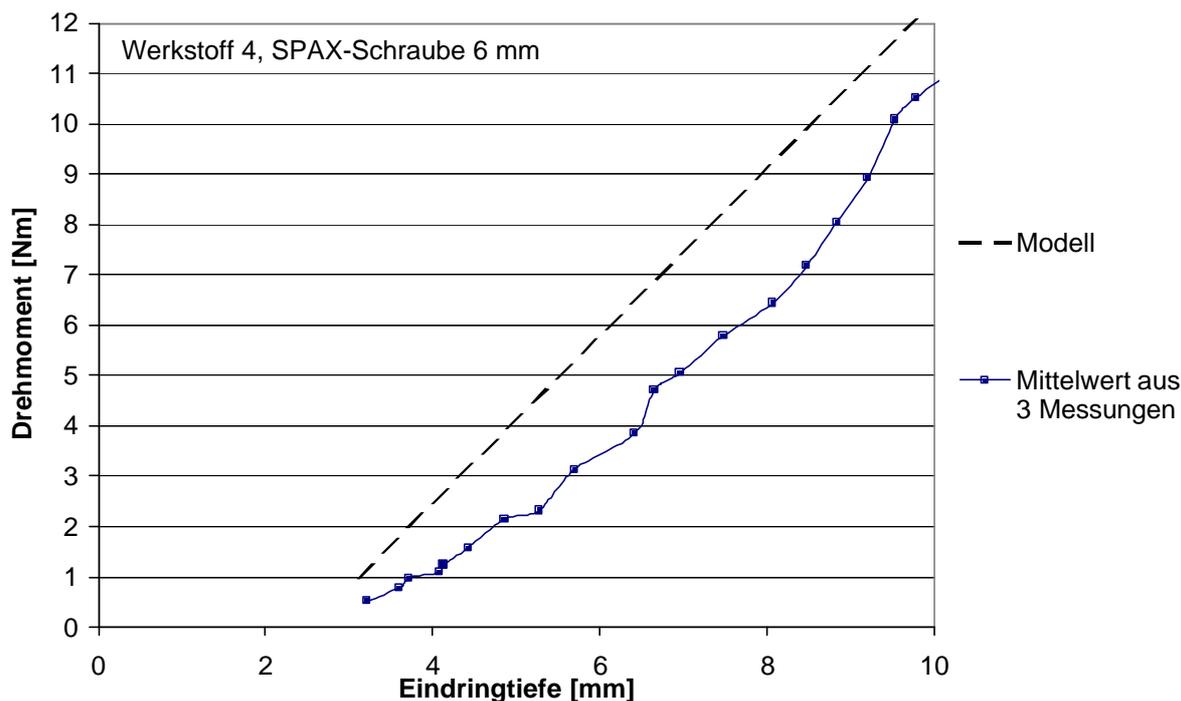
Weiterhin werden Messungen mit dem Werkstoff 4, dem Material 4 des Laugenbehälters einer Waschmaschine durchgeführt (Bild 40, Bild 41, Bild 42).



**Bild 40:** Erforderliches Drehmoment in Abhängigkeit der Eindringtiefe für Werkstoff 4 (PP) und Schraube 1( 4,5 mm)



**Bild 41:** Erforderliches Drehmoment in Abhängigkeit der Eindringtiefe für Werkstoff 4 (PP) und Schraube 2 (5 mm)



**Bild 42:** Erforderliches Drehmoment in Abhängigkeit der Eindringtiefe für Werkstoff 4 (PP) und Schraube 3 (6 mm)

Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen den im Experiment ermittelten und den im Prozessmodell berechneten Werten. Der Wert des Modells liegt aufgrund des oberen Schrankenverfahrens über dem experimentell ermittelten.

Die Abweichung zwischen Experiment und Modell liegt bei ca. 1-4 Nm. Das Modell ermöglicht somit eine hinreichend genaue Aussage über die voraussichtliche Höhe des erforderlichen Drehmomentes. Das entwickelte Modell ist geeignet, um Aussagen über die Leistungsstärke des Antriebes in Abhängigkeit des Werkstoffs sowie des Endeffektors und auftretende Reaktionskräfte zu geben. Weiterhin können die Werte zur Prozessüberwachung genutzt werden. Die Berechnung kann benutzerfreundlich über das in MATLAB implementierte Programm erfolgen.

## 4.2 Übertragbare Normalkräfte

Die experimentelle Überprüfung der errechneten Normalkräfte erfolgt an einer Zug-Druckmaschine vom Typ 8500 der Firma Instron (Bild 43). Diese Presse kann Zug- und Druckkräfte bis 25 kN erzeugen und mit einer Genauigkeit von 2% messen.



Bild 43: Instron Zug-Druck-Maschine 8500 mit Steuerung

Die Kunststoffe und das Schwingsystem werden in einer Vorrichtung auf der Grundplatte eingespannt, die Endeffektoren werden in Pratten gespannt. Der Zylinder der Presse wird dann mit einer Geschwindigkeit von 1mm/s verfahren. Die Werte für den zurückgelegten Weg und die eingebrachte Zugkraft werden von der Pressensteuerung an eine Messkarte im PC übergeben und mit der Software DasyLab 3.0 aufgenommen. Die Daten werden in Microsoft Excel importiert, ausgewertet und graphisch dargestellt.

### **Versuchsdurchführung**

Zur Überprüfung des Modells für die übertragbaren Normalkräfte werden ebenfalls vollständige faktorielle Versuchsreihen durchgeführt. Wieder werden für die Prozesskenngröße Schraube vier Ausprägungen (Tabelle 5) und für die Prozesskenngröße Werkstoff 5 Ausprägungen betrachtet. Zusätzlich wird die Eindringtiefe  $h$  variiert. Es werden Eindringtiefen von  $h = 1,5$  mm, 3 mm, 8 mm und 19 mm untersucht. Für jede Messung werden 3 Versuchswiederholungen durchgeführt. Zunächst Werkstoff 1-3 in einer Vorrichtung in der Zugmaschine eingespannt und die Schrauben mit 4,5 mm, 5 mm und 6 mm in den Eindringtiefen 8 mm und 19 mm eingeschraubt (Bild 44).



Bild 44: Zugversuch mit eingespannten Werkstoffproben

Zusätzlich zu den Versuchsreihen mit den Werkstoffen 1-3 werden auch Kunststoffproben aus einem Produkt der weißen Ware, dem Anwendungsbeispiel Waschmaschine entnommen und die Werte für Modell und Experiment gegenübergestellt.

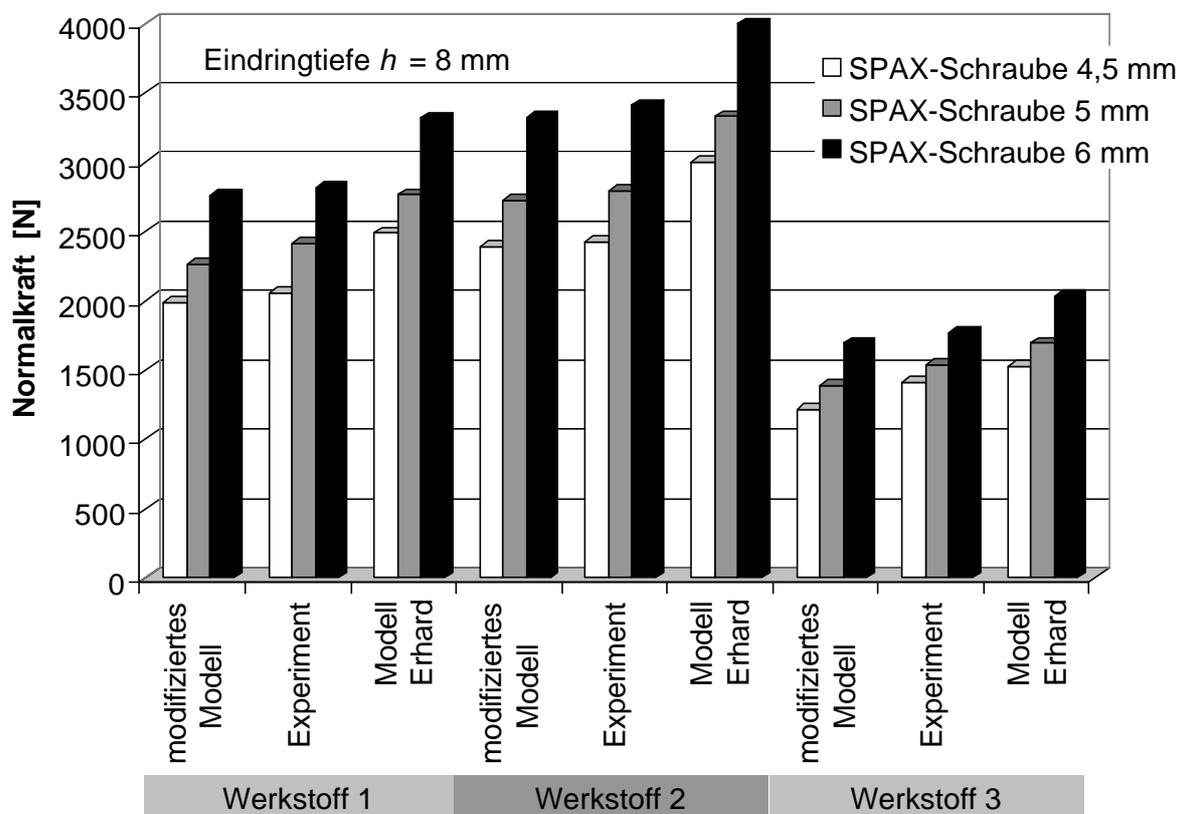


Bild 45: (links) Zugversuche mit dem Werkstoff des Schwingsystems; (rechts) Zugversuche mit gesamtem Schwingsystem

Die Proben wurden aus dem Laugenbehälter und der Bedienblende einer Waschmaschine entnommen. In [Bild 45](#) links sind die Versuche mit dem Werkstoff des Laugenbehälters dargestellt.

## Ergebnis

Die Übereinstimmung der aufgenommenen Messwerte mit dem Modell nach ERHARD [ERH99] erweist sich als unzureichend. Die errechneten Werte liegen zum Teil mehr als 20% über den experimentell ermittelten und damit deutlich zu hoch. Für die Berechnung der Normalkräfte ist das Modell nicht geeignet ([Bild 46](#), [Bild 47](#)).



[Bild 46](#): Gegenüberstellung der experimentell ermittelten, der mit dem Modell nach ERHARD [ERH99] sowie der mit dem modifizierten Modell errechneten Werte (Eindringtiefe 19 mm)

Dies liegt daran, dass die von ERHARD getroffenen Annahmen nur bedingt dem Realfall entsprechen. Der Durchmesser des durch Abscheren entstehenden Lochs ist aufgrund des elastischen Anteils des Werkstoffs kleiner als der Außendurchmesser der Schraube. Weiterhin schert das Material nicht am äußersten Rand der Gewindeflanke, sondern ein wenig im Gewinde ab ([Bild 48](#)).

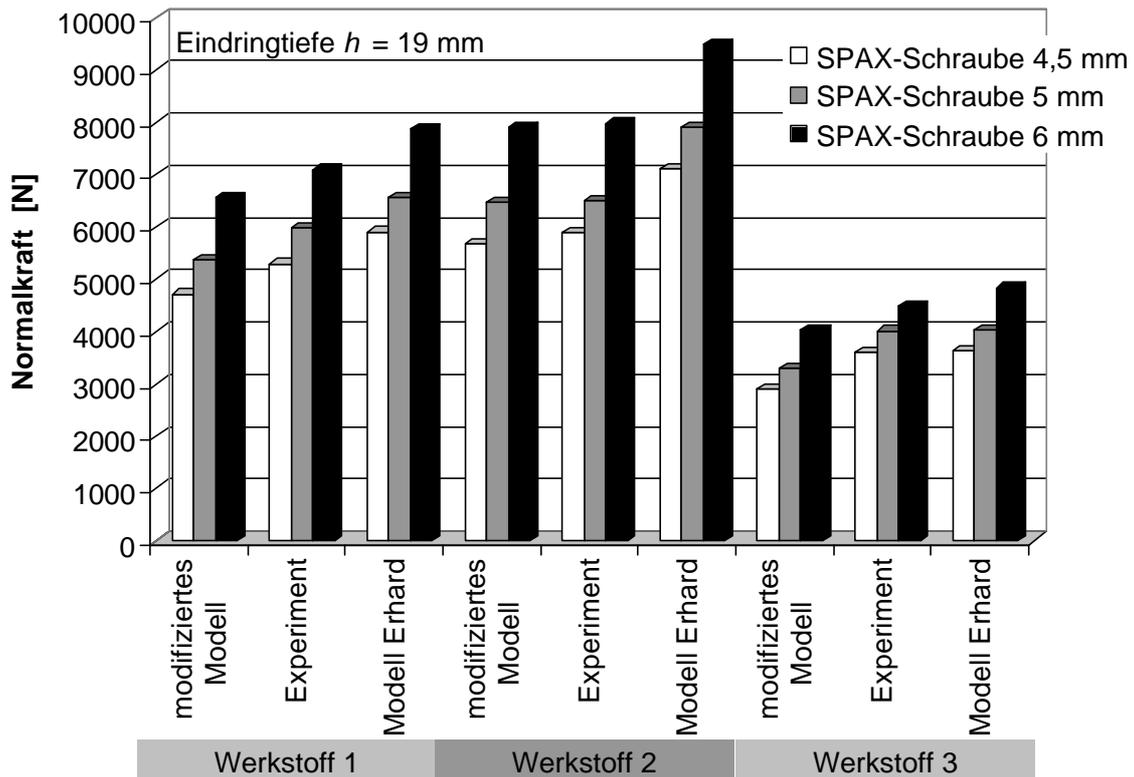


Bild 47: Gegenüberstellung der experimentell ermittelten, der mit dem Modell nach ERHARD [ERH99] sowie der mit dem modifizierten Modell errechneten Werte (Eindringtiefe 19 mm)

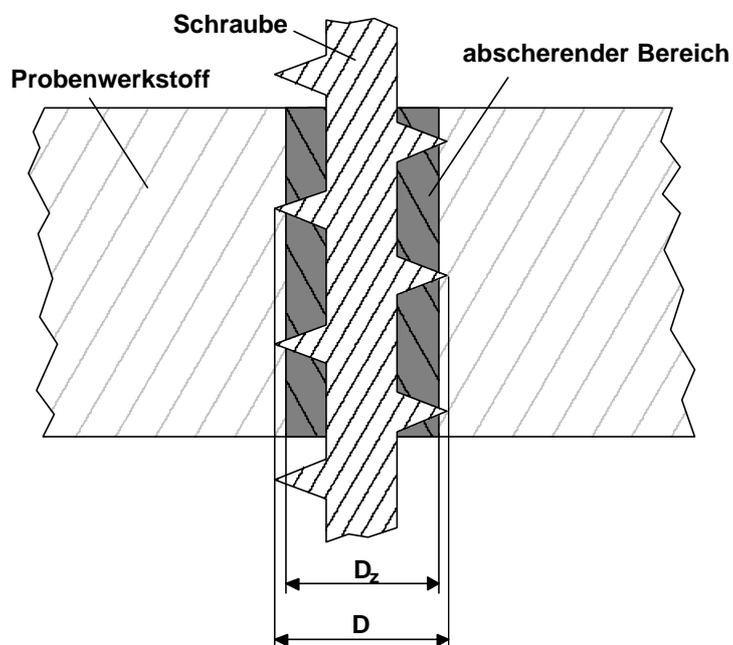


Bild 48: Abscherung des Probenwerkstoffs

Der reale Durchmesser des Lochs  $D_z$ , ist abhängig vom Außen- und Innendurchmesser der Schraube, sowie dem Werkstoff, in dem die Wirkfläche erzeugt

wird. Der sich durch diesen material- und schraubenabhängigen Faktor ergebende reale Durchmesser des abgesicherten Materials  $D_Z$ , wird vereinfacht als:

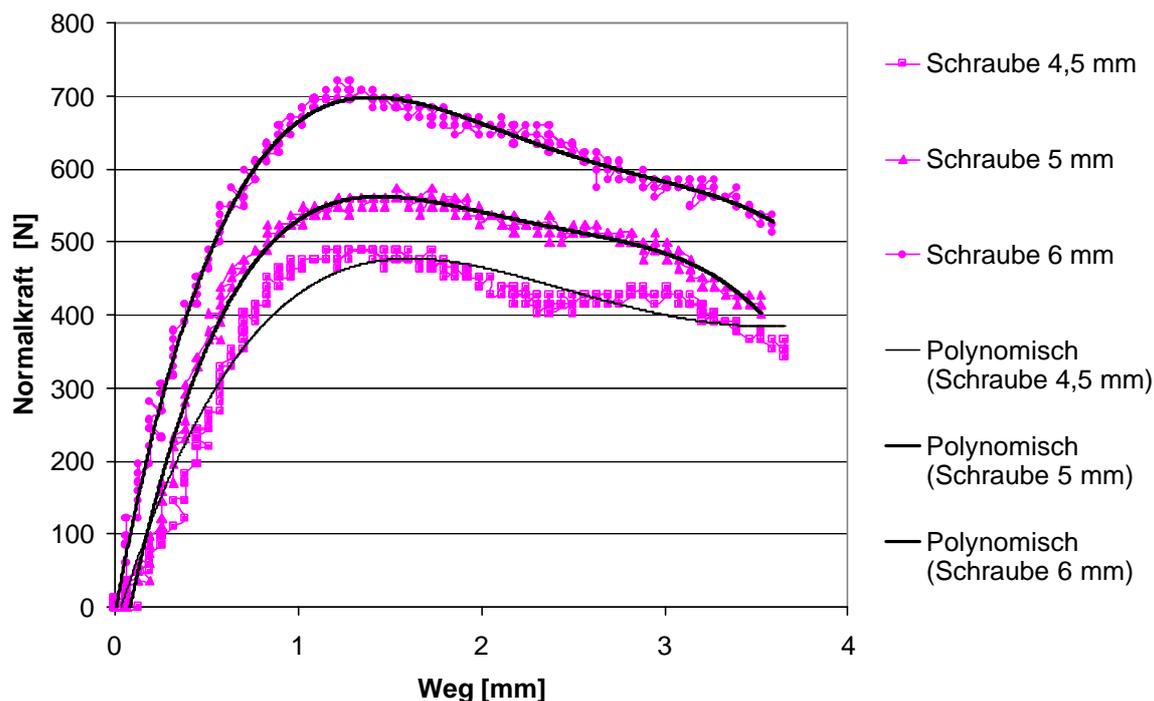
$$D_Z = D - \frac{1}{10}D \quad (102)$$

angenommen, wobei  $D$  der Außendurchmesser der Schraube ist. Dieser Wert wird durch den Vergleich mit den Messwerten als hinreichend genau bestätigt. Außerdem wird in der von ERHARD [ERH99] durchgeführten Berechnung nicht berücksichtigt, dass nicht ein Zylinder, sondern nur eine Spirale absichert (Bild 27). Um dies zu berücksichtigen, wird die Länge der Schraubenlinie in Abhängigkeit der Eindringtiefe berechnet. Entlang dieser Schraubenlinie befindet sich ein Spalt im Material. Diese Fläche wird von der errechneten Zylinderfläche abgezogen. Die Breite des Spalts  $b_s$  ist normalerweise vom Flankenwinkel der Schraube und den Materialeigenschaften abhängig, kann jedoch zur Vereinfachung auf  $b_s = 0,2$  mm festgelegt werden. Die Vereinfachung erwies sich in den Messungen als zulässig. Mit diesen Detaillierungen des von ERHARD [ERH99] vorgestellten Modells ergibt sich für die übertragbare Normalkraft  $F_N$  folgende Gleichung:

$$F_N = \mathbf{p} \cdot D_Z \cdot h \cdot k - \frac{h}{p} \cdot k \cdot b_s \cdot \sqrt{(D\mathbf{p})^2 + h^2} . \quad (103)$$

Die mit diesem modifizierten Modell errechneten Werte liegen für alle Kunststoffe hinreichend genau unter den experimentell ermittelten. Die Abweichungen sind durch die verschiedenen Materialeigenschaften der Kunststoffe zu erklären. Die mit dem verbesserten Modell errechneten Werte reichen zur Auslegung eines Greifers aus. Ein Sicherheitsfaktor ist ohnehin zu berücksichtigen. Für eine genauere Berechnung müssten weitere Parameter wie der Anteil der elastischen und plastischen Verformung, der Reibkoeffizient oder auch das Fließverhalten des Werkstoffes betrachtet werden. Neben dem erheblichen Modellierungsaufwand sind diese Daten in der Regel auch nicht vorhanden. Die Werte können benutzerfreundlich, schnell und einfach mit einem in Microsoft Excel implementierten Programm errechnet werden.

Zusätzlich erfolgte eine experimentelle Überprüfung des modifizierten Modells an Anwendungsbeispielen. Dazu wird eine Bedienblende sowie das Schwingsystem einer Waschmaschine ausgewählt. Beide Komponenten sollen später durch Greifer gehandhabt werden. Die Bedienblende besteht aus Polystyrol. Nach Angaben des Herstellers liegt die Schubspannung vergleichbar mit dem untersuchten Werkstoff 2 bei ca. 53 N/mm<sup>2</sup>. Die Blende hat eine Materialstärke von 1,5 mm. Die beim Experiment aufgenommenen Werte sind in Bild 49 dargestellt.



**Bild 49:** Experimentell ermittelte Normalkräfte für SPAX<sup>®</sup>-Schrauben für die Bedienblende einer Waschmaschine

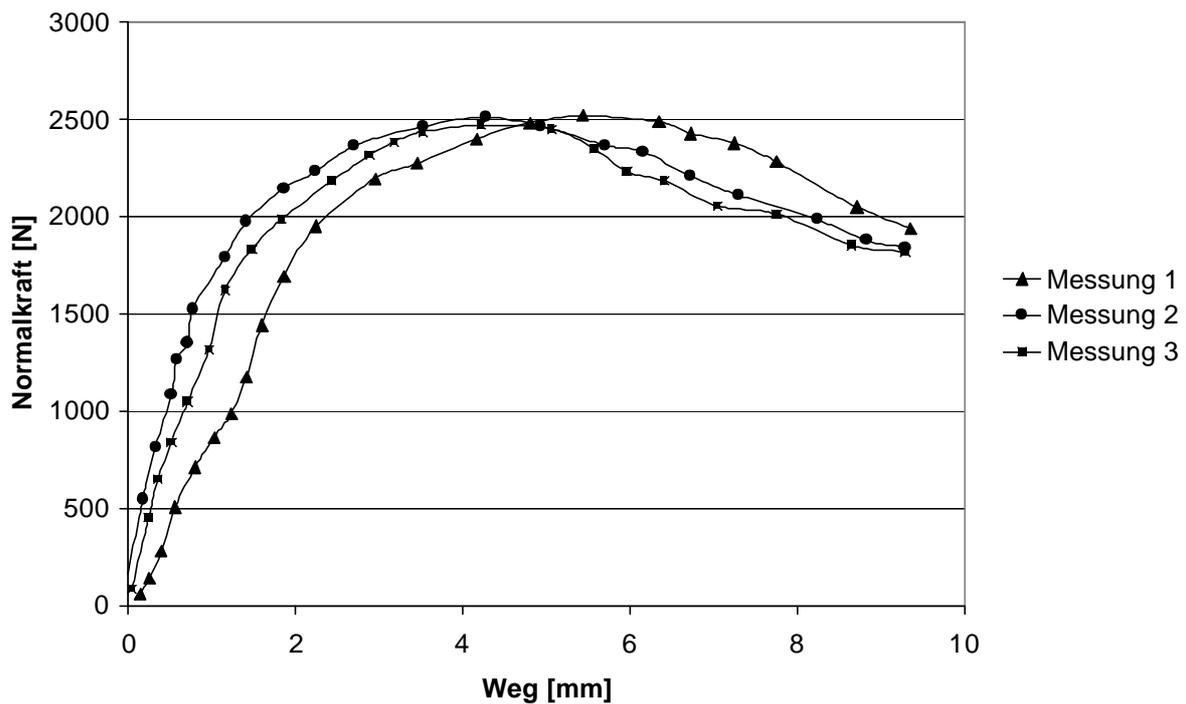
Durch Einsetzen dieser Werte in das modifizierte Modell erhält man die folgende Tabelle (Tabelle 6). Über die von einer 6 mm SPAX<sup>®</sup>-Schraube erzeugten Wirkflächen kann eine Kraft in Höhe von 623 N, dies entspricht einem Gewicht von ca. 62 kg, eingeleitet werden.

SPAX <sup>®</sup> -Schraube [mm]	Übertragbare Normalkraft [N]
4,5	449,00
5	511,37
6	623,76

**Tabelle 6:** Berechnete Normalkräfte für die Bedienblende einer Waschmaschine

Die Übereinstimmung zwischen Modell und Experiment wird durch die Bild 49 dargestellten experimentellen Werte und die in der Tabelle 6 errechneten Werte erneut bestätigt.

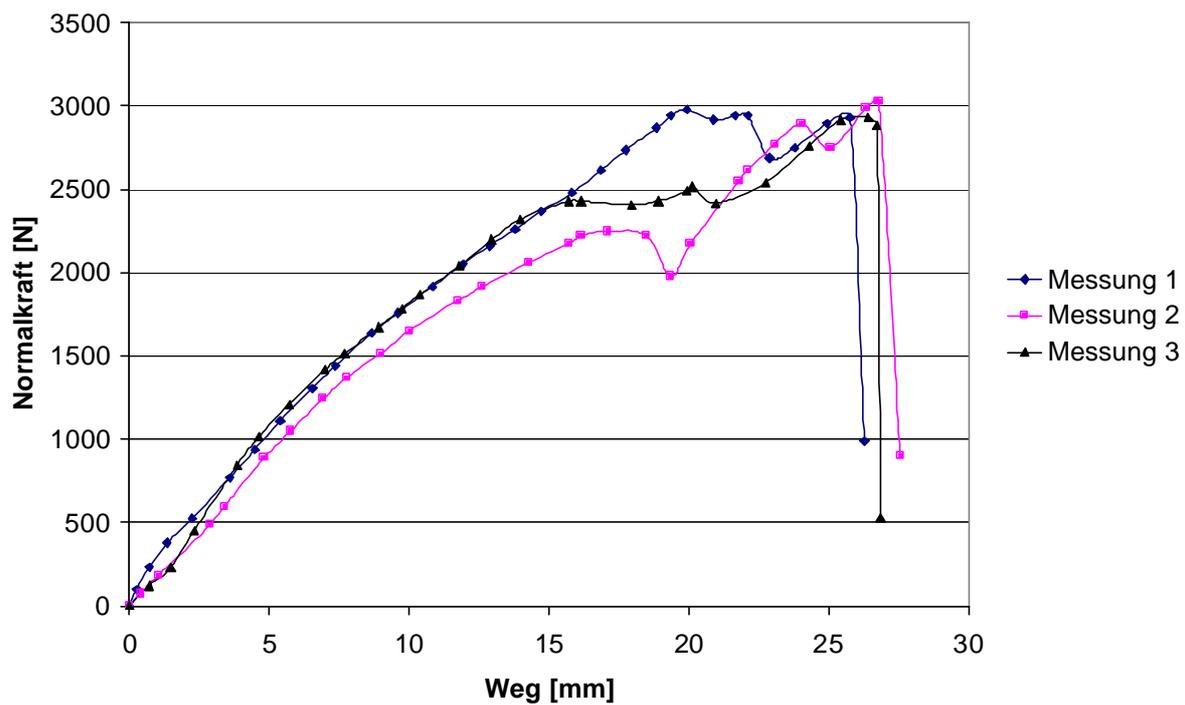
Für den Werkstoff des Laugenbehälters mit einer Wandstärke von 3 mm wird für die 12 mm DIN 571 Schraube in den Versuchen für die übertragbare Normalkraft ein Mittelwert von 2492 Nm festgestellt.



**Bild 50:** Experimentell ermittelte Werte für die über den Laugenbehälter übertragbare Normalkraft (Schraube DIN 571, 12 mm)

Bei einem Gewicht des Schwingsystems von 45 kg bis 80 kg wäre damit eine dreifache Sicherheit gegeben. Mit dem Modell errechnet sich für diese Randbedingungen ein Wert von 2333 N.

Abschließend wird das gesamte Schwingsystem auf der Grundplatte der Zug-Druckmaschine gespannt und der schraubenförmige Endeffektor nicht nur durch den Laugenbehälter aus Kunststoff sondern auch durch die Wäschetrommel aus Edelstahl geschraubt ([Bild 45](#) rechts). Dadurch können noch höhere Normalkräfte und Momente übertragen werden. Ähnlich soll dies bei dem zu entwickelnden Greifer realisiert werden. In Zugversuchen ergab sich eine maximal übertragbare Normalkraft von 3000 N ([Bild 51](#)). Die stellenweisen Einbrüche in den Kurven kommen durch das Abrutschen des Endeffektors auf den nächsten Gewindegang zustande.



**Bild 51:** Experimentell ermittelte Werte für die über den Laugenbehälter und die Wäschetrommel übertragbare Normalkraft (Schraube DIN 571, 12 mm)

## 5 Konstruktive Anforderungen und Richtlinien

Zur Konstruktion der auf diesem Prinzip beruhenden Greifer bietet sich die methodische Vorgehensweise nach [PAH97] an. Greifer bestehen, wie bereits beschrieben, aus dem Energie-, Träger-, Informations-, Wirk- und dem kinematischen System. Aufgrund des ausgewählten Greifprinzips ergeben sich generelle konstruktive Anforderungen die durch das jeweilige Anwendungsfeld näher spezifiziert oder ergänzt werden. Diese konstruktiven Anforderungen und Richtlinien werden im Folgenden nach den Teilsystemen eines Greifers dargestellt. Im Kapitel 6 werden diese Anforderungen und Richtlinien für zwei Greifer umgesetzt.

### Wirksystem

Im Gegensatz zum herkömmlichen Greifer wird das Wirksystem nicht nur zur Übertragung von Kräften und Momenten, sondern auch zur Erzeugung der Wirkflächen genutzt. Damit ergeben sich zusätzliche Anforderungen an das Wirksystem. Generell besteht es für alle auf dem modellierten Prinzip beruhenden Greifer aus einem schraubenförmigen Endeffektor. Zur Kosteneinsparung bietet es sich an, die Endeffektoren aus der Vielzahl der handelsüblichen selbstschneidenden Schrauben [BAU91] auszuwählen.

Zur Unterstützung der Erfüllung der Hauptaufgaben des Greifers, dem Herstellen, Aufrechterhalten und Lösen der Verbindung zum Handhabungsobjekt können zusätzliche Endeffektoren erforderlich sein. Diese fixieren das Objekt beim Erzeugen der Wirkflächen und nehmen das eingeleitete Eindringmoment auf. Beim Bewegen des Handhabungsobjektes sichern sie zusätzlich die Position und Orientierung und beim Lösen nehmen sie das beim Herausdrehen des Endeffektors entstehende Drehmoment auf (s. Kapitel 6.3.1). Dies entfällt in der Regel, wenn mehr als ein schraubenförmiger Endeffektor eingesetzt wird.

Im Idealfall werden die Endeffektoren über ein flexibles Spannsystem z.B. in Form eines Bohrfutters, mit dem kinematischen System verbunden werden. Damit kann bei Verschleiß oder veränderten Anforderungen eine schnelle Anpassung vorgenommen werden.

Je nach Anwendungsfall kann es erforderlich sein, nicht nur einen, sondern mehrere Endeffektoren einzusetzen. Werden mehrere Systeme verwendet, kommt es jedoch in der Regel zur Reduzierung der Flexibilität und Zugänglichkeit. Diesen Nachteilen wird im Idealfall durch beliebig kombinierbare Module begegnet. Der im Kapitel 6.4 beschriebene Greifer ist bereits in Ansätzen modular aufgebaut. Zukünftige

Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet könnten erheblich zur Kostenreduzierung und Flexibilisierung beitragen.

### **Energiesystem**

Für das Eindringen des Endeffektors ist eine rotatorische Bewegung notwendig. Dafür können prinzipiell elektrische, pneumatische oder hydraulische Antriebe eingesetzt werden. Pneumatische Antriebe zeichnen sich durch einfache, kleine und kompakte Bauweise aus. Vorteilhaft sind weiterhin die geringen Kosten bei der Anschaffung sowie die Störsicherheit gegen elektrische und magnetische Felder. Nachteilig ist die Geräuschbelästigung durch Abluft. Weiterhin kann die Verfahrensgeschwindigkeit in der Regel nicht eingestellt werden.

Elektrische Antriebe besitzen eine sehr gute Regelbarkeit der Bewegungsvorgänge und der Krafterzeugung bei einem guten Wirkungsgrad. Die Antriebe sind geräuscharm und sauber. Allerdings bauen die Geräte zur Übertragung großer Kräfte deutlich größer als Hydrauliksysteme.

Hydraulische Antriebe können große Kräfte bei kleinster Bauweise erzeugen. Diese Antriebe ermöglichen eine stufenlose Einstellung einer gleichförmigen Verfahrensgeschwindigkeit über einen großen Stellbereich sowie die Einstellbarkeit der Greifkräfte über den Weg. Nachteilig ist der relativ hohe Wartungsaufwand zur Verhinderung von Leckagen sowie gesonderte Rückleitungen für den Rückfluss zum Ölbehälter.

Aufgrund der höheren Aufwendungen für hydraulische Antriebe erscheinen diese ungeeignet. Favorisiert werden deshalb elektrische und pneumatische Antriebe. Beim Einsatz am Roboter sind Energieversorgungen durch Druckluft und Spannungsversorgung in der Regel standardmäßig vorhanden. In der manuellen Handhabung bieten sich prinzipiell ebenfalls beide Energiearten an. Abzuwägen ist hierbei der Einsatzort sowie die Einsatzhäufigkeit. Bei guter Zugänglichkeit und hoher Einsatzhäufigkeit sowie stationärem Einsatz, bietet es sich an, den Greifer durch einen Druckluftschlauch zu versorgen. Bei geringerer Nutzung an schwer zugänglichen Orten oder beim mobilen Einsatz könnten Akku-betriebene Werkzeuge verwendet werden.

### **Kinematisches System**

Das kinematische System hat die Aufgabe, die rotatorische Bewegung des Antriebes auf den Endeffektor zu übertragen. Der Einsatz eines Getriebes zur Erhöhung des Drehmomentes und Erniedrigung der Drehzahl ist für den jeweiligen Anwendungsfall zu prüfen.

Zur Erzeugung des Gewindes im Handhabungsobjekt muss der Vorschub des Gewindes mit der Vorschubgeschwindigkeit des Greifers synchronisiert werden. Beim manuellen Einsatz erledigt diese Aufgabe der Mensch, der das Werkzeug nachführt. Beim automatisierten Einsatz ist die Synchronisierung der Vorschubgeschwindigkeit durch den Greifer selbst oder durch das Handhabungsgerät möglich. Einfacher als die Programmierung der linearen Vorschubgeschwindigkeit des Handhabungsgerätes, die von der jeweiligen Drehzahl und der Steigung des Gewindes abhängig ist, ist eine federnd gelagerte Linearführung, die den Endeffektor unabhängig von Drehzahl und Steigung nachführt. In Einzelfällen kann die Synchronisation auch durch das Handhabungsobjekt erfolgen, so z.B. bei der Handhabung von Schwingsystemen von Waschmaschinen. Durch die federnde Aufhängung des Schwingsystems passt sich dieses dem Vorschub des Endeffektors an.

Zusätzlich ist zu prüfen, ob große Momente durch die Verwendung von rotatorischen Schlägen übertragen werden. Insbesondere bei der manuellen Handhabung können dadurch auftretende Reaktionskräfte verringert und eine Gefährdung des Nutzers verhindert werden.

### **Trägersystem**

Das Trägersystem ist vom jeweiligen Einsatzfeld abhängig. Im Idealfall ist der Greifer sowohl manuell, als auch automatisiert einsetzbar. Es bietet sich somit eine modulare Bauweise an. Denkbar wäre ein austauschbares Trägersystem in Form eines Griffs zur manuellen oder eine Adapterplatte eines Greiferwechselsystems zur automatisierten Handhabung. Bei der manuellen Handhabung werden die zur Prozesssteuerung erforderlichen Informationen wie Eindringtiefe und Vorschub in der Regel durch den Menschen kontrolliert, so dass diese Informationen nicht durch das Trägersystem Griff geleitet werden müssen.

### **Informationssystem**

Zur Überwachung der Eindringtiefe und zum rechtzeitigen Abschalten des Antriebes ist ein Informationssystem erforderlich. Damit kann auch das eingebrachte Drehmoment zur Prozesskontrolle überwacht werden. Sensoren zur Aufnahme der entsprechenden Einflussgrößen sind jeweils in Abhängigkeit des Anwendungsfeldes auszuwählen. Taktile und optische Systeme zur Abstandsmessung oder auch Sensoren zur Drehmoment- und Drehlageüberwachung können eingesetzt werden.

## 6 Anwendungsbeispiele

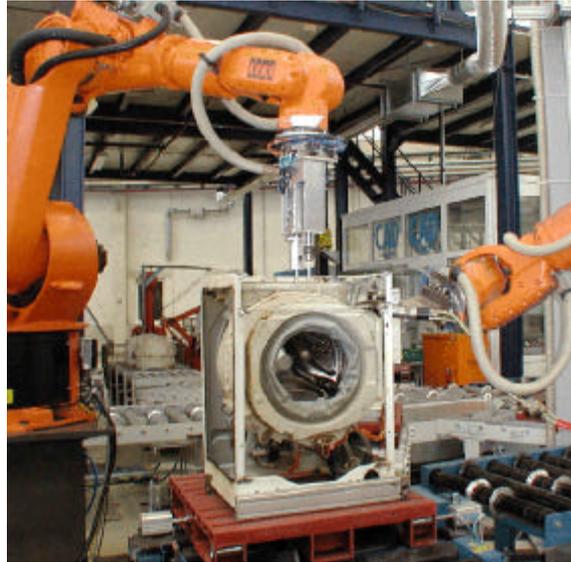
### 6.1 Randbedingungen

In dem durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft geförderten Sonderforschungsbereich 281 "Demontagefabriken zur Rückgewinnung von Ressourcen in Produkt- und Materialkreisläufen" wird am Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb (IWF) der TU Berlin prototypisch ein flexibles Demontagesystem für das Produktspektrum Haushaltsgroßgeräte aufgebaut und weiterentwickelt (Bild 52). In einem modularen Zellenkonzept werden automatisierte und manuelle Arbeitsstationen über ein flexibles Transportsystem verkettet. Dabei gilt es, die Grenzen der wirtschaftlichen Automatisierung zu finden. Es soll überprüft werden, wie bei den hohen Flexibilitätsanforderungen der Demontage automatisierte und manuelle Arbeitsstationen zuverlässig und wirtschaftlich zu einem flexiblen Demontagesystem kombiniert werden können.



Bild 52: Flexibles Demontagesystem am IWF der TU Berlin [SEL00b]

In diesem System werden zunächst die Seitenwände durch einen robotergeführten Plasmastrahl herausgetrennt. Dann werden sowohl manuell, als auch automatisiert weitere Komponenten wie das Bullauge, Kabel und Schläuche, die Einspülschale und –schublade sowie die Bedienblende mit zugehörigen Metallverstreben entnommen. Hier soll ein Greifer für Gehäuseteile und kleine Komponenten zum Einsatz kommen.



**Bild 53:** Trennen der Federn und Stoßdämpfer bei gegriffenem Schwingsystem

Anschließend soll das Schwingsystem samt Anbaukomponenten wie Motor, Pumpe und Betongewicht aus dem Gehäuse entnommen werden. Aufgrund des hohen Gewichtes des Schwingsystems sowie der scharfen Kanten und schlechten Zugänglichkeit soll dieser Prozess automatisiert werden. Hier soll ein weiterer Greifer zum Einsatz kommen. Dieser muss in der Lage sein, das Schwingsystem definiert zu greifen und es zunächst zu halten, bis die Federn und Dämpfer, die das Schwingsystem mit dem Gehäuse verbinden, mit einer Hydraulikschere getrennt sind (Bild 53). Anschließend soll er das Schwingsystem aus dem Gehäuse entnehmen und zur weiteren Verarbeitung an einen sogenannten Dodekapod übergeben. Dieser flexible Spann- und Manipulierroboter erleichtert nachfolgende manuelle und automatisierte Verrichtungen durch die Bereitstellung zusätzlicher Freiheitsgrade des Werkstücks. Das Schwingsystem wird bis auf den Motor einer dem Material nach getrennten Verwertung zugeführt. Anhand dieser Randbedingungen erfolgt die Auslegung von zwei Greifern mit Hilfe der implementierten Modelle.

## 6.2 Auslegung

### 6.2.1 Übertragbare Normalkräfte

Für die Handhabung von Kunststoffteilen wird ein maximales Handhabungsgewicht von 7,5 kg und eine minimale Wandstärke von 1,5 mm angenommen. Als maximale Wandstärke werden aufgrund der durchgeführten Untersuchungen Wandstärken bis 6 mm angenommen, die z.B. an Versteifungen von Gehäuseteilen auftreten. Zum Einsatz kommen hier als Endeffektoren die bereits beschriebenen SPAX<sup>®</sup>-Schrauben. Die eingesetzten Kunststoffe sind vielfältig. Für die Reißfestigkeit der Materialien

werden daher Werte zwischen  $10 \text{ N/mm}^2$  und  $60 \text{ N/mm}^2$  angenommen. Zur Dimensionierung des Endeffektors, der die Kräfte und Momente einleitet, muss der ungünstigste Fall angenommen werden, d.h. eine Reißfestigkeit von  $R_M = 10 \text{ N/mm}^2$  und eine Wandstärke und damit Eindringtiefe von  $1,5 \text{ mm}$ . Im Bild 54 sind die übertragbaren Normalkräfte in Abhängigkeit der Schubspannung des Werkstoffs des zu handhabenden Objektes für die Eindringtiefe  $h = 1,5 \text{ mm}$  dargestellt. Die Schubspannung geht linear in das Modell ein, so dass sich bei dieser Darstellung eine Gerade ergibt, deren Steigung von der Schraube abhängig ist. Mit Hilfe des in Excel 97 implementierten modifizierten Modells lassen sich solche Diagramme für beliebige Eindringtiefen schnell erstellen und können zur Auswahl des Endeffektors verwendet werden.

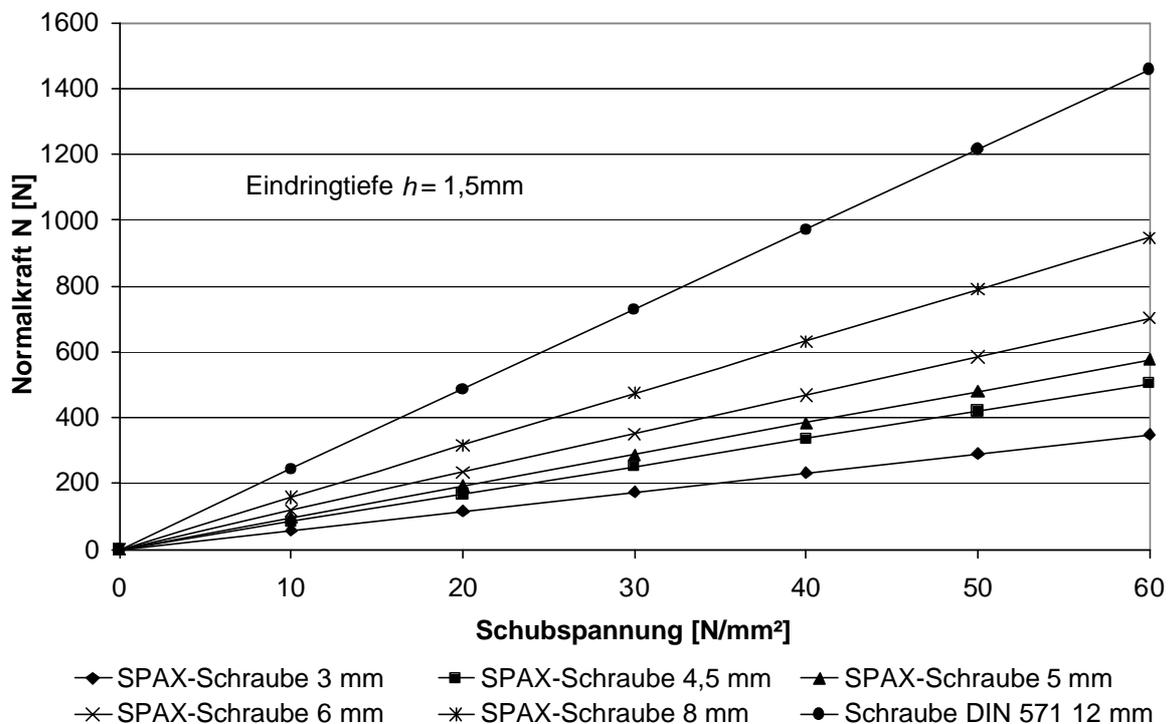


Bild 54: Übertragbare Normalkräfte in Abhängigkeit des Schraubendurchmessers (SPAX<sup>®</sup>-Schrauben) und Werkstoffs bei einer Eindringtiefe von  $h = 1,5 \text{ mm}$

Für die Handhabung von Kunststoffteilen von maximal  $7,5 \text{ kg}$  ergibt sich bei der Einrechnung eines Sicherheitsbeiwerts  $S_T = 2$  einer Normalkraft  $F_N$  von  $150 \text{ N}$ . Bei der als unteren Grenze angenommenen Reißfestigkeit von  $R_M = 10 \text{ N/mm}^2$  wird somit eine  $6 \text{ mm}$  SPAX<sup>®</sup>-Schraube ausgewählt.

Der Laugenbehälter mit Anbaukomponenten wie Motor, Pumpe und Betongewichten hat ein Gewicht von ca.  $45 \text{ kg}$  bis maximal  $80 \text{ kg}$ . Im Anwendungsbeispiel besteht dieser aus Polypropylen (s. Tabelle 4, Werkstoff 5) mit einer Reißfestigkeit von  $R_M = 48 \text{ N/mm}^2$ . Aufgrund der möglichen Kollisionen des Schwingsystems mit dem

Gehäuse beim Herausnehmen, der Verfahrbewegungen des Roboters sowie der Schäden, die durch ein herunterfallendes Schwingsystem verursacht werden können, sollte mindestens eine dreifache Sicherheit vorgesehen werden. Weiterhin ist aufgrund des Gewichts und der Bewegung des Schwingsystems damit zu rechnen, dass der Greifer sowie die Wirkflächen mit hohen Momenten beaufschlagt werden. Diese Einflüsse können zu Lasten der Flexibilität und Zugänglichkeit durch das Greifen mit zwei Endeffektoren verringert werden. Die Vor- und Nachteile sind für den jeweiligen Anwendungsfall abzuwägen.

Mit dem Sicherheitsbeiwert  $S_2 = 3$  ergibt sich eine erforderliche Normalkraft von 2400 N. Die Materialstärke und damit die Eindringtiefe beträgt  $h = 3$  mm. Mit Hilfe des entwickelten Modells kann für die einzelnen Durchmesser der Schrauben die übertragbare Normalkraft für eine Eindringtiefe von 3 mm berechnet und eine Schraube ausgesucht werden (Bild 55). Aufgrund der genannten Randbedingungen wird eine Schraube nach DIN571 mit 12mm Aussendurchmesser (s. Tabelle 5) eingesetzt. Diese kann eine Kraft von ca. 2500 N übertragen.

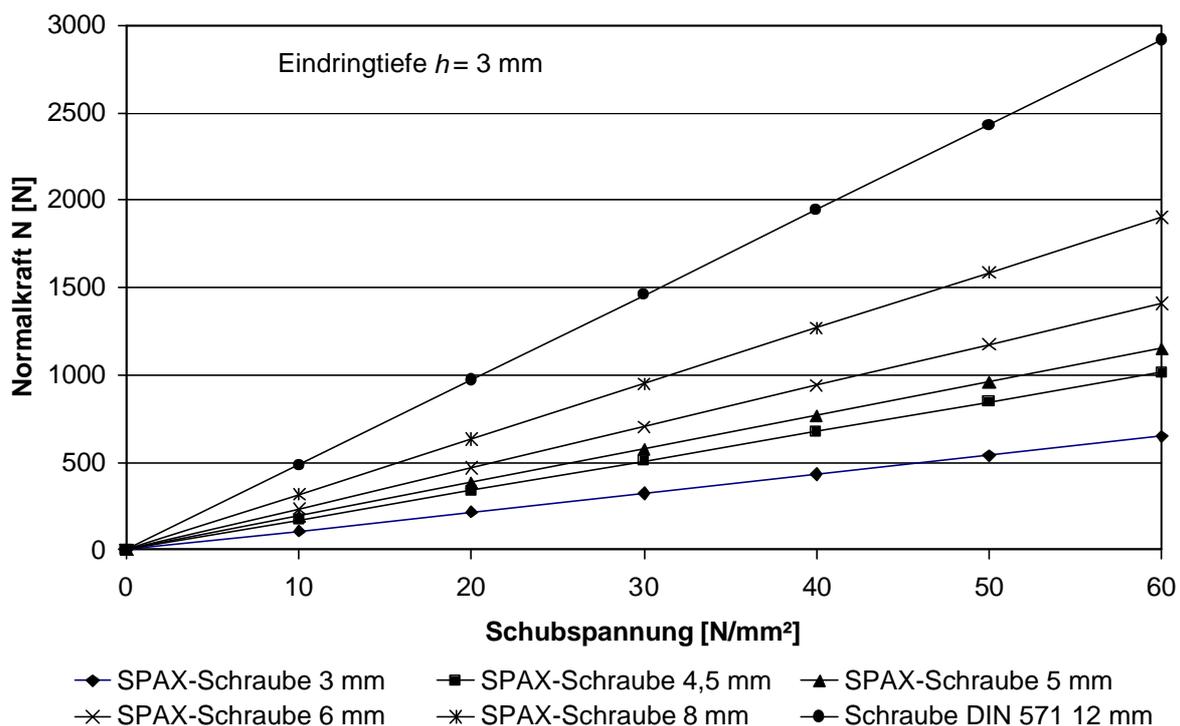


Bild 55: Übertragbare Normalkräfte in Abhängigkeit der Schraube und der Schubspannung des Werkstoffs bei einer Eindringtiefe von  $h = 3$  mm

### 6.2.2 Berechnung des Eindringmoments

Für die Handhabung von Kunststoffteilen mit einem Gewicht bis maximal 7,5 kg wurde eine SPAX®-Schraube mit einem Außendurchmesser  $D = 6$  mm ausgewählt. Bei einer

maximalen Eindringtiefe von  $h = 6$  mm und einer Reißfestigkeit von  $R_M = 60$  N/mm<sup>2</sup> ergibt sich mit Hilfe des in MATLAB implementierten oberen Schrankenverfahrens ein maximal erforderliches Eindringmoment von 12,487 Nm. Das kinematische System des Greifers muss damit in der Lage sein, den Endeffektor mit einem Drehmoment von ca. 13 Nm anzutreiben.

Für den Greifer für Schwingsysteme wurde die 12 mm Schraube nach DIN 571 ausgewählt. Sie hat einen Außendurchmesser von  $D = 12$  mm, einen Innendurchmesser von  $d = 9$  mm und eine Steigung von  $p = 4,5$  mm. Diese Werte werden in die Maske der in MATLAB implementierten Software eingegeben. Damit ergibt sich ein maximales Eindringmoment von 46 Nm.

Mit Hilfe der berechneten Drehmomente wird die erforderliche Leistung des Energiesystems festgelegt. Weiterhin geben sie Aufschluß darüber, welche Kräfte das kinematische System, das Trägersystem aber auch das Handhabungsgerät bzw. der Mensch aufnehmen muss.

## 6.3 Greifer zum Handhaben von kleinen Kunststoffkomponenten

### 6.3.1 Konstruktive Auslegung des Greifers

Für die Entwicklung der Prototypen werden die in Kapitel 5 beschriebenen konstruktiven Anforderungen sowie die gängigen Konstruktionsmethoden [VDI2222, ROT82, PAH93] berücksichtigt und angewendet. Die Konstruktionszeichnungen für den Greifer werden mit Hilfe von AutoCad erstellt.

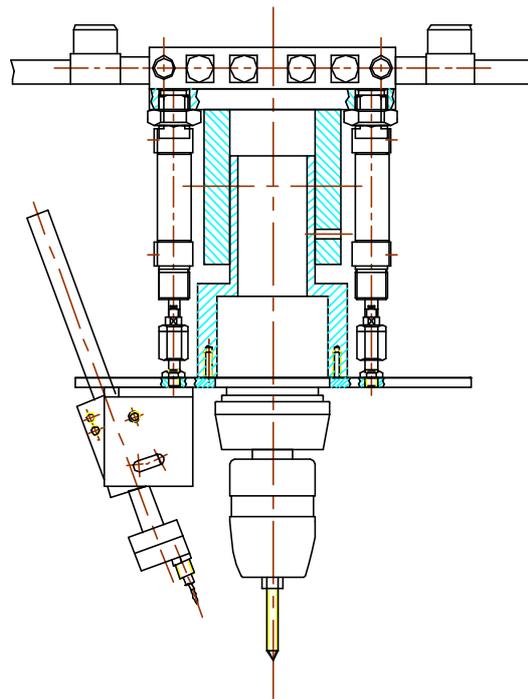


Bild 56: Konstruktionszeichnung des Greifers in AutoCad

Einsatzfeld des Greifers ist die Demontage von Kunststoffkomponenten aller Art, wie Gehäuseteile von Geräten der weißen und braunen Ware (z.B. Fernseher, PC, Videorekorder, Telefone, Fön, Tastaturen, Waschmaschinenkomponenten usw.) sowie von Teilen des Innenausbaus von Fahrzeugen, wie Türverkleidungen und Armaturenbrett beim Automobil oder auch die Innenausstattung von Schienenfahrzeugen. Der realisierte Greifer wurde für die automatisierte Demontage ausgelegt. Die Umrüstung für die manuelle Handhabung kann durch die Verwendung eines Griffes erfolgen. Zusätzlich könnte durch die Integration eines linearen Impulserzeugers das Lösen der Handhabungsobjekte erleichtert werden. Die Teilsysteme des realisierten Greifers werden im Folgenden beschrieben.

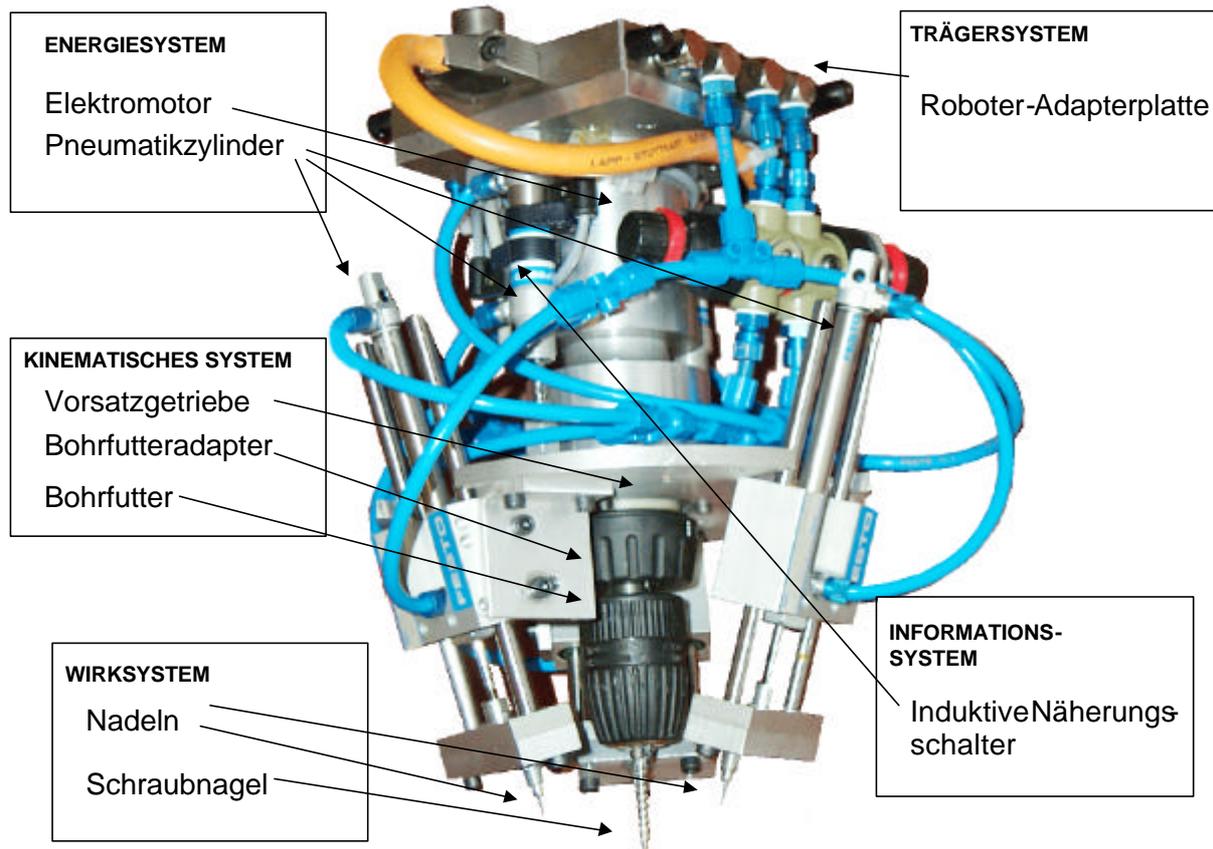


Bild 57: Prototypischer Greifer für Kunststoffkomponenten

### Informationssystem

Am Kunststoffgreifer sind zwei induktive Näherungsschalter der Firma Festo des Typs SMEO-4U-K-LED-24 direkt am Pneumatikzylinder installiert. Diese werden von der Robotersteuerung mit 12 Volt versorgt und deren Zustand über die Eingänge der Robotersteuerung abgefragt. Sie geben Auskunft, ob sich der Greifer in der oberen oder unteren Endlage befindet. Die Signale der Sensoren steuern den Greifprozess.

### Energie-System

Für den Kunststoffgreifer werden pneumatische und eine elektrische Antriebskomponente verwendet. Das Bohrfutter mit dem Endeffektor wird durch einen Elektromotor mit Getriebe angetrieben. Aufgrund der Auslegung kann ein Motor ausgewählt werden, der ein Drehmoment von ca. 13 Nm besitzt. Der verwendete kostengünstige Motor mit einem maximalen Drehmoment von 16 Nm stammt aus dem Akkubohrschrauber AB E 12/2 RT der Firma Metabo. Die Versorgung des Motors erfolgt über eine externe Spannungsquelle, da die erforderlichen Ströme nicht über das System des Roboters bereitgestellt werden können.

Zur Bewegung der Nadeln werden drei Pneumatikzylinder der Firma Festo des Typs DSNU-10-80P-A eingesetzt. Für die Bewegung des gesamten Greifers relativ zum Trägersystem werden zwei Zylinder des Typs DSNU-16-10-PA verwendet.

### **Kinematisches System**

Der Greifer kann auf einer verdrehgesicherten Linearführung mit den zwei Druckluftzylindern der Firma Festo (Typ DSNU-10P-A) verfahren werden. Der maximale Hub der Zylinder von 10 mm legt auch die maximale Eindringtiefe fest. Dieses System wird zusammen mit den im Informationssystem beschriebenen Näherungsschaltern in den Endlagen zur Steuerung des Aufsetzens auf dem Handhabungsobjekt, zum Ablegen, zur Anpassung des Vorschubes beim Erzeugen der Wirkflächen sowie zur Regulierung der Eindringtiefe genutzt.

Beim Erzeugen der Wirkflächen wird über die Zylinder eine konstante Anpresskraft erzeugt. Die ausführbare Linearbewegung und somit die Eindringtiefe wird durch die Kolbenlänge des Zylinders oder wahlweise durch mechanische Komponenten und Informationssysteme begrenzt. Damit kann die Eindringtiefe variabel an den jeweiligen Prozess angepasst werden.

Die drei Pneumatikzylinder des Typs DSNU-10-80P-A werden für die Bewegung der Nadeln eingesetzt. Parallelführungen der Firma Festo des Typs FEN-8/10-008-KF nehmen die durch die Nadeln aufgenommenen Kräfte und Momente auf und verhindern eine Beschädigung der Zylinder. Die drei Einheiten aus Zylinder und Parallelführung sind winkelverstellbar und können an das Handhabungsobjekt angepasst werden.

### **Wirksystem**

Als Endeffektoren des Wirksystems kommen die bereits beschriebenen Schaftschrauben zum Einsatz, die aus SPAX<sup>®</sup>-Schrauben durch abtrennen des Schraubenkopfes hergestellt werden. Aufgrund der Randbedingungen wird mit Hilfe des Modells eine Schraube mit einem Außendurchmesser von  $D = 6$  mm ausgewählt. Außerdem kommen zur Fixierung des Handhabungsobjektes während der Erzeugung und Nutzung der Wirkflächen sowie zum Ablegen gehärtete Stahlnadeln der Firma Schmauser (Form C, 1,98 x 33,3 mm) zum Einsatz. Aufgrund der hohen Festigkeit haben sie einen geringen Verschleiß. Sie werden durch eine Hülse gehalten, die bei Beschädigung der Nadeln ein einfaches Auswechseln ermöglicht.

## Trägersystem

Als Trägersystem kommt ein Werkzeugwechselsystem GWA 125 der Firma Schunk zum Einsatz die notwendigen Versorgungsungen für die Greifer (Pneumatik, Sensorik, Elektrik) werden ebenfalls beim Verbinden mit dem Greifer hergestellt. Es werden vier Signalleitungen, vier Pneumatikleitungen sowie eine Stromleitung benötigt.

Zukünftige Entwicklungen könnten in der Weiterentwicklung des Trägersystems liegen, um die Werkzeuge sowohl manuell als auch automatisiert ohne große Umrüstung einsetzen zu können.

### 6.3.2 Funktionsweise

Im Ausgangszustand sind die Zylinder zur Erzeugung des Vorschubes in der unteren Endlage. Diese Position wird über das Informationssystem festgestellt. Der Greifer wird nun in Richtung des Handhabungsobjektes verfahren. Zunächst setzen die Nadeln auf. Aufgrund ihrer Beweglichkeit passen sie sich der Oberfläche des Objektes an. Der Anpressdruck kann über den Druck der Zylinder reguliert werden. Anschließend setzt die Spitze der Schraube auf. Die Zylinder, die zum Verfahren der gesamten Greifers dienen, sind zu diesem Zeitpunkt nur mit geringem Druck beaufschlagt. Sie werden zusammengedrückt und der Näherungsschalter meldet dies an den Roboter. Die Verfahrensgeschwindigkeit des Roboters wird verringert und gestoppt, wenn der obere Näherungsschalter ausgelöst wird. Die Nadeln fixieren nun das Objekt und der Endeffektor befindet sich auf der Oberfläche des Handhabungsobjekts. Nun wird der Motor gestartet und der Endeffektor dringt in das Handhabungsobjekt ein. Der Vorgang wird gestoppt, sobald die obere Endlage der Zylinder zur Erzeugung des Vorschubes erreicht wird. Nach der Erzeugung können die Wirkflächen zur Übertragung von Kräften und Momenten genutzt werden und das Handhabungsobjekt von Ort A nach B transportieren (Bild 58). Anschließend wird die Schraube wieder aus dem Handhabungsobjekt herausgedreht. Die dabei auftretenden Kräfte sind deutlich geringer, da sie nur durch die Reibung zwischen Schraube und Werkstoff hervorgerufen werden. Auch dieser Prozess wird durch die Nadeln unterstützt, die zum einen das Objekt gegen ein Verdrehen sichern und zum anderen den Löseprozess durch die aufgebrachte Normalkraft erleichtern. So kommt es zu einer Lösung der Verbindung zwischen Greifer und Objekt.

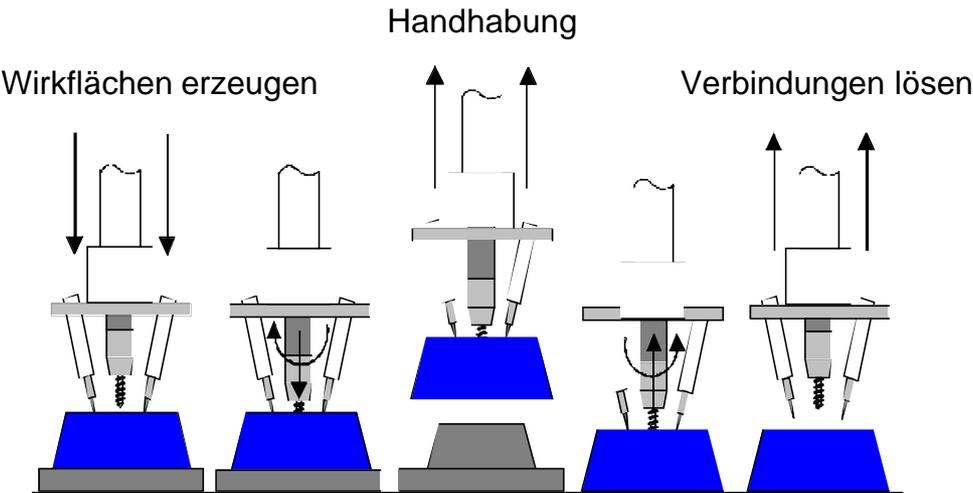


Bild 58: Prozessablauf für das Erzeugen und Nutzen von Wirkflächen mit einer Schaftschraube

### 6.3.3 Erprobung

Der Greifer wird zum Handhaben von verschiedenen Produkte und Komponenten aus unterschiedlichen Kunststoffen eingesetzt. Wie erwartet ist der Greifer weitgehend unabhängig von der Geometrie sowie dem Werkstoff des Handhabungsobjektes. Unter anderem wird der Greifer wie in Bild 59 zur Handhabung von Fernseherrückwänden verwendet.

Die in Fernsehern enthaltene Bildröhre stellt aufgrund der Implosionsgefahr ein Gefahrgut dar. Vielfach wurde die Automatisierbarkeit dieses Vorganges untersucht und zum Teil implementiert [EBA94, HUC97, DIE93]. Dabei erwies sich das Abnehmen der Rückwand aufgrund der Vielfalt der Formen und Werkstoffe bisher als problematisch.

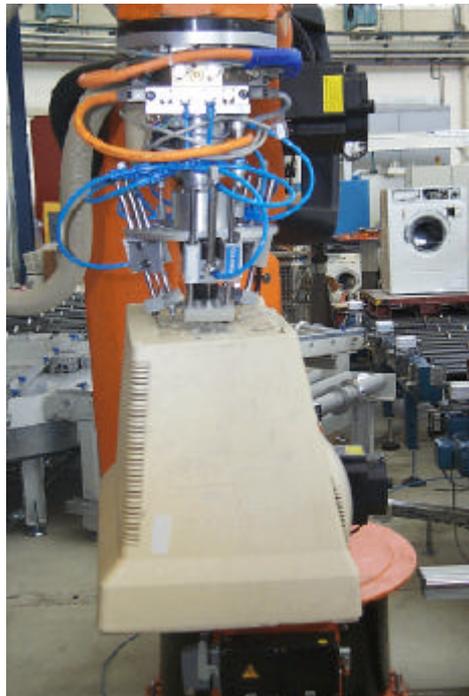


Bild 59: Handhabung von Fernseherrückwänden mit dem Greifer für Kunststoffkomponenten

Weiterhin wird der Greifer in Demontageprozessen zur hybriden Demontage von Waschmaschinen eingesetzt. Mit Hilfe des Greifers können zum Beispiel die Einspülschale und –schublade (Bild 60) oder auch die Frontblende abgenommen werden.



Bild 60: Entnahme der Einspülschublade mit dem realisierten Greifer

Zum Teil kam es zum Abrutschen des Endeffektors in der Einspannung des Schnellspannfutters. Daher werden die Endeffektoren am Schraubenschaft abgeschliffen. Der Greifer wird in weiteren Versuchen zur Erzeugung und Nutzung von Wirkflächen in Elektrokleingeräten, wie Kaffeemaschinen, Föns sowie Türverkleidungen von Pkws, eingesetzt. Vielfach reichen die über die erzeugte Verbindung übertragbaren Kräfte und Momente aus, um Press-, Schnapp- und Steckverbindungen ohne zusätzliche Prozesse zu lösen. So kann z.B. die eingeschnappte Einspülschublade, die aus einem Werkstoff mit hoher Reißfestigkeit besteht, durch den Greifer ohne vorheriges Lösen der Schnappverbindung herausgezogen werden. Manuell ist dieser Vorgang mühselig, da eine Kraft von über 300 N notwendig ist.

## **6.4 Greifer zum Handhaben des Schwingsystems einer Waschmaschine**

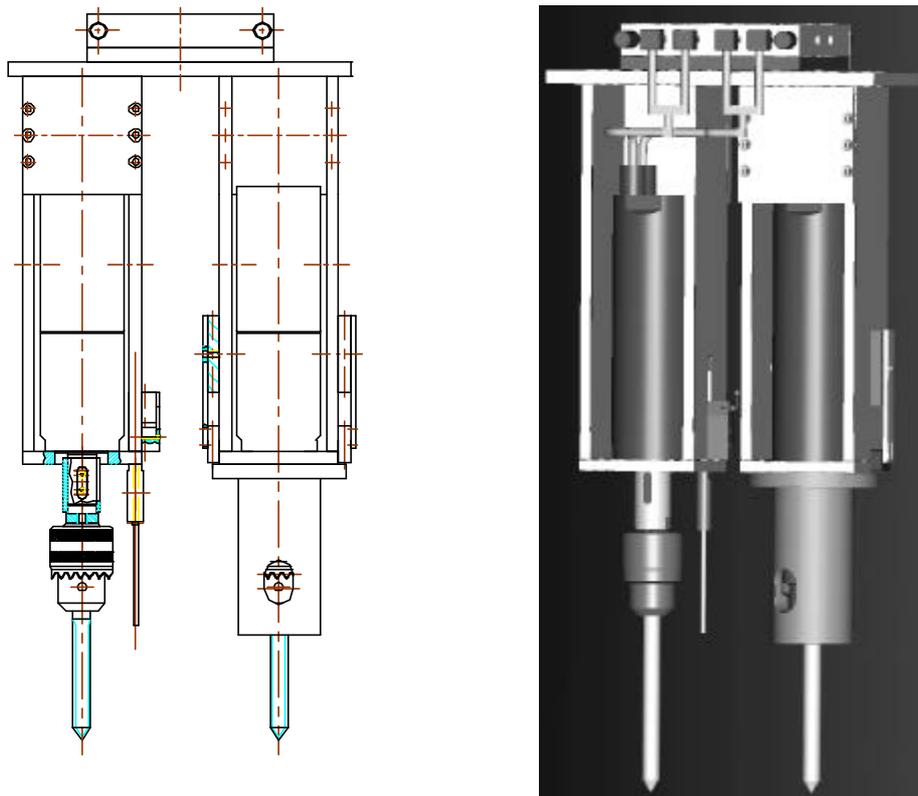
### **6.4.1 Konstruktive Auslegung des Greifers**

Zielsetzung ist es, einen Greifer zu entwickeln, der verschiedene Schwingsysteme mit einem Gewicht von ca. 45 kg bis maximal 80 kg handhaben kann. Das Schwingsystem besteht im Wesentlichen aus dem Laugenbehälter aus Kunststoff sowie der Waschtrommel aus Stahl (Bild 61).



**Bild 61:** Komponenten des Schwingsystems

Für die Entwicklung und Konstruktion des Greifers werden ebenfalls die konstruktiven Anforderungen sowie die gängigen Konstruktionsmethoden zu Grunde gelegt. Die konstruktive Realisierung des Greifers erfolgte in ProEngineer und AutoCad (**Bild 62**).



**Bild 62:** Konstruktionszeichnungen für den Greifer in AutoCad und Pro Engineer

In **Bild 63** ist der realisierte Prototyp mit der Bezeichnung der wesentlichen Komponenten der Teilsysteme des Greifers dargestellt. Im Folgenden wird die konstruktive Realisierung der Teilsysteme des Greifers beschrieben.

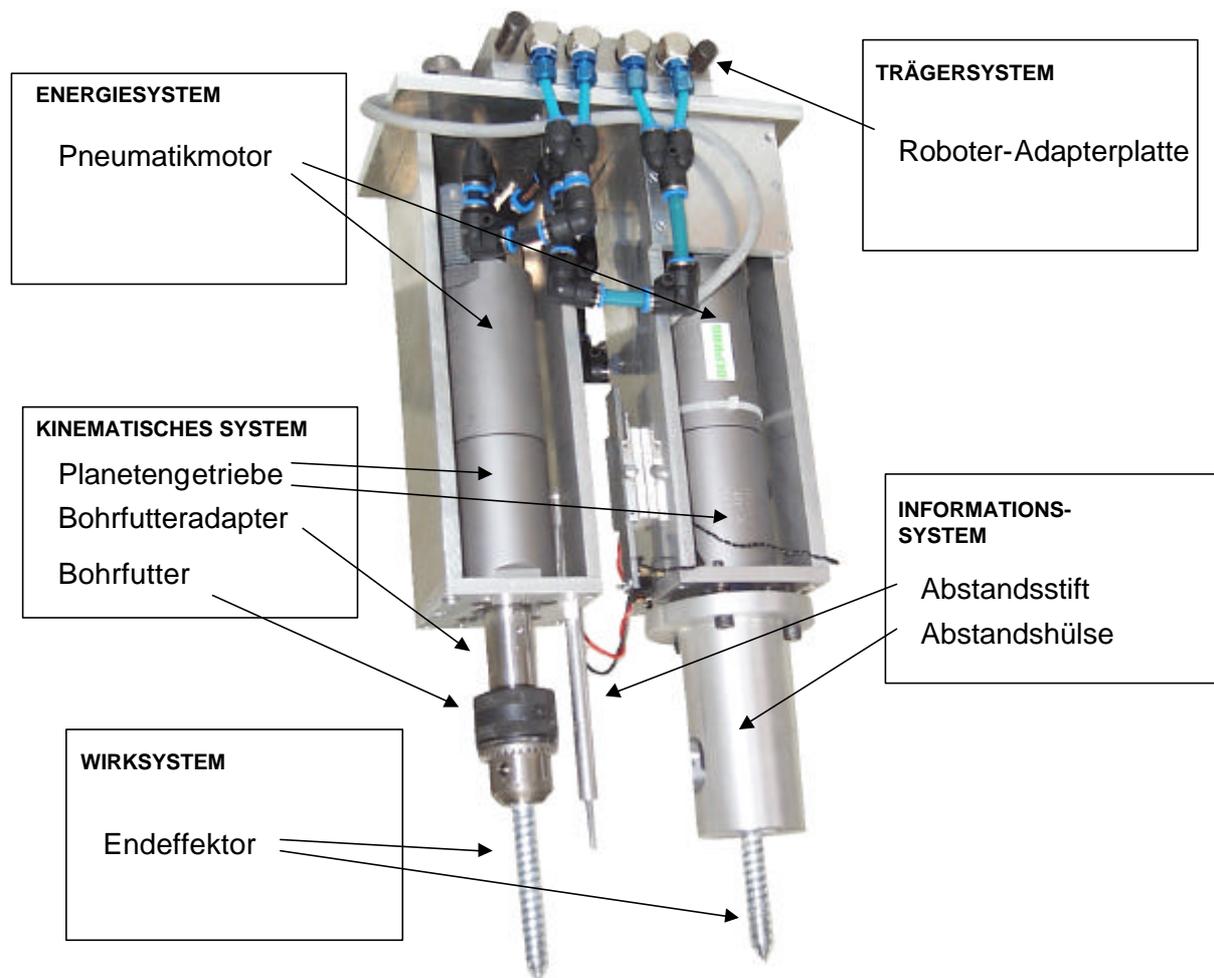


Bild 63: Realisierter flexibler Greifer für schwere Komponenten

### Informationssystem

Für den Greifer werden zwei taktile Sensoren zur Überwachung der Eindringtiefe eingesetzt. Diese sind ebenfalls mit der Robotersteuerung verbunden. Für die Realisierung werden drei Mikroschalter eingesetzt. Zwei Schalter der Firma Omron Typ SS-5GL2 sind unter der federnd gelagerten Hülse angebracht. Sobald die Hülse auf einen Widerstand trifft, bewegt sich die Hülse durch Zusammendrücken der Federn nach unten und betätigt die justierbaren Mikroschalter. Die Schalter geben ein Signal an die Robotersteuerung weiter, wodurch die Druckluftzufuhr für den Lamellenmotor unterbrochen und damit der Eindringprozess gestoppt wird. Ein weiterer Sensor der Firma OTEHALL England des Typs 385/25/10 ZDO wird in einem sensorischen Abstandsstift eingesetzt, um den zweiten Motor zu stoppen (Bild 64). Aufgrund der beschränkten Zugänglichkeit am Schwingsystem der Waschmaschine wird hier keine Hülse, sondern der Stift zu Ermittlung der Eindringtiefe verwendet.

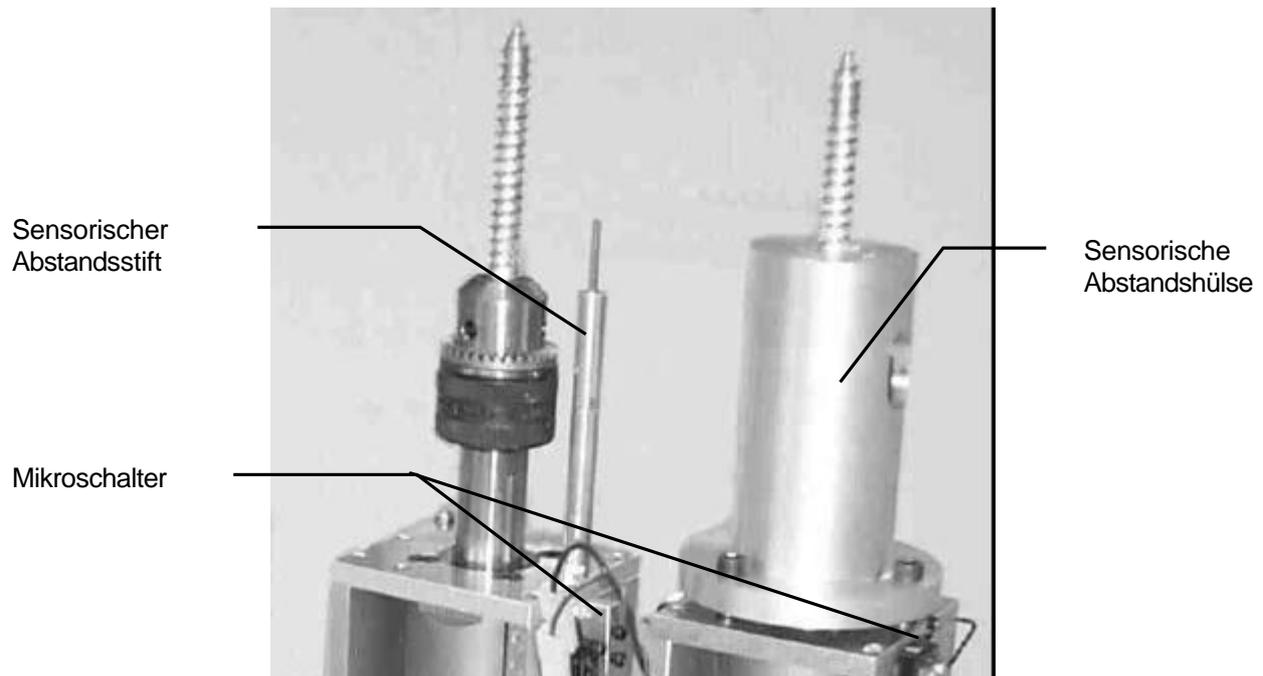


Bild 64: Komponenten des Informationsverarbeitungssystems

Dieser betätigt, wenn er auf ein Hindernis trifft ebenfalls einen Mikroschalter und stoppt die Rotationsbewegung des Endeffektors. Durch dieses Informationssystem kann sichergestellt werden, dass das Schwingsystem der Waschmaschine in der Waagerechten definiert gegriffen ist. Dies ist eine Voraussetzung zur Durchführung der komplexen Bewegung zum Herausnehmen des Schwingsystems aus dem Gehäuse.

### **Energie-System**

Es werden zwei Druckluftlamellenmotoren mit Getriebe des Typs 67-066 der Firma Deprag & Schulz GmbH mit einem maximalen Drehmoment von 57 Nm und einer Nennleistung von 600 Watt eingesetzt. Sie sind damit in der Lage, das errechnete Drehmoment von 46 Nm aufzubringen. Alle Außenteile incl. der Spindel sind aus rostfreiem Stahl. Die Motoren sind vollkommen abgedichtet, es kann weder Abluft austreten, noch Verschmutzung aus der Umgebung eindringen. Damit sind sie für das Anwendungsfeld Demontage bestens geeignet. Sie können wahlweise im Rechts- oder Linkslauf betrieben werden. Die Umsteuerung erfolgt automatisch durch das Steuerungsprogramm des Roboters. Die Motoren können die hohen Kräfte und Momente bei der Handhabung des Schwingsystems ohne eine Schädigung aufnehmen.

### **Kinematisches System**

Das kinematische System dient der Bewegungs- und Kraftübertragung zwischen Antriebs- und Wirksystem des Greifers. Es hat die Aufgabe, die rotatorische Bewegung vom Antrieb auf den Endeffektor zu übertragen. Im Wesentlichen bildet das

kinematische System die mechanische Grundstruktur mit sämtlichen Getriebe-, Übertragungs- und Führungselementen. Es umfasst das Getriebe des Antriebmotors, eine Kupplung zwischen Abtriebswelle und Aufnahme für den Endeffektor sowie die Aufnahme selbst. Als Aufnahme für den Endeffektor wird ein handelsübliches Zahnkranz-Bohrfutter der Firma RÖHM (Typ Prima) mit 3 Backen verwendet. Es ist für Links- und Rechtslauf geeignet (Bild 65). An der Abtriebswelle des Druckluftmotors ist eine Passfedernut und eine Passfeder serienmäßig vorhanden. Zur weiteren Übertragung der Rotationsbewegung wird eine Kupplung benötigt, die Abtriebswelle und Bohrfutter verbindet.



Bild 65: Bohrfutter der Firma Röhms [RÖH01]

Die konstruierte Kupplung besitzt auf der Abtriebsseite, zum Verbinden mit dem Bohrfutter, ein rechtsgängiges Außen- und linksgängiges Innengewinde. Auf der Antriebsseite wird sie über eine Passfeder mit der Welle des Getriebes des Motors verbunden.

### **Wirksystem**

Als Wirksystem kommt die ausgewählte 12 mm Holzschraube nach DIN 571 ohne Schraubenkopf zum Einsatz. Diese ist kostengünstig, kann schnell gewechselt und je nach Anwendungsfall in der Länge variiert werden. Die Lebensdauer des Endeffektors kann durch das Aufbringen von Beschichtungen oder das Verwenden anderer Werkstoffe erhöht werden.

### **Trägersystem**

Das Trägersystem ist die mechanische Schnittstelle zwischen Greifer und Handhabungsgerät. Sie dient der Übertragung der aufgenommenen und erzeugten Kräfte und Momente. Hier erfolgt auch die energetische Kopplung mit der Antriebsenergie sowie der Informationsaustausch zwischen Sensorik und Steuerung. Das Trägersystem umfasst das Werkzeugwechselsystem GWA 125 der Firma Schunk mit den notwendigen Versorgungsleitungen für die Greifer (Pneumatik, Sensorik,

Elektrik) sowie den Motorträger als Gerüst des Greifers. Zukünftige Entwicklungen könnten in der Weiterentwicklung des Trägersystem liegen, um die Werkzeuge sowohl manuell als auch automatisiert ohne große Umrüstung einsetzen zu können.

#### **6.4.2 Funktionsweise**

Gegenüber dem Greifer für kleine Kunststoffkomponenten ist für den Greifer von Schwingsystemen keine Fixierung des Handhabungsobjekts erforderlich. Das Schwingsystem ist beim Herstellen der Verbindung durch das Gehäuse und beim Lösen durch den bereits genannten Dodekapod fixiert. Weiterhin wird durch die Verwendung von zwei gleichzeitig aufsetzenden Endeffektoren das Einleiten von Momenten und somit ein Verdrehen verhindert. Die Motoren sind einzeln steuerbar und können separat durch einen Sensor gestoppt werden. Zum Erzeugen von Wirkflächen werden die Endeffektoren auf das jeweilige Handhabungsobjekt aufgesetzt und die Motoren im Rechtslauf gestartet, bis sie durch ein Sensorsignal wieder gestoppt werden. Zum Lösen der Verbindung werden die umsteuerbaren Motoren entsprechend im Linkslauf betrieben. Für die Anpassung des Vorschubes an die Steigung und Umdrehungszahl des Endeffektors ist keine Vorrichtung vorgesehen, da sie zur Handhabung der Schwingsysteme nicht benötigt wird.

#### **6.4.3 Erprobung**

Der Greifer wird über das Werkzeugwechselsystem mit dem Industrieroboter verbunden. Nachdem er grob über dem Schwingsystem positioniert und orientiert ist, werden die Pneumatikantriebe mit Druckluft versorgt. Der Roboter fährt dann mit konstanter Geschwindigkeit nach unten auf das federnd aufgehängte, nachgiebige Schwingsystem. Die rotierenden Endeffektoren erzeugen ein Gewinde im Schwingsystem und schrauben sich ein. Beim Betätigen der taktilen Sensoren in Hülse und Abstandsstift wird der jeweilige Antrieb abgeschaltet. Wenn sich beide Antriebe im Stillstand befinden, ist das Schwingsystem waagrecht gegriffen und die Bewegung des Roboters wird gestoppt. Die entstandene Verbindung zwischen Schwingsystem und Greifer ist ausreichend, um das bis zu 80 kg schwere Schwingsystem aus dem Gehäuse zu entnehmen. Bei dem beschriebenen Prozess ist die Synchronisierung von Robotervorschub zur Umdrehungszahl und Steigung des Endeffektors aufgrund der Nachgiebigkeit des Schwingsystems nicht erforderlich. Anschließend wird das Schwingsystem mit Hilfe des Greifers an den Dodekapod übergeben (Bild 66). Dieser nutzt die Trommelöffnung als Greiffläche.

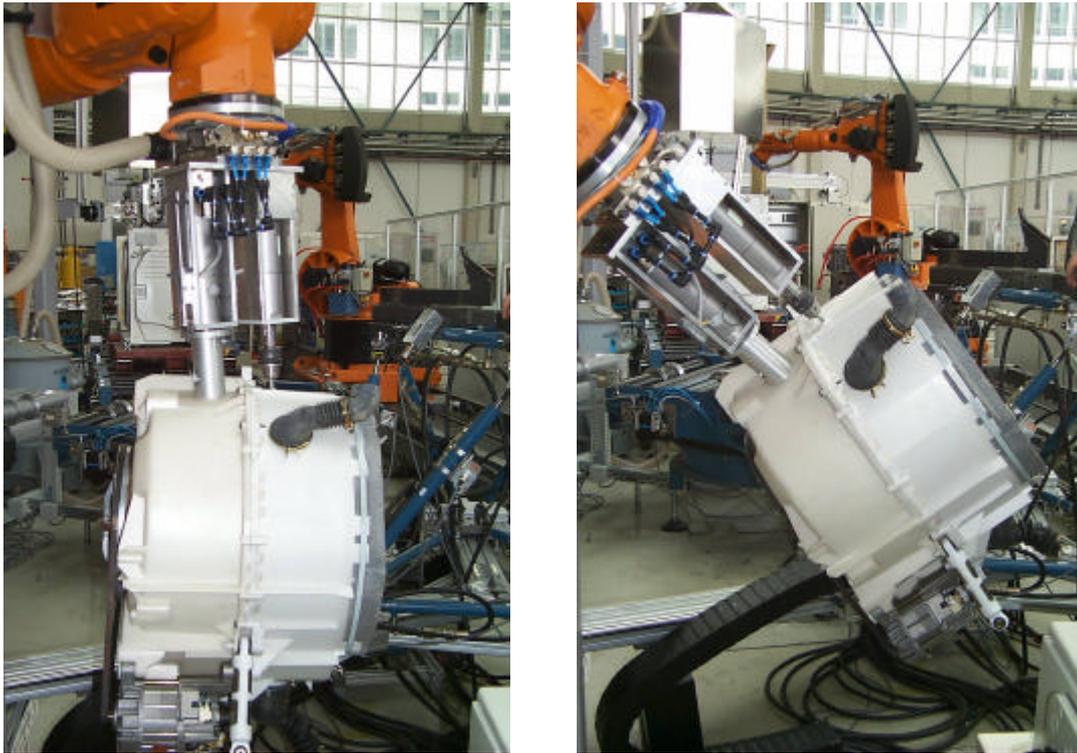


Bild 66: Greifer mit Schwingsystem

Das umgesetzte Greiferprinzip hat sich hinsichtlich seiner Funktions- und Wirkstruktur im Demontageprozess als geeignet herausgestellt. Serienreife Konstruktionen des Greifers werden sich durch gefälligere, ergonomisch günstigere Formen und Materialien sowie eine modulare Bauweise auszeichnen. Eventuell können tragende Funktionen durch Kunststoffteile ersetzt werden, so dass das Werkzeug leichter wird und durch Anpassungen am Trägersystem (z.B. Griffe) auch manuelle Verrichtungen, ohne Handhabungsgeräte, möglich werden.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Die Demontage ermöglicht das Schließen von Kreisläufen, wodurch Ressourcen länger in Produkt- und Materialkreisläufen verbleiben. Beim Einsatz handelsüblicher Werkzeuge ist die Durchführung von Demontageprozessen aufgrund der vielfältigen Geometrien und Werkstoffe der Produkte sowie der nutzungsbedingten Veränderungen in der Regel zeit- und kostenintensiv. Ständige Werkzeugwechsel, das Bereitstellen zahlreicher Werkzeuge sowie wiederholte Erkennungs- und Entscheidungsprozesse haben hohe Personal- und Werkzeugkosten zur Folge.

Zur Reduzierung der Kosten werden flexible und robuste Werkzeuge benötigt, die weitgehend unabhängig von Geometrie und Werkstoff Kräfte und Momente zum Greifen und Spannen sowie zum Lösen von Verbindungen einleiten. Der Einsatz wirkflächengenerierender Verfahren ermöglicht neue Greifprinzipien, mit denen robuste und flexible Werkzeuge für die Demontage entwickelt werden können. Im Rahmen dieser Arbeit werden die Voraussetzungen zur Entwicklung und Konstruktion von flexiblen Demontagegreifern, die auf diesem Prinzip beruhen, geschaffen und beispielhaft in zwei Greifern umgesetzt. Die Greifer tragen zur Erleichterung von Demontageprozessen, zur Humanisierung der Arbeitsbedingungen sowie zur Rationalisierung der Demontage bei.

Zur Erzeugung der Wirkflächen können die Fertigungsverfahren nach DIN 8580 eingesetzt werden. Diese werden analysiert und bewertet. Ausgewählt wird das Gewindefurchen nach DIN 8583, bei dem eine sichere Verbindung zwischen Greifer und Handhabungsobjekt entsteht, über die Kräfte und Momente in sechs Freiheitsgraden übertragen werden können. Dieses Verfahren ist weitgehend unabhängig vom Werkstoff und der Geometrie des Objektes. Der Endeffektor kann zur Erzeugung und Nutzung der Wirkflächen eingesetzt werden. Die Eindringkräfte und damit die Reaktionskräfte am Greifer sind relativ gering. Die Greifkraftübertragung ist auch bei Energieausfall gewährleistet und es kommt zu keiner zusätzlichen Verschmutzung. Der sensorielle Aufwand zur Positionierung und Orientierung des Greifers ist gering und durch eine einfache Überwachung der Eindringtiefe kann eine Beschädigung anderer Komponenten vermieden werden. Das Lösen erfolgt durch Herausdrehen des Endeffektors mit entgegengesetzter Drehrichtung.

Die zur konstruktiven Umsetzung des Greifprinzips erforderlichen Informationen über die übertragbare Normalkraft zur Auswahl des Endeffektors sowie die Höhe des Eindringmomentes eines gewindefurchenden Endeffektors zur Auslegung des Antriebes, werden in Prozessmodellen bestimmt. Für die Berechnung des Eindringmomentes wird das obere Schrankenverfahren, ein analytisches Modell der

Plastomechanik, verwendet. Zur Berechnung der übertragbaren Normalkraft wird ein vorhandenes Modell überarbeitet. Die Modelle können neben der Auslegung der Werkzeugkomponenten zur Bestimmung der Reaktionskräfte auf Mensch oder Maschine, zur Überwachung des Prozesses aber auch zur Simulation herangezogen werden. Auch beim Einsatz von gewindeformenden Schrauben in der Fertigung können Schraubeinheiten ausgewählt und die Festigkeit der Verbindung berechnet werden. Die entwickelten und implementierten Modelle ermöglichen es, das Eindringmoment und die übertragbare Normalkraft schnell und einfach für den jeweiligen Anwendungsfall zu berechnen.

In der experimentellen Überprüfung der Modelle werden an einem Versuchsstand für verschiedene Kunststoffe und Endeffektoren die Eindringmomente in Abhängigkeit des Schraubeninnen- und Außendurchmessers, der Steigung, der Reißfestigkeit des Werkstoffs sowie der Eindringtiefe gemessen. Die experimentell ermittelten Werte liegen aufgrund des oberen Schrankenverfahrens unter den im Modell errechneten Werten. Die geringen Abweichungen zwischen Experiment und Modell belegen die Angemessenheit des aufgestellten Modells. An einem weiteren Versuchsstand einer Zug-Druckmaschine werden die übertragbaren Normalkräfte experimentell überprüft. Das durch Modifikation des von ERHARD [ERH99] aufgestellten Modells zur Berechnung der Abscherkräfte einer gewindeformenden Schraube entstandene Modell wird ebenfalls durch die Messwerte belegt.

Anhand der Teilsysteme eines Greifers werden die relevanten konstruktiven Anforderungen an die Teilsysteme beschrieben. Anschließend erfolgt die Umsetzung von zwei wirkflächengenerierenden flexiblen Greifern für ein hybrides Demontagesystem, in dem sie Kunststoffkomponenten sowie das Schwingsystem handhaben. Diese weisen ihre Funktionsfähigkeit im Betrieb eines Demontagesystems nach.

Ein zukünftiges Forschungsfeld wird in der Modularisierung der Greifer aber auch der Demontagewerkzeuge allgemein gesehen. So wären Abstufungen von Greifergrößen vorstellbar, die aufbauend auf Modulen entsprechend dem Einsatzgebiet manuell und/oder automatisiert zum Einsatz kommen. Der Baukasten sollte unter anderem Komponenten zur Erzeugung von rotatorischen und translatorischen Schlägen und Bewegungen, Wechselsysteme für Endeffektoren, Griffe für die manuelle Handhabung sowie verschiedene Sensorsysteme umfassen, die nahezu beliebig kombiniert und angeordnet werden können. Aus diesem Baukasten könnten nicht nur kostengünstige und flexible Greifer, sondern auch andere Werkzeuge wie z.B. der Entschrauber [WAG97, SEL00b] entstehen.

## 8 Literatur

- [BAU91] Bauer, C.-O.: Handbuch der Verbindungstechnik. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 1991.
- [BAT 86] Bathe, K.-J.: Finite-Elemente-Methoden. Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo: Springer Verlag, 1986.
- [BOK97] Boks, C.B.; Tempelman, E.: Delphi Study on Future Disassembly and Recycling Technology for the Electronics and Automotive Industry, Final Report. TU Delft, Delft, Netherlands, 1997.
- [BRI94] Brinkmann, K.; Ehrenstein, G.W.; Steinhilper, R.: Umwelt- und recyclinggerechte Produktentwicklung: Anforderungen, Werkstoffwahl, Gestaltung, Praxisbeispiele. Augsburg: WEKA Verlag GmbH, 1994.
- [BTH87] Barthelmeß, P.: Montagegerechtes Konstruieren durch die Integration von Produkt- und Montageprozessgestaltung. Reihe iwv-Forschungsberichte, Bd. 9. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 1987.
- [CAR81] Cardaun, U.: Systematische Auswahl von Greifkonzepten für die Werkstückhandhabung. Dissertation Universität Hannover, 1981.
- [DEG93] Degner, W.; Lutze, H.; Smejkal, E.: Spanende Formung: Theorie, Berechnung, Richtwerte. 13. Auflage. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 1993.
- [DFG96] N.N.: Integration der Montage- und Demontageprozess-Gestaltung in einem produktneutralen Ansatz. Bericht über den ersten Bearbeitungszeitraum. DFG-Projekt Erlangen, München, Stuttgart, 1996.
- [DIN1910] DIN 1910 Teil 1: Schweißen; Begriffe, Einteilung der Schweißverfahren. Berlin: Beuth Verlag, 1983.
- [DIN267] DIN 267-30: Mechanische Verbindungselemente - Technische Lieferbedingungen – Teil 30: Metrische gewindefurchende Schrauben. Berlin: Beuth Verlag, 2001.
- [DIN571] DIN 571: Sechskant-Holzschrauben. Berlin: Beuth Verlag, 1986.
- [DIN2740] DIN 2740 Blatt 1: Mechanische Einrichtungen in der Automatisierungstechnik: Greifer für Handhabungsgeräte. Berlin: Beuth Verlag, 1991.
- [DIN8580] DIN 8580 E: Fertigungsverfahren: Begriffe, Einteilungen (Entwurf). Berlin: Beuth Verlag, 1985.
- [DIN 8582] DIN 8582: Fertigungsverfahren Umformen; Einordnung, Unterteilung. Berlin: Beuth Verlag, 1974.

- Unterteilung. Berlin: Beuth Verlag, 1971.
- [DIN8583] DIN 8583: Fertigungsverfahren Druckumformen; Eindrücken; Blatt 5: Unterteilung, Begriffe. Berlin: Beuth Verlag, 1970.
- [DIN8588] DIN 8588: Fertigungsverfahren Zerteilen - Einordnung, Unterteilung, Begriffe. Berlin: Beuth Verlag, 1985.
- [DIN8589] DIN 8589 Teil 0: Fertigungsverfahren Spanen. Einordnung, Unterteilung, Begriffe. Berlin: Beuth Verlag, 1981.
- [DIN8590] DIN 8590: Fertigungsverfahren Abtragen. Einordnung, Unterteilung, Begriffe. Berlin: Beuth Verlag, 1983.
- [DIN8591] DIN 8591 E: Fertigungsverfahren Zerlegen - Einordnung, Unterteilung, Begriffe (Entwurf). Berlin: Beuth Verlag, 1985.
- [DIN8593] DIN 8593: Fertigungsverfahren Fügen; Einordnung, Unterteilung, Begriffe. Berlin: Beuth Verlag, 1985.
- [DIN19226] DIN 19226 Teil 1: Regelungstechnik und Steuerungstechnik. Allgemeine Grundbegriffe. Berlin: Beuth Verlag, 1994.
- [DIN66201] DIN 66201: DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin. DIN 66201 Teil 1, Prozessrechensysteme: Begriffe. Berlin: Beuth Verlag, 1981.
- [DIE93] Dieterle, A.: Flexible Demontage von Elektrokleingeräten. Produktionsautomatisierung, Nr. 6, 1993.
- [DRE93] Dreher, H.; Krüll, G.: Alles im Griff. Planung und Auswahl von Greiferwechselsystemen. Robotertechnik (1993) Sonderpublikation, S.36-39.
- [DRU51] Drucker, D.C.; Greenberg, W.; Prager, W.: The safety factor of an elastic plastic body in plane strain. Trans. ASME J. App. Mechs. 73, 371 (1951).
- [DUB97] Beitz, W.; Grote, K.-H.: Dubbel, Taschenbuch für den Maschinenbau. 19. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York, Barcelona, Budapest, Hongkong, London, Mailand, Paris, Santa Clara, Singapur, Tokio: Springer Verlag, 1997.
- [EBA94] Ebach, H.: Advanced Disassembly Systems, an Important Step in Life Cycle. 2<sup>nd</sup> International Seminar on Life Cycle Engineering, CIRP RECY'94, Meisenbach Verlag Bamberg, 1994.
- [EPA97] N.N.: Remanufactured products: Good as new. United States Environmental Protection Agency, EPA 530-N-002, 1997.
- [ERH99] Erhard, G.: Konstruieren mit Kunststoffen. 2. Auflage München, Wien: Carl Hanser Verlag, 1999.

- [ERS75] Ersoy, M.: Wirkfläche und Wirkraum - Ausgangselemente zum Ermitteln der Gestalt beim rechnergestützten Konstruieren. Dissertation TU Braunschweig, 1975.
- [FAN95] Fan, X.: Simulation des Ringwalzprozesses mit dem Oberen Schrankenverfahren. Fortschr.-Berichte. VDI Reihe 2 Nr. 357. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1995.
- [FEL93] Feldmann, K.; Hopperdietzel, R.: Wirtschaftliches Recycling durch automatisierte Demontage. Zwf 88 (1993) 4, S. 148-150.
- [FEL96a] Feldmann, K.; Schönherr, U.; Zeller, J.: Control and Grasp Strategies for a Multifingered Hand. Production Engineering 3 (1996) 1, S. 83-86.
- [FEL96b] Feldmann, K.; Meedt, O.: Innovative Werkzeuge zur Steigerung der Effizienz bei der Demontage elektronischer Produkte. In: Tagungsband zum VDI-Seminar "Recyclingfähige elektronische Produkte". Düsseldorf: VDI-Verlag, 1996.
- [FEL96c] Feldmann, K.; Meedt, O.: Recycling and Disassembly of Electronic Devices. In: Life-Cycle Modelling for Innovative Products and Processes (Hrsg. Jansen, H.; Krause, F.-L.). London, Weinheim, New York, Tokyo, Melbourne, Madras: Chapman & Hall (1996), S. 233-245.
- [FEL96d] Feldmann, K.; Meedt, O.: Innovative Tools and Systems for Efficient Disassembly Processes. In: ECO-Performance '96. Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Seminar on Life Cycle Engineering. Zürich: Verlag Industrielle Organisation, 1996, S. 229-236.
- [FEL97] Feldmann, K.; Meedt, O.: Effizienzsteigerung bei der Demontage elektronischer Geräte. Beitrag zum Kolloquium zur Kreislaufwirtschaft, Sfb 281, TU Berlin, 1997.
- [FEL99] Feldmann, K.; Meedt, O.: Innovative Werkzeuge zur Steigerung der Effizienz bei der Demontage elektronischer Produkte, in: VDI-Verlag [Hrsg.], Tagungsband zum VDI-Seminar "Recyclingfähige elektronische Produkte", Düsseldorf, 1999.
- [GOT95] Gottschalk, T.; Allester, F.; Gutsche, C.: Festgefriergreifer mit ständig kühlender Greifwirkfläche und das Verfahren zu seinem Betreiben. Patentschrift DE 4411826 C1, 31.08.1995.
- [GRO98] Große-Ophoff, M.; Gruber, F.: Altautoverwertung – Probleme und zukünftige Anforderungen; Entsorgungspraxis Nr. 7-8, S.48-54, 1998.

- [GUI99] Guide, D.: Remanufacturing Production Planning and Control: U.S: Industry Practise and Research Issues. Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Seminar on Re-use. Eindhoven , Netherlands, March 1999.
- [HEN96] Hentschel, C.: Beitrag zur Organisation von Demontagesystemen. Dissertation TU Berlin. Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin: Berlin, 1996.
- [HER92 ] Hering, E.; Martin, R.; Stohrer, M.: Physik für Ingenieure. 4. Auflage, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1992.
- [HES98] Hesselbach, J.; Kühn, M.: Survey of Processes at Disassembly Companies. In: 1<sup>st</sup> IFAC Workshop on Intelligent Assembly and Disassembly, Bled, Slovenia, 1998, p. 141-145.
- [HUC97] Hucht, A.: Vorstellung einer flexibel automatisierten Demontagezelle für Altfernsehgeräte. Informationsmaterial PRIELOG Logistik GmbH Prieros, Wildau, 1997.
- [IND84] N.N.: Vergleich der Finite-Element-Methode und der Boundary-Element-Methode. Industrieanzeiger, 26, 1984.
- [ISE88] Isermann, R.: Identifikation dynamischer Systeme, Bd. 1 und Bd. 2, Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1988.
- [ISO10666] DIN EN ISO 10666 Bohrschrauben mit Blechsraubengewinde – Mechanische und funktionelle Eigenschaften (ISO 10666:1999); Deutsche Fassung EN ISO 10666:1999. Berlin Beuth Verlag, 2000.
- [KAH95] Kahmeyer, M.: Flexible Demontage mit dem Industrieroboter am Beispiel von Fernseh-Endgeräten. Dissertation, Universität Stuttgart. Reihe Forschung und Praxis, Band 215. Berlin Heidelberg, New York, Springer Verlag, 1995.
- [KOL72a] Koller R.: Methodisches Konstruieren und Entwickeln von Produkten. In: Schweizer Maschinenmarkt 42, S. 336-342, 1972.
- [KOL72b] Koller, R.: Methodischen Konstruieren. In: Industrie Anzeiger 94, S. 336-342, 1972.
- [KOL94] Koller, R.: Konstruktionslehre für den Maschinenbau. Berlin: Springer 1976, 2 Aufl. 1985. – Grundlagen zur Neu- und Weiterentwicklung technischer Produkte, 3. Aufl. 1994.
- [KÖL95] Köller, H.: Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz, Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis Bd. 77, Erich Schmidt Verlag, Berlin 1995.

- [KOP98] Kopp, R.;  
Wiegels, H.: Einführung in die Umformtechnik. 1. Auflage Aachen:  
Verlag der Augustinus Buchhandlung, 1998.
- [KRI95] Kriwet, A.: Bewertungsmethodik für die recyclinggerechte  
Produktgestaltung. Dissertation TU Berlin. Reihe  
Produktionstechnik Berlin, Band 163. München, Wien:  
Carl Hanser Verlag, 1995.
- [KRW94] N.N.: Gesetz zur Vermeidung, Verwertung und Entsorgung  
von Abfällen – Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz  
(KrW- /AbfG), Bonn, Juli 1994.
- [KUN97] N.N.: Erste thermoplastische Heckklappe. Kunststoffe 87,  
(1997), 12, S. 1803.]
- [KUN98] N.N.: Kunststoffe 88 (1998) 10 Carl Hanser Verlag,  
München 1998.
- [LAN99] Lang, O.;  
Vogel, R.;  
Siebel, N.;  
Gräder, A.: Vergleich verschiedener bildbasierter Regler zur  
Realisierung teilautonomer Greifvorgänge. Autonome  
Mobile Systeme 1999, 15. Fachgespräch. Berlin,  
Heidelberg, Springer Verlag 1999.
- [LOS96] Loske, R.;  
Bleischwitz, R.: Zukunftsfähiges Deutschland. Ein Beitrag zur global  
nachhaltigen Entwicklung. Studie des Wuppertal  
Instituts für Klima, Umwelt und Energie für den BUND  
und MISEREOR, Birkhäuser Verlag, Basel, Bonn,  
Berlin 1996.
- [LUN98] Lund, R.: Remanufacturing: An American Ressource.  
Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Conscious Design  
and Manufacturing, Rochester Institute of Technology,  
June 1998.
- [MAY93] Mayr, M.;  
Thalhofer, U.: Numerische Lösungsverfahren in der Praxis FEM-BEM-  
FDM. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 1993.
- [MEE98] Meedt, O.,: Effizienzsteigerung bei Demontage und Recycling durch  
flexible Demontagetechnologien und optimierte  
Produktgestaltung. Diss. Univ. Erlangen, 1998.
- [MER86] Mertens, P.;  
Warnecke, G.;  
Deisenroth, M.: Greiferwechsellvorrichtungen für Industrieroboter. ZWF  
81 (1986) 10, S.537-540.
- [MÖL96] Möller, T.: Beitrag zur automatisierten selektiven Entstückung von  
Leiterplatten. Dissertation Universität Dortmund,  
Dortmund 1996.
- [MUS95] Musa, H.;  
Loh, K. P.: Flexible Lightweight Gripper for Educational Robot. In:  
Third International Conference on Manufacturing  
Technology, Hong Kong, 1995, S.328-333.

- [NIE98] Niemeier, J.: Entwicklung und Verifizierung eines Prozessmodells für das Einzelpunktlöten in der Elektronikfertigung. Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin. Fraunhofer Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik, IPK Berlin. Berlin, 1998.
- [NEU95] Neu, S.: Entwicklung und Verifizierung eines Prozessmodells für das Längspressen von Gummi-Metall-Verbindungen. Dissertation TU Berlin. Reihe Produktionstechnik Berlin, Band 164. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 1995.
- [PAH97] Pahl, G.; Beitz, W.: Konstruktionslehre - Methoden und Anwendung. 4. neubearbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1997.
- [PER99] Perlewitz, H.; Seliger, G.; Tomiyama, T.; Umeda, Y.: Disassembly and Recycling of Durable and Consumer Goods in Japan – Present Condition and Trends of R&D Activities. 6th CIRP International Seminar on Life Cycle Engineering, Kingston, Ontario, Canada, 1999.
- [PER00] Perlewitz, H.: Planung und marktorientierter Betrieb von Demontagefabriken. Dissertation TU Berlin. Berlin IPK Berlin, 2000.
- [PRA51] Prager, W.; Hodge, G.: Theory of Perfectly Plastic Solids. John Wiley & Sons, Inc (1951).
- [PRA54] Prager, W.; Hodge, P.G.: Theorie ideal plastischer Körper. Wien: Springer-Verlag, 1954.
- [RAD94] Rademacher, L.: Gekonnt kaputtmachen – Flexibel automatisierte Greiftechnik in der Demontage. Flexible Automation 12 (1994) 2, S. 40-43.
- [REC00] N.N. Kreislaufwirtschaft und Automatisierung. In: Recycling Magazin. März 2000. 55.Jahrgang, Nr. 5, S. 14-15.
- [REFA75] Verband für Arbeitsstudien Refa e.V. (Hrsg.) Methoden des Arbeitsstudiums, Teil 2 Datenermittlung, Carl Hanser Verlag, München 1971 / 1975.
- [REI97] Reinhart, G.; Ross, P.: Hybride Demontagezellen. Beitrag zum Kolloquium zur Kreislaufwirtschaft, Sfb 281, TU Berlin: 1997.
- [ROD75] Rodenacker, W.G.; Claussen, U.: Regeln des methodischen Konstruierens, Bd. I u. Bd. II. Mainz: Krauskopf Verlag, 1973 und 1975.
- [ROD91] Rodenacker, W.G.: Methodisches Konstruieren- Konstruktionsbücher Bd.27. Berlin, Springer Verlag 1970, 2. Aufl. 1976, 3. Aufl. 1984, 4. Aufl. 1991.
- [ROT82] Roth, K.: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen. Berlin: Springer-Verlag, 1982.

- [RÖH01] N.N.: Firmenunterlagen RÖHM GmbH, Sontheim an der Brenz 2001. (www.roehm-spannzeuge.com)
- [RUP97] Rupprecht, R.: Flexibel automatisierte Demontage von Fahrzeugdächern. IPA-IAO Forschung und Praxis, Dissertation Universität Stuttgart, 1997.
- [SAA94] Saadat, M.: Technische Hände als modulares Greifersystem. Technica (1994) 1/2, S.23-26.
- [SCH92] Schweigert, U.: Greiferkonzepte für die automatisierte Montage: Noch nicht praxiserprobt. Schweizer Maschinenmarkt (1992) 17, S.20-23.
- [SCH95] Schmidt; et. al : Altautoverwertung und Entsorgung ; Expert Verlag, Renningen, Malsheim, 1995.
- [SCH00] N.N.: Stiftgreifer STG. Produktinformation der Fritz Schunk GmbH, Bahnhofstr. 110, D-74348 Lauffen, 2000.
- [SEL95] Seliger, G.; Hentschel, C.; Wagner, M.: Disassembly Factories for Recovery of Resources in Product and Material Cycles. In: Life-Cycle Modelling for Innovative Products and Processes. Hrsg. Jansen, H.; Krause, F.-L.. London, Weinheim, New York, Tokyo, Melbourne, Madras: Chapman & Hall (1996), S.56-67.
- [SEL97] Seliger, G.; Müller, K.; Perlewitz, H.: More Use with fewer Resources - A Contribution towards Sustainable Development. In: Life Cycle Networks Proceedings of the 4<sup>th</sup> International CIRP Seminar on Life Cycle Engineering, 1997.
- [SEL99] Seliger, G.; Stephan, J.: Der Gefriergreifer und seine Anwendung. In: Vortragsband zum 10. Internationalen Techtexil-Symposium, 12-15/4/1999, Frankfurt/M, Deutschland.
- [SEL00a] Seliger, G.; Grudzien, G.: Life Cycle Unit in Product Life Cycle – Tool for improved Maintenance, Repair and Recycling. In: Proceedings of the 33<sup>th</sup> CIRP International Seminar on Manufacturing Systems, June 5-7, Stockholm, 2000.
- [SEL00b] Seliger, G.; Rebafka, U.; Stenzel, A.: ZWF Sonderbeilage Juli 2000, Sfb 281 „Demontagefabriken“. München: Carl Hanser 2000.
- [SIE83] Siemens, K.-J.: Konstruktive Lösungswege zur Erhöhung der Flexibilität von Werkzeugen für Handhabungsgeräte. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1983.
- [SPU72] Spur, G.: Optimierung des Fertigungssystems Werkzeugmaschine. München: Carl Hanser Verlag 1972.
- [SPU82] Spur, G.; Severin, F.: Analyse und Entwicklung flexibler Greifereinrichtungen für Handhabungsgeräte. Zwf 77 (1982) 2, S.75-81.

- [SPU95] Spur, G.: Lebenszyklusorientiertes Produktmanagement. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZwF), 90 (1995) 9. München: Carl Hanser Verlag, S. 404-405.
- [STE67] Steck, E.: Kraftberechnung bei Umformverfahren mit Hilfe der "oberen Schranke". Werkstatttechnik 59(1967)6, S.273-279.
- [SEL99a] Seliger, G.; Stenzel, A.; Zuo, B.-R.: Determination of Indentation forces for Disassembly process. In: Proceedings of the 32nd CIRP International Seminar on Manufacturing Systems, Leuven 1999, S. 333-338.
- [SEL99b] Seliger, G.; Stenzel, A.; Zuo, B.-R.: A Self-Connection Approach for Flexible Disassembly. In: Proceedings of the 1999 IEEE International Symposium on assembly and task planning – ISATP`99, Porto 1999, S. 141-145.
- [STE99c] Stenzel A.; Rebafka, U; Grudzien, W.: Demontagefabriken zur Rückgewinnung von Ressourcen in Produkt- und Materialkreisläufen. In: Ökologischer Lebensraum Büro, Berlin 1999, S.110 - 116.
- [STE00a] Stenzel, A.; Seliger, G.: Formunabhängige Endeffektoren. In: Kolloquium zur Kreislaufwirtschaft und Demontage. Berlin 2000, S. 10-15.
- [STE00b] Stenzel, A.; Seliger, G.; Zuo, B.-R.: Flexible Handling in Disassembly with Screwnail Indentation. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. San Francisco 2000, S.3681-3686.
- [STE01] Stephan, J.: Beitrag zum Greifen von Textilien. Dissertation TU Berlin. Berlin IPK Berlin, 2001.
- [STR87] Striegel, G. Intelligente Sensoren und flexible Greifer in der Montagetechnik. In: 7. Dt. Montagekongress 1987, Die neue Rationalisierungschance durch Elektronik, Robotik und Sensorik, Landsberg, 1987.
- [TRE68] Tresca, H.: Mémoire sur L'écoulement des corps solides. Mém. pres. par div.sav. 18, 733-799 (1868).
- [TRI96] Tritsch, C.: Flexible Demontage technischer Gebrauchsgüter, in: Dissertation, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebstechnik, Universität Karlsruhe, Karlsruhe, 1996.
- [UMW96] N.N.: Langes Warten – ohne Ende. In: UmweltMagazin Recycling Kompaß: Elektronikschrott, 1996.
- [VDI2222] N.N: VDI Richtlinie 2222, Konstruktionsmethodik – Konzipieren technischer Produkte. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1977.

- 
- [VDI2243] N.N.: VDI-Richtlinie 2243, Blatt 1, Recyclingorientierte Produktentwicklung. Düsseldorf: VDI Verlag, 2000.
- [VDI2740] N.N.: VDI-Richtlinie 2740, Blatt 1, Greifer für Handhabungsgeräte und Industrieroboter. Düsseldorf: VDI Verlag, 1995.
- [VDI2860] N.N.: VDI-Richtlinie 2860, Montage- und Handhabungstechnik; Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1990.
- [WAG97] Wagner, M.: Prozessmodell für die Kraftübertragung durch neue Wirkflächen zur Erzeugung geometrietoleranter Demontagewerkzeuge. Dissertation TU Berlin. Berlin FhG/IPK Berlin, 1997.
- [WAR92] Warnecke, H.-J.; Schraft R. D.: Handbuch Handhabungs-, Montage- und Industrieroboter. Landsberg/Lech: verlag moderne industrie, 1992.
- [WAR00] Warmbold, J.: Flexibler Greifer macht's möglich. Roboter be- und entlädt ein Drehzentrum. In: Schweizer Maschinenmarkt, Heft 28 S.34-36, 2000.
- [WÄT93] Wätzig, R.; Kühnel, M.; Rothe, U.: Flexibel automatisiert greifen und halten (1.Teil). Dima (1993) 3, S.34-38.
- [WEI98] Weigl, A.; Tolle, H.: Demontage von Elektronikgeräten mit Industrierobotern. Spektrum der Wissenschaft 1/ 1998.
- [WIE70] Wiendahl, H.-P.: Funktionsbetrachtung technischer Gebilde – Ein Hilfsmittel zur Auftragsabwicklung in der Maschinenbauindustrie. Dissertation RWTH Aachen, 1970.
- [ZVEI99] N.N.: Verantwortung für den Wandel. Tätigkeitsbericht des ZVEI 1998/1999. Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie (ZVEI) e.V. Frankfurt am Main, 1999.

## 9 Anhang

### Anhang A: Grundlegende Theoreme

Theorem 1: Die Bedingung der Inkompressibilität kann ausgedrückt werden als:

$$\dot{\mathbf{e}}_x + \dot{\mathbf{e}}_y + \dot{\mathbf{e}}_z = 0 \Leftrightarrow \frac{v_r}{r} + \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial v_j}{\partial j} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0$$

Beweis: Nach Gleichung (2) gilt

$$\partial \mathbf{V} = \frac{v_r}{r} \cdot \mathbf{A} + \frac{v_j}{r} \cdot \mathbf{B} + \mathbf{C} \cdot \partial \mathbf{W} \cdot \mathbf{C}^T \quad (\text{A1})$$

wobei

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \sin^2 \mathbf{j} & -\sin \mathbf{j} \cdot \cos \mathbf{j} & 0 \\ -\sin \mathbf{j} \cdot \cos \mathbf{j} & \cos^2 \mathbf{j} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \sin \mathbf{j} \cdot \cos \mathbf{j} & -\cos^2 \mathbf{j} & 0 \\ \sin^2 \mathbf{j} & -\sin \mathbf{j} \cdot \cos \mathbf{j} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \cos \mathbf{j} & -\sin \mathbf{j} & 0 \\ \sin \mathbf{j} & \cos \mathbf{j} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Aus (10) folgt

$$\text{tr}\{\partial \mathbf{V}\} = \frac{v_r}{r} \cdot \text{tr}\{\mathbf{A}\} + \frac{v_j}{r} \cdot \text{tr}\{\mathbf{B}\} + \text{tr}\{\mathbf{C} \cdot \partial \mathbf{W} \cdot \mathbf{C}^T\}$$

mit  $\text{tr}\{\}$  ist die Spur einer Matrix.

Es gilt

$$\text{tr}\{\mathbf{A}\} = 1, \quad \text{tr}\{\mathbf{B}\} = 0, \quad \text{tr}\{\mathbf{C} \cdot \partial \mathbf{W} \cdot \mathbf{C}^T\} = \text{tr}\{\partial \mathbf{W}\}$$

Daraus folgt,

$$\text{tr}\{\partial \mathbf{V}\} = \frac{v_r}{r} + \text{tr}\{\partial \mathbf{W}\}$$

Aus (3)-(4) erhält man

$$\text{tr}\{\partial \mathbf{V}\} = \dot{\mathbf{e}}_x + \dot{\mathbf{e}}_y + \dot{\mathbf{e}}_z, \quad \text{tr}\{\partial \mathbf{W}\} = \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial v_j}{\partial j} + \frac{\partial v_z}{\partial z}$$

Damit gilt,

$$\dot{\mathbf{e}}_x + \dot{\mathbf{e}}_y + \dot{\mathbf{e}}_z = \frac{v_r}{r} + \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial v_j}{\partial j} + \frac{\partial v_z}{\partial z}$$

was zu zeigen war.

Theorem 1 beschreibt die Randbedingung der Inkompressibilität in Zylinderkoordinaten. Es wird benutzt um das Aufstellen des Geschwindigkeitsfeldes erleichtern.

Theorem 2: Das Produkt der Tensoren der Umformgeschwindigkeit kann ausgedrückt werden als

$$\dot{\mathbf{e}}_{ij} \cdot \dot{\mathbf{e}}_{ij} = \left( \frac{v_r}{r} \right)^2 + \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{v_j}{r} \right)^2 + 2 \cdot \frac{v_r}{r} \cdot \left( \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial v_j}{\partial j} \right) - \frac{v_j}{r} \left( \frac{\partial v_j}{\partial r} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial v_r}{\partial j} \right) + \dot{\mathbf{e}}_{ij} \cdot \dot{\mathbf{e}}_{ij}$$

Beweis: Aus (A1), gilt

$$\partial \mathbf{V}^T = \frac{v_r}{r} \cdot \mathbf{A}^T + \frac{v_j}{r} \cdot \mathbf{B}^T + \mathbf{C} \cdot \partial \mathbf{W}^T \cdot \mathbf{C}^T \quad (\text{A2})$$

Mit

$$\partial \tilde{\mathbf{V}} = \frac{\partial \mathbf{V} + \partial \mathbf{V}^T}{2}, \quad \partial \tilde{\mathbf{W}} = \frac{\partial \mathbf{W} + \partial \mathbf{W}^T}{2}, \quad \tilde{\mathbf{A}} = \frac{\mathbf{A} + \mathbf{A}^T}{2}, \quad \tilde{\mathbf{B}} = \frac{\mathbf{B} + \mathbf{B}^T}{2}$$

Ausgehend von (A1)-(A2), folgt

$$\partial \tilde{\mathbf{V}} = \frac{v_r}{r} \cdot \tilde{\mathbf{A}} + \frac{v_j}{r} \cdot \tilde{\mathbf{B}} + \mathbf{C} \cdot \partial \tilde{\mathbf{W}} \cdot \mathbf{C}^T$$

Weiterhin,

$$\begin{aligned} (\partial \tilde{\mathbf{V}})^2 &= \left( \frac{v_r}{r} \right)^2 \cdot (\tilde{\mathbf{A}})^2 + \left( \frac{v_j}{r} \right)^2 \cdot (\tilde{\mathbf{B}})^2 + \mathbf{C} \cdot (\partial \tilde{\mathbf{W}})^2 \cdot \mathbf{C}^T + 2 \cdot \frac{v_r}{r} \cdot \frac{v_j}{r} \cdot \tilde{\mathbf{A}} \cdot \tilde{\mathbf{B}} + \\ & 2 \cdot \frac{v_r}{r} \cdot \tilde{\mathbf{A}} \cdot \mathbf{C} \cdot \partial \tilde{\mathbf{W}} \cdot \mathbf{C}^T + 2 \cdot \frac{v_j}{r} \cdot \tilde{\mathbf{B}} \cdot \mathbf{C} \cdot \partial \tilde{\mathbf{W}} \cdot \mathbf{C}^T \end{aligned}$$

und

$$\begin{aligned} \text{tr}\{(\partial \tilde{\mathbf{V}})^2\} &= \left( \frac{v_r}{r} \right)^2 \cdot \text{tr}\{(\tilde{\mathbf{A}})^2\} + \left( \frac{v_j}{r} \right)^2 \cdot \text{tr}\{(\tilde{\mathbf{B}})^2\} + \text{tr}\{\mathbf{C} \cdot (\partial \tilde{\mathbf{W}})^2 \cdot \mathbf{C}^T\} + \\ & 2 \cdot \frac{v_r}{r} \cdot \frac{v_j}{r} \cdot \text{tr}\{\tilde{\mathbf{A}} \cdot \tilde{\mathbf{B}}\} + 2 \cdot \frac{v_r}{r} \cdot \text{tr}\{\tilde{\mathbf{A}} \cdot \mathbf{C} \cdot \partial \tilde{\mathbf{W}} \cdot \mathbf{C}^T\} + 2 \cdot \frac{v_j}{r} \cdot \text{tr}\{\tilde{\mathbf{B}} \cdot \mathbf{C} \cdot \partial \tilde{\mathbf{W}} \cdot \mathbf{C}^T\} \end{aligned}$$

Es gilt

$$\text{tr}\{(\tilde{\mathbf{A}})^2\} = 1, \quad \text{tr}\{(\tilde{\mathbf{B}})^2\} = \frac{1}{2}, \quad \text{tr}\{\mathbf{C} \cdot (\partial \tilde{\mathbf{W}})^2 \cdot \mathbf{C}^T\} = \text{tr}\{(\partial \tilde{\mathbf{W}})^2\}, \quad \text{tr}\{\tilde{\mathbf{A}} \cdot \tilde{\mathbf{B}}\} = 0,$$

$$\operatorname{tr}\{\tilde{\mathbf{A}} \cdot \mathbf{C} \cdot \partial \tilde{\mathbf{W}} \cdot \mathbf{C}^T\} = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial v_j}{\partial \mathbf{j}}, \quad \operatorname{tr}\{\tilde{\mathbf{B}} \cdot \mathbf{C} \cdot \partial \tilde{\mathbf{W}} \cdot \mathbf{C}^T\} = -\frac{1}{2} \left( \frac{\partial v_j}{\partial r} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial v_r}{\partial \mathbf{j}} \right)$$

daraus folgt,

$$\operatorname{tr}\{(\partial \tilde{\mathbf{V}})^2\} = \left( \frac{v_r}{r} \right)^2 + \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{v_j}{r} \right)^2 + 2 \cdot \frac{v_r}{r} \cdot \left( \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial v_j}{\partial \mathbf{j}} \right) - \frac{v_j}{r} \cdot \left( \frac{\partial v_j}{\partial r} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial v_r}{\partial \mathbf{j}} \right) + \operatorname{tr}\{(\partial \tilde{\mathbf{W}})^2\}$$

Aus (8)-(9), gilt

$$\dot{\mathbf{e}}_{ij} \dot{\mathbf{e}}_{ij} = \operatorname{tr}\{(\partial \tilde{\mathbf{V}})^2\}, \quad \dot{\mathbf{e}}_{ij} \dot{\mathbf{e}}_{ij} = \operatorname{tr}\{(\partial \tilde{\mathbf{W}})^2\}$$

Damit erhalten wir

$$\dot{\mathbf{e}}_{ij} \dot{\mathbf{e}}_{ij} = \left( \frac{v_r}{r} \right)^2 + \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{v_j}{r} \right)^2 + 2 \cdot \frac{v_r}{r} \cdot \left( \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial v_j}{\partial \mathbf{j}} \right) - \frac{v_j}{r} \cdot \left( \frac{\partial v_j}{\partial r} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial v_r}{\partial \mathbf{j}} \right) + \dot{\mathbf{e}}_{ij} \dot{\mathbf{e}}_{ij}$$

was zu beweisen war.

Theorem 2 bestimmt die Beziehung zwischen dem Produkt der Umformgeschwindigkeitstensoren in kartesischen und in Zylinderkoordinaten. Dieses Ergebnis erleichtert erheblich die Arbeit zum Aufstellen der Gleichungen zur Ermittlung der plastischen Verformungsenergie.

### Geometrie von Spiralen

Spirale um einen Zylinder

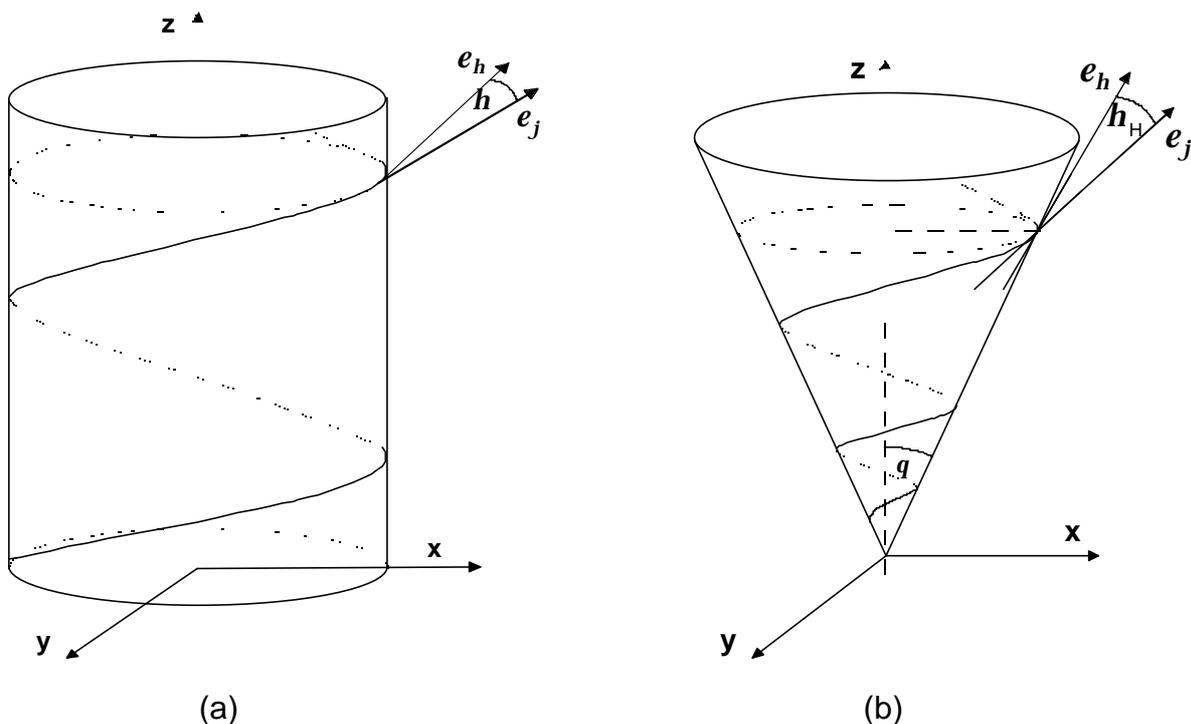


Bild 67: (a) Spirale um einen Zylinder. (b) Spirale um einen Kegel.

Zur Verdeutlichung sind in Bild 67 Spiralen um einen Zylinder sowie Kegel einen dargestellt.

Der Steigungswinkel ist gegeben durch

$$\tan \mathbf{h} = \frac{b}{r}, \quad (\text{A3})$$

wobei  $b = \frac{p}{2p}$  der Koeffizient der Steigung der Schraube ist.

### 9.1.1.1 Spirale um einen Kegel

Für eine Spirale um einen Kegel (Bild 67(b)), sind die Koordinaten für jeden Punkt P gegeben durch

$$\text{L: } \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r \cos \mathbf{f} \\ r \sin \mathbf{f} \\ r \cot \mathbf{q} \end{bmatrix}, \quad (\text{A4})$$

wobei  $\mathbf{f}$  der Parameter und  $\mathbf{q} = \arctan(r/z)$  der Kegelwinkel ist.

Der Tangentenvektor der Spirale im Punkt P ist

$$\mathbf{n}_h = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{r} \cos \mathbf{f} - r \dot{\mathbf{f}} \sin \mathbf{f} \\ \dot{r} \sin \mathbf{f} + r \dot{\mathbf{f}} \cos \mathbf{f} \\ \dot{r} \cot \mathbf{q} \end{bmatrix} \quad (\text{A5})$$

und der Einheitstangentenvektor

$$\mathbf{e}_h = \frac{\mathbf{n}_h}{\|\mathbf{n}_h\|}. \quad (\text{A6})$$

Der Einheitstangentenvektor lässt sich darstellen durch

$$\mathbf{e}_j = \begin{bmatrix} -\sin \mathbf{f} \\ \cos \mathbf{f} \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (\text{A6})$$

Der Steigungswinkel ist gegeben durch

$$\cos \mathbf{h}_H = \mathbf{e}_h \cdot \mathbf{e}_j = \frac{r \dot{\mathbf{f}}}{\sqrt{\dot{r}^2 + (r \dot{\mathbf{f}})^2 + (\dot{r} \cot \mathbf{q})^2}}. \quad (\text{A7})$$

Weiterhin gilt

$$r = b f \tan \mathbf{q} , \quad \dot{r} = b \dot{f} \tan \mathbf{q} . \quad (\text{A8})$$

Durch einsetzen von (17) in (16), erhält man

$$\cos h_{\text{H}} = \frac{r \cos \mathbf{q}}{\sqrt{(r \cos \mathbf{q})^2 + b^2}} \quad (\text{A9})$$

$$\sin h_{\text{H}} = \frac{b}{\sqrt{(r \cos \mathbf{q})^2 + b^2}} \quad (\text{A10})$$

$$\tan h_{\text{H}} = \frac{b}{r \cos \mathbf{q}} . \quad (\text{A11})$$

Die Gleichungen (A3) und (A11) bestimmen den Steigungswinkel für Spiralen um einen Zylinder beziehungsweise Kegel und werden zur Entwicklung des Geschwindigkeitsfeldes benötigt.

## Anhang B: Quellcode für die Berechnung in MATLAB

```
%-----
% PROGRAMM ZUR BERECHNUNG DES EINDRINGMOMENTES EINER SCHAFTSCHRAUBE
%
% Das Programm bestimmt das Eindringmoment mit dem Verfahren der oberen
% Grenze. Die Berechnung beruht auf optimalen Geschwindigkeitsfeldern
% Das optimale Feld wird durch Variation von Rho im vorgegebenen Werte-
% bereich ermittelt. Kriterium für die Ermittlung ist, das die benötigte
% Energie minimiert wird. Der optimale Wert von Rho ist nahezu Null.
%
% Copyright (c) 1999 by Alexander Stenzel, Bing Ran Zuo
%-----
clc
disp(' ');
disp('=====');
disp('PROGRAMM ZUR BERECHNUNG DES EINDRINGMOMENTES EINER SCHAFTSCHRAUBE');
disp('=====');
disp(' ');

% Eingabeparameter zur Berechnung (alle positiv)
%-----
input ('Geben Sie die Schubspannung des Materials ein (Sigma [N/mm^2]): ');
k=ans/sqrt(3); % Schubfließspannung(N/mm^2)
```

```

input ('Geben Sie die Steigung des Gewindes ein (p[1/mm])      :
');
p=ans;                % Steigung des Gewindes(mm)
input ('Geben Sie den äußeren Durchmesser der Schraube ein (D [mm]) : ');
D=ans;                % Äußerer Durchmesser der Schraube (mm)
input ('Geben Sie den inneren Durchmesser der Schraube ein (d [mm]) : ');
d=ans;                % Innerer Durchmesser der Schraube(mm)
input ('Geben Sie die Länge der Schraubenspitze ein (h0 [mm])      : ');
h0=ans;               % Länge der Schraubenspitze(mm)
input ('Geben Sie die maximale Eindringtiefe ein (h [mm])      :
');
h=ans;                % Eindringtiefe(h>=h0) (mm)
input ('Geben die Intervallgröße für die Eindringtiefe ein (h [mm]) : ');
intervall=ans;        % Eindringtiefe(h>=h0) (mm)
l=100;
clc
disp('=====');
disp('      PROGRAMM ZUR BERECHNUNG DES EINDRINGMOMENTES EINER
SCHAFTSCHRAUBE');
disp('=====');

%  Bildschirmausgabe der Parameter
%-----
disp(' ');
fprintf (' k = %g',k)
fprintf ('      Schubfließspannung des Materials [N/mm²] \n')
fprintf (' P = %g',p)
fprintf ('      Steigung des Gewindes ein [1/mm] \n')
fprintf (' D = %g',D)
fprintf ('      Äußerer Durchmesser der Schraube [mm] \n')
fprintf (' d = %g',d)
fprintf ('      Innerer Durchmesser der Schraube [mm] \n')
fprintf (' h0 = %g',h0)
fprintf ('      Länge der Schraubenspitze [mm] \n')
disp(' ');

%  Schleifenparameter
%-----
inter=h0;
stop=h;
h=h0;

```

```
while h<=stop;
fprintf (' Einringtiefe h = %g\n',inter);

% Hergeleitete Parameter
%-----
N=100;           % Nummer von Schritten zur bestimmung des optimalen
Geschwindigkeitsfeldes
al=atan(0.5*d/h0); % Innerer Kegelwinkel
be=atan(0.5*D/h0); % Äußerer Kegelwinkel
b=0.5*p/pi;      % Koeffizient der Gewindesteigung

% Überprüfen der Eingabeparameter
%-----
if (k<0)|(k==0)
    disp(' Fehler: Schubfließspannung ist ungültig!');
    return;
end
if (p<0)|(p==0)
    disp(' Fehler: Gewindesteigung ist ungültig!');
    return;
end
if (D<0)|(D==0)
    disp(' Fehler: Der Außendurchmesser der Schraube ist ungültig!');
    return;
end
if (d<0)|(d==0)|(d>D)|(d==D)
    disp(' Fehler: Der Innerdurchmesser der Schraube ist ungültig!');
    return;
end
if (h0<0)|(h0==0)
    disp(' Fehler: Die Länge der Schraubenspitze ist ungültig!');
    return;
end
if (l<0)|(l==0)
    disp(' Fehler: Die Gesamtlänge der Schraube ist ungültig!');
    return;
end
if (h<h0)|(h>1)
    disp(' Fehler: Die Eindringtiefe ist ungültig!');
    return;
end
```

```

% Vereinbarungen für zu berechnende Parameter
%-----
Rho=[];           % konstanter Vektor [1xN]
LAD=[];          % Matrix der Geschwindigkeitskoeffizienten [4xN]
Mh=[];           % Vektor mit Energiekoeffizienten [1xN]
Mb=[];
Ms=[];
Mho=[];
Mbo=[];
Mhi=[];
Mbi=[];
Mhs=[];
Mbs=[];

% Berechnung von Rho
%-----
rho_max=tan(be)*tan(al)^2/(tan(be)-tan(al))^2;
rho_min=-tan(al)^3/(tan(be)-tan(al))^2;

% Suche nach optimalen Geschwindigkeitsfeld.
%-----
for i=0:N
rho=rho_min+(rho_max-rho_min)*i/N;      % constant
Rho=[Rho,rho];                          % constant vector

% Berechnung der Geschwindigkeitskoeffizienten---lad[i]
%-----
t1=tan(be)+tan(al);                      %
Hilfsvariablen
t2=tan(be)*tan(al);
t3=tan(be)^2-tan(al)^2;
lad=[rho,-2*rho/t1+tan(al)^2/t3,2*rho*t2/t1+t2^2/t3,-rho]; %
Geschwindigkeitskoeffizienten [1x4]
LAD=[LAD,lad'];

% Berechnung der Energiekoeffizienten---M
%-----
% 1. für Schraubenspitze--- Mh, Intergration term Ih (Newton-Verfahren)
if rho==0
t1=sqrt(1+4*cot(al)^2);
t2=sqrt(1+4*cot(be)^2);

```

```

    Ih=sqrt(2)*lad(3)*(log((2*cot(al)+t1)/(2*cot(be)+t2))+0.5*t2/cot(be)-
0.5*t1/cot(al));
    Mh=[Mh,sqrt(2)*pi*h0^2*Ih];
else
    Ih=quad8('f',al,be,[],[],lad,h0,b);
    Mh=[Mh,4*sqrt(2)*pi*b^2*Ih/(3*lad(1)^2)];
end

% 2. Für den Gewindeteil--- Mb
t1=sqrt(d^2+4*b^2);
t2=sqrt(D^2+4*b^2);
Ib=(t2-t1)/(2*b)-log((d*(2*b+t2))/(D*(2*b+t1)));
Mb=[Mb,2*pi*abs(lad(1))*h0*(h-h0)*Ib];

% 3. Für die ringförmige Fläche (z=h0) --- Ms
Is=lad(3)*h0*(D-d)/2+lad(4)*(D^2-d^2)/8;
Ms=[Ms,2*pi*Is];

% 4. Für den äußeren Kegel der Schraubenspitze(theta=be)--- Mho
if lad(1)*cot(be)+lad(2)==0
    Mho=[Mho,0];
else
    c1=b*sqrt(((lad(3)*cot(be)+lad(4))/(lad(1)*cot(be)+lad(2)))^2+1);
    Iho=((c1^2+(h0*tan(be))^2)^1.5-c1^3)/3;
    Mho=[Mho,2*pi*Iho*(lad(1)*cot(be)+lad(2))/(b*sin(be))];
end

% 5. Für den äußeren Zylinder des Gewindeteils(r=0.5D)--- Mbo
Mbo=[Mbo,pi*(h-h0)*(2*lad(1)*h0+lad(2)*D)*sqrt(1+(0.5*D/b)^2)];

% 6. Für den inneren Zylinder des Schraubenschaftes--- Mhi
c2=b*sqrt(((lad(3)*cot(al)+lad(4))/(lad(1)*cot(al)+lad(2)+1))^2+1);
Ihi=((c2^2+(h0*tan(al))^2)^1.5-c2^3)/3;
Mhi=[Mhi,2*pi*Ihi*(lad(1)*cot(al)+lad(2)+1)/(b*sin(al))];

% 7. Für den inneren Zylinder des Gewindeteils(r=0.5d)--- Mbi
Mbi=[Mbi,pi*(h-h0)*(2*lad(1)*h0+(lad(2)+1)*d)*sqrt(1+(0.5*d/b)^2)];

% 8. Für das Gewinde an der Schraubenspitze--- Mhs, Intergration des Term
Ihs (Newton-Verfahren)

```

```

%
Ihs=quad8('g',cot(be),cot(al),[],[],lad,h0,b);
Mhs=[Mhs,2*b^2*Ihs];

% 9. Für das Gewinde am Gewindeteil--- Mbs
t1=D-d;
t2=D^2-d^2;
t3=D^3-d^3;
Ibs=(lad(2)+1)*t3/24+lad(1)*h0*t2/8+(lad(2)+1)*b^2*t1/2+lad(1)*h0*b^2*log(D/d);
Mbs=[Mbs,2*(h-h0)*Ibs/b^2];
end % for i=1:N

%Ausgabeparameter(Eindringmoment)
%-----
M=Mh+Mb+Ms+Mho+Mbo+Mhi+Mbi+Mhs+Mbs; % Vektor für Gesamtenergie [1xN]
M0=Mh+Mb+Ms+Mho+Mbo; % Vektor für Gesamtenergie ohne Reibung [1xN]
T=M*k*b; % Vektor für Eindringmoment[1xN]
T0=M0*k*b; % Vektor für Eindringmoment ohne Reibung [1xN]
[Rho_max,Rmax_ind]=max(Rho); % Maximalwert von Rho und zugehöriger Index
[Rho_min,Rmin_ind]=min(Rho); % Minimalwert von Rho und zugehöriger Index
[M_opt,ind]=min(M); % optimale Energiekoeffizienten (mm^2)
[M0_opt,ind0]=min(M0); % optimaler Energiekoeffizient mit Reibung(mm^2)
Rho_opt=Rho(ind); % Optimaler Wert für Rho unter Berücksichtigung des Geschwindigkeitsfelde
[T_opt,ind]=min(T); % Minimales Eindringmoment(N.mm)
[T0_opt,ind0]=min(T0); % Minimales Eindringmoment ohne Reibung(N.mm)
% Ausgabe der Ergebnisse
%-----
T_opt=T_opt/1000;
T0_opt=T0_opt/1000;
fprintf(' Eindringmoment mit Reibung [Nm]: %g\n',T_opt);
fprintf(' Eindringmoment ohne Reibung [Nm]: %g\n\n',T0_opt);
%disp(' ');
inter=inter+intervall;
h=inter;
end

```

## Anhang C: Messwerte

### Messwerte Abscherung

- Experimentell Mittelwert aus 3 Messungen
- Modifiziertes Modell mit Spalt 0,2 mm

#### Eindringtiefe 8 mm

	modifiziertes Modell	Werkstoff 1	Modell Erhard	modifiziertes Modell	Werkstoff 2	Modell Erhard	modifiziertes Modell	Werkstoff 3	Modell Erhard
4,5 mm	1988	2060	2488	2394	2430	2997	1219	1412	1526
5 mm	2264	2410	2764	2727	2796	3330	1389	1539	1696
6 mm	2761	2813	3317	3326	3410	3996	1694	1767	2035

#### Eindringtiefe 19 mm

	modifiziertes Modell	Werkstoff 1	Modell Erhard	modifiziertes Modell	Werkstoff 2	Modell Erhard	modifiziertes Modell	Werkstoff 3	Modell Erhard
4,5 mm	4721	4489	5909	5687	5888	7118	2897	3596	3626
5 mm	5377	5982	6565	6477	6502	7908	3299	4011	4029
6 mm	6559	7097	7879	7901	7986	9490	4025	4495	4834