

# **Beitrag zur automatisierten Demontage durch Optimierung des Trennprozesses von Schraubenverbindungen**

Dissertation  
zur Erlangung des Grades eines  
Doktor-Ingenieurs  
an der Fakultät Maschinenbau  
der Universität Dortmund

vorgelegt von

Diplom-Ingenieur  
Markus Nave

aus  
Unna

Dortmund, April 2003

---



## Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis .....	IV
1 Einleitung 1	
1.1 Problemstellung und Ziel der Arbeit.....	1
1.2 Aufbau der Arbeit.....	4
2 Stand der Elektronik- und Elektrogeräteentsorgung.....	5
2.1 Mengengerüst und Entsorgungswege für Elektro- und Elektronikgeräte .....	5
2.2 Industrielle Verwertung von Elektro- und Elektronikaltgeräten.....	7
2.3 Automatisierungstendenzen in der Demontage .....	9
2.4 Analyse des Recyclingprozesses von Bildschirmgeräten .....	11
3 Analyse der Schwachstellen in der realisierten Demontagezelle .....	16
3.1 Beschreibung des Versuchsaufbaus.....	16
3.2 Produktanalyse von Bildschirmgeräten.....	17
3.3 Anforderungen an die automatisierte Demontage.....	21
3.4 Ermittlung von Schwachstellen.....	25
3.4.1 Auswertung hinsichtlich Demontagezeit .....	26
3.4.2 Auswertung hinsichtlich Flexibilität .....	31
3.4.3 Ergebnisse der Schwachstellenanalyse .....	34
4 Entwicklungen zur Optimierung des Entschraubungsprozesses .....	36
4.1 Problemstellung und Stand der Entwicklung .....	36
4.2 Untersuchung der auftretenden Schraubenverbindungen.....	39
4.3 Ermittlung der optimalen Demontagestrategie zum Trennen von Schraubenverbindungen.....	42
4.4 Analyse des Trennprozesses Zerlegen von Schraubverbindungen.....	53
4.4.1 Theoretische Analyse des Zerlegeprozesses.....	53
4.4.2 Experimentelle Analyse des Zerlegeprozesses .....	57

---

---

4.5	Ableitung von Anforderungen an ein Entschraubungswerkzeug.....	64
4.6	Konzeption eines Toleranzausgleichsverfahrens .....	67
4.6.1	Ziele für den Einsatz eines Toleranzausgleichsverfahrens .....	67
4.6.2	Systematik der Toleranzausgleichsverfahren.....	69
4.6.3	Suchstrategien zur Formschlusserstellung .....	71
4.6.4	Lage des Toleranzausgleichssystems .....	76
4.6.5	Zusammenfassung der Konzeptauswahl für ein Toleranzausgleichsverfahren.....	77
4.7	Ermittlung der Anforderungen und Randbedingungen.....	78
4.8	Konstruktion.....	81
4.8.1	Komponentenauswahl.....	81
4.8.2	Berechnung der lateralen Reaktionskräfte .....	88
4.8.3	Konzept zum Lösen der ausgedrehten Schraube vom Schrauberbit .....	89
4.9	Anpassung des Ausgleichsmoduls an das Trennwerkzeug .....	94
5	Experimentelle Untersuchungen .....	95
5.1	Anforderungen an den Versuchsstand .....	95
5.1.1	Integration des Schraubwerkzeuges in die Demontagezelle .....	95
5.1.2	Beschreibung des Versuchsaufbaus .....	99
5.2	Experimentelle Untersuchung des entwickelten Ausgleichsmoduls.....	99
5.3	Wirtschaftlichkeitsanalyse.....	107
6	Zusammenfassung und Ausblick .....	110
6.1	Zusammenfassung.....	110
6.2	Ausblick.....	114
	Literaturverzeichnis .....	116
	Abbildungsverzeichnis .....	138
	Tabellenverzeichnis.....	141

---

---

Anhang A: Klassifizierung von Bildschirmgeräten.....	143
Anhang B: Verbindungstechnik, Greifflächen und Demontagekräfte .....	145
Anhang C: Umfrage zur Automatisierung der Demontage.....	147
Anhang D: REFA-Zeitermittlungsverfahren .....	153
Anhang D.1: REFA-Zeitaufnahmebögen für die manuelle Demontage .....	153
Anhang D.2: Zeitermittlung nach REFA für die automatisierte Demontage .....	156
Anhang E: Gewichtungsfaktor und Erfüllungsgrad für Variantenbewertung ....	158
Anhang F: Kostenbetrachtungen.....	160

---

## Abkürzungsverzeichnis

AbfG	Abfallgesetz
Al	Aluminium
a	Achsversatz, Lateralversatz
$a_{Tm}$	Trajektorien
$A_k$	Kolbenfläche des Vorschubzylinder
BDE	Betriebsdatenerfassung
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
BMBF	Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
Cu	Kupfer
c	Federsteifigkeit
DIN	Deutsches Institut für Normung
d	Drahtstärke
$d_a$	Außendurchmesser
FCKW	Fluorchlorkohlenwasserstoff
Fe-Metalle	Eisenmetalle
Flammh.	Flammhemmer
$F_A$	Axialkraft
$F_s$	Andruckkraft bei Suchbeginn des Vorschubzylinders
$F_v$	Vorschubkraft
HDPE	Hochdruck - Polyethylen
Hg	Quecksilber
IR	Infrarot
i.d.R.	in der Regel
$\Delta L$	Lageabweichung
$\Delta l$	Federweg $\Delta l$
LCD	Liquid Cristal Display
LED	Light Emitting Diodes
$M_A$	Ausdrehmoment
$M_L$	Lösemoment
$M_K$	Kopfmoment
m	Masse
Ne - Metalle	Nichteisenmetalle

---

---

n. V.	nach Vereinbarung
o. A.	ohne Angabe
o. V.	ohne Verfasser
p	Druck des Vorschubzylinders
PBB	Polybromierte Biphenyle
PBDE	Polybromierte Diphenylether
PCB	Polychlorierte Biphenyle
PE	Polyethylen
PP	Polypropylen
PVC	Polyvinylchlorid
RCC	Remote Center Compliance
Scara-Roboter	Selective Compliance Assembly Robot Arm (3 Drehachsen, senkrechte Linearachse (Hubachse))
SPS	Speicherprogrammierte Steuerung
Stck	Stückzahl
Ta	Technische Anleitung
T <sub>KF</sub>	Toleranzkompensationsfeld
t <sub>e</sub>	Zeit je Einheit
t <sub>eB</sub>	Betriebsmittelzeit je Bildschirmgeräte-Einheit
t <sub>er</sub>	Erholungszeit
t <sub>gB</sub>	Betriebsmittel-Grundzeit
t <sub>B</sub>	Nutzungszeit des Betriebsmittels
t <sub>h</sub>	Hauptnutzung
t <sub>n</sub>	Nebennutzung
t <sub>i</sub>	Einzelzeit
t <sub>v</sub>	Verteilzeit
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VO	Verordnung
WEEE	Waste from Electrical and Electronical Equipment
z <sub>er</sub>	Erholungszeitfaktor
z <sub>v</sub>	Verteilzeitfaktor
ZVEI	Zentralverband Elektroindustrie
v <sub>aut</sub>	Anlagenverfügbarkeit
δ	Kippwinkel, Angularwinkel
σ	Spannungen, innere Kräfte

---





# 1 Einleitung

Zunehmendes Wachstum und damit hohe Abfallmengen stehen in den letzten Jahrzehnten einem gestiegenen Umweltbewusstsein der Bürger gegenüber [1].

Ein Umdenken beim Verbraucher - umweltfreundliche Produkte - muss eine Berücksichtigung beim Hersteller - weniger Abfall, wiederverwertbare Altstoffe - nach sich ziehen. Die Müllberge erhöhen beim Deponieren die Gefährdung des Grundwassers und die Belastung der Umwelt durch Schwermetalle. Die Deponien selber werden knapp, da die Auflagen immer größer werden und sich die Bürger gegen die Standorte vehement wehren. Auch das Verbrennen des Abfalls ist nicht ohne Risiko, entstehende Dioxine und Furane gefährden Mensch und Umwelt [2, 3].

Der Gesetzgeber ist zum Handeln gezwungen. Gesetze und Verordnungen sollen Erzeuger und Verbraucher zwingen, die ökologische Verantwortung zu beachten. Priorität hat die Abfallwirtschaft mit den Grundsätzen Vermeidung von Abfall vor Wiederverwertung und Wiederverwertung vor Beseitigung. Ziel der Abfallwirtschaft ist, den Verlust wertvoller Stoffe zu verhindern, somit die vorhandenen Ressourcen zu schonen und die Belastung der Umwelt durch Abfall- und Giftstoffe zu minimieren [4].

Es ist zwingend notwendig, bei abnehmenden natürlichen Ressourcen, sich verknappendem Deponieraum und steigenden Deponiekosten, innovative Wege und Konzepte für die Behandlung von Abfällen zu entwickeln und umzusetzen. Neben der Abfallvermeidung als wichtigstem Ziel wird durch die konsequente Nutzung im Wirtschaftskreislauf vorhandener Material- und Produktströme dem Gedanken der Kreislaufwirtschaft Rechnung getragen. Die Industrie ist aufgefordert, den Produkt- bzw. Stoffkreislauf zu schließen. Durch ein effektives Recycling von Elektronikschrott wird die Abfallvermeidung und Ressourcenschonung gefördert.

## 1.1 Problemstellung und Ziel der Arbeit

Auf Basis des Kreislaufwirtschaftsgesetzes hat die Europäische Union die Richtlinie über die Abfallentsorgung von Elektro- und Elektronikaltgeräten im Mai 2001 ratifiziert [5,8]. Am 13.08.2004 tritt die deutsche Verordnung in Kraft, zum 13.08.2005 müssen die Rücknahmesysteme aktiv sein. Bis zum 31.12.2006 muss eine Erfüllung der Sammel- und Verwertungsquoten gewährleistet werden. Das Ziel ist es, Altgeräte in einer möglichst wirtschaftlichen und umweltverträglichen Form zu recyceln, d.h. die Teile- und Stoffkreisläufe über die verschiedenen Phasen des Produktlebenszyklusses soweit wie möglich zu schließen [6].

Die Elektro- und Elektronikaltgeräteentsorgung wurde über Jahre als problemlos angesehen. Die Elektronikschrott-Verordnung umfasst alle Produkte mit elektrischen Bauteilen, wie z.B. Platinen, Widerständen, integrierten Schaltungen oder Kondensatoren. Innovative Technologien und schnellwechselnde Modetrends sorgen für große Zuwachsraten in der Elektrogeräte- und Elektronikindustrie, für kürzere Gebrauchsdauer und somit für rasch wachsende Elektronikschrottmengen. 1999 fielen 6 Mio. Tonnen Elektro- und Elektronikaltgeräte, 2001 8 Mio. Tonnen in der Europäischen Union an [5, 7]. Das derzeitige Aufkommen an Elektronikschrott in Deutschland beläuft sich auf 1,3 bis 2,0 Mio. Tonnen (nach ZVEI) im Jahr - je nach Definition - mit einer Zuwachsrate von 3 bis 5% jährlich [7, 8]. Das Elektronikschrottaufkommen ist in den letzten Jahren dreimal schneller als der übliche kommunale Abfall gewachsen [9, 10]. 90% der Elektronikaltgeräte (ohne Haushaltsgroßgeräte) werden auf Abfalldeponien gelagert oder verbrannt [11, 12].

---

Probleme bereiten aber nicht nur die steigenden Mengen an Elektroaltgeräten und Elektronikprodukten. Elektronikschrott ist eine außerordentlich komplexe und problematische Abfallart. Teilweise enthalten Elektro- und Elektronikgeräte nahezu die komplette Palette aller im Periodensystem vorkommenden Elemente (inkl. Schwermetalle). Sie beinhalten die verschiedensten z. T. toxischen Stoffe wie flammhemmende Kunststoffe, Öle, Gase, oder Leuchtstoffe [2].

Die Verordnung fordert deshalb, dass sich die Hersteller der Geräte bereits bei der Konstruktion mit der Entsorgungsproblematik beschäftigen. Die Verantwortung für das Produkt endet nicht mit der Garantiezeit, sondern schließt die Entsorgung mit ein [13].

Die Demontage von Produkten ist innerhalb des Recyclingsystems ein wichtiges Instrument zur Reduzierung der zu entsorgenden Reststoffe. Dabei können verwendungsfähige Komponenten und sortenreine Fraktionen als Sekundärrohstoff gewonnen sowie Schadstoffe gesondert gesammelt werden. Ziele der Demontage entsprechend der Kreislaufwirtschaft sind [14]:

1. Schadstoffentfrachtung,
2. Intensivierung der Wieder- und Weiterverwendung,
3. Gewinnung und Erhöhung der Qualität von Sekundärrohstoffen.

Die heute bekannten Demontageverfahren von Elektro- und Elektronikaltgeräten sind aufgrund der zur Zeit geringen Rücklaufquoten von 10 bis 20 Prozent [12] und der heterogenen Geräterückfuhr manuell. Hier kommen konventionelle Montagewerkzeuge wie Schraubendreher, Hammer und Schneidezangen sowie vereinzelt mechanische Einrichtungen wie Druckluftschrauber oder Entlöthilfen für Elektronikbauteile zum Einsatz. Manipulatoren wie Hub-Dreh-Stationen an den Arbeitsplätzen für die Unterstützung der Werker bei der Demontage von Großgeräten werden hingegen nur vereinzelt in Behindertenwerkstätten eingesetzt [15, 16].

Die Tätigkeit der manuellen Demontage ist mit monotonen Arbeitsinhalten und physischen Belastungen verbunden, die eine unwirtschaftliche Demontageleistung nach sich ziehen. Sowohl aus wirtschaftlichen Gründen als auch zur Humanisierung der Arbeitsplätze ist die Automatisierung der Demontageprozesse von großer Bedeutung. Als Motivation zum Anstreben einer automatisierten Lösung ergibt sich also neben dem Rationalisierungsaspekt und einer Verbesserung der Demontageleistung die Forderung nach einer Minderung der physischen Belastung der Arbeiter [17].

Bei der Automatisierung der Demontage werden hohe Anforderungen an die Flexibilität gestellt, da zum einen Geräte in Losgröße 1 demontiert werden müssen und sich zum anderen der Zustand des zu demontierenden Gerätes während seines Lebenszyklusses verändern kann [18]. Aufgrund der hohen Zustandsunsicherheit, bedingt durch z.B. Korrosion, Beschädigungen, Produktmodifikationen oder Varianzen infolge von Reparaturmaßnahmen, kann die Demontage nicht einfach als eine Umkehrung der Montage betrachtet werden. Daher können Objektmodelle, die auf dem Produktzustand zum Zeitpunkt der Montage basieren, nicht uneingeschränkt verwendet werden, so dass umfassende Sensorinformationen notwendig sind, um für eine Demontage notwendige Objektmerkmale zu erhalten [19]. Für einen Industrieroboter ergeben sich wegen des Defizits an „Erfahrungen“, „Sensorik“ und auch „Technologie“ mannigfaltige Anforderungen [20]. So stehen keine speziellen Demontagewerkzeuge z. B. zum Trennen von Verbindungen zur Verfügung [21].

Ansätze zur flexiblen Automatisierung der Demontage werden zur Zeit erforscht. Die bisherigen Automatisierungsansätze beziehen sich allerdings lediglich auf die Demontage eines Gerätetyps. Vereinzelt Lösungen zur Automatisierung der Demontage werden zur Zeit industriell nur bei großen Stückzahlen mit minimaler Typenvielfalt und geringer Komplexität, wie z.B. beim Behälterrecycling eingesetzt [22].

---

Automatisierbare Demontageanlagen besitzen für den industriellen Einsatz folgende Merkmale [23, 24]:

- bei geringer Demontagetiefe und hoher Ausbringung gelangen starr automatisierte Einzweckstationen mit hohem Automatisierungsgrad zum Einsatz,
- komplexe Demontageprozesse besitzen einen niedrigen Automatisierungsgrad und geringe Ausbringung,
- Industrieroboter werden zur Zeit lediglich zu Testzwecken im Labor eingesetzt.

Derzeit existieren noch keine automatisierten Demontagesysteme für Elektronikschrott, die auch im realen industriellen Alltag ökonomisch und mit hoher Verfügbarkeit arbeiten. Dies liegt im Wesentlichen in den folgenden Punkten begründet [25]:

- eine unzureichende Sammellogistik führt zu einem geringen Mengenaufkommen an den einzelnen Demontagebetrieben,
- große Typen- und Variantenvielfalt, insbesondere im Konsumgüterbereich,
- alterungs- und nutzungsbedingte Varianz (variierende Gebrauchszustände),
- nicht demontagegerechter Produktaufbau,
- Fehlen von standardisierten Baugruppen,
- uneinheitliche und nicht demontagegerechte Verbindungstechniken,
- Mangel an automatisierungsspezifischen Zerlegewerkzeugen [26].

Das Hauptproblem ist also die momentan vielfach noch mangelnde Flexibilität der verfügbaren Automatisierungskomponenten, wobei hier die Peripherieelemente sowie die Demontage- und Zerlegewerkzeuge eine große Rolle spielen. Andererseits sollte jedoch zur Senkung der Demontagekosten bzw. Verbesserung der Wirtschaftlichkeit und Humanisierung des Arbeitsplatzes die Innovation in Richtung der automatisierten Demontage gerichtet sein [27].

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Schaffung wissenschaftlicher Grundlagen für die flexible Automatisierung der Demontage als Beitrag zur Einführung wirtschaftlicher Lösungen für die Demontage. Grundlage dieser Arbeit ist die Untersuchung und Analyse einer realisierten automatisierten Demontagezelle, das Ableiten und Bewerten von Entwicklungspotenzialen und die Optimierung des Trennprozesses von Schraubenverbindungen, welcher eine bedeutende Schwachstelle darstellt.

---

## 1.2 Aufbau der Arbeit

Recycling als Bestandteil des Produktlebenslaufes gewinnt in den letzten Jahren wachsende Beachtung in der Gesellschaft, nicht zuletzt ausgelöst durch Aktivitäten des Gesetzgebers auf diesem Gebiet. Die Demontage von Komponenten und Bauteilen gewährleistet eine ordnungsgemäße Abfallwirtschaft mit den Zielen Verwendung vor Verwertung vor Entsorgung. Diesem Umstand wird in dieser Arbeit durch Erweiterung des Wissensstands über Möglichkeiten, Voraussetzungen und Grenzen einer Automatisierung der Demontage sowie durch einen Beitrag zur Einführung wirtschaftlicher Lösungen für die Demontage Rechnung getragen.

Diese Arbeit baut auf den Ergebnissen der Dissertation von Hucht [28] auf, in der eine technisch realisierbare Lösung für die Demontage von Bildschirmgeräten in Form einer robotergestützten Demontagezelle entwickelt und umgesetzt wurde.

Aufbauend auf einer Betrachtung des gegenwärtigen Standes der Technik wird der Istzustand der Demontage für das Recycling mit einer Erhebung und einer Analyse ausgewählter Demontageaufgaben untersucht. Hierzu werden die technischen, wirtschaftlichen und organisatorischen Grundlagen der Demontage und die bestehenden Automatisierungshemmnisse zusammengestellt. Anschließend erfolgt die Ermittlung und Analyse der Schwachstellen der bereits realisierten automatisierten Demontagezelle hinsichtlich der technischen Lösung. In dieser Pilotanlage wird die automatisierte Demontage ausgewählter Bildschirmgeräte im Hinblick auf quantitative und qualitative Einflüsse untersucht. Die Schwachstellenanalyse erfolgt auf Basis eines Vergleiches mit den erhobenen technischen Grundlagen der manuellen Demontage und den bestehenden Automatisierungshemmnissen am Beispiel ausgedienter und neuwertiger Bildschirmgeräte. Insbesondere werden hier das Trennen von Schraubenverbindungen, welche sich in den Versuchen als komplexe Demontageaufgaben hinsichtlich der Werkzeugpositionierung und der Übertragung der Lösekräfte zeigten, sowie die Demontagezeiten systematisch analysiert.

In mehreren Versuchsreihen werden unterschiedlich zugängliche Schraubenverbindungen mit verschiedenen Trenn- und Schraubwerkzeugen gelöst und anschließend die technischen Lösungen und Prozesszeiten der einzelnen Verfahren gegenübergestellt und bewertet. Aus den Ergebnissen der Schwachstellen- und Trennprozessanalyse sowie theoretischen Untersuchungen von Schraubenverbindungen werden die Anforderungen den verfügbaren Werkzeugen zum Übertragen von Kräften zum Trennen von Schraubenverbindungen gegenübergestellt. Auf Basis der Anforderungen werden die erforderlichen Entwicklungsschritte von Werkzeugen zum Trennen von Schraubenverbindungen abgeleitet und entwickelt. Anschließend wird das realisierte Trennwerkzeug in die Demontagezelle implementiert und experimentell verifiziert. Versuche zur dynamischen Übertragung der Lösekräfte werden durch numerische Untersuchungen ergänzt. Mit Hilfe der gewonnenen Erkenntnisse durch die Integration eines entwickelten Trennwerkzeuges für Schraubenverbindungen werden die wesentlichen Randbedingungen der automatisierten Demontage herausgestellt und ein Vergleich mit dem Anforderungskatalog für einen industriellen Einsatz durchgeführt.

Neben der rein technischen Lösung besitzen ökonomische Randbedingungen höchste Priorität, die einen Einsatz in industriellen Recyclingaktivitäten bestimmen. Daher wird ausgehend von Kostendaten aus der manuellen Demontage eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der automatisierten Demontage durchgeführt.

---

## 2 Stand der Elektronik- und Elektrogeräteentsorgung

### 2.1 Mengengerüst und Entsorgungswege für Elektro- und Elektronikgeräte

Die sehr unterschiedlichen elektrischen und elektronischen Gebrauchsgüter aus privaten Haushalten, aus dem gewerblichen oder kommunalen Bereich stellen die zur Entsorgung Verpflichteten vor große Probleme [29]. Das derzeitige Aufkommen an Elektronikschrott in Deutschland beläuft sich auf 1,3 bis 2,0 Mio. Tonnen im Jahr - je nach Definition - mit einer Zuwachsrate von 3 bis 5% jährlich [7, 9]. Die breite Spanne der unterschiedlichen Abfallmengen ist aufgrund unterschiedlicher Ansätze in den Bereichen der Datenerhebung und –auswertung, bezogen auf die Definition von Elektronikschrott, zu begründen [30; 31]. Von diesem Abfallaufkommen sind ca. 40% ausgediente Investitionsgüter aus dem industriellen und gewerblichen Bereich, die restlichen 60% der Geräte fallen in den Haushalten an [32]. Von der geschätzten Menge an Elektronikschrott macht der Computerschrott nur 1% der Stückzahlen aus, den Hauptanteil bilden mit 61% Geräte der Unterhaltungselektronik, 24% Haushaltsgeräte und der Rest sind Geräte aus Industrie und Gewerbe [33]. Das jährliche Abfallpotenzial von Geräten der Unterhaltungselektronik und IT-Geräten beträgt zur Zeit [9, 34,]:

- Fernsehgeräte:	5.247.000 Stück p.a.	165.434 t p.a.
- Videorecorder:	3.480.000 Stück p.a.	27.840 t p.a.
- Videokamera / Camcorder:	1.290.000 Stück p.a.	1.290 t p.a.
- Rundfunkgeräte / Radiorecorder:	6.022.000 Stück p.a.	18.066 t p.a.
- HiFi-Anlagen:	3.970.000 Stück p.a.	48.550 t p.a.
- Satellitenempfangsanlagen:	1.104.000 Stück p.a.	5.520 t p.a.
- PC's, Monitore:	2.143.000 Stück p.a.	120.950 t p.a.
- Telefone, Handys	6.512.000 Stück p.a.	3.256 t p.a.
- Anrufbeantworter:	2.013.000 Stück p.a.	805 t p.a.
- Faxgeräte:	815.000 Stück p.a.	489 t p.a.

Die zukünftigen Rücklaufquoten werden zum einen vom eingeführtem Entsorgungsgebührensysteem, zum anderen vom Verbraucherverhalten und Umweltbewusstsein der Bevölkerung bestimmt werden [38]. Elektronikgeräte besitzen eine geringe Innovationszeit. Alle 2 bis 3 Jahre werden auf dem Markt modernere, leistungsfähigere Geräte angeboten, so dass die Geräte nach einer geringen Erstnutzung ersetzt werden, obwohl ihre eigentliche Lebensdauer wesentlich höher ist. Aus Pilotversuchen in Essen und Bregenz weiß man, dass Elektro- und Elektronikgeräte, insbesondere Computer und Geräte der Unterhaltungselektronik, nach Ablauf ihrer Erstnutzung in den Haushalten eine Zweit- und Drittnutzung erfahren [35, 36, 37]. Weiterhin können viele Elektro- und Elektronikkleingeräte, sogenannte „mülltonnengängige“ Kleingeräte, weiterhin über den Hausmüll entsorgt werden. Prognostiziert wird eine Zunahme der zu entsorgenden Geräte der Unterhaltungselektronik und Computer, wenn der Sättigungsgrad der Haushalte erreicht ist [33, 39]. Bezüglich der Haushaltsgroßgeräte liegt seit 10 Jahren eine Abdeckung der Haushalte bei größer 97%, so dass hier eine gleichbleibende Abfallrate durch kontinuierlichen Austausch der Geräte erfolgt [40].

Die Entsorgung der Geräte geschieht heute noch weitgehend mit traditionellen Methoden, d.h. kleinere Geräte werden in die Mülltonne geworfen und größere Geräte zur Sperrmüllabfuhr bereitgestellt. Endgültig werden die Geräte dann verschrottet oder sie gelangen auf Deponien und in Verbrennungsanlagen für Hausmüll. Dieser Entsorgungsweg ist problematisch und umstritten [41].

Einzelne Städte und Kreise führen in letzter Zeit umfassendere Pilotprojekte zur getrennten Sammlung von Elektro- und Elektronikaltgeräten durch [36]. Die Situation in der öffentlichen Entsorgung ist aber weiterhin dadurch gekennzeichnet, dass die entsprechenden Kapazitäten für die Verwertung der zu erwartenden Rücklaufquoten noch nicht in ausreichendem Maße zur Verfügung stehen.

Neben dem Weg über die öffentliche Entsorgung werden vom Handel, vom Hersteller und von den privaten Entsorgern Konzepte zum Aufbau von Rücknahme- und Verwertungssystemen entwickelt [42]. Einen Überblick über die Entsorgungswege, welche neben der öffentlichen Entsorgung zur Zeit im Rahmen der WEEE aufgebaut werden, zeigt folgende Abbildung [43, 44]:

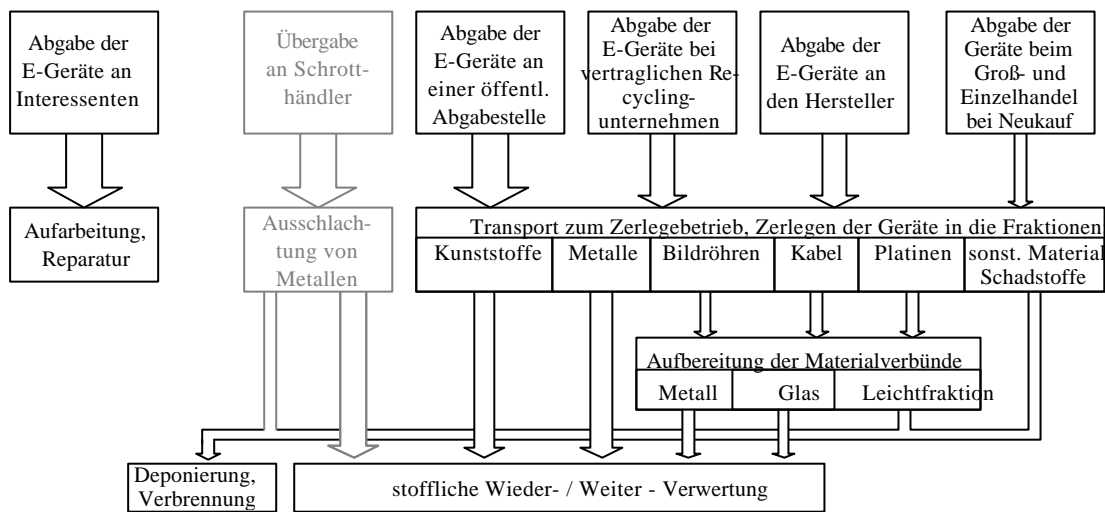


Abb. 2.1: Rücknahme- und Verwertungswege für Elektronikschrott [45]

Die Rücknahmewege durch Abgabe an Interessenten, Übergabe an Schrotthändler, Anlieferung an öffentlichen Abgabestellen oder über den Haus- und Sperrmüll werden zur Zeit am häufigsten genutzt. Durch die WEEE-Richtlinie sind für den Verbraucher kostenlose Rücknahmesysteme mit der Gewährleistung entsprechender Verwertungsquoten umzusetzen. Die kostenlose Rücknahme ausgedienter Elektro- und Elektronikaltgeräte wird dann über öffentlichen Abgabestellen, Recyclingunternehmen, welche mit dem Hersteller eine vertragliche Rücknahme geschlossen haben, sowie über den Händler oder direkt über den Hersteller erfolgen. Die Entsorgung der Altgeräte über den Schrotthändler mit dem Ziel der Gewinnung von Metallen oder über den Haus- und Sperrmüll mit der Deponierung oder Verbrennung der Geräte wird zukünftig nicht mehr erfolgen. Bei der Rücknahme der Altgeräte durch den Hersteller gibt dieser in den meisten Fällen diese an Verwerterfirmen zur Demontage weiter [46].

Die Entwicklung eines effizienten, geschlossenen Recyclingsystems beinhaltet sowohl den Aufbau eines flächendeckenden Sammel-, Lager- und Rücknahmesystems [47-49], als auch die anlagentechnische Umsetzung erforderlicher Recyclingtechnologien [50-55].

## 2.2 Industrielle Verwertung von Elektro- und Elektronikgeräten

Infolge der Zustandsunsicherheiten durch den Gebrauch der Geräte bestehen Probleme in der Trennung der komplexen Materialverbände. Elektro- und Elektronikgeräte bestehen z.B. aus einer Vielzahl von Inhaltsstoffen, sie enthalten sowohl Wert- als auch Schadstoffe. Materialverbände werden entweder zerstörend (Shredder, Hammermühle) oder durch Demontage aufgelöst [64]. Die mechanische Zerkleinerung vollständiger Geräte mit Hilfe von Shredderanlagen zeichnet sich durch höhere Kapazitäten sowie niedrigere Kosten im Vergleich zur kostenintensiven manuellen Demontage aus. Jedoch müssen bei diesem Verfahren Nachteile berücksichtigt werden, die aus dem wahllosen Zerkleinern der Altprodukte und den nachgeschalteten Sortierprozessen resultieren und einen begrenzten Reinheitsgrad der Wertstoffe und einen großen Anteil als Sondermüll einzustufenden Shredderleichtfraktion zur Folge hat [14, 65]. Versuche der Firma Miele in Zusammenarbeit mit Shredderunternehmen ergaben bei Haushaltsgroßgeräten einen Anteil der Leichtmüllfraktion von 36,2%, bei Haushaltskleingeräten sogar von 76,2%. Die Rentabilitätsgrenze von Shredderanlagen liegt jedoch bei einem Leichtmüllanteil von ca. 20% nach einer vorhergehenden Schadstoffentfrachtung [66].

Zur Lösung dieses Problems wird immer häufiger eine Vordemontage der Teile vorgenommen. Die Demontage erlaubt nicht nur eine Trennung nach stofflichen Kriterien in sortenreine Wertstoffe mit verbesserten Verwertungsmöglichkeiten sowie das gezielte Separieren von lokal konzentrierten Schadstoffen, sondern auch eine Trennung der Bestandteile nach funktionalen Kriterien zur Rückgewinnung vollständiger Bauteile oder hochwertiger Sekundärrohstoffe [67, 68]. Die Grobtrennung, die sowohl zerstörend als auch zerstörungsfrei erfolgen kann, ist in vier Hauptfraktionen durchzuführen [69]:

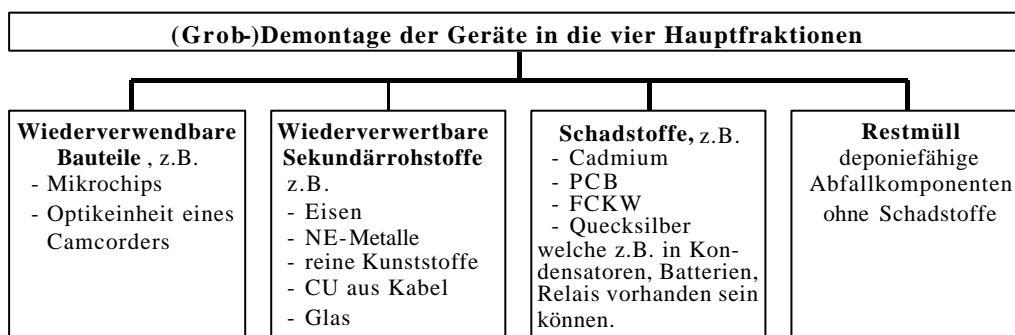


Abb. 2.2: Grobtrennung innerhalb der Demontage in vier Hauptfraktionen

Die Zerlegung in Fraktionen richtet sich nach den eingeplanten Recyclingwegen. Wiederverwendbare Teile gehen v.a. in den Gebrauchtwarenmarkt oder werden in der Herstellung minderwertiger Produkte (Chips für Spielzeuge) eingesetzt und erhalten so einen hohen Anteil der bei der Produktion des Altproduktes geleisteten Wertschöpfung [70]. Metallische Fraktionen werden zum Umschmelzen an Hüttenwerke abgegeben. Sortenreine Thermoplast werden regeneriert [56]. Die anderen Polymere werden entweder verpresst (Schallschutzwand, Blumenkübel, Begrenzungspfosten), rohstofflich verwertet (Schwarze Pumpe: Gewinnung von Methan), verbrannt oder deponiert [71]. Die Glasfraktion wird zur Verwertung noch gereinigt. Platinen sind wegen ihres Kupfergehalts von Kupferhütten begehrt. Sonderstoffe werden meist unbehandelt deponiert.

Ein Recycling von Elektro- und Elektronikgeräten findet bis heute nur in sehr beschränktem Umfang statt. Viele der zur Zeit praktizierten Verwertungsverfahren beschränken sich auf lukrative Einzelbereiche. Eine nennenswerte Verwertung erfolgt zum einen über den privaten Schrotthandel, die durch

Schreddern von Haushaltsgroßgeräten den gewonnenen Metallanteil als Sekundärrohstoff an Stahlhütten verkauft und so Verwertungsquoten bis zu 60% erzielen [28]. Zum Anderen liegt das Hauptaugenmerk auf edelmetallhaltigen Komponenten, wie sie v.a. auf Platinen zu finden sind, auf wiederverwendbaren Microchip-Bausteinen sowie auf dem Kupfer- und Silberanteil der Kabelfraktion [46]. Der wirtschaftlich uninteressante Rest wird als Abfall entsorgt und gelangt so auf Mülldeponien und in Verbrennungsanlagen.

Zur Zeit ist die Demontage - aufgrund der stark ausgeprägten Heterogenität und der Komplexität der Geräte - vor allem durch Seriengrößen der Losgröße 1 gekennzeichnet [72]. Eine Demontage von Elektro- und Elektronikgeräten an der Werkbank und ein geringer Mechanisierungsgrad ist daher Stand der Technik und damit Alltag in den heute existierenden Demontagebetrieben. Sie zeichnen sich durch den Einsatz konventioneller Werkzeuge aus der Montage, wie z.B. Hammer, Zange, Seitenschneider, Druckluft- bzw. Elektroschrauber, Schraubendreher und Brecheisen sowie vereinzelt mechanischer Hilfsmittel aus. So werden Geräte heutzutage mit einem Hammer und einem Schraubendreher zerschlagen oder aufgestemmt. Umherfliegende Teile sowie entstehende scharfe Grate stellen ein hohes Verletzungspotenzial dar. Hinzu kommt noch eine Gesundheitsgefährdung durch die Implosionsgefahr bei Bildröhren, freigesetzte Giftstoffe (PCB, Hg,...) sowie Verschmutzung und Lärm [66]. Darüber hinaus erschweren die großen durch den Werker zu bewegend Lasten die Arbeit, da Manipulatoren zum Heben, Drehen, Positionieren und Fixieren großer Geräte lediglich in Behindertenwerkstätten zum Einsatz kommen. Erschwert wird die manuelle Demontage durch die teilweise deformiert und zerstört beim Verwerter ankommenden Geräte [73].

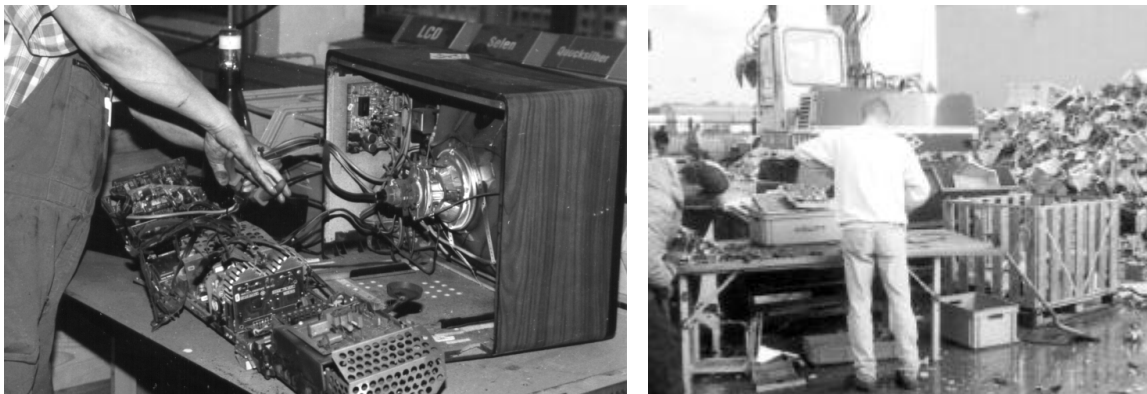


Abb. 2.3: Derzeit praktizierte Demontage (links: Brahl, rechts: Rohstoff-Handels-GmbH)

Die manuelle Demontage zeichnet sich durch folgende Charakteristika [74] aus:

Vorteile	Nachteile
+ kleine Losgrößen möglich	- abnehmende Wirtschaftlichkeit mit wachsender Stückzahl
+ hohe Flexibilität	- Anforderungen durch Arbeitsschutz
+ hoher Demontagegrad möglich, d.h. optimale Reinheit von Sekundärstoffen	- hohe Ausfallraten durch Krankheit, Urlaub, Pausen, ...
+ Schaffung bzw. Erhalt von Arbeitsplätzen	- Monotonie durch gleiche Tätigkeiten

Die Analyse der manuellen Demontage zeigt, dass es nicht sinnvoll ist, die durch moderne Technik realisierten Verbesserungen von Arbeitsabläufen und Arbeitsbedingungen im Bereich der Montage in der Demontage rückgängig zu machen. Die kostenaufwendige manuelle Demontage führt zu Überlegungen, durch Handhabungsautomaten eine Kostensenkung zu erreichen [27].



## 2.3 Automatisierungstendenzen in der Demontage

Ansätze zur Automatisierung der Demontage werden zur Zeit erforscht. Die bisherigen Automatisierungsansätze beziehen sich allerdings lediglich auf die Demontage eines Gerätetyps:

- In Zusammenarbeit mit der Deutschen Telekom wurde am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung eine automatisierte Demontagezelle mit einem 6-Achs-Knickarm-Roboter für die Aufarbeitung von Fernsprechengeräten des Typs „Modula“ realisiert. Das Modula zeichnet sich bereits durch einen demontagerechten Sandwichaufbau mit meist linearen Trennrichtungen und lösbaren Verbindungstechniken aus [75].
  - Das Institut für Fertigungsautomatisierung und Handhabungstechnik der Technischen Universität Braunschweig realisierte eine Anlage zum automatischen Entstückten von Leiterplatten. Die Anlage zur Leiterplattenentstückung gliedert sich in die vier Verfahrensschritte mechanisierte Steckerabtrennung, Bauteil-Identifikation, gezielte Teile-Demontage, Abtrennung der restlichen Bauteile. Eine Ähnliche Anlage wurde an der TU-Dresden aufgebaut [76, 77].
  - Eine weitere automatisierte Leiterplattenentstückungsanlage wurde am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik der Universität Erlangen-Nürnberg entwickelt. Sie ist gekennzeichnet durch modularisierte Arbeitsplätze, die manuell oder automatisiert ausgeführt und durch einen flexiblen Materialfluss miteinander verbunden sind. [78].
  - Am Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik der TU Berlin (SFB281) wurde eine Montage- und Demontagezelle für Waschmaschinen und eine zweite für Telefone entwickelt, deren wesentliche Bestandteile drei Industrieroboter mit unterschiedlichen kinematischen Konfigurationen sind [79].
  - Der Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik an der Universität Erlangen-Nürnberg entwickelte eine Demontagezelle für Kleingeräte, die aus einem Scara- und einem Knickarm-Roboter besteht. [80].
  - Am Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik wurde ein Demontagesystem für Mikrowellen eingerichtet. Hier werden die Gehäuseabdeckungen mit einem Portalroboter automatisiert abgenommen und die restlichen Demontageschritte manuell ausgeführt. Die Arbeitsstationen sind über Stetigförderer miteinander verbunden [81].
  - Am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebstechnik der Universität Karlsruhe wurde eine gemischt automatische/manuelle Demontagezelle für Fernsehgeräte aufgebaut. Im ersten, automatischen Schritt wird die Rückwand durch einen Knickarm-Roboter abgenommen und die Bildröhre belüftet. Alle Schritte zur Demontage und Entnahme der einzelnen Elektronikbauteile und Kabel erfolgen in einem zweiten, manuellen Schritt [82].
  - Im Verbundprojekt FAUDEG (Flexibel automatisierte Demontage von Elektrogeräten) unter Leitung der Universität Dortmund wurde an der Entwicklung von automatisierten Demontageanlagen geforscht. Ziel war der Aufbau eines weitgehend automatisierten Demontagesystems für Bildschirmgeräte mit Industrierobotern [83].
  - Die Firma Sony hat 1995/96 in Japan für ca. 20 Millionen Euro eine teilautomatisierte Demontageanlage für Fernsehgeräte aufgebaut, deren wesentliches Ziel es war, die beiden Glasfraktionen der Bildröhre zu gewinnen [84]. Aufgrund der hohen Recyclingkosten pro Gerät wurde die Anlage nach der Versuchszeit wieder abgebaut.
-

- Im Rahmen eines europäischen Forschungs-Projektes (ADAS), an dem die Firmen Siemens AG (Deutschland), 3D Scanners LTD (England), RISO National Laboratory (Dänemark) und Robotiker (Spanien) beteiligt waren, wurde eine robotergestützte Demontagezelle zur selbständigen Demontage von Elektronikgeräten mit fortschrittlicher Teileerkennung entwickelt. Diese Zelle sollte so flexibel ausgelegt werden, dass die notwendigen Demontagevorgänge an die unterschiedlichen Gerätetypen selbständig angepasst werden [85, 86]. Dieses Projekt wurde in 2001 eingestellt, da die komplexe Aufgabenstellung z.Z. noch nicht gelöst werden konnte.

Besondere Charakteristika der realisierten Automatisierungsansätze - beispielsweise der Applikation der entwickelten Zelle für die Demontage des Telefongerätes „Modula“ - sind:

- Demontage nur eines Gerätetyps mit einer Stückzahl von etwa 200.000 pro Jahr und
- weitgehende demontagegerechte Produktgestaltung.

Die Anlagen zeichnen sich durch eine geringe Flexibilität aus. Losgröße 1 - wie bei der manuellen Demontage - wurde nicht realisiert. Die erforderliche Flexibilität macht alle Automatisierungsansätze äußerst schwierig [87, 88]. Ein entscheidender Mangel ist die fehlende experimentelle Erprobung der Ansätze mit einem realen System [89]. Die vorgestellten Beispiele verdeutlichen aber, dass bei ausreichender Stückzahl zu demontierender Elektro- und Elektronikgeräte sich eine solche oder eine ähnliche Strategie als wirtschaftlich erweisen wird.

Das Anwachsen der Menge an Altgeräten bedingt durch den schnellen Fortschritt auf dem Elektroniksektor und der damit verbundenden Kurzlebigkeit der Geräte wird zu einer Automatisierung in der Demontage führen, um ein verbessertes wirtschaftliches Ergebnis zu erzielen [90, 91]. Weiterhin ist die Automatisierung der Demontage aufgrund der Gefahrstoffe innerhalb einiger Elektronikgeräte und der Gewichte von Großgeräten aus Gründen der Humanisierung des Arbeitsplatzes von hohem Interesse. Eine Automatisierung der Demontage von Elektro- und Elektronikgeräten in Baugruppen ist aufgrund des großen Rationalisierungspotenzials in Zukunft anzustreben [92, 93]. Insbesondere die automatisierte Demontage von Bildschirmgeräten (Computermonitore und Fernsehgeräte) ist sinnvoll, da hier aufgrund der hohen Deckungsrate in der Bevölkerung (99% der Haushalte besitzen mindestens ein Fernsehgerät) eine hohe Rücklaufquote zu erwarten ist, die Geräte aufgrund der Gewichte manuell nur schwer handhabbar sind und eine Zerlegung in einzelne Fraktionen aus ökologischer Sicht aufgrund der schadstoffbelasteten Bildröhre - welche auch bei recyclinggerechten Geräten, wie z.B. der Grüne Fernseher von Loewe oder der Ökovision von Schneider, vorhanden ist - erforderlich sein wird. Aufgrund des heute erkennbaren Verbraucherverhaltens ist absehbar, dass ab 2002 je Jahr ca. 120.000 t gebrauchter Fernsehgeräte zur Rücknahme anstehen. Während einer längeren Übergangszeit wird sich das Gros der zurückgegebenen Geräte an die Menge der in den Markt gebrachten Geräte (ca. 180.000 t in 2001) annähern [9, 32].

## 2.4 Analyse des Recyclingprozesses von Bildschirmgeräten

Die zur Zeit in Anwendung befindlichen Recyclingverfahren sind die manuelle Demontage der Elektro- und Elektronikgeräte mit anschließender mechanischer Aufbereitung der Fraktionen oder das Schreddern kompletter Geräte nach einer vorab durchgeführten manuellen Schadstoffentfrachtung [94]. Das einzusetzende Recyclingverfahren ist von der Geräteart abhängig. Bei Bildschirmgeräten ist eine Demontage notwendig, da diese bedingt durch das blei- und strontiumhaltige Bildröhrenglas, der Leuchtstoffe sowie PCB-Kondensatoren und Nickel/Cadmium-Batterien bei älteren Geräten einen relativ hohen Schadstoffgehalt besitzen. Schätzungen zufolge fielen 1994 ca. fünf Millionen Fernsehgeräte und 2 Millionen Computermonitore zur Entsorgung an. Im Jahr 2001 geht man von 5,25 Millionen Fernsehgeräten und 2,15 Millionen Computermonitoren aus [9]. Es ist davon auszugehen, dass diese Zahlen sich in Zukunft noch erhöhen werden [39].

Bei Bildschirmgeräten war bisher wie bei allen Elektrogeräten die kostengünstige Montage ausschlaggebend für die Konstrukteure. Schwerlösbare Verbindungen (Clip-, Schnappverbindungen) sowie der Einsatz verschiedenster, nicht gekennzeichneten Kunststoffe, führen zu einer äußerst aufwendigen Sortierung, wobei viele stark verunreinigte Fraktionen entstehen.

Kennzeichnend für die Bildschirmgeräte sind die drei Materialfraktionen: Kunststoffe (11%, davon 54% flammhemmend ausgerüstet), Bildröhrenglas (56%) sowie elektronische Schaltungen (9%) [95]. Die Metalle machen weit weniger als 10% eines Bildschirmgerätes aus. Zu über 90% besteht es also aus Materialien, die nicht direkt, sondern erst nach einer Aufbereitung weiter vermarktet werden können. Nach Versuchen und Berechnungen können aus einem TV-Gerät (32 kg) 7 kg Stahl, 420 g Kupfer, 310 g Aluminium gewonnen werden [96]. Verwertungsmöglichkeiten für Kunststoffe aus Altgeräten bestehen zur Zeit nicht (Verbundmaterialien, kleine Teile, Flammhemmer, große Vielzahl unterschiedlicher Kunststoffe). Das größte Problem beim Bildschirmgeräterecycling stellt die Bildröhre dar, die innen mit Cadmium beschichtet und zur Strahlenabschirmung mit Blei versehen ist. Deren Verwertung befindet sich in der Entwicklung [97]. So setzt die Firma Schott das demontierte Bildschirmglas zu 20% bei der Neuproduktion ein.

Die Aussonderung der verschiedenen wertstoff- und schadstoffhaltigen Komponenten aus dem Elektronikschrott lässt sich nur über die Zerlegung der Geräte erreichen. Der Demontageablauf ergibt sich aus der Anordnung der Bauteile im Gerät.

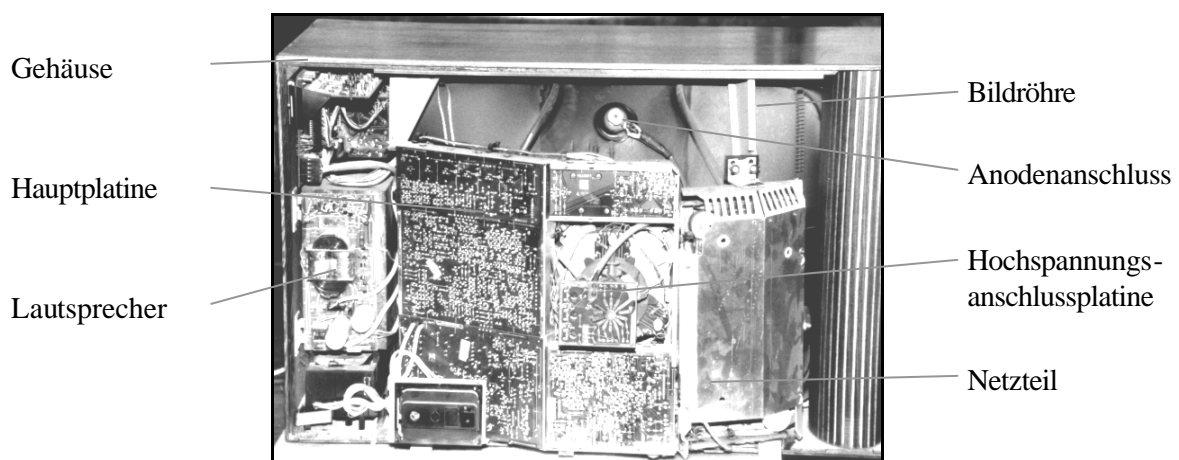


Abb. 2.4: Anordnung der Bauteile in einem Fernsehgerät (Bj. Ende der 70iger Jahre)

Obwohl sich die einzelnen Geräte in ihrem Aufbau unterscheiden, lässt sich ein einheitlicher Ablauf bei der Demontage feststellen. Als erstes wird nach Abbau der Rückwand die Bildröhre belüftet. Aus Gründen des Arbeitsschutzes sind die Bildröhren zur Vermeidung der Implosionsgefahr im ersten möglichen Arbeitsschritt zu belüften. Weiterhin ist zu beachten, dass nur belüftete Bildröhren zwischengelagert werden dürfen. Die Bildröhrenbelüftung erfolgt i.d.R. entweder durch Abschlagen des Hochspannungsanschlusses an der Bildröhre oder durch das Einschlagen eines Schraubendrehers in den Anodenanschluss. Im nächsten Arbeitsschritt folgt die Grobdemontage. Hier werden die Platinen, die Elektronenkanone, die Ablenkspule, die Bildröhre, die Bedieneinheit und die Lautsprecher ausgebaut, die Kabel entfernt sowie das Restgehäuse zerlegt. Sind die Leiterplatten oder andere Bauteile mit Schadstoffen belastet, folgt die Feindemontage. Hier werden schadstoffhaltige Bauteile entfernt, wie z.B. PCB – Kondensatoren. Bei den ausgebauten Bildröhren wird ebenfalls eine Schadstoffreinigung durchgeführt. Die einzelnen Schritte des Demontageablaufes für Bildschirmgeräte werden noch einmal in der nachfolgenden Abbildung zusammengefasst dargestellt:

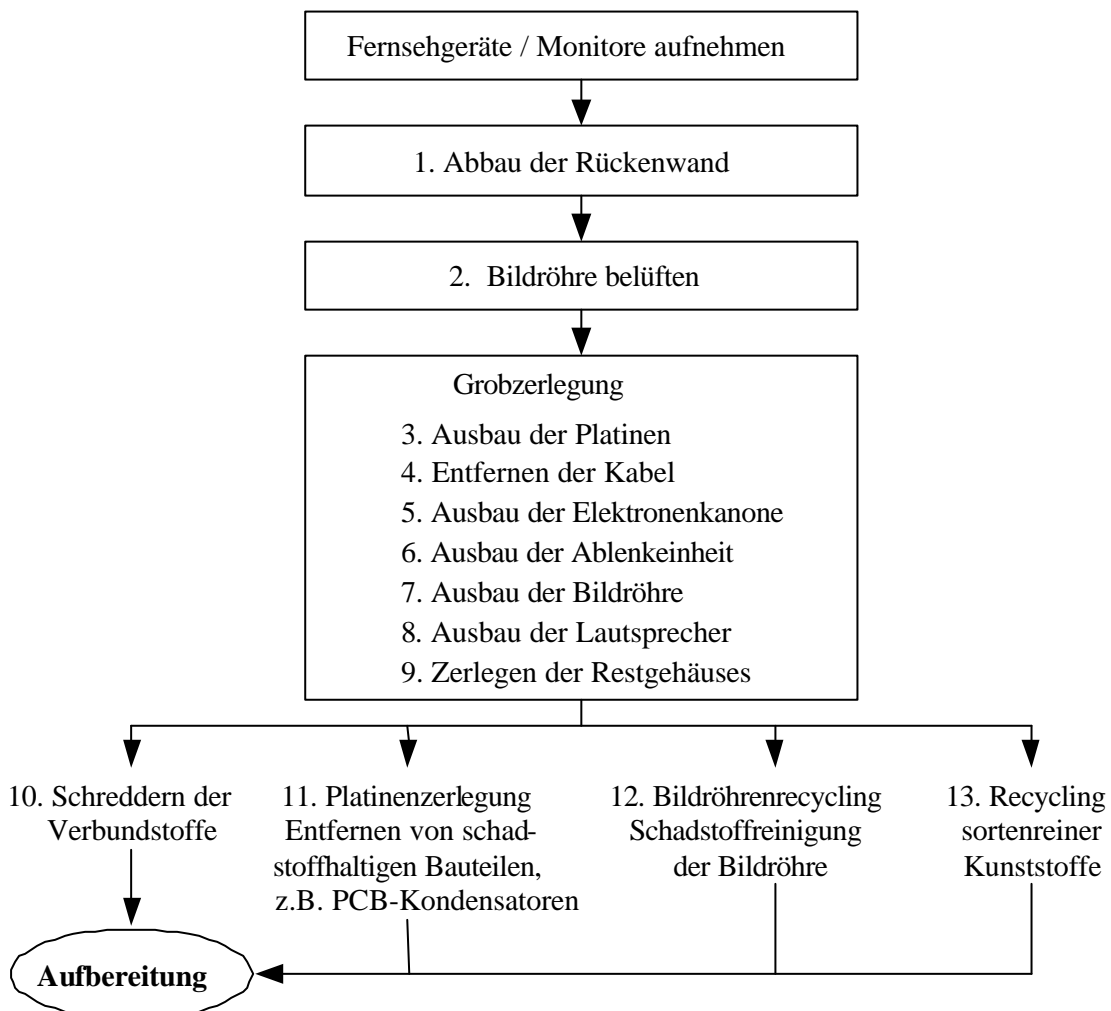


Abb. 2.5: Manueller Demontageablauf für Bildschirmgeräte

In der Abbildung 2.6 sind die durchschnittlichen Fraktionsverteilungen der manuellen Demontage, bezogen auf die untersuchten Bildschirmgerätetypen, gegenübergestellt:

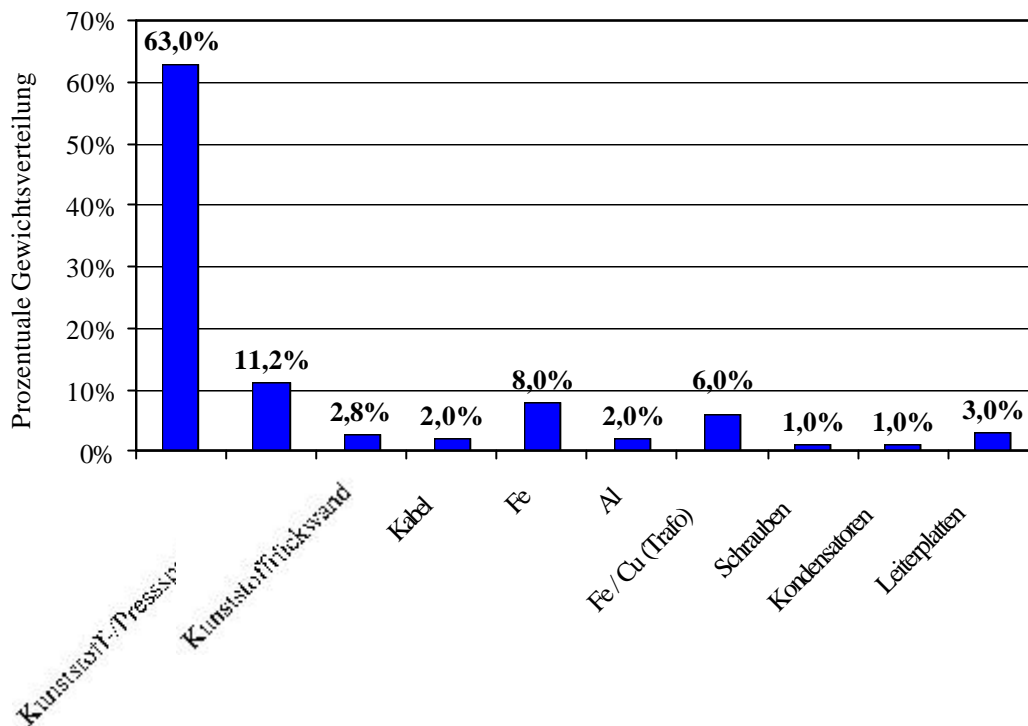


Abb. 2.6: Durchschnittliche Fraktionsverteilung von Bildschirmgeräten [98]

Die durchschnittliche Demontagezeit der Bildschirmgeräte bei der manuellen Zerlegung beläuft sich auf ca. 7 bis 8 Minuten bei modernen Geräten und 10 bis 11 Minuten bei 10 bis 15 Jahre alten Geräten. Diese Zeit gibt lediglich die Zeit für den produktiven Zerlegeprozess wieder. Nebenzeiten für den innerbetrieblichen Transport der Geräte, die Bestückung der Werkbänke, den Abtransport der demontierten Fraktionen, kleinere Pausen (z.B. für Rauchen, Besuch der Toilette sowie sonstige Totzeiten) sind hier nicht enthalten.

Nach der reinen Zerlegung der Bildschirmgeräte erfolgt das Recyceln der Bildröhren. Probleme beim Bildröhrenrecycling entstehen durch die verschiedenen Glassorten (bei Farbbildröhren), durch die giftige Leuchtschicht und durch die Beschichtungen des Glases mit Blei und Barium. Hauptbestandteil des Bildröhrenglases von Farbbildschirmgeräten ist mit 73% das Schirmglas, welches aus Barium/Strontium/Zirkon-Silicatglas besteht und die in der Röhre produzierte Röntgenstrahlung absorbiert. Der Konus und der Hals der Bildröhre, die 26% des Glasanteils ausmachen, bestehen aus Bleiglas. Schirm, Konus und Hals sind durch die Glasfritte (1%), ein bleihaltiges Glaslot (Glasemalle), verschweißt. Beschichtungen im Inneren, die eigentliche Leuchtschicht, die Gittersubstanzen für das Vakuum usw. bringen weitere chemische Verbindungen ins System und bereiten besondere Entsorgungsprobleme. Als Leuchtstoffe, die auf der Innenseite des Schirmglases aufgedampft sind, werden häufig Europium (roter Leuchtstoff), Cadmium / Cadmiumsulfid (grüner Leuchtstoff) und Bernstein (oranger Leuchtstoff) eingesetzt [95]. Farbbildröhren weisen im Inneren eine Maske auf, die jedem Elektronenstrahl einen Punkt der unterschiedlich farbigen Leuchtstoffe freigibt. Monochromgeräte haben diese Maske nicht.

Die schematische Darstellung einer Farbbildröhre ist in der folgenden Abbildung dargestellt:

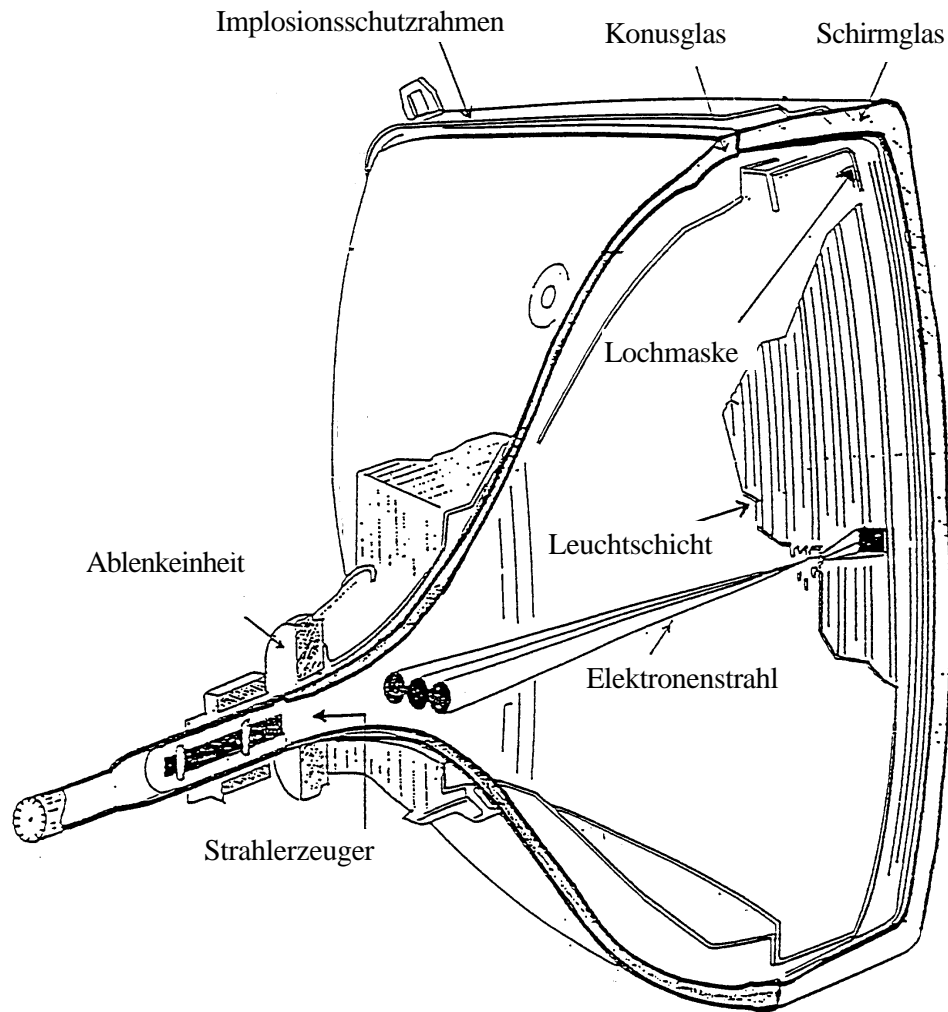


Abb. 2.7: Schematische Darstellung einer Farbbildröhre [99]

In Tabelle 2.1 ist die Zusammensetzung einer modernen Farbbildröhre dargestellt:

Schirmglas (ca. 13% Ba), beschichtet	63,20%
Konusglas (15% PbO, 4,5-6% Ba/St), beschichtet	23,80%
Metallteile (Maske, Spann- und Maskenrahmen)	12,10%
Strahlerzeugereinheit	0,44%
Glasfritte	0,43%
Beschichtungen und Leuchtstoffe	0,03%

Tab. 2.1: Zusammensetzung einer 63 cm - Farbbildröhre [95, 98]

Aufgabe des Recyclings von Bildröhren ist die rückstandsfreie Entfernung der Beschichtungen und Abtrennung der metallischen Bauteile. Darüber hinaus ist die Trennung der beiden Glassorten wünschenswert. Die derzeit in der Diskussion befindlichen verfahrenstechnischen Konzeptionen lassen sich nach der Abfolge der Verfahrensschritte und nach der Art der verwendeten Technologien klassifizieren [100]. Man kann grundsätzlich unterscheiden in

- A) Techniken, bei denen die Bildröhren zunächst getrennt werden: Das Trennen erfolgt entweder mittels Heizdraht (thermomechanisch absprengen) oder Säge (kaltmechanisch zersägen), durch Erhitzen der Bildröhre (thermisch ablösen) oder durch Aufbringen von Salpetersäure auf die Trennnaht der erwärmten Bildröhre;
- B) Verfahren, die eine Trennung nicht oder erst später im Prozessablauf vorsehen, wie z.B. das Schreddern oder Brechen kompletter Bildröhren.

Unabhängig von der Vorgehensweise bei der Trennung der Glasfraktionen können folgende Reinigungstechniken angewandt werden:

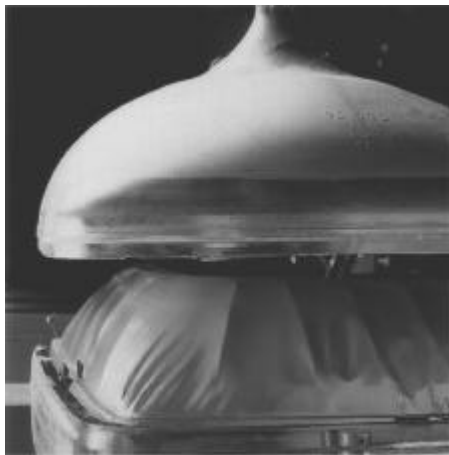
1. Mechanische Trockenverfahren mit Bürsten, Strahlmitteln oder trockene Mahlverfahren, jeweils mit Schadstoffrückhaltung aus der Abluft (Absaugen);



Abtrennung des Implosionsschutzrahmens



Trockenmechanisch-termische Trennung der Bildröhrenglasteile mittels Heizdraht



Abnahme des Konusglases



Absaugung der schadstoffhaltigen Bildröhren-Leuchtschicht

Abb. 2.8: Trockenmechanisch-thermisches Trennverfahren der Bildröhrenglasteile und anschließendem Absaugen der Leuchtstoffe mit einer Bürste

2. Chemische Nassverfahren, teilweise mit Ultraschall-Unterstützung;
3. Mechanische Nassverfahren (Waschen) ohne Chemikalienzusatz, Schadstoffrückgewinnung aus dem Prozesswasser [101].

### 3 Analyse der Schwachstellen in der realisierten Demontagezelle

#### 3.1 Beschreibung des Versuchsaufbaus

Eine flexibel automatisierte Demontagestation stellt das Grundelement einer Demontagezelle dar und wird „als eine Demontageanlage, die frei programmierbar auf Varianten- oder Produktwechsel sowie die jeweilige nutzungs- und alterungsbedingte Varianz der zu zerlegenden Produkte oder Baugruppen reagieren kann“, definiert [101, 102].

Für die Entwicklung der Teilsysteme und Konzeptionierung der automatisierten Demontagestation wurden zum Teil vorhandene Komponenten automatisierter Fertigungs- und Montagesysteme [103, 104] einbezogen. Jedoch müssen die hohen Anforderungen an die Flexibilität bzgl. der vielseitigen Produktpalette und der hohen Varianz der Produktzustände berücksichtigt und gelöst werden [105].

Die Erkennungsfähigkeit und Geschicklichkeit des Menschen ist möglichst weitgehend unter Orientierung an der Aufgabe der Demontage von Elektronikgeräten nachzuahmen. Bei der manuellen Demontage setzt der Mensch seine Arme und Hände für die Handhabungs- und Trennaufgaben sowie seine Augen für die Erkennungsaufgaben und die Prozessüberwachung ein. Bei der Nachahmung der menschlichen Vorgehensweise kommt es zu einer sachgerechten Aufgabenteilung [106, 107]. Das natürliche Szenario, auf dem aufzusetzen ist, ist wegen der Imitation der menschlichen Flexibilität ein Szenario von einem Demontageroboter und einem Handhabungsroboter, die jeweils über ein Greiferwechselsystem zugängliche Demontagewerkzeuge zum Lösen von Verbindungselementen und Greifer zum Handhaben der gelösten Bauteile aufnehmen. Auf einem Demontagetisch mit Dreh- und Zentriereinrichtung wird das zu demontierende Gerät fixiert. Stetigfördererelemente übernehmen den Materialfluss innerhalb der Zelle. Hier ist sowohl eine geeignete Zuführung der Geräte als auch ein Abtransport der demontierten Bauteile erforderlich.

Die Prozessüberwachung ist für die automatisierte Demontage von zentraler Bedeutung. Um eine ausreichende Flexibilität und Sicherheit bei den vielfältigen Einsatzfällen und alterungsbedingten Zustandsvarianzen zu gewährleisten, ist der Einsatz eines Bildverarbeitungssystems notwendig, welches Informationen über die zeitnahen Produkt- und Prozesszustände liefert [108]. Die Kamera wurde robotergeführt integriert, um so eine Ansteuerung definierter Aufnahmepunkte (Schraubenköpfe, Kabelstränge) im Raum zu ermöglichen und relevante Daten in gezielten Aufnahmen bei reduziertem Bildausschnitt zu erheben [78]. Diese Daten bilden die Grundlage für die von einem Leitreechner ermittelten aktuellen Steuersignale für den Demontagevorgang. Der Leitreechner verknüpft den Materialfluss mit dem Informationsfluss und stellt das Bindeglied zwischen Organisation und Demontage dar [109].

Bei der hier entwickelten Zelle soll eine Demontage von Bildschirmgeräten sämtlicher Hersteller und Typen ermöglicht werden. Grundlage für die Steuerung der Automatisierungskomponenten bildet eine Datenbank, in der für jedes Gerät "Demontageprogramme" abgelegt sind. In der Datenbank werden folgende Daten gespeichert:

- Anfahrpunkte der Roboter (werden mit Hilfe einer „Teach-Box“ eingeteacht),
  - die zu entnehmenden Bauteile sowie die Lage und Position der Greifflächen,
  - Art, Anzahl sowie Position und Lage der zu lösenden Verbindungstechniken,
  - Werkzeug- und Greiferauswahl mit entsprechender Demontagestrategie.
-



Abbildung 3.1 zeigt das Layout der Demontagezelle bestehend aus Demontage- und Handhabungsroboter, Fördertechnik sowie einem Demontagetisch mit Dreh- und Zentriereinrichtung:

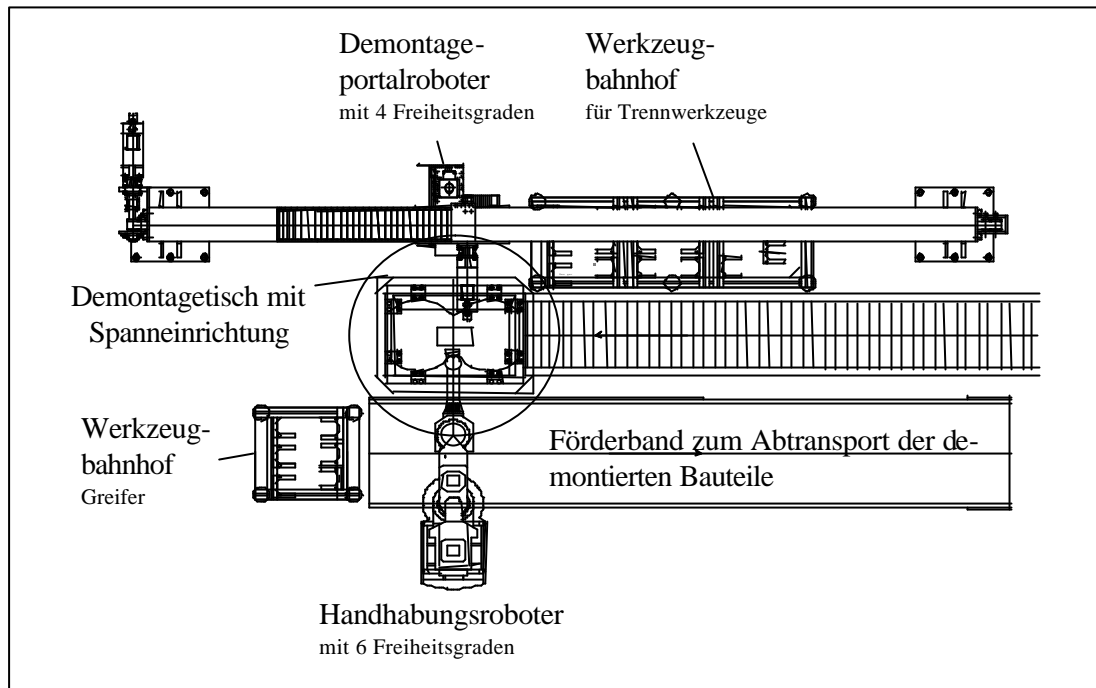


Abb. 3.1: Layout der vollautomatisierten Demontagezelle [28]

### 3.2 Produktanalyse von Bildschirmgeräten

Für die Analyse und Bewertung der Schwachstellen in der Demontagezelle ist eine Auswahl charakteristischer Bildschirmgerätetypen notwendig. Zur Klassifizierung der Produkte und Analyse der Produktzustände zurückgeführter Bildschirmaltgeräte wurden in einer Studie von März bis Juni 1998 im Zerlegezentrum der Firma Brahl GmbH in Berlin unterschiedliche Bildschirmgerätetypen verschiedener Baujahre zerlegt und hinsichtlich Alter, Verbindungsarten, Aufbau, Bauteilstruktur und Produktzuständen untersucht. Für diese Studie wurden 769 Bildschirmgeräte in Baugruppen demontiert und anschließend die Baugruppen weiter in Einzelteile zerlegt. Optisch einwandfreie Geräte wurden zunächst auf Funktionsfähigkeit geprüft. Vor der Demontage wurden das Alter, der Gerätetyp und das Gerätegewicht dokumentiert. Während der Demontage wurden der Zeitbedarf je demontiertes Bauteil und dessen Gewicht aufgenommen. Parallel wurden die Verbindungsarten und der Zeitbedarf zum Trennen der Verbindungen ermittelt. Zusammenfassend wurden nach der Gerätedemontage die Gesamtdemontagezeit sowie die Anzahl Verbindungen je Verbindungsart und deren Gesamttrennzeit ermittelt sowie der Aufbau und Produktzustand beschrieben. Ergebnis dieser Untersuchung ist eine grobe Klassifizierung der Fernsehgeräte in Gruppen entsprechend ihres Aufbaus und den Verbindungstechniken, die Ermittlung einer wirtschaftlich sinnvollen Demontagetiefe sowie der Analyse der zu lösenden Bauteile und ihrer Verbindungselemente.

Erste Untersuchungen zeigten, dass bei Bildschirmgeräten gleichen Baujahres ein ähnlicher Aufbau und gleiche Verbindungsarten vorliegen, so dass eine Gruppierung unabhängig vom Hersteller durch das Baujahr der Bildschirmgeräte bestimmt wird (siehe Anhang A). Mit diesen Kriterien können Bildschirmgeräte wie folgt grob klassifiziert werden:

Bauteil	Verbindungsart und Bauteilstruktur je Baujahr					
	1970	1975	1980	1985	1990	1995/2000
Rückwand	gesteckt und teilweise zusätzlich geschraubt			geschraubt, evtl. zusätzlich Schnappverbindungen		
Kabelverbindungen	einzelne Kabelstränge, gelötet			gebündelte Kabelstränge, gelötet, teilweise gesteckt		
Anodenanschlussplatine	auf Bildröhrenhals gesteckt					
Hauptplatine	aufklappbar über Bolzenverbindungen			eingehängt oder eingeschoben		
Netzteil	aufklappbar über Bolzenverbindungen			auf Hauptplatine integriert (Miniaturisierung elektrischer Bauteile)		
Hochspannungstrafo	eingehängt oder geschraubt			auf Hauptplatine integriert		
Ablenkeinheit	Federspannvorrichtung			Spannschraube, zusätzlich geklebt (vier Silikonpunkte)		
Bildröhre	vier Schraubenverbindungen					
Restgehäuse	Pressspangehäuse			Kunststoffgehäuse		

Tab. 3.1: Kriterien zur Einteilung von Bildschirmgeräten [28]

Die Untersuchung zeigt, dass sich Bildschirmgeräte von Baujahr 1970 bis 2000 hinsichtlich Aufbaustruktur und Verbindungsarten in zwei Hauptgruppen einteilen lassen:

1. Hauptgruppe: Bildschirmgeräte bis Baujahr 1984/85
2. Hauptgruppe: Bildschirmgeräte ab Baujahr 1984/85

Hinsichtlich der ersten Hauptgruppe lassen sich Bildschirmgerätetypen mit geschraubter oder gesteckter Rückwand, unterschiedlichen Bolzenverbindungen sowie geschraubtem oder eingehängtem Hochspannungstransformator unterscheiden. Als Verbindungstechniken kommen Schrauben, Bolzenverbindungen und Federspannvorrichtungen für die Ablenkeinheit zum Einsatz. Die Kabelverbindungen in den Geräten werden nicht gebündelt.

In der zweiten Hauptgruppe werden die Unterschiede durch die zunehmende Miniaturisierung elektronischer Baueile deutlich. So sind auf den kleineren Hauptplatinen bei den modernen Bildschirmgeräten das Netzteil und der Hochspannungstransformator integriert. Weiterhin lassen sich Unterschiede hinsichtlich der Verbindungstechniken finden. Bolzenverbindungen kommen nicht mehr zum Einsatz, die Hauptplatine wird eingeschoben oder eingehängt. Die Ablenkeinheit wird über eine Spannschraube befestigt, und einzelne Kabel sind gebündelt.

Ziel für beide Hauptgruppen bei der Entsorgung ist es, sowohl ökologisch als auch ökonomisch zu demontieren, d.h. Schadstoffe müssen entnommen, wieder-/ weiterverwendbare Bauteile sowie wieder-/ weiterverwertbare Wertstoffe (als Sekundärrohstoffe) möglichst sortenrein demontiert werden [112, 113]. Daher wurde im Rahmen der manuellen Demontageuntersuchungen bei der Brahl GmbH eine sinnvolle Demontagetiefe ermittelt. Das nachfolgende Diagramm zeigt die Ergebnisse der manuellen Demontageuntersuchungen:

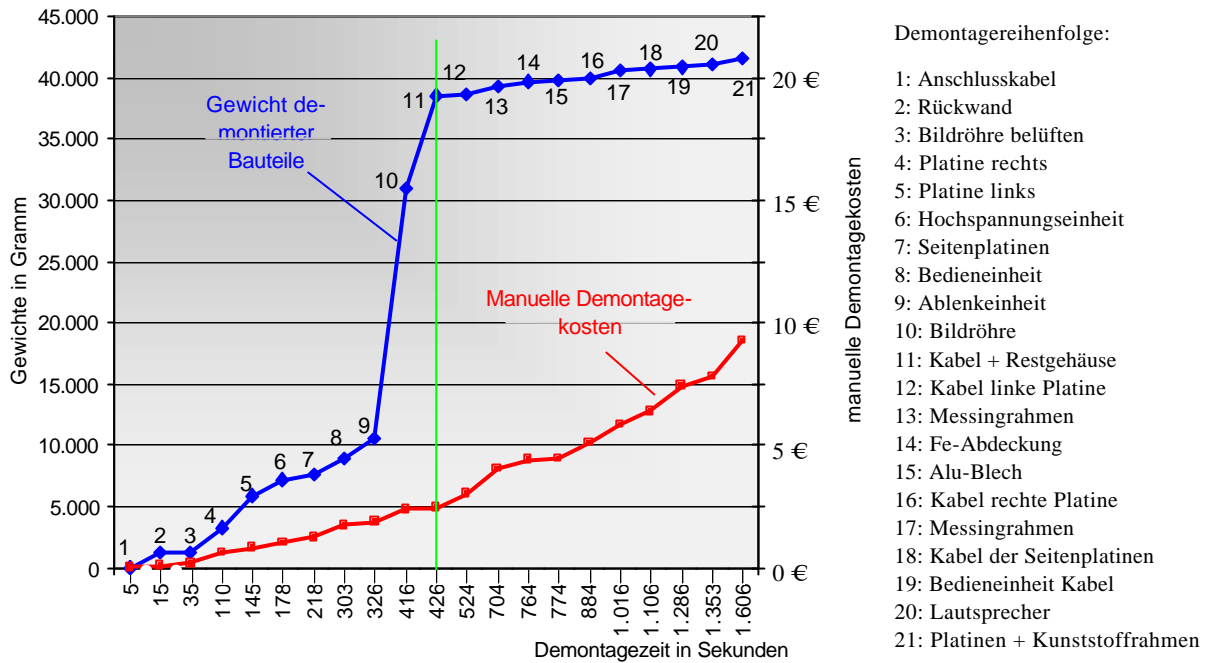


Abb. 3.2: Gewicht - Kosten - Zeit - Diagramm für den Philips „Siera“ 26588 K / 21 Z [28] (Anmerkung: X-Achse besitzt keine lineare Skalierung)

Das Diagramm zeigt, dass bei der Demontage des Philipsgerätes die Kurve des Gewicht-Zeit-Diagramms nach dem elften Demontageschritt einen deutlich flacheren Verlauf annimmt. In den ersten 426 Sekunden werden 38.560 g mit ca. 2,5 € Personalkosten demontiert, d.h. innerhalb von 26,5% der gesamten Demontagezeit und –kosten werden 92,8% des Gerätegewichts demontiert. Aus dem Verlauf der Kurve ergibt sich also eine Demontagetiefe bis zum Ausbau der Bildröhre. Eine weiterführende Demontage ist aufgrund des hohen Zeitaufwandes bei einer geringen Wertschöpfung nicht zu empfehlen. Eine Schadstoffentfrachtung ist allerdings auf jeden Fall auch bei hohem Zeitbedarf durchzuführen [28].

In der nachfolgenden Tabelle sind die zu demontierenden Fraktionen angegeben:

Fraktion	Gründe für die Demontage
Platinen	<ul style="list-style-type: none"> <li>- hoher Anteil an Edelmetallen,</li> <li>- Schadstoffe wie die flammgeschützten Kunststoffe und sonst. Schadstoffe (z.B. PCB-Kondensatoren, Quecksilberschalter) werden in konzentrierter Form erfasst,</li> <li>- Vermeidung der Kontamination der Sekundärrohstoffe.</li> </ul>
größere Kunststoffteile (Gehäuse) oder Metallbauteile (Halterungen)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- größere Bauteile können sauber separiert werden und als Sekundärrohstoffe in der Produktion eingesetzt werden,</li> <li>- Voraussetzung für das Recycling von Kunststoffbauteilen ist allerdings die genaue Kenntnis der chemischen Inhaltsstoffe, da ansonsten nur ein „downcycling“ (Parkbänke, Verkehrsinseln oder Blumenkübel) möglich ist.</li> </ul>
Bildröhre	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Die schadstoffhaltigen Leuchtmittel werden in nachfolgender Aufbereitung in konzentrierter Form erfasst,</li> <li>- das Bildröhrenglas kann als Sekundärrohstoff in der Produktion eingesetzt werden.</li> </ul>

Tab. 3.2: Kriterien für die Demontage von Bildschirmgeräten in Fraktionen

Zur Analyse der Trennverfahren wurden verschiedene Geräte von ausgewählten Herstellern manuell zerlegt und systematisch untersucht. Die Auswahl der Geräte und Hersteller wurde so getroffen, dass das Ergebnis der Teiluntersuchung auf die übergeordnete Gesamtheit übertragen werden kann. Die Analyse ergab genaue Daten über die zu lösenden Verbindungen sowie über das Bauteil- und Materialspektrum. Somit wurden erste Anforderungen an die einzusetzenden Werkzeuge und Greifer in der Demontage sowie die Art und Anzahl der Verbindungselemente, die Art der Greifflächen der einzelnen Bauteile und die benötigten Greifkräfte ermittelt (siehe Anhang B).

Die nachfolgende Abbildung 3.3 zeigt den prozentualen Anteil der zu lösenden Verbindungselemente und ihren prozentualen Zeitanteil für die manuelle Demontage einer Verbindung bezogen auf die untersuchten Bildschirmgeräte [115]:

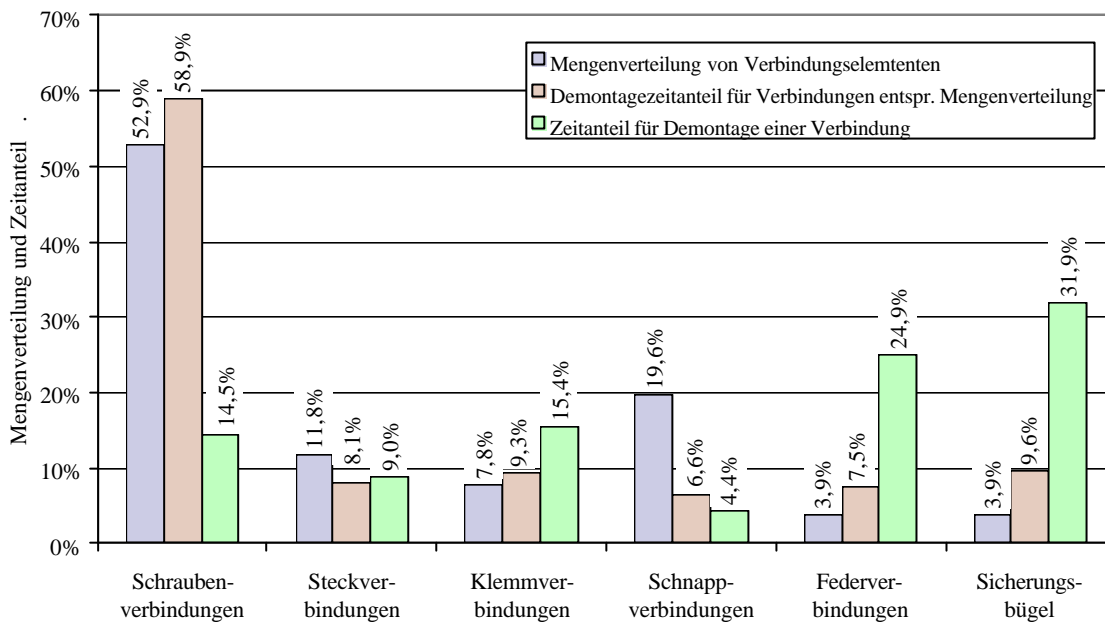


Abb. 3.3: Häufigkeitsverteilung der zu lösenden Verbindungstechniken und Lösezeit für eine Verbindung bei der manuellen Demontage von Bildschirmgeräten (Studie)

Abbildung 3.3 zeigt, dass der Anteil an Schraubenverbindungen mit 53% über der Hälfte aller Verbindungselemente bei der Demontage von Bildschirmgeräten entspricht. Dies wird weiter in der Verteilung des Zeitbedarfes für das Lösen aller Verbindungen bei der manuellen Demontage eines Bildschirmgerätes verdeutlicht. Annähernd 59% des gesamten Zeitbedarfes wird für das Trennen aller Verbindungen in einem Bildschirmgerät beim Lösen der Schraubenverbindungen benötigt. Weiterhin fällt auf, dass Federverbindungen sehr selten sind, allerdings für die Demontage einer Federverbindung die größte Zeit benötigt wird. Stecker-, Klemm- und Schnappverbindungen besitzen die kleinsten Demontagezeiten.

Die Anzahl der zu lösenden Verbindungstechniken und damit der Zeitbedarf für das Lösen der Verbindungen ist in erster Linie vom Baujahr der Bildschirmgeräte abhängig. Moderne Bildschirmgeräte besitzen keine Sicherheitsbügel oder Sicherheitsfedern, dagegen ist der Anteil an Schraubenverbindungen höher als bei älteren Geräten, so dass mit hoher Zunahme von Schraubenverbindungen auch der Zeitbedarf für das Lösen der Verbindungselemente gegenüber der Gesamtdemontagezeit steigt.

### 3.3 Anforderungen an die automatisierte Demontage

Aufbauend auf der Analyse des manuellen Demontageprozesses und der Produktanalyse ergeben sich die Randbedingungen zur Automatisierung der Demontage von Elektro- und Elektronikgeräten, die sich von denen in der Produktion unterscheiden. Dies führt zu neuen Anforderungen, die bei der Gestaltung entsprechender Demontagesysteme berücksichtigt werden müssen. Ein Demontagesystem wird von außen durch Arten und Mengen der zu demontierenden Altprodukte sowie durch wirtschaftliche und gesellschaftliche Faktoren beeinflusst [116].

<b>Einflussfaktoren auf den automatisierten Demontageprozess</b>			
<b>Recyclingprozess-bezogen</b>	<b>Demontageprozess-bezogen</b>	<b>Demontageobjekt-bezogen</b>	<b>Betriebskenn-größen</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Recyclingform               <ul style="list-style-type: none"> <li>- Verwendung</li> <li>- Verwertung</li> </ul> </li> <li>• Recycling-Behandlungsprozess               <ul style="list-style-type: none"> <li>- Aufarbeitung</li> <li>- Aufbereitung</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Trennprozess               <ul style="list-style-type: none"> <li>- Zerstörungsgrad</li> <li>- Kräfte/Momente</li> <li>- Trennrichtung</li> </ul> </li> <li>• Teileabfuhr               <ul style="list-style-type: none"> <li>- geordnet</li> <li>- ungeordnet</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Produktgestaltung               <ul style="list-style-type: none"> <li>- Verbindungs-technik</li> <li>- Material</li> <li>- Gewicht</li> <li>- Größe</li> <li>- Trennrichtung</li> <li>- Zugänglichkeit</li> </ul> </li> <li>• Produktzustand</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Losgröße</li> <li>• Stückzahl</li> <li>• Automatisierungsgrad</li> <li>• Auslastung</li> <li>• Produktpalette</li> <li>• Varianz des Produktzustandes</li> </ul>

Tab. 3.3: Einflussfaktoren auf den automatisierten Demontageprozess [78]

Bei der Automatisierung der Demontageprozesse müssen somit neben den festen Planungsgrößen wie Produktpalette und -gestaltung die variablen Einflussfaktoren wie Produktzustand und die daraus resultierende Demontagesstrategie Beachtung finden.

Zur Darstellung des Einsatzfeldes und zur Präzisierung der Aufgabenstellung in der Automatisierung der Demontage wurde bei 108 Entsorgungsbetrieben – welche rein manuell demontieren – sowie bei 29 Unterhaltungselektronikgeräteherstellern eine Erhebung in Form einer Fragebogenumfrage erstellt, so dass auf Basis der getroffenen Auswahl von Entsorgungsbetrieben und Herstellern die Ergebnisse der Teiluntersuchungen auf die übergeordnete Gesamtheit übertragen werden können [117]. Die Befragung erfolgte vom Juni bis September 1998 mit einer gesamten Rücklaufquote von 67 %. Der Fragebogen sowie die angeschriebenen Entsorgungsbetriebe und Hersteller sind im Anhang C aufgelistet.

Während der Umfrage wurde pro Entsorgungsbetrieb über einen Zeitraum von 3 Monaten eine durchschnittliche Rücklaufzahl von 94 Bildschirmgeräten pro Tag und eine durchschnittliche Variantenvielfalt von 2.894 Bildschirmgerätetypen ermittelt. Neben den Betriebs- und Produktdaten wurden vor allem die wesentlichen technischen, wirtschaftlichen und organisatorischen Automatisierungshemmnisse in der Demontage mit dem Fragebogen analysiert. In der Abbildung 3.4 sind die bei der Erhebung genannten wesentlichen Automatisierungshemmnisse als arithmetisches Mittel und Standardabweichung für die Demontage mit der Angabe der Anzahl Nennungen pro Kriterium zusammengefasst (entspr. Frage 1 des Fragebogens):

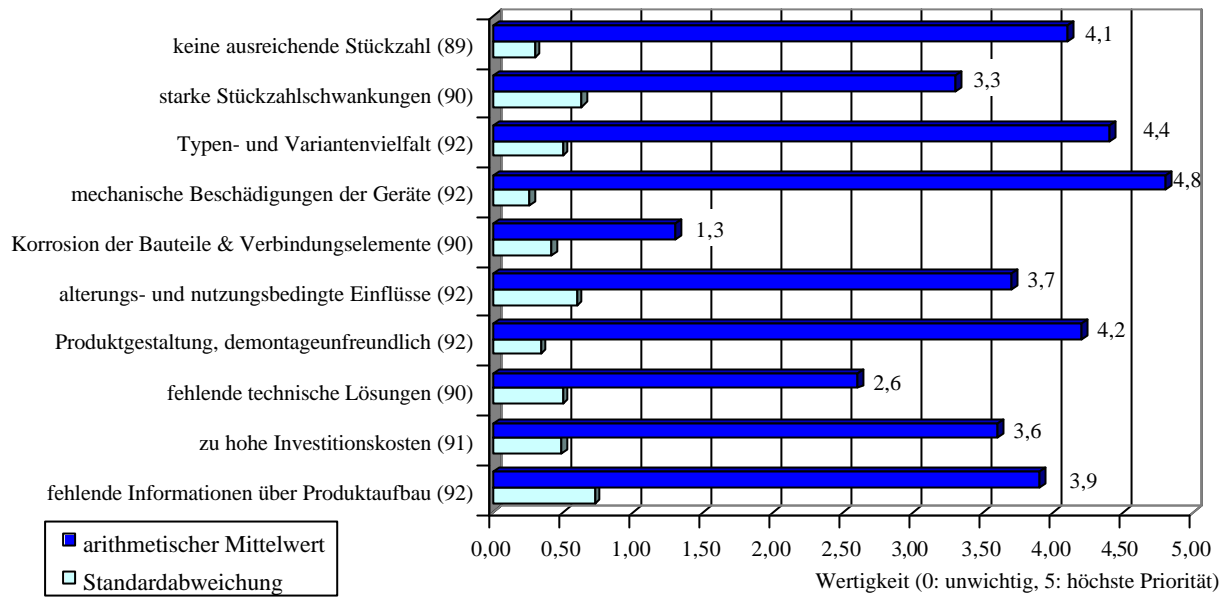


Abb. 3.4: Automatisierungshemmnisse bei der Demontage elektrischer Altgeräte (Umfrage)

Die am häufigsten genannten Automatisierungshemmnisse sind die Beschädigungen der Altgeräte, die demontageunfreundliche Produktgestaltung und die hohe Typen- und Variantenvielfalt. Dieses Problem wird gegenüber der Neuproduktion durch das Aufkommen unterschiedlicher Gerätegenerationen, kleiner Losgrößen, heterogener Geräterückführung sowie alterungs- und nutzungsbedingte Zustandsvarianz weiter vergrößert. Die Standardabweichungen der einzelnen Kriterien liegt zwischen 0,30 und 0,69 und zeigt aufgrund der geringen Abweichungen die einheitlichen Tendenzen in der Industrie. Die Auswertung der Umfrage deckt sich mit den Ergebnissen der Untersuchungen bei der Brahl GmbH.

Abbildung 3.5 zeigt die während der Untersuchung ermittelten Produktzustände:

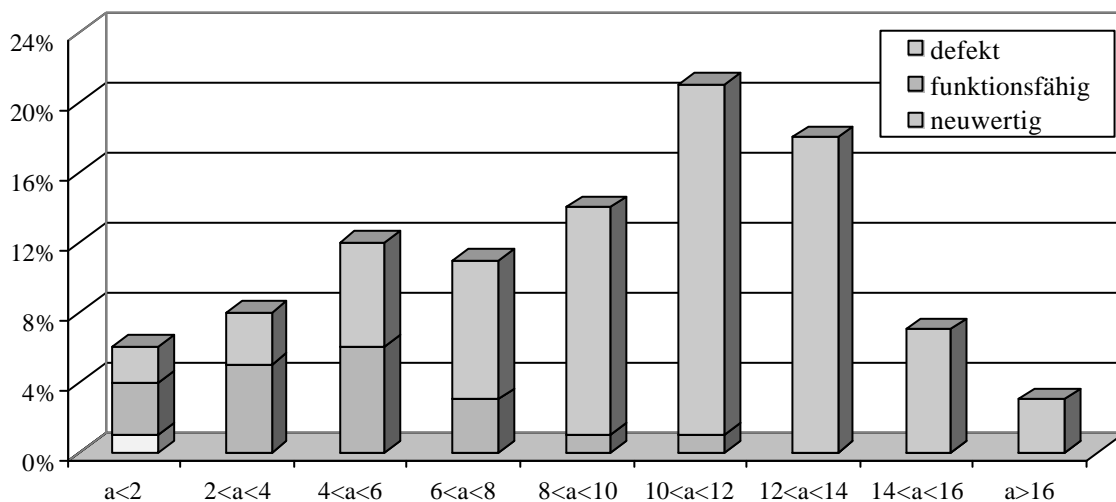


Abb. 3.5: Zustand und Alter des Bildschirmgeräterücklaufes (eigene Studie bei Brahl)

Insbesondere die alterungs- und nutzungsbedingten Varianzen stellen hohe Anforderungen an die Automatisierung der Demontage. Diese Varianzen sind durch Veränderungen des Gerätezustandes während des Lebenszyklusses begründet und resultieren beispielsweise aus Alterung, Korrosion, Veränderungen von Bauteilen und Verbindungen bei Reparaturen oder dem Ausschichten der Ge-

räte oder sind bedingt durch Transportschäden. In den Untersuchungen wurden daher Bildschirmgeräte manuell demontiert und die auftretenden Zustandsänderungen aufgenommen. Die Häufigkeit der auftretenden alterungs- und nutzungsbedingten Varianzen wurde zusammen mit 82 Entsorgungsbetrieben (76% Rücklaufquote bei den Entsorgungsbetrieben) innerhalb der viermonatigen Umfrage ermittelt. Parallel hierzu wurden die Zustandsänderungen bei Bildschirmgeräten während der manuellen Demontageuntersuchung bei der Brahl GmbH ermittelt. Die Ergebnisse sind in der nachfolgenden Tabelle dargestellt:

alterungs- und nutzungsbedingte Zustandsvarianzen	Umfrage	Brahl-Studie
- Positionsabweichungen von Verbindungen, Kabelsträngen oder Bauteilen z.B. infolge des robusten Handlings während der Sammlung:	6,3 %	4,1 %
- Fehlen eines Bauteils (Bauteil wurde vor Abgabe entnommen):	5,3 %	3,6 %
- Fehlen eines Verbindungselementes (insbesondere von Schrauben):	6,8 %	4,3 %
- Schraubentypen sind vertauscht / ausgetauscht:	2,1 %	1,7 %
- Schrauben sind überdreht oder oxidiert und lassen sich nicht lösen:	1,8 %	0,5 %
- Verbindungselemente sind festgerostet:	0,3 %	0,0 %
- Bauteile oder Verbindungen sind innerhalb des Gehäuses verklemmt:	4,4 %	2,3 %
- Rückwand ist beschädigt oder fehlt:	9,1 %	10,3 %
- Bildröhre ist beschädigt:	7,8 %	7,5 %
- Außenseite des Gehäuses ist beschädigt:	8,2 %	8,6 %
- Bedienungseinheit ist lose oder fehlt:	3,8 %	3,5 %
- Staub innerhalb des Gerätes (v.a. auf Leiterplatten und Bildröhren):	88,9 %	93,4 %

Tab. 3.4: Alterungs- und nutzungsbedingte Zustandsvarianzen (eigene Studie und Umfrage)

Aus den Automatisierungshemmnissen sowie der Produktanalyse lassen sich Anforderungen an die Automatisierung der Demontage ableiten, die sich vor allem aus der Heterogenität der Produkte und Produktzustände ergeben. Somit müssen insbesondere die folgenden Flexibilitätsanforderungen im Hinblick auf veränderte Arbeitsinhalte erfüllt werden:

⇒ *Produktflexibilität* der automatisierten Demontage ist die Fähigkeit der Anlage, sämtliche Geräte unterschiedlichen Typs und Herstellers in Losgröße 1 demontieren zu können. Problem ist die Heterogenität, Stückzahlschwankungen und Variantenvielfalt der Produkte bei geringeren Stückzahlen im Vergleich zur Fertigung. Weiterhin kann das Altprodukt im Gegensatz zur Herstellung neuer Produkte zum Zeitpunkt der Demontage nicht mehr beeinflusst werden, so dass der Demontageprozess von der konstruktiven Produktgestaltung abhängig ist, welche i.d.R. fertigungsrelevanten Kriterien entsprechen.

$$\text{Produktflexibilität} = 100\% - \frac{\text{Anzahl der Umrüstvorgänge je Gerätetypwechsel}}{\text{Anzahl der automatisiert demontierbaren Gerätetypen}}$$

⇒ *Produktzustandsflexibilität* ist die Fähigkeit der Anlage, Produkte mit unterschiedlichen alterungs- und nutzungsbedingten Einflüssen demontieren zu können. Je größer die Verschiedenartigkeit der zu demontierenden Geräte ist und je mehr diese gelöst werden, um so höher ist die Flexibilität der Anlage.

$$\text{Produktzustandsflexibilität} = \frac{\text{Anzahl der vollständig demontierten Geräte}}{\text{Anzahl der eingeschlossenen Geräte}}$$

Die Flexibilität wird erzielt durch die Kombination von flexiblen Anlageelementen sowie deren flexibler Steuerung [118]. In der Abbildung 3.6 sind die bei der Erhebung genannten Anforderungen an das Gesamtsystem als arithmetisches Mittel und die Standardabweichungen sowie die Anzahl Nennungen je Kriterium dargestellt (entspr. Frage 3 des Fragebogens):

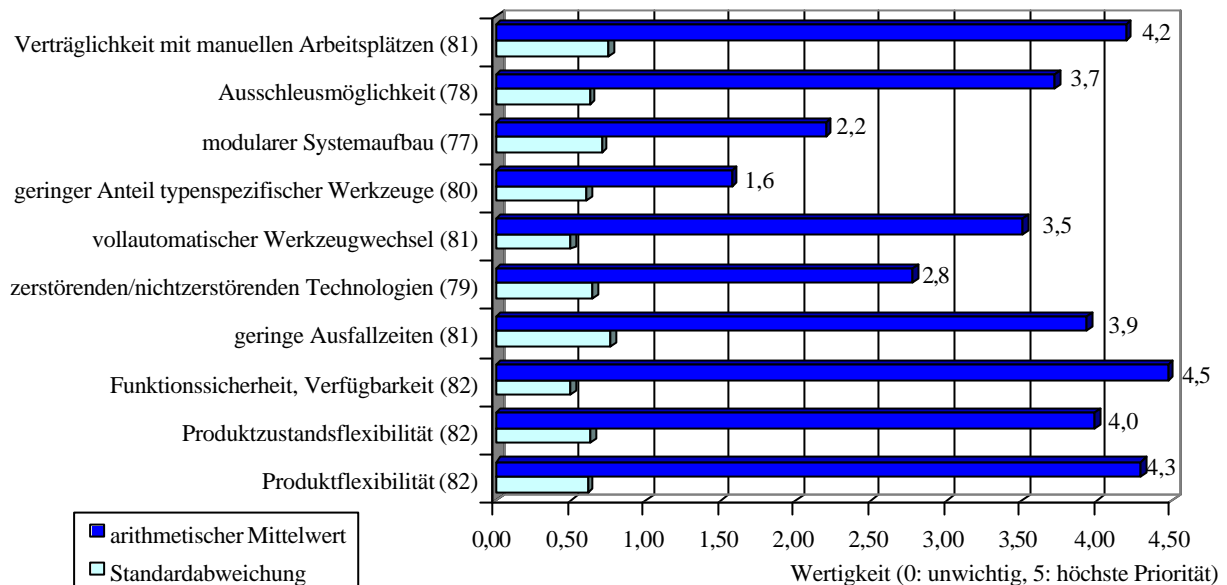


Abb. 3.6: Anforderungen an die Automatisierung der Demontage elektrischer Altgeräte

Die geringen Werte der Standardabweichungen zeigen die gemeinsamen Anforderungen der Industrie an die Automatisierung der Demontage. Auf Basis der Angabe der Entsorgungsbetriebe als potentiellen Nutzer in der Erhebung (Fragen 3 und 4) wurden die Anforderungen an die automatisierte Demontage abgeleitet:

<b>Anforderungen an das Gesamtsystem aus Anwendersicht</b>	
-	Produktflexibilität: mind. 98% der programmierten Geräte müssen ohne Umrüstaufwand automatisiert demontierbar sein.
-	Produktzustandsflexibilität: mind. 90% der Geräte müssen auch bei alterungs- und nutzungsbedingten Einflüssen automatisiert demontiert werden.
-	Eine Reproduzierbarkeit von mind. 99% muss gewährleistet werden.
-	Eine Funktionssicherheit und Verfügbarkeit von mind. 98% sowie eine Ausfallzeit für Wartung und Reparaturen von max. 2% muss sichergestellt sein.
-	Modularer Aufbau, geringer Aufwand zur Anpassung an wachsende Produktvielfalt.
-	Bereitstellung von zerstörenden und nichtzerstörenden Trenntechnologien, geringer Anteil typenspezifischer Werkzeuge, um Werkzeugwechsel zu minimieren.
-	Ausschleusmöglichkeit, um eine Systemblockierung zu verhindern.
-	Verträglichkeit mit vor- und nachgelagerten manuellen Arbeitsplätzen.
-	Einhaltung der gesetzlichen Arbeitsschutzanforderungen.
-	<i>Wirtschaftlichkeit</i> : Die Amortisationszeit beschreibt die wirtschaftliche Rückflussdauer und muss unter 4 Jahre betragen.

Aus den ermittelten Anforderungen lässt sich erkennen, dass die höchste Priorität auf eine maximale Produkt- und Produktzustandsflexibilität mit einer hohen Funktionssicherheit gelegt wird. Weiterhin muss die automatisierte Anlage eine hohe Verfügbarkeit, geringe Ausfallzeiten und eine übliche Amortisationszeit von maximal 4 Jahren besitzen, um so eine bessere Wirtschaftlichkeit gegenüber der manuellen Demontage unter Berücksichtigung aller Arbeitsschutzanforderungen zu erzielen.



### 3.4 Ermittlung von Schwachstellen

Für die Ermittlung der Schwachstellen wurden aus den zwei Hauptgruppen, welche Bildschirmgeräte nach Abschnitt 3.2 (Tab. 3.2, Seite 18) in

1. Bildschirmgeräte bis Baujahr 1984/85 mit geschraubter und gesteckter Rückwand, unterschiedlichen Bolzenverbindungen sowie geschraubtem und eingehängtem Hochspannungstrafo sowie
2. Bildschirmgeräte ab Baujahr 1984/85, welche aufgrund der zunehmenden Miniaturisierung kleinere, eingehängte Hauptplatinen mit integriertem Netzteil und Hochspannungstrafo und gebündelten Kabelsträngen

einteilen, je zwei Bildschirmgeräte ausgewählt. Aus der 1. Hauptgruppe wurden die zwei Fernsehgerätetypen Philips "Siera" 26C 768 von 1977 und Beovision 4000 3901 TV von Bang & Olufsen aus dem Jahr 1983 ausgewählt. Aus der zweiten Hauptgruppe wurden der Sharp DV 6301-S von 1997 mit geschraubter Rückwand und eingehängter Hauptplatine sowie das RFT-Gerät SIESTA TV 63-102 aus dem Jahr 1991 mit eingeschobener Hauptplatine ausgewählt.

Die Pilotanlage zur flexiblen automatisierten Bildschirmgerätedemontage wurde im Rahmen von intensiven Versuchen mit einer effektiven Roboterbetriebszeit von 431 Stunden zur Demontage von Bildschirmgeräten von Bang & Olufsen, Philips, RFT und Sharp untersucht. Die nachfolgende Tabelle 3.5 soll die wichtigsten Angaben über die in den Versuchsreihen demontierten Bildschirmgeräte aufzeigen:

Hersteller	Philips	Bang & Olufsen	RFT	Sharp
Typenbezeichnung	„Siera“ 26 C 768	Beovision 4000 3901 TV	SIESTA TV 63-102	DV 6301 - S
Baujahr	1977	1983	1991	1997
Größe (B x H x T) in mm	750 x 510 x 460	695 x 490 x 460	640 x 510 x 430	590 x 530 x 430
Gewicht in g	38.560 g	37.860 g	26.980 g	26.060 g

Tab. 3.5: Angaben über die demontierten Bildschirmgeräte

Die Zerlegung der Bildschirmgeräte erfolgt in die einzelnen Baugruppen, wie z.B. Rückwand, Hochspannungsanschlussplatine, Hauptplatine, Netzteil, Hochspannungstransformator, Ablenkeinheit, Bedieneinheit, Bildröhre sowie Restgehäuse.

Um eine kritische Betrachtung dieser Entwicklungsstufe der automatisierten Demontagezelle vornehmen zu können, wurden mehrere Versuchsreihen durchgeführt. Das Hauptaugenmerk dieser Versuche lag dabei auf der prinzipiellen Realisierbarkeit der Automatisierung der Demontage, auf der Ermittlung der Demontagezeiten sowie der Analyse der Demontagestrategien und Werkzeuge zum Trennen von Verbindungen. Weiterhin war die Ermittlung der Produkt- und Produktzustandsflexibilität der Demontagezelle Bestandteil der Untersuchungen.

In der ersten Versuchsreihe wurden die Zeiten für die automatisierte Demontage der Bildschirmgeräte nach REFA ermittelt, analysiert und mit den Werten der manuellen Demontage verglichen. Insbesondere wurden Zeitpotenziale durch Optimierungen des Trennens von Schraubverbindungen aufgezeigt.

Während der Untersuchung der Flexibilität der Demontageanlage auf Transport-, Nutzungs- und Alterungseinflüsse wurden technische Probleme insbesondere für das Trennen von Schraubverbindungen ermittelt und die erhöhten Demontagezeiten aufgenommen.

### 3.4.1 Auswertung hinsichtlich Demontagezeit

In dieser Versuchsreihe wurden die Zeiten für die manuelle und vollautomatisierte Demontage der ausgewählten Bildschirmgeräte ermittelt. Die Zeitermittlung wurde unter Anwendung des REFA-Zeitaufnahmeverfahrens durchgeführt. Unter Zeitaufnahme wird das Ermitteln von Soll-Zeiten durch Messen und Auswerten von Ist-Zeiten bedingt durch Umgebungseinflüsse verstanden. Durch Auswertung der Erfassung der Bezugsmengen, der Einflussgrößen, der Leistungsgrade und der Ist-Zeiten für einzelne Ablaufabschnitte sowie der Beschreibung des Arbeitsverfahrens, der Arbeitsmethode und der Arbeitsbedingungen ergeben sich Soll-Zeiten für bestimmte Ablaufabschnitte. Das Ergebnis der Beobachtung des Ist-Ablaufes, d.h. die Ist-Zeiten sowie die Begleitumstände, unter denen die gemessenen Zeiten entstanden sind, wurden protokolliert [119].

Für die Ermittlung der Soll-Grundzeiten für die manuelle Demontage wurde je Prozessabschnitt ein Leistungsgrad ermittelt, da die menschliche Leistung einer großen Streuung unterliegt. Der Leistungsgrad drückt das Verhältnis von beeinflussbarer Ist- zur Bezugs-Mengenleistung aus. In der Praxis beurteilt man den Leistungsgrad als Ganzheit aus dem Zusammenspiel von Intensität und Wirksamkeit des Prozessablaufes. Die Verknüpfung der Ist-Zeiten mit den Leistungsgraden ergibt die Grundzeiten. Die Summe der Soll-Grundzeiten aller Prozessabschnitte für die Demontage eines Bildschirmgerätes wird bei der manuellen Demontage zusätzlich mit einem prozentualen Verteilzeit- und Erholungszeitfaktor beaufschlagt. Die Verteilzeit beinhaltet zusätzliche Zeiten zur planmäßigen Ausführung eines Ablaufes durch den Menschen, die sich z.B. aus Vorbereitung, Säubern, Wartung, Störungen oder persönlichen Bedürfnissen ergeben. Die Erholungszeit ist erforderlich, um eine Erholung des Arbeiters für eine konstante Demontageleistung zu gewährleisten [119]. Innerhalb eigener Untersuchungen in verschiedenen Zerlegebetrieben wurde ein Erholungszeitfaktor in Anlehnung an die Tarifverträgen von  $z_{er} = 5\%$  festgelegt. Der Verteilzeitfaktor wurde nach der REFA-Verteilzeitaufnahme mit  $z_v = 15\%$  ermittelt (vgl. [28]).

Bei Beginn und Ende der jeweiligen Messungen lag eine Auge-Hand-, während des Demontageprozesses eine Auge-Auge-Messung vor. Als Messmittel für die Ermittlung der manuellen Demontagezeiten kamen eine Stoppuhr, außerdem eine elektronische Waage, ein Bandmaß und eine Messlehre zum Einsatz. Die Werkzeuge befanden sich auf den Werkbänken, auf denen auch die Geräte demontiert wurden.

Die Prozesszeitermittlung für die automatische Demontage erfolgte durch einmalige Zeitermittlung und wurden an der entsprechend in Abschnitt 3.1 beschriebenen Demontagezelle durchgeführt. Die Prozesszeitermittlung wurde als Einzelzeitmessung durchgeführt. Eine nachträgliche Gesamtzeitmessung erfolgte nicht, weil die Systemzustände an den einzelnen Zeitmesspunkten eindeutig reproduzierbar sind und somit keine Messfehler entstehen. Da bei automatisierten Betriebsmitteln keine vom Menschen beeinflussbaren Tätigkeiten vorliegt, sind nur störungsbedingte Unterbrechungen zu berücksichtigen, die in der Berechnung durch den Faktor  $v_{aut}$  für die Verfügbarkeit der Demontagezelle bei der Bestimmung der Jahresarbeitszeit (s. Kap. 5.3) berücksichtigt werden. Somit liegt auch keine Leistungsstreuung bei der Demontagezelle vor, so dass sich ein Leistungsgrad von 100% ergibt [119]. Für die Zeitermittlung der automatisierten Demontage stand eine im Leitrechner integrierte Stoppuhr zur Verfügung.

Als Verfahren der Zeitmessung wurde sowohl bei der manuellen als auch bei der automatisierten Demontage das Fortschrittszeitverfahren gewählt, da man ein bereits demontiertes Gerät zur zusätzlichen Gesamtzeitmessung nicht noch einmal zerlegen kann. Da die Ablauffolgen, d.h. die Folge und

die Zahl der zu messenden Ablaufabschnitte, mit unregelmäßigen Wiederholungen einzelner Abschnittfolgen behaftet sind, wurde der Zeitaufnahmebogen Z1 und Z1E gewählt.

Für den Vergleich der Prozesszeiten der automatisierten Demontage mit den Zeiten der manuellen Demontage muss bei beiden Arbeitsverfahren eine gleiche Demontagetiefe zugrunde gelegt werden. Die Demontagetiefe bzw. -reihenfolge ist wie folgt festgelegt:

Schritt	Demontiertes Bauteil
1	Rückwand
2	Anschlussplatine am Bildröhrenhals
3	Bildröhre belüften
4	Hauptplatine und Netzteil (bei modernen Geräten ist Netzteil auf Hauptplatine)
5	Transformator (bei modernen Geräten ist dieser auf der Hauptplatine integriert)
6	Ablenkeinheit
7	Bildröhre
8	Bedieneinheit
9	Lautsprecher
10	Restgehäuse

Tab. 3.6: Demontagetiefe der manuellen und automatisierten Demontage

In der ersten Messreihe lagen bei den Bildschirmgeräten keine Zustandsvarianzen aufgrund von nutzungs- und alterungsbedingten Einflüssen vor. Elektro- und Elektronikaltgeräte ohne Zustandsabweichungen sind für die automatisierte Demontage als ideal zu betrachten, da hier der programmierte Demontageablauf ohne Programmkorrektur abgearbeitet wird. Diese Demontagezeiten bilden daher die Basiszeiten für die automatisierte Demontage von Bildschirmgeräten und werden mit den unterschiedlichen Demontagezeiten, die sich aus den weiteren Versuchen ergeben, verglichen. Die Zeitaufnahmebögen für die manuellen Demontageuntersuchungen finden sich im Anhang D.1, für die automatisierte Demontage im Anhang D.2.

In Abbildung 3.7 sind die Zeitverläufe für die automatisierte und manuelle Demontage der in Abschnitt 3.1 beschriebenen Entwicklungsstufe und die Zeiten für die manuelle Demontage der Fernsehgeräte Philips „Siera“ 26 C 768, Beovision 4000 3901 TV von Bang & Olufsen, das RFT-Gerät SIESTA TV 63-102 und den Sharp DV - 6301 S dargestellt. Die Demontagetiefe für die manuelle Demontage entspricht bei dem Vergleich der Demontagetiefe der automatisierten Demontage entsprechend der Tabelle 3.6. Die Abbildungen zeigen die Demontageprozesszeiten und ihre Verteilungen auf den Demontage- und Handhabungsroboter bei der Demontage der einzelnen Bildschirmgeräte. Dabei werden die Demontageprozesszeiten mit und ohne Stillstandszeiten dargestellt. Der waagerechte Verlauf einer Kurve gibt die „unproduktiven“ Stillstandszeiten der Roboter an, die durch das Drehen des Bildschirmgerätes oder durch das Arbeiten des gegenüberliegenden Roboters im gemeinsamen Arbeitsraum entstehen. Die Gesamtzeit für die Demontage eines Bildschirmgerätes (entspricht der X-Achse) ergibt sich aus der Summe der Prozess-, Sensor-, Handhabungs- und Wartezeiten.

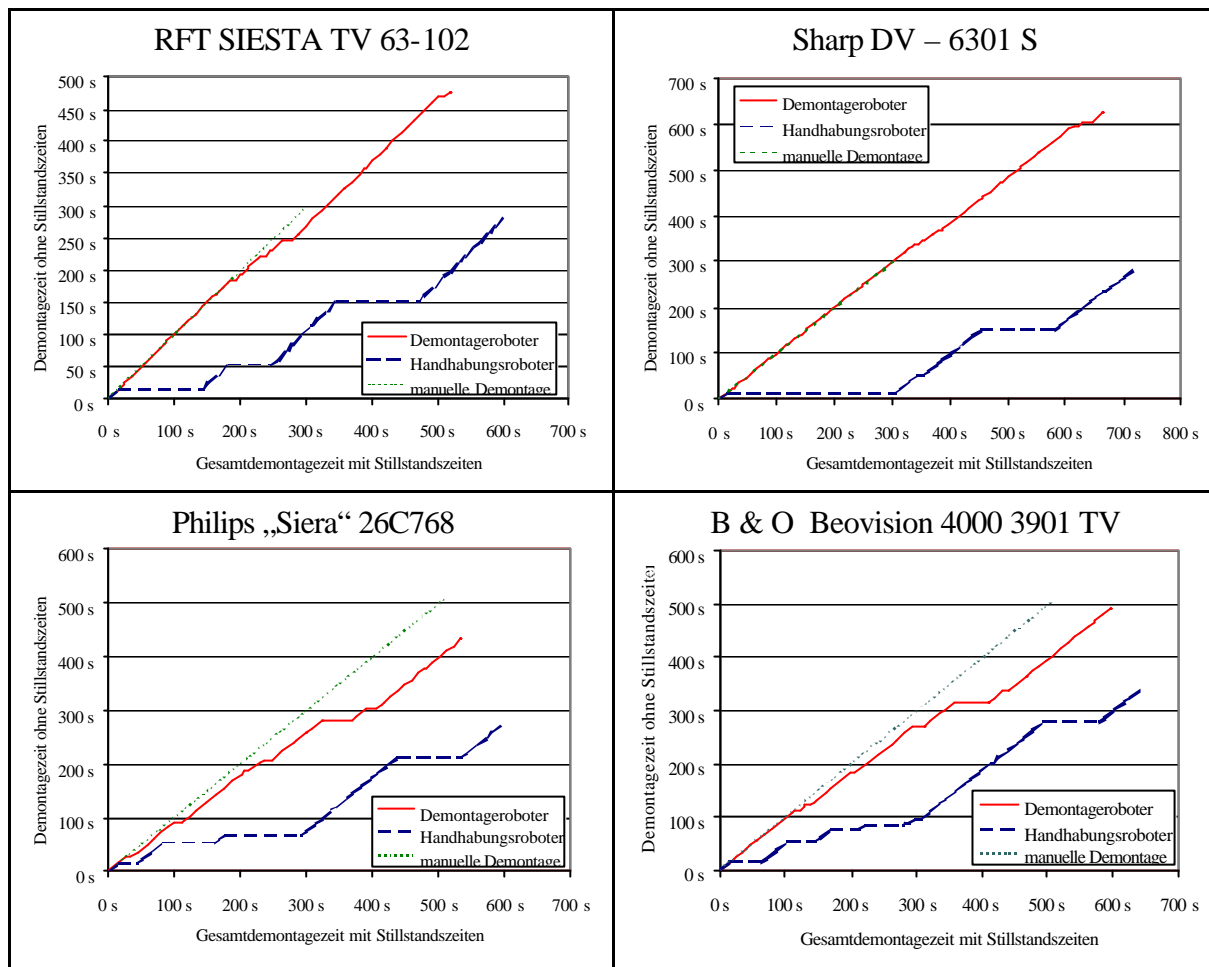


Abb. 3.7: Demontagezeit-Verteildigramm

Tabelle 3.7 stellt die gesamte Demontagezeit pro Einheit für die vier betrachteten Bildschirmgeräte für die manuelle und automatisierte Demontagezeit gegenüber. Dabei wurden jeweils 10 Geräte manuell demontiert, um so statistisch sichere Demontagezeiten mit geringen Streuwerten zu erhalten. In der automatisierten Demontagezelle wurden je drei Geräte demontiert mit der Aussage vernachlässigbar kleiner Prozesszeitdifferenzen aufgrund der Reproduzierbarkeit der automatisierten Demontageabläufe.

	Philips „Siera“ 26C768	B & O Beovision 4000 3901 TV	RFT SIESTA TV 63 - 102	Sharp DV - 6301 S
Automatisierte Demontage	9,68 min	10,93 min	10,03 min	11,95 min
Manuelle Demontage	8,52 min (7,10 min*)	8,46 min (7,05 min*)	4,34 min (3,62 min*)	5,16 min (4,30 min*)
Differenz automatisiert – manuell	+ 13,7 %	+ 29,2 %	+ 101,5 %	+ 131,6 %

Tab. 3.7: Gesamtprozesszeiten für die automatisierte und manuelle Demontage

\*: reine Grundzeit ohne Erholungszeit- und Verteilzeitfaktor

Der Vergleich der automatisierten zur manuellen Demontage zeigt deutlich, dass der Zeitbedarf für die automatisierte Demontage um 14% bis 30% bei den älteren Geräten und sogar um über 100% bei modernen Geräten höher liegt als bei der manuellen Demontage.

Betrachtet man das Demontagezeit-Verteildiagramm (Abb. 3.7) wird zum einen die hohen Prozesszeitdifferenzen ohne Berücksichtigung der Stillstandszeiten zwischen den beiden Roboter deutlich, welche durch die hohen Stillstandszeiten der Handhabungsroboter begründet sind. Auch sind größere Stillstandszeiten des Demontageroboters bei der Demontage der älteren Geräte zu erkennen. Hingegen liegen bei der Demontage der modernen Geräte annähernd keine Stillstandszeiten beim Demontageroboter, aber hohe Stillstandszeiten beim Handhabungsroboter vor. Das Demontagezeit-Verteildiagramm zeigt zum anderen, dass bei den älteren Geräten von Bang & Olufsen und Philips der Anteil der produktiven Prozesszeit ohne Stillstandszeiten unterhalb der manuellen Demontagezeiten liegt. Bei den modernen Geräten von Sharp und RFT liegen insbesondere die Prozesszeiten des Demontageroboters deutlich über den manuellen Zeiten.

Zur Reduzierung der Zeitverluste der automatisierten gegenüber der manuellen Demontage werden die Zeitbedarfe der automatisierten Demontage näher untersucht. Tabelle 3.8 zeigt die Aufteilung der Demontagezeit bezüglich der „unproduktiven“ Stillstandszeiten der Roboter sowie Nebenzeiten für Werkzeugwechsel, Sensorzeiten und der eigentlichen Prozesszeiten. Diese Aufteilung macht deutlich, in welchen Bereichen Optimierungen erfolgen müssen.

		Philips „Siera“ 26C768	B&O Beovision 4000 3901	RFT SIESTA TV 63-102	Sharp DV - 6301 S	Durch- schnittl. Zeiten
Demontage- roboter	Stillstandszeiten	102 s 19,1%	104 s 17,5%	43 s 8,3%	40 s 6,0%	12,5%
	Werkzeugwechselzeiten	105 s 19,7%	120 s 20,2%	90 s 17,3%	105 s 15,8%	18,2%
	Sensorzeiten	28 s 5,2%	27 s 4,5%	32 s 6,2%	31 s 4,7%	5,1%
	Trennprozesszeiten	299 s 56,0%	344 s 57,8%	354 s 68,2%	489 s 73,5%	64,2%
Handhabungs- roboter	Stillstandszeiten	308 s 53,0%	317 s 48,3%	320 s 53,2%	435 s 60,7%	54,0%
	Werkzeugwechselzeiten	75 s 12,9%	120 s 18,3%	75 s 12,5%	75 s 10,5%	13,5%
	Prozesszeiten	198 s 34,1%	219 s 33,4%	207 s 34,4%	207 s 28,9%	32,5%

Tab. 3.8: Aufteilung der Demontagezeiten bei der automatisierten Zerlegung

Tabelle 3.8 zeigt deutlich den hohen Zeitanteil der unproduktiven Stillstandszeiten des Handhabungsroboters während der automatisierten Demontage von durchschnittlich 54%, d.h. dass über die Hälfte der gesamten Demontagezeit der Handhabungsroboter nicht in den Demontageprozess eingreift. Lediglich ein Drittel des Zeitanteils wird für den eigentlichen Handhabungsprozess – Greifen, Entnehmen und Ablegen der gelösten Bauteile – benötigt. Die Zeiten für Werkzeugwechsel liegen beim Handhabungsroboter bei durchschnittlich 13,5%.

Der größte Anteil der Demontagezeit beim Demontageroboter entsteht durch den eigentlichen Trennprozess (64,2%). Die Stillstandszeiten des Demontageroboters mit 12,5% sowie die Werkzeugwechselzeiten mit 18,2% sind geringer als die Trennprozesszeiten, jedoch sind diese durch Pro-

zessoptimierung zu verringern. Die Sensorzeiten, die sich aus den Zeiten für die Bildaufnahme und den Rechenzeiten für die Auswertung zusammensetzen, sind mit 5,1% vernachlässigbar klein.

Da die Trennprozesse den größten Zeitanteil der Demontagezeit entsprechen, werden hier hohe Potenziale zur Reduzierung der Demontageprozesszeiten erwartet. Daher werden die Trennprozesszeiten für einzelne Verbindungen näher analysiert. Die nachfolgende Abbildung 3.8 zeigt die zeitliche Verteilung für das Trennen unterschiedlicher Verbindungselemente:

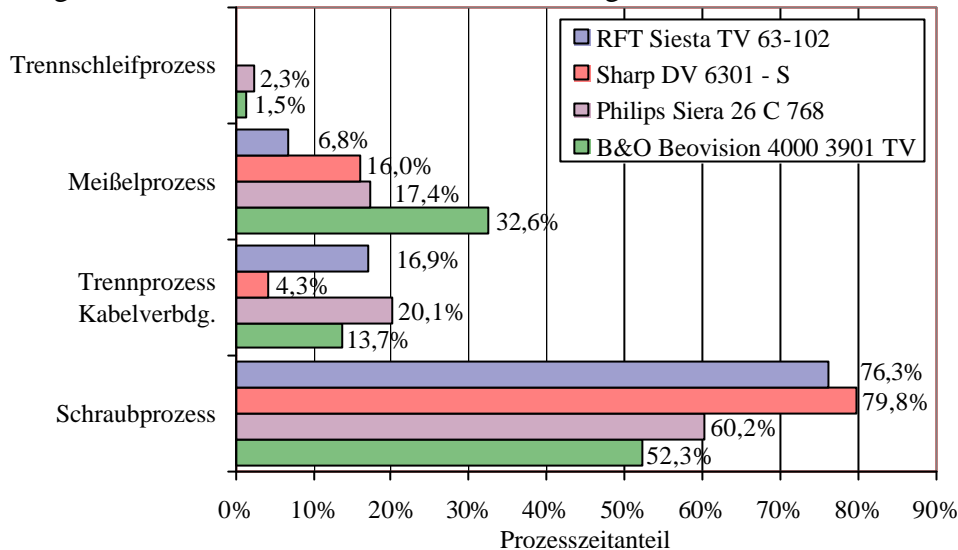


Abb. 3.8: Zeitliche Verteilung unterschiedlicher automatischer Trennprozesse (vgl. Abb 3.3)

Abbildung 3.8 zeigt, dass insbesondere bei den modernen Fernsehgeräten von Sharp und RFT der Schraubprozessanteil über 76% bezogen auf den produktiven Zeitbedarf aller Trennprozesse beträgt. Tabelle 3.9 zeigt eine nähere Betrachtung des Schraubprozesses:

Schraubprozess	Philips Siera 26 C 768	B&O Beovision 4000 3901	RFT Siesta TV 63-102	Sharp DV 6301 - S	Durchschnittswert
Anzahl Schraubenverbindungen	5	7	9	13	
Anteil Schraubprozess vom Gesamt-Demontageprozess	36,0%	32,3%	55,5%	62,6%	
Schraube anfahren	40 s	56 s	72 s	104 s	25,0 %
Sensorzeit Schraube	10 s	14 s	18 s	26 s	6,3 %
Schraube lösen	50 s	70 s	90 s	130 s	31,2 %
Schrauben ablegen	60 s	84 s	108 s	156 s	37,5 %
Gesamtzeitbedarf Schraubprozess	160 s	224 s	288 s	416 s	
Prozesszeit pro Schraubenverbindung	32 s	32 s	32 s	32 s	

Tab. 3.9: Zeitliche Verteilung des Schraubprozesses

Tabelle 3.9 macht deutlich, dass 75% der Schraubprozesszeit für das Anfahren der Roboterhandachse zur Schraubenverbindung und die Formschlusserstellung sowie für den Transport der gelösten Schraube zur Schraubenabziehvorrichtung und das Trennen der Schraube vom Schrauberbit an der Abziehvorrichtung benötigt wird. Diese Zeiten entstehen lediglich durch die Bewegungen der Roboterhand und beruhen v.a. auf dem hohen Zeitbedarf für die Formschlusserstellung zwischen

Schrauberbit und Schraubenkopf und für die Abgabe der gelösten Schraube an einer stationären Schraubenabziehvorrichtung. Weiterhin zeigt die Tabelle, dass für den Löse- und Ausdrehprozess ein Zeitbedarf von ca. 10 Sekunden pro Schraubenverbindung benötigt wird. Diese Lösezeit liegt im Vergleich zur manuellen Demontage, bei der eine Schraube in durchschnittlich 7 Sekunden ausgedreht wird, um über 30% höher und ist mit dem leistungsschwachen Pneumatikmotor des vorhandenen Schrauberwerkzeuges begründet.

Somit ergeben sich zur Reduzierung der Demontageprozesszeiten und dementsprechend zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit folgende Entwicklungsansätze:

- Durch die Entwicklung eines Trennwerkzeuges mit einer schnellen und sicheren Formschlusserstellung sowie einem flexiblen Entfernen der gelösten Schraube sind die Prozesszeiten für die Formschlusserstellung und für das Ablegen der gelösten Schraube zu minimieren.
- Durch ein leistungsstärkeres Trennwerkzeug sind die Trennzeiten zu reduzieren.
- Eine Minimierung der unwirtschaftlichen Stillstandszeiten erfolgt durch eine neu gestaltete Aufgabenverteilungen zwischen dem Demontage- und dem Handhabungsroboter mit dem Ziel, einzelne Trennprozessschritte parallel durch den Handhabungsroboter durchzuführen. Unter Berücksichtigung einer Kollisionsvermeidung (Aufteilung des Arbeitsraumes) wird somit der Handhabungsroboter gleichzeitig auch für das Lösen einiger Verbindungen oder Kabel eingesetzt.
- Die Reduzierung der Werkzeugwechselzeiten kann durch Einsatz eines Kompakt-Schwenkkopfes an der Handachse der Roboter erfolgen mit dem Ziel, zwei Werkzeuge gleichzeitig aufzunehmen und durch intelligenten Einsatz die Anzahl der Werkzeugwechsel zu minimieren.

### 3.4.2 Auswertung hinsichtlich Flexibilität

Um den Flexibilitätsanforderungen an die Steuerung des Demontageprozesses gerecht zu werden, wurde eine teilzentrale Steuerung aufgebaut, bei der der Leitreechner nur noch Koordinierungs- und Überwachungsaufgaben wahrnimmt. Die eigentliche Prozesssteuerung wird von untergeordneten Steuerungseinheiten durchgeführt. Somit werden rechenintensive Operationen, wie z.B. die Bildauswertung, in einzelne Steuerungsmodule übertragen. Die erforderlichen Daten werden dem Leitreechner über Kommunikationsschnittstellen übermittelt.

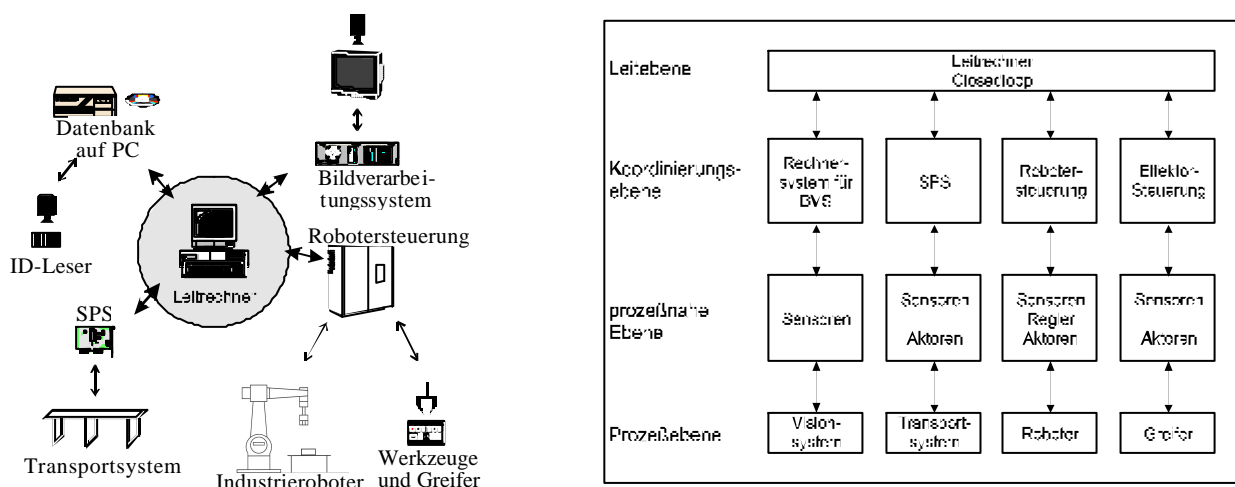


Abb. 3.9: Teilzentrale Steuerungsstruktur des Demontageystems

Die teildezentrale Automatisierungshierarchie ist aus mehreren Prozessebenen aufgebaut. In der prozessnahen Ebene sind Regler, Sensoren und Aktoren angeordnet, die Prozessdaten aufnehmen und entsprechend den Teilprozess regeln und ausführen. Innerhalb der Koordinierungsebene wird die prozessnahe Ebene koordiniert und überwacht. Hier werden Automatisierungskomponenten wie speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS) oder Prozessoren eingesetzt, die neben der Verwaltung, Steuerung und Regelung von Teilprozessen die Kommunikation zwischen Leitebene und der prozessnahen Ebene ermöglichen. Oberste Stufe in dieser Hierarchie ist die Leitebene, in der die Informationen der Koordinierungsebene gesammelt und die Prozess- und Anlagendaten aufbereitet und verwaltet werden. Die Leitebene ist für die Überwachung und Koordinierung des gesamten Demontageprozesses verantwortlich. Der Leitreechner arbeitet im Closed-loop Betrieb, d.h. der Leitreechner kann neben der reinen Prozessdatenverarbeitung aktiv in den Prozess eingreifen und somit den Demontageprozess beeinflussen, wie dies beispielsweise beim Auftreten von Zustandsunsicherheiten erfolgt.

Die Vorteile der teilzentralen Steuerung liegen in der höheren Prozessbereitschaft und der effizienteren Nutzung der bestehenden Systemressourcen auf der Prozessebene. Durch die definierten Schnittstellen der einzelnen Hierarchieebenen ist eine Erweiterung um neue Systemmodule infolge der offenen Systemstruktur möglich, ohne in das Gesamtsystem entscheidend einzugreifen [120]. Somit sind aufgrund des modularen Aufbaus und der flexiblen Erweiterbarkeit der Datenbank die Anforderungen an die Produktflexibilität gewährleistet.

Die Anforderungen an die Produktzustandsflexibilität werden durch die Zustandsvarianzen begründet. Da Objektmodelle, die auf dem Produktzustand zum Zeitpunkt der Montage basieren, nicht uneingeschränkt verwendet werden können oder nicht vollständig verfügbar sind, sind umfassende Sensorinformationen notwendig, um die für eine Demontage notwendigen Objektinformationen zu erhalten [121]. Das Bildverarbeitungssystem – für die Prozessüberwachung verantwortlich – übergibt an das Leitsystem Sensorsignale, so dass das Leitsystem bei Abweichungen online Programmkorrekturen durchführt.

Für die Untersuchung der Demontagezelle auf die Anforderung der Produktzustandsflexibilität waren mehrere Bildschirmgeräte einer Serie mit Zustandsvarianzen erforderlich, um mehrere Versuchsreihen mit einem Gerätetyp zu ermöglichen und quantifizierbare Aussagen zu erhalten. Da bei den Entsorgungsbetrieben keine Stückzahlen größer 3 einer Bildschirmgeräteserie zu erhalten waren, wurden an je drei Bildschirmgeräten der Firmen Bang & Olufsen, Philips, RFT und Sharp Transport-, Nutzungs- und Alterungseinflüsse nachgestellt. Daher wurden die Bildschirmgeräte so „manipuliert“, dass die in den manuellen Demontageuntersuchungen ermittelten Zustandsabweichungen auftraten. So wurden Schrauben ausgetauscht, Bauteile entfernt oder beschädigt oder durch die Übertragung von Transportfrequenzen über eine Laboranlage auf die zu entsorgenden Geräte Positionen von Bauteilen, Verbindungen oder Kabel verändert. Somit wurden folgende Zustandsänderungen nachgestellt:

- Lageabweichungen von Verbindungen, Kabel oder Bauteilen (Transportbelastungen)
  - Schraubentypen sind vertauscht (bei den Geräten von Bang & Olufsen und Philips wurden je 2 Schraubentypen ausgetauscht, beim RFT-Gerät 3 und beim Sharp 5 Schrauben),
  - fehlende Schraubenverbindungen (bei den Fernsehgeräten von Bang & Olufsen, Philips und RFT fehlten je 1 Schraube, beim Sharp 2 Schrauben),
  - Bauteile sind beschädigt (Transportschäden) oder fehlen,
  - Außenseite des Gehäuses ist beschädigt (Transport- und Handhabungsschäden),
  - Staub innerhalb des Gerätes (v.a. auf den Leiterplatten und der Bildröhre).
-



Die Untersuchungen bei der Brahl GmbH haben jedoch gezeigt, dass diese Varianzen auftreten, jedoch die Anzahl pro Gerät wesentlich geringer ist. Ziel dieser Versuchsreihe war die Ermittlung der Flexibilitätseigenschaften der Demontageanlage auf Zustandsänderungen infolge der Fehlerdedektion durch das Bildverarbeitungssystem. Abbildung 3.10 zeigt die Verfügbarkeit der Zelle in Bezug auf Zustandsvarianzen:

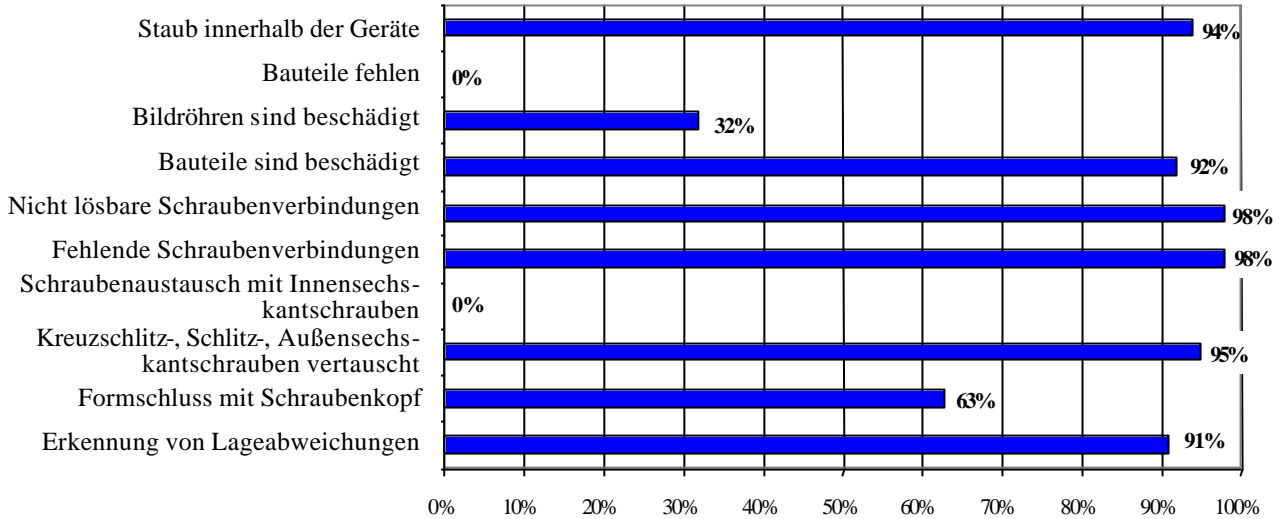


Abb. 3.10: Verfügbarkeit der Demontagezelle entsprechend der ersten Entwicklungsstufe

Abbildung 3.10 zeigt die bereits hohe Verfügbarkeit von über 90% bei einzelnen Varianzen.. Jedoch ist die Formschlusserstellungsrate zwischen den Wirkflächen der Schraube und den Wirkorganen des Schrauberbits mit 63% sehr gering, obwohl die Schraubenposition – auch bei Abweichungen – durch das Bildverarbeitungssystem erkannt wird. Diese geringe Formschlusserstellungsrate ist v. a. durch Positioniertoleranzen des Demontageroboters begründet. Ausreichend hingegen ist die Rüstflexibilität gegenüber unterschiedlicher Schraubenkopfgeometrien, da – wie die Erhebungen gezeigt haben – ein Austauschen der Schraubentypen durchschnittlich bei nur 2,1% aller Schraubenverbindungen mit abnehmender Tendenz bei neueren Gerätetypen auftreten und die geringfügige Erhöhung der Demontagezeit durch den Werkzeugwechsel kaum Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit besitzt.

Abbildung 3.11 zeigt die Auswirkungen von Zustandsvarianzen auf die Demontagezeit:

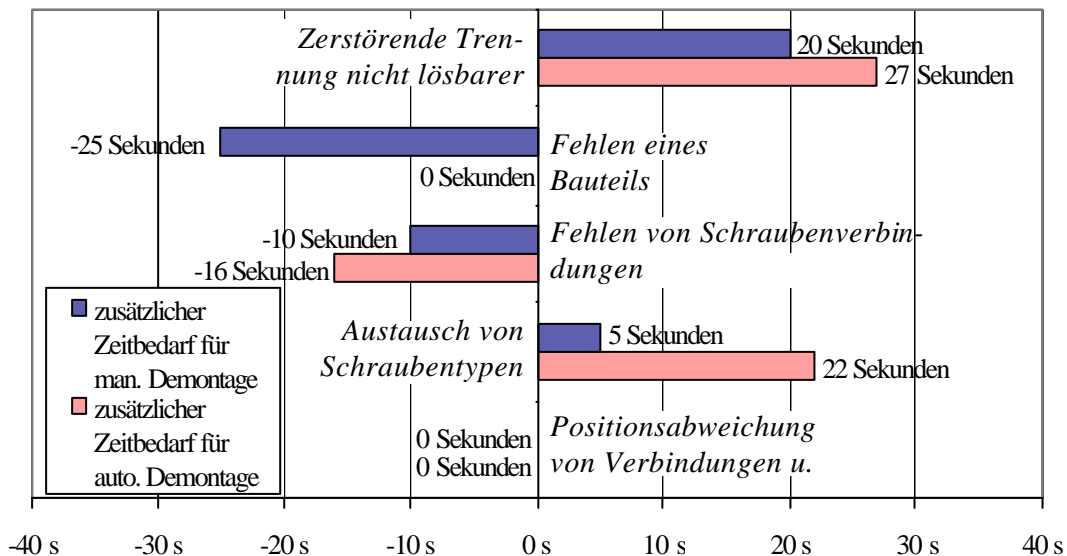


Abb. 3.11: Zusätzlicher Zeitbedarf je Zustandsänderung

Aus der Abbildung 3.11 geht hervor, dass bei der automatisierten wie auch bei der manuellen Demontage sich die Demontagezeiten infolge von Werkzeugwechsel bedingt durch unterschiedliche Schraubentypen oder nicht lösbarer Verbindungen erhöhen. Weiterhin wird deutlich, dass die Prozesszeiten für das Aufbohren von Schrauben bei der automatisierten Demontage aufgrund der starren Werkzeugführung geringer sind als bei der manuellen.

Keine Auswirkungen auf die Demontagezeiten besitzen Positionsabweichungen von Verbindungen und Kabeln. Sowohl bei der automatisierten als auch bei der manuellen Demontage erfolgt immer eine Überprüfung bzw. Ermittlung der Positionen der Kabel und Verbindungen. Die Ermittlung des Werkzeugansatzpunktes erfolgt bei der manuellen Demontage durch das Auge parallel zur Werkzeughandhabung. Bei der automatisierten Demontage erfolgt immer ein Abgleich der realen und vorgegebenen Koordinaten durch das Bildverarbeitungssystem. Somit sind immer Sensorzeiten und Zeiten für die Bildauswertung erforderlich, so dass bei Positionsabweichungen keine zusätzlichen Zeiten anstehen.

### 3.4.3 Ergebnisse der Schwachstellenanalyse

Unter all den Teilkomponenten des Robotersystems - Steuerung, Prozessüberwachung, Werkzeuge, Robotertechnik - liegt die geringste Flexibilität in Bezug auf die Zustandsvarianzen im kinematischen Aufbau der Anlagenkomponenten und in den Werkzeugen.

Die wesentlichen Versuchsergebnisse hinsichtlich Demontagezeit und Verfügbarkeit sind:

1. Hohe Demontagezeitpotenziale, Verbesserung der Flexibilität und der Sicherstellung reproduzierbarer Abläufe liegen v.a. beim Lösen von Schraubverbindungen vor:
  - Das Anfahren der Roboterhand zur Schraubenverbindung, die Formschlusserstellung sowie der Transport der gelösten Schraube zur Schraubenabziehvorrichtung und das Trennen der Schraube vom Schrauberbit entspricht 69% der Schraubprozesszeit.
  - Die durch die Roboterpositioniertoleranzen begründete unpräzise Wiederholbarkeit der Formschlusserstellung mit einer Rate von nur 63% trägt zur Unsicherheiten in der Reproduzierbarkeit des gesamten Demontageablaufes bei.
2. Eine Minimierung der unwirtschaftlichen Stillstandszeiten erfolgt durch paralleles Arbeiten der Roboter unter Berücksichtigung einer Kollisionsvermeidung.
3. Eine weitere Reduzierung der Demontagezeit wird durch eine Verringerung der Werkzeugwechsel durch Einsatz eines Kompakt-Schwenkkopfes erzielt.

Die Versuchsergebnisse machen insbesondere ein hohes Entwicklungspotential beim Trennprozess von Schraubenverbindungen deutlich:

- Durch den Einsatz eines Toleranzausgleichssystems am Schrauberkopf wird auch beim Auftreten eines Lateralversatzes ein Formschluss sichergestellt sowie die Formschlusserstellungszeiten reduziert.
  - Der Zeitbedarf für das Entfernen der gelösten Schraube vom Bit sowie für das Anfahren der nächsten Schraube (ergibt sich aus dem Entfernen der Schraube) ist durch ein flexibles, mobiles Entfernen der Schraube vom Schrauberbit zu reduzieren. Weiterhin sind die Trennzeiten durch ein leistungsstärkeres Trennwerkzeug zu verringern.
-

Grundsätzlich zeigt diese Versuchsreihe die prinzipielle Möglichkeit, dass die in zahlreichen manuellen und automatisierten Demontageuntersuchungen festgestellten Zustandsvarianzen mittels geeigneter Sensorik erkannt werden und im Leitsystem zu Online-Programmkorrekturen führen. Untersuchungen bezüglich der Redistribution zeigen, dass v.a. hier durch die sorglose Handhabung der Geräte und den ohne Ladungssicherung durchgeführten Transport die größten Beschädigungen z.B. am Gehäuse oder an der Bildröhre entstehen [122]. Daher muss zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit der Demontage eine Redistribution der zu demontierenden Geräte ohne Beschädigungen der Geräte gewährleistet werden, da Geräte, die bereits von außen deutlich beschädigt sind, so starke Zustandsabweichungen aufweisen, dass der Einsatz geeigneter Sensorik und Aktorik mit hohen Investitionskosten verbunden ist sowie die Demontagezeiten aufgrund der benötigten Sensor- und Rechenzeiten für die Auswertung der Sensordaten erheblich ansteigen würden, so dass die Wirtschaftlichkeit der automatisierten Demontage negativ beeinflusst wird.

Aus den zuvor genannten Voraussetzungen zur Schaffung einer industriell erforderlichen Flexibilität lässt sich deutlich erkennen, dass die Erhöhung der Flexibilität mit Kosten verbunden ist. Daher muss eine optimale Flexibilität gefunden werden, um kein unwirtschaftliches System für die Demontage von Elektronikgeräten zu erhalten. Wirtschaftliche Flexibilität heißt nicht, mit hohem Investitionsaufwand heute alle denkbaren Möglichkeiten für die Zukunft abzudecken. Wirtschaftliche Flexibilität ist die maßgeschneiderte Investition für die heutigen Bedürfnisse bei gleichzeitiger Erhaltung aller Optionen, mit entsprechenden Zusatzaufwendungen die Forderungen der Zukunft im Rahmen des Gesamtkonzepts dann zu erfüllen, wenn sie wirklich erforderlich erscheinen. Während des industriellen Einsatzes der Demontagezelle müssen weitere Erfahrungen gesammelt und festgestellt werden, inwiefern eine Erweiterung der Flexibilität unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten notwendig erscheint.

## 4 Entwicklungen zur Optimierung des Entschraubungsprozesses

### 4.1 Problemstellung und Stand der Entwicklung

Bei der Demontage führt die Vielfalt der Altprodukte und der zeitlich versetzte Rücklauf zu einem sehr breiten Spektrum von Produktvarianten, die zusätzlich durch nutzungsbedingte Einflüsse in unvorhersehbarer Weise verändert sein können. Dies führt zu Flexibilitätsanforderungen an die Werkzeuge, die über die Anforderungen in der Produktion hinausgehen. Das Lösen von Verbindungen basiert auf dem Übertragen von Kräften und Momenten zwischen dem Werkzeug und den jeweiligen Verbindungselementen.

Die am Markt verfügbaren elektrischen und pneumatischen Schraubsysteme wurden speziell für die Montage von Schraubenverbindungen entwickelt [123, 124]. Für die Entwicklung dieser Schraubwerkzeuge wurden die Wechselbeziehungen zwischen Vorspann- und Reibmomenten sowie zwischen Anzugs- und Setzmoment bestimmt [125, 126, 127]. Berücksichtigt wurde dabei der Einflussfaktor Schmierzustand [123, 128] und es wurden Regeln zur Auswahl des jeweils geeigneten Anzugsverfahrens aufgestellt [123, 129].

Die Schraubenmontage in der Fertigung erfolgt heutzutage überwiegend manuell unter Zuhilfenahme von manuell geführten Schraubsystemen. Eine Kombination von Schraubsystemen mit flexiblen Handhabungsgeräten zu flexiblen Schraubstationen findet bisher jedoch nicht statt [130-135]. Die Gründe hierfür liegen darin, dass

- konventionelle Teilezuführsysteme nur bedingt umrüstbar sind und die Umrüstung mit relativ großem Aufwand verbunden ist [136, 137],
- erkannte Positionierfehler durch verfügbare Fügehilfen nicht prozesskompatibel kompensiert werden, da herkömmliche Compliance-Elemente wie Remote Center Compliance (RCC) [138, 139] zwar Lateral- und Angularfehler ausgleichen, gleichzeitig jedoch durch ihre konstruktionsbedingte Drehnachgiebigkeit eine zuverlässige Prozessüberwachung beim Schraubprozess unmöglich machen,
- eine Flexibilität bezüglich unterschiedlicher Schraubengrößen und -arten nur durch aufwendige automatische Werkzeugwechselsysteme gegeben ist, welche zu einer Erhöhung der Anlagenkomplexität sowie der Taktzeiten führen, so dass die Wirtschaftlichkeit stark beeinflusst wird [140, 141].

Neben den in der Montage vorhandenen Entwicklungspotenzialen ergab die Ermittlung der Schwachstellen der automatisierten Demontagezelle (Abschnitt 3.4) weitere Entwicklungsansätze speziell für das Lösen von Schraubenverbindungen innerhalb des Demontageprozesses:

- Positionsabweichungen gegenüber der vorgegebenen Position bedingt durch Produktzustandsänderungen werden nicht ohne Positionsanpassung kompensiert. Hier bestehen hohe Anforderungen an das Bildverarbeitungssystem, welche zu hohen Taktzeiten zur Ermittlung der genauen Positionsdaten führen und letztendlich aufgrund der hohen Investitionskosten und der hohen Taktzeiten die Wirtschaftlichkeit der Demontage negativ beeinflussen.
  - Bedingt durch Positioniertoleranzen des Industrieroboters, der Greiferwechselsysteme und der Werkstückspannvorrichtung entsteht ein Lateral-Achsversatz der Schrauberspindel zur Schraubenachse. Dieser Lateral-Achsversatz führt zu einer unsicheren Formschlusserstellung des Schraubersbits mit dem Schraubenkopf.
-

- Die Abgabe der gelösten Schraube an der Bitspitze des Schraubwerkzeuges erfolgt an einer starren, stationären Schraubenabziehvorrichtung. Somit entstehen zwischen den einzelnen Entschraubungsprozessen eine Vielzahl von unproduktiven und somit unwirtschaftlichen Roboterbewegungen zur Abziehvorrichtung und von dort wieder zur nächsten Schraubenposition.
- Die auftretenden Zustandsänderungen von verschiedenen Schraubenarten werden durch das Bildverarbeitungssystem erkannt und führen zu Werkzeugwechseln. Aufgrund der in Eigenerhebungen und manuellen Untersuchungen festgestellten geringen Vertauschungsrate von 2,1% (s. Tab. 3.4) bezüglich der Schraubentypen mit abnehmender Tendenz bei neueren Geräten aufgrund gerätespezifischer Schrauben, ist die Rüstflexibilität der Schrauberwerkzeuge gegenüber unterschiedlicher Schraubentypen ausreichend. Jedoch ist der Prozess so zu steuern, dass zunächst alle Schrauben geprüft und dabei die Schrauben gelöst werden, die mit dem an der Roboterhand vorhandenen Schrauberwerkzeug einen Formschluss bilden. Erst anschließend ist ein Werkzeugwechsel vorzunehmen, um so die Anzahl der Werkzeugwechsel zu minimieren.

Die Aufstellung der Weiterentwicklungspotenziale zeigt die Notwendigkeit der Entwicklung eines Werkzeuges zur Optimierung des Trennprozesses von Schraubenverbindungen.

Stand der heutigen Entwicklung zur Trennung von Schraubenverbindungen sind zwei Prototypen, welche Schraubenverbindungen über Generierung neuer Wirkflächen lösen sollen.

Zum einen wurde am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik an der Universität Erlangen-Nürnberg bereits 1997 ein Bohr-Entschraubungswerkzeug entwickelt (s. Abb. 4.1 b). Dieser linksdrehende Bohrschrauber besteht aus einem Schaft, der mit zwei linksorientierten Schneiden versehen ist. Das Werkzeug wird mit variablen Drehzahlen im Linkslauf eingesetzt. Dadurch können folgende Funktionen umgesetzt werden [142 bis 147]:

1. Übertragung von Momenten an vorhandenen Eingriffsflächen:

Das Bohr-Entschraubungswerkzeug ist so gestaltet, dass die Schneiden in Kombination mit Kreuzschlitz- und Längsschlitzschrauben einen Formschluss zur Übertragung des Drehmomentes erzeugen können und diese Schraubentypen zerstörungsfrei gelöst werden.

2. selbständige Generierung von Eingriffsflächen:

Falls die vorhandenen Formelemente nicht ausreichen, werden durch das Werkzeug automatisch neue Wirkübertragungsflächen in Form von Spanwurzeln erzeugt, die dann zur Übertragung genutzt werden können.

3. Zerstörung von Verbindungen:

Falls eine Lösung der Verbindungen durch eine Übertragung von Drehmomenten nicht möglich ist, kann durch Erhöhung der Drehzahl ein konventioneller Bohrprozess eingeleitet werden, um so die Schraube aus dem Gewinde auszubohren.

Der Vorteil dieses Bohrschraubers besteht in der Möglichkeit, sämtliche Schraubenkopftypen mit nur einem Werkzeug zerstörungsfrei oder – falls ein zerstörungsfreies Lösen der Schraubenverbindung nicht möglich ist – zerstörend durch Aufbohren der Verbindung zu lösen. Nachteilig bei diesem Werkzeug sind die hohen Prozesszeiten, wenn die Verbindungen zerstörend getrennt werden sowie der konstant hohe Anpressdruck. Dieser Anpressdruck führt bei nachgiebigen oder spröden Bauteilen, wie sie Geräte der Unterhaltungselektronik sowie Geräte der Büro- und Informationstechnik (z.B. dünnwandige Kunststoffrückwand bei Bildschirmgeräten) aufweisen, dazu, dass die Energie nicht aufgenommen wird aufgrund der Nachgiebigkeit der Bauteile oder entstehender Risse in spröden Kunststoffbauteilen. Diese Nachteile führten Ende 1997 zur Einstellung der Entwicklung.

Der zweite Prototyp wurde am Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb der Technischen Universität Berlin entwickelt. Hier wurde der erste Prototyp bereits 1997 fertiggestellt. Dieses Entschraubungswerkzeug besitzt eine „dreizackige Klaue“ als Greifkörper (s. Abb 4.1 a) [148]. Über eine tangential angeordnete pneumatische Düse wird der Druck im oberen Teil des Zylinders erhöht. Diese Erhöhung des Zylinderdruckes hat eine lineare Beschleunigung der Impulsmasse im Zylinder zur Folge. Durch die lineare Impulskraft wird der scharfkantige Greifkörper in den Schraubenkopf eingekerbt, so dass der Schrauber sich selbst eine neue Angriffsfläche generiert. Über diese neue Wirkfläche wird dann das Drehmoment auf die Schraubenverbindung übertragen. Die Pneumatikdüse dient nicht nur für die Aufbringung des linearen Impulses durch die Impulsmasse infolge der Erhöhung des Zylinderdruckes, sondern auch für die Aufbringung eines rotatorischen Impulses aufgrund der tangentialen Einleitung des Luftstromes. Dieser rotatorische Impuls wird für das Überwinden des Losbrechmomentes der Schraubenverbindung genutzt. Die gelöste Schraube wird mit Hilfe eines pneumatischen Antriebes herausgeschraubt, während die Impulsmasse in die Ausgangslage zurückfährt. Die gelösten Schrauben werden mit Hilfe eines Magneten aus dem Schraubenschaft gezogen. Der heutige Entwicklungsstand entspricht einer Weiterentwicklung des Entschraubungswerkzeuges von 1997 mit dem Ziel der Reduzierung des Eigengewichtes und der Prozesszeiten [149].

Die Vorteile dieses Entschraubungswerkzeuges zum heutigen Entwicklungsstand liegen in den kurzen Prozesszeiten sowie in der Flexibilität des Werkzeuges gegenüber unterschiedlichen Schraubengeometrien. Die Nachteile, insbesondere bezogen auf dünnwandige Bauteile oder Kunststoffbauteile bestehen wie beim Bohrschrauber in der Aufnahme der Impulsenergie, die zu einer Nachgiebigkeit der Bauteile oder teilweise zu Rissen in Kunststoffbauteilen führt und das letztendlich die Impulsenergie nicht immer eine Einkerbung in den Schraubenkopf ermöglicht [150-152]. Aufgrund des kurzfristigen Schlagimpulses lässt sich dieses Verfahren jedoch in der Demontage von Haushaltsgroßgeräten und Kraftfahrzeugen einsetzen, so dass die Entwicklungen weitergeführt werden.

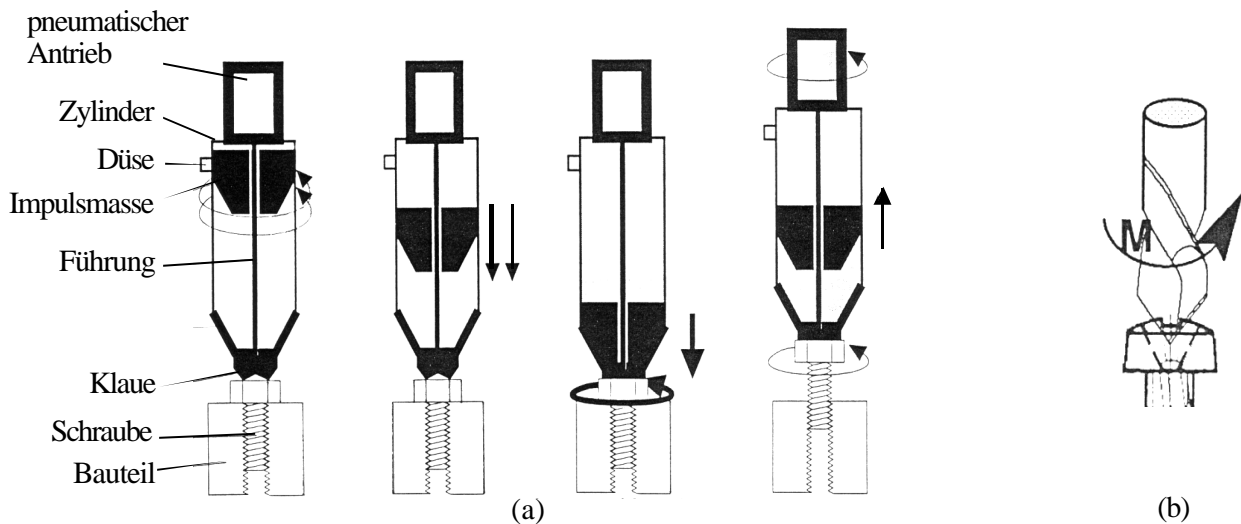


Abb. 4.1: Prinzipdarstellung des Impuls-Entschraubers (a) und des Bohr-Entschraubers (b)

Die Versuchsergebnisse, Potenziale und der Stand der heutigen Entwicklung zeigen den Bedarf an einem Demontagewerkzeug zum Trennen von Schraubenverbindungen in Unterhaltungselektronikgeräten sowie in Geräten der Büro- und Informationstechnik mit nachgiebigen Bauteilen oder spröden Kunststoffbauteilen auf.

Hierzu müssen zunächst die zu lösenden Schraubenarten untersucht, die optimale Demontagestrategie für den Trennprozess von Schraubenverbindungen ermittelt und letztendlich der Trennprozess näher analysiert werden, um prozessrelevante Einflussparameter zu erheben. Die Analyse des Trennprozesses und eine Quantifizierung der ermittelten Einflussparameter ermöglicht die Erstellung eines Anforderungskataloges zur Konzeption und Konstruktion von Funktionsmodulen zur Anpassung eines Trennwerkzeuges. Nach der Entwicklung der Funktionsmodule erfolgt die Integration und Testung innerhalb der Demontagezelle.

## 4.2 Untersuchung der auftretenden Schraubenverbindungen

Die Hauptfunktion „Trennen“ innerhalb des Demontageprozesses zielt auf das Lösen von Verbindungen, die während der Produktion der jetzigen Altprodukte erstellt wurden. Schraubenverbindungen setzen sich aus den zu verbindenden Bauteilen sowie den Schrauben zusammen, die der Herstellung und Aufrechterhaltung der Verbindungen dienen [153]. Schrauben sind standardisierte Massenprodukte mit geometrisch bestimmten Formen und haben im Vergleich zum Bauteil einen geringen Wert.

Als allgemeine Wirkprinzipien werden Stoffschluss, Formschluss und Kraftschluss unterschieden. Stoffschlüssige Verbindungen treten bei Bildschirmgeräten nicht auf. Schnapp- und Klippverbindungen, die bei Bildschirmgeräten sehr häufig auftreten, stellen typische formschlüssige Verbindungen dar. Formschlüssige Verbindungen nutzen die Adhäsions- und Kohäsionskräfte der beteiligten Bauteile, wobei die Kohäsionskraft den inneren stofflichen Zusammenhalt der beteiligten Bauteile und die Übertragung der Kräfte und Momente sicherstellen und damit im weiteren Sinn auch kraftschlüssigen Verbindungscharakter haben [153]. Schraubenverbindungen werden den kraftschlüssigen Verbindungen zugerechnet und erfordern den direkten stofflichen Kontakt der Bauteile und der Schrauben. Diese im Kraftfluss liegenden Kontaktflächen bilden die Wirkflächenpaare [154] der Verbindungen und beeinflussen neben den stofflichen Merkmalen der Bauteile und Schrauben entscheidend die Leistungsfähigkeit der Verbindung. Wirkflächen sind damit eine Voraussetzung für die meisten Prinzipien zum Übertragen von Kräften und Momenten. Sie werden nach Kriterien wie Form, Lage, Anzahl, Größe der Kontaktflächen und Art des Zusammenhalts unterschieden, wobei diese Eigenschaften in der Regel durch die Geometrie des Bauteils und der Schrauben vorgegeben sind. Schraubenverbindungen sind lösbare Verbindungen, bei denen der Füge- und Trennvorgang mehrfach wiederholt werden kann, ohne dass sich die Qualität der Verbindung verschlechtert oder sich die Bauteile verändern [153, 115].

Bei der Analyse von Schraubenverbindungen während der manuellen Demontageuntersuchungen bei der BRAHL GmbH wurden Schraubenverbindungen bezüglich Schraubenkopfform, Gewinde sowie Lage und Zugänglichkeit untersucht. Dabei wurden folgende Schraubenverbindungselemente mit den entsprechenden maximalen Lösemomenten in Bildschirmgeräten sowie in sonstigen Geräten der Unterhaltungs- und Bürotechnikbranche ermittelt.

Schraubenwirkfläche	Gewindeform	Größe Æ	Länge	Maximales Lösemoment
Kreuzschlitzschraube	Selbstschneidend	3,5 .. 4,0	6..12 mm	2,8 Nm
Kreuzschlitzschraube	Selbstschneidend	3,5 .. 4,0	12..20 mm	2,9 Nm
Kreuzschlitzschraube	Metrisches ISO-Gew.	M3	3..5 mm	0,8 Nm
Kreuzschlitzschraube	Metrisches ISO-Gew.	M4	5..10 mm	2,3 Nm
Kreuzschlitzschraube	Metrisches ISO-Gew.	M4	10..15 mm	2,4 Nm
Schlitzschraube	Selbstschneidend	3,5 .. 4,0	6..18 mm	2,9 Nm
Schlitzschraube	Metrisches ISO-Gew.	M4	3..6 mm	2,3 Nm
Schlitzschraube	Metrisches ISO-Gew.	M4	6..12 mm	2,4 Nm
Außensechskantschraube	Metrisches ISO-Gew.	M5	10 mm	4,8 Nm
Außensechskantschraube	Selbstschneidend	5,5 .. 6,0	8..14 mm	6,6 Nm
Außensechskantschraube	Selbstschneidend	5,5 .. 6,0	16..20 mm	6,7 Nm
Außensechskantschraube	Metrisches ISO-Gew.	M6	8..14 mm	8,2 Nm
Innensechskant (Imbus)	Metrisches ISO-Gew.	M5	6..10 mm	4,8 Nm

Tab. 4.1: Auftretende Schraubenverbindungselemente in Bildschirmgeräten [114]

Als Schraubenkopfgeometrien bei Schlitzschrauben wurden Zylinderkopf- und Flachkopfschrauben festgestellt. Bei den Kreuzschlitzschrauben traten die Kreuzschlitztypen Phillips-Recess und Pozidriv auf. 83% der analysierten Kreuzschlitzschrauben sind Phillips-Recess-Kreuzschlitzschrauben mit (Halb-)Rundkopf. Kreuzschlitzschrauben der Größe M4 werden mit der Bitgröße 2 gelöst, Kreuzschlitzschrauben der Größe M3 werden nach DIN mit der Bitgröße 1 gelöst, lassen sich aber auch mit der Bitgröße 2 lösen. Weiterhin ist festzustellen, dass sich Phillips- und Pozidriv-Kreuzschlitzschrauben der Größe M3 und M4 sowohl mit einem Phillips- als auch mit einem Pozidriv-Kreuzschlitzklinge lösen lassen. Abbildung 4.2 zeigt die Häufigkeitsverteilung bezüglich der Schraubenkopfgröße und Schraubenkopffart:

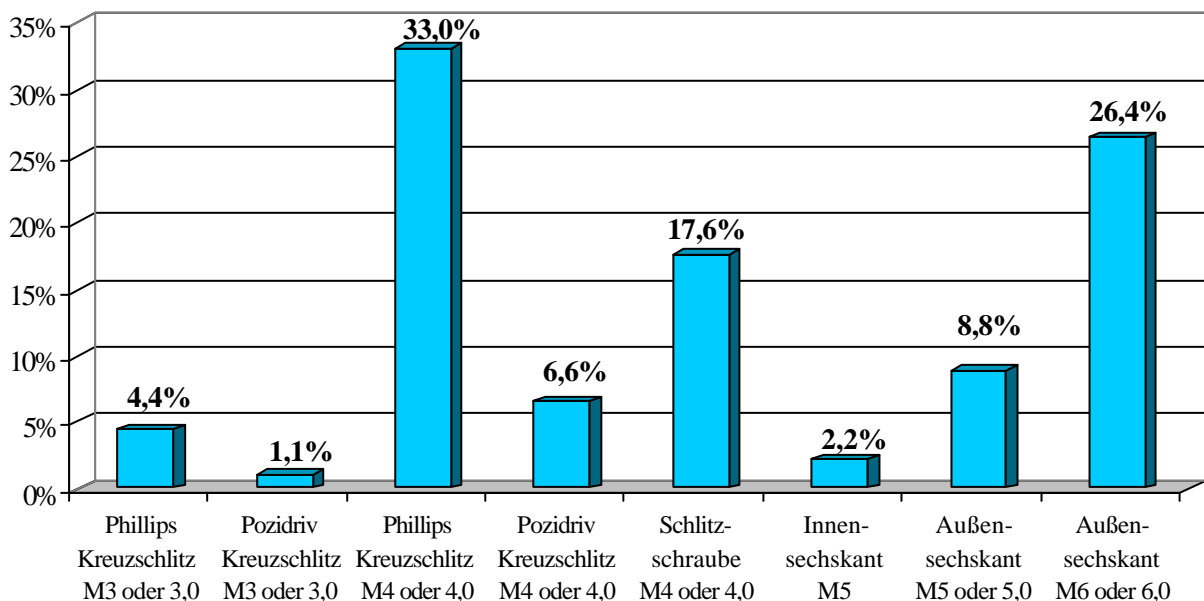


Abb. 4.2: Häufigkeitsverteilung von Schraubenarten in Bildschirmgeräten



Abbildung 4.2 zeigt, dass der überwiegende Anteil der Schrauben Kreuzschlitzschrauben der Größe M4 oder Blechschrauben mit dem Nenndurchmesser 4,0 mm, die insbesondere für die Befestigung der Rückwand benötigt werden, und Außensechskantschrauben der Größe M6 oder Blechschrauben mit dem Nenndurchmesser 6,0 mm für die Befestigung der Bildröhre sind. Für die Auslegung der benötigten Kreuzschlitzschrauberbits ist zu erkennen, dass alle in Bildschirmgeräten sowie in Geräten der Unterhaltungselektronik und Bürotechnik vorhandenen Kreuzschlitzschrauben sich mit einem Bit lösen lassen, da ihre Größen nur geringfügig zwischen M3 und M4 differieren und die Kreuzschlitzart für diese Größen sowohl durch einen Phillips- als auch durch einen Pozidriv-Kreuzschlitzbit gelöst werden. Bei den auftretenden Schlitzschrauben sind nur die Schraubengröße M4 bzw. Blechschrauben mit dem Nenndurchmesser 4,0 mm festzustellen. Für die Befestigung der Bildröhre werden Außensechskantschrauben der Größe M6 oder Blechschrauben mit dem Nenndurchmesser 6,0 mm eingesetzt. Die Spannschraube für den Sicherungsring zur Befestigung der Ablenkeinheit am Bildröhrenhals liegt in unterschiedlichen Varianten vor. Zum einen werden Kreuzschlitzschrauben oder eine Kombination von Außensechskant- und Kreuzschlitzschrauben der Größe M4 eingesetzt, zum anderen sind bei wenigen Gerätetypen auch Innensechskantschrauben der Größe M5 vorhanden. Als maximales Drehmoment zum Überwinden des Anzugsmomentes beim Lösen von Kreuzschlitz- und Schlitzschrauben wird ein zu übertragendes Moment von mindestens 2,6 Nm benötigt. Zum Lösen der Außensechskantschrauben an der Bildröhre hingegen ist ein maximales Drehmoment von mindestens 8,2 Nm erforderlich. Abbildung 4.3 zeigt das experimentell verifizierte Verhältnis von Anzugsmoment zu Lösemoment.

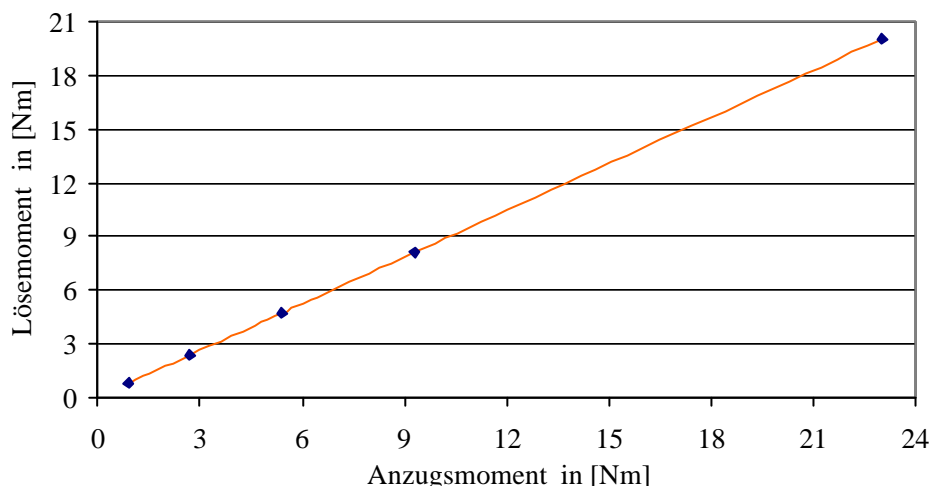


Abb. 4.3: Anzugs- und Lösemoment bei unbeschädigten Schraubenverbindungen (DIN)

Wie aus Abbildung 4.3 hervorgeht, wird das Lösemoment in erster Linie vom Gewindetyp und dem Anzugsmoment bestimmt. Das Lösemoment liegt bei Schraubenverbindungen mit unbeschädigten Gewindegängen geringfügig unter dem Anzugsmoment. Dies wird durch das Setzverhalten von Schrauben nach dem Anziehen begründet [128, 135, 155, 156]. Verschmutzungs- und Korrosionseinflüsse sowie Gewindebeschädigungen können das aufzubringende Lösemoment um bis zu 45% erhöhen [78, 125].

Die Analyse der eingesetzten Schraubentypen zeigt weiterhin, dass beim Lösen mehrerer Schrauben an einem Bauteil nur ein Schraubentyp gelöst werden muss, wenn keine Zustandsvarianzen vorhanden sind. So müssen zum Lösen der Rückwand bei modernen Geräten mehrere Schraubenverbindungen zerlegt werden, die jedoch alle die gleiche Schraubengröße und Schraubenkopfgeometrie besitzen und sich somit mit einem Schrauberbit lösen lassen.

### 4.3 Ermittlung der optimalen Demontagestrategie zum Trennen von Schraubenverbindungen

Die Demontage ist als die Gesamtheit aller Vorgänge definiert, die den Zusammenhalt geometrisch bestimmter Körper auflösen [157]. Die Demontage ist immer eine Folge von Funktionen. Sie beinhaltet neben den Nebenfunktionen Handhaben und Kontrollieren als Hauptfunktion das Trennen von Bauteilverbindungen [158]. Nach DIN ist Trennen „Fertigen durch Ändern der Form eines festen Körpers, wobei der Zusammenhalt örtlich aufgehoben, d.h. (...) im ganzen vermieden wird“ [159]. Im engeren Sinne wird unter Trennen das Lösen von zwei oder mehr geometrisch bestimmten Körpern verstanden [160].

Die Demontageprozesse werden entsprechend den verwendeten Trennverfahren nach ihrer Wirkung auf die zu demontierenden Bauteile in zerstörungsfrei oder zerstörend unterschieden [161]. Zerstörungsfreie Trennprozesse, wie die Mehrzahl der Zerlegeprozesse, lösen die Verbindungen an vorhandenen Wirkflächen durch Kräfte und Momente auf die Bauteile und Verbindungselemente, ohne dass die Bauteile und Verbindungselemente beschädigt werden [162]. Zerstörende Demontageprozesse wie Zerteilen [163], Zerspanen [164] oder Abtragen [165] beschädigen beim Trennen von Verbindungen auch die Bauteile. Zwischen diesen beiden Ausprägungen von Trennprozessen existiert ein Übergangsbereich, in dem die Bauteile keine Beeinträchtigungen erfahren, während das Verbindungselement zerstört wird. Dieser Bereich wird als teilzerstörende Demontage bezeichnet [166]. Bei der Gegenüberstellung der Demontageprozesse und der zu lösenden Verbindungen wird deutlich, dass sich die zerstörungsfreie Demontage auf die lösbaren Verbindungen beschränkt, während zerstörende Demontageprozesse sowohl für lösbare als auch für unlösbare Verbindungen geeignet sind. Mit teilzerstörenden Prozessen, wie dem Aufbohren von Schraubenverbindungselementen, kann ein großes Spektrum von lösbaren und unlösbaren Verbindungen gelöst werden.

	Verbindungen / Wirkprinzip	
	formschlüssig	kraftschlüssig
zerstörungsfrei	Stecker abziehen	Schraube herausdrehen
teilzerstörend	Niet aufbohren	Schraubenkopf abfräsen
zerstörend	integrierten Schnapphacken abbrechen	um Schraube herum hohlfräsen

Tab. 4.2: Zuordnung von Verbindungsarten und Trennprozessen mit Beispielen

Neben dem in der Elektronikgerätedemontage nicht einsetzbaren Trennverfahren *Abtragen* unterteilt man das Trennverfahren in *Zerlegen*, *Zerteilen* und *Spanen*.

Das Trennverfahren *Zerlegen* wird nach DIN als „das Trennen von zuvor gefügten Werkstoffen geometrisch bestimmter Form und eingefülltem, formlosen Stoff, wobei keine Beschädigung der Werkstücke auftreten darf“ [167] definiert. Durch Zerlegen werden Bauteile und Verbindungselemente zerstörungsfrei demontiert. Schraubenverbindungen werden mit Hilfe von Schraubwerkzeugen zerstörungsfrei zerlegt.

Im Gegensatz zum Zerlegen sind die Trennverfahren der zerstörenden (teilweise auch teilzerstörenden) Demontage unterteilt in *Zerteilen* als „mechanisches Trennen von Werkstücken ohne Entstehen von formlosem Stoff, als auch ohne Späne“ [168] und *Spanen* als „das Abtragen von Werkstoff durch ein Werkzeug mit keilförmiger Schneide“ [169]. Die Scher- und Schneidvorgänge der *Zerteilverfahren* werden aufgrund der nicht gegebenen Zugänglichkeit von zwei Seiten an die Schraubenverbindungen innerhalb der Bildschirmgeräte nicht weiter betrachtet. Beim *Spanen* wird der Trennprozess unterschieden in Spanen mit geometrisch bestimmter Schneide und Spanen mit geometrisch unbestimmter Schneide. In der Gruppe Spanen mit geometrisch bestimmter Schneide scheiden Hobeln und Drehen durch die erforderliche Relativbewegung der Schraubenverbindung sowie Feilen, Schaben und Bürstenspanen durch das zu geringe Zeitspannungsvolumen aus. Das Räumen und Gewindeschneiden ist für den Trennprozess von Schraubenverbindungen innerhalb von Elektronikgeräten nicht einsetzbar. Damit verbleiben Bohren, Fräsen und Sägen als Verfahren, mit denen in ausreichend kurzer Zeit Schraubenverbindungen zerstörend gelöst werden können. Das Trennen von Schraubenverbindungen durch Sägen ist jedoch nur bedingt bei vorhandener Zugänglichkeit möglich. Das Spanen mit geometrisch unbestimmten Schneiden umfasst zum einen Feinbearbeitungsverfahren wie Lappen und Honen, die aufgrund des geringen Zeitspannungsvolumens nicht in Betracht kommen, zum anderen das Trennschleifen, welches in ausreichender Zeit das Durchtrennen von Schraubenverbindungen ermöglicht.

Somit stehen für das Trennen von Schraubenverbindungen prinzipiell folgende Verfahren zur Verfügung:

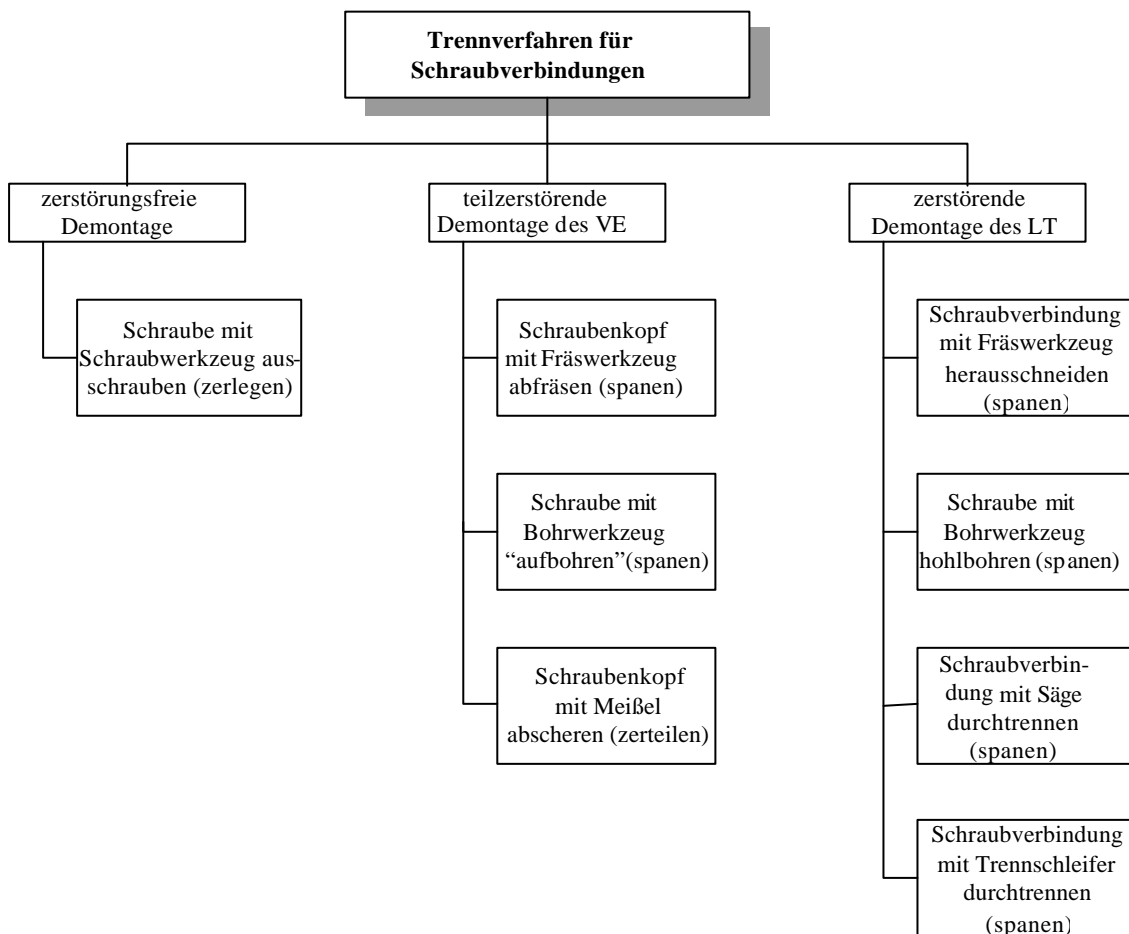


Abb. 4.4: Einsetzbare Verfahren zum Trennen von Schraubenverbindungen

Für das zerstörungsfreie Zerlegen von Schraubenverbindungen werden Schraubwerkzeuge eingesetzt, deren Bits entsprechend dem Schraubentyp – Kreuzschlitz-, Schlitz- oder Außen- und Innen-sechskant-Schraube – rüstflexibel angepasst werden.

Das Trennschleifen erfolgt mit Hilfe einer kunstharzgebundenen Schleifkörnung auf einem metallischen Grundkörper, da bei diesen Scheiben ein sehr geringer Abrieb festzustellen ist. Für das Sägen wird ein Metallsägeblatt mit möglichst kleinem Durchmesser eingesetzt.

Für das Bohren wird ein Zentrierbohrer eingesetzt, um das Ansetzen zum Aufbohren der Schraube zu erleichtern. Das Hohlbohren von Schraubenverbindungen wird aufgrund der benötigten Zeit für die Vielzahl der Bohrungen nicht berücksichtigt. Beim Fräsen werden Stirn- und Umfangsfräsen kombiniert, so dass keine kinematischen Einschränkungen wie beim Bohren, Sägen oder Trennschleifen vorliegen. Somit kann das Trennen von Schraubenverbindungen sowohl durch Ausfräsen des Schraubelementes als auch durch Abfräsen des Schraubenkopfes erfolgen.

Zur Ermittlung des optimalen Trennverfahrens werden die Anforderungen, die sich aus den Randbedingungen der Demontage ergeben, den verfügbaren Werkzeugen und Übertragungen von Kräften und Momenten gegenübergestellt. Für die Entscheidung des optimalen Trennverfahrens werden daher folgende Kriterien herangezogen, die die allgemeinen Anforderungen der Demontage berücksichtigen:

1. Zugänglichkeit:  
Verfahren, die eine Zugänglichkeit von zwei Seiten (z.B. Schneidvorgänge) erfordern, scheiden aus, da diese aufgrund der komplexen Produktstruktur in der Regel nicht gegeben ist.
  2. Werkzeuggröße / Arbeitsraum:  
Verfahren, deren Werkzeuge einen großen Arbeitsraum benötigen bzw. sperrig sind, sind aufgrund des immer höher werdenden Miniaturisierungsgrad und Bauteilkomplexitätsgrad und dem damit verbundenen eingeschränkten Arbeitsraum nicht geeignet.
  3. Relativbewegung der Schraubenverbindung oder des Werkzeuges:  
Verfahren, die eine Bewegung der Schraubenverbindung oder des Werkzeuges (z.B. Drehen) erfordern, kommen aufgrund der Miniaturisierung der Elektronikgeräte nicht in Betracht.
  4. Reproduzierbarkeit, Trennsicherheit:  
Verfahren, die keine vollständige Reproduzierbarkeit bzw. Trennsicherheit besitzen, scheiden aus.
  5. Produkt- und Produktzustandsflexibilität:  
Je höher die Flexibilität bezüglich unterschiedlicher Schraubentypen und Schraubenpositionsänderungen ist, desto besser.
  6. Positionsanforderungen an das Bildverarbeitungssystem:  
Je höher die Positioniertoleranz der Werkzeugangriffsfläche zur Wirkungsfläche der Schraubenverbindung ist, desto geringer sind die Anforderungen an das Bildverarbeitungssystem und damit die benötigten Sensorzeiten. Letztendlich wird so die Wirtschaftlichkeit der Demontage positiv beeinflusst.
  7. Prozesszeit:  
Verfahren, die einen hohen Zeitbedarf pro Trennprozess erfordern, sind für eine produktive Demontage ungeeignet.
-

## 8. Werkzeugverschleiß, Werkzeugstandzeiten:

Je höher die Standzeiten der Trennwerkzeuge sind, um so höher ist die Anlagenverfügbarkeit und somit die Wirtschaftlichkeit der Demontage.

## 9. Beanspruchung:

Je geringer die Rückwirkung des Verfahrens, wie z.B. durch Prozesskräfte auf das Objekt bzw. die Handhabung des Werkzeuges ist, desto besser.

## 10. Werkstoffabhängigkeit:


Verfahren, die durch die vorhandenen Werkstoffeigenschaften beeinflusst werden, kommen bei der Werkstoffvielfalt der Altprodukte nicht in Frage. Beispielsweise können thermische Einwirkungen, bedingt durch den Trennprozess, dazu führen, dass der Prozess nicht durchführbar ist und die Schraubenverbindung nicht getrennt wird.


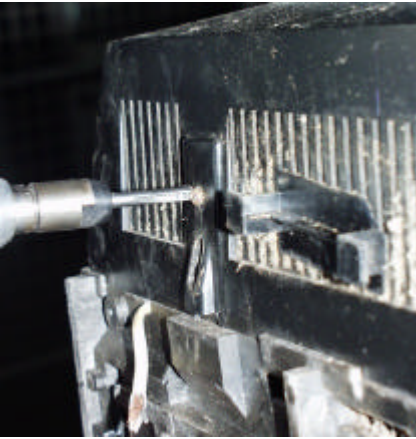

## 11. Reinheit der Fraktionen, Bauteilbeschädigung:


Je sortenreiner die Bauteiltrennung erfolgt, um so höher ist die Qualität der nachfolgenden Aufbereitungsverfahren.

Nur wenn die zu lösenden Bauteile nicht beschädigt werden, lassen sie sich für Reparaturen wiederverwenden.

Am Beispiel der zwei Kreuzschlitzschrauben in der Rückwand des Bildschirmgerätes Beovision von Bang & Olufsen wurden die unterschiedlichen Trennverfahren ausführlich analysiert:




Werkzeug	Demon- tagezeit	Kommentar Vor- und Nachteile
Kreuzschlitz-Schrauber (zerstörungsfreie Demontage) 	64 s	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ gute Zugänglichkeit und ausreichender Arbeitsraum für das Schraubwerkzeug</li> <li>+ keine Fehler, reproduzierbar</li> <li>+ schneller Löseprozess (10 Sekunden)</li> <li>+ saubere Trennung der Bauteile (Reinheit der Fraktionen), keine Beschädigung von Bauteilen</li> <li>+ kein Verschleiß, keine Späne</li> <li>+ keine Werkstoffabhängigkeit</li> <li>+ keine Beanspruchung bzw. Rückwirkung auf das Objekt (geringfügige Druckkräfte)</li> <li>- hohe Positionieranforderungen ⇒ Rechenzeit für Bildauswertung</li> <li>- extreme Zeitverluste durch Schraubenablage</li> <li>- überdrehte o. korrodierte Schrauben lassen sich nicht lösen</li> </ul>


<p>Mit Kernbohrer Schraube ausbohren (teilzerstörende Demontage)</p> 	48 s	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ gute Zugänglichkeit und ausreichender Arbeitsraum für das Bohrwerkzeug</li> <li>+ keine Fehler, reproduzierbar</li> <li>+ schneller Löseprozess (aber reine Prozesszeit etwas größer als beim Schrauben)</li> <li>+ überdrehte o. korrodierte Schraubenverbindungen lassen sich trennen</li> <li>+ keine Schraubentypenkennung</li> <li>- hohe Positionieranforderungen (entspricht dem Schraubprozess) ⇒ Rechenzeit für Bildauswertung</li> <li>- geringfügige Werkstoffabhängigkeit bei Kunststoffelementen (Verschmelzungen)</li> <li>- Beanspruchung des Objektes durch Prozessdruckkräfte</li> <li>- Verschleiß des Werkzeuges</li> <li>- Spanbildung</li> <li>- keine saubere Trennung der Bauteile (Sortenreinheit), ggf. Beschädigung der Bauteile</li> </ul>
<p>Schraubenkopf abräsen (teilzerstörende Demontage)</p> 	66 s	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ gute Zugänglichkeit und ausreichender Arbeitsraum für das Fräswerkzeug</li> <li>+ keine Fehler, reproduzierbar</li> <li>+ überdrehte o. korrodierte Schraubenverbindungen lassen sich trennen</li> <li>+ keine Schraubentypenkennung</li> <li>+ geringe Positionieranforderungen ⇒ geringe Anforderungen an das BVS</li> <li>- Werkstoffabhängigkeit: bei Kunststoffen kann es zu Verschmelzungen kommen</li> <li>- langwieriger Trennprozess</li> <li>- Beanspruchung des Objektes durch Prozessdruckkräfte</li> <li>- Verschleiß des Werkzeuges</li> <li>- Spanbildung</li> <li>- keine saubere Trennung der Bauteile (Schraube verbleibt in der Rückwand), Beschädigung der Bauteile</li> </ul>
<p>Schraube aus Kunststoffrückwand herausfräsen (zerstörende Demontage)</p> 	58 s	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ gute Zugänglichkeit und ausreichender Arbeitsraum für das Fräswerkzeug</li> <li>+ keine Fehler, reproduzierbar</li> <li>+ überdrehte o. korrodierte Schraubenverbindungen lassen sich trennen</li> <li>+ keine Schraubentypenkennung</li> <li>+ geringe Positionieranforderungen ⇒ kein BVS erforderlich</li> <li>- Werkstoffabhängigkeit: bei Kunststoffen kann es zu Verschmelzungen kommen</li> <li>- geringfügige Beanspruchung des Objektes durch Prozesskräfte</li> <li>- Verschleiß des Werkzeuges</li> <li>- Spanbildung</li> <li>- keine saubere Trennung der Bauteile (Schraube verbleibt in der Rückwand), Beschädigung der Bauteile</li> </ul>

<p>Schnappverbdg. mittels Säge oder Trennschleifer zerstörend durchtrennen (zerstörende Demontage)</p> 	50 s	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ schnelles Verfahren</li> <li>+ gute Zugänglichkeit und ausreichender Arbeitsraum</li> <li>+ keine Fehler, reproduzierbar</li> <li>+ überdrehte o. korrodierte Schrauben trennbar</li> <li>+ keine Schraubentypenkennung</li> <li>+ geringe Positionieranforderungen ⇒ kein BVS erforderlich</li> <li>- keine saubere Trennung der Bauteile (Schraube verbleibt in Rückwand)</li> <li>- Verschleiß des Werkzeuges</li> <li>- Spanbildung und Staubentwicklung</li> <li>- spez. Verfahren: nicht die Schraube wird durchtrennt, sondern das Bauteil (keine Übertragbarkeit auf alle Verbindungen, wenn Zugänglichkeit nicht gegeben ist)</li> </ul>
--	------	--

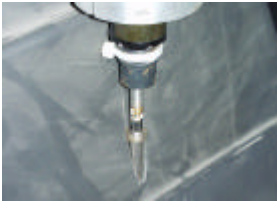


Tab. 4.3: Analyse unterschiedlicher Trennverfahren von Kreuzschlitzschraubenverbindungen in der Rückwand des Fernsehgerätes Beovision von Bang & Olufsen

In den nächsten Vergleichen der Trennverfahren bei unterschiedlichen Schraubenverbindungen werden nur die ausschlaggebenden Kriterien berücksichtigt:

Verbindungselement: 1 Schlitz-Schraube an der Bedieneinheit des Bang & Olufsen		
Werkzeug	Demontagezeit	Kommentar Vor- und Nachteile
<p>Schlitz-Schrauber (zerstörungsfreie Demontage)</p> 	32 s	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ gute Zugänglichkeit</li> <li>+ reproduzierbar, schneller Löseprozess</li> <li>+ kein Verschleiß, keine Späne</li> <li>- hohe Positionieranforderungen ⇒ Rechenzeit für Bildauswertung</li> <li>- Zeitverluste durch Schraubenablage</li> <li>- überdrehte oder korrodierte Schrauben nicht lösbar</li> </ul>
<p>Schraube mit Kernbohrer aufbohren (teilerstörende Demontage)</p> 	22 s	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ gute Zugänglichkeit, reproduzierbar</li> <li>+ überdrehte o. korrodierte Schraubenverbindung trennbar</li> <li>+ keine Schraubentypenkennung</li> <li>- hohe Positionieranforderungen (entspricht dem Schraubprozess) ⇒ Rechenzeit für Bildauswertung</li> <li>- Verschleiß des Werkzeuges, Spanbildung</li> <li>- keine saubere Trennung der Bauteile (Beschädigung)</li> </ul>
<p>Schraubenkopf abräsen (teilerstörende Demontage)</p> 	33 s	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ gute Zugänglichkeit, reproduzierbar</li> <li>+ überdrehte o. korrodierte Schraubverbindungen trennbar</li> <li>+ keine Schraubentypenkennung, geringe Positionieranforderungen ⇒ geringe Anforderungen an das BVS</li> <li>- langwieriger Trennprozess</li> <li>- Verschleiß des Werkzeuges, Spanbildung</li> <li>- keine saubere Trennung der Bauteile (Beschädigung)</li> </ul>
<p>Schraube aus Metallhalterung herausfräsen (zerstörend)</p>	–	<ul style="list-style-type: none"> <li>- wirtschaftlich nicht einsetzbar, da das Ausfräsen aus dem Metallhalter einen extremen Zeitaufwand benötigt.</li> </ul>
<p>Durchtrennen der Schraubenhalterung mittels Trennschleifer (zerstörende Demontage)</p>	–	<ul style="list-style-type: none"> <li>- nicht durchführbar, da kein ausreichender Arbeitsraum vorhanden und eine Zugänglichkeit nicht gegeben ist.</li> </ul>





<p>Durchtrennen der Schraubenhalterung mittels Trennschleifer (zerstörende Demontage)</p> 	29 s	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ keine Fehler, reproduzierbar</li> <li>+ überdrehte o. korrodierte Schraubverbindungen trennbar</li> <li>+ geringe Positionieranforderungen ⇒ kein BVS erforderlich</li> <li>- Verschleiß des Werkzeuges</li> <li>- Spanbildung, starke Staubentwicklung</li> <li>- keine saubere Trennung der Bauteile</li> <li>- spezielles Verfahren: nicht die Schraube wird durchtrennt, sondern das Bauteil (keine Übertragbarkeit)</li> </ul>
---	------	--

Tab. 4.4: Analyse unterschiedlicher Trennverfahren von Schraubenverbindungen an der Bedieneinheit des Fernsehgerätes Beovision von Bang & Olufsen

Verbindungselement: 8 Kreuzschlitzschrauben in der Rückwand des Sharp-Gerätes		
Werkzeug	Demonstrationszeit	Kommentar Vor- und Nachteile
<p>mit Schrauber inkl. Ablegen der Schraube (zerstörungsfrei)</p> 	256 s	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ gute Zugänglichkeit, reproduzierbar</li> <li>+ schneller Löseprozess</li> <li>+ saubere Trennung der Bauteile (Reinheit der Fraktionen)</li> <li>+ kein Verschleiß, keine Späne</li> <li>- Schraubentypenkennung, hohe Positionieranforderungen ⇒ Rechenzeit für Bildauswertung</li> <li>- extrem hohe Zeitverluste durch Schraubenablage</li> <li>- überdrehte o. korrodierte Schrauben nicht lösbar</li> </ul>
<p>Schraube mit Kernbohrer aufbohren (teilerstörende Demontage)</p> 	192 s	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ reproduzierbar, gute Zugänglichkeit</li> <li>+ überdrehte o. korrodierte Schraubverbindungen trennbar</li> <li>- hohe Positionieranforderungen (entspricht dem Schraubprozess) ⇒ Rechenzeit für Bildauswertung</li> <li>- Verschleiß des Werkzeuges, Spanbildung</li> <li>- durch die entstehende hohe Erwärmung kann der Kunststoff schmelzen und den Bohrer verkleben</li> <li>- keine saubere Trennung der Bauteile (Sortenreinheit)</li> </ul>
<p>Schraubenkopf abräsen (teilerstörende Demontage)</p> 	200 s	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ gute Zugänglichkeit, reproduzierbar</li> <li>+ überdrehte o. korrodierte Schraubverbindungen trennbar</li> <li>+ geringe Positionieranforderungen ⇒ geringe Anforderungen an das BVS</li> <li>- langwieriger Trennprozess</li> <li>- die Länge des Fräasers muss der Tiefe der eingelassenen Schrauben entsprechen</li> <li>- Verschleiß des Werkzeuges, Spanbildung</li> <li>- keine saubere Trennung der Bauteile (Beschädigung)</li> </ul>
<p>Schraube aus Kunststoffrückwand fräsen (zerstörende Demontage)</p>	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>- die versenkten Schrauben können nicht aus dem Gehäuse ausgefräst werden, da kein ausreichender Arbeitsraum vorhanden und eine Zugänglichkeit nicht gegeben ist.</li> </ul>
<p>Durchtrennen der Schraubenhalterung mittels Trennschleifer oder Säge (zerstörende Demontage)</p>	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>- nicht durchführbar, da kein ausreichender Arbeitsraum vorhanden und eine Zugänglichkeit nicht gegeben ist.</li> </ul>

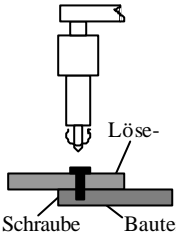
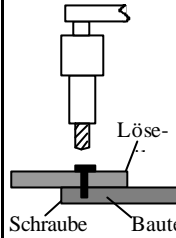
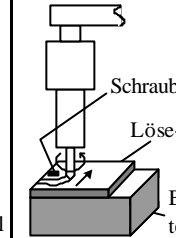
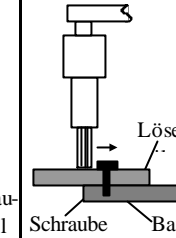
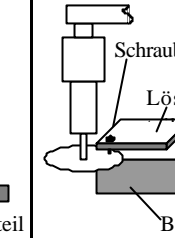
Tab. 4.5: Analyse unterschiedlicher Trennverfahren von Kreuzschlitz-Schraubenverbindungen in der Rückwand des Fernsehgerätes von Sharp



Verbindungselement: Spanschraube am Sicherungsring der Ablenkeinheit (z.B. Sharp)		
Werkzeug	Demon- tagezeit	Kommentar Vor- und Nachteile
Schraube mit Innensechskant- schrauber zerstörungsfrei lösen 	32 s	+ gute Zugänglichkeit, reproduzierbar + saubere Trennung der Bauteile + kein Verschleiß, keine Späne - Schraubentyperkennung, hohe Positionieranforderungen ⇒ Rechenzeit für Bildauswertung (insbesondere wenn bei Reparaturen der Spanring deutlich gedreht wurde) - Zeitverluste durch Schraubenablage - überdrehte o. korrodierte Schrauben nicht lösbar
Schraube mit Kernbohrer aufbohren (teilzerstörende Demontage)	–	- nicht durchführbar, da die aus dem Prozess resultierenden Druckkräfte nicht übertragen werden können.
Schraubenkopf abräsen (teilzerstörende Demontage) 	41 s	+ gute Zugänglichkeit, reproduzierbar + überdrehte o. korrodierte Schraubenverbindungen trenn- bar + geringe Positionieranforderungen ⇒ geringe Anforde- rungen an das BVS - langwieriger Trennprozess - Verschleiß des Werkzeuges, Spanbildung
Schraube mit Fräser durchtrennen (teilzerstörende Demontage) 	35 s	+ gute Zugänglichkeit, reproduzierbar + überdrehte o. korrodierte Schraubenverbindungen trenn- bar + geringe Positionieranforderungen ⇒ geringe Anforde- rungen an das BVS - langwieriger Trennprozess - Verschleiß des Werkzeuges, Spanbildung
Schraube mit Hilfe des Trennschlei- fers durchtrennen (zerstörend) 	22 s	+ schnelles, reproduzierbares Verfahren + überdrehte o. korrodierte Schraubenverbindungen trenn- bar + geringe Positionieranforderungen - Problem: falls bei Reparaturen der Spanring deutlich gedreht wurde ⇒ BVS erforderlich - Spanbildung, Verschleiß des Werkzeuges - spezielles Verfahren: nicht die Schraube wird durchtrennt, sondern das Bauteil (keine Übertragbarkeit auf alle Schraubenverbindungen)
Durchtrennen der Schraubenhal- terung mittels Säge (zerstörend)	–	- nicht durchführbar, da kein ausreichender Arbeitsraum vorhanden und eine Zugänglichkeit nicht gegeben ist.

Tab. 4.6: Analyse unterschiedlicher Trennverfahren für die Spanschraube am Sicherungsring der Ablenkeinheit des Fernsehgerätes von Sharp

Tabelle 4.7 zeigt die Eigenschaften der beschriebenen Werkzeuge auf und stellt eine Bewertung im Hinblick auf den Einsatz des Verfahrens in der Elektronikgerätedemontage vor:

Alternativen	A	B	C	D	E
<b>Bewertungskriterien</b>	<b>Zerlege-WZ (Schraub-WZ)</b> 	<b>Kernbohr-WZ für Schraube</b> 	<b>Fräswerkzeug für LT</b> 	<b>Fräswerkzeug für Schraube</b> 	<b>Trennschleifer für Schraube</b> 
<b>Prozesszeit je Schraube</b>	Lösen: 7 - 9 sec Ablegen: 15 sec	15 - 17 sec	19 - 21 sec	25 - 27 sec	14 - 20 sec
<b>technischer Aufwand / Invest</b>	ca. €800,- je Schrauber	ca. €650,-	ca. €650,-	ca. €650,-	ca. €750,-
<b>Flexibilität bzgl. Größe Typ, Art Zustand</b>	rüstflexibel	rüstflexibel	flexibel	rüstflexibel	flexibel
	rüstflexibel	flexibel	flexibel	flexibel	flexibel
	unflexibel	flexibel	flexibel	flexibel	flexibel
<b>Positioniergenauigkeit</b>	sehr hohe Positioniergenauigkeit, höchste Anforderungen an BVS	sehr hohe Positioniergenauigkeit, hohe Anforderungen an BVS	geringe Positioniergenauigkeit, kein BVS erforderlich	sehr hohe Positioniergenauigkeit, hohe Anforderungen an BVS	geringe Positioniergenauigkeit, kein BVS erforderlich
<b>Standzeiten</b>	groß	gering	mittel	gering	gering
<b>Zerstörungsgrad</b>	zerstörungsfrei	(teil-)zerstörend	zerstörend	(teil-)zerstörend	zerstörend
<b>Verfahren</b>	reproduzierbar, stark beschädigte Schrauben nicht lösbar	reproduzierbar	reproduzierbar, bei Durchtrennung von Stahlbauteilen (LT, BT) nicht anwendbar	reproduzierbar, aber eine ausreichende Zugänglichkeit des Fräsers muss gegeben sein	reproduzierbar, aber eine Zugänglichkeit zum Schraubenschaft muss gegeben sein
<b>Prozesskräfte</b>	keine Kräfte auf Bauteile	hohe Druckkräfte	geringe Prozesskräfte	geringe Prozesskräfte	geringe Druckkräfte
<b>Werkstoffabhängigkeit</b>	keine	gering (bei Kunststoffteilen kann Bohrer evtl. verkleben)	gering (bei Kunststoffteilen kann Fräser evtl. verkleben)	keine	keine
<b>Fraktionierung</b>	vollständig sortenrein, Teilewiederverwendung mgl.	Schraubenrest verbleibt im Basisteil	Schrauben- und Löseteil-Rest verbleiben im Basisteil	Schraubenrest verbleibt im Basisteil	Schrauben- und Löseteil-Rest verbleiben im Basisteil

Tab. 4.7: Lösungsalternativen zum Lösen von Schraubenverbindungselementen [vgl. 166]

Aus der Tabelle 4.7 lässt sich entnehmen, dass bei Wieder- bzw. Weiterverwendung der Bauteile eine zerstörungsfreie Demontage von Schraubenverbindungen notwendig ist. Dies ist insbesondere für das Recycling von Kunststoffen erforderlich, da nur sortenreine Kunststoffe als hochwertige Sekundärrohstoffe in der Produktion einsetzbar sind. Weitere Vorteile des Zerlegens von Schraubenverbindungen mit Schraubwerkzeugen sind die Reproduzierbarkeit, die Werkstoffunabhängigkeit und

die geringen Prozesskräfte des Verfahrens sowie die immer vorhandene Zugänglichkeit des Schraubwerkzeuges. Jedoch stellt das Verfahren hohe Anforderungen an die Positioniergenauigkeit. Weiterhin ist die nicht vorhandene Flexibilität eines Schrauberwerkzeuges gegenüber Schraubenkopftypen nachteilig. Nur durch Werkzeugwechsel kann das Demontagesystem auf unterschiedliche Schraubenkopftypen reagieren. Die Produktanalyse während der manuellen Demontageuntersuchung (s. Abschnitt 3.3, Tab. 3.4) hat jedoch gezeigt, dass der Anteil während der Produktlebenszeit veränderter Schraubenkopftypen bei 2,1% aller Schrauben von zu entsorgenden Geräten der Unterhaltungs- und Informationstechnikbranche liegt. Weiterhin hat die Analyse gezeigt, dass für jedes Bauteil nur ein Schraubentyp verwendet wird, so dass zum Lösen des Bauteils alle Schraubenverbindungen mit einem Schrauberbit zerlegt werden können. Aufgrund des geringen Anteils veränderter Schraubenkopftypen, bedingt durch Veränderungen während der Nutzungsphase und durch den gleichen Schraubentypen je Bauteil, ist die Rüstflexibilität der Schraubwerkzeuge ausreichend. Die nicht vorhandene Flexibilität der Schrauber gegenüber unterschiedlichen Schraubengrößen kann vernachlässigt werden, da bei Geräten der Unterhaltungselektronik und der Informationstechnik eine geringe Varianz der Schraubengrößen festzustellen ist, so dass je Kreuzschlitz- und Schlitzschraube je ein Schrauberwerkzeug und zwei bis drei Außen- und Innensechskantschrauber ausreichen. Gleiches gilt auch bezüglich der nicht vorhandenen Schraubenzustandsflexibilität, da bei der Studie keine Schrauben so stark korrodiert oder deren Wirkflächen so stark beschädigt waren, dass mit einem Schraubwerkzeug diese Schraubenverbindungen nicht zu lösen waren. Die Gesamtprozesszeit beim Schrauben muss durch Optimierung der Schraubenabgabe verringert werden.

Als Alternative zum Schrauber steht das Aufbohren von Schraubenverbindungen oder das Abfräsen des Schraubenkopfes. Beide Verfahren besitzen den Vorteil der Flexibilität gegenüber Schraubentypen. Auch bei diesen Verfahren ist lediglich eine Rüstflexibilität gegenüber unterschiedlichen Schraubengrößen festzustellen, die jedoch aufgrund der geringen Varianz an Schraubengrößen nicht erforderlich ist. Beide Verfahren benötigen jedoch eine hohe Positioniergenauigkeit. Aufgrund des teilzerstörenden Verfahrens werden die Bauteile nicht sortenrein getrennt und die Standzeiten der Werkzeuge begrenzt. Problematisch beim Kernbohren ist die Aufnahme der entstehenden Druckkräfte, die je nach Bauteil nicht immer möglich ist. Für das Abfräsen des Schraubenkopfes ist ein größerer Arbeitsraum als für das Bohren oder Schrauben erforderlich. Daher können in das Bauteil eingelassene Schraubenköpfe nicht erreicht werden. Beide Verfahren benötigen eine höhere Trennzeit für das Lösen von Schraubenverbindungen gegenüber dem Schrauben.

Eine weitere Alternative ist das Ausfräsen von Schraubenverbindungen aus den Bauteilen. Vorteil dieses Verfahrens ist die Flexibilität gegenüber Schraubentypen und Schraubengrößen. Nachteilig ist die Standzeit des Fräasers, die Prozesszeit sowie die Werkstoffabhängigkeit. Der Werkstoff der Bauteile beeinträchtigt im Wesentlichen die Prozesszeit, so dass bei metallischen Werkstoffen ein Ausfräsen unwirtschaftlich wird. Weiterhin muss ein großer Arbeitsraum und eine ausreichende Zugänglichkeit auch um den Schraubenkopf vorhanden sein, um ein Ausfräsen der Schraube zu ermöglichen. Diese Freiräume sind aufgrund der Minituarisierung der Elektronikgeräte jedoch nur selten vorhanden.

Das Trennen von Verbindungen mit einem Trennschleifer ist ein sehr schnelles und einfaches Verfahren, welches jedoch aufgrund der Zugänglichkeit zum Schraubenschaft oder zu anderen Trennstellen nur selten einsetzbar ist.

Alle zerstörenden Verfahren besitzen den Nachteil, dass Kunststoffbauteile durch die eingebrachte Energie der Werkzeuge einem Schmelzvorgang ausgesetzt sein können.

---

Bewertungskriterium j	Gewichtung $\alpha_j$	Schraubwerkzeug		Kernbohrer		Schr.-kopf abräsen		Schraube ausfräsen		Trennschleifer	
		$E_{ij}$	$P_{ij}$	$E_{ij}$	$P_{ij}$	$E_{ij}$	$P_{ij}$	$E_{ij}$	$P_{ij}$	$E_{ij}$	$P_{ij}$
Prozesszeit	13,6%	4,8	0,7	3,0	0,4	2,8	0,4	1,2	0,2	3,0	0,4
Nebenzeiten	3,8%	1,2	0,0	4,7	0,2	4,7	0,2	4,7	0,2	4,8	0,2
Flexibilität bzgl. Typ	9,8%	3,0	0,3	5,0	0,5	5,0	0,5	4,8	0,5	5,0	0,5
Flexibilität bzgl. Größe	3,0%	4,2	0,1	3,0	0,1	3,0	0,1	5,0	0,2	4,8	0,1
Flexibilität bzgl. Zustand	9,8%	1,2	0,1	4,8	0,5	4,8	0,5	5,0	0,5	5,0	0,5
Positionieranforderung	11,4%	2,0	0,2	2,0	0,2	2,0	0,2	3,8	0,4	3,7	0,4
Werkzeugstandzeiten	3,8%	5,0	0,2	1,2	0,0	1,2	0,0	1,8	0,1	1,2	0,0
Verfahrenssicherheit	15,2%	4,0	0,6	3,2	0,5	3,0	0,5	3,5	0,5	4,0	0,6
Zugänglichkeit	11,4%	4,8	0,5	4,8	0,5	2,8	0,3	1,2	0,1	1,2	0,1
Prozesskräfte	10,6%	4,8	0,5	2,0	0,2	3,0	0,3	3,8	0,4	2,8	0,3
Werkstoffabhängigkeit	3,0%	5,0	0,2	3,0	0,1	3,7	0,1	1,2	0,0	4,0	0,1
Sortenreinheit	4,5%	5,0	0,2	2,7	0,1	2,7	0,1	1,8	0,1	1,7	0,1
<b>Nutzwert:</b>			<b>3,7</b>		<b>3,4</b>		<b>3,2</b>		<b>3,1</b>		<b>3,4</b>

Tab. 4.8: Auswahl der Demontagestrategie (Gewichtungs- und Erfüllungsgrad s. Anhang E)

Die Analyse der Demontagestrategien zeigt, dass das Lösen von Schraubenverbindungen primär zerstörungsfrei mit einem Schraubwerkzeug aufgrund der schnellsten Trennprozesszeit, der Sortenreinheit insbesondere bei Kunststoffbauteilen, des geringsten Arbeitsraumbedarfes und der geringsten Prozesskräfte erfolgt. Jedoch sind die Zeitverluste (Nebenzeiten) bedingt durch das Ablegen der Schraube durch Prozessoptimierungen zu minimieren und die Prozesssicherheit, insbesondere bei der Formschlusserstellung, entsprechend der Schwachstellenanalyse zu verbessern. Die nachfolgende Abbildung zeigt die Nutzwerte bei verschiedenen Gewichtungen:

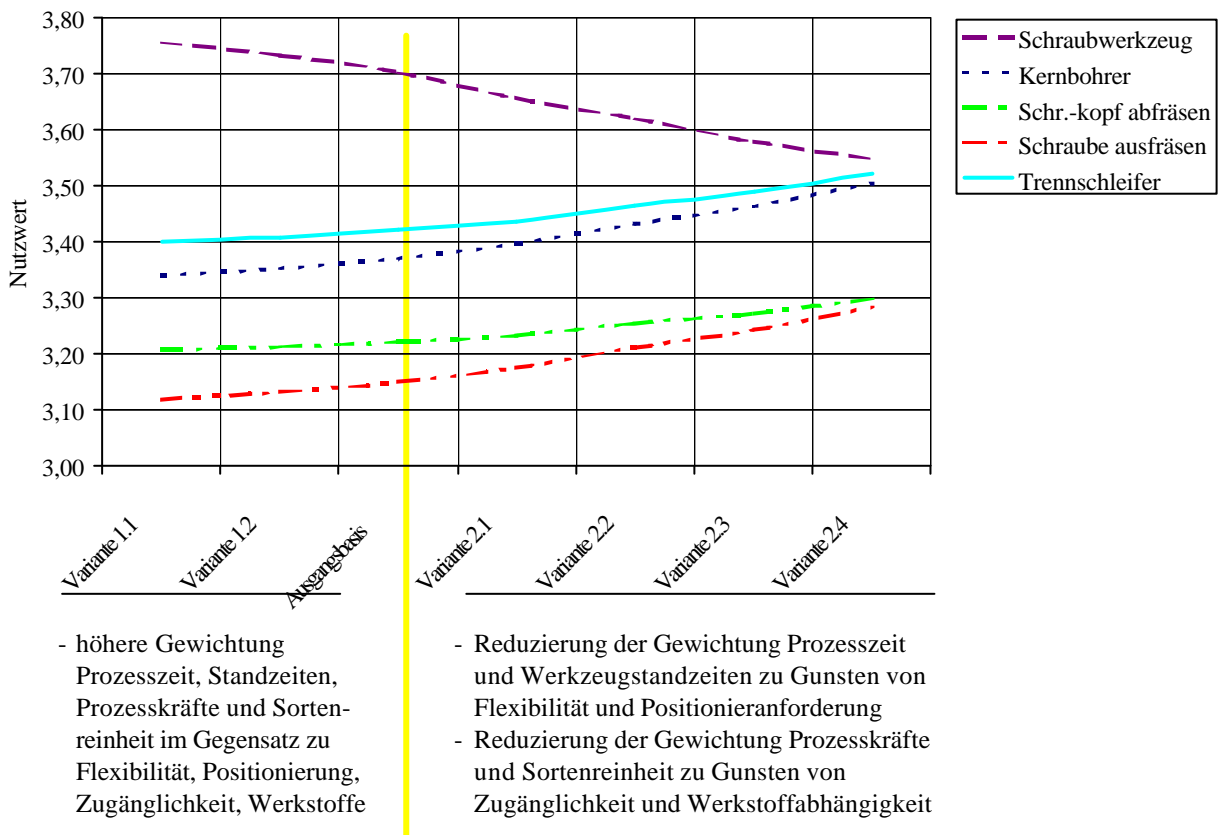


Abb. 4.5: Sensitivitätsanalyse zur Auswahl der Demontagestrategie

Die Sensitivitätsanalyse zeigt, dass bei Reduzierung der Gewichtung Prozesszeit und Werkzeugstandzeiten zu Gunsten von Flexibilität und Positionieranforderung sowie bei Reduzierung der Ge-

wichtung Prozesskräfte und Sortenreinheit zu Gunsten von Zugänglichkeit und Werkstoffabhängigkeit sich der Nutzwert des Schraubwerkzeuges zu Gunsten der anderen Verfahren reduziert und sich die Nutzwerte der Verfahren Schrauben, Kernbohren und Trennschleifen annähern.

Somit wird als Alternative zum Schrauben das Lösen der Verbindung mit Hilfe eines Kernbohrers oder Trennschleifers empfohlen. Das Lösen von Schraubenverbindungen durch Trennschleifer ist zu empfehlen, wenn man seitlich an die Schrauben herankommen kann, wie z.B. beim Lösen der Ablenk-einheit. Die zerstörenden Strategien werden alternativ eingesetzt, wenn die Schraubenverbindungen nicht zerstörungsfrei gelöst werden können.

Wie diese Analyse der Demontageprozesse von Verbindungselementen zeigt, muss für die Aufrechterhaltung der Flexibilität und der Prozessverfügbarkeit in der automatisierten Demontagezelle typischerweise eine Zusammenstellung mehrerer, zerstörungsfreier und zerstörender Trenntechnologien erfolgen. Daher werden neben Schraubwerkzeugen Kernbohrer und Trennschleifer eingesetzt, um so eine ausreichende Rüstflexibilität der automatisierten Demontageanlage gegenüber Produkten und Produktzuständen zu ermöglichen. Während eine Bereitstellung von Kernbohrern und Trennschleifern auf Basis von Komponenten entsprechend dem Stand der Technik erfolgt, besteht für die Realisierung von automatisierten Zerlegewerkzeugen (Schraubwerkzeug) noch ein Weiterentwicklungsbedarf.

## **4.4 Analyse des Trennprozesses Zerlegen von Schraubverbindungen**

### **4.4.1 Theoretische Analyse des Zerlegeprozesses**

Der Trennvorgang „Zerlegen von Schraubenverbindungen“ lässt sich bei detaillierter Betrachtung in drei zeitlich aufeinanderfolgende Prozessphasen untergliedern [78]:

- Phase 1: Formschlusserstellung zwischen Schraubwerkzeug und Schraubkopf,
- Phase 2: Lösen der Schraubenverbindung durch Überwindung des Anzugsmomentes,
- Phase 3: Ausdrehen der Schraube zur vollständigen Lösung der Verbindung.

Abbildung 4.6 zeigt die einzelnen Zerlegeprozessschritte und die während der jeweiligen Phase wichtigen Einflussgrößen, die relevanten Trennprozessparameter und, daraus abgeleitet, die Zielfunktionen von Schraubzerlegevorrichtungen, die während der einzelnen Phasen zu erfüllen sind:

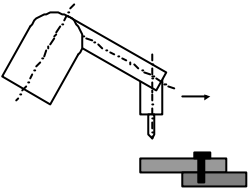
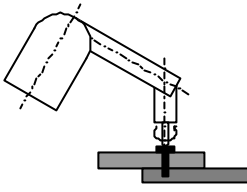
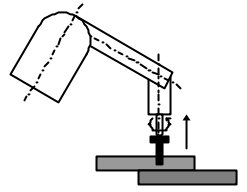
Prozessphase	1. Formschlusserstellung	2. Lösen	3. Ausdrehen
			
<b>Einfluss Produktgestaltung</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Position</li> <li>• Trennrichtung</li> <li>• Kopfgeometrie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Anzugsmoment</li> <li>• Kopfgeometrie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Schraubenlänge</li> <li>• Gewindemoment</li> </ul>
<b>Einfluss Produktzustand</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Drehwinkellage</li> <li>• Beschädigung Kopf</li> <li>• Verschmutzung</li> <li>• Korrosion</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vorspannung</li> <li>• Kopfreibung</li> <li>• Gewindereibung</li> <li>• Verschmutzung</li> <li>• Korrosion</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gewindereibung</li> <li>• Korrosion</li> </ul>
<b>Trennprozessparameter</b>	<b>Anfahrstrategie</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Lateralversatz</li> <li>• Angularversatz</li> <li>• Drehwinkelversatz</li> </ul>	<b>Lösestrategie</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Lösemoment</li> <li>• Axialkraft</li> <li>• Schrauberdrehzahl</li> </ul>	<b>Ausdrehstrategie</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Axialkraft</li> <li>• Schrauberdrehzahl</li> </ul>
<b>Zielfunktionen der Zerlegevorrichtung</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• große Nachgiebigkeit gegen Drehwinkel-, Angularwinkel- u. Lateralversatz</li> <li>• hohe Positioniergenauigkeit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• große Nachgiebigkeit gegen Lateralversatz</li> <li>• geringer Schrauberrückhub</li> <li>• große Steifigkeit gegen Torsionsbeanspruchung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• große Nachgiebigkeit gegen Drehwinkel-, Angularwinkel- u. Lateralversatz</li> <li>• hohe Positioniergenauigkeit</li> </ul>

Abb. 4.6: Trennprozessmodell Zerlegen von Schraubenverbindungen [78]

Die Formschlusserstellung wird im Wesentlichen durch die verschiedenen Schraubenkopfgeometrien und -größen beeinflusst. So muss mit Hilfe des Bildverarbeitungssystems die Schraubengeometrie ermittelt und das entsprechende Schrauberrückhub ausgewählt werden. Ferner muss die genaue Position und Wirkrichtung der Schraube feststehen. Nur so wird gewährleistet, dass der Roboter das Schraubwerkzeug in Wirkrichtung ohne Angularwinkelversatz (auch Kippwinkelversatz) an der genauen Position ansetzen kann.

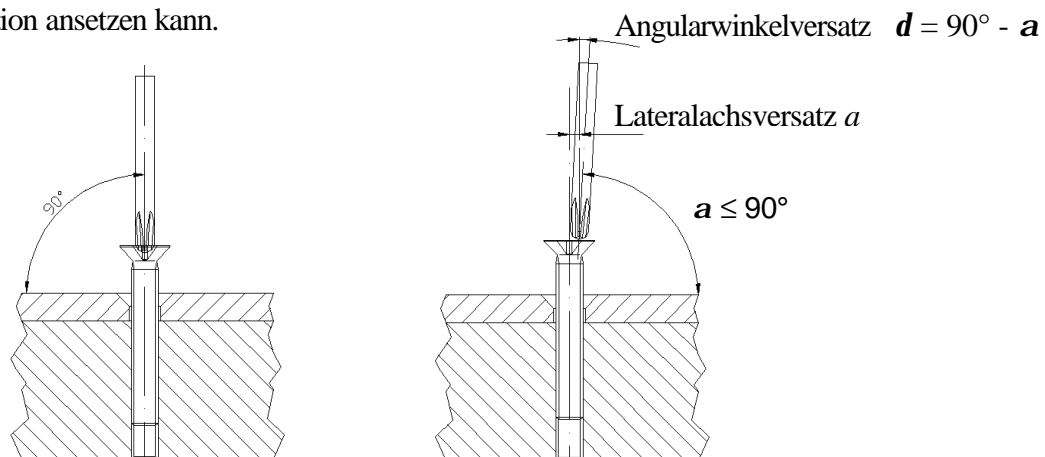


Abb. 4.7: Formschlusserstellung in Schraubenwirkrichtung und mit Angularwinkelversatz

Abbildung 4.8 verdeutlicht die Geometrieverhältnisse für die in Elektronikschrott auftretenden Schraubentypen [170, 171] und stellt die für die Formschlusserstellung fundamentale Zentrierbedingung zusammen, die sich berechnet aus dem Drehwinkel- und Lateralversatz:

	Außensechskant	Innensechskant	Kreuzschlitz	Schlitz
Schraubenkopftyp, Kopfgeometrie				
Werkzeugzentrierung am Schraubenkopf	außen	innen	innen	keine
Winkelteilung des Schraubwerkzeuges	60°	60°	90°	180°
Fügefase	$f_f = f_s = \frac{s_1 - e_1}{2}$	$f_f = f_{wz} = \frac{s_2 - e_2}{2}$	$f_f = f_{wz} = \frac{\varnothing m - d}{4}$	$f_f = f_{wz} = \frac{B - b}{2}$
Maxim. Drehwinkelversatz	± 30°	± 30°	± 45°	± 90°
Zentrierbedingung	$\sqrt{\left[a_y + \frac{e}{2} \sin d\right]^2 + \left[a_x + \frac{e}{2} (1 - \cos d)\right]^2} < f_f$		$\sqrt{a_x^2 + a_y^2} < f_f$	$a_x + \frac{s}{2} \sin d < \frac{B - b \cdot \cos d}{2}$ $\wedge a_y < \frac{s}{2}$

Abb. 4.8: Einflüsse auf die Formschlusserstellung in Abhängigkeit vom Schraubentyp [78]

Lateralversatz und Drehwinkelversatz besitzen bei der Erstellung des Formschlusses einen hohen Einfluss. Der maximale Drehwinkelversatz beim manuellem Schraubprozess entspricht der halben Winkelteilung des Schraubwerkzeuges. Der Lateralversatz ergibt sich aus  $\sqrt{a_x^2 + a_y^2}$ , wobei  $a_x$  und  $a_y$  dem Achsversatz zwischen Schraubenkopf und Schrauberbit entspricht. Der zu erwartende Lateralversatz zwischen Schraubenkopf und Schraubwerkzeug wird primär von der Positioniertoleranz des Demontageroboters und der Zentriereinrichtung bestimmt.

In der Abbildung 4.9 sind die Fügefasen je Schraubenkopftyp und Schraubengröße dargestellt:

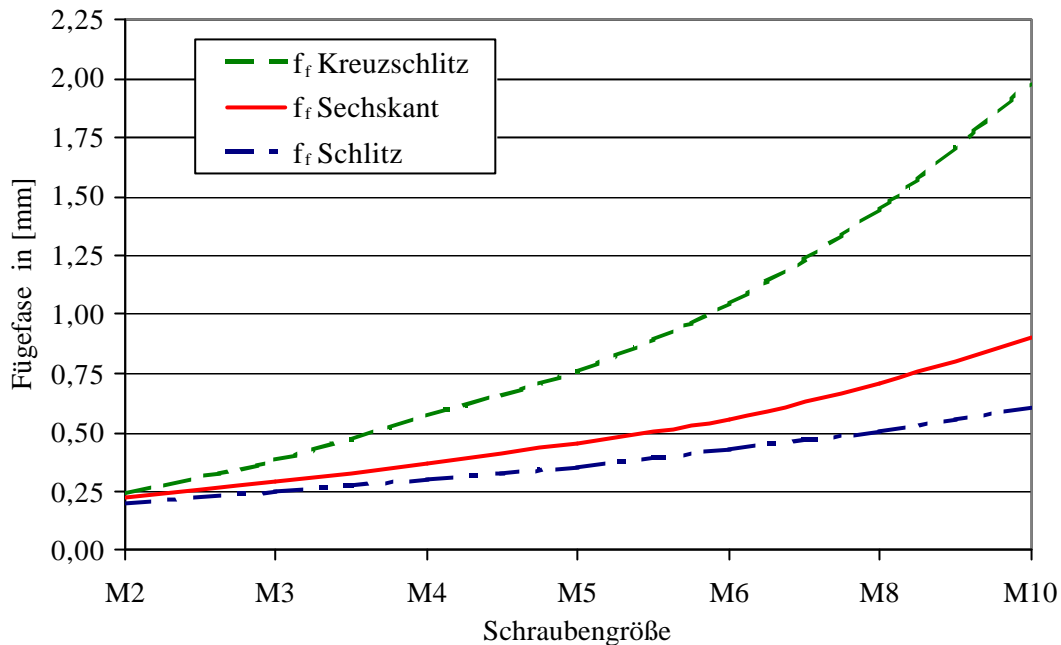


Abb. 4.9: Fügefasen unterschiedlicher Schraubenkopfgeometrien

Abbildung 4.9 zeigt, dass für die automatisierte Zerlegung von Schraubenverbindungen Kreuzschlitzschrauben besonders geeignet sind, da beim Lösen von Kreuzschlitzschrauben, aufgrund der großen Fügefase des Werkzeuges, ein Lateralversatz um mehrere Millimeter und, aufgrund der Innenzentrierung der Schraubenklinge, ein Drehwinkelversatz bis zu  $\pi/4$  ausgeglichen werden kann. Die Fügefase des Schraubenkopfes bzw. des Werkzeuges ist abhängig von der Schraubengröße und nimmt mit zunehmender Schraubengröße zu. Umgekehrt heißt das, dass mit sinkender Schraubengröße auch der mögliche Lateral- und Drehwinkelversatz sinkt [171 - 180].

Dem Diagramm ist ferner zu entnehmen, dass die Außen- und Innensechskantschrauben, aufgrund der deutlich kleineren Fügefasen je Schraubengröße, für die Zentrierung des Schraubwerkzeuges eine Erhöhung der Positioniergenauigkeit erforderlich machen. Hinsichtlich des Drehwinkelversatzes ist eine genaue Zentrierung im Winkelsekundenbereich beim Lösen von Außen- und Innensechskantschrauben erforderlich. Weiterhin zeigt das Diagramm, dass bei Schlitzschrauben höhere Anforderungen für den Ausgleich des Lateral- und Drehwinkelversatzes bestehen. Darüber hinaus entfällt die Möglichkeit zur Zentrierung der Schlitzschraubenklinge während der ersten Trennprozessphase, aufgrund fehlender mehrachsig symmetrischer Fügefasen. Die Schraubenkopfgeometrie und Schraubenkopfgröße beeinflusst also den möglichen Lateral- und Drehwinkelversatz bei der Formschlusserstellung, die bei Schlitzschrauben am kritischsten ist und mit sinkenden Schraubengrößen höhere Anforderungen an die Systeme stellt. Somit erfordert die Formschlusserstellung bei Außensechskant-, Innensechskant- und Schlitzschrauben entweder eine Erhöhung der Positioniergenauigkeit oder den Einsatz eines Toleranzausgleichsystems für den simultanen Ausgleich von Lateral- und Drehwinkelversatz. Neben dem Schraubenkopftyp und der Schraubengröße wird die Formschlusserstellung durch den Schraubenkopfzustand beeinflusst, wobei Verformungen, z.B. durch Überdrehen der Schraube beim Festdrehen oder Korrosion, die Anforderungen an die Formschlusserstellung weiter erhöhen [78].



## 4.4.2 Experimentelle Analyse des Zerlegeprozesses

### Beschreibung des Versuchsaufbaus

Für die Ableitung von wissenschaftlichen Grundlagen und Leistungswerten für die Auslegung des Schrauberwerkzeuges wurde ein Versuchsaufbau zum automatisierten Lösen von Schraubenverbindungen erstellt. Die Versuchsanlage wurde aus Komponenten der realisierten Demontagezelle aufgebaut:

- Portalroboter mit SPS-Steuerung,
- Pneumatikschrauber,
- Zentriervorrichtung,
- Werkstück mit unterschiedlichen Gewindegrößen (M3 bis M8),
- Winkelskala gekoppelt mit Schrauberspindel,
- Inkrementalgeber an der Welle zur Aufnahme der Drehzahl,
- Torsionswelle mit Dehnungs-Messstreifen
- 6 Schleifringkörper für Spannungsversorgung und Messwertübertragung der Dehnungs-Messstreifen,
- Trägerfrequenzmessverstärker mit Anschluss am PC zur Übernahme der Messwerte,
- PC zur Messwertauswertung.

Auf der Torsionswelle, welche zwischen Schrauberabtrieb und Schrauberbit integriert wurde, wurden die Dehnungs-Messstreifen wie folgt aufgebracht:

- Senkrechte Dehnungs-Messstreifen oben und unten an der Torsionswelle zur Aufnahme der axialen Druckkräfte
- Dehnungs-Messstreifen  $45^\circ$  und  $135^\circ$  zur Torsionswellenachse zur Drehmomentenaufnahme.

In das Werkstück wurden manuell verschiedene Schraubenkopftypen und Schraubengrößen eingedreht. Anschließend wurde das Werkstück in die Zentriervorrichtung eingespannt, so dass der Portalroboter senkrecht von oben die Schrauben lösen konnte.

### Experimentelle Kennzahlenermittlung

Um die Versuchsreihen möglichst effizient durchzuführen und statistisch abgesicherte Ergebnisse zu erhalten, wurden zunächst die von Krottmaier [181] beschriebenen Phasen zur Versuchsplanung durchlaufen. In der ersten Phase soll das der Untersuchung zugrunde liegende Problem möglichst eng umfasst werden. Für die automatisierte Zerlegung von Schraubenverbindungen bestehen die größten Probleme in der Erstellung des Formschlusses zwischen Schrauberbit und Schraubenkopf. Die durchgeführten Experimente konnten sich deshalb auf diesen Prozess beschränken. Im nächsten Schritt, der Problemanalyse, wurden als die für das Problem maßgeblichen Parameter die Drehgeschwindigkeit sowie Lateral-, Angular- und Drehwinkelversatz identifiziert. Nachfolgend ermöglichen die Techniken des Homing-In eine Reduzierung der zu untersuchenden Parameter. Möglich ist hier eine gewichtete Auswahl, bei der die einzelnen Bewertungskriterien frei definiert werden oder die auf dem Homing-In nach Shainin beruhende Streuungskartenanalyse. Da diese Phase allerdings nur sinnvoll bei mehr als 20 Parametern anzuwenden ist, wurde in diesem Fall bewusst darauf verzichtet. In der vierten und letzten Phase der Versuchsplanung wurde die Anzahl der durchzuführenden Versuchsreihen durch entsprechende Parameterkombinationen auf ein Minimum reduziert. Eine Orientierung bieten hierfür die von Taguchi entwickelten Orthogonaltafeln. So wurden als sinnvolle Versuchsreihen nachstehend genannte Parametervariationen identifiziert.

---

Folgende Versuche wurden zur experimentellen Analyse des Zerlegeprozesses durchgeführt:

1. In der ersten Versuchsreihe wurde der Einfluss des Lateralversatzes auf die Formschlusserstellung bei fehlendem Angular- und Drehwinkelversatz ermittelt. Hierzu wurde der Pneumatikschrauber am Portalroboter mit unterschiedlichen Achsversätzen positioniert.
2. In der zweiten Versuchsreihe wurde der Einfluss des Drehwinkelversatzes auf die Formschlusserstellung bei fehlendem Lateral- und Angularversatz ermittelt. Hier wurde der Pneumatikschrauber mit unterschiedlichen Drehwinkelversätzen ohne Achsversatz positioniert und der Formschluss ohne aktives Drehen der Schrauberspindel erstellt.
3. Für die Ermittlung des Einflusses der Drehgeschwindigkeit der Schrauberspindel auf die Formschlusserstellung wurde in der dritten Versuchsreihe der Pneumatikschrauber ohne Lateralversatz und mit einem undefinierten Drehwinkelversatz manuell positioniert und der Formschluss durch Drehen der Schrauberspindel erstellt.
4. Die vierte Versuchsreihe diente der Ermittlung des maximal möglichen Angularwinkelversatzes mit fehlendem Lateral- und Drehwinkelversatz, bei dem ein sicherer Formschluss sowie eine Übertragung des Löse- und Ausdrehmomentes gewährleistet wird. Hierbei wurden die Kippwinkel mit Hilfe der Robotersteuerung eingestellt.

In der Abbildung 4.10 sind die Einflüsse von Lateralversatz, Drehwinkelversatz, Drehgeschwindigkeit und Angularwinkelversatz der Schrauberspindel, bei einer konstanten Axialkraft  $F_A = 12 \text{ N}$ , auf die Formschlusserstellung für die kritischen Schraubenkopfgeometrien Außensechskant und Schlitzschraube bei minimaler Schraubengröße (M3) (s. Abb. 4.9) dargestellt, welche als statistische Mittelwerte aus mehreren Versuchsreihen ermittelt wurden.

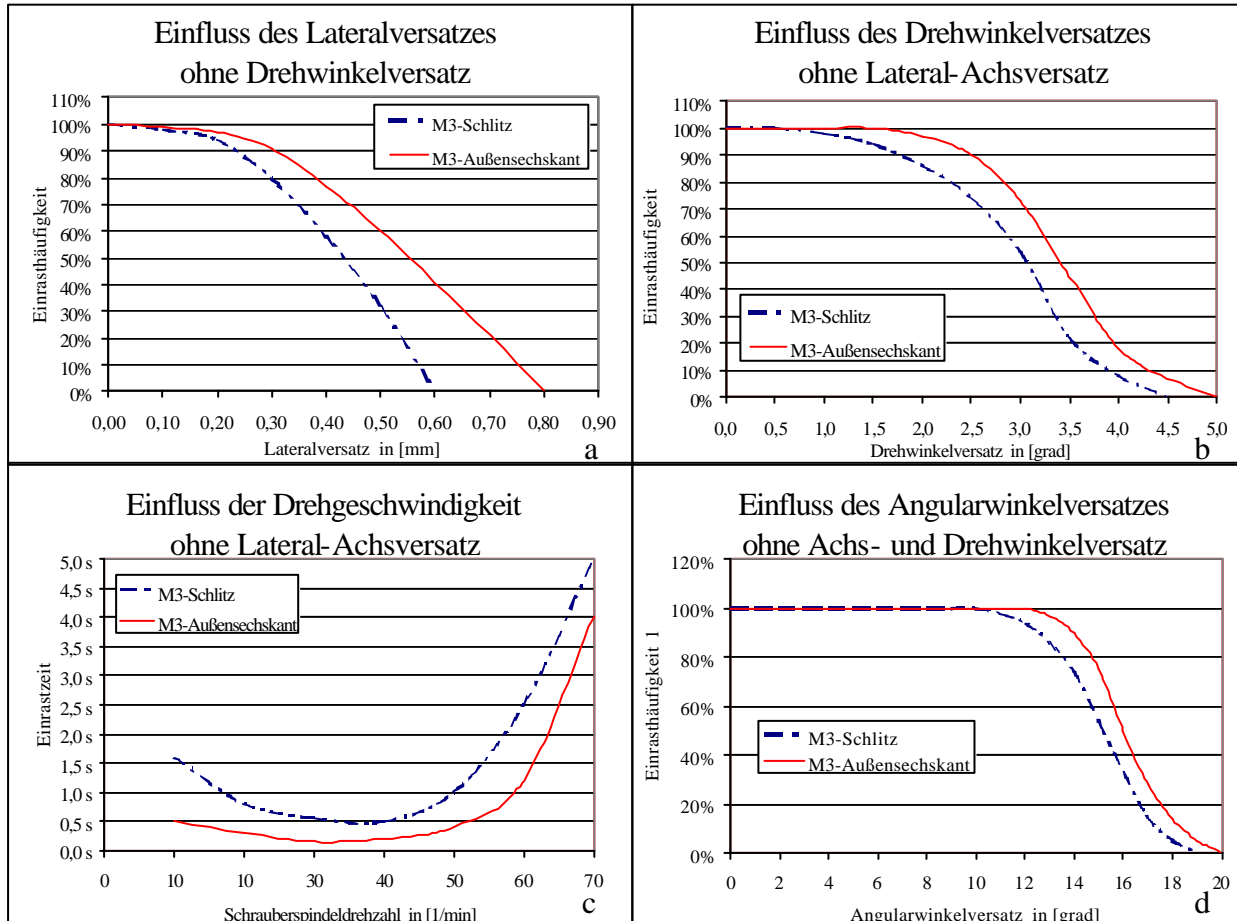


Abb. 4.10: Einflüsse auf die Formschlusserstellung

Aus den Abbildungen 4.10a und 4.10b lässt sich entnehmen, dass bereits ein geringer Lateral- und Drehwinkerversatz einen kritischen Einfluss auf die Formschlusserstellung besitzen. Die Versuchsreihen haben bestätigt, dass Schlitzschrauben die ungünstigsten Geometrieigenschaften gegenüber Kreuzschlitz-, Außen- und Innensechskantschrauben zur Formschlusserstellung besitzen. So kann ein Formschluss nur bis zu einem Achsversatz  $a \leq 0,3$  mm erfolgen, ein sicherer Formschluss mit einer Reproduzierbarkeit von 100% sogar nur bis zu einem Achsversatz  $a \leq 0,1$  mm.

Weiterhin zeigt Abbildung 4.10c, dass der Zeitbedarf für die Formschlusserstellung bei einem Drehwinkerversatz abhängig ist von der Drehgeschwindigkeit der Schrauberspindel. Die Versuchsreihen haben ergeben, dass sich der minimalste Zeitbedarf für die Formschlusserstellung bei einer Drehzahl der Schrauberspindel von zwischen  $w_{Lmin} = 30 \text{ min}^{-1}$  und  $w_{Lmax} = 40 \text{ min}^{-1}$  ergibt.

Aus der Abbildung 4.10d wird ebenfalls deutlich, dass ein Angularwinkerversatz oder ein Kippwinkel  $d$  zwischen Schrauber- und Schraubenachse in dem Intervall  $0^\circ < d < 9^\circ$  keinen Einfluss auf die Formschlusserstellung sowie auf das zu übertragende Lösemoment besitzt.

Neben der Ableitung von wissenschaftlichen Grundlagen und Leistungswerten für die Zerlegephase Formschlusserstellung, wurden in mehreren Versuchsreihen mit unterschiedlichen Szenarien die Einflüsse von Axialkraft und Drehwinkelgeschwindigkeit auf das Löse- und Ausdrehmoment ermittelt.

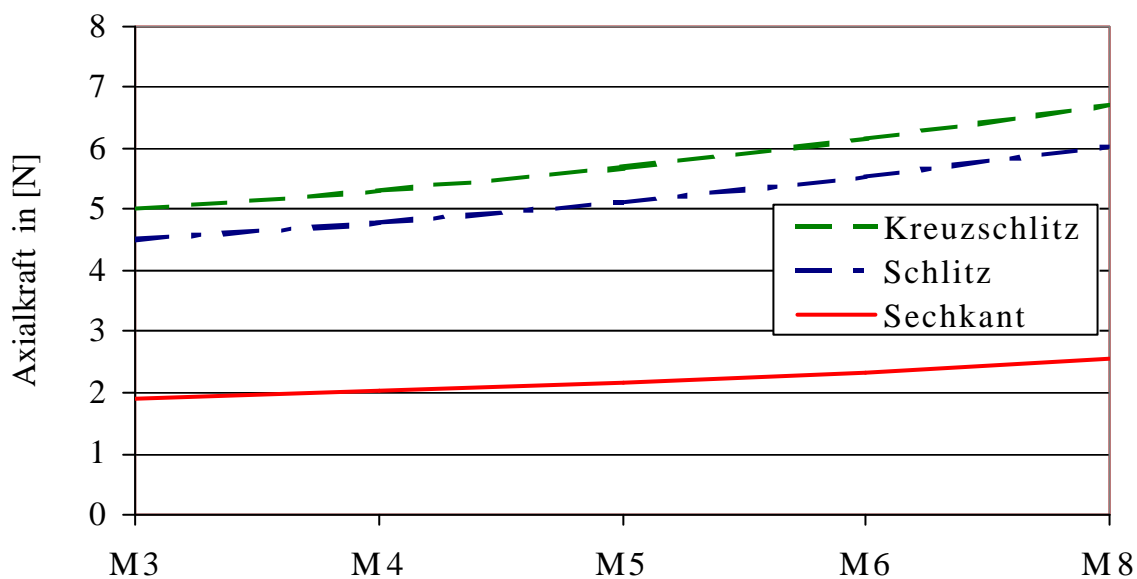


Abb. 4.11: Mindestaxialkraft für die Übertragung des Lösemomentes

Abbildung 4.11 zeigt die erforderliche Axialkraft für die Übertragung des Lösemomentes je Schraubenkopfgeometrie und -größe ohne Aufhebung des Formschlusses zwischen Schraubwerkzeug und Schraubenkopf. Aus der Abbildung geht hervor, dass Sechskantschrauben eine vernachlässigbare Axialkraft für die Übertragung des Lösemomentes benötigen. Die größte Axialkraft ( $F_A = 6,7$  N) beim Übertragen des Lösemomentes auf eine M8-Schraube ist bei Kreuzschlitzschrauben aufgrund der großen Fügefase des Werkzeuges erforderlich.

In der nachfolgenden Abbildung ist der ermittelte Einfluss der Axialkraft und der Schrauberspindeldrehzahl auf das reibungsbedingte Löse- und Ausdrehmoment dargestellt:

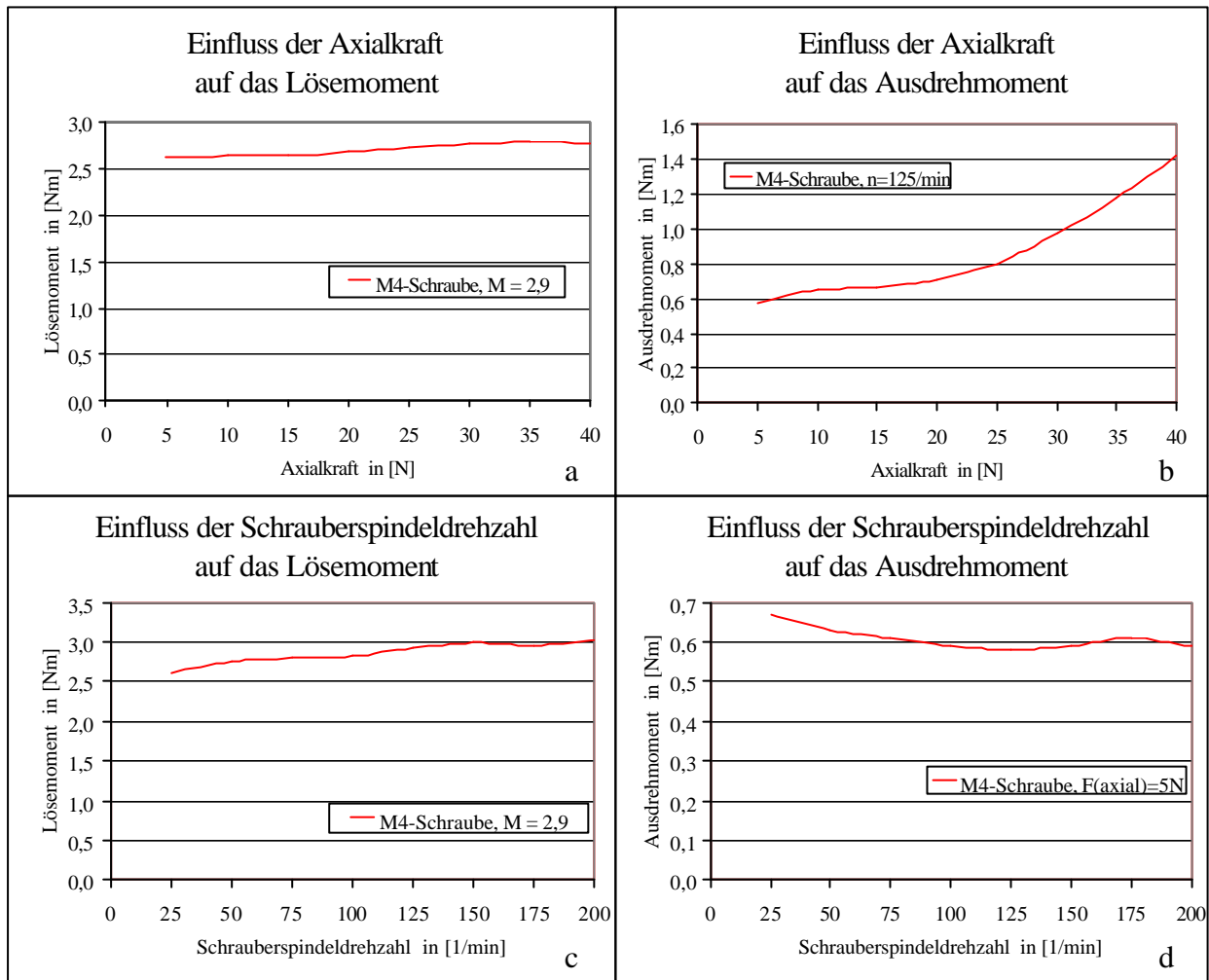


Abb. 4.12: Einflüsse von Axialkraft und Drehzahl auf Löse- und Ausdrehmoment

Die Versuchsreihen zur Ermittlung des Einflusses der Axialkraft zeigt in Abbildung 4.12a nur geringe Auswirkungen der Axialkraft auf das Lösemoment. Zum Lösen einer Schraubenverbindung ist das Lösemoment zu überwinden, welches aus den Reibwirkungen am Schraubenkopf und – bedingt durch die Zugspannungen der Schraube – am Gewinde resultiert. Durch die Einleitung der Axialkraft werden diese Reibungskräfte und somit auch das Lösemoment nicht beeinflusst, da bei zunehmender Axialkraft die Abnahme der Gewindereibung durch die Zunahme der Kopfreibung bei einem größeren Hebelarm kompensiert wird. Hingegen zeigt Abbildung 4.12b den deutlichen Einfluss der Axialkraft auf das Ausdrehmoment nach dem Überwinden des Lösemoments. Während der Ausdrehphase, in welcher nur Gewindereibungen der gelösten Schraube zu überwinden sind, liegt das Ausdrehmoment bei einer geringen Axialkraft von maximal  $F_{Amax} = 15\text{N}$  z.B. für eine M4-Schraube bei  $M_A \leq 0,7\text{ Nm}$ . Nimmt die Axialkraft jedoch zu, nimmt der Druck des Schraubengewindes auf das Innengewinde des Bauteils zu, so dass es zu einer erhöhten Gewindereibung kommt und somit das Ausdrehmoment mit steigender Axialkraft exponential zunimmt.

Die Schrauberdrehzahl besitzt nahezu keinen Einfluss auf das Löse- und Anzugsmoment (Abb. 4.12c und d), da der Gleitreibungskoeffizient unabhängig von der Drehzahl ist. Die Übertragung des Lösemomentes sollte mit einer möglichst geringen Drehzahl erfolgen, um einen si-

chere Formschlusssicherung zu gewährleisten. Während der Ausdrehphase ist die Drehzahl  $\omega$  um den Faktor 4 bis 5 zu erhöhen, um eine Ausdrehzeit deutlich geringer als bei der manuellen Demontage zu erhalten und das Ausdrehmoment geringfügig zu senken.

Die Ergebnisse der Versuchsreihen bezüglich der Einflüsse durch Lateral- und Drehwinkelversatz auf die Formschlusserstellung sowie der Einflüsse von Axialkraft und Drehzahl sind:

- Das Lösemoment wird in erster Linie vom Gewindetyp und dem Anzugsmoment bestimmt (Abb. 4.3). Verschmutzung, Korrosion und Gewindebeschädigungen können das aufzubringende Lösemoment um bis zu 45% erhöhen [78, 125, 183].
- Der mögliche Lateral- und Drehwinkelversatz wird zum einen durch die Schraubenkopfgeometrie beeinflusst. Schlitzschrauben sind besonders kritisch bei der Formschlusserstellung zu betrachten (s. Abb. 4.10 a und b).
- Zum anderen nimmt der mögliche Lateral- und Drehwinkelversatz mit sinkender Schraubengröße ab und erhöht die Anforderungen an die Formschlusserstellung (Abb. 4.9).
- Die Formschlusserstellungszeit ist abhängig von der Drehgeschwindigkeit  $\omega$  der Schrauberspindel. Da die Drehgeschwindigkeit keinen Einfluss auf das Löse- oder Ausdrehmoment besitzt (Abb. 4.12c/d), sollte die Drehzahl während der Übertragung des Lösemomentes zwischen  $w_{Lmin} = 30 \text{ min}^{-1}$  und  $w_{Lmax} = 40 \text{ min}^{-1}$  liegen, um einen sicheren Formschluss zu gewährleisten (Abb. 4.10 c).
- Während der Ausdrehphase sollte die Drehzahl der Schrauberspindel mindestens bei  $\omega_{Amin} = 200 \text{ min}^{-1}$  liegen, um eine deutlich geringere Ausdrehzeit als bei der manuellen Demontage zu erhalten.
- Zur Minimierung des Werkzeugverschleißes wird eine Axialkraft von  $F_A \leq 15 \text{ N}$  gewählt, die keinen Einfluss auf die Formschlusserstellung und das Lösemoment besitzt (Abb. 4.12 a und b). Mit höherer Axialkraft steigt auch das Ausdrehmoment proportional.
- Der Angularwinkelversatz oder Kippwinkel zwischen Schrauber- und Schraubenachse besitzt für den Bereich  $0^\circ < \boldsymbol{d} < 9^\circ$  keinen Einfluss auf die Formschlusserstellung (Abb. 4.10 d) und auf die Formschlusserhaltung während der Übertragung des Lösemomentes.

Das aufzubringende Lösemoment zu Beginn der Prozessphase 2 zum Lösen von Schraubenverbindungen wird primär von den Einflüssen der Produktgestaltung, der Schraubenkopfgeometrie und dem Anzugsmoment sowie von nutzungs- und alterungsbedingten Produktzustandsänderungen beeinflusst. Diese Produktzustandsänderungen wie Korrosion, Gewindereibung infolge von Verschmutzungen oder dem Aufquillen von Kunststoffgewinden tragen zur Erhöhung des Lösemomentes bis zu 45% bei [78, 125, 183]. Andererseits führt das Setzen von Schrauben zu einer Reduzierung des Lösemomentes gegenüber dem Anzugsmoment [128, 155]. Abbildung 4.13 zeigt die Einflussparameter auf die zweite Prozessphase Lösen, die im Wesentlichen durch die Produktgestaltung und den Produktzustand beeinflusst wird.

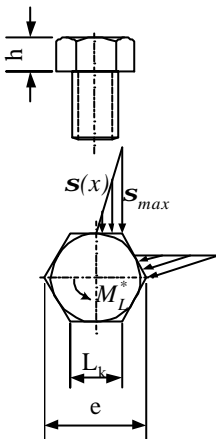
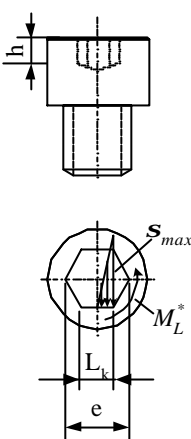
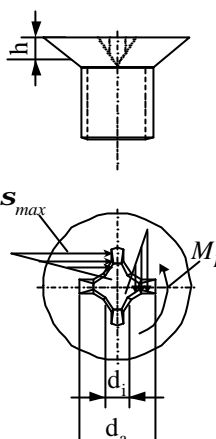
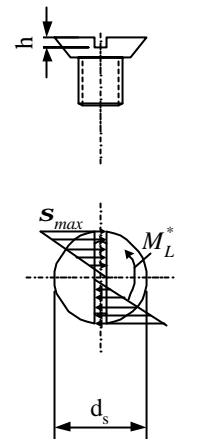
	Außensechskant	Innensechskant	Kreuzschlitz	Schlitz
Kräfte und Momente am Schraubenkopf				
Lösemoment [Tochtermann]	$M_L = F_v \cdot \left[ \frac{d_2}{2} \tan(\mathbf{d}_G - \mathbf{g}_m) + r_A \cdot \mathbf{m}_A \right]$			
alterungsbedingte Einflüsse	Korrosion des Gewindes, zusätzliche Gewindereibung durch Verschmutzung, Aufquellen von Kunststoffgewinden			
Lösemoment durch alterungsbedingte Einflüsse	$M_L^* = F_v \cdot \left[ \frac{d_2}{2} \tan(\mathbf{d}^* - \mathbf{g}_m) + r_A \cdot \mathbf{m}_A^* \right]$			
übertragbares Kopfmoment	$M_{Kii} = 6 \int_0^{\frac{h}{2}} \mathbf{s}(x) \cdot dx \cdot dA$ $M_{Kii} < \frac{3}{16} \mathbf{s}_{Hzul} \cdot h \cdot e^2$	$M_{Kii} = 4 \int_0^{\frac{d_a - d_i}{2}} \mathbf{s}(x) \cdot dx \cdot dA$ $M_{Kii} < \frac{\mathbf{s}_{Hzul} \cdot (d_a - d_i)^2}{8}$	$M_{Kii} = 2 \int_0^{\frac{d_s}{2}} \mathbf{s}(x) \cdot dx \cdot dA$ $M_{Kii} < \frac{1}{4} \mathbf{s}_{Hzul} \cdot d_s^2 \cdot h$	
Einflüsse auf Lösemoment	Verformung des Schraubenkopfes Korrosion des Schraubenkopfes			
übertragbares Kopfmoment bei verformtem Schraubenkopf	$M_{Kv} < \frac{3}{16} \mathbf{s}_{Hzul} \cdot h \cdot e^2 \cdot v_k^2$	$M_{Kv} < \frac{\mathbf{s}_{Hzul} \cdot (d_a - d_i)^3 \cdot v_k^3}{8 \cdot \tan \alpha}$	$M_{Kv} < \frac{1}{4} \mathbf{s}_{Hzul} \cdot h \cdot d_s^2 \cdot v_k^2$	

Abb. 4.13: Einflüsse auf die Lösbarkeit von Schraubenverbindungen [78, 182]

Um Schraubenverbindungen unter Berücksichtigung des durch nutzungs- und alterungsbedingte Einflüsse erhöhten Lösemomentes  $M_L^*$  zerstörungsfrei lösen zu können, muss das Lösemoment  $M_L^*$  kleiner als das übertragbare Kopfmoment unter Berücksichtigung des Schraubenkopfeszustandes und des Schraubenkopfabschirmmomentes sein. Somit muss für das zerstörungsfreie Zerlegen von Schraubenverbindungen gelten:

$$M_L^* < \text{MIN}(M_{Kii}; M_{Kabsch})$$

Ist das Lösemoment größer als das Kopfmoment oder das Schraubenkopfabschirmmoment und die Schraubenverbindung daher nicht zerstörungsfrei zerlegbar, muss die Schraubverbindung mit einem zerstörenden Trennverfahren, wie Aufbohren oder Abfräsen der Schraube, erfolgen. Mit einem Ab-scheren des Schraubenkopfes ist i.d.R. auch die Schraubenverbindung getrennt.

Das Ausdrehen der Schraube als letzte Trennprozessphase wird vor allem durch den Parameter Schraubenlänge beeinflusst. Alterungs- und nutzungsbedingte Einflüsse sind hier zu vernachlässigen. Am Ende dieser Prozessphase ist auf das sichere Herausziehen der Schraube zu achten, um so die Schraubenverbindung vollständig zu lösen.

Zur Bestimmung der aufzubringenden Lösemomente während der gesamten Trennprozessphase wurden für eine Kreuzschlitz-Blechschaube mit dem Nenndurchmesser 4,0 mm und eine M6-Außensechskantschraube, die – wie die Analyse der Schraubenverbindungen zeigte (s. Abschnitt 4.2) – am häufigsten in Bildschirmgeräten vorhanden sind, die Momentenverläufe während des gesamten Löseprozesses aufgenommen. Als Versuchsanlage diente die auf Seite 58 beschriebene Anlage. Abbildung 4.14 zeigt den gemessenen Momentenverlauf beim Lösen der Blechschaube mit dem Nenndurchmesser 4,0 mm und einem Anzugsmoment  $M_A = 2,8$  Nm sowie der M6-Außensechskantschraube mit einem Anzugsmoment  $M_A = 9,3$  Nm:

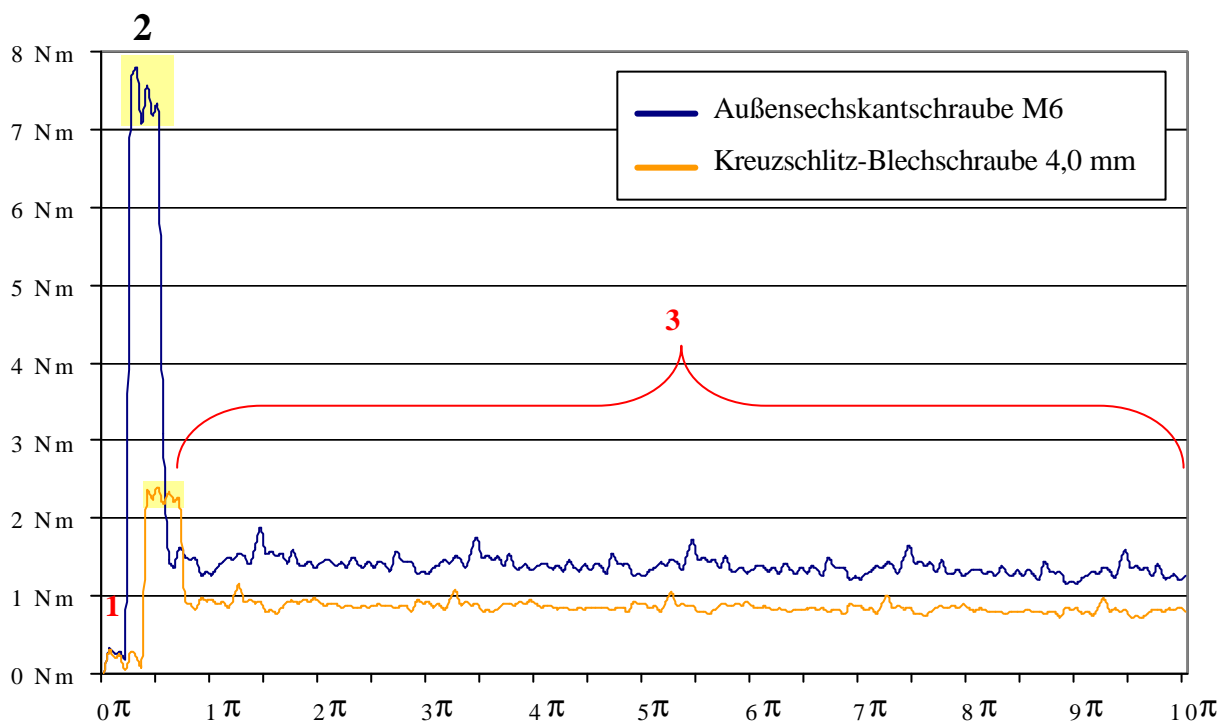


Abb. 4.14: Lösemomentenverlauf einer Blechschaube 4,0 mm und einer M6-Schraube

Zu Beginn des Trennprozesses in der Phase 1 erfolgt die Formschlusserstellung zwischen dem Schraubenkopf und dem eingesetzten Werkzeug. Hier zentrieren die Schrauber über Drehen der Spindeln mit minimalem Drehmoment die Schrauberbits - Schlitzschrauber Klinge und Nuss für M6-Außensechskantschraube - auf den Schraubenkopf. Entsprechend dem maximalen Drehwinkelversatz ist die Formschlusserstellung bei der Außensechskantschraube nach einem Drehwinkel von max.  $30^\circ$  ( $1/3 \pi$ ) und bei der Kreuzschlitzschraube nach einem Drehwinkel von max.  $45^\circ$  ( $1/2 \pi$ ) erreicht.

Im Anschluss an die schraubenkopfgeometrieabhängigen Winkeldrehung der Schrauberspindel zur Formschlusserstellung fällt in der zweiten Trennprozessphase beim Lösen der Schraubenverbindung

schlagartig das Lösemoment am Schrauberantrieb an. Bei der mit einem Anzugsmoment  $M_A = 9,2$  Nm festgedrehten M6-Schraube liegt das Lösemoment bei  $M_L = 7,9$  Nm, bei der Blechschraube mit dem Nenndurchmesser 4,0 mm, die mit einem Anzugsmoment  $M_A = 2,8$  Nm festgedreht wurde, liegt das Lösemoment bei  $M_L = 2,4$  Nm.

Nach dem Überwinden des maximalen Lösemomentes fällt der Momentenverlauf in der dritten Trennprozessphase, dem Ausdrehen, wieder ab und bleibt weitgehend konstant bis zum Ende des Löseprozesses. Dabei wiederholen sich innerhalb einer Umdrehung des Schrauberbits um  $360^\circ$  ( $2\pi$ ) zyklische Momentensprünge, bedingt durch Beschädigung der Gewindegänge, Verunreinigungen oder Korrosion. Zum Ende der Ausdrehphase fällt das Lösemoment auf annähernd Null ab und der Löseprozess wird beendet.

Die Analyse der Trennprozesse zeigt den Einfluss von Schraubenkopfgeometrie und Schraubengröße auf den Lateral- und Drehwinkelversatz, die Abhängigkeit des Lösemomentes vom Gewindetyp und Anzugsmoment sowie den Einfluss der Drehzahl und der Axialkraft auf das Lösemoment und die Formschlusserstellungszeit. Somit ist zum Erreichen einer maximalen Prozesssicherheit bei minimaler Trennprozesszeit in den Trennprozessphasen 1 und 2 eine minimale Drehzahl mit erhöhter Axialkraft auf die Schraubenverbindung zu übertragen. In der dritten Prozessphase, dem Ausdrehen der Schraube, ist, zur Minimierung der Prozesszeit, die Drehzahl des Schraubers zu erhöhen und die Axialkraft gleichzeitig zu reduzieren.

#### 4.5 Ableitung von Anforderungen an ein Entschraubungswerkzeug

Aus den allgemeinen Anforderungen an ein automatisiertes Demontagesystem und den ermittelten Schwachstellen des Ist-Zustandes sowie der Analyse der zu lösenden Schraubentypen und des Trennprozesses ergeben sich die Anforderungen für die Weiterentwicklung eines Zerlegewerkzeuges zum Lösen von Schraubenverbindungen mit den Vorgaben einer Prozesssicherheit und Reproduzierbarkeit von größer 98 % bei minimaler Prozesszeit:

1. Geringfügige Positionierabweichungen bzw. Lateral-Achsversätze müssen durch Ausgleichsmodule kompensiert werden, um so möglichst hohe Positioniertoleranzen zu ermöglichen und möglichst geringe Rückstellkräfte zu erzeugen. Weiterhin muss das Schrauberbit während der Ausdrehphase der Wirkrichtung der Schraube, bedingt durch die Gewindeführung, folgen. Hier ist eine achsgerade Führung der Schraubspindel während des Ausdrehvorgangs erforderlich, wobei ein Kippwinkel  $d_{max} < 9^\circ$  nicht den Löseprozess beeinflusst.
  2. Zeitparallel zur Rotation muss eine drehzahlproportionale Translationsrückhubbewegung mit einer axialen Nachgiebigkeit möglich sein. Schwankungen der Translationsgeschwindigkeiten, bedingt durch Gewindesteigungstoleranzen sowie durch reibungsbeeinflusste Schwankungen, müssen kompensiert werden.
  3. Die Drehzahl und Axialkraft muss regelbar sein, um so mit minimaler Drehzahl den Formschluss zu ermöglichen, anschließend bei gleichbleibender minimaler Drehzahl mit erhöhter Axialkraft das Lösemoment aufzubringen und nach dem Lösen der Schraubenverbindung die Schraube mit hoher Drehzahl und geringer Axialkraft ausdrehen. Somit wird eine hohe Prozesssicherheit mit geringer Lösezeit erreicht.
-



4. Das aufzubringende Lösemoment sollte mindestens  $M_L = 21$  Nm betragen. Dabei ist die Verwindungssteifigkeit des Schraubwerkzeuges auf die auftretenden Reaktionsmomente – insbesondere bei der Überwindung des Anzugsmomentes – auszulegen.
5. Das Ablegen der Schrauben muss flexibel mit minimalen Roboterbewegungen ermöglicht werden, um so den größten Zeitanteil des Löseprozesses zu minimieren.
6. Der gesamte Zerlegeprozess muss überwacht werden. Dies bedingt, dass der Schraubprozess durch im Schraubwerkzeug integrierte Sensoren zur Erfassung von Drehwinkelgeschwindigkeit, Drehmoment und Axialkraft gesteuert wird.
7. Störkanten der Demontageobjekte sind zu umgehen (Zugänglichkeit). Das erfordert praxistaugliche Abmessungen des Schraubwerkzeuges mit einem maximalen Durchmesser von 38 mm und einer Länge von 80 mm, um eine möglichst hohe Beweglichkeit des Roboters im Arbeitsraum zu ermöglichen.
8. Die Leitsystemsteuerung ist bezüglich der Flexibilitätserhöhung gegenüber Schraubenarten zu erweitern, so dass zunächst alle Schraubentypen geprüft werden und parallel alle Schraubenverbindungen eines Typs gelöst werden, um so die Anzahl der Werkzeugwechsel zu minimieren.
9. Die allgemeinen Anforderungen an Trennsysteme müssen berücksichtigt werden:
  - Die Masse des Trennwerkzeuges darf maximal 10 kg betragen (Grund: maximales Handhabungsgewicht des Demontageroboters).
  - Das Trennwerkzeug muss für eine freie Zugänglichkeit des Wirkorgans zu den Schrauben möglichst schlank sein.
  - Nutzung der Standardschnittstelle zum Demontageroboter
  - vollautomatischer Werkzeugwechsel
  - Rüstflexibilität zur Erweiterung der Produktpalette (modularer Aufbau)
  - möglichst kostengünstige Verwendung von Standardkomponenten, die bereits in der Schraubenmontage erprobt sind.

Neben den technischen Anforderungen an das Zerlegewerkzeug, bedingt durch die Trennprozessanalyse, Schraubenverbindungsarten und vorhandener Schwachstellen, ist das Arbeitsmedium festzulegen. In Betracht kommen zwei Möglichkeiten der Energiezuführung. Am Greiferwechselsystem des Demontageroboters stehen sowohl elektrische als auch pneumatische Energie zur Verfügung. Bei Einsatz von pneumatischen Schraubern muss entsprechend der erforderlichen Werkzeugleistung der Arbeitsdruck ermittelt und der sich hieraus ergebene Querschnitt der Schlauchzuleitungen festgelegt werden. Alternativ sind elektrisch betriebene Schrauber zu betrachten. Für ihre Energiezuführung sind die Zuleitungsquerschnitte zu ermitteln und die Strombelastbarkeit der Steckverbindungen am Wechselsystem zu beachten.

---

Pneumatikwerkzeuge können aufgrund ihrer großen Leistungsdichte hohe lineare Kräfte und Drehmomente übertragen. Sie stellen im Gegensatz zu elektrischen Werkzeugen das volle Drehmoment auch im Stillstand ohne Energieverbrauch zur Verfügung und sind bis zum Stillstand ohne nachteilige Folgen überlastbar. Elektrisch betriebene Werkzeuge stellen im Stillstand nur ein geringes Drehmoment zur Verfügung und dürfen nicht überlastet werden. Sowohl elektrische als auch pneumatische Werkzeuge lassen sich einfach und stufenlos regeln. Bei Pneumatikwerkzeugen erfolgt eine einfache Regelung des Pneumatikdrucks über Druckregelventile im Bereich 1:10. Die Regelung des Pneumatikdrucks kann lastabhängig erfolgen. Die Geschwindigkeiten linearer (Vorschubgeschwindigkeit) oder rotierender Bewegungen (Drehzahlgeschwindigkeit) lassen sich einfach über Drosselventile oder Schnellentlüftungsventile steuern [184]. Abluftgeräusche von Pneumatikwerkzeugen können durch Verwendung von Schalldämpfern auf Werkstattgeräuschniveau minimiert werden. Pneumatische und elektrische Werkzeuge besitzen eine hohe Lebensdauer, jedoch können bei Pneumatikwerkzeugen aufgrund der mechanischen Beanspruchungen gelegentlich Reparaturen anfallen. Pneumatikwerkzeuge besitzen wegen ihrer großen Leistungsdichten eine kleinere Baugröße und ein geringeres Gewicht. Die Energiekosten bei Pneumatikwerkzeugen sind im Vergleich zu elektrischen Werkzeugen höher. So kostet 1 m<sup>3</sup> Druckluft mit 6 bar je nach Anlage und Nutzungsgrad 0,01 EUR bis 0,02 EUR. Somit liegen die Energiekosten für Pneumatikwerkzeuge bei 0,1 bis 0,2 EUR/kWh, für elektrische Werkzeuge bei 0,05 EUR/kWh. Im Gegensatz zu den Energiekosten sind die Investitionskosten für Pneumatikwerkzeuge geringer als für elektrische Werkzeuge [185, 186, 187].

Für die Auswahl des Arbeitsmediums für das automatisierte Schraubwerkzeug muss das ganze System vom Eingangssignal bis zum ausführenden Antriebsglied berücksichtigt werden. Aufgrund der geringen Arbeitsspiele besitzen die höheren Energiekosten der Druckluft eine untergeordnete Rolle. Die Vorteile des Pneumatikschraubwerkzeuges gegenüber einem elektrischen Schraubwerkzeug liegen in der einfachen und stufenlosen Regelung der Geschwindigkeiten, der Linearkräfte und der Drehmomente sowie in der Belastbarkeit bis zum Stillstand und der geringen Störanfälligkeit. Ausschlaggebend ist jedoch die geringere Baugröße (Abmessungen sind ca. 20 – 40% kleiner) und das geringere Gewicht (ca. 50 – 70% geringeres Gewicht) eines Pneumatikwerkzeuges gegenüber einem Elektroschrauber bei gleichem Leistungsgrad, aufgrund der großen Leistungsdichte zur Übertragung hoher Kräfte und Momente. Aufgrund der geringeren Baugröße kann eine bessere Zugänglichkeit und Beweglichkeit des Werkzeuges ermöglicht werden. Aufgrund des geringeren Gewichtes des Pneumatikschraubers, der durch den Demontageroboter bewegt und positioniert werden muss, ist eine geringere Traglast des Roboters erforderlich. Weiterhin führen die geringeren Traglasten zu einer minimierten dynamischen Auslenkung der Roboterachsen und somit zu größeren Beschleunigungswerten und kürzeren Positionierzeiten.

	Pneumatikantrieb	Elektroantrieb
Vorteile	+ Leistungsgewicht + Überlastbar: höchstes Moment im Stillstand	+ geringerer Steuerungsaufwand
Nachteile	- hoher Geräuschpegel - teure Energie - mechanische Belastung => Wartungsaufwand	- höhere Investitionskosten - nicht überlastbar - geringere Kräfte => höhere Übersetzung erforderlich

## 4.6 Konzeption eines Toleranzausgleichsverfahrens

### 4.6.1 Ziele für den Einsatz eines Toleranzausgleichsverfahrens

Die Positioniergenauigkeit bei der flexiblen Demontageautomatisierung mit Industrierobotern kann als allgemeines Querschnittsproblem bei allen Demontageprozessen gesehen werden. Die höchsten Ansprüche an die Positioniergenauigkeit treten beim Demontagevorgang „Zerlegen von Schraubenverbindungen“ auf, der sowohl der häufigste als auch der komplexeste Trennprozess ist. Das spezifische Problem des Trennvorgangs „Zerlegen von Schraubenverbindungen“ ist zum einen, bei der Formschlusserstellung Positionierabweichungen bedingt durch Lateral-Achsversätze und Drehwinkelversätze zu kompensieren. Zum anderen muss eine Rotationsbewegung mit der Abstützung der Reaktionsmomente und dazu koordiniert eine axiale Rückhubbewegung entsprechend der Schraubenachse erzeugt werden. Abbildung 4.15 zeigt die spezifischen Probleme des Trennvorgangs „Zerlegen von Schraubenverbindungen“.

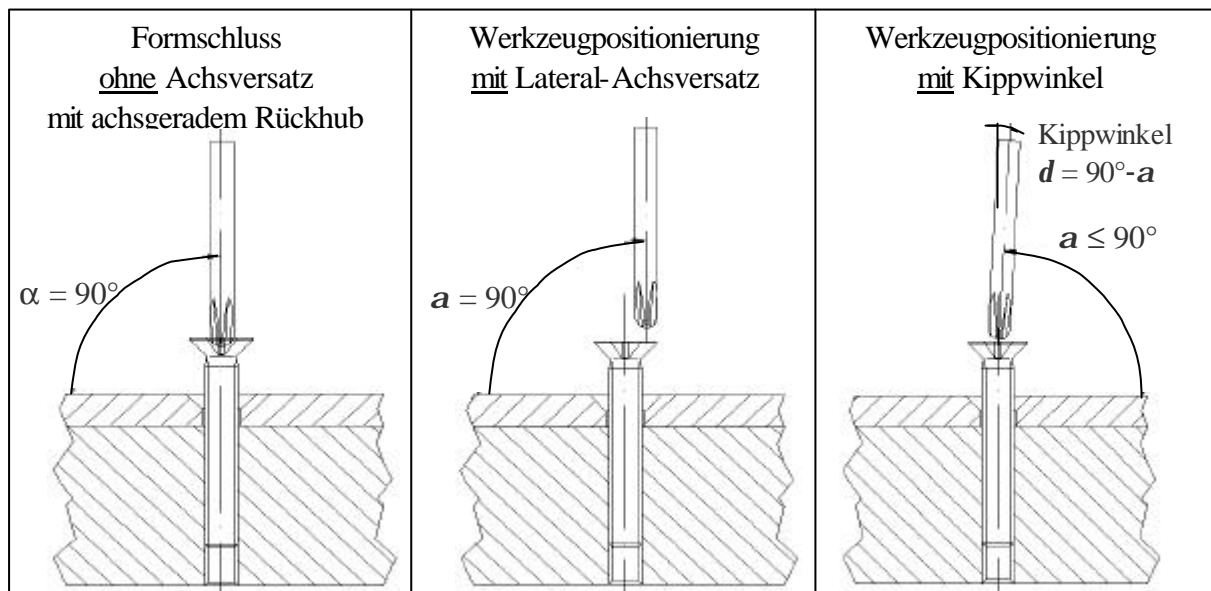


Abb. 4.15: Spezifische Probleme des Trennvorgangs „Zerlegen von Schraubenverbindungen“

Aus der Abbildung 4.15 lassen sich die spezifischen Probleme während der Trennprozessphasen Formschlusserstellung und Ausdrehen von Schrauben erkennen:

- Aufgrund der Toleranzen an Schraubenkopf [188] und Schraubwerkzeug [189] existiert zwischen Werkstück und Werkzeug je nach Toleranzlage ein Kopfspiel. Dieser Achsversatz ist zum einen durch Positioniertoleranzen des Demontagesystems zum anderen durch fertigungsbedingte Toleranzen des Werkstückes begründet.
- Der maximale Kippwinkel  $d$  zwischen Schrauber- und Schraubenachse muss der Angularwinkelversatzbedingung für die Formschlusserstellung entsprechen und kleiner  $9^\circ$  sein.
- Mit Industrierobotern als Handhabungseinheit von Schraubwerkzeugen lassen sich Trennprozesse mit beliebiger Winkelorientierung der Schrauberachse durchführen. Daher kann die Problematik des Verkippens der Schraube im Schraubwerkzeug infolge eines Formschlusses des Schrauberbits und der Schraube mit richtigen Raumkoordinaten, aber falscher Wirkrichtung, auftreten. Dieser Kippwinkel  $d$  ( $d = 90^\circ - a$ ) zwischen Schrauberachse und Gewindemittelachse bewirkt mit zunehmender Ausdrehlänge eine Zunahme des Lateralversatzes. Bedingt durch den

Kippwinkerversatz zwischen Schrauberachse und Schraubenachse wird eine laterale Kraft  $\alpha$  erzeugt. Die auftretenden Rückstellkräfte müssen minimiert und kompensiert werden.

- Zu Beginn des Löseprozesses muss ein von der Klemmkraft und dem Reibungskoeffizienten  $m$  abhängiges Lösemoment  $M_L$  drehsteif übertragen werden.
- Vom Zeitpunkt des Ansetzens bis zur Beendigung des Ausdrehens der Schraube muss vom Schraubwerkzeug neben dem Lösemoment  $M_L$  eine definierte axiale Kraft  $F_{ax}$  erzeugt werden, die groß genug ist, um den Formschluss zwischen Schraube und Schraubwerkzeug aufrecht zu erhalten. Andererseits ist die axiale Druckkraft zu begrenzen, um den Werkzeugverschleiß zu minimieren. Dabei muss beim Überwinden des Lösemomentes zu Beginn des Löseprozesses eine erhöhte Axialkraft übertragen werden. Anschließend wird beim Ausdrehen der Schraube die Axialkraft reduziert.
- Neben der Realisierung einer drehzahlproportionalen, axialen Translationsrückhubbewegung der Schrauberspindel besteht die Möglichkeit einer Geschwindigkeitsanpassung zwischen Bit und Schraubenkopf über eine axiale Nachgiebigkeit, um Schwankungen, bedingt durch Gewindesteigungstoleranzen oder durch unterschiedlich starke Reibungseinflüsse, zu kompensieren.

Das Schraubmodul muss folglich in der Lage sein, trotz mechanischer Steifigkeit gegenüber Drehmomenten um seine Längsachse während der Prozessphase Formschlusserstellung Positionierfehler auszugleichen, während der Lösephase Reaktionsmomente zu kompensieren und während der Ausdrehphase der Schraube diese in Längsrichtung definiert zu folgen sowie eine prozessphasenabhängige Drehzahl und Axialkraft zu übertragen.

Die theoretischen und experimentellen Untersuchungen des Trennprozesses „Zerlegen von Schraubenverbindungen“ zeigen somit die Notwendigkeit der Entwicklung von Modulen und Verfahren für die Formschlusserstellung beim Lösen von Schraubenverbindungen auf. Das Problem der Formschlusserstellung beim Zerlegen von Schraubenverbindungen lässt sich in Erweiterung des aus der Montagetechnik bekannten Bolzen-Loch-Problems darstellen als [190, 191, 192]

- Minimierung des Lateralversatzes zwischen Schrauberbit und Schraubenkopf durch Ausgleich der Positioniertoleranzen (in Anlehnung an das Bolzen-Loch-Problem) und
- Minimierung des Drehwinkerversatzes zwischen den Wirkflächen des Schrauberbits und des Schraubenkopfes zur Erfüllung der Zentrierbedingung.

Lageabweichungen zwischen den Wirkflächen des Schraubenkopfes und des Schrauberbits werden als Lateral-Achsversatz bezeichnet und treten hier insbesondere auf durch:

- Positionierfehler durch eingeschränkte Positioniergenauigkeit der Industrieroboter [193],
- Toleranzen im Greiferwechselsystem [194, 195],
- Toleranzen des Bildverarbeitungssystems [196],
- fertigungsbedingte Lagetoleranzen des Gewindelochs bzw. der Schraube im Werkstück,
- vorrichtungsbedingte Positioniertoleranzen der Zentrier- und Spannvorrichtung für die Elektronikgeräte.

## 4.6.2 Systematik der Toleranzausgleichsverfahren

Für den Ausgleich von Lageabweichungen nach der Grobpositionierung des Schraubwerkzeuges durch den Demontageroboter ist die Entwicklung eines Toleranzausgleichsverfahrens erforderlich, um eine Formschlusserstellung zwischen Schrauberbit und Schraubenkopf zu gewährleisten.

Die Korrekturbewegungen des Schrauberbits relativ zum Schraubenkopf werden nach der Art der Bewegung unterteilt in [210, 211]:

- Toleranzausgleich durch Bewegung der Bildschirmgeräte auf dem Demontagetisch,
- Toleranzausgleich durch Bewegung des Schraubwerkzeuges.

Für den Toleranzausgleich durch Bewegung der Bildschirmgeräte auf dem Demontagetisch müssen große Massen bewegt werden. Um die für feinwerktechnische Demontageaufgaben benötigten Positioniergenauigkeiten zu erreichen, müssen hohe technische Anforderungen an die Antriebselemente für die Feinpositionierung der großen Massen erfüllt werden.

Beim Toleranzausgleich durch Korrekturbewegungen des Werkzeuges werden kleinere Massen bewegt, so dass hier eine höhere Flexibilität ermöglicht und ein schnellerer Toleranzausgleich erzielt wird. Die Korrekturbewegungen erfolgen somit mit Hilfe des Demontageroboters oder eines Ausgleichsmoduls zwischen dem Schrauberbit und dem Roboterarm. Folgende Toleranzausgleichsverfahren sind realisierbar:

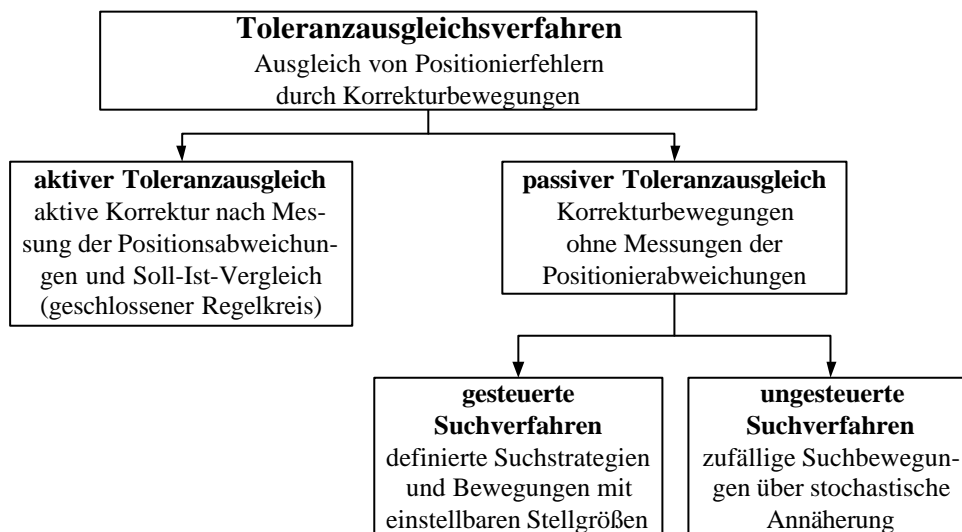


Abb. 4.16: Einteilung von Toleranzausgleichsverfahren [in Anlehnung an 197, 198, 199]

Für den aktiven Toleranzausgleich sind Messsysteme für den Aufbau eines geschlossenen Regelkreises erforderlich, deren Sensorik sowohl die Position der Schraubenwirkflächen als auch die Position des Schrauberbits messen und nach einer Auswertung der Messwerte die genauen Positionsabweichungen und den Bewegungsvektor für die Feinpositionierung ermitteln [200]. Als Messsysteme für den aktiven Toleranzausgleich lassen sich folgende Sensoren einsetzen, die nach berührungsloser und berührender Sensorik unterschieden werden:

- berührungslose Positionsmessung mit optischen Sensoren wie Bildverarbeitung, Lasermesssysteme oder Fotosensoren [200, 201, 202] sowie
- berührende Positionsmessung mit taktilen Sensoren wie Matrixtaster [203, 204, 205].

Bei geregelten Toleranzausgleichsverfahren erfolgt die Positionsermittlung der Schraubenwirkflächen und des Schrauberbits mit berührungsloser oder berührender Sensorik. Auf Basis der Positionsermittlung wird die Größe und Richtung der erforderlichen Korrekturbewegung abgeleitet. Dabei erfolgt die Formschlusserstellung zwischen Schraubenwirkfläche und Schrauberbit teilweise nach mehreren Ausgleichszyklen. Die Anzahl der Ausgleichszyklen wird bestimmt durch die Toleranzen der Sensorik und der Positioniertoleranzen des Demontagesystems. Aufgrund der erforderlichen Messwerterfassung, -auswertung und Feinpositionierung in teilweise mehreren Zyklen, benötigen alle geregelten Toleranzausgleichsverfahren für die Formschlusserstellung lange Taktzeiten. Ein weiterer Nachteil geregelter Toleranzausgleichsverfahren ist die Notwendigkeit eines Sensorsystems für die Ermittlung der relativen Positionsabweichung. Aufgrund der Minituarisierung von Elektronikgeräten ist eine Zugänglichkeit der Sensorik zur Messung der Positionen der Schraubenwirkfläche und des Schrauberbits aus einer Position nicht immer möglich.

Passive Toleranzausgleichsverfahren erfolgen durch Korrekturbewegungen ohne Messung der Positionierabweichung und werden unterschieden in gesteuerte und ungesteuerte Suchverfahren. Sinnvoll ist die Überprüfung des Formschlusses, um eine hohe Prozesssicherheit zu gewährleisten.

Gesteuerte Toleranzausgleichsverfahren beinhalten gezielte Such- und Positionierbewegungen nach vorgegebenen Abläufen. Hier wird das Schrauberbit vorzugsweise relativ zum Schraubenkopf mit definierten Suchbewegungen geführt, bis unter Einwirkung der Axialkraft der Formschluss erfolgt ist.

Bei ungesteuerten Toleranzausgleichsverfahren werden zum einen ebenfalls auftretende Reaktionskräfte für zufällige Suchbewegungen ohne Stellgrößen genutzt. Zum anderen erfolgt eine Formschlusserstellung durch eine stufenweise Annäherung über zufällige Suchpunkte ohne Stellgrößen.

Gesteuerte und ungesteuerte Toleranzausgleichsverfahren benötigen keine Positionsmessungen und Messwertauswertungen. Bei diesen Verfahren erfolgt die Formschlusserstellung in einem Zyklus. Somit ermöglichen gesteuerte und ungesteuerte Verfahren kürzere Formschlusszeiten als geregelte Toleranzausgleichsverfahren. Weiterhin ist der steuerungstechnische Aufwand bei den passiven Toleranzausgleichsverfahren geringer. Nachteilig bei den passiven Toleranzausgleichsverfahren sind die kleineren, realisierbaren Suchbereiche, die von einem maximalen  $d_{max} < 9^\circ$  abhängig sind. Gesteuerte Toleranzausgleichsverfahren besitzen aufgrund der definierten Suchbewegungen mit regelbaren Stellgrößen statistisch eine geringere Formschlusserstellungszeit als ungesteuerte Verfahren.

Passive Toleranzausgleichsverfahren ermöglichen einen Toleranzausgleich nur bei geringen Lageabweichungen in Abhängigkeit eines Kippwinkels von  $d_{max} < 9^\circ$  und bei Fügefasen am Schraubwerkzeug. Daher wird als Toleranzausgleichsverfahren eine Kombination aus geregeltem und gesteuertem Toleranzausgleichsverfahren gewählt, um die Vorteile der geringen Formschlusszeiten und der großen Suchbereiche nutzen zu können. Für die erste Phase der Formschlusserstellung, der Grobpositionierung des Werkzeuges, wird ein Bildverarbeitungssystem eingesetzt, welches neben der Ermittlung des Schraubenkopftyps die Position des Schraubenkopfes ermittelt, um so fertigungsbedingte Lage-toleranzen der Schraube im Bildschirmgerät sowie die vorrichtungsbedingten Positioniertoleranzen der Zentriervorrichtung des Demontagetisches, die bei maximal 1,5 mm liegen, zu ermitteln. Somit führen diese Werte nicht zu einem Lateralversatz des Schraubwerkzeuges zum Schraubenkopf. Nach dem Abgleich der fertigungsbedingten und vorrichtungsbedingten Lagetoleranzen mit Hilfe des Bildverarbeitungssystems erfolgt die Grobpositionierung des Schraubwerkzeuges durch den Demontageroboter. Zwischen Schraubenkopf und Schrauberbit können nun weitere Lageabweichungen bedingt durch Positioniergenauigkeit des Demontageroboters, Toleranzen im Greiferwechselsystem und Toleranzen des Bildverarbeitungssystems auftreten. Der Ausgleich dieses Achsversatzes erfolgt in der zweiten Phase der Formschlusserstellung durch ein gesteuertes Verfahren, so dass durch Such- und Korrekturbewegungen ein Formschluss zwischen Schrauberbit und Schraubenkopf ermöglicht wird.

### 4.6.3 Suchstrategien zur Formschlusserstellung

Aufgrund der Kombination aus geregelterm und gesteuertem Toleranzausgleichsverfahren erfolgt die Formschlusserstellung in zwei Prozessphasen.

1. Prozessphase: Grobpositionierung des Schrauberbits nach Positionsermittlung des Schraubenkopfes durch das Bildverarbeitungssystem (geregelter Verfahren).
2. Prozessphase: Bei geringer Lageabweichung zwischen Schrauberbit und Schraube erfolgt die Formschlusserstellung mit dem Schraubenkopf infolge der Nachgiebigkeit des Ausgleichsmoduls.

Bei größerer Lageabweichung zwischen Schrauberbit und Schraube wird der Formschluss mit dem Schraubenkopf infolge der gesteuerten Suchbewegungen erstellt.

Aufgabe des Ausgleichsmoduls ist es, Lageabweichungen nach der ersten Prozessphase zu kompensieren. Durch den Einsatz eines Bildverarbeitungssystems werden fertigungsbedingte und vorrichtungsbedingte Lagetoleranzen ermittelt, so dass nur die folgenden Toleranzen durch das Ausgleichsmodul in der zweiten Prozessphase maximal zu kompensieren sind:

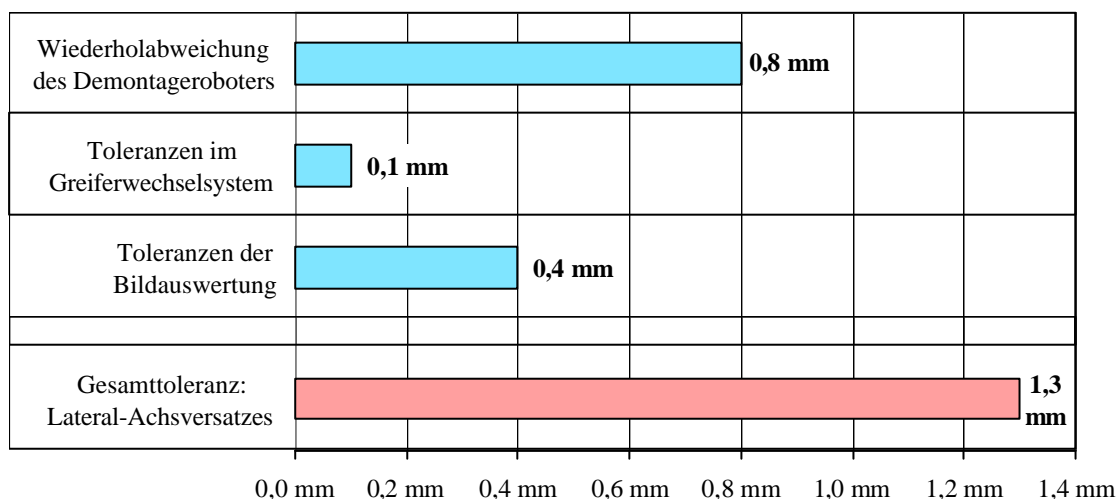


Abb. 4.17: Einflussparameter auf die Wiederholabweichung [188, 194, 196]

Abbildung 4.17 zeigt die Einflussparameter und deren Größe auf die Wiederholabweichung beim Trennprozess „Zerlegen von Schraubenverbindungen“ mit der realisierten Demontagezelle nach dem Einsatz des Bildverarbeitungssystems. Die Wiederholabweichung ist der größte Abstand zwischen den möglichen Ist-Positionen des Demontageroboters, der beim Anfahren einer Sollposition auf einer Achse mit unterschiedlichem Richtungssinn mit einer 99,7%igen Wahrscheinlichkeit auftreten kann. Die dabei dargestellten Wiederholabweichung sind Angaben des Herstellers und wurden in mehreren Messreihen verifiziert. Die Wiederholabweichung des Demontageroboters sind durch die elastischen Verformung der Portalachsen, die nicht spielfreien Lagerungen, der Nachgiebigkeit der Gelenke, der Stick-Slip Reibung und das Getriebeispiel begründet, die Toleranzen des Werkzeugwechselsystems durch eine nicht spielfreie Lagerung, die Toleranzen des Bildverarbeitungssystems sind durch die teilweise geringen Kontraste zwischen den Schraubenköpfen und den Bildschirmgerätebauteilen (z.B. schwarzer Schraubenkopf auf schwarzer Rückwand) begründet.

Die theoretisch, maximal auftretende Wiederholabweichung ergibt sich aus der Summe der einzelnen Toleranzen. Hier ist zu berücksichtigen, dass die einzelnen Toleranzen auch entgegenwirken und die maximalen Toleranzen der einzelnen Systeme nur selten erreicht werden (s. Abb. 4.20). Das Diagramm 4.17 zeigt die theoretisch maximal auftretende Wiederholabweichung des Demontagehandhabungssystems  $a_{Handhabung}$ , welche bei  $a_{Handhabung} = 1,3$  mm liegt und dem maximalen Achsversatz zwischen dem Schrauberbit und der Schraubenwirkfläche entspricht. Somit können Achsversätze des Schraubwerkzeuges gegenüber Kreuzschlitzschrauben ab der Größe M8 aufgrund der großen Fügefasen ohne Toleranzausgleichssysteme rein passiv durch kompliante Lagerung der Schraubenklinge ausgeglichen werden. Wegen der hohen Steifigkeit des Schraubwerkzeuges müssen jedoch zum Ausgleich von Wiederholabweichung Ausgleichssysteme integriert werden.

Aus der Abbildung 4.17 geht hervor, dass der maximal auftretende Lateral-Achsversatz  $a_{max} = 1,3$  mm entspricht. Um die Größe des maximalen Achsversatzes bei der Positionierung des Schraubwerkzeuges in Bezug auf die Schraubenkopfgröße festzustellen, wurden innerhalb der manuellen Demontageuntersuchungen die verschiedenen Schraubenkopfdurchmesser gemessen.

Abbildung 4.18 zeigt die Kopfdurchmesser verschiedener Schraubengrößen und -typen:

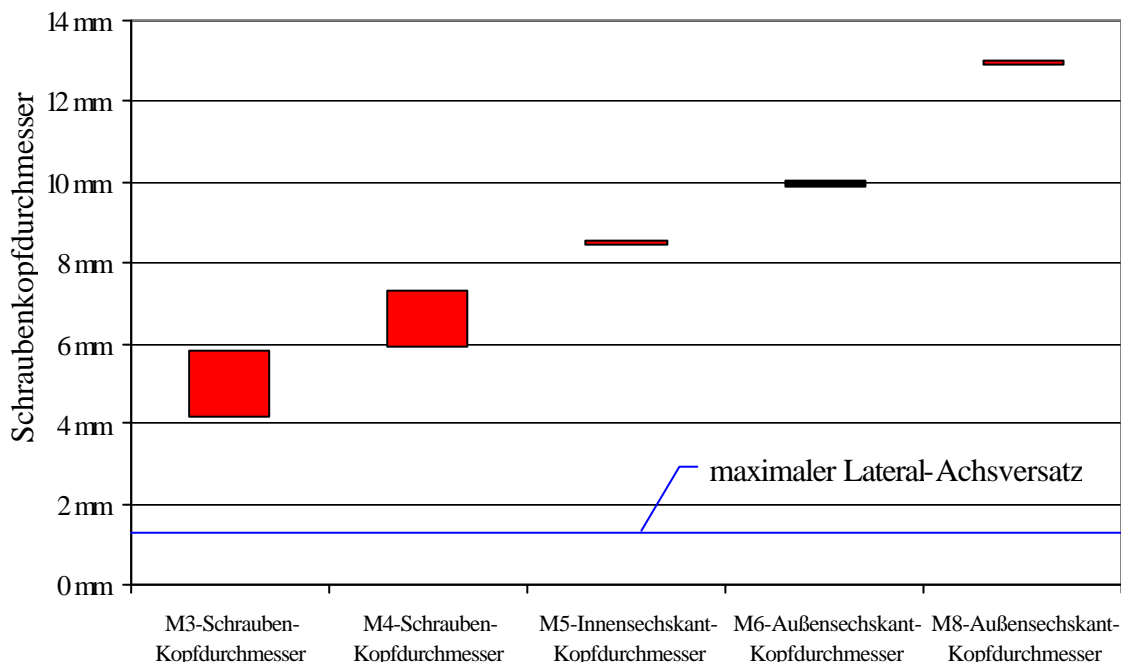


Abb. 4.18: Schraubenkopfdurchmesserbereich je Schraubengröße

Aufgrund der für die Formschlusserstellung erschwerten Geometrieverhältnisse bei kleinen Schlitzschraubenköpfen erfolgt die Betrachtung der Formschlusserstellung und die darauf aufbauende Ermittlung von Suchstrategien entsprechend der Analyse für den kleinsten ermittelten Schraubenkopfdurchmesser von 4,2 mm einer M3-Schlitzschraube.



Die nachfolgende Abbildung 4.19 zeigt den maximalen Achsversatz zwischen Schraubwerkzeug und einer M3-Schlitzschraube mit einem Schraubenkopfdurchmesser von 4,2 mm:

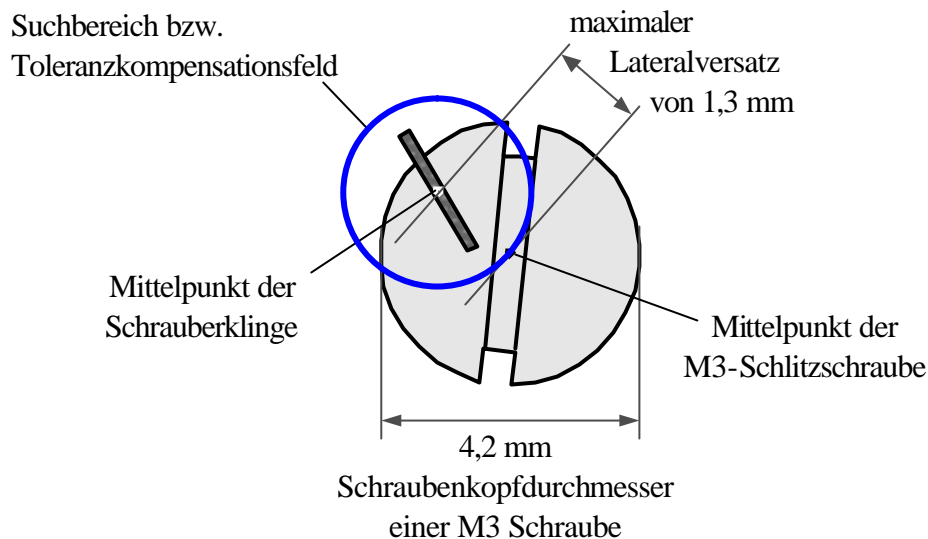


Abb. 4.19: Formschlusserstellung einer Schrauber Klinge mit einer M3-Schlitzschraube

Abbildung 4.19 zeigt, dass der Mittelpunkt der Schrauber Klinge bei einem maximalen Lateral-Achsversatz  $a_{max} = 1,3$  mm, welcher mit Hilfe des Bildverarbeitungssystems ermöglicht wird, auch bei der kleinsten Schraubenkopfgröße noch auf dem Schraubenkopf liegt. Dies wird durch die folgende theoretische Betrachtung des Toleranzkompensationsfeldes  $T_{KF}$  bestätigt, welches den Suchbereich für den Toleranzausgleich darstellt:

$$a_{max}^2 < \frac{d_{Schraubenkopf}}{2}$$

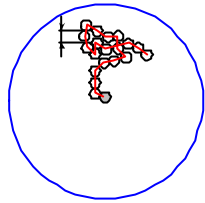
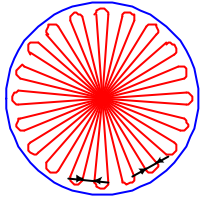
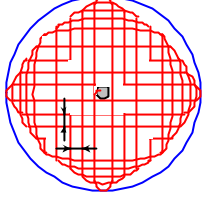
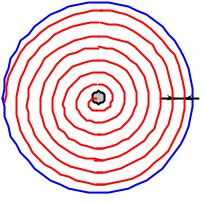
mit  $a_{max}$  = maximaler Lateral-Achsversatz, entspricht der maximalen Wiederholabweichung des Demontagehandhabungssystems  $a_{Handhabung}$

Somit ergibt sich ein maximales Toleranzkompensationsfeld von  $(\mathbf{p} \cdot a_{Handhabung}^2)$ , in welchem die Formschlusserstellung des Schraubenkopfes mit der Schrauber Klinge erfolgt.

Die Formschlusserstellung bedingt die Übereinstimmung der X- und Y-Koordinaten der Trajekturen sowie die zugehörigen Winkelkoordinaten innerhalb der zulässigen Toleranzen. Die Übereinstimmung der Winkelkoordinate wird erreicht durch eine der Suchbewegung überlagerten konstanten Drehung des Schraubwerkzeuges.

Mögliche Suchstrategien werden eingeteilt in Abtastverfahren einzelner Suchpunkte und schwingungserregte Suchbewegungen durch Überstreichen des Toleranzkompensationsfeldes unter ständiger Berührung des Schraubenkopfes. Abtastverfahren unterscheiden sich durch die Anordnung und Reihenfolge der Suchpunkte. Schwingungserregte Suchbewegungen unterscheiden sich in der Art und Richtung der Suchbewegung sowie der Schwingungsübertragung vom Werkzeug auf den Schrauberbit. Konzeptabhängig ergeben sich Schwingungsbewegungen des Schrauberbits auf dem Schraubenkopf. Die Schwingungsspuren der Schrauberbitmittelachse werden als Trajekturen der Suchbewegung im Toleranzkompensationsfeld dargestellt. Die überstrichene Fläche des Toleranzkompensationsfeldes  $T_{KF}$  bestimmt die Größe der ausgeglichenen Positionsabweichung. Der maxi-

male Abstand der Trajekturen  $a_{Tm}$  wird durch das kleinstmögliche Fügenspiel zwischen Schrauberbit und Schraubenkopf unter Berücksichtigung ihrer Fügefasen und der Suchdrehzahl des Schrauberbits bestimmt. Ausgehend von Toleranzausgleichsverfahren für das Bolzen-Loch-Problem in der Montage [214, 215, 216] zeigt die nachfolgende Tabelle 4.9 alternative Suchstrategien für passive Verfahren zur Formschlusserstellung des Schrauberbits mit dem Schraubenkopf:

Suchstrategien	Abtastverfahren mit sukzessiver Approximation (stufenweise Annäherung)	Linearschwingung um den Mittelpunkt	zweiachsige Linearschwingung (Lissajoussche Figuren)	spiralförmige Suchstrategie mit Unwuchterregung
Trajektorien der Suchbewegung				
Anmerkung zum Verfahrensweg	häufiges Kreuzen des Verfahrensweges, zufällige Suchbewegung	Abstand zwischen den Trajekturen ist meist kleiner als $a_{Tm}$	Kreuzen des Verfahrensweges ist erforderlich	kein Kreuzen, konstanter Abstand $a_{Tm}$ zwischen den Trajekturen
Suchzeit	Suchzeit und Formschlusswahrscheinlichkeit zufällig (stochastisch verteilte Suchzeit)	Dauer der Verfahrenszeit mit zufälliger Verfahrenslänge in Abhängigkeit von der Lage des Schraubenmittelpunktes	Dauer der Verfahrenszeit mit zufälliger Verfahrenslänge in Abhängigkeit von der Lage des Schraubenmittelpunktes	kürzeste Suchzeit, da Strategie von innen nach außen erfolgt und Schraubenachse sich häufig nahe der Schraubenachse befindet (siehe Abb. 4.20)
Realisierungsaufwand	mittel	mittel	hoch	gering

Tab. 4.9: Auswahl von Suchstrategien zur Formschlusserstellung (in Anlehnung an [210])

Aufgrund der Auswahl eines gesteuerten Toleranzausgleichsverfahrens ist die Implementierung einer zweiachsigen Linearschwingung oder einer sukzessiven Approximation nicht durchführbar, da diese Suchstrategie die externe Steuerung eines angetriebenen Ausgleichsmoduls für die Korrekturschwingungen benötigt. Die spiralförmige Suchstrategie mit Unwuchterregung [217] besitzt gegenüber der Linearschwingung um den Mittelpunkt den Vorteil der kürzesten Suchzeit und des geringeren Realisierungsaufwandes bei einem selbsttätigen Ausgleichsmodul mit federnder Nachgiebigkeit.

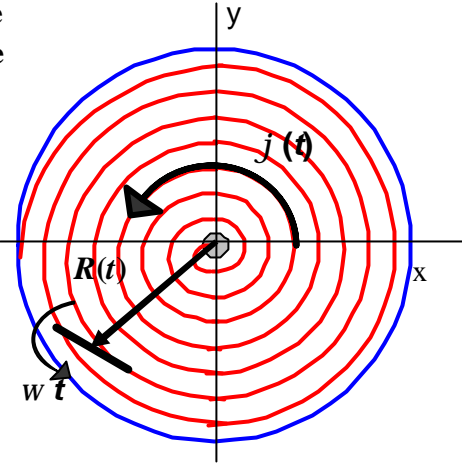
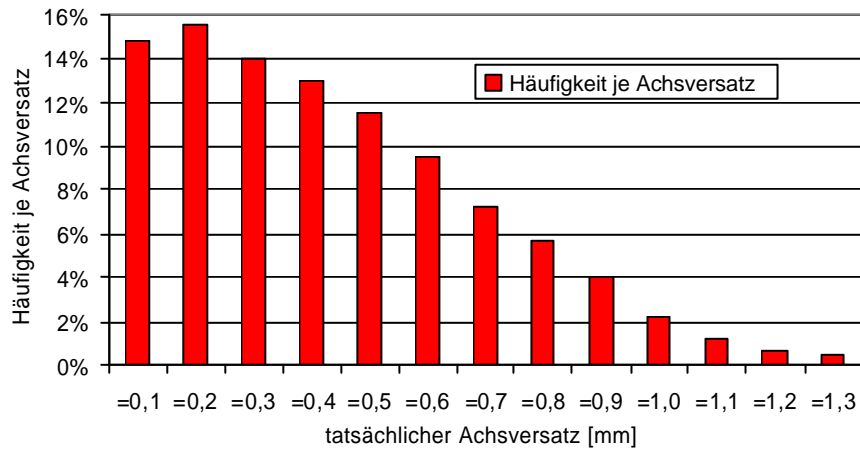
<p>Suchstrategie Trajektorien der Suchbewegung</p>	<p><b>Spiralförmige Suchstrategie</b></p> 																												
<p>Suchfunktion Horizontalkomponente</p>	<p><math>X(t) = R(t) \cdot \cos j(t)</math></p>																												
<p>Vertikalkomponente</p>	<p><math>Y(t) = R(t) \cdot \sin j(t)</math></p>																												
<p>Drehkomponente</p>	<p><math>d(t) = w \cdot t</math></p>																												
<p>Toleranzkompensationsfeld</p>	<p><math>T_{KF} = 2 \cdot p \cdot R(t)^2 = 2 \cdot p \cdot (l_0 \cdot \sin d(t))^2</math> mit <math>d(t) = \text{Kippwinkel}</math>  <math>T_{KFmax} = 2 \cdot p \cdot (l_0 \cdot \sin d_{max})^2</math> mit <math>d_{max} = 9^\circ</math></p>																												
<p>Verfahrweg</p>	<p>Da der tatsächlich auftretende Lateralversatz statistisch häufig kleiner ist als der maximale theoretische Achsversatz des Demontagehandlungssystems, nimmt die Wiederholhäufigkeit des Achsabstandes zwischen Schraube und Schrauberspindel mit zunehmenden Achsversatz ab. Somit erfolgt die Formschlusserstellung abnehmend mit der Entfernung von der Schrauberspindelachse, so dass das gesamte Suchfeld nur selten abgefahren werden muss.</p>  <table border="1" data-bbox="534 1288 1396 1736"> <caption>Häufigkeit je Achsversatz</caption> <thead> <tr> <th>tatsächlicher Achsversatz [mm]</th> <th>Häufigkeit (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>=0,1</td><td>14,8</td></tr> <tr><td>=0,2</td><td>15,5</td></tr> <tr><td>=0,3</td><td>14,0</td></tr> <tr><td>=0,4</td><td>13,0</td></tr> <tr><td>=0,5</td><td>11,8</td></tr> <tr><td>=0,6</td><td>9,8</td></tr> <tr><td>=0,7</td><td>7,2</td></tr> <tr><td>=0,8</td><td>5,8</td></tr> <tr><td>=0,9</td><td>4,2</td></tr> <tr><td>=1,0</td><td>2,5</td></tr> <tr><td>=1,1</td><td>1,5</td></tr> <tr><td>=1,2</td><td>0,8</td></tr> <tr><td>=1,3</td><td>0,5</td></tr> </tbody> </table>	tatsächlicher Achsversatz [mm]	Häufigkeit (%)	=0,1	14,8	=0,2	15,5	=0,3	14,0	=0,4	13,0	=0,5	11,8	=0,6	9,8	=0,7	7,2	=0,8	5,8	=0,9	4,2	=1,0	2,5	=1,1	1,5	=1,2	0,8	=1,3	0,5
tatsächlicher Achsversatz [mm]	Häufigkeit (%)																												
=0,1	14,8																												
=0,2	15,5																												
=0,3	14,0																												
=0,4	13,0																												
=0,5	11,8																												
=0,6	9,8																												
=0,7	7,2																												
=0,8	5,8																												
=0,9	4,2																												
=1,0	2,5																												
=1,1	1,5																												
=1,2	0,8																												
=1,3	0,5																												
<p>Suchzeit</p>	<p>Dauer der Verfahrzeit mit zufälliger Verfahrlänge in Abhängigkeit von der Drehzahl und Axialkraft.</p>																												
<p>Steuerung der Bewegung</p>	<p>Die Steuerung der Bewegung erfolgt über die Regelung der Axialkraft.</p>																												
<p>Realisierungsaufwand</p>	<p>Gering aufgrund der federnden Nachgiebigkeit des Ausgleichsmoduls.</p>																												

Abb. 4.20: Spiralförmige Suchstrategie für den ungesteuerten Toleranzausgleich

#### 4.6.4 Lage des Toleranzausgleichssystems

Abbildung 4.21 zeigt die grundsätzliche Möglichkeit der Implementierung eines Ausgleichsmoduls zum Ausgleich eines Lateralversatzes zwischen Schraubenkopf und Schrauberschaft.

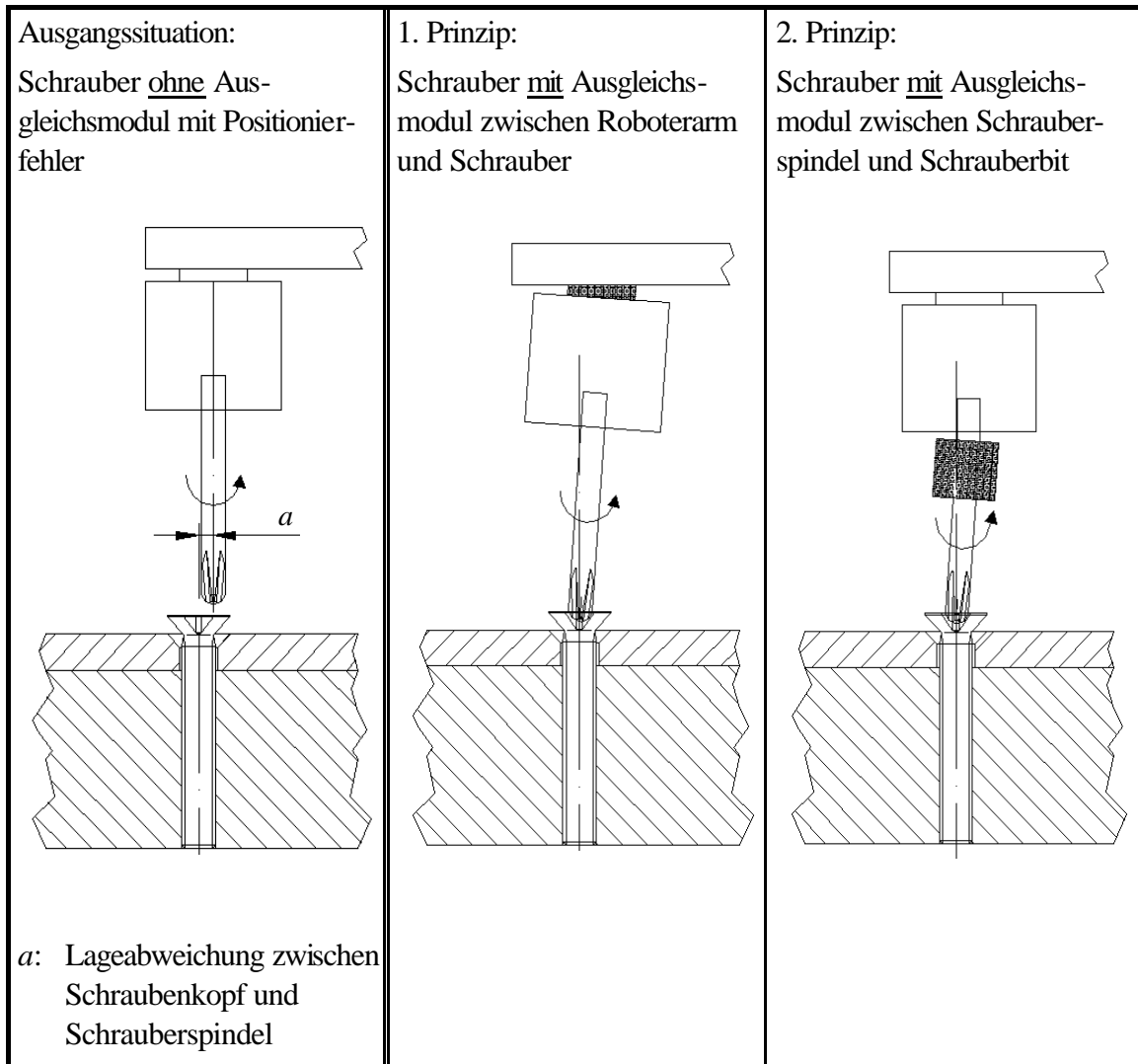


Abb. 4.21: Prinzipdarstellung der Positionier- und Bahnfehlerausgleichsmöglichkeiten

Für den verwindungssteifen Ausgleich eines geringen Lateral-Achsversatzes zwischen Schraubenkopf und Schrauberspindel wird die Integration des Ausgleichsmoduls zwischen der Schrauberspindel und der Verlängerung des Schrauberbits entsprechend des zweiten Prinzips der Abbildung 4.21 empfohlen, da aufgrund der geringeren zu bewegenden Massen ein günstigeres dynamisches Verhalten ermöglicht wird. Im Fall eines Ausgleichsmoduls zwischen Schrauber und Roboterarm, entsprechend des ersten Prinzips, muss die gesamte Masse des Schraubers bewegt werden. Die hierdurch entstehenden Eigenschwingungen des Schraubwerkzeuges führen zu unkontrollierten Bewegungen. Zudem treten bedingt durch das Eigengewicht des Schraubwerkzeuges Lageabweichungen bei horizontalen Schraubvorgängen auf.

#### 4.6.5 Zusammenfassung der Konzeptauswahl für ein Toleranzausgleichsverfahren

In der Tabelle 4.10 sind die Konzepte für Toleranzausgleichsverfahren mit den entsprechenden Lösungsprinzipien und den Auswahlkriterien nochmals zusammenfassend dargestellt:

Konzept	Lösungsprinzipien	Auswahl	Auswahlkriterium
1. Verfahren	aktiv mit geregelter Verfahren	(x)	Nutzung des BVS zur Toleranzreduzierung
	passiv mit gesteuertem Verfahren	x	hohe Prozesssicherheit
	passiv mit ungesteuertem Verfahren		
2. Suchstrategie	Linearschwingung um Mittelpunkt		
	zweiachsige Linearschwingung		
	spiralförmige Strategie	x	kürzeste Suchzeit, geringster Aufwand
3. Lage des Ausgleichsystems	zwischen Schrauberspindel und Schrauberbit	x	geringere zu bewegende Masse führt zu günstigeren dynamischen Eigenschaften und ermöglicht horizontale Schraubvorgänge
	zwischen Roboterarm und Schrauber		

Tab. 4.10: Konzepte für Toleranzausgleichsverfahren mit den entsprechenden Lösungsprinzipien und den Auswahlkriterien

Der Hauptvorteil der passiven, gesteuerten Verfahren liegt in der Prozesssicherheit. Generell ist die Wahrscheinlichkeit für einen erfolgreichen Suchvorgang bei diesen Verfahren sehr viel höher als bei den passiven, stochastischen Verfahren. Deren Vorteil liegt eindeutig in dem vergleichsweise primitiven und damit kostengünstigen Aufbau. Durch den Einsatz eines Bildverarbeitungssystems zum Suchen von Kabelverbindungen und Prüfen von Schraubenkopfgeometrien erfolgt in der ersten Prozessphase ein aktiver, geregelter Toleranzausgleich vor dem Start des passiven, gesteuerten Ausgleichsverfahrens, um die fertigungsbedingten Toleranzen am Bildschirmgerät und die vorrichtungsbedingten Toleranzen der Positioniereinrichtung auszuschließen. Somit wird das maximale Toleranzkompensationsfeld deutlich eingeschränkt und es müssen lediglich Toleranzen, bedingt durch den Roboter, das Bildverarbeitungssystem und das Schraubwerkzeug durch das passive, gesteuerte Verfahren ausgeglichen werden.

Wie aus Tabelle 4.10 hervorgeht, ist von der spiralförmigen Suchstrategie die kürzeste Suchzeit zu erwarten. In Verbindung mit der ohnehin vorhandenen Suchdrehzahl lässt sich die Spiralbahn zudem relativ einfach durch eine Auslenkung des Werkzeuges bezogen auf das Drehzentrum über eine Unwuchtregelung realisieren.

Die Integration des Ausgleichsmoduls erfolgt zwischen der Schrauberspindel und der Verlängerung des Schrauberbits, da aufgrund der geringeren zu bewegenden Massen günstigere dynamische Verhalten ermöglicht werden. Somit können horizontale Schraubvorgänge durchgeführt und Eigenschwingungen des Schraubwerkzeuges vermieden werden.

## 4.7 Ermittlung der Anforderungen und Randbedingungen

Aufgabe des Ausgleichsmoduls ist zum einen der Ausgleich des Lateralachs- und Drehwinkelversatzes und des Kippwinkelversatzes zwischen Werkstück und Werkzeug bedingt durch die Positioniertoleranzen des Demontagesystems sowie die Gewährleistung eines sicheren Formschlusses während des Löseprozesses. Die maximale Positioniertoleranz des Demontagesystems liegt nach Abbildung 4.17 bei  $a_{max} = 1,3$  mm. Für das Ausgleichssystem wird eine zweifache Sicherheit vorausgesetzt, so dass ein maximales Toleranzkompensationsfeld mit dem Radius  $r_{max} = 2,6$  mm gefordert wird. Weiterhin muss eine drehzahlproportionale, axiale Translationsrückhubbewegung des Schrauberbits erfolgen, um Drehzahlschwankungen bedingt durch Gewindesteigungstoleranzen bei der Fügepartner oder durch unterschiedlich starke Reibungseinflüsse, zu kompensieren.

Zum anderen muss das Ausgleichsmodul die auftretenden Rückstellkräfte bedingt durch den Kippwinkelversatz zwischen Schrauberachse und Schraubenachse minimieren und kompensieren. Für die Kompensierung der Lageabweichung darf der Kippwinkel  $d_{max} = 9^\circ$  nicht überschritten werden, um einen Ausgleich von Positionierfehlern während der Formschlusserstellung zu ermöglichen und beim Ausdrehen von Schrauben aus den Positionierfehlern resultierende Bahnfehler zu verhindern. Auftretende Bahnfehler während der Ausdrehphase führen zu einem Verkippen der Schrauben im Schraubenschaft oder im Schraubwerkzeug. Der Gesamtwinkelversatz ergibt sich aus dem Kippwinkel und dem während der Ausdrehphase auftretenden Bahnfehler. Bedingt durch diesen Gesamtwinkelversatz zwischen Schrauberachse und Schraubenachse wird eine laterale Kraft erzeugt. Die auftretenden Rückstellkräfte am Schrauberantrieb und am Demontageroboter müssen minimiert und kompensiert werden.

Die am Schrauberbit entstehende laterale Kraft wird über den Schrauber auf den Demontageroboter übertragen. Somit gilt als Nachgiebigkeit des Gesamtsystems:

$$\frac{1}{C_{ges}} = \frac{1}{C_{Schrauber}} + \frac{1}{C_{Demontageroboter}}$$

Ziel ist es, die übertragenden Reaktionskräfte auf den Demontageroboter und den Schrauberantrieb zu minimieren. Durch die Integration eines Ausgleichsmoduls mit hoher Nachgiebigkeit wird als Annahme die Steifigkeit des Demontageroboters vernachlässigt. Somit entspricht die Gesamtnachgiebigkeit vereinfacht:

$$C_{ges} = C_{Schrauber}$$

Neben den technischen Anforderungen, resultierend aus den Positioniertoleranzen des Demontagehandhabungssystems, ergeben sich konstruktive Anforderungen an die Abmessungen des Ausgleichsmoduls, die durch die geometrischen Gegebenheiten der Bildschirmgeräte begründet sind. Daher müssen die Abmessungen des Ausgleichsmoduls so gewählt werden, dass aufgrund der Vielzahl von Störkanten in Bildschirmgeräten die Zugänglichkeit des Zerlegewerkzeuges nicht beeinflusst wird. Die extremen Lagen wurden in zwei Skizzen erfasst.

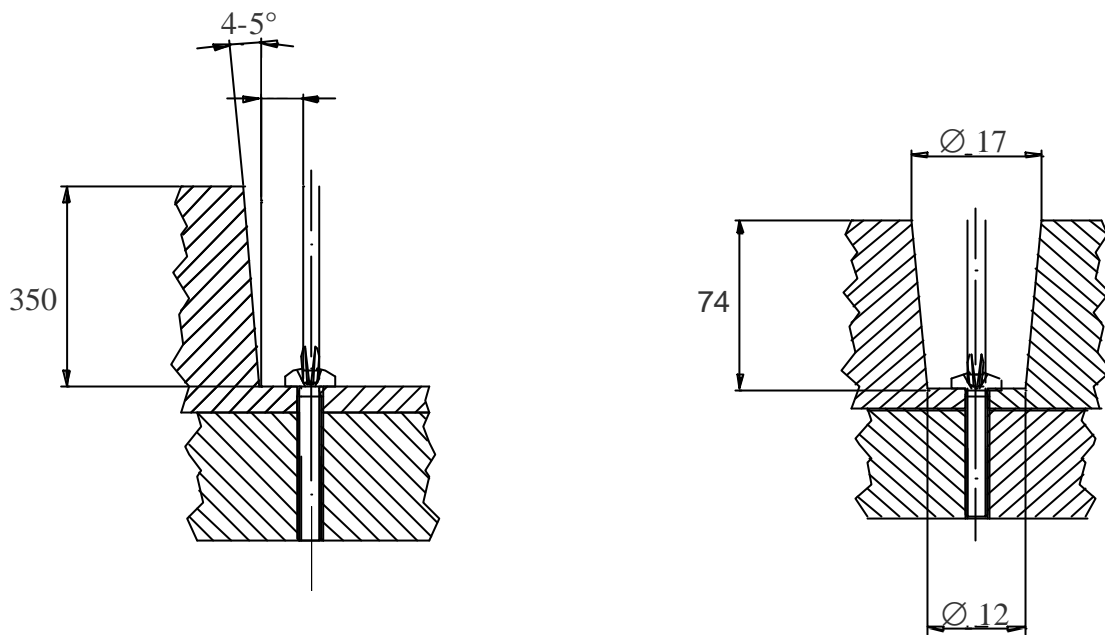


Abb. 4.22: Extreme Positionen von Schraubenverbindungen in Bildschirmgeräten (in mm)

Die Abbildung 4.22 zeigt zwei extreme Positionen von Schraubenverbindungen in Bildschirmgeräten. Die rechte Skizze zeigt eine Schraube, die 74 mm tief in der Rückwand des Bildschirmgerätes eingelassen ist. Dabei ist die Auflage des Schraubenkopfes nur geringfügig größer als der Schraubenkopf selbst. Bei dieser Schraubenposition ist nicht jede Demontagestrategie anwendbar. Jedoch wird beim Schrauben die Formschlusserstellung durch den Kanal erleichtert. Die linke Skizze zeigt eine Schraubenverbindung, deren Mittelachse nur 12 mm neben einem anderem Bauteil liegt. Zusätzlich hat die Analyse der Zugänglichkeit des Schraubers zu den Schraubenwirkflächen bei der Elektronikgerätedemontage gezeigt, dass der Außendurchmesser des Ausgleichmoduls aufgrund der zunehmenden Minituarisierung der Elektronikgeräte 38 mm nicht überschreiten darf.

Die Anforderungen an das Ausgleichsmodul werden in einer Anforderungsliste (Tab. 4.11), welche die funktionalen und wertmäßigen Anforderungen an die Einzelkriterien darstellt und Angaben über Art und Quelle der Anforderungen macht, zusammengestellt. Bei der Art der Anforderungen wird unterschieden in

- Festforderung (F): vorgegebene Werte bzw. Funktionen müssen genau eingehalten werden.
- Zielforderung (Z): die vorgegebenen Werte stellen eine Grenze, einen Bereich mit bevorzugter Grenze, einen Zielpunkt oder eine Tendenz dar und sind optimal zu erfüllen.
- Wunschforderung (W): die Anforderungen sind nicht zwingend zu erfüllen.

<b>Anforderungsliste für das Ausgleichsmodul von Entschraubungswerkzeugen</b>							
<b>Gliederung</b>			<b>Anforderung</b>				
Nr.	Benennung	Einzelkriterium	Nr.	Beschreibung	Werte	Anforderung	Quelle
1.	Physikalische Größen						
		Drehmoment	1.1	Nenn Drehmoment	8,2 Nm	F	S. 40
			1.2	Max. Drehmoment (2-fache Reserve)	16 Nm	Z	
		Axialkraft	1.3	minimale Axialkraft in der Lösephase	5 N	F	S. 60
			1.4	maximale Axialkraft in der Lösephase	15 N	F	S. 60
			1.5	minimale Axialkraft in der Ausdrehphase	2 N	F	S. 60
			1.6	maximale Axialkraft in der Ausdrehphase	15 N	F	S. 60
		Drehzahl	1.7	minimale Drehzahl in der Formschluss- und Lösephase	35 min <sup>-1</sup>	F	S. 60
			1.8	maximale Drehzahl in der Ausdrehphase	200 min <sup>-1</sup>	Z	S. 61
		Achsversatz	1.9	minimaler Versatz	1,3 mm	F	S. 71
			1.10	maximaler Versatz (2-fache Sicherheit)	2,6 mm	W	
		Drehwinkelversatz	1.11	maximaler Drehwinkelversatz	< 180°	F	S. 55
		Angularwinkelversatz	1.12	maximaler Angularwinkelversatz	9°	F	S. 58
2.	Bauliche Anforderungen						
		Außendurchmesser	2.1	max. Außendurchmesser des Moduls	38 mm	Z	S. 79
		Verlängerung des Schrauberbits	2.2	Mindestlänge der Bitverlängerung	80 mm	Z	S. 79
			2.3	max. Durchmesser der Bitverlängerung	10 mm	Z	S. 79
		Gewicht	2.4	maximales Handhabungsgewicht	1.000 g	W	S. 65
3.	Funktionale Anforderungen						
		Suchbewegungen des Schrauberbits	3.1	selbsttätige Suchbewegung des Bits		Z	S. 74
			3.2	Steuerung der Suchbewegungen durch eingeleitete Prozesskräfte		Z	S. 74
		Rückstell- und Reaktionskräfte	3.3	Minimierung und Kompensierung der auftretenden Rückstell-/Reaktionskräfte		W	S. 78
		Ausgleich axialer Toleranzen	3.4	Integration einer axialen Nachgiebigkeit		W	S. 77
		horizontale Auslenkung	3.5	zulässige Auslenkung bei horizontaler Suchbewegung	0,1 mm	Z	S. 77
		Rückstellung in die Ausgangslage	3.6	selbsttätige Rückstellung in die exakte Ausgangslage nach Schraubprozess		Z	S. 77
		Ablegen der gelösten Schraube	3.7	schnelle und flexible Entfernung der ausgedrehten Schraube vom Bit		Z	S. 30

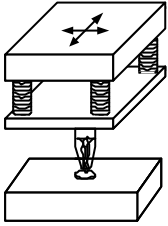
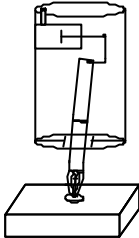
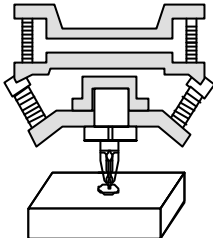
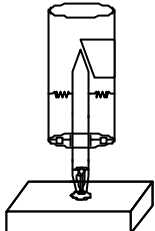
Tab. 4.11: Anforderungsliste für das Ausgleichsmodul von Entschraubungswerkzeugen



## 4.8 Konstruktion

### 4.8.1 Komponentenauswahl

Mögliche Konzepte für den selbsttätigen Ausgleich von Positioniertoleranzen des Demontagesystems in der zweiten Formschlusserstellungsphase werden in der Tabelle 4.12 gezeigt. Die Konzepte werden nach angetriebenen und selbsttätigen Verfahren unterschieden und entsprechend den Anforderungen an das Ausgleichsmodul bewertet:

	Eigenantrieb		externer Antrieb	
	Vibrationsunterstützte Ausgleichsmodule	Ausgleichsmodul mit Pneumatik-antrieb	Remote Center Compliance	Federnd nachgiebiges Ausgleichsmodul bei Reaktionskräften und -momenten
Funktionsmodule				
Erzeugung der Suchbewegung	durch Elektromagneten angeregte Schwingungen	Pneumatikzylinder	Nutzung der lateralen Reaktionskräfte	Nutzung der axialen Reaktionskräfte
Energieübertragung	Schleifkontakte oder Induktionsspulen	Drehübertrager	-	-
Baugrößenrestriktion	möglicherweise erfüllbar	möglicherweise erfüllbar	Außendurchmesser entspricht nicht den Anforderungen	erfüllbar
Restriktionen bzgl. der Übertragung des Lösemomentes	-	-	konstruktionsbedingte Drehnachgiebigkeit	-
Komplexität, Realisierungsaufwand	Aufwand für Steuerung, Energieübertragung, Abstimmung der Eigenfrequenzen	Aufwand für Steuerung, Energieübertragung, mechanische Kraftübertragung	gering, Zukauf	Entwicklungsaufwand, geringer technischer Aufwand

Tab. 4.12: Konzepte für den eigenständigen Ausgleich von Positionierfehlern

Grundsätzlich werden - wie Tabelle 4.12 zeigt - die Konzepte nach Lage der Antriebseinheit differenziert in:

- Ausgleichsmodule mit integriertem Antrieb [206, 207, 208] sowie
- Ausgleichsmodule mit externem Antrieb [206, 203].

Bei Ausgleichsmodulen mit integriertem Antrieb erfolgen die gesteuerten Suchbewegungen mittels Initiatoren wie beispielsweise über Elektromagneten, Pneumatikzylindern oder piezoelektrischen Antrieben. Bei einem Eigenantrieb über einen Elektromagneten kann beispielsweise das Schrauberbit in Schwingung versetzt werden, so dass durch gesteuerte Frequenzwechsel ein Suchverfahren bis zur Formschlusserstellung erfolgt.

Bei Ausgleichsmodulen mit externer Steuerung wird das Toleranzkompensationsfeld vom Schrauberbit nach einer definierten Suchbewegung abgetastet, bis die Formschlusserstellung zwischen Schrauberbit und Schraubenkopf erfolgt ist [209]. Gesteuerte Toleranzausgleichsverfahren mit externem Antrieb nutzen die beim Trennprozess auftretenden Reaktionskräfte für den Toleranzausgleich und werden durch die Größe der eingeleiteten Prozesskräfte gesteuert. Dabei sind Fügefasen am Schrauberbit und am Schraubenkopf erforderlich [210].

Der Vergleich der Konzepte für den eigenständigen Ausgleich der Positionierfehlern in Tabelle 4.12 zeigt, dass die Toleranzausgleichsmodule mit Eigenantrieb gegenüber den selbsttätigen Modulen mit externem Antrieb aufgrund der komplexeren Baustruktur aufwendiger sind. Zudem ist eine höhere Störanfälligkeit bedingt durch den Antrieb, die Energieübertragung und die größere Anzahl mechanischer Teilkomponenten zu erwarten. Weiterhin ist die Einhaltung der Baugrößenrestriktion stark erschwert.

Selbsttätige Ausgleichsmodule nutzen für die Korrekturbewegungen die auftretenden Reaktionskräfte und benötigen daher keinen eigenen Antrieb. Ausgleichsmodule mit Remote Center Compliance besitzen den konstruktiven Nachteil, dass der Außendurchmesser der bereits realisierten Ausführungen größer als der vorgegebene Durchmesser von 38 mm ist. Für den Ausgleich von Positionierfehlern ist daher ein drehstarrs Ausgleichsmodul mit einer federnden Nachgiebigkeit auf laterale Reaktionskräfte zu konzipieren.

Für den Einsatz eines Ausgleichsmoduls mit einer federnden Nachgiebigkeit müssen Konzepte entwickelt werden, die eine Übertragung des Drehmomentes auf das Schrauberbit und eine Auslenkung der Spindelverlängerung ermöglichen. Vorteilhaft ist zudem eine Rückstellkraft in die Mittellage bei fehlenden Reaktionskräften.

Tabelle 4.13 zeigt Elemente zur Drehmomentübertragung, die eine Auslenkung durch Prozesskräfte ermöglichen:

	Metallbalg- kupplung	Wulst- kupplung	Klauen- kupplung	Membran- kupplung	Kardan- gelenk	Gleichlauf- gelenk	Schling- feder- kupplung
zulässiger Achs- versatz	++	++	O	O	--	--	++
zulässiger Win- kelversatz	++	++	++	++	++	++	++
Exaktheit der Mittellage	--	--	-	--	--	--	+
Bereitgestellte Rückstellkraft	-	--	-	-	--	--	++
Baugröße bei gefordertem Nennmoment	O	-	++	--	++	--	++
von Bauart ab- gedeckter Nenn- momentbereich	++	++	++	++	++	--	++

- ++ sehr gut geeignet
- + gut geeignet
- O zufriedenstellend geeignet
- unbefriedigend geeignet
- ungeeignet

Tab. 4.13: Elemente zur Drehmomentübertragung für eine Auslenkung der Schrauberspindel (für max. Nenndrehmoment von 15 Nm, in Anlehnung an [213])

Tabelle 4.13 zeigt eine Bewertung verschiedener Elemente zur Drehmomentübertragung für eine Auslenkung der Schrauberspindel entsprechend der ermittelten Anforderungen an das Ausgleichsmodul. Aus dem Vergleich geht die Schlingenfederkupplung als das Element hervor, welches die Anforderungen zur Drehmomentübertragung für eine Auslenkung der Schrauberspindel am besten erfüllt. Insbesondere die Anforderungen an die Exaktheit der Mittellage und an die bereitgestellte Rückstellkraft wird lediglich von der Schlingenfederkupplung erfüllt. Grund hierfür ist der mechanische Aufbau der Schlingenfederkupplung mit den drei ineinander liegenden Federn. Durch die entgegengesetzte Wicklung der mittleren Feder kann ein Drehmoment in beide Drehrichtungen übertragen werden. Durch die Blocklage der Federn wird die definierte Mittellage ermöglicht.

Abbildung 4.23 zeigt die morphologische Gegenüberstellung der einzelnen Lösungsprinzipien zu den Soll-Funktionen:

Wirkprinzip	Wirkstruktur			
geeignete mech. Effekte	geeignete Teillösungen mit Effektträgern			
1. Antrieb	1.1  elektrisch	1.2  pneumatisch	1.3  Reaktionskräfte	
2. Drehmomentübertragung	2.1  Metallbalgkupplung	2.2  Wulstkupplung	2.3  Klauenkupplung	2.4  Schlingenfederkupplung
3. Spindel-führung	3.1  Drehgelenk	3.2  Linearführung		
4. Herstellung der Mittellage	4.1  Zwangsgeführt	4.2  Federelement		
	Nr. 1 / 2 / 3		Nr. 4	

Abb. 4.23: Morphologischer Kasten zur Auswahl von Effekten und Effektträgern zu den Soll-Funktionen der funktionellen Phasen

In der nachfolgenden Tabelle sind die einzelnen Soll-Funktionen bewertet:

Bewertungs-kriterium j	Gewich-tung $a_j$	Nr.1 pneumatischer An-trieb, Wulstkupplung, Linearführung, Zwangsgeführt		Nr.2 Reaktionskräfte, Schlingenfederkuppl., Drehgelenk, Zwangsgeführt		Nr.3 elektrischer Antrieb, Metallbalgkupplung, Drehgelenk, Federelement		Nr.4 Reaktionskräfte, Klauenkupplung., Linearführung, Federelement,	
		$E_{ji}$	$P_{ji}$	$E_{ji}$	$P_{ji}$	$E_{ji}$	$P_{ji}$	$E_{ji}$	$P_{ji}$
Bauraum	20%	3,0	0,6	4,7	0,9	2,2	0,4	4,0	0,8
Komplexität	20%	2,9	0,6	4,8	1,0	1,5	0,3	4,1	0,8
Realisierungsaufwand	20%	2,3	0,5	3,9	0,8	1,2	0,2	3,1	0,6
Suchzeit	10%	3,8	0,4	4,0	0,4	2,0	0,2	3,9	0,4
Prozesssicherheit	30%	4,0	1,2	4,0	1,2	4,0	1,2	4,0	1,2
<b>Nutzwert:</b>			<b>3,2</b>		<b>4,3</b>		<b>2,4</b>		<b>3,8</b>

Tab. 4.14: Auswahl von Effekten und Effektträgern zu den Soll-Funktionen

In der Tabelle 4.15 sind die Konstruktionsmerkmale mit den entsprechenden Lösungsprinzipien und den Auswahlkriterien nochmals zusammenfassend dargestellt:

Konstruktionsmerkmale	Lösungsprinzipien	Auswahl	Auswahlkriterium
1. Antrieb	elektrisch		
	pneumatisch		
	ohne Antrieb, Reaktionskräfte	x	Bauraum, geringe Komplexität
2. Drehmomentübertragung -	formschlüssige Elemente (Konstruktion)		
	Federelemente (Elastomer / Stahl)		
	Metallbalgkupplung		
	Wulstkupplung		
	Klauenkupplung		
	Membrankupplung		
	Kardankupplung		
	Gleichlaufgelenkkupplung		
	Schlingenfederkupplung	x	Baugröße, Erfüllung zusätzlicher Aufgaben
3. Spindelführung	Drehgelenk	x	Bauraum, Realisierungsaufwand
	Linearführung		
	Ausgleichskupplung		
4. Herstellung der Mittellage	Zwangsgeführt	x	Schwerkrafteinfluss, geringe Komplexität
	gesonderte Federelemente		

Tab. 4.15: Konstruktionsmerkmale mit Lösungsprinzipien und Auswahlkriterien

Passive Verfahren, die eine Suchbewegung mit einem eigenen Antrieb erzeugen, besitzen eine differenzierte Einstellbarkeit der Parameter für die Suchbewegung. Bei einer Kopplung der Suchbewegung an die Größe der Anpresskraft besteht die Möglichkeit, den Druck des Vorschubzylinders zu variieren. Hauptnachteil der angetriebenen Varianten ist der hohe konstruktive Aufwand. Für diese Lösungen ist als Grundvoraussetzung neben der Energiewandlung auch eine Energieübertragung auf das sich drehende Werkzeug nötig. Der daraus resultierende Bauraum widerspricht der Forderung nach einer möglichst „schlanken“ Bauform. Den besten Kompromiss stellt in diesem Zusammenhang eine kontrollierte, durch Reaktions- bzw. Andruckkräfte gesteuerte Suchbewegung dar.

Für die Drehmomentübertragung besteht neben einer Eigenkonstruktion durch formschlüssige oder federnde Elemente die Möglichkeit des Zukaufes eines Ausgleichselementes. Vorteil ist in diesem Zusammenhang, dass sich viele Teilfunktionen auf sehr kleinem Raum unterbringen lassen. Die Schlingenfederkupplung stellt bezogen auf die sich bietenden Alternativen die beste Lösung dar. Baugrößen mit Durchmessern von ca. 30 mm ermöglichen bereits die Übertragung eines Nennmomentes von  $M_N = 10 \text{ Nm}$ . Es sind zudem keine zusätzlichen Elemente zur Bereitstellung der Rückstellkräfte nötig.

Die ausgewählte Kupplung besitzt eine definierte Mittellage. In Abhängigkeit von den Fertigungstoleranzen der Kupplung kann allerdings nicht davon ausgegangen werden, dass die Mittellage exakt mit der Ideallage übereinstimmt. Beim Anfahren der Zielkoordinaten mit einer horizontalen Spindellage besteht die Gefahr, dass der vordere Teil des Schraubwerkzeuges durch das Eigengewicht ausgelenkt wird. Die Konstruktion sollte daher über eine Einrichtung verfügen, die eine exakt definierte

Führung während des Positioniervorganges sicherstellt. Zudem wird durch diese Maßnahme erreicht, dass störende Schwingungen bei Beschleunigung des Werkzeuges unterdrückt werden.

Die Führung der Spindel erfolgt über ein Drehgelenk. In Anbetracht der geringen Größe des Suchbereiches bewegen sich die dadurch zu erwartenden Winkelfehler deutlich unterhalb der geforderten Maximalabweichung von  $d_{max} = 9^\circ$ . Weitere Vorteile ergeben sich aus dem einfachen Aufbau und dem vergleichsweise geringen Bauraum.

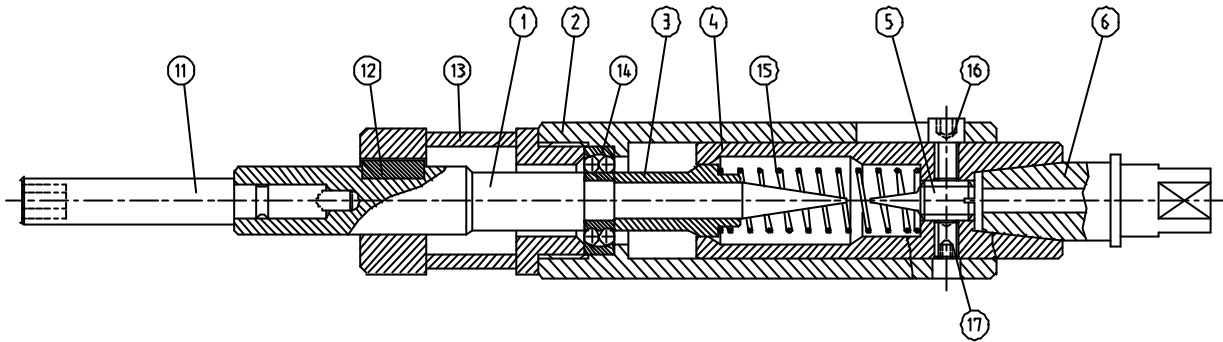


Abb. 4.24: Konstruktionszeichnung des Ausgleichsmoduls mit federnder Nachgiebigkeit und Rückstellung

Die Formschlusserstellung zwischen den Wirkorganen des Schrauberbits und dem Schraubenkopf erfolgt durch Unterstützung des Ausgleichsmoduls, mit dessen Hilfe ungesteuerte Toleranzausgleichsverfahren angestoßen werden. Über die federnde Nachgiebigkeit des Ausgleichsmoduls auf Reaktionskräfte und –momente wird ein Suchprozess eingeleitet, der sich in drei wesentliche Schritte unterteilt:

1. Nach dem Anfahren der von der Steuerungstechnik vorgegebenen Sollposition verfährt die Einheit senkrecht zum Schraubenkopf. Die Vorrichtung dreht sich dabei mit einer reduzierten Suchdrehzahl. Im Grundzustand ist der Schaft doppelt geführt und wird so in einer definierten Mittel-lage gehalten. Auf der Vorderseite wird der Schaft durch das Pendelkugellager geführt. Der zweite Fixpunkt entsteht an der Berührfläche zwischen dem Druckstück (Pos. 3) und der Zentrierhülse (Pos. 4). Durch die starre Führung werden Schwingungen bei der Positionierung vermieden. Da keine Wartezeiten für die Ausschwingvorgänge anfallen, verkürzt sich dadurch der Gesamtprozess.
2. Bei der Berührung von Schrauberbit und Schraubenkopf gibt die Druckfeder entsprechend ihrer Vorspannung und ihrer Federkennlinie nach. Das Vorderteil der Vorrichtung, bestehend aus Kupplung (Pos. 13), Mantelhülse (Pos. 2), Pendelkugellager (Pos. 14) und Druckstück verschiebt sich gegenüber der Zentrierhülse. Zunehmend geht dabei der Formschluss zwischen dem Druckstück und der Zentrierhülse verloren. Der Schaft erhält einen Winkelfreiheitsgrad von ca.  $\pm 3^\circ$ . Das Pendelkugellager fungiert hierbei als Drehpunkt. Bedingt durch die Nachgiebigkeit der Gelenkkupplung ergibt sich eine unkontrollierte Suchbewegung innerhalb des Suchkreises. Der durch die Einheit freigegebene Suchbereich vergrößert sich dabei durch das Abgleiten der Fasen von Druckstück und Zentrierhülse.
3. Berühren sich der Schaft und der Suchkegel (Pos. 5), führt der Schaft kontrollierte, kreisförmige Suchbewegungen aus. Der Radius dieser Suchbewegung nimmt mit wachsendem Federweg zu. Der Federweg, bei dem die Suchbewegung beginnt, kann durch das Zustellen des Suchkegels

bestimmt werden. Mit dem Federweg wird entsprechend der Federkennlinie auch die Andruckkraft bei Suchbeginn festgelegt. Die Kraft  $F_{As}$ , bei der die Suchbewegung beginnt, liegt zwischen  $F_{As} = 8 \text{ N}$  und  $F_{As} = 15 \text{ N}$ . Der Suchkegel wird durch den Gewindestift (Pos. 17) gegen Verdrehen gesichert. Die maximale Winkelauslenkung bzw. der Maximaldurchmesser des Suchkreises wird durch die Übermaßbohrung in der hinteren Muffe der Wellenkupplung festgelegt.

Ist ein Formschluss zwischen Schrauberbit und Schraubenkopf erfolgt, kann die Schraubbewegung sofort eingeleitet werden. Es ist dabei unerheblich, in welcher Phase des Suchprozesses der Schraubenkopf „gefunden“ wurde bzw. zu welchem Zeitpunkt der Formschluss am Bit zustande gekommen ist. Die Schraubbewegung wird mit erhöhter Drehzahl ausgeführt. Der Druck des Vorschubzylinders ist unmittelbar nach erfolgtem Formschluss auf einen Druck

$$p \leq F_{As}/A_k \quad (A_k: \text{Kolbenfläche des Vorschubzylinders})$$

zurückzuschalten. Es wird so vermieden, dass beim Ausschrauben die Suchbewegung erneut eingeleitet wird.

Die Andruckkraft des Vorschubzylinders wird über den Adapter (Pos. 6) in die Zentrierhülse geleitet. Die Feder (Pos. 15) sorgt für eine Weiterleitung des Kraftflusses über das Druckstück und den Innenring des Pendelkugellagers in den Schaft. Das Pendelkugellager ist in dieser Anordnung in axialer Richtung annähernd kräftefrei. Radial müssen dagegen die Rückstellkräfte der Ausgleichskupplung kompensiert werden.

Der Federweg von 15 mm wird durch den stirnseitigen Anschlag zwischen Mantelhülse und Zentrierhülse begrenzt. Beim Erreichen des maximalen Federweges sind die Schraubenköpfe der Innensechskantschrauben daher frei von Axialkräften.

Das Drehmoment zum Lösen der Schraubenverbindung wird von der Spindel der Schraubvorrichtung über einen Vierkant formschlüssig auf den Adapter übertragen. Die Kegelerbindung 1:5 leitet das Moment in die Zentrierhülse. Die Schraubenköpfe der Innensechskantschrauben (Pos. 16) übertragen das Lösemoment auf die Mantelhülse. Die Schraubenköpfe sind in Langlöchern geführt und lassen eine axiale Verschiebung gegenüber der Zentrierhülse zu.

Das Linksgewinde M24 x 1,5 bewirkt die Drehmomentübertragung auf die Gelenkkupplung. Der Formschluss zwischen der Kupplung und dem Schaft entsteht durch die Passfeder (Pos. 12). Die Passfeder Verbindung erhält einen Gleitsitz, um ein Verspannen der Anordnung bei Winkelauslenkung zu vermeiden.

Aufgrund der konstruktiven Eigenschaften ist eine ausreichende Nachgiebigkeit beim Ausgleich von geringen Positionierungenauigkeiten und Bahnfehlern gegeben, so dass letztendlich die Reaktionskräfte auf die Schrauberspindel minimiert werden.

#### 4.8.2 Berechnung der lateralen Reaktionskräfte

Durch die Steuerung der Druckbeaufschlagung des Vorschubzylinders besteht die Möglichkeit, die in Abschnitt 4.8.1 beschriebenen Prozessphasen in einer definierten zeitlichen Abfolge zu aktivieren. Die Kennlinie der Druckfeder bestimmt dabei, bei welcher Andruckkraft die jeweiligen Prozessschritte eingeleitet werden.

Aus Versuchen ergab sich, dass für die betrachteten Schraubenverbindungen das erforderliche Lösemoment bei einer maximalen Andruckkraft  $F_{max} = 15 \text{ N}$  zuverlässig übertragen wird. Die Einleitung des Suchprozesses erfolgt daher bei einer Axialkraft  $F_s$  dieser Größenordnung. Im Zusammenhang mit der Forderung nach einer maximalen Andruckkraft der Vorrichtung von  $F_{max} = 15 \text{ N}$  lässt sich bezogen auf die Federsteifigkeit eine Vorauswahl für die Druckfeder treffen. Zusammen mit dem zwischen dem Suchbeginn und dem Erreichen des Endanschlages zurückgelegten Federweg  $\Delta l$  ergibt sich eine erforderliche Federsteifigkeit von:

$$c_{erf} = \frac{F_{max} - F_{As}}{\Delta l} = \frac{15 \text{ N} - 10 \text{ N}}{10 \text{ mm}} = 0,5 \text{ N/mm}$$

Ausgehend von dem zur Verfügung stehenden Einbauraum und der erforderlichen Federrate wurde eine Druckfeder vom Typ D-148 der Firma Gutekunst ausgewählt. Die Feder besitzt folgende technische Daten:

Federsteifigkeit:	$c = 0,614 \text{ N/mm}$
Ursprungslänge:	$l_0 = 55,50 \text{ mm}$
Drahtstärke:	$d = 1,00 \text{ mm}$
Außendurchmesser:	$d_a = 13,50 \text{ mm}$
Kleinste Prüflänge:	$l_{min} = 13,34 \text{ mm}$
Feder-Vorspannung:	$F_v = 6,5 \text{ N}$

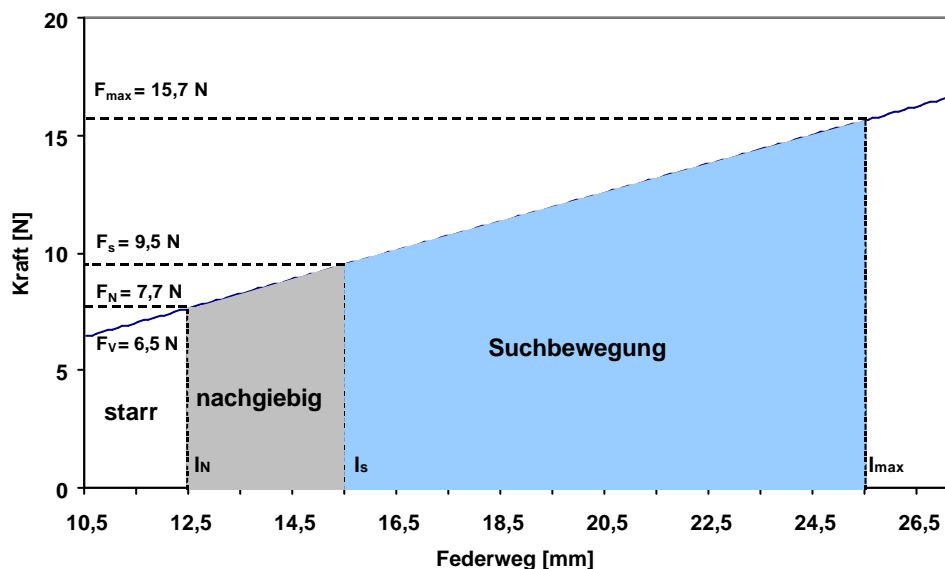


Abb. 4.25: Federkennlinie der Druckfeder

Aus der Federkennlinie und der Geometrie der Vorrichtung ergibt sich ein Übergang in den Bereich der Lateralnachgiebigkeit bei einer Andruckkraft von  $F_N = 7,7 \text{ N}$ . Die Suchbewegung wird bei einer Kraft von  $F_s = 9,5 \text{ N}$  eingeleitet. Die Zustellung des Suchkegels ermöglicht, den Arbeitspunkt für den Beginn der Suchbewegung den jeweiligen Erfordernissen anzupassen.



### 4.8.3 Konzept zum Lösen der ausgedrehten Schraube vom Schrauberbit

Die Analyse der Schraubprozesszeiten hat gezeigt, dass ein erhebliches Potenzial zur Reduzierung der Demontagezeiten in der Entwicklung von flexiblen Verfahren zum Entfernen der ausgedrehten Schraube vom Schrauberbit vorhanden ist. Die Versuchsanalyse in Abschnitt 3.4.1 zeigt, dass 37 % der gesamten Lösezeit einer Schraubenverbindung (12 Sekunden pro Schraube) für das Lösen der ausgedrehten Schraube vom Schrauberbit benötigt werden. Somit ergibt sich folgendes Zeitreduzierungspotential bei der automatisierten Demontage von:

	B&O Beovision 4000 3901 TV	Philips Siera 26 C 768	Sharp DV 6301 – S	RFT Siesta TV 63-102	durchschnittlicher Zeitanteil
automatisierte Demontagezeit, 1. Entwicklungsstufe	10,93 min	9,68 min	11,95 min	10,03 min	100,0%
Prozesszeit für das Ablegen aller gelösten Schrauben	1,20 min 11,0%	1,20 min 12,4%	2,60 min 21,8%	1,80 min 17,9%	16,0%

Tab. 4.16: Prozesszeit für das Ablegen aller gelösten Schrauben im Vergleich zur Gesamtdemontagezeit in der ersten Entwicklungsstufe (s. Kapitel 3)

Tabelle 4.16 zeigt, dass in der ersten Entwicklungsstufe der automatisierten Demontagezelle durchschnittlich 16% der gesamten Demontagezeit für das Entfernen sämtlicher ausgeschraubter Schrauben vom Schrauberbit an der stationären Schraubenabziehvorrichtung benötigt werden.

Die Analyse der Versuchsergebnisse entsprechend Tabelle 4.16 zeigen die erforderliche Optimierung des Lösens der Schraube vom Schrauberbit auf. Ziel dieser Optimierung ist es, das Lösen der ausgedrehten Schraube vom Schrauberbit flexibel während der Roboterbewegung zum nächsten Demontageschritt zu ermöglichen, um so die ausgedrehte Schraube während der direkten Anfahrt des nächsten Demontageschrittes vom Schrauberbit zu entfernen.

Prinzipiell sind – abgesehen vom stationären bestehendem Prinzip – für das Lösen der ausgedrehten Schraube vom Schrauberbit an jeder Roboterposition folgende technische Konzepte möglich:

1. Absaugen der gelösten Schraube entsprechend der Umkehrung der Schraubenzufuhr bei der Montageautomatisierung.
2. Über ein elektromagnetisches Feld werden gelöste Schrauben entnommen und durch Abschalten des Elektromagneten wieder vom Schrauberbit gelöst.
3. Nutzung der Schraubenträgheit zum Lösen der Schraube vom magnetisierten Schrauberbit durch einen Impuls des Vorschubzylinders.

Das Absaugen der ausgedrehten Schraube vom magnetisierten Schrauberbit als Umkehrprinzip der Zuführtechnik in der Montage hat in Laborversuchen gezeigt, dass zum einen kleine Schrauben häufig nicht vom magnetisierten Schrauberbit gelöst werden, zum anderen lange Schrauben teilweise quer vor dem Absaugrohr angesaugt wurden. Das Absaugen der ausgedrehten Schraube wurde daher nicht weiter berücksichtigt.

Um das Entnehmen der ausgedrehten Schraube aus dem Schraubenschaft mit Hilfe eines elektromagnetischen Feldes zu ermöglichen und durch Abschalten des elektromagnetischen Feldes diese Schraube wieder vom Schrauberbit zu entfernen, muss die Schraube ausreichend magnetisiert werden. Für den Aufbau des elektromagnetischen Feldes am Schrauberbit kann zum einen eine lange,

dünne Spule um die Bitverlängerung integriert werden, zum anderen kann dieses durch das Drehen der Bitverlängerung innerhalb einer stehenden Spule erzeugt werden.

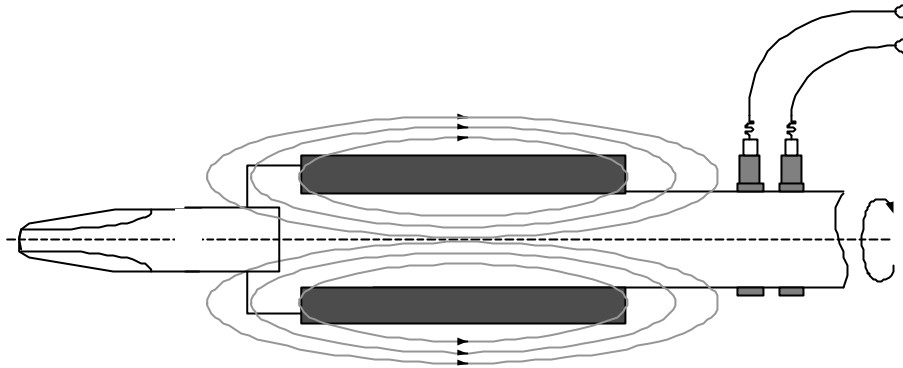


Abb. 4.26: Lange, dünne Spule um die Bitverlängerung

Die Energieübertragung vom starren Schraubwerkzeug auf die drehende Bitverlängerung erfolgt über Schleifkontakte oder Transformatoren. Neben den baulichen Anforderungen an eine schlanke Bitverlängerung und dem Verschleiß der Schleifkontakte zeigten erste Laborversuche Unsicherheiten innerhalb der Prozesssicherheit. Diese Prozessunsicherheit ist durch die Restmagnetisierung des Bits auch nach Abschalten des Elektromagneten begründet.

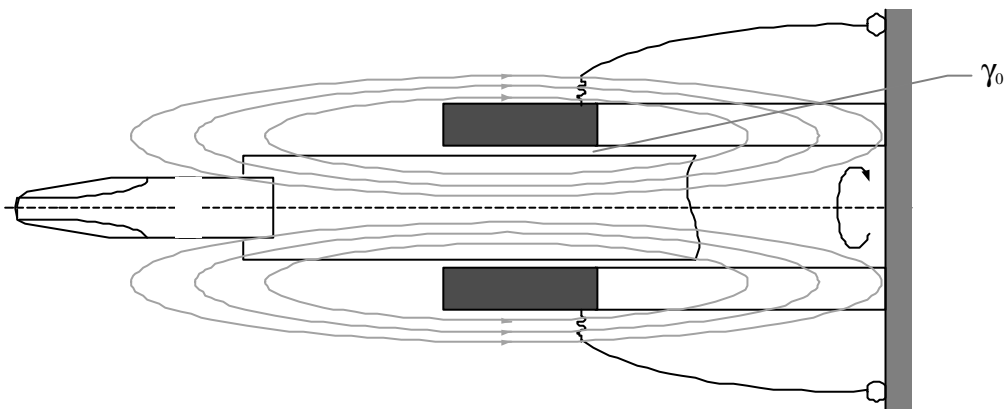


Abb. 4.27: Drehen der Bitverlängerung innerhalb einer stehenden Spule

Neben der Integration der Spule um die Bitverlängerung mit einer Energieübertragung ist auch der Aufbau eines elektromagnetischen Feldes durch das Drehen der Bitverlängerung innerhalb einer stehenden Spule möglich. Die Bitverlängerung fungiert dabei als Spulenkern. Da die Spule sich nicht dreht, gibt es keine Probleme mit der Energieübertragung zur Spule. Aber durch den Luftspalt zwischen Spule und Spulenkern (Bitverlängerung) entstehen Verluste in der Übertragung des magnetischen Feldes, die durch eine größere Spule kompensiert werden müssen. Weiterhin bleibt durch die Bitmagnetisierung die Schraube auch beim Abschalten des Elektromagneten magnetisiert, so dass auch hier Prozessunsicherheiten vorliegen.

Zur Reduzierung dieser Prozessunsicherheit ist das Bit durch Beaufschlagung der Spule mit einer hochfrequenten Wechselspannung zu entmagnetisieren. Weiterhin sollte die Bitverlängerung aus einem weichmagnetischen Werkstoff, wie z.B. Transformatorenbleche, aufgebaut werden, um so entsprechend der Magnetisierungskurve einen gut magnetisierbaren Werkstoff zu nutzen. Dies steht aber der Anforderung gegenüber, das Bit aus einem hartmagnetischen Werkzeugstahl aufzubauen.

Die dritte technisch mögliche Variante ermöglicht durch Nutzung der Schraubenträgheit das Entfernen der ausgedrehten Schraube vom magnetisierten Schrauberbit. Durch einen vor- oder rückwärtigen Linearimpuls des Pneumatikzylinders erfolgt das Entfernen der Schraube vom Schrauberbit. Laborversuche mit dem Schrauberantrieb zeigten, dass durch einen linearen Impuls des Pneumatikzylinders bei gleichzeitiger Übertragung eines Drehmomentes Schrauben sicher vom Schrauberbit gelöst werden.

Tabelle 4.17 zeigt die Bewertung der einzelnen Konzepte hinsichtlich der Kriterien Prozesszeit, Prozesssicherheit, Werkzeugverschleiß, Bauraum und Realisierungsaufwand:

Bewertungs-kriterium j	Gewichtung $a_j$	Elektromagneten in der Bitverlängerung		Spule und Bitverlängerung als Kern		Linearimpuls des Schrauberkolbens	
		$E_{ij}$	$P_{ij}$	$E_{ij}$	$P_{ij}$	$E_{ij}$	$P_{ij}$
Prozesszeit	10%	4,7	0,5	4,7	0,5	4,7	0,5
Prozesssicherheit	30%	2,3	0,7	2,3	0,7	4,8	1,4
Werkzeugverschleiß	15%	4,1	0,6	4,8	0,7	1,8	0,3
Bauraum	15%	1,7	0,3	2,1	0,3	4,9	0,7
Realisierungsaufwand	30%	2,1	0,6	2,2	0,7	4,4	1,3
<b>Nutzwert:</b>			<b>2,7</b>		<b>2,9</b>		<b>4,2</b>

Tab. 4.17: Variantenvergleich für das flexible Entfernen der gelösten Schraube

Die technisch einfachste Lösung zur Trennung der Schraube von dem magnetischen Schrauberbit ist durch einen linearen Impuls des Pneumatikzylinders möglich. Prinzipiell ist ein Lösen der Schraube vom Schrauberbit durch einen Impuls auf zwei verschiedene Arten möglich:

1. durch eine Beschleunigung des Pneumatikzylinders nach hinten
2. durch eine Beschleunigung des Pneumatikzylinders nach vorne und Fahren gegen den vorderen Endanschlag.

Um die Prozesssicherheit bei dieser Verfahren zu gewährleisten, wurde der benötigte Druckimpuls theoretisch ermittelt und in zahlreichen Laborversuchen experimentell verifiziert.



Abb. 4.28: Messung des Druckimpulses mit einem Beschleunigungsaufnehmer

Die erreichbare Beschleunigung hängt dabei von der Gesamtmasse  $m_{ges}$  aller beschleunigten Teile und der Druckkraft  $F_p$  auf der Kolbenrückseite ab. Die Druckkraft auf die Kolbenrückfläche  $A_R$  beträgt bei dem Nenndruck  $p_N$ :

$$F_p = p_N \cdot A_R$$

Für die Berechnung der Beschleunigung kann die Masse  $m_S$  der Schraube vernachlässigt werden, da das maximale Gewicht der während der Demontageuntersuchungen ermittelten schwersten Schraube (M6) bei  $m_S = 6 \text{ g}$  liegt sowie das Gewicht des Ausgleichsmoduls bei  $m_A = 823 \text{ g}$  und das Gewicht der Kolbenstange bei  $m_K = 253 \text{ g}$  beträgt. Die Gesamtmasse setzt sich damit aus der Masse der Ausgleichsvorrichtung  $m_A$  und der Masse der Kolbenstange  $m_K$  zusammen. Die bei gegebenem Nenndruck erreichbare Beschleunigung lässt sich unter dieser Voraussetzung durch folgende Beziehung darstellen:

$$a = \frac{F_p - F_R}{m_{ges}} = \frac{p_N \cdot A_R - F_R}{m_A + m_K} \quad (\text{für } m_S \ll m_A + m_K)$$

Damit die Ablösung der Schraube zuverlässig funktioniert, muss die bei der Beschleunigung auf die Schraube wirkende Trägheitskraft  $F_T$  die Magnetkraft  $F_{magn}$  des Bits überwinden. Je nach Lage der Schrauberachse wirkt die Gewichtskraft  $m_S \cdot g$  der Schraube dabei unterstützend oder entgegengesetzt. Im Folgenden wird davon ausgegangen, dass die Schrauberachse senkrecht nach unten zeigt. Daraus ergibt sich die Grenzbedingung:

$$m_S \cdot (a + g) \geq F_{magn}$$

Der Einfluss der Reibung im Pneumatikzylinder ist bei den vorangegangenen Betrachtungen vernachlässigt worden, und muss ggf. im Praxisbetrieb durch eine entsprechende Erhöhung des Nenndruckes kompensiert werden. Bei einer Schraubenmasse von:

$$m_S \geq \frac{F_{magn}}{\left( \frac{p_N \cdot A_R - F_R}{m_A + m_K} + g \right)}$$

ist eine Trennung gerade noch möglich. Bei gegebener Magnetkraft und gegebenen Bauteilmassen lässt sich der Vorgang zugunsten kleinerer Schrauben folglich nur durch eine Erhöhung des Nenndruckes bzw. durch eine Reduzierung der Reibung aller beteiligten Komponenten beeinflussen.

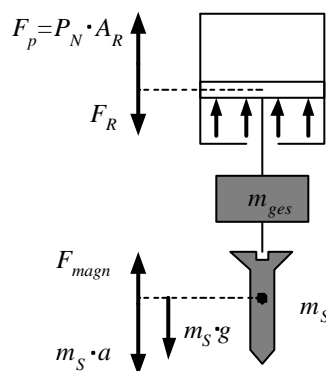


Abb. 4.29: Kräftebilanz für den Ablösevorgang

Mit den nachfolgenden Parametern

Gesamtmasse:	$m_{ges} = 1,1 \text{ kg}$
Kolben(rück-)fläche:	$A_R = 6,6 \text{ cm}^2$
magnetische Haltekraft des Bits:	$F_{mag.} = 0,12 \text{ N}$

ergibt sich die Abhängigkeit der minimalen Schraubenmasse vom Nenndruck.

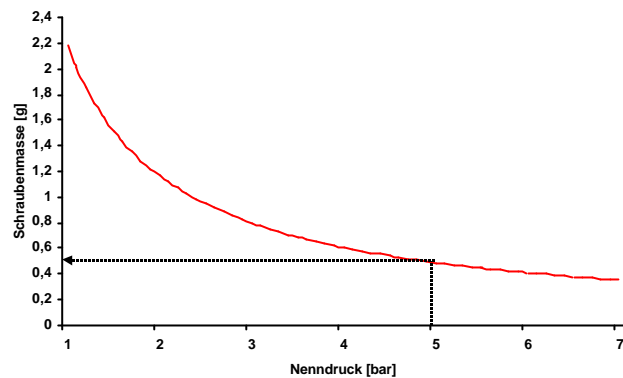


Abb. 4.30: Grenzbedingung für Schraubengröße bei einer Beschleunigung des Pneumatikzylinders nach hinten mit einem Nenndruck von 5 bar

Abbildung 4.30 zeigt, dass die erforderliche Druckkraft zum Ablösen der Schraube mit sinkender Schraubenmasse bzw. Schraubengröße steigt. Es bestätigt sich dadurch die praktische Erfahrung, dass die Ablösung durch impulsartige Bewegungen bei kleinen Schrauben im Vergleich zu den größeren Schrauben Probleme bereitet. Bei einem Nenndruck von  $p_N = 5$  bar liegt die kritische Grenze bei einer Schraubenmasse von  $m_{ges} = 0,51$  g bei einer Beschleunigung des Pneumatikzylinders nach hinten.



Abb. 4.31: Beschleunigung des Schrauber-Pneumatik-Kolbens bei einer Beschleunigung des Pneumatikzylinders nach vorn mit einem Nenndruck von 5 bar

Abbildung 4.31 zeigt den zeitlichen Verlauf der Beschleunigung bei der Versuchsanordnung. Für das Verfahren der Beschleunigung des Pneumatikzylinders nach hinten steht demnach eine konstante Beschleunigung von 48 g (entsprechend  $470,9 \text{ m/s}^2$ ) zur Verfügung. Das Fahren gegen den vorderen Endanschlag des Zylinders stellt eine Verzögerung von 460 g (entsprechend  $4512,6 \text{ m/s}^2$ ) bereit. Die Anordnung ist demzufolge bei dem Verfahren der Beschleunigung des Pneumatikzylinders nach vorne in der Lage, eine Schraube der Masse

$$m_s \cdot (a + g) \geq F_{magn}$$

vom Schrauberbit zu lösen. Mit der magnetischen Haltekraft von 0,12 N ergibt sich daraus eine minimale Schraubenmasse von  $m_s = 0,026$  g.

Die Masse der kleinsten zu verarbeitenden Schraubengröße liegt bei ca. 0,5 g, so dass ein zuverlässiger Prozessablauf auch unter Einbeziehung der auftretenden Reibung durch eine Beschleunigung des Pneumatikzylinders nach vorn gegeben ist.

#### 4.9 Anpassung des Ausgleichsmoduls an das Trennwerkzeug

Das Grundwerkzeug bildet die Pneumatik-Schraubeinheit SUR 4610 der Firma Weber Schraubautomaten GmbH. Diese Schraubeinheit entspricht den in Abschnitt 4.5 gestellten Anforderungen an die Schraubeinheit. Insbesondere ermöglicht diese Schraubeinheit

- die Regelung der Drehzahl und Axialkraft in Abhängigkeit der Löseprozessphasen (Formschlusserstellung:  $w_{Lmin} = 30$  bis  $40 \text{ min}^{-1}$ , Ausdrehphase:  $\omega_{Amin} \geq 200 \text{ min}^{-1}$ ),
- eine Lösemomentübertragung bis zu 30 Nm,
- eine Aufnahme des auftretenden Reaktionsmomentes auch bei der Übertragung des maximalen Momentes,
- eine zur Rotation zeitparallele, drehzahlproportionale Translationsrückhubbewegung mit einer axialen Nachgiebigkeit über einen doppelwirkenden Vorschubzylinder zum Ausgleich von Schwankungen der Translationsgeschwindigkeiten,
- über den doppelwirkenden Vorschubzylinder, der in der Längsachse der Schraube verfährt, eine lineare Rückhubbewegung des Schraubwerkzeuges parallel zur achsgeraden Führung der Schrauberspindel beim Herausdrehen der Schraube ohne Bahnfehler,
- durch geringe Abmessungen eine hohe Beweglichkeit des Roboters im Arbeitsraum und Störkanten der Demontageobjekte zu umgehen,
- die Umsetzung der Anforderung an das maximale Handhabungsgewicht des Roboters,
- eine Nutzung der Standardschnittstelle sowie vollautomatische Werkzeugwechsel,
- die Verwendung von Standardkomponenten, die in der Schraubenmontage erprobt sind.

Die Schraubeinheit wird über einen Flügelzellenmotor angetrieben. Aufgrund der schlanken Bauweise des Flügelzellenmotors und des geringen Kolbenflächendurchmessers des Pneumatikzylinders besitzt der Schrauber lediglich einen Außendurchmesser von nur 50 mm.

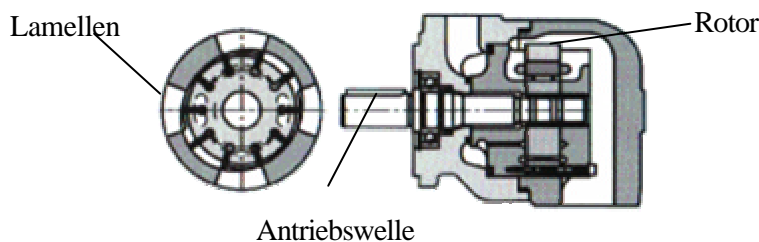


Abb. 4.32: Systemzeichnung eines Flügelzellenmotors

Für den Ausgleich der Lateral-Achsversätze wurde an der Spindel des Schrauberabtriebs das Ausgleichsmodul mit federnder Nachgiebigkeit über eine Pressverbindung montiert. Zwischen dem Ausgleichsmodul und dem Schrauberbit ist eine Verlängerung von 80 mm eingesetzt. Somit sind auch schlecht zugängliche Schrauben (z.B. versenkte Schrauben) lösbar.

Abbildung 4.28 zeigt das Schraubwerkzeug mit dem montierten Ausgleichsmodul.

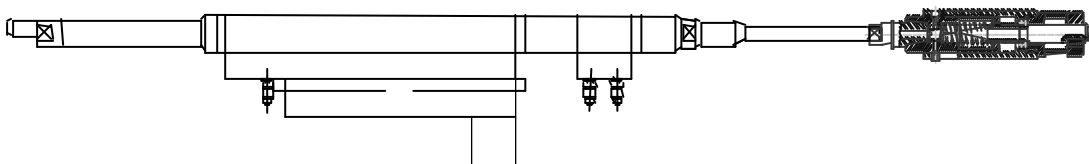


Abb. 4.33: Konstruktionszeichnung Schraubwerkzeug mit Toleranzausgleichsmodul

## 5 Experimentelle Untersuchungen

### 5.1 Anforderungen an den Versuchsstand

#### 5.1.1 Integration des Schraubwerkzeuges in die Demontagezelle

Für die Integration des Schraubwerkzeuges in die Demontagezelle musste die Schnittstelle zwischen dem Schraubwerkzeug und dem Roboter gestaltet sowie die Steuerung des Zerlegeprozesses von Schraubenverbindungen innerhalb des Demontageablaufes aufgebaut werden.

Die Schnittstelle Roboter - Schraubwerkzeug wird durch ein Greiferwechselsystem bestimmt. Das Wechselsystem stellt nicht nur die mechanische Schnittstelle, sondern liefert auch die Voraussetzungen für die Übertragung von Informationen, Energie und Medien.

Für die Ansteuerung des Schraubwerkzeuges war eine Modifikation der Steuerung erforderlich. Die Anlagenkomponenten werden über ein Leitsystem gesteuert, dem zwei Robotersteuerungen für den Demontageroboter und für den Handhabungsroboter unterlagert sind. Die Steuerung des Entschraubungswerkzeuges wurde der Robotersteuerung des Demontageroboters unterlagert. Für die erforderlichen Abläufe während der Demontage wurden Funktionen in der Robotersteuerung und im Leitsystem programmiert und getestet.

Die Eingliederung der neuen Komponenten soll anhand des folgenden Blockschaubildes veranschaulicht werden. Darin sind die neu hinzukommenden Komponenten und die vorhandenen Komponenten, die wegen der Integration angepasst werden mussten, gekennzeichnet. Abbildung 5.1 zeigt die steuerungstechnische Eingliederung der neuen Komponenten.

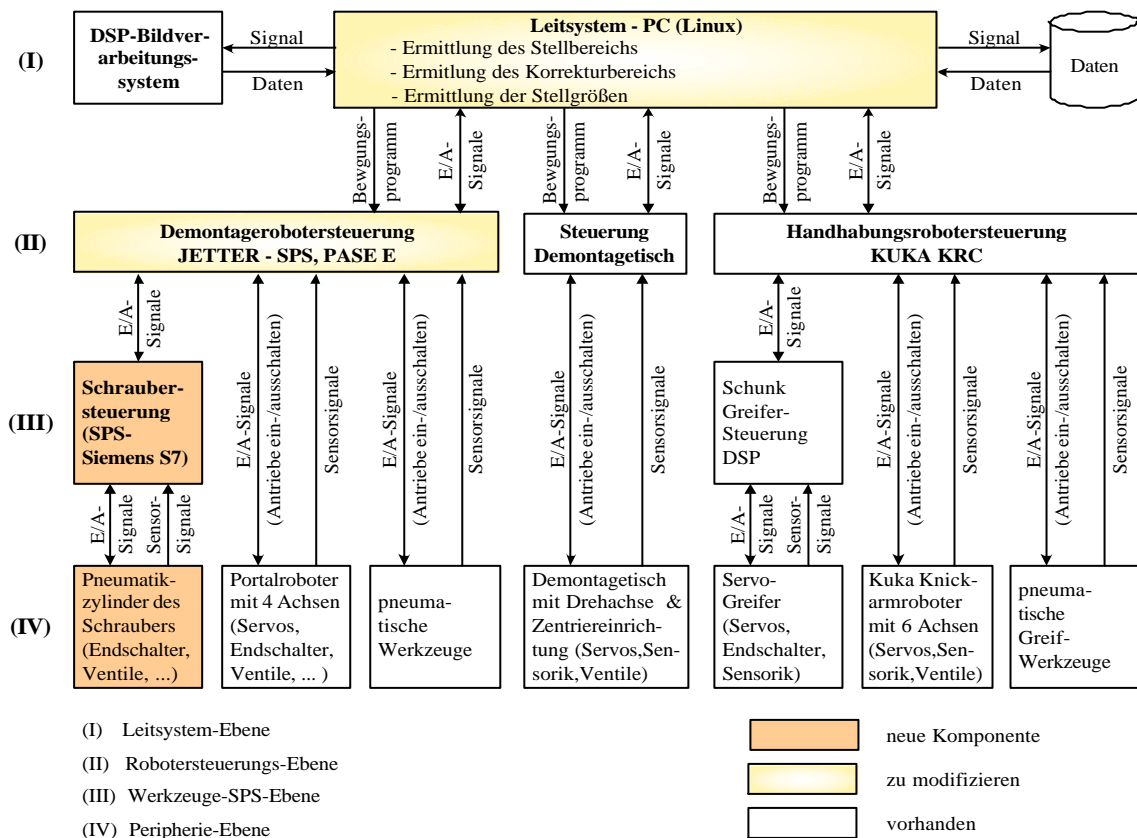


Abb. 5.1: Steuerungstechnisches Blockschaubild des Demontagesystems

Durch die SPS-Steuerung des Schraubwerkzeuges werden folgende Funktionen ausgeführt:

- Überwachung des Zerlegeprozesses,
- Steuerung des Drehmomentes,
- Steuerung der Drehzahl,
- Steuerung der Axialkraft.

Die Überwachung des Schraubprozesses erfolgt mit Hilfe von im Pneumatikzylinder integrierten Sensoren. Zum einen sind Endlagensensoren angebracht, die die Position der Schrauberspindel durch Lagemessung des Pneumatikkolbens in voll ausgefahrener Stellung sowie im eingefahrenem Zustand (Ruhezustand) ermitteln. So wird der Schraubprozess beendet, sobald nach der Übertragung des Lösemomentes der Rückhub des Vorschubzylinders beendet ist. Falls kein Rückhub des Vorschubzylinders trotz Formschlusserstellung erfolgte, wird über den Endlagensensor erkannt, dass die Schraubverbindung z.B. aufgrund eines korrodierten Schraubenkopfes nicht mit dem Schraubwerkzeug gelöst wurde.

Die Überwachung des Formschlusses zwischen Schrauberbit und Schraubenkopf erfolgt mit Hilfe eines Druckmessers vor dem Motoreingang, der das komprimierte Luftvolumen gegen Umgebungsdruck misst. Erfolgt während der Formschlusserstellungsphase kein sprunghafter Anstieg des Pneumatikdrucks, erfolgte kein Formschluss.

Die Steuerung des Drehmomentes, der Drehzahl sowie der axialen Druckkraft erfolgt über die Regelung des Pneumatikdrucks mittels Drosseln.

Die Schrauberspindel wird über einen Flügelzellenmotor angetrieben. Flügelzellenmotoren arbeiten nach dem Verdrängerprinzip und besitzen daher den Vorteil einer sehr sensiblen Steuerungsmöglichkeit. So wird bei Stillstand der Luftdurchfluss sofort vollständig unterbrochen.

Die nachfolgende Abbildung 5.2 zeigt den prinzipiellen Steuerungsaufbau des Schraubwerkzeuges:

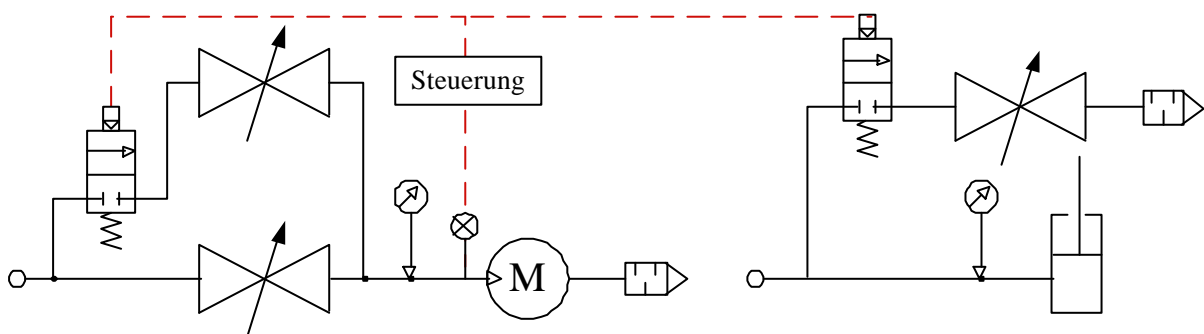


Abb. 5.2: Prinzipieller Steuerungsaufbau des Schraubwerkzeuges

links: Steuerungsaufbau des Flügelzellenmotors

rechts: Steuerungsaufbau des Pneumatikzylinders

Das Drehmoment sowie die Drehzahl werden über die Drosselsteuerung des Flügelzellenmotors gesteuert. Die Drehzahl ergibt sich aus der Momentenkennlinie des Flügelzellenmotors im Zusammenhang mit dem auftretendem Lastmoment in Abhängigkeit des Volumendurchflusses. Bei einem geringen Volumendurchfluss tritt ein niedriges Moment mit einer niedrigen Drehzahl auf. Während der ersten Prozessphase – der Formschlusserstellungsphase (Abb. 5.3, Phase 1) – ist das Wegeventil



geschlossen, so dass nur eine Drossel geöffnet ist. Diese Drossel reduziert den Durchfluss so, dass der Flügelzellenmotor nur mit einer Drehzahl von etwa  $w_{min} = 35 \text{ min}^{-1}$  läuft.

Nach der Formschlusserstellung steigt der Pneumatikdruck am Motoreingang an. Der Pneumatikdruck vor dem Motoreingang wird über einen Druckmesser gegen Umgebungsdruck gemessen. Über den Druckanstieg am Flügelzellenmotoreingang wird das Wegeventil geschaltet. Während der Lösephase (Abb. 5.3, Phase 2) kann es zum Stillstand des Flügelzellenmotors kommen. Das übertragene Drehmoment steigt in diesem Fall bis zu einem maximalen Wert an, der durch die Motor Kennlinie und den Netzdruck bestimmt wird. Flügelzellenmotoren besitzen den Vorteil, dass maximale Drehmoment im Stillstand zu übertragen. Nach dem Lösen der Schraube bleiben beide Drosseln geöffnet, so dass bedingt durch den maximalen Durchfluss die Drehzahl während der Ausdrehphase bis auf maximal  $w_{max} = 200 \text{ min}^{-1}$  ansteigt.

Die axiale Druckkraft wird über den pneumatischen Vorschubzylinder übertragen. Die Steuerung der Kraft erfolgt durch den Drucksensor am Eingang des Flügelzellenmotors. Das Sinken des Druckes am Motoreingang liefert der Steuerung den optimalen Zeitpunkt zur Reduzierung des Pneumatikdruckes. Der Druck wird damit zu dem Zeitpunkt reduziert, in dem ein Formschluss erfolgt ist, das Lösemoment übertragen wurde und der Ausdrehvorgang (Abb. 5.3, Prozessphase 3) beginnt.

Die Rückhubgeschwindigkeit des Pneumatikkolbens während der Ausdrehphase (Abb. 5.3, Phase 3) passt sich durch das kompressible Luftvolumen in dem Zylinder automatisch der Geschwindigkeit des Schraubenkopfes an.

Die nachfolgende Abbildung 5.3 zeigt den Verlauf des Drehmomentes, der Spindeldrehzahl und der Axialkraft je Prozessphase:

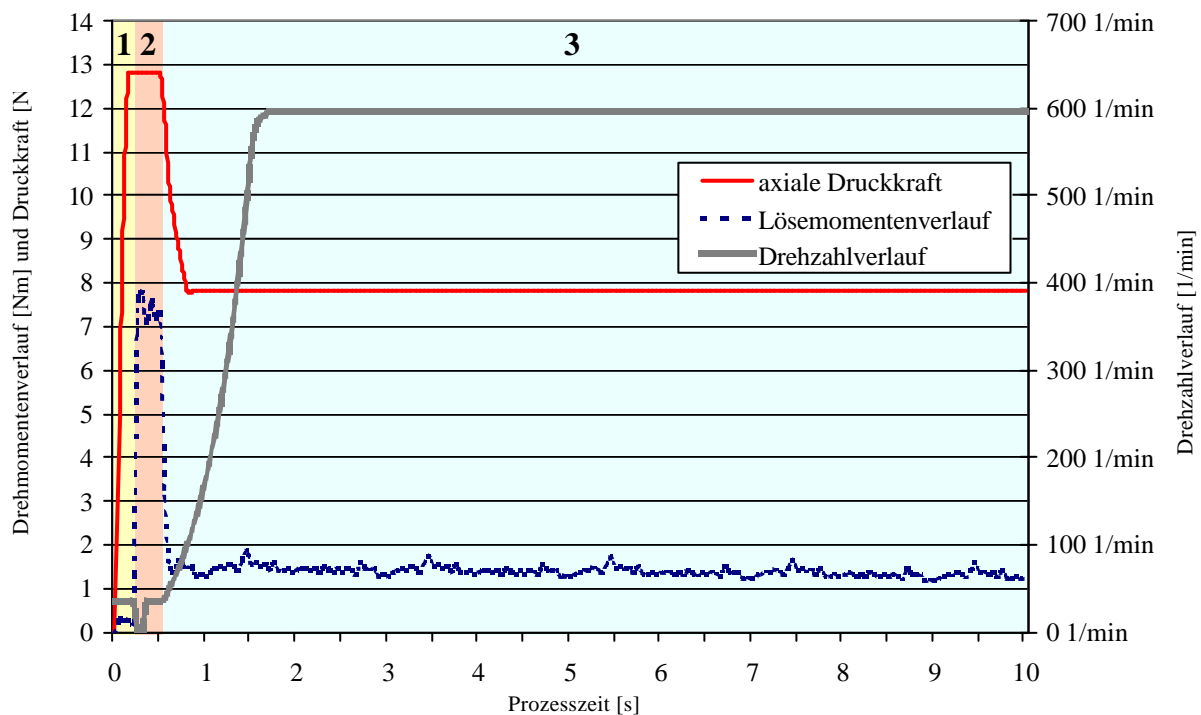


Abb. 5.3: Verlauf von Drehmoment, Spindeldrehzahl und Axialkraft je Prozessphase

Die SPS-Steereinheit des Schrauberwerkzeuges steuert den Zerlegeprozess von Schraubenverbindungen. Ein Entschraubungsvorgang läuft in folgenden Schritten ab:

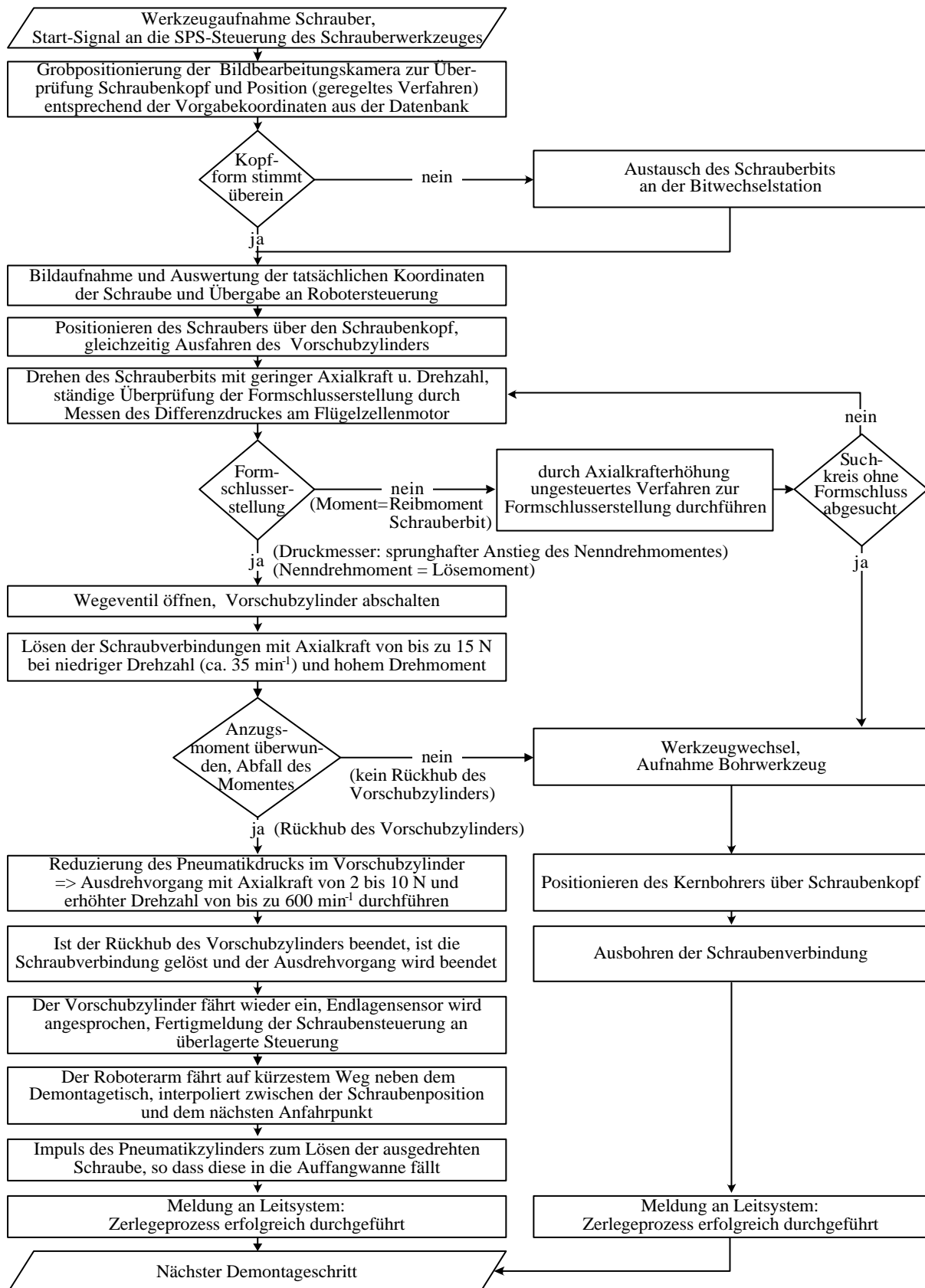


Abb. 5.4: Ablauf des Zerlegeprozesses mit neuer Schraubeinheit und Ausgleichsmodul mit Ausgleichsverfahren und flexiblem Entfernen der gelösten Schraube

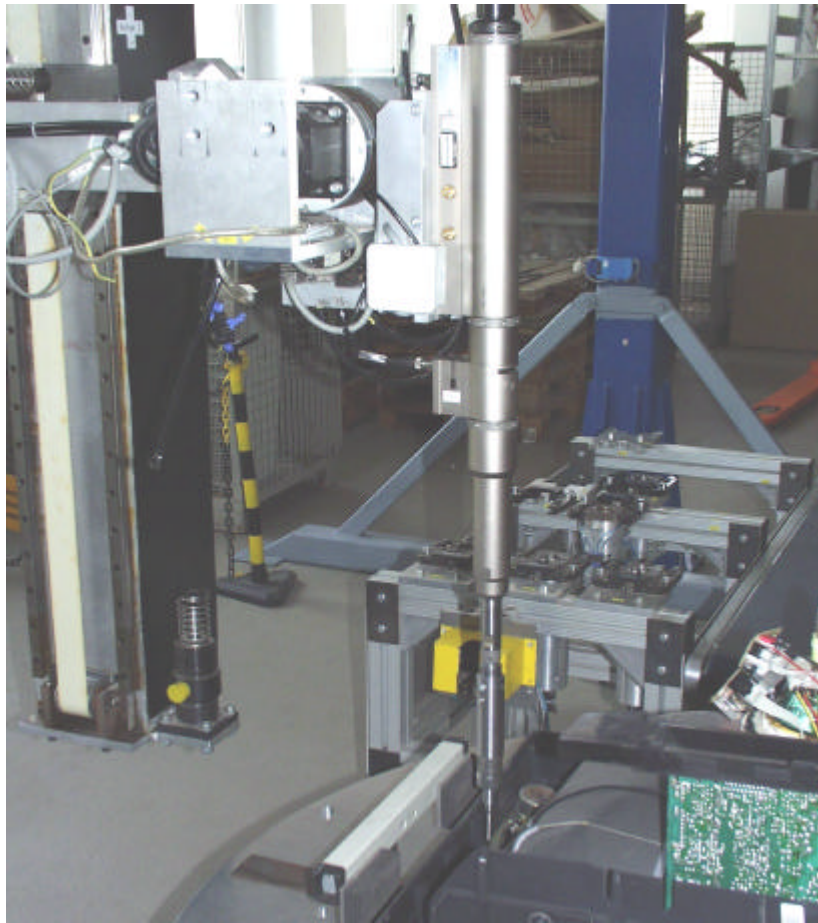


Abb. 5.5: Integration des Schraubwerkzeugs mit Ausgleichsmodul in die Demontagezelle

### 5.1.2 Beschreibung des Versuchsaufbaus

Für die experimentelle Verifikation des entwickelten Trennwerkzeugs in der Demontagezelle anhand der in Abschnitt 4.4 ermittelten wissenschaftlichen Grundlagen und Leistungswerte wurde der in Abschnitt 4.4.2 beschriebene Versuchsaufbau mit dem Schraubwerkzeug und dem Ausgleichsmodul ergänzt.

## 5.2 Experimentelle Untersuchung des entwickelten Ausgleichsmoduls

Innerhalb unterschiedlicher Versuchsreihen wurden im ersten Schritt Vorteile und Schwachstellen des Schraubwerkzeugs mit dem Ausgleichsmodul ermittelt und bewertet. Die Fehlerbetrachtung und Auswertung der Demontageabläufe der ersten Versuchsreihen haben Hinweise über geringfügige Anpassungen ergeben, die mit in die Konstruktion eingeflossen sind und umgesetzt wurden. So wurde der Suchkegel flacher gestaltet, um den Abstand der Trajekturen  $a_{TM}$  zu optimieren. Von der Firma HAZET wurden neue Schrauberbits integriert, um ein Klemmen der Bits in einer automatisierten Bitwechselstation zu ermöglichen und mit den entsprechenden Bits die Versuchsreihen durchzuführen. Weiterhin wurden die Drosseln für die Steuerung der Druckluft feinjustiert.

Die Versuche mit dem modifizierten Ausgleichsmodul lieferten Anhaltswerte über

1. die Erfüllung des Anforderungsprofils innerhalb der einzelnen Trennprozessphasen wie
  - Berücksichtigung der Einflussfaktoren auf die Formschlusserstellung und
  - Berücksichtigung der Einflussfaktoren auf die Löse- und Ausdrehphase,
2. die Integration und Eignung des entwickelten Verfahrens und Werkzeuges innerhalb eines Demontageprozesses an den ermittelten unterschiedlichen Entschraubungsaufgaben nach
  - Schraubenart (Schraubenkopfgeometrie, Schraubengröße, Lösemoment),
  - Lage und Zugänglichkeit der Schrauben (Störkanten),
  - Ablauf der Entschraubung und Verfahren zum Entfernen der gelösten Schraube,
3. die erreichbaren Demontagezeiten mit dem entwickelten Verfahren und Werkzeug,
4. die Verfügbarkeit und Störungshäufigkeit von Teilsystemen und deren Störungsursache.

In mehreren Versuchsreihen wurde zunächst der Schraubprozess auf seine Eignung innerhalb der Demontage und die Erfüllung des Anforderungsprofils untersucht. Innerhalb der verschiedenen Versuchsreihen wurden die Prozessgrößen Axialkraft, Drehzahl und Drehmoment variiert und hieraus Formschlusswahrscheinlichkeiten, Formschlusszeiten, maximaler Lateral- und Kippwinkelversatz sowie Verfügbarkeit und auftretende Störungen ermittelt. Die Ermittlung des Einflusses der Prozessgrößen auf die einzelnen Trennprozessphasen des Schraubprozesses erfolgte innerhalb der Demontagezelle an einer eingespannten Platte, in welcher verschiedene Bohrungen mit Innengewinde und unterschiedlichen Gewindegrößen vorhanden waren. Somit wurde eine große Anzahl an Versuchen mit reproduzierbaren Umgebungsbedingungen durchgeführt. Dieser Versuchsaufbau ermöglichte eine genaue Messung der Lageabweichungen sowie eine Auswertung der Versuchsergebnisse bezüglich der Einflussfaktoren aufgrund der Reproduzierbarkeit des Versuchsablaufes und der Ausgangswerte.

Im ersten Versuch wurden die Einflüsse der Axialkraft und der Drehzahl auf die Formschlusswiederholgenauigkeit ermittelt. Dabei wurden unterschiedliche Schraubengrößen und -kopfgeometrien aus der eingespannten Platte mit unterschiedlichen Achsversätzen gelöst. Abbildung 5.6 zeigt die Formschlusserstellungsrate bei einer M3-Schlitzschraube mit einem Achsversatz von  $a = 1,5$  mm. Dieses Szenario besitzt – wie Abschnitt 4.6.3, zeigt – die höchsten Ansprüche an die Formschlusserstellung, wobei die Lageabweichung gegenüber der maximalen Positioniertoleranz des Demontagesystems um 0,2 mm erhöht wurden:

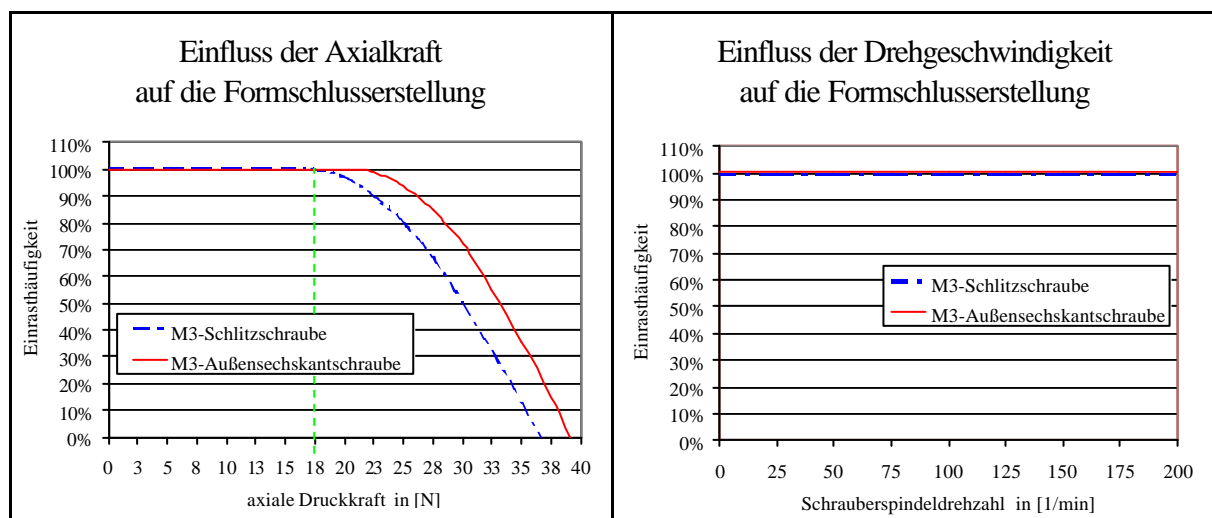


Abb. 5.6: Einflüsse auf die Formschlusserstellungsrate mit dem neuen Schraubmodul auf eine M3-Schraube bei einem Lateral-Achsversatz von 1,5 mm

Die Abbildung 5.6 zeigt, dass ab einer Axialkraft  $F_A > 17,6$  N bei M3-Schrauben die Formschlusswiederholgenauigkeit von 100% nicht gewährleistet werden kann. Aufgrund der federnden Nachgiebigkeit des Ausgleichsmoduls auf die Axialkraft erfolgt die Durchführung der spiralförmigen Suchstrategie durch Unwucherregung ausgehend von Schraubermittelpunkt. Durch die Einleitung einer Axialkraft größer der Grenz-Axialkraft  $F_A = 17,6$  N besitzen die Trajektorien einen Abstand ( $a_{Tm}$ ) größer als das kleinstmögliche Fügspiel zwischen Schrauberbit und Schraubenkopf (siehe Abschnitt 4.8.1), so dass eine sichere Formschlusserstellung nicht gewährleistet werden kann. Aus der Abbildung 5.6 kann weiterhin entnommen werden, dass die Drehzahlgröße keinen Einfluss auf die Formschlusswiederholgenauigkeit besitzt.

Abbildung 5.7 zeigt die Formschlusswiederholgenauigkeit je Lateral-Achsversatz zwischen Schrauberspindel und Schraubenkopf für die kleinsten auftretenden Schraubenkopfgeometrien – einer M3-Schlitz-, M3-Kreuzschlitz- und M3-Außensechskant-Schraube – mit Ausgleichsmodul und als Vergleich zur Ausgangssituation – entsprechend Abschnitt 4.4.2 – ohne Ausgleichsmodul:

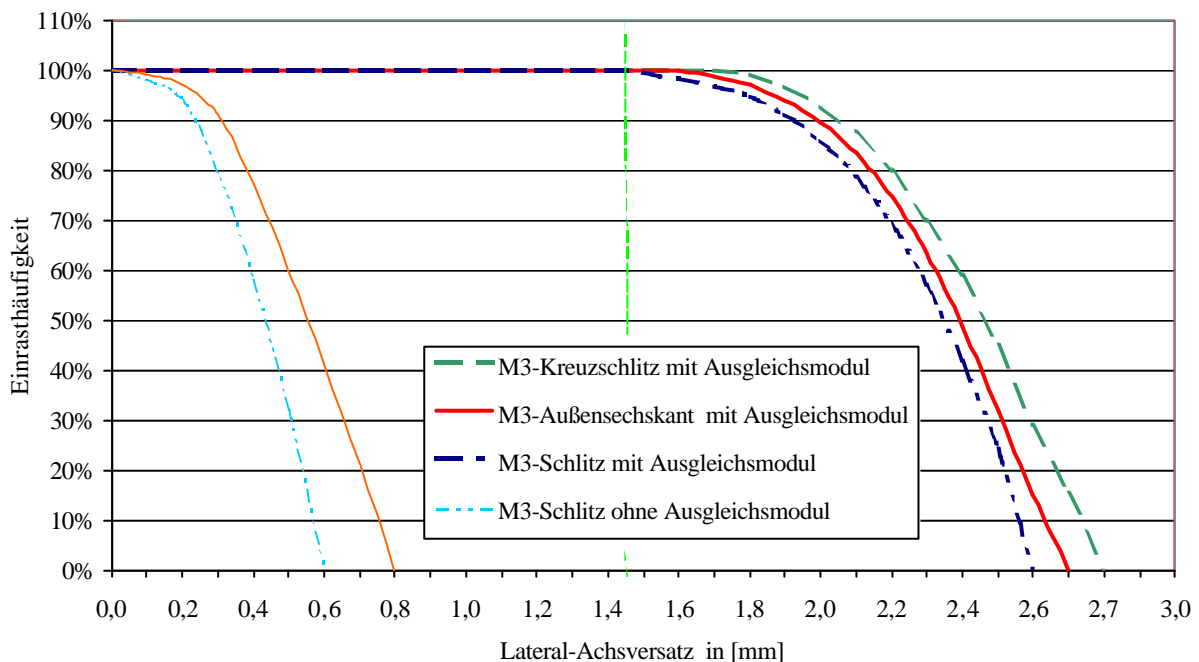


Abb. 5.7: Formschlusserstellungsrate mit Ausgleichsmodul in Abhängigkeit der Lageabweichung und Vergleich zur ersten Entwicklungsstufe

Aus Abbildung 5.7 geht hervor, dass durch den Einsatz des Ausgleichsmoduls die Wiederholgenauigkeit bei der Formschlusserstellung bis zu einem Achsversatz von 1,4 mm für jeden Schraubentyp zu 100% gewährleistet ist. Bis zu einem Achsversatz von 2,4 mm wird eine Formschluss-Wiederholgenauigkeit von 50% erreicht. Weiterhin ist die Formschluss-Wiederholgenauigkeit nur geringfügig von der Schraubenkopfgeometrie abhängig.

In Übereinstimmung mit den theoretischen Untersuchungen wurden aus den Versuchsauswertungen folgende Prozessgrößen für die Formschlusserstellungsphase mit einer Wiederholgenauigkeit von 100% ermittelt:

Schraubengröße, Schraubenkopf	Ausgleich eines maximalen Lateral-Achsversatzes	optimale axiale Anpresskraft	Drehzahl während der Formschlusserstellungsphase
M3- Schlitz	1,4 mm	8 N	35 min <sup>-1</sup>
M4- Schlitz	1,5 mm	8 N	35 min <sup>-1</sup>
M3- Kreuzschlitz	1,5 mm	8 N	35 min <sup>-1</sup>
M4- Kreuzschlitz	1,7 mm	8 N	35 min <sup>-1</sup>
M5- Kreuzschlitz	1,8 mm	9 N	35 min <sup>-1</sup>
M6- Kreuzschlitz	2,0 mm	10 N	35 min <sup>-1</sup>
M4- Außensechskant	1,6 mm	6 N	35 min <sup>-1</sup>
M5- Außensechskant	1,7 mm	6 N	35 min <sup>-1</sup>
M6- Außensechskant	1,9 mm	7 N	35 min <sup>-1</sup>
M8- Außensechskant	2,1 mm	9 N	35 min <sup>-1</sup>

Tab. 5.1: Prozessgrößen für eine 100%ige Formschluss-Wiederholgenauigkeit

Neben der Untersuchung der Formschlusserstellung zeigten die Versuche, dass nach erfolgreicher Formschlusserstellung ein sicheres Lösen und Ausdrehen der Schrauben erfolgte. Somit wurden die Anforderungen an das Schraubmodul wie folgt erfüllt:

- Regelung des Drehmomentes zur Übertragung des maximalen Drehmomentes von 15 Nm zum Lösen der Schraubenverbindung und eines geringeren Drehmomentes zum Ausdrehen der Schraube,
- Regelung der axialen Anpresskraft zur Übertragung einer Anpresskraft für die Formschlusserstellung von 8 bis maximal 15 N und Reduzierung der Axialkraft während der Ausdrehphase auf 2 bis maximal 10 N,
- Regelung der Drehzahl zur Übertragung einer geringen Drehzahl während der Formschlusserstellungs- und Lösephase von etwa 35 min<sup>-1</sup> und Erhöhung der Drehzahl auf maximal 200 min<sup>-1</sup> während der Ausdrehphase,
- Minimierung und Kompensierung der auftretenden Rückstell- und Reaktionskräfte sowie Ausgleich vertikaler Toleranzen und Schwankungen der Translationsgeschwindigkeiten durch die axiale Nachgiebigkeit der Schrauberbitverlängerung,
- Verhinderung von Bahnfehlern durch achsgerade Führung der Schraubspindel während des Ausdrehvorgangs infolge des Rückhubs des Vorschubzylinders der Schraubereinheit.

Innerhalb der zweiten Versuchsreihe erfolgte der Test des Einsatzes des Schraubwerkzeuges innerhalb des Demontageprozessablaufes von Bildschirmgeräten. Dabei wurden die vor- und nachgelagerten Vorgänge betrachtet. Erst hier zeigen sich die Auswirkungen des Schraubwerkzeuges auf das Gesamtsystem.



Abb. 5.8: Einsatz des Schraubwerkzeuges mit Ausgleichsmodul in der Bildschirmgerätedemontage

Zunächst wurde die Zugänglichkeit des Schraubwerkzeuges zu den Schraubenköpfen während der Demontage von Bildschirmgeräten geprüft. Aufgrund der schlanken Bauform der Schraubeinheit und des Ausgleichsmoduls sowie der Bitverlängerung wird eine ausreichende Zugänglichkeit der Schrauberbits auch zu den Extrempositionen gewährleistet, so dass die Formschlusserstellung bei jeder Schraube in den untersuchten Bildschirmgeräten nicht durch die Zugänglichkeit des Schrauberbits behindert wird.

Weiterhin wurden die Prozesszeiten für die einzelnen Zerlegephasen ermittelt. Für den gesamten Schraubprozess werden durchschnittlich 18 Sekunden benötigt, welches zu einer Zeitreduzierung von 14 Sekunden bzw. 44% gegenüber dem Schraubprozess des Ausgangszustandes der ersten Entwicklungsstufe (s. Kapitel 3) führt.

Die nachfolgende Abbildung 5.9 zeigt die Aufteilung der Zeitanteile auf den Schraubprozess sowie die Zeiteinsparungen gegenüber dem Ausgangszustand:

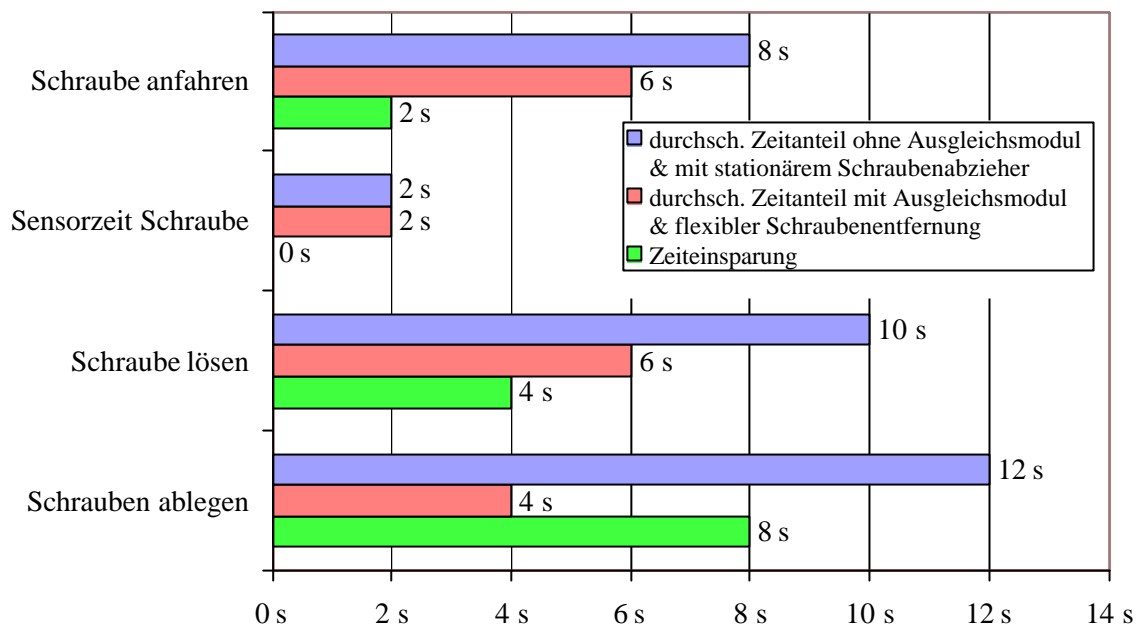


Abb. 5.9: Schraubprozesszeiten für die einzelnen Zerlephasen

Anschließend wurden – innerhalb der dritten Versuchsreihe – die Auswirkungen der Integration des neuen Schraubwerkzeuges in den automatisierten Demontageprozess auf die Gesamtdemontagezeiten und die Verfügbarkeit der Demontagezelle ermittelt. Tabelle 5.2 zeigt die Gesamtdemontagezeiten der 2. Entwicklungsstufe der automatisierten Demontage mit dem entwickelten Schraubwerkzeug sowie einen Vergleich zu der manuellen Demontage und zur ersten Entwicklungsstufe der Demontagezelle entsprechend des Kapitels 3.

	B&O Beovision 4000 3901 TV	Philips Siera 26 C 768	Sharp DV 6301 - S	RFT Siesta TV 63-102
auto. Demontage, 2. Stufe	9,30 min	8,51 min	8,92 min	7,93 min
auto. Demontage, 1. Stufe	10,93 min	9,68 min	11,95 min	10,03 min
manuelle Demontage	8,46 min	8,52 min	5,16 min	5,32 min
Differenz: auto. Demontage 2. Stufe - manuelle	+ 50 s + 9,9%	+ 1 s + 0,1%	+ 225 s + 72,8%	+ 156 s + 49,1%
Differenz: auto. Demontage 2. Stufe - 1. Stufe	- 98 s - 14,9%	- 70 s - 12,1%	- 182 s - 25,4%	- 126 s - 20,9%

Tab. 5.2: Gesamtdemontagezeiten der zweiten Entwicklungsstufe

Tabelle 5.2 zeigt die deutliche Reduzierung der Gesamtdemontagezeit aufgrund des Einsatzes des entwickelten Schraubwerkzeuges, insbesondere durch die Reduzierung des Zeitbedarfes für das Entfernen der ausgedrehten Schraube sowie durch die reduzierte Formschlusserstel



lungs- und Ausdrehzeit. Aufgrund der Vielzahl von Schraubverbindungen wird hierdurch, insbesondere bei den neuen Geräten von Sharp und RFT, die automatisierte Demontageprozesszeit um 21 bis 25% reduziert. Im Vergleich zur manuellen Demontage liegt bei der automatisierten Demontage der älteren Geräten von Bang & Olufsen und Philips in der zweiten Entwicklungsstufe eine annähernde Übereinstimmung vor.

Durch eine Erweiterung des Aufgabengebietes des Handhabungsroboters durch Übernahme von Trennprozessfähigkeiten sowie der Integration eines Kompakt-Schwenkkopfes für die Aufnahme von zwei Werkzeugen, können unproduktive Wartezeiten des Handhabungsroboters gesenkt und die Demontagezeiten weiter reduziert werden. Dies gilt insbesondere für die Demontage moderner Bildschirmgeräte, da für das Lösen der Rückwand ein hoher Zeitbedarf benötigt wird. Daher müssen auch hier Trennaufgaben vom Handhabungsroboter übernommen werden, um diesen besser auszulasten.

Um die Verfügbarkeit der zweiten Entwicklungsstufe der Demontagezelle und insbesondere des Schraubwerkzeuges zu bestimmen und Weiterentwicklungspotenziale zu ermitteln, wurden im Dauerbetrieb während der experimentellen Untersuchungen des Gesamtprozesses je 8 Fernsehgeräte der Firmen Bang & Olufsen, Philips, RFT und Sharp automatisiert demontiert, die auftretenden Störungen erfasst und ihre Ursachen untersucht. Dabei traten insbesondere Störungen resultierend aus fehlerhaften Auswertungen des Bildverarbeitungssystems auf. Abbildung 5.10 zeigt die prozentuale Fehlerrate je Störung sowie deren Standardabweichung:

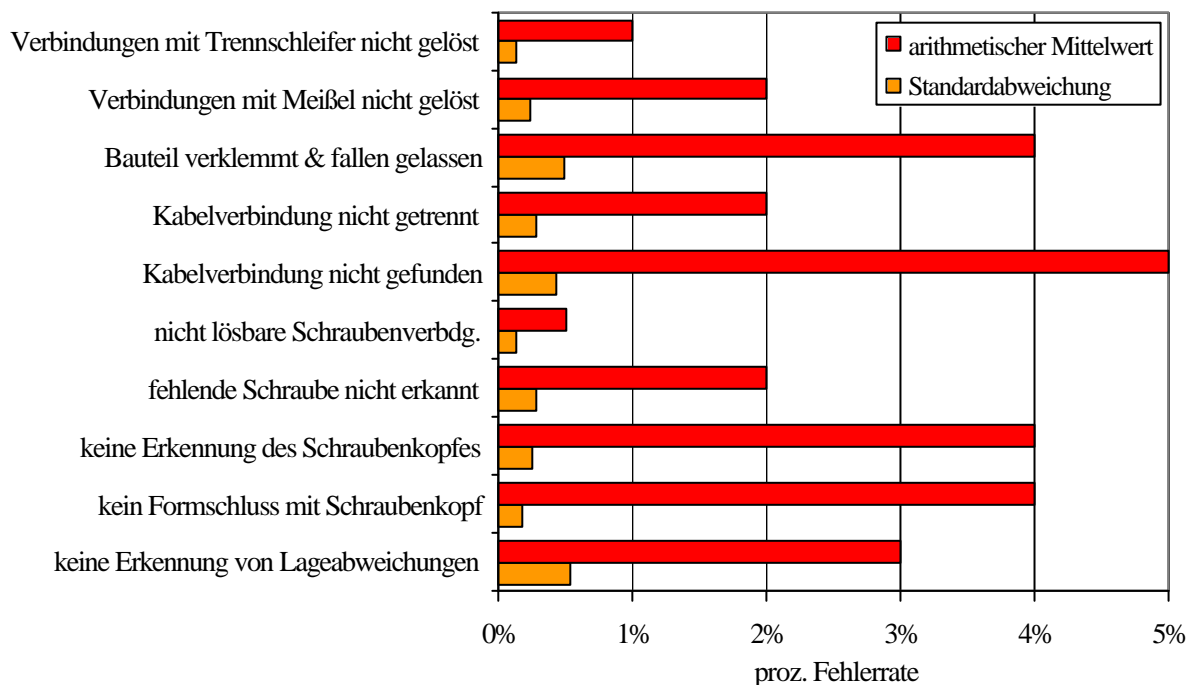


Abb. 5.10: Prozentuale Fehlerrate beim automatisierten Demontageprozess

Abbildung 5.10 zeigt die verschiedenen Fehler sowie deren Standardabweichung. Die Standardabweichung der einzelnen Kriterien liegt zwischen 0,12 und 0,58 und zeigt aufgrund

der geringen Abweichungen die einheitlichen Tendenzen in den Versuchen. Die Vielzahl der auftretenden Fehler liegt insbesondere bei den nicht erkannten Lageabweichungen von Schrauben- und Kabelverbindungen sowie den nicht erkannten Schraubenkopfgeometrien und fehlenden Schrauben.

Diese Fehler resultieren aus

- Messpunkte, die außerhalb des maximalen Betrachtungsraums liegen,
- nicht auswertbaren Lichtflecken,
- fehlerhaften Bildverarbeitungsauswertungen.

Höhere Verfügbarkeit bei Verfahren mit Bildverarbeitungssystemen kann nur erreicht werden, wenn es gelingt, störende Umgebungseinflüsse wie beispielsweise Streulicht auszuschalten und ein Bildverarbeitungssystem mit größerem Messbereich, höherer Bildaufnahmeauflösung und sicherer Auswertung einzusetzen bzw. zu entwickeln.

Unter Berücksichtigung der während der manuellen Untersuchung aufgenommenen Zustandsänderungshäufigkeiten (entsprechend Tabelle 3.4 in Abschnitt 3.3) ergibt sich für die Demontagezelle in der zweiten Entwicklungsstufe eine Gesamtverfügbarkeit von 86% während der Demontageuntersuchungen. Es zeigt sich, dass insbesondere die komplexen Demontageaufgaben beim Zerlegen der älteren Geräte von Bang & Olufsen und Philips die Verfügbarkeit der Demontagezelle geringer ist als bei den modernen Geräten mit einfachem Produktaufbau. Die Verfügbarkeit ist durch Optimierung des Bildverarbeitungssystems zu erhöhen und während der industriellen Testung weiter zu verifizieren.

Die Versuche bestätigen die Einsetzbarkeit des entwickelten Schraubwerkzeuges mit Toleranzausgleichsmodul und der Toleranzausgleichsverfahren hinsichtlich der Reduzierung der Demontagezeiten und der Fehlerrate.

---

### 5.3 Wirtschaftlichkeitsanalyse

Die ökonomische Effektivität ist das Verhältnis zwischen dem durch den Einsatz der Produktionsmittel erreichten Nutzen zu ihrem Aufwand. Geht man von einer allgemeinen Zielsetzung aus, ein zunehmend günstigeres Verhältnis zwischen Nutzen und Aufwand zu erreichen, dann ist zweifellos jede einzelne nutzenerhöhende und aufwandsenkende Möglichkeit auszuschöpfen. Dafür können die Ergebnisse von Wirtschaftlichkeitsrechnungen von hohem Wert sein. Der ökonomische Nutzen wird als Ergebnisdifferenz von Gegenüberstellungen erforderlicher einmaliger und laufender Aufwendungen zu den realisierbaren einmaligen und laufenden Nutzenwirkungen ermittelt.

Mit Hilfe der Kostenvergleichsrechnung werden im Folgenden die beiden Demontagetechniken gegenübergestellt. Der Betrachtungszeitraum beträgt 10 Jahre. Bei der Bewertung werden Einflussfaktoren, die sich aus der Integration der Demontagezellen in den betrieblichen Materialfluss ergeben, nicht berücksichtigt. Diese spezifischen quantitativen und qualitativen Größen müssen im konkreten Einzelfall gesondert untersucht werden. An dieser Stelle sollen lediglich generelle Parameterbereiche ermittelt werden, die den Einsatz einer Demontagezelle des jeweiligen Typs sinnvoll erscheinen lassen. Die Gesamtkosten setzen sich wie folgt zusammen:

#### 1. Personalkosten

Zur Berechnung der benötigten Arbeitskräfte (s. Anhang G, Tab. F1 – F3) ist der Jahresdurchsatz entscheidend:

$$F \left[ \frac{\text{Stück}}{\text{Person bzw. Zelle}} \right] = \frac{\text{Jahresarbeitszeit [h/Jahr]} * 60}{\text{Zeit pro Einheit } t_{e1} [\text{Minuten/Stk.}]}$$

Zur Berechnung der Jahresarbeitszeit wird hier von folgenden Voraussetzungen ausgegangen: Bei manueller Demontage liegt eine 37,5 - Stunden - Woche vor, wobei pro Jahr effektiv 40 Wochen mit lediglich einer Schicht pro Tag gearbeitet wird. Bei automatischer Demontage werden jährlich 51 Wochen angesetzt, wobei die Schichtanzahl bei der nachfolgenden Untersuchung für drei Szenarien – ein-, zwei- und dreischichtig – ist. Die prozentuale Verfügbarkeit  $\eta_{aut}$  als Maß der technischen Zuverlässigkeit wirkt sich ebenfalls auf die effektive Jahresarbeitszeit der automatisierten Demontagezelle aus. Zugrundegelegt werden dabei die durchschnittlichen Demontagezeiten der manuellen und automatisierten Demontage entsprechend des Abschnittes 5.2, Tabelle 5.2.

Zum Vergleich der beiden Systeme wird nun wie folgt verfahren: In einem ersten Schritt werden die Einflussparameter des Jahresdurchsatzes der automatisierten Demontagezelle variiert. Danach wird berechnet, wie viele Arbeitskräfte nötig sind, um von Hand im einschichtigen Betrieb denselben Jahresdurchsatz zu erreichen (entsprechend dem Demontageprinzip werden für Materialfluss- und Wartungsaufgaben benötigte Arbeitskräfte mit einkalkuliert). In einem zweiten Schritt werden für die benötigten Mitarbeiter verschiedene Lohnkosten angesetzt, wobei Zuschläge für die zweite und dritte Schicht (bei automatisierter Demontagezelle) mit in die Berechnungen einfließen. Die entscheidungsrelevanten Personalkosten hängen also von der Schichtanzahl der automatisierten Demontagezelle, deren Verfügbarkeit  $\eta_{aut}$ , und den Personalkosten ab.

## 2. Investitionskosten

Die Investitionen fließen in Form der planmäßigen Abschreibungen als Kostenparameter in die Betrachtung ein. Bei einer zugrundegelegten Abschreibungsdauer von bis zu 5 Jahren wird beim Betrachtungszeitraum im sechsten Jahr eine Ersatzinvestition angenommen. Pro automatisierter Demontagezelle ergibt sich eine Investitionssumme von 380.275 EUR. Der Investitionsbetrag bei manueller Demontage hängt von den Szenarioparametern ab, da sich der Umfang der benötigten Betriebsmittel nach der Anzahl der eingesetzten Arbeitskräfte richtet (s. Anhang F, Tab. F4 – F5). Pro Arbeitsplatz mit anteiliger Fördertechnik belaufen sich die Investitionen für die Betriebsmittel auf 5.950 EUR.

## 3. Kapitalkosten

Die hier angesetzten Kapitalkosten  $R$  (s. Anhang F, Tab. F6 – F7) sind die Kosten der Kapitalaufnahme für die zu realisierenden Investitionen. Sie ermitteln sich für die einzelnen Jahre, indem man das restliche gebundene Kapital mit einem internen Kalkulationszinsfuß, der in diesem Fall mit 5% angenommen wurde, multipliziert:

$$R_j = \left( \text{Investitionskosten} - \sum_{i=0}^{j-1} AfA_i \right) * \text{kalk. Zinsfuß}$$

## 4. Sonstige Kosten

Die Betriebskosten für Instandhaltung und Miete wurden berücksichtigt (s. Anhang F, Tab. F8 – F10). Sonstige allgemeine Betriebskosten, wie Kosten für Versicherungen, wurden in dem Vergleich der Szenarien vernachlässigt, da diese zwischen den verschiedenen Demontageverfahren nur geringfügig differieren und daher die Gesamtaussage nicht wesentlich beeinflussen.

## 5. Gesamtkosten

Auf Basis der Gesamtkosten (s. Anhang F, Tab. F11 – F12) lassen sich die durchschnittlichen Demontagekosten pro Stück mit Hilfe der folgenden Formel errechnen:

$$\text{Kosten [EUR/Stk.]} = \frac{\sum_{i=1}^n \text{Gesamtkosten}_i [\text{EUR}]}{n [\text{Jahre}] * \Phi [\text{Stück / Jahr}]} ?$$

Somit ergeben sich je Szenario folgende Demontagekosten pro Stück über 10 Jahre gemittelt:

Szenario	Durchschnittliche Demontagekosten pro Gerät [EUR/Stück]		
	Manuelle Demontage	Automatische Demontage <small>ohne Ausgleichsmodul &amp; mit stationärem Schraubenabzieher</small>	Automatische Demontage <small>mit Ausgleichsmodul und flexibler Schraubenentfernung</small>
Szenario 1: 1 Schicht, 80% Verfügbarkeit	7,20 EUR/Stück	8,35 EUR/Stück	7,72 EUR/Stück
Szenario 2: 1 Schicht, 90% Verfügbarkeit	6,40 EUR/Stück	7,42 EUR/Stück	6,87 EUR/Stück
Szenario 3: 2 Schichten 80% Verfügbarkeit	6,97 EUR/Stück	5,27 EUR/Stück	4,88 EUR/Stück
Szenario 4: 2 Schichten, 90% Verfügbarkeit	6,19 EUR/Stück	4,69 EUR/Stück	4,34 EUR/Stück
Szenario 5: 3 Schichten, 80% Verfügbarkeit	6,18 EUR/Stück	4,25 EUR/Stück	3,93 EUR/Stück
Szenario 6: 3 Schichten, 90% Verfügbarkeit	5,50 EUR/Stück	3,78 EUR/Stück	3,49 EUR/Stück

Tab. 5.3: Demontagestückkosten je Szenario über 10 Jahre gemittelt

Aus der Tabelle 5.3 geht hervor, dass in einem Einschichtbetrieb der Demontagezelle die Demontagestückkosten höher liegen als bei der manuellen Demontage. Wird die Demontagezelle über zwei oder drei Schichten eingesetzt, liegen die Demontagekosten pro Stück über 10 Jahre gemittelt niedriger als bei der manuellen Demontage. Die Verfügbarkeit der Demontage beeinflusst die Stückkosten zu Gunsten der automatisierten Demontage.

Weiterhin zeigt die Tabelle 5.3 den Einfluss des Ausgleichsmoduls und der flexiblen Entfernung der gelösten Schraube vom Schrauberbit gegenüber der ersten Entwicklungsstufe der automatisierten Demontagezelle mit einer Reduzierung der Demontagestückkosten um 8% .

Die Ergebnisse mit Ausgleichsmodul und flexibler Entfernung der gelösten Schraube gegenüber der manuellen Demontage werden in Abbildung 5.11 nochmals verdeutlicht:

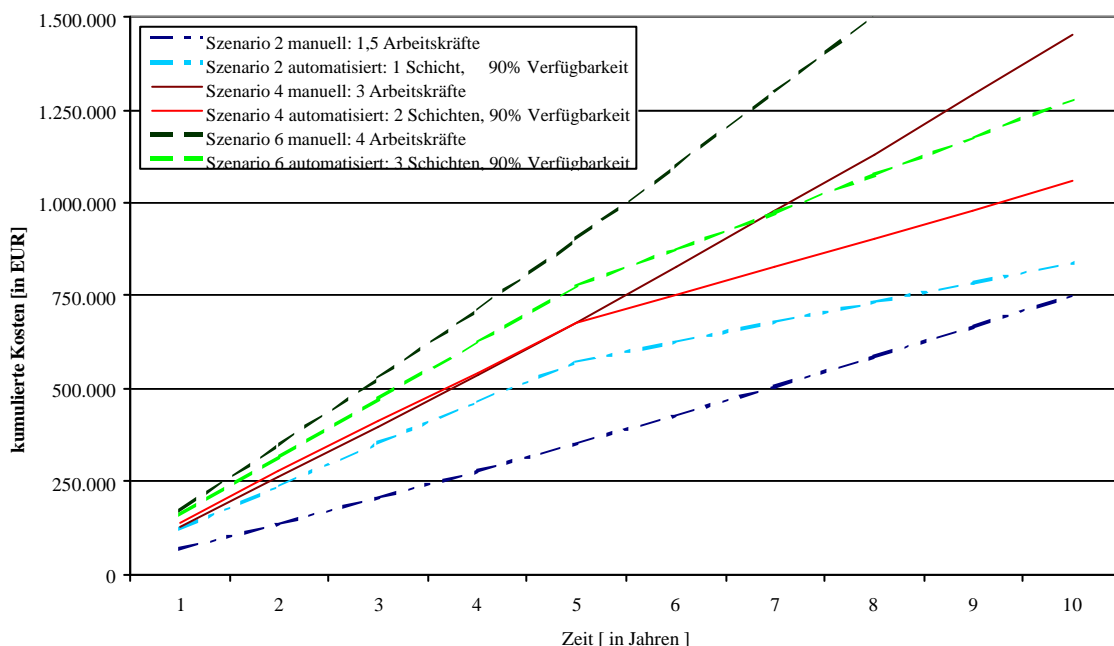


Abb. 5.11: Kumulierter Kostenvergleich je Szenario

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

### 6.1 Zusammenfassung

Die Forderung nach Schonung der Ressourcen und Verringern der Abfallmengen führt zu einer Abkehr von der reinen Abfallbeseitigung hin zu einer Kreislaufwirtschaft. Das Ziel der Kreislaufwirtschaft ist es, Stoffe möglichst lange in diesem Kreislauf – sei es als Bauteil oder als Sekundärrohstoff – zu halten und abschließend umweltgerecht zu entsorgen. Damit stellt sich zunehmend auch die Herausforderung, Altprodukte in einer möglichst wirtschaftlichen und umweltverträglichen Form zu recyceln, d.h. die Teile- und Stoffkreisläufe über die verschiedenen Phasen des Produktlebenszyklus soweit wie möglich zu schließen. Dies beinhaltet eine Demontage der Produkte, die zumindest partiell sowohl beim Produkt- und Materialrecycling als auch bei der Schadstoffseparierung als erster Schritt im Recyclingprozess erforderlich ist. Denn aufgrund der eingeschränkten Verfügbarkeit und begrenzten Leistungsfähigkeit sonstiger Techniken zur Wertstofftrennung wird es durch eine vorgeschaltete Demontage erst möglich, hochwertige Stoffkreisläufe zu schließen und drohende Umweltbelastungen durch eine gezielte Schadstoffentfrachtung zu reduzieren. Daher ist auch in Zukunft eine Demontage von Bildschirmgeräten zwingend notwendig, da diese Elektronikgeräte eine hohe Schadstoffkonzentration in der Bildröhre besitzen.

Untersuchungen, die in den heute existierenden Rückbauzentren durchgeführten manuellen Demontagetätigkeiten zeigen einen überwiegend unstrukturierten Einsatz manueller Vorrichtungen und führen zu einer hohen physischen Belastung der Werker infolge der unzureichenden Arbeitsbedingungen und des geringen Mechanisierungsgrades. Die Folge ist eine geringe manuelle Demontageleistung, welche die Wirtschaftlichkeit der Demontage vor allem durch die hohen Lohnkosten negativ beeinträchtigt. Der Handlungsbedarf im Hinblick auf die Weiterentwicklung und Übertragung moderner Verfahren der Produktionstechnik auf die Problemstellung der Demontage ist daher evident. Es wird eine stärkere Automatisierung einzelner Demontagevorrichtungen oder ganzer Demontageabläufe angestrebt, um Mitarbeiter zu entlasten und Einsparpotenziale zu nutzen.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Schaffung wissenschaftlicher Grundlagen für die flexible Automatisierung der Demontage als Beitrag zur Einführung wirtschaftlicher Lösungen für die Demontage. Grundlage dieser Arbeit war die Untersuchung und Analyse der realisierten automatisierten Demontagezelle, das Ableiten und Bewerten von Entwicklungspotenzialen und die Optimierung des Trennprozesses von Schraubenverbindungen, welcher als Schwachstelle erkannt wurde und Einsparpotenziale darstellte.

Ausgehend von einer Analyse des Ist-Zustandes der Aufarbeitung und Aufbereitung elektrischer Geräte auf der Basis manueller Demontageuntersuchungen, wurden die Anforderungen an flexible Systeme zur Automatisierung der Demontage abgeleitet und innerhalb einer Repräsentativerhebung konkretisiert und bewertet. Die größten Anforderungen werden dabei an die Produkt- und Produktzustandsflexibilität gestellt. Die marktseitig steigende Vielfalt der Produkttypen und -varianten und ihre variierende Nutzungsdauer führt zu einem sehr breiten Spektrum von zu demontierenden Altprodukten und somit zu einer Demontage in Losgröße 1. Daraus ergeben sich Flexibilitätsanforderungen an die Demontagebetriebsmittel, die über denen liegen, die in der Produktion auftreten. Diese Anforderungen werden durch Produktzustandsflexibilitätsanforderungen infolge von Umwelteinwirkungen und Gebrauchseinflüsse, wie Reparaturen oder Beschädigungen, noch zusätzlich erweitert.

Basierend auf einer umfangreichen Produkt- und Prozessanalyse sowie den Anforderungen an die automatisierte Demontage wurde das Gesamtsystem für die Automatisierung der Demontage konzipiert. Für die Trennprozesse innerhalb der Demontage wird ein Portalroboter eingesetzt sowie ein Knickarmroboter für die Handhabung der gelösten Bauteile. Als Werkzeuge werden pneumatische Werkzeuge, wie Schrauber, Meißel, Schneidzange, Säge, Trennschleifer, Bohrer und Fräser eingesetzt. Die eingesetzten Greifer sind an die speziellen Anforderungen der Demontage angepasst. So kommen ein Sauggreifer, zwei programmierbare Servogreifsysteme und ein spezieller Sauggreifer für die Handhabung der Bildröhre zum Einsatz. Als Demontagetisch wird ein spezieller Drehtisch mit Fördertechnik und einer Spanneinrichtung integriert. Die Steuerung der einzelnen, teilweise intelligenten Anlagenkomponenten erfolgt durch einen Leitrechner. Das Steuerungskonzept entspricht einer teilzentralen Steuerung. Charakteristisch bei dieser teilzentralen Steuerung ist, dass einzelne Anlagenkomponenten einen eigenen Prozessor besitzen, der die Steuerung dieser Teilsysteme übernimmt. Der Leitrechner übernimmt lediglich die Kommunikation zwischen den einzelnen Anlagenkomponenten. Für die Prozessüberwachung wird ein Bildverarbeitungssystem eingesetzt. Bei Erkennung von Zustandsänderungen werden Online-Programmkorrekturen ausgeführt.

Im Rahmen der durchgeführten Versuche wurden Schwachstellen der automatisierten Demontage ermittelt und analysiert. So wurden 2 moderne sowie 2 ältere Bildschirmgerätetypen automatisiert demontiert, um Aufschluss

- über die Demontagezeiten,
- über die Flexibilität bezüglich Produktvielfalt und Zustandsänderungen sowie
- über die Demontage- und Trennstrategien

zu erhalten. Die Analyse der Versuchsreihen ergab folgende Ergebnisse:

1. Optimierung des Schraubprozesses, insbesondere der Teilprozesse Formschlusserstellung und Ausdrehen sowie das Entfernen der ausgedrehten Schraube vom Schrauberbit zur Reduzierung der Prozesszeiten und zur Erhöhung der Prozesssicherheit.
2. Die Produktflexibilität ist aufgrund des modularen Aufbaus der Demontageanlage und der Steuerungsstruktur sowie der flexiblen Erweiterbarkeit der Datenbank gegeben. Das Werkzeugwechselsystem ermöglicht die Bereitstellung produktspezifischer Werkzeuge im Werkzeugbahnhof. Aufgrund der teilzentralen Steuerungsstruktur wird eine Erweiterung um neue Systemmodule infolge der offenen Systemstruktur möglich.
3. Die Analyse der Versuchsreihen zur Ermittlung der Produktzustandsflexibilität zeigte eine Vielzahl bereits realisierter Online-Korrekturen auf Zustandsvarianzen durch den Einsatz des Bildverarbeitungssystems. So können Lageabweichungen von Schrauben und von Kabeln um  $\pm 50$  mm sowie Schraubenkopfgeometrien erkannt werden. Bei nicht lösbaren Schraubenverbindungen werden zerstörende Demontagetechnologien eingeleitet. Können gelöste Bauteile nicht entnommen werden, wird das Demontageprogramm abgebrochen. Hingegen wurden auch Entwicklungspotenziale festgestellt. So muss das Fehlen eines Bauteils erkannt und alle Arbeitsschritte für das Lösen und Entnehmen dieses Bauteils übersprungen werden. Weiterhin bestehen große Probleme bei beschädigten Bauteilen.

Für die Optimierung des Trennens von Schraubenverbindungen wurden zunächst unterschiedliche Demontagestrategien untersucht und bewertet. Die Analyse der Demontagestrategien zeigt, dass das Lösen von Schraubenverbindungen primär zerstörungsfrei mit einem Schraubwerkzeug aufgrund der schnellsten Trennprozesszeit, der Sortenreinheit, insbesondere bei Kunststoffbauteilen, des geringsten Arbeitsraumbedarfes und der geringsten Prozesskräfte erfolgt. Jedoch sind die Zeitverluste, bedingt

durch das Ablegen der ausgedrehten Schraube, zu minimieren und die Prozesssicherheit, insbesondere bei der Formschlusserstellung, zu erhöhen. Alternativ zu dieser Strategie stehen zerstörende Trennstrategien mit Bohrer oder Fräser, deren Einsatz dann erfolgt, wenn Schraubenverbindungen nicht zerstörungsfrei lösbar sind.

Für die Erhebung des Anforderungskataloges wurden die unterschiedlichen Schraubenverbindungen untersucht sowie der Trennprozess analysiert. Dazu wurden die Einflüsse auf den Zerlegeprozess theoretisch und experimentell untersucht und die spezifischen Probleme während der einzelnen Zerlegeprozessphasen abgeleitet. Als wichtigste technische Automatisierungshemmnisse erwiesen sich das Fehlen von für das Entschrauben geeigneten Ausgleichshilfen, die Lageabweichungen zwischen Schrauberbit und Schraubenkopf infolge von Positioniertoleranzen des Demontagesystems und fertigungsbedingte Toleranzen des Werkstückes selbständig kompensieren sowie Bahn- und Schleppfehler durch achsgerader Rückhubbewegung der Schrauberspindel vermeiden.

Für den Ausgleich von Lageabweichungen zwischen Schrauberbit und Schraubenkopf wurden Toleranzausgleichsverfahren und Funktionsmodule morphologisch untersucht und bewertet. Als Toleranzausgleichsverfahren wurde eine Kombination aus geregelter und ungesteuertem Verfahren für die Formschlusserstellung gewählt. Dabei erfolgt die Grobpositionierung des Schrauberbits nach Überprüfung der Schraubenposition durch das Bildverarbeitungssystem. Mit diesem geregelten Verfahren können Toleranzen des Demontagesystems und fertigungsbedingte Toleranzen der Schraubenposition ausgeglichen werden. Die anschließende Formschlusserstellung erfolgt unterstützt durch ein Ausgleichsmodul mit federnder Nachgiebigkeit bei Reaktionskräften und –momenten, um Positionierabweichungen des Roboter- und Werkzeugsystems bis zu 1,3 mm zu kompensieren. Durch die federnde Nachgiebigkeit des Ausgleichsmoduls mit Unwuchtregelung wird eine spiralförmige Suchstrategie als gesteuertes Toleranzausgleichsverfahren übertragen und die Schraubenkopffläche systematisch bis zum Formschluss durch Erhöhung der axialen Anpresskraft abgesucht.

Aufgrund der Ergebnisse der Analysen wurden die einzelnen Funktionsmodule konzipiert und ein Prototyp angefertigt und getestet. Mittels theoretischer und experimenteller Untersuchungen des Werkzeugprototypen wurden die Parameter Drehwinkelgeschwindigkeit und axiale Anpresskraft entsprechend der analysierten Einflussfaktoren optimiert.

Die durchgeführten Versuchsreihen zeigen die Erfüllung des Anforderungsprofils innerhalb der einzelnen Trennprozessphasen sowie die Eignung des entwickelten Verfahrens und des Schraubwerkzeuges innerhalb des Demontageprozesses. Die Prozesszeiten für das Lösen von Schraubenverbindungen wurden durch das neue Schraubwerkzeug um 56% gesenkt. Insbesondere wurden erhebliche Zeiten bei der Formschlusserstellung, beim Lösen und Ausdrehen der Schraube sowie durch das flexible Entfernen der ausgedrehten Schraube vom Schrauberbit infolge eines Impulses des Vorschubzylinders der Schraubereinheit eingespart. Die Analyse der Gesamtdemontagezeiten zeigt daher eine deutliche Zeitreduzierung aufgrund des Einsatzes des entwickelten Schraubwerkzeuges. Aufgrund der Vielzahl von Schraubverbindungen an der Rückwand wird hierdurch, insbesondere bei den modernen Geräten die automatisierte Demontageprozesszeit um ca. 30% reduziert. Im Vergleich zur manuellen Demontage liegt bei der automatisierten Demontage der älteren Geräten eine annähernde Übereinstimmung vor. Bei den modernen Geräten liegen die automatisierten Demontagezeiten jedoch um 36 bis 50% über den manuellen Demontagezeiten, weil für das Lösen der Rückwand eine Vielzahl von Schrauben gelöst werden müssen und hierfür ein hoher Zeitbedarf benötigt wird, so dass hohe, unproduktive Wartezeiten des Handhabungsroboters entstehen.



Unter Berücksichtigung der ermittelten Zustandsänderungshäufigkeiten ergibt sich für die Demontagezelle mit dem neuen Schraubwerkzeug eine Verfügbarkeit von 86% während der experimentellen Untersuchungen. Es zeigt sich, dass insbesondere bei komplexen Demontageaufgaben beim Zerlegen der älteren Geräte (Baujahr vor 1984 / 85) die Verfügbarkeit der Demontagezelle geringer ist als bei den modernen Geräten mit einfachem Produktaufbau.

Die Versuche lassen aufgrund der bereits erreichten Verfügbarkeit des Gesamtsystems eine Wirtschaftlichkeit der entwickelten Verfahren und Methoden bei der Umsetzung in die industrielle Praxis des Produktrecyclings erwarten. So zeigt ein erster Wirtschaftlichkeitsvergleich auf Basis von Demontagestückkosten pro Gerät, dass der Einsatz einer automatisierten Demontagezelle in einem Zweischichtbetrieb sich bereits nach etwa 2,5 Jahren gegenüber der manuellen Demontage amortisiert.

Neben diesen Ergebnissen zeigt sich, dass eine automatisierte Demontage für Fernsehgeräte ab Baujahr 1985 / 86 empfehlenswert ist, da ab dieser Generation die untersuchten Fernsehgeräte bei den Demontagebetrieben einen ähnlichen Aufbau besitzen. Um die Demontagezeiten für diese Gerätegeneration weiter zu senken, müssen die unproduktiven Wartezeiten des Handhabungsroboters minimiert werden.

Das in der vorliegenden Arbeit vorgestellte Schraubwerkzeug mit Ausgleichsmodul erhöht die Formschlussicherheit, vermindert den Peripherieaufwand, reduziert die Prozesszeiten, erhöht die Verfügbarkeit und ermöglicht auch komplexe, raumschräge Entschraubungsvorgänge. Die durchgeführten Untersuchungen und Analysen zeigen, dass bei der Automatisierung der Demontage ein erhebliches Rationalisierungspotenzial besteht, welches sich durch die gesetzgeberischen Maßnahmen in der Bundesrepublik Deutschland und in der Europäischen Union in den kommenden Jahren noch erhöhen wird.

---

## 6.2 Ausblick

Die Innovationszeiten in der Elektronikbranche sind kurz, die Lebensdauer der Produkte daher ebenfalls. Die Entsorgung von Elektronikgeräten wird in Zukunft an Relevanz gewinnen. Um sich auf dem Markt mit einem Produkt durchzusetzen, müssen die Kosten desselben möglichst niedrig gehalten werden. Mitentscheidend hierbei sind auch geringerer Energiebedarf und geringerer Materialeinsatz sowie geringere Montage- und Entsorgungskosten, da diese Kosten im Verkaufspreis berücksichtigt und durch den Kunden getragen werden.

Mit den in der vorliegenden Arbeit entwickelten Verfahren sind wesentliche Grundlagen für eine Erhöhung des Automatisierungsgrades in der Praxis der Produktdemontage für das Recycling geschaffen. Für eine weitere Steigerung der ökonomischen und ökologischen Effizienz der Demontage- und Recyclingprozesse bei der Einführung einer flächendeckenden Kreislaufwirtschaft sind darüber hinaus die folgenden weiteren Entwicklungsarbeiten für den Erfolg von Bedeutung:

### 1. Weiterentwicklung der Demontagetechnologie

- Erweiterung der Produktzustandserkennung auf weitere Produkte, Produkttypen und –varianten sowie typische Produktzustände.
- Die Verkürzung der Demontageprozesszeiten durch Einsatz eines Kompaktschwenkkopfes und Ablaufoptimierung zur Reduzierung der unproduktiven Warte- und Stillstandszeiten des Handhabungsroboters.
- Nutzung von Konstruktionsdaten für eine automatisierte Erstellung von Demontageprogrammen.
- In Anlehnung an das menschliche Verhalten, basierend auf taktilem Geschicklichkeit, sind Feinbewegungen sensorgestützt online zu planen. Mit Hilfe eines Kraft-Momentensensors muss die Entnahme auch von Bauteilen, welche nicht direkt in Demontagerichtung entnommen werden können - wie z.B. Hauptplatinen, die im Gehäusechassis eingehängt sind - selbständig erfolgen. Der Roboter muss selbständig alternierende Ausweichbewegungen senkrecht zur Demontagerichtung durchführen, bis das Bauteil gelöst ist.
- Automatisierung der Geräteidentifizierung am Zelleneingang.

### 2. Demontagegerechte Produktgestaltung

- Die konsequente Umsetzung eines erweiterten Simultaneous Engineering Ansatzes unter Einbeziehung der gesamten Produktlebenszeit für die Entwicklung neuer Produkte mit angepassten Produktions- und Recyclingsystemen (fertigungs- und demontagegerechte Produktgestaltung mit Einsatz funktionaler und recyclinggerechter Werkstoffe) [221]. Eine erste Orientierung gibt der Entwurf zur VDI-Richtlinie 2243 „Konstruieren recyclinggerechter technischer Produkte“.
-

- Der Aufwand und damit die Kosten für die Gerätedemontage sind durch konstruktive Maßnahmen zu beeinflussen (vgl. [222]):
  - gute Zugänglichkeit, keine langen oder engen Zugänge zur Demontagestelle, keine Bauteile, die sich in Gehäusen mit Hinterschneidungen befinden
  - nur eine Demontagerichtung („von oben“), Beispiel: Bei Bildschirmgeräten ist die Hauptplatine in einem Einschub am Gehäuseboden einzulegen und somit ohne Verkantungen in Demontagerichtung entnehmbar (Gerätebeispiel: Loewe Planus)
  - möglichst wenige Demontagevorgänge durch Verringerung der Verbindungselemente und Baugruppen, Beispiel: Bei Fernsehgeräten muss die schwer zugängliche IR-Empfängerplatine auf der Hauptplatine integriert werden
  - Vereinheitlichung und Minimierung der Verbindungstechniken unter Berücksichtigung einer automatisierten Montage- und Demontagetechnologie, wie z.B. durchgängiger Einsatz von Kreuzschlitzschrauben mit einheitlichem Kreuzschlitztyp und Größe
  - Einsatz von Schnellverriegelungen mit Kreuzschlitzwirkflächen anstelle von Schrauben-, Clip- und Schnappverbindungen
  - standardisierte Greifflächen zur Übertragung der Greifkräfte in Schwerpunktnähe
  - Kabelverbindungen an einem Bauteil mit Steckverbindungen versehen, die über Zugkräfte lösbar sind

### 3. Optimierung der Redistribution [8, 45]

- Die Optimierung der Redistributionslogistik muss eine organisierte bzw. standardisierte Rückführung der Altgeräte über die Prozesskette Annahme, Sammlung, Zwischenlagerung und Transport zu den Recyclingzentren ohne Beschädigung der Geräte ermöglichen, z.B. durch Einsatz spezielle Sammelfahrzeuge, Vorsortierung, ...
- Die Standorte der Zerlegezentren sind so zu wählen, dass die Anzahl der rückgeführten Geräte eine wirtschaftliche Auslastung der automatisierten Demontagezelle gewährleisten.

Der weitere Verlauf der Entwicklung soll darauf abzielen, die angesprochenen Weiterentwicklungspotenziale umzusetzen und die Demontagezelle industriell zu testen sowie an die sich hieraus ergebenden industriellen Anforderungen anzupassen und die Verfügbarkeit weiter zu erhöhen.

Während des industriellen Einsatzes der Demontagezelle werden weitere Zustandsänderungen auftreten. Allerdings muss hier deren Häufigkeit festgestellt und eingeordnet werden. Da mit zunehmender Flexibilität auch die Investitionen und Rechenzeiten steigen, muss zur Vermeidung einer Unwirtschaftlichkeit für die zu erfüllende Demontageaufgabe eine optimale Flexibilität gesucht werden. Die Fähigkeit des Menschen, z.B. Beschädigungen unmittelbar zu erkennen, sind auf absehbare Zeit mit vertretbarem Aufwand technisch nicht nachbildbar. So müssen bei der zukünftigen Entsorgung von Elektronikaltgeräten bereits bei der Annahme die Geräte auf etwaige Beschädigungen optisch geprüft werden.

Voraussetzung für die Einführung der Automatisierung der Demontage ist neben der Umsetzung der gesetzgeberischen Maßnahmen und der technischen Weiterentwicklung der Aufbau einer effektiven Redistributionslogistik, um Beschädigungen zu reduzieren und ausreichende Stückzahlen für eine Auslastung der Demontagezelle zu gewährleisten.

---

## Literaturverzeichnis

- [1] Bothe, D.  
Die Verwertung von Restabfällen aus Sicht des Kreislaufwirtschaftsgesetzes  
Abfallwirtschafts-Journal 6/96
  - [2] Kreis, W.; Möller, T.  
Wiederverwendung elektronischer und Entfernung toxischer Bauelemente  
Uni-Report – Berichte aus der Forschung der Universität Dortmund
  - [3] Hautz, A.  
Elektronikschrottreycling: mehr Risiken als Chancen?  
Entsorgungspraxis 12/1997
  - [4] Baumgarten, J.; Haberland, S.  
Demontage als integraler Bestandteil der Kreislaufwirtschaft  
Logistik im Unternehmen (1997)
  - [5] Kommission der Europäischen Gemeinschaften  
Vorschlag für eine Richtlinie des Europäischen Parlamentes und des Rates über  
Elektro- und Elektronikaltgeräte vom 13.06.2000
  - [6] Bönker, T.  
Qualität in der Kreislaufwirtschaft  
Qualität und Zuverlässigkeit, Band 40 (1995), Heft 10
  - [7] Schwarz, G.; Schultheiß, K.  
Mattscheibe im Recycling  
Umwelttechnik 3/2001
  - [8] Hansen, U.  
Wachsende Herausforderung  
Logistik Heute 1/2-2003, Huss-Verlag GmbH, München
  - [9] Ivisic, R.-A.  
Erwartetes Altgeräteaufkommen als Grundlage zur Planung von Entsorgungskonzepten  
EP 4/2001
  - [10] Helbach; Wassenberg; Lyko  
Neue Entwicklung des Elektronikschrottreyclings  
Entsorgungspraxis 10/1998
  - [11] AEA Technology  
Recovery of WEEE: Economic and Environmental Impacts  
Juni 1999
  - [12] Environmental Consequences of Incineration and Landfilling of Waste from Electr(on)ic  
Equipment, Copenhagen 1999
-

- 
- [13] Bergmann; Brodersen; Danzer; Tartler  
Einhalt der Vielfalt  
Entsorga 5/1999
- [14] Herman, V.  
Overview of national an international EEE legislative trends  
Vortrag auf ETMUEL, workshop No.1  
Surrey Institute of Art & Design, Farnham, UK, 30. September 1999
- [15] Boley, D.; Amann, A.; Goetz, J.  
Methoden und Techniken der Altgerätedemontage - Sachstandsbericht  
Herausgeber: Umweltministerium Baden- Württemberg  
Stuttgart 1998
- [16] Hartmann M.; Lehmann, F.  
Demontage  
VDI-Zeitschrift 135, Nr. 1/2, 1998
- [17] Steinhilper, R.  
Recycling – das Produktionsverfahren mit Zukunft  
Beispiele aus Deutschland und USA  
TIZ Fachberichte 113/4 Nr.4, 1989
- [18] Gradwohl, H.; Wüstenberg, D.  
Einflüsse auf die Verwertung von Altgeräten  
Abfallwirtschaftsjournal, 1998
- [19] Warnecke, H.-J.; Schweitzer, M.; Kahmeyer, M.  
Flexible Disassembly with Industrial Robots  
23<sup>rd</sup> international Symposium on Industrial Robots,  
Barcelona, Spanien, Oktober 1998
- [20] Volmer, J.  
Industrieroboter, Funktion und Gestaltung  
Verlag Technik GmbH, Berlin, 1992
- [21] Seliger, G.; Müller, K.; Perlewitz, H.; Stenzel, A.  
More Use with fewer Resources – A Contribution towards Sustainable Development  
Life Cycle Networks Proceedings of the 4th CIRP Seminar on Life Cycle Engineering
- [22] Huber, B  
Hochautomatisierte Recyclinganlagen für Metallfässer  
23. IPA Forschung und Praxis T21 umweltbewusst produzieren  
Berlin: Springer Verlag 1991
- [23] Kobrow, H.  
Teilautomatisierte Demontage von Verbrennungsmotoren  
Fertigungstechnik und Betrieb, Berlin 40, 1991
-

- 
- [24] Seliger, G.; Heinemeyer, H.J.; Neu, S.  
Robotergeführte Demontage und Montage von Kleingetrieben für die Austauschlieferung  
ZwF 88(1993), Heft 6
- [25] Warnecke, H.-J.; Schweitzer, M.; Kahmeyer, M.  
Design for Disassembly – Challenge of the Future  
International Forum on Design for Manufacture and Assembly,  
Newport, Rhode Island, Juni 1992
- [26] Bönker, T.; Möller, T.  
Wirtschaftliche Demontage von Elektrogeräten und Leiterplatten durch Teilauto-matisierung  
Maschinenmarkt, Würzburg 101 (1995) 33
- [27] Feldmann, K.; Hopperdietzel, R.  
Wirtschaftliches Recycling durch automatisierte Demontage  
ZwF 88 Heft 4, 1995
- [28] Hucht, A.  
Beitrag zur Entwicklung einer flexiblen, robotergestützten Demontagezelle  
Dissertation an der Universität Dortmund, 1998
- [29] o.V.  
Recycling mit Garantieschein  
Umwelttechnik 9/1998
- [30] Deutscher Verband für Materialforschung und -prüfung e.V. (DVM)  
Entsorgung von elektrischen und elektronischen Geräten  
DVM-Tag 1995, „Elektroschrott ‘95“, Berlin 1995
- [31] Jähning, F.  
Elektronik - Schrott - Verantwortung für umweltgerechte Entsorgung  
etz, Bd 112 (1991), Heft 19
- [32] Verein Deutscher Ingenieure VDI (Hrsg.)  
Konstruieren recyclinggerechter technischer Produkte,  
VDI - Richtlinien, VDI 2243, Oktober 1993
- [33] Fläschner, H.-J.; Matthes, O.; Mitzlaff, A.  
Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten aus Haushaltungen  
Entsorgungspraxis Nr 6/98
- [34] o.V.  
Statistisches Jahrbuch der Bundesrepublik Deutschland  
Hrsg.: Statistisches Bundesamt, Wiesbaden Stuttgart u.a.: Kohlhammer
- [35] Landesbetrieb Hamburger Stadtreinigung, IMS Ingenieurgesellschaft mbH:  
Ingenieurstudie Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten aus Haushaltungen  
Band 1, Hamburg 1991
-

- 
- [36] Bundesministerium für Umwelt, Jugend und Familie (Österreich)  
Pilotsammlung von Elektrogeräten in Bregenz  
Schriftenreihe der Sektion III, Wien, 1996
- [37] Zweck Abfallwirtschaft Rhein-Neckar  
Ingenieurstudien zur Entsorgung von Elektro- und Elektronikaltgeräten im Gebiet der ZARN,  
Östringen, 1992
- [38] CARE Innovation 1996  
Eco-Efficient-Concepts for the Electronic Industry towards Sustainability  
Proceedings of the International Congress  
Frankfurt a.M., 18-20 November 1998
- [39] BC Berlin Consult GmbH  
Verwertung und Entsorgung von Elektronik - Schrott  
Seminar - Umwelttechnologieforum, Berlin 1999
- [40] Produktion, Nr. 47 (1990):  
Penibel zerlegen oder alles in einem Topf, Verwerten von Altfahrzeugen  
Produktion, Nr. 30 (1991): Die Kunst des Teilens, Autorecycling, Konzepte
- [41] Reichl, H.; Griese, H.  
Elektronics goes green 2000+  
Joint International Congress and Exhibition, Berlin, 11-13 September 2000
- [42] o.V.  
Lösungskonzept der deutschen Elektroindustrie für die Verwertung und Entsorgung elektro-  
technischer und elektronischer Geräte  
Frankfurt: Zentralverband der Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V., 1998
- [43] Hansen, U.  
Produktkreisläufe – Schlüssel zum nachhaltigen Wirtschaften  
IRB-Verlag Stuttgart, 1999
- [44] Moukabary, G.  
Entwicklung eines QM-Instrumentariums zur Ausgestaltung der Kunden-Lieferanten-  
Beziehung in der logistischen Kette des Elektronikschrott-Recyclings  
AiF-Forschungsprojekt 11014N  
Fraunhofer IML, Dortmund 1999
- [45] Neher, A.  
Das letzte Glied der Supply Chain  
Logistik Heute 1/2-2003, Huss-Verlag GmbH, München
- [46] Moukabary, G.  
Redistribution und Demontage in der Kreislaufwirtschaft – Konzepte für kleine und mittel-  
ständische Unternehmen  
AiF-Forschungsprojekt 10440N  
Fraunhofer IML, Dortmund 1997
-

- 
- [47] Jünemann, R.; Wehking, K.- H.; Rinschede A.  
Entsorgungslogistik Bd. 1, Grundlagen, Stand der Technik  
Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis  
hrsg. von R. Jünemann, Berlin: Erich Schmidt Verlag, 1991
- [48] Kötter, U.  
Selber bringen oder holen lassen?  
Logistik Heute 10/96
- [49] Emmermann, M.  
Logistikstrukturen für Entsorgung und Demontage  
Logistik-Lösungen für die Praxis, Band 2 (1994)
- [50] Jünemann, R.; Wehking, K.- H.; Rinschede A.  
Entsorgungslogistik Bd. 2, Grundlagen, Stand der Technik  
Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis  
hrsg. von R. Jünemann, Erich Schmidt Verlag, Berlin 1991
- [51] Hansen, U.  
Redistribution und Demontage in der industriellen Kreislaufwirtschaft  
UWF – Umweltwirtschaftsforum 1996
- [52] Dutz, E.  
Die Logistik der Produktverwertung  
Schriftenreihe der Bundesvereinigung Logistik (BVL) e.V. Bremen, Band 38  
Huss-Verlag, München 1996
- [53] Fröhlich, G.; Schimke, E.-F.  
Recycling von Elektronikschrott – Eine neue logistische Aufgabenstellung  
F+H – Fördern und Heben, Band 46 (1996), Heft 3
- [54] Fraunhofer - Gesellschaft  
Institut für Materialfluss und Logistik - Dortmund, Abteilung Entsorgungslogistik  
Potenzielle Recyclingwege bei der Produktrückführung
- [55] Ziegahn, K.-F.  
Ressourcenschonung durch Kunststoffrecycling  
FhG-Berichte 3/90
- [56] Steinhilper, R.; Hudelmeyer, U  
Erfolgreiches Produktrecycling zur erneuten Verwendung oder Verwertung.  
Ein Leitfaden für Unternehmen RKW  
Eschborn: 1992
- [57] Weigl, A.; Hohm, K.  
Fachgebiet Regelsystemtheorie und Robotik, TH Darmstadt  
A force-torque sensor-based motion strategy for robot assisted disassembly  
Proceedings of the First ECPD International Conference on Advanced Robotics and Intelligent Automation, September 6-8, Athens, Greece
-



- 
- [58] Warnecke, H.-J.; Steinhilper, R.  
Instandsetzung, Aufarbeitung, Aufbereitung: Recyclingverfahren, Produktgestaltung VDI-Zeitschrift 124 (1982)
- [59] Parec GmbH, Paderborn  
Umweltgerechte Aufarbeitung von Elektronikschrott, 11.01.1993
- [60] Hörsken, M.  
Nur ein Trostpflaster für Töpfer?  
Planung & Transport 1/93, S. 10
- [61] Boecker, R.  
Verfahrenskonzept zur Verwertung von ausgedienten Elektronikgeräten
- [62] Tiltmann; Schüren  
Recyclingpraxis Elektronik  
Verlag TÜV Rheinland, Köln 1994
- [63] Steinhilper, R.  
Produktrecycling im Maschinenbau  
Berlin: Springer 1988 Jugl. Stuttgart, Universität, Diss. 1988
- [64] Koch, P.; Kasper, R.  
Zerlege- und Aufbereitungstechnik für Elektroaltgeräte und Elektronikschrott  
Aufbereitungstechnik, Band 37 (1996), Heft 5
- [65] Dichant, G.; Dizun, U.  
Was da läuft, ist Betrug – Elektronikschrott: Ohne Vorgaben zieht Recycling im Wettbewerb mit billigeren Entsorgungsverfahren, wie Shreddern, Deponieren oder Exportieren den Kürzeren  
VDI-Nachrichten Nr. 9 (27.2.1998)
- [66] Herrmann, E.  
Entsorgung von Elektronikschrott  
Entsorgungspraxis Nr. 9/92, S. 554
- [67] Seliger, G.; Kriwet, A.  
Demontage im Rahmen des Recyclings  
ZwF 88 (1993)
- [68] o.V.  
Nur jeder sechste ist eine Zeitbombe  
Umwelttechnik 2/1999
- [69] Technische Universität Berlin und Hochschule der Künste Berlin  
Sonderforschungsbereich 281  
Demontagefabriken zur Rückgewinnung von Ressourcen in Produkt- und Materialkreisläufen  
Kolloquium zur Kreislaufwirtschaft und Demontage, Berlin, 30./31.01.1997
-

- 
- [70] Pötschke, M  
Sekundärrohstoffe aus Gebrauchsgütern – Wiederverwertungstechnologien  
recyclinggerechte Produktentwicklung, VDI-Bericht Nr. 1089, Düsseldorf 1993
- [71] o.V.  
Haften bis ins nächste Leben  
Umwelttechnik 3/2000
- [72] Trisch, C.  
Flexible Demontage technischer Gebrauchsgüter  
Dissertation 1999
- [73] Werder, H.-K. v.  
Planung der Demontage elektrischer und elektronischer Altgeräte  
Dissertation TU Braunschweig, 2001
- [74] Reczling - Alles im Griff  
Tagungsband Tb 130 zur Informationstagung am 4. und 5. Juni 2002  
Schriftreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, 2002
- [75] Kaymeyer, M.  
Flexible Demontage mit dem Industrieroboter am Beispiel von Fernsprech-Endgeräten  
IPA - IAO Forschung und Praxis, Band 215, Springer - Verlag 1995
- [76] Gerlach, G.; Sorber, J.; Kaden, S.  
Die verwendungsgerechte Entstückung von Bauelementen auf Leiterplatten unter Nutzung  
von Identifikationssystemen  
Wissenschaftliche Zeitschrift der TU Dresden, Band 44 (1995), Heft 4
- [77] Schöps, D.  
Automatisierte Entstückung von Flachbaugruppen  
VDI-Bericht 1479 zur Tagung „Ganzheitliches Recycling Elektr(on)ischer Produkte  
VDI-Gesellschaft Fördertechnik, Materialfluss, Logistik in Düsseldorf, 27.04.1999
- [78] Hopperdietzel, R.; Franke, J.; Liedl, G.; Schiebisch, J.; Tartler, D.; Fischer, M.  
Automatisierte Demontage bestückter Leiterplatten  
Elektronik 15 / 1992
- [79] Seliger, G.; Heinemann, H.-J.; Neu, S.  
Robotergeführte Demontage und Montage von Getrieben für die Austauschfertigung  
ZwF 88 (1995) 6
- [80] Feldmann, K.; Hopperdietzel, R.  
Wirtschaftliches Recycling durch automatisierte Demontage  
ZwF 88 (1997) 4
- [81] Hauser, H ; Röttchen, P.  
Flexibles Demontagesystem zum Recycling von Elektro- und Elektronikaltgeräten  
Verlag Praxiswissen GmbH, Dortmund, 1993
-

- 
- [82] Sony Environmental Center Europe  
Automated TV Disassembly Cell (Environment EV5V-CT92-0241)  
im Rahmen des Programms „The recycling of mass consumer products“  
3<sup>rd</sup> year progress report (1995), TNO report TNO-MEP-R 96/124  
TNO Institute of Environmental Science, Energy Research and Process Innovation, Fellbach,  
March 1996
- [83] Universität Dortmund  
Fachgebiet Logistik, Lehrstuhl für Maschinenelemente, -gestaltung und Handhabungstechnik  
FAUDEG: Flexibel automatisierte Demontage von Bildschirmgeräten  
Gefördert durch das Ministerium für Wirtschaft, Mittelstand, Technologie und Verkehr des  
Landes Nordrhein-Westfalens
- [84] Video der Fa. SONY, 1996
- [85] Informationsschrift über das ESPRIT III Project 9052, 1993 - 1995  
Selbstständige Demontage mit fortschrittlicher Teileerkennung  
Siemens AG, Nürnberg-Erlangen
- [86] ESPRIT Project No. EP 9052  
Autonomous Disassembly by Advanced Shape Recognition
- [87] Zussman, E.; Scholz-Reiter, B.; Scharke, H.  
Modeling and Planning of Disassembly Processes  
Proceedings of the IFIP WG5.3 International Conference on Life-Cycle Modeling for  
Innovative Products and Processes  
London, New York, Tokyo: Chapman & Hall, 1999
- [88] Zussmann, E.; Scholz-Reiter, B.; Scharke, H.  
Planung in reaktiven Demontageprozessen  
Industrie Management 12 (1998)
- [89] Reinhart, G.; Friess, D.  
Perspektiven automatisierter Demontagesysteme  
ZwF 90 (1996)
- [90] Holzhauer, R.  
Automatisierte Abläufe unterstützen die Demontage  
Industrieanzeiger Heft 51/52 (1998)
- [91] Reinhart, G.; Frieß, D.  
Perspektiven automatisierter Demontagesysteme  
ZWF – Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Band 90 (1997)
- [92] Dieterle, A.  
Flexible Demontage von Elektrokleingeräten  
Produktionsautomatisierung (1995)
-

- [93] Breer, J.; Dechow, O.  
Computerschrott - Recycling, Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis  
Erich - Schmidt Verlag, Berlin 1994
- [94] Milberg, J; Dieterle, A  
Demontage von Elektrokleingeräten  
Technischer Bericht IWB; München, 1995
- [95] Zinnow, A.  
Bildröhrenaufbereitung bei der Fa. Hetzel, in: Bildröhrenrecycling  
Workshop Niedersächsischen Gesellschaft zur Endablagerung von Sonderabfall, 1998
- [96] Brennemann, Ch.; Lotz, H-R.; Schmidt, J.  
Auf Biegen und Brechen  
Müllmagazin 3/1996, S. 23-39
- [97] o.V.  
Fernseher schirmen ab  
umwelttechnik 9/1999
- [98] Hautz, A.  
Konzept zur Leuchtschichtaufbereitung von Bildröhren  
Entsorgungspraxis 4/1995
- [99] Frick, A.  
Wohin mit dem Glas, in: Bildröhrenrecycling  
Workshop Niedersächsischen Gesellschaft zur Endablagerung von Sonderabfall, 1998
- [100] Schlögl, M.  
Recycling von Bildröhren  
Moderne Metalltechnik – 4/95
- [101] Kopacek, B.; Kopacek, P.  
The role of semi-automatized disassembly in Recycling  
14<sup>th</sup> IFAC World Congress, Peking 1999
- [102] Warnecke, H.J.; Schraft, R.D.  
Industrieroboter  
Berlin: Springer-Verlag, 1992
- [103] o.V.  
Schraubroboter für 200.000 DM  
Flexible Automation (1995)
- [104] Kopacek, B.; Kopacek, P.; Hoffmann, M.; Knoth, R.  
Disassembly of electronics equipment with a flexible semi-automatic disassembly cell  
Proceedings Volume 1 in Electronics goes green 2000+, Berlin, 11-13.09.2000
-

- 
- [105] Hentschel, D.  
Beitrag zur Organisation von Demontagesystemen  
Dissertation TU Berlin  
Reihe Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin  
Berlin 1998
- [106] Eckerth, G.  
Systemplanung flexibel automatisierter Demontageanlagen  
Spektrum 2001, Verlag Praxiswissen, Dissertation 2001
- [107] Schweizer, M.  
Mit neuem Schwung in die 90er – Industrieroboter wieder auf dem Vormarsch  
Roboter (1989)
- [108] Schweigert, U.  
Zeigen, wo es langgeht – Entwicklungsstand sensorgeführter Roboter in der Montage  
Maschinenmarkt 97 (1997)
- [109] o.V.  
Steuerung von Montagezellen  
Arbeitsgemeinschaft Prozessperipherie im VDMA, Frankfurt, 1995
- [110] Hucht, A.  
Der Roboter als ‚Terminator‘  
Technica, Band 45 (1998), Heft 8
- [111] Fischer, K. / Pautz, D. - Umweltbundesamt Berlin:  
Ziele und Umsetzung der geplanten Elektronikschrottverwertung  
Seminar Oberpfaffenhofen 1995: Vermeidung und umweltgerechte Entsorgung von ES
- [112] Kiesgen, G.  
Entwicklung von ökologisch und ökonomisch effizienten Recycling- und Demontagestrategien  
für komplexe technische Gebrauchsgüter  
Universitätsverlag Dr. N. Brockmeyer, Bochum 1996
- [113] Schrauber, H.; Brauer, S.  
Wirtschaftliche Nutzung des Recyclingpotenzials durch optimale Demontagetiefen  
EP, Heft 10 (1994)
- [114] Rohstoff-Handels-GmbH: Firmenprospekt  
„E-Schrott-Verwertung seit 1980“  
Gewerbegebiet-Ost, Ferdinand-Clasen-Str. 34, 41812 Erkelenz
- [115] Schmidt-Kretschmer, M.  
Untersuchungen an recyclingunterstützenden Bauteilverbindungen  
Dissertation TU Berlin, Schriftenreihe Konstruktionstechnik, 1994
-

- 
- [116] Fachverband Unterhaltungselektronik im ZVEI  
Pressemitteilung am 31.08.1998 in Berlin
- [117] Dürr, W.; Mayer, H.  
Wahrscheinlichkeitsberechnung und schließende Statistik  
Studienbücher der Wirtschaft  
München, Wien: Carl Hanser Verlag, 1987
- [118] Altmann, G  
Konzeption, Entwicklung und Integration einer intelligenten Sensorik für die flexibel automatisierte Demontage mit dem Industrieroboter  
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung;  
Berufsakademie Stuttgart, Diplomarbeit, 1996
- [119] REFA  
Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation u. Unternehmensentwicklung e.V.  
Methodenlehre der Betriebsorganisation – Datenermittlung  
Carl Hanser Verlag, München, 1997
- [120] Warnecke, H.J.; Grau, R.; Weisener, T.  
Montagezellensteuerungen: Basis der flexiblen Montageautomatisierung  
Schweizer Maschinenmarkt 96 (1990)
- [121] Scholz-Reiter, B.; Scharke, H.  
Implementation and testing of a reactive disassembly planer  
4<sup>th</sup> International Seminar on Life Cycle Engineering  
Berlin, 26./27. 06.1998
- [122] Böhm, E.; Biermann, M.  
Optimierte Logistik statt Demontage-Automatisierung  
VDI-Nachrichten, Nr. 22, 03.06.1994
- [123] Strelow, D.  
Reibungszahl und Werkstoffpaarung in der Schraubenmontage  
Verbindungstechnik 11 (1981)
- [124] Wahl, K.  
Entwicklung und Vergleich von Schrauben aus Sicht eines Automobil-Herstellers  
Drucklufttechnik (1986)
- [125] Göbel, J.  
Einflussfaktoren auf die Klemmkraft einer Schraubverbindung beim drehmomentgesteuerten Anziehverfahren, Druckluftpraxis (1986)
- [126] Kayser, K.  
Einflüsse der Kraftangriffsflächen von Schraubenköpfen auf das Anziehen  
Verbindungstechnik 12 (1980)
-

- 
- [127] Einsatz elektronischer Handwerkzeuge zur Montage im Maschinen-, Anlagen- und Fahrzeugbau  
Werkstatt und Betrieb 118 (1985)
- [128] Pfaff, H.; Thomala, W.  
Streuung der Vorspannkraft beim Anziehen von Schraubenverbindungen  
VDI-Z 124 (182), 1997
- [129] Großberndt, H.  
Automatische Montagen erfordern verbesserte Schraubenqualität  
Informationsschrift der Firma EJOT Eberhard Jäger GmbH & Co. KG  
Verbindungstechnik  
Bad Laasphe, 1988
- [130] Fischer, G. E.  
Montage von Schrauben mit Industrierobotern  
Zugl. Stuttgart, Universität, Diss. 1987, Berlin: Springer 1990
- [131] Milberg, J.  
Entwicklungstendenzen in der flexibel automatisierten Montage  
Flexible Automation (1987)
- [132] Warnecke, H.J.; Schweizer, M.; Schweigert, U.  
Entwicklungsschwerpunkte bei der flexiblen Montageautomatisierung in der Feinwerktechnik  
wt Werkstatttechnik 80 (1990)
- [133] Warnecke, H.J.; Walther, J.  
Automatisches Schrauben mit Industrierobotern  
Wt-Z. ind. Fertig. 743 (1984)
- [134] Abele, E.  
Einsatzmöglichkeiten von flexibel automatisierten Montagesystemen in der industriellen Produktion (Schriftreihe „Humanisierung des Arbeitslebens“, Band 61),  
Düsseldorf: VDI-Verlag, 1988
- [135] Bruchhold, I.  
Untersuchung der Tragfähigkeit und des Füge- und Trennverhaltens von lösbaren Verbindungen  
Dissertation TU Berlin, Schriftenreihe Konstruktionstechnik, Band 15, 1994
- [136] Großberndt, J.  
Automatische Schraubenmontagen  
Der Betriebsleiter (1985)
- [137] Singer, M.; Heck, M.  
Design for Automatic Screwfeeding  
Assembly Engineering 28 (1985)
-

- 
- [138] Baudisch, R.; Brotkorb, H.  
Greiferwechselsystem für Montagearbeiten in der Gerätetechnik  
Feingerätetechnik 35 (1986)
- [139] Maier, C.  
Ein Beitrag zur flexiblen Automatisierung der Montage unter besonderer Berücksichtigung des Schraubens mit Industrierobotern  
München, Techn. Univ., Diss., 1995
- [140] Stapel, A.  
Automation erzwingt Nullfehler-Schrauben  
Produktion (1995)
- [141] Lotter, B.  
Planung und Aufbau von flexiblen Montageanlagen am Beispiel der Feinwerktechnik  
Werkstatttechnik 77 (1987)
- [142] Meedt, O.  
FAPS, Universität Erlangen-Nürnberg  
Effizienzsteigerung in der Demontage durch den Einsatz flexibler Werkzeuge  
Vortrag im Rahmen des Fachseminars begleitend zur Motek 1996, Sinsheim
- [143] Feldmann, K.; Meedt, O.  
Demontage elektronischer Geräte unter Nutzung effizienter Werkzeuge und lebenszyklus-  
übergreifender Produktdaten  
Industriemanagement 12 (1996)
- [144] Feldmann, K.; Meedt, O.  
Innovative Tools and Systems for Efficient Dissassembly Processes  
Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Seminar on Life Cycle Engineering  
ECO-Performance`96 Zürich, Verlag Industrielle Organisation  
und  
Innovative Werkzeuge zur Steigerung der Effizienz bei der Demontage elektronischer Pro-  
dukte  
Tagungsband zum VDI-Seminar „Recyclingfähige elektronische Produkte“  
Düsseldorf: VDI-Verlag, 1998
- [146] Scheller, H.  
Automatisierte Demontagesysteme und recyclinggerechte Produktgestaltung elektronischer  
Baugruppen  
Maisenbach 1998
- [147] Feldmann, K.; Meedt, O.  
Recycling and Disassembly for Electronic Devices  
Life-Cycle Modelling for Innovative Products and Processes  
(Hrsg. Jansen, H.; Krause, F.-L.) London, Weinheim, New York, Tokyo, Melbourne, Ma-  
dras: Chapman & Hall (1996)
-



- 
- [148] Seliger, G.; Wagner, M.  
Modeling of Geometry-Independent Endeffectors for Flexible Disassembly Tool  
Technische Universität Berlin, Sonderforschungsbereich 281  
Vortrag im Rahmen der „ECO-Performance '96“, Zürich, 1996
- [149] Seliger, G.; Wagner, M.  
Demontagewerkzeuge schaffen Zeit- und Kostenvorteile  
Der Betriebsleiter (1995)
- [150] Seliger, G.; Wagner, M.  
Flexible and Save Automation with Gripping Interfaces  
Proceedings of the 27th CIRP Seminar on Manufacturing Systems, Ann Arbor, Michigan,  
U.S.A., 1998
- [151] Seliger, G.; Wagner, M.  
Modeling of Geometry-Independent Endeffectors for Flexible Disassembly Tools  
ECO-Performance of the 3rd International CIRP Seminar on Life Cycle Engineering  
Zürich: Verlag Industrielle Organisation, 1996
- [152] Seliger, G.; Wagner, M.  
Modeling of Geometry-Independent Endeffectors for Flexible Disassembly Tool  
Technische Universität Berlin, Sonderforschungsbereich 281  
Vortrag im Rahmen der „ECO-Performance ,96“, Zürich, 1996
- [153] Bauer, C.-O.  
Handbuch der Verbindungstechnik  
München, Wien: Carl Hanser Verlag, 1991
- [154] Pahl, G.; Beitz, W.  
Konstruktionslehre – Methoden und Anwendungen  
3., neubearbeitete Auflage, Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1993
- [155] o.V.  
Demontageuntersuchungen zur Bestimmung von Lösemomenten an Schraubverbindungen  
ZwF 89 (1994)
- [156] Widmann, H.  
Anziehungsmomente unter der Lupe  
Industrie-Anzeiger 108 (1986)
- [157] Warnecke, H.-J.; Schraft, R.-D.  
Handbuch Handhabungs-, Montage- und Industrierobotertechnik  
Bd. 3, Landsberg am Lech: Verlag Moderne Industrie, 1984
- [158] VDI Richtlinie 2860  
Montage- und Handhabungstechnik  
Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole  
Berlin: Beuth-Verlag 1990
-

- 
- [159] DIN 8580, Fertigungsverfahren – Begriffe; Einteilung (Entwurf)  
Berlin: Beuth-Verlag 2002
- [160] Tönshoff, H. K.  
Dubbel – Taschenbuch für den Maschinenbau: „Trennen“  
Hrsg. von Beitz, W. und Küttner, K.H.  
Springer-Verlag
- [161] DIN 8580, Fertigungsverfahren – Begriffe; Einteilung (Entwurf)  
Berlin: Beuth-Verlag 2002
- [162] DIN 8591 E, Fertigungsverfahren Zerlegen – Einordnung, Unterteilung, Begriffe  
Entwurf, Berlin: Beuth Verlag, 2002
- [163] DIN 8588, Fertigungsverfahren Zerteilen – Einordnung, Unterteilung, Begriffe  
Entwurf, Berlin: Beuth Verlag, 2002
- [164] DIN 8589 Teil 0, Fertigungsverfahren Spanen – Einordnung, Unterteilung, Begriffe  
Entwurf, Berlin: Beuth Verlag, 2002
- [165] DIN 8590, Fertigungsverfahren Abtragen – Einordnung, Unterteilung, Begriffe  
Entwurf, Berlin: Beuth Verlag, 2002
- [166] Kahmeyer, M.  
Flexible Demontage mit dem Industrieroboter am Beispiel von Fernsprech-Endgeräten  
Dissertation Universität Stuttgart  
Reihe Forschung und Praxis, Band 215  
Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 1995
- [167] DIN 8591, Fertigungsverfahren Zerlegen - Einordnung, Unterteilung, Begriffe  
Entwurf, Berlin, Köln: Beuth-Verlag 2002
- [168] DIN 8588, Fertigungsverfahren Zerteilen - Einordnung, Unterteilung, Begriffe  
Entwurf, Berlin: Beuth-Verlag 2002
- [169] DIN 8589, Fertigungsverfahren Spanen - Einordnung, Unterteilung, Begriffe  
Entwurf, Berlin: Beuth-Verlag 2002
- [170] DIN 931-2, Sechskantschrauben mit Schaft; Gewindes M42 - M160 x 6, Produktkla. B  
Berlin: Beuth-Verlag 1987
- [171] DIN 5264 (ISO 2380-1-1997), Schraubendreher für Schrauben mit Schlitz  
Berlin: Beuth-Verlag 1999
- [172] DIN ISO 2936 (DIN 911), Winkelschraubendreher für Innensechskantschrauben  
Berlin: Beuth-Verlag 2001
- [173] DIN EN ISO 4762 (DIN 912), Zylinderschrauben mit Innensechskant  
Berlin: Beuth-Verlag 1998
-

- 
- [174] DIN 920, Flachkopfschrauben mit Schlitz und kleinem Kopf  
Berlin: Beuth-Verlag 1986
- [175] DIN 921, Flachkopfschrauben mit Schlitz und großem Kopf  
Berlin: Beuth-Verlag 1986
- [176] DIN 3125, Steckschlüssel mit Griff  
Berlin: Beuth-Verlag 2000
- [177] DIN EN ISO 1207, Zylinderschrauben mit Schlitz – Produktklasse A (ISO 1207: 1992)  
Deutsche Fassung EN ISO 1207: 1994
- [178] DIN ISO 1482, Senk-Blechschauben mit Schlitz (Einheitskopf)  
Berlin: Beuth-Verlag 1983
- [179] DIN ISO 1481, Flachkopf-Blechschauben mit Schlitz  
Berlin: Beuth-Verlag 1990
- [180] DIN ISO 8764-1 (DIN 5260), Schraubendreher für Schrauben mit Kreuzschlitz; Schraubendreher Spitzen  
Berlin: Beuth-Verlag 2000
- [181] Krottmaier, J.  
Versuchsplanung: Der Weg zur Qualität des Jahres 2000  
Verlag Industrielle Organisationm, Zürich 1995
- [182] Richter, K.; Loew, K.  
Mechanik des selbsttätigen LöSENS von Schrauben  
Konstruktion 44 (1992)
- [183] Strelow, D.  
Reibungszahl und Werkstoffpaarung in der Schraubenmontage  
Verbindungstechnik 13 (1981) Nr. 6
- [184] Schwarz, M.  
Auswahl und Steuerung von Druckluftmotoren  
Techno-tip 12 (1982)
- [185] Deppert, W.; Stoll, K.  
Pneumatik–Anwendungen – Kosten senken mit Pneumatik  
Vogel Fachbuch, 1990
- [186] o.V.  
Druckluft/Elektromotoren im Vergleich  
Atlas Copco Druckluft Kommentare (1982)
- [187] o.V.  
Wirtschaftliches Verschrauben mit Druckluftwerkzeugen  
Techno-tip 11 (1981)
-

- 
- [188] Betriebsanleitung Demontagezelle  
RTR – Reihnoldus Transport und Robotertechnik, 1996
- [189] Steinhilper, R.; Kahmeyer, M.  
Produktrecycling durch industrielle Demontage – Aufgaben und Perspektiven eines kommenden Industriezweiges  
VDI-ADB Jahrbuch 92/93; S. 194 – 215, Düsseldorf: VDI-Verlag 1992
- [190] Nevins, J.L.; Whitney, D.E.  
Assembly Research  
The Industrial Report 7 (1980) 1, S. 27 – 43
- [191] Whitney, D.E. u.a.  
Part mating theorie for compliant parts  
National Technical Information Service, August 31, 1980
- [192] Whitney, D.E.; Gustavson, R.E.; Hennessey, M.P.  
Designing Chamfers  
The International Journal of Robotics Research 2 (1983)
- [193] Niefer, W.  
Möglichkeit und Notwendigkeit der Mechanisierung und Automatisierung  
Rationalisierung 32 (1981)1
- [194] Fritz Schunk GmbH  
Betriebsanleitung Servo-Greifer und Werkzeugwechselsystem
- [195] Mertens, P.; Warnecke, G.; Deisenroth, M.  
Greifwechselforrichtungen für Industrieroboter  
ZwF 81 (1986)
- [196] North Intelligence Control Systems GmbH, Berlin  
Betriebsanleitung Bildverarbeitungssystem
- [197] Hopkins, S.H.; Bland, C.J.; Byrne, C.B.  
A toolbox of assembly strategies  
Proceedings of the 19<sup>th</sup> International Symposium of Industrial Robots, Qapril 1988
- [198] Jakobi, P.; Volmer, J.  
Fügemechanismen für die automatische Montage mit Industrierobotern  
Maschinenbautechnik (1982)
- [199] Frankenhauser, B.  
Methoden zum Toleranzausgleich  
Montage (1989)
- [200] Warnecke, H.J.; Schweizer, M.; Schweigert, U.  
Toleranzausgleich in der Präzisionsmontage  
Montage (1990)
-

- 
- [201] Domm, M.  
Kleinserienbestückung von Leiterplatten mit bedrahteten Bauelementen durch Industrieroboter  
Dissertation an der Universität Stuttgart, Springer-Verlag Berlin 1994
- [202] Hollis, R.L.; Taylor, R.H.; Johnson, M.  
Robotic circuit board testing using fine positioners with fiber-optic sensing  
Proceedings of the 15<sup>th</sup> International Symposium on Industrial Robots
- [203] Francois, C.; Artigue, F.  
Automated assembly by reference measurement  
Robotica 2 (1984)
- [204] Riehn Müller, T.  
Taktile Sensoren und Aktuatoren für den Robotereinsatz in der Montage  
VDI-Berichte 747, Automatisierung der Montage in der Feinwerktechnik und Elektrotechnik, März 1989
- [205] Schmieder, L.  
Die Kombination von Näherungssensoren mit einem Kraftmomentensensor  
Tagungsband Sensor 88, 3.-5. Mai 1988, Nürnberg
- [206] Gweon, D.  
Fügen von biegeschlaffen Steckkontakten mit Industrierobotern  
Berlin: Springer, 1987  
Zugl. Stuttgart, Universität, Diss. 1987
- [207] Hoffmann, B.D.; Pollack, S.H.; Weissmann, B.  
Vibratory insertion process: new approach to non-standard component insertion  
Robots & Conference Proceedings, June 4-7, 1984, Detroit  
Dearborn, Mi.: SME, 1984, Vol. 1
- [208] Jeong, K.W.; Cho, H.S.; Lee, C.O.  
On a vibratory assembly method using a PWM control based pneumatic assembly wrist  
Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Conference on Assembly Automation,  
Oct. 23-25, 1989, Tokyo
- [209] Warnecke, H.J.; Schweizer, M.; Schöniger, J.  
Musterverarbeitung mit taktilen Sensoren – Konzept eines Modulare Aktiven Greifer-/ Sensorsystems (MAGS)  
Robotersysteme 3 (1987)
- [210] Schweigert, U.  
Toleranzausgleichssysteme für Industrieroboter am Beispiel des feinwerktechnischen Bolzen – Loch – Problems  
Dissertation an der Universität Stuttgart, Springer-Verlag Berlin 1991
-

- [211] Spur, G.; Seliger, G.; Furgac, I.; Diep, T.V.  
Sensorunterstütztes Montagesystem  
Robotersysteme 2 (1986)
- [212] Holzmann, G.; Dreyer, H.-J.; Faiss, H.  
Technische Mechanik  
Teil 3: Festigkeitslehre  
Stuttgart: Teubner, 1975
- [213] Künne, B.  
Einführung in die Maschinenelemente – Gestaltung, Berechnung, Konstruktion  
B. G. Teubner, Stuttgart, 1999
- [214] Nevis, J.L.; Whitney, D.E.  
Assembly Research  
The Industrial Robot (1980)
- [215] Whitney, D.E.  
Part mating theory for compliant parts  
National Technical Information Service, August 31, 1980
- [216] Whitney, D.E.; Gustavson, R.E.; Hennessey, M.P.  
Designing Chamfers  
The International Journal of Robotics, Research 2 (1983)
- [217] Militzer, F.  
Schwingungserregter Fügemechanismus mit Unwuchterregung  
Feingerätetechnik 37 (1989)
- [218] o.V.  
Schraubtechnik: Mehr Sicherheit durch Überwachung  
VDI-Z 130 (1988)
- [219] Muck, G.  
Elektronische Messung und Steuerung von Drehmomenten in Montagemaschinen  
VDI-Berichte Nr. 323 (1978)
- [220] Tolle, H.; Weigl, A.  
Flexible robotergestützte Demontage von Elektronikaltgeräten  
Thema Forschung 1/98
- [221] Hesselbach, J.; Hermann, Ch.  
Combined Strategies for Recycling – Product and Process oriented Benchmark  
2<sup>nd</sup> International Symposium on Environmentally Conscious Design, Tokyo 2002
- [222] Trapp, Th; Stoll, W.  
Recyclingoriented Product and System Development  
Electronics goes Green 2000+, Berlin 2000
-

- 
- [222] Beitz, W.  
Demontagefreundliche Schnappverbindungen  
VDI-Berichte 493, Düsseldorf: VDI-Verlag, 1983
- [223] o.V.  
Sonderforschungsbereich 281 „Demontagefabrik zur Rückgewinnung von Ressourcen in  
Produkt- und Materialkreisläufen“  
Methodik zur Bewertung der Recyclinggerechtigkeit  
Forschungsprogramm, Technische Universität Berlin, 1998 – 2000
- [224] o.V.  
Der Rat der Sachverständigen für Umweltfragen: Sondergutachten Abfallwirtschaft  
Hsg. Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit;  
Bonn: September 1990
- [225] o.V.  
Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseiti-  
gung von Abfällen (Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz / KrW-/AbfG vom 27.9.94  
Umweltrecht, 9. Aufl. München: stv, 1995
- [226] Budde, A.  
Überwachung der Entsorgung nach dem Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz  
Entsorgungspraxis 10/1996
- [227] Jünemann, R. (Hrsg.)  
Wehking, K.-H.; Rinschede, A.  
Entsorgungslogistik, Band III  
Erich-Schmidt-Verlag, Berlin, 1995
- [228] Krikke, H.  
Opzet van een retourlogistieke keten voor duurzame consumenten producten  
Design for Remanufacturing, 23.04.1998
- [229] o.V.  
Das Gesetz und seine Verordnungen  
Logistik Heute 10/96
- [230] Wender, A.  
Kreislaufwirtschaftsgesetz und Landesabfallgesetz – Konsequenzen  
Vortrag im Rahmen des ELOG-Seminars 1996: „Kreislaufwirtschaft in der Praxis“  
Dortmund, 21./22. November 1996
- [231] VDI 2343, Entwurf  
Ganzheitliches Recycling elektronischer Geräte, 11/1998
- [232] Friedel, C.  
Kreislaufwirtschaft läuft ins Leere  
VDI Nachrichten 04.10.1996
-

- [233] Friedel, C.  
Kreislaufwirtschaft fordert von Ingenieuren mehr Kreativität  
VDI Nachrichten 04.10.1996
- [234] Kaminski, R.  
Änderungen des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes?  
Entsorgungspraxis 6/2000
- [235] Korfmacher, H.  
Zukunft: Elektro-Altgeräte-Verwertung  
Recycling magazin 23/1999
- [236] o.V.  
Verordnung über die Vermeidung, Verringerung und Verwertung von Abfällen gebrauchter elektrischer und elektronischer Geräte (Elektronik-Schrott-Verordnung) Entwurf.  
Bundesamt für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit WA II 4 – 30 114/7, 1992
- [237] Benz, K.-W.  
Statement zur Pressekonferenz „VDMA und AG Cycle im VDMA“ am 20.11.1995 im  
Presseclub Bonn  
VDMA, Abteilung Technik und Umwelt, Frankreich, 1995
- [238] Baumgarten, H.; Haberland, S.  
Demontagefabriken als integraler Bestandteil der Kreislaufwirtschaft  
Logistik im Unternehmen, Band 9, (1995), Heft 11/12
- [239] Möller, T.  
Beitrag zur automatisierten selektiven Entstückung von Leiterplatten  
Dissertation, Universität Dortmund im Januar 1996
- [240] Krottmeier, J.  
Versuchsplanung: Der Weg zur Qualität des Jahres 2000  
2. überarbeitete Auflage, Verlag TÜV Rheinland, Praxiswissen für Ingenieure, 1991
- [241] Jünemann, Reinhardt:  
Materialfluss und Logistik  
Systemtechnische Grundlagen mit Praxisbeispielen  
Springer - Verlag, Berlin 1989
- [242] Zangenmeister, C.  
„Nutzwertanalyse in der Systemtechnik“  
4. Auflage, Wittmann-Verlag, München, 1976
- [243] KUKA GmbH  
Betriebsanleitung KUKA KR 125
-



- 
- [244] Zussman, E.; Scholz-Reiter, B.  
Institut of Technology Haifa - Israel; Technische Universität Cottbus  
Planung in reaktiven Demontageprozessen  
Industrie Management 12 (1996), GITO-Verlag
- [245] Landesbetrieb Hamburger Stadtreinigung, IMS Ingenieurgesellschaft mbH  
Ingenieurstudie Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten aus Haushaltungen,  
Band 1, Hamburg 1991
- [246] REFA  
Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation u. Unternehmensentwicklung e.V.  
Methodenlehre der Betriebsorganisation – Datenermittlung  
Carl Hanser Verlag, München, 1997
- [247] Dutz, E.  
Die Logistik der Produktverwertung  
Dissertation Universität Mannheim, 1995
- [248] o.V.  
Elektrogeräte recycling im Industriemaßstab  
VDI-Nachrichten, Nr. 20, 20.05.1994
- [249] DIN ISO 4757 (DIN 7962), Kreuzschlitze für Schrauben  
Berlin: Beuth-Verlag 2000
- [250] Abele, E. u.a.  
Studie zur Untersuchung der Einsatzmöglichkeiten von flexibel automatisierten Montagesystemen in der industriellen Produktion (Montagestudie)  
Düsseldorf: VDI-Verlag, 1988
- [251] o.V.  
Verbrennung so gut wie Recycling?  
VDI Nachrichten Nr. 30, 1997
- [252] o.V.  
Technik und Know-how ermöglichen fast vollständige Wiederverwertung  
Rundschau, 1995
- [253] Diegner, B.  
Entsorgung von Elektronikgeräten  
Umweltwirtschaftsforum, Heft 1, Nov. 1995
- [254] Heisel, U.; Richter, F.  
Montagewerkzeuge oder Greifer? Einsatzmöglichkeiten in flexibel automatisierten Montageanlagen  
Wt-Produktion und Management (1994)
-

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1:	Rücknahme- und Verwertungswege für Elektronikschrott.....	6
Abb. 2.2:	Grobtrennung innerhalb der Demontage in vier Hauptfraktionen.....	7
Abb. 2.3:	Derzeit praktizierte Demontage .....	8
Abb. 2.4:	Anordnung der Bauteile in einem Fernsehgerät (Bj. Ende der 70iger Jahre).....	11
Abb. 2.5:	Manueller Demontageablauf für Bildschirmgeräte .....	12
Abb. 2.6:	Durchschnittliche Fraktionsverteilung von Bildschirmgeräten.....	13
Abb. 2.7:	Schematische Darstellung einer Farbbildröhre .....	14
Abb. 2.8:	Trockenmechanisch-thermisches Trennverfahren der Bildröhrenglasteile und anschließendem Absaugen der Leuchtstoffe mit einer Bürste .....	15
Abb. 3.1:	Layout der vollautomatisierten Demontagezelle.....	17
Abb. 3.2:	Gewicht - Kosten - Zeit - Diagramm für den Philips „Siera“ 26588 K/21Z.....	19
Abb. 3.3:	Häufigkeitsverteilung der zu lösenden Verbindungstechniken und Lösezeit für eine Verbindung bei der manuellen Demontage von Bildschirmgeräten.....	20
Abb. 3.4:	Automatisierungshemmnisse bei der Demontage elektrischer Altgeräte.....	22
Abb. 3.5:	Zustand und Alter des Bildschirmgeräterücklaufes .....	22
Abb. 3.6:	Anforderungen an die Automatisierung der Demontage elektrischer Altgeräte.....	24
Abb. 3.7:	Demontagezeit- Verteildiagramm.....	28
Abb. 3.8:	Zeitliche Verteilung unterschiedlicher automatischer Trennprozesse .....	30
Abb. 3.9:	Teilzentrale Steuerungsstruktur des Demontagesystems .....	31
Abb. 3.10:	Verfügbarkeit der Demontagezelle entsprechend der Entwicklungsstufe .....	33
Abb. 3.11:	Zusätzlicher Zeitbedarf je Zustandsänderung .....	33
Abb. 4.1:	Prinzipdarstellung des Impuls-Entschraubers und des Bohr-Entschraubers .....	38
Abb. 4.2:	Häufigkeitsverteilung von Schraubenarten in Bildschirmgeräten .....	40
Abb. 4.3:	Anzugs- und Lösemoment bei unbeschädigten Schraubenverbindungen.....	41
Abb. 4.4:	Einsetzbare Verfahren zum Trennen von Schraubenverbindungen.....	43
Abb. 4.5:	Sensitivitätsanalyse zur Auswahl der Demontagesstrategie .....	52
Abb. 4.6:	Trennprozessmodell Zerlegen von Schraubenverbindungen.....	54
Abb. 4.7:	Formschlusserstellung in Schraubenwirkrichtung und mit Angularwinkel .....	54
Abb. 4.8:	Einflüsse auf die Formschlusserstellung in Abhängigkeit vom Schraubentyp .....	55
Abb. 4.9:	Fügefasen unterschiedlicher Schraubenkopfgeometrien.....	56
Abb. 4.10:	Einflüsse auf die Formschlusserstellung.....	58

---

Abb. 4.11:	Mindestaxialkraft für die Übertragung des Lösemomentes .....	59
Abb. 4.12:	Einflüsse von Axialkraft und Drehzahl auf Löse- und Ausdrehmoment .....	60
Abb. 4.13:	Einflüsse auf die Lösbarkeit von Schraubenverbindungen.....	62
Abb. 4.14:	Lösemomentenverlauf einer Blechschraube 4 mm und einer Schraube M6 .....	63
Abb. 4.15:	Spezifische Probleme des Trennvorgangs „Zerlegen von Schraubenverbindungen“.....	67
Abb. 4.16:	Einteilung von Toleranzausgleichsverfahren.....	69
Abb. 4.17:	Einflussparameter auf die Wiederholungsabweichung.....	71
Abb. 4.18:	Schraubenkopfdurchmesserbereich je Schraubengröße .....	72
Abb. 4.19:	Formschlusserstellung einer Schrauber Klinge mit einer M3-Schlitzschraube .....	73
Abb. 4.20:	Spiralförmige Suchstrategie für den ungesteuerten Toleranzausgleich.....	75
Abb. 4.21:	Prinzipdarstellung der Positionier- und Bahnfehlerausgleichsmöglichkeiten.....	76
Abb. 4.22:	Extreme Positionen von Schraubenverbindungen in Bildschirmgeräten.....	79
Abb. 4.23:	Morphologischer Kasten zur Auswahl von Effekten und Effektträgern zu den Soll-Funktionen der funktionellen Phasen .....	84
Abb. 4.24:	Konstruktionszeichnungen des Ausgleichsmoduls mit federnder Nachgiebigkeit und Rückstellung.....	86
Abb. 4.25:	Federkennlinie der Druckfeder .....	88
Abb. 4.26:	Lange, dünne Spule um die Bitverlängerung.....	90
Abb. 4.27:	Drehen der Bitverlängerung innerhalb einer stehende Spule .....	90
Abb. 4.28:	Messung des Druckimpulses mit einem Beschleunigungsaufnehmer .....	91
Abb. 4.29:	Kräftebilanz für den Ablösevorgang .....	92
Abb. 4.30:	Grenzbedingung für Schraubengröße.....	93
Abb. 4.31:	Beschleunigung des Schrauber-Pneumatik-Kolbens .....	93
Abb. 4.32:	Systemzeichnung eines Flügelzellenmotors.....	94
Abb. 4.33:	Konstruktionszeichnung des Schraubwerkzeuges mit Ausgleichsmodul.....	94
Abb. 5.1:	Steuerungstechnisches Blockschaubild des Demontagesystems .....	95
Abb. 5.2:	Prinzipieller Steuerungsaufbau des Schraubwerkzeuges .....	96
Abb. 5.3:	Verlauf von Drehmoment, Spindeldrehzahl und Axialkraft je Prozessphase .....	97
Abb. 5.4:	Ablauf des Zerlegeprozess mit neuer Schraubeinheit und Ausgleichsmodul mit Ausgleichsverfahren und flexiblem Entfernen der gelösten Schraube.....	98
Abb. 5.5:	Integration des Schraubwerkzeuges mit Ausgleichsmodul in die Demontagezelle .....	99

---

---

Abb. 5.6:	Einflüsse auf die Formschlusserstellungsrate mit dem neuen Schraubmodul auf eine M3-Schraube bei einem Lateral-Achsversatz von 1,5 mm .....	100
Abb. 5.7:	Formschlusserstellungsrate mit Ausgleichsmodul in Abhängigkeit der Lageabweichung und Vergleich zur ersten Entwicklungsstufe .....	101
Abb. 5.8:	Einsatz des Schraubwerkzeugs mit Ausgleichsmodul in der Bildschirmgerätedemontage .....	103
Abb. 5.9:	Schraubprozesszeiten für die einzelnen Zerlegethassen .....	104
Abb. 5.10:	Prozentuale Fehlerrate beim automatisierten Demontageprozess .....	105
Abb. 5.11:	Kumulierter Kostenvergleich je Szenario .....	109
Abb. A.1:	Fernsehgeräte unterschiedlichen Baujahrs (1970-1985) mit geöffneter Rückwand .....	143
Abb. A.2:	Fernsehgeräte unterschiedlichen Baujahrs (1986-1996) mit geöffneter Rückwand .....	144
Abb. D.1	Vorderseite des Zeitaufnahmebogens Z1 (Mittelwert) für die manuelle Demontage des Fernsehgerätes Philips „Siera“ 26C768 .....	153
Abb. D.2:	Rückseite des Zeitaufnahmebogens Z1 (Mittelwert) für die manuelle Demontage des Fernsehgerätes Philips „Siera“ 26C768 .....	154
Abb. D.3:	Ergänzungsbogen zum REFA-Zeitaufnahmebogen Z1 (Mittelwert) für die manuelle Demontage des Fernsehgerätes Philips „Siera“ 26C768.....	155
Abb. D.4:	Vorderseite des Zeitaufnahmebogens Z1 für die automatisierte Demontage des Fernsehgerätes Philips „Siera“ 26C768 .....	156
Abb. D.5:	Rückseite des Zeitaufnahmebogens Z1 für die automatisierte Demontage des Fernsehgerätes Philips „Siera“ 26C768.....	157

---

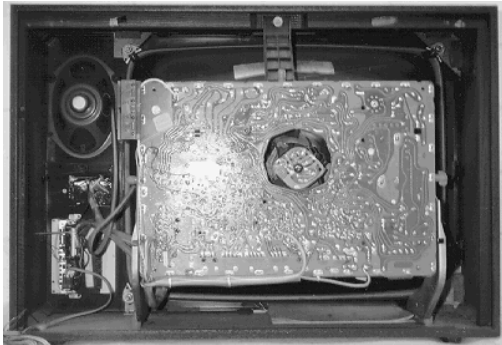
## Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1:	Zusammensetzung einer 63 cm - Farbbildröhre.....	14
Tab. 3.1:	Kriterien zur Einteilung von Bildschirmgeräten.....	18
Tab. 3.2:	Kriterien für die Demontage von Bildschirmgeräten in Fraktionen.....	19
Tab. 3.3:	Einflussfaktoren auf den automatisierten Demontageprozess.....	21
Tab. 3.4:	Alterungs- und nutzungsbedingte Zustandsvarianzen.....	23
Tab. 3.5:	Angaben über die demontierten Bildschirmgeräte.....	25
Tab. 3.6:	Demontagetiefe der manuellen und automatisierten Demontage .....	27
Tab. 3.7:	Gesamtprozesszeiten für die automatisierte und manuelle Demontage .....	28
Tab. 3.8:	Aufteilung der Demontagezeiten bei der automatisierten Zerlegung .....	29
Tab. 3.9:	Zeitliche Verteilung des Schraubprozesses.....	30
Tab. 4.1:	Auftretende Schraubenverbindungselemente in Bildschirmgeräten.....	40
Tab. 4.2:	Zuordnung von Verbindungsarten und Trennprozessen mit Beispielen.....	42
Tab. 4.3:	Analyse unterschiedlicher Trennverfahren von Kreuzschlitzschraubenverbindungen in der Rückwand des Fernsehgerätes Beovision von B&O .....	47
Tab. 4.4:	Analyse unterschiedlicher Trennverfahren von Schraubenverbindungen an der Bedieneinheit des Fernsehgerätes Beovision von Bang & Olufsen.....	48
Tab. 4.5:	Analyse unterschiedlicher Trennverfahren von Kreuzschlitz-Schraubenverbindungen in der Rückwand des Fernsehgerätes von Sharp .....	48
Tab. 4.6:	Analyse unterschiedlicher Trennverfahren für die Spannschraube am Sicherungsring der Ablenkeinheit des Fernsehgerätes von Sharp .....	49
Tab. 4.7:	Lösungsalternativen zum Lösen von Schraubenverbindungselementen.....	50
Tab. 4.8:	Auswahl der Demontagestrategie .....	52
Tab. 4.9:	Auswahl von Suchstrategien zur Formschlusserstellung .....	74
Tab 4.10:	Konzepte für Toleranzausgleichsverfahren mit den entsprechenden Lösungsprinzipien und den Auswahlkriterien.....	77
Tab. 4.11:	Anforderungsliste für das Ausgleichsmodul von Entschraubwerkzeugen.....	80
Tab. 4.12:	Konzepte für den eigenständigen Ausgleich von Positioniergenauigkeiten.....	81
Tab. 4.13:	Elemente zur Drehmomentübertragung für eine Auslenkung der Schrauberspindel.....	83
Tab. 4.14:	Auswahl von Effekten und Effekträgern zu den Soll-Funktionen.....	84
Tab. 4.15:	Konstruktionsmerkmale mit den entsprechenden Lösungsprinzipien und den Auswahlkriterien.....	85
Tab. 4.16:	Prozesszeit für das Ablegen aller gelösten Schrauben im Vergleich zur Gesamtdemontagezeit in der ersten Entwicklungsstufe.....	89

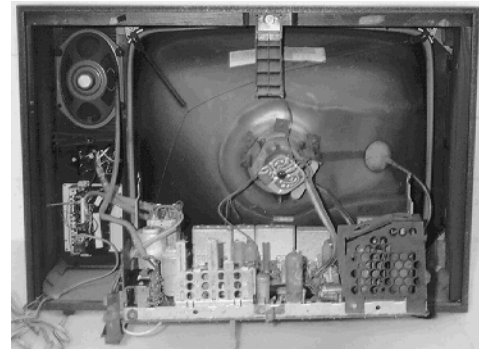
---

Tab. 4.17:	Variantenvergleich für das flexible Entfernen der gelösten Schraube.....	91
Tab. 5.1:	Prozessgrößen für eine 100%ige Formschluss-Wiederholgenauigkeit .....	102
Tab. 5.2:	Gesamtdemontagezeiten der zweiten Entwicklungsstufe .....	104
Tab. 5.3:	Demontagestückkosten je Szenario über 10 Jahre gemittelt.....	109
Tab. B.1:	Verbindungstechnik, Greifflächen und Demontagekraft beim B&O.....	145
Tab. B.2:	Verbindungstechnik, Greifflächen und Demontagekraft beim PHILIPS.....	145
Tab. B.3:	Verbindungstechnik, Greifflächen und Demontagekraft beim RFT „Siesta“ .....	146
Tab. B.4:	Verbindungstechnik, Greifflächen und Demontagekraft beim SHARP.....	146
Tab. D.1:	Zeitaufnahmeergebnisse nach REFA (Mittelwert) für die manuelle Demontage.....	155
Tab. D.2:	Ergebnisse der Zeitermittlung nach REFA für die automatisierte Demontage .....	157
Tab. E.1:	Ermittlung des Gewichtungsfaktors $\alpha_j$ .....	158
Tab. E.2:	Ermittlung des Erfüllungsgrades $E_{ij}$ .....	159
Tab. F.1:	Darstellung der betrachteten Szenarien.....	160
Tab. F.2:	Ermittlung des Personalbedarfes je Szenario .....	160
Tab. F.3:	Ermittlung der Personalkosten pro Jahr je Szenario.....	160
Tab. F.4:	Investitionskosten je Demontagesystem.....	161
Tab. F.5:	Gesamtinvestitionen und jährliche Abschreibung je Szenario für die manuelle Demontage .....	161
Tab. F.6:	Kapitalkosten $R_j$ der manuelle Demontage je Szenario .....	162
Tab. F.7:	Kapitalkosten $R_j$ der automatisierten Demontage (szenariounabhängig) .....	162
Tab. F.8:	Flächenbedarf je Einheit und Mietkosten.....	162
Tab. F.9:	Mietkosten pro Jahr je Szenario.....	162
Tab. F.10:	Instandhaltungskosten pro Jahr je Szenario.....	163
Tab. F.11:	Kumulierte Gesamtkosten der manuellen Demontage je Szenario .....	163
Tab. F.12:	Kumulierte Gesamtkosten der automatisierten Demontage je Szenario .....	163

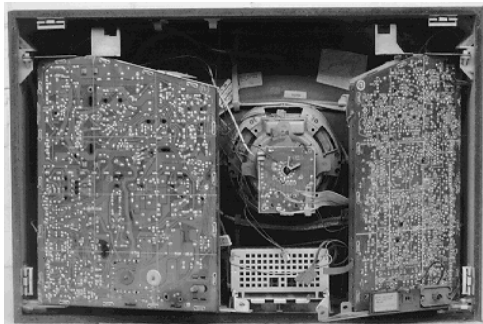
## Anhang A: Klassifizierung von Bildschirmgeräten



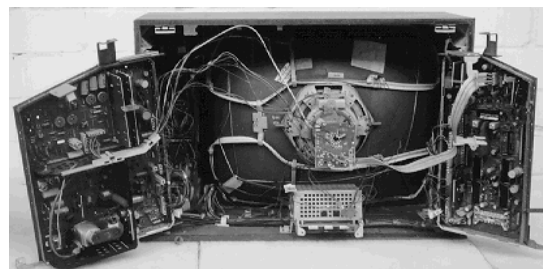
SABA electronics (1970)



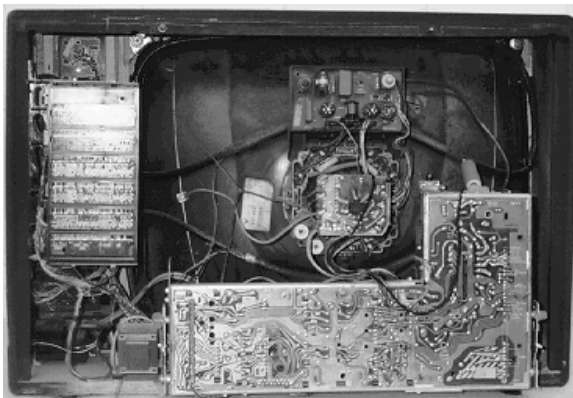
SABA electronics mit aufgeklappter Platine



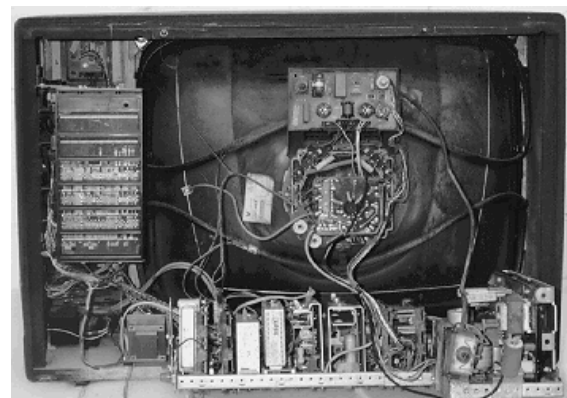
Philips „Siera“ 26C768 (1977)



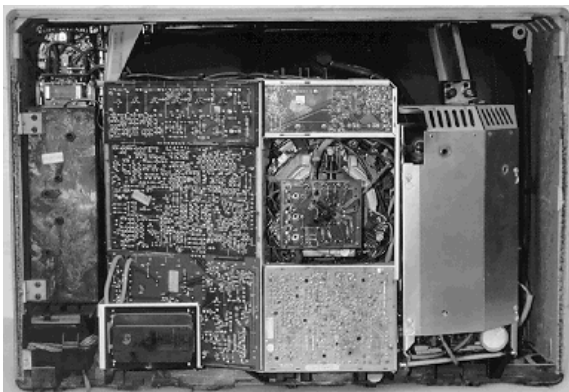
Philips „Siera“ mit aufgeklappter Platine



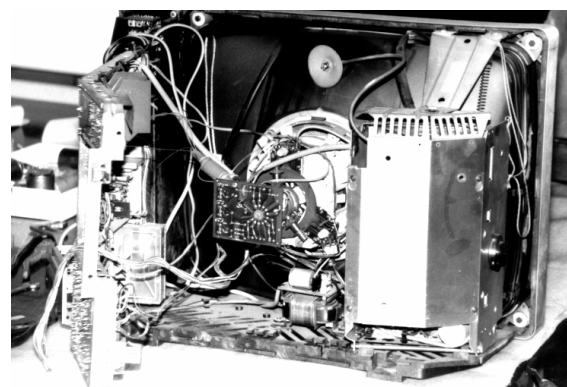
NORDMENDE spectra (1978)



NORDMENDE spectra mit aufgeklappter Platine

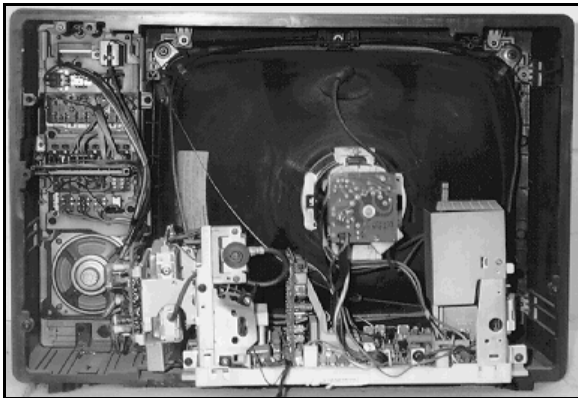


Bang&Olufsen Beovision 4000 3901 TV (1983)

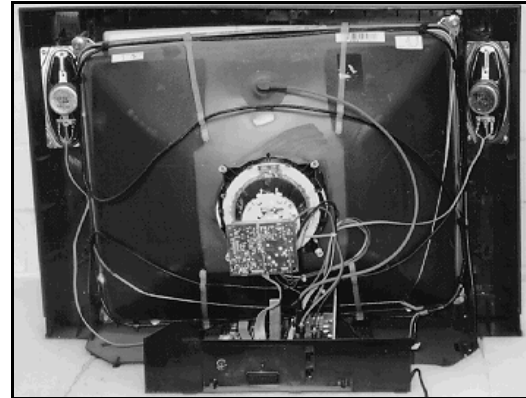


Bang&Olufsen Beovision mit aufgeklappter Platine

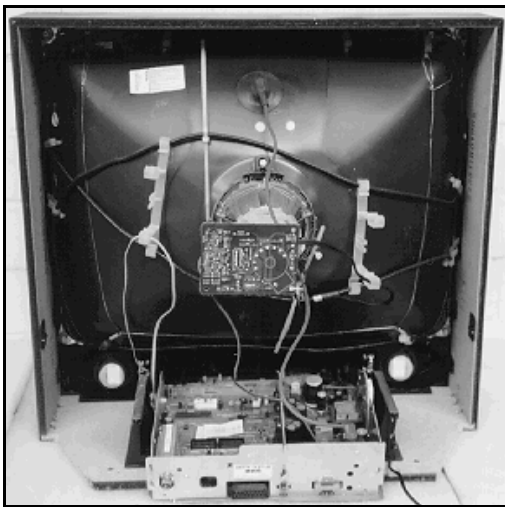
Abb. A.1: Fernsehgeräte unterschiedlichen Baujahrs (1970-1985) mit geöffneter Rückwand



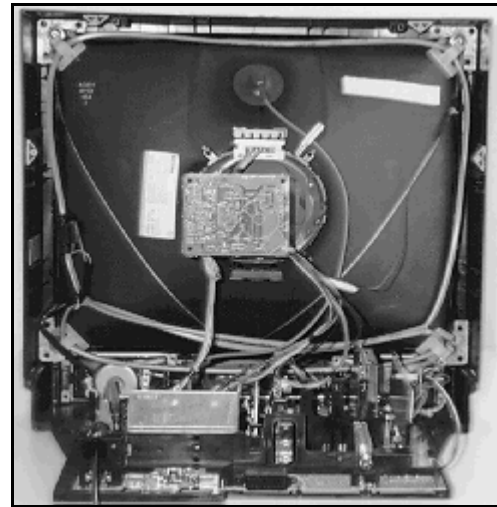
Sanyo secam pal (1986)



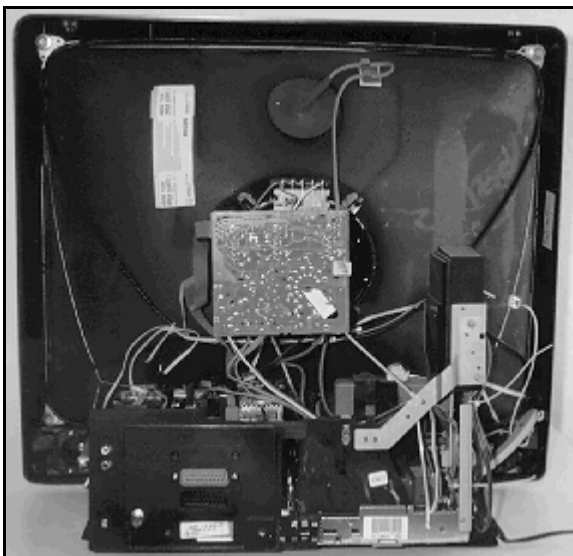
Schneider TV-8-70315/P (1990)



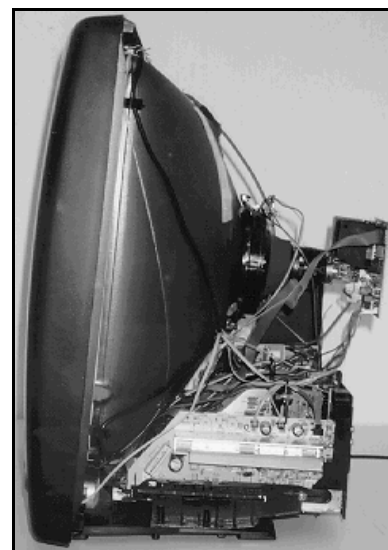
RFT SIESTA TV 70-220 (1992)



Sharp DV 6301-S (1995)



Grundig ST 70-150 IDTV (1996)



Grundig ST 70-150 - seitliche Ansicht

Abb. A.2: Fernsehgeräte unterschiedlichen Baujahrs (1986-1996) mit geöffneter Rückwand [28]



**Anhang B: Verbindungstechnik, Greifflächen und Demontagekräfte****BANG & OLUFSEN Beovision 4000 3901 TV:**

<i>Bauteil</i>	<i>Art, Anzahl der Verbindungstechnik</i>	<i>Greiffläche, Greifkraft</i>
Rückwand	2 Schnappverbindung oder 2 Kreuzschlitz-Blechschaube 3.5, Tiefe 9 mm	glatte Rückwand, mittig 25 N
Hochspannungs- anschlussplatine	1 Platinenstecker	linke oder rechte Außen- kante, mittig 5 N
Hauptplatine	2 Schnappverbindungen	Platine zwischen den hinte- ren beiden Alu-Kanten grei- fen (Hub = 67 mm) 22 N
Netzteil	2 Schlitzschrauben, M4, Tiefe 5mm; 1 Bolzenverbindung mit Feder	glatte Fläche, mittig 21 N
Ablenkeinheit	1 Sicherungsfeder	umschließend 25 N
Hochspannungs- trafo	2 Kreuzschlitz-Blechschauben 3.5, Tiefe 8 mm	oben oder unten, mittig 8 N
Bedienteil	2 Klemmverbindungen	an der glatten Laut- sprecherbox, mittig 18 N
Bildröhre	4 Sechskantschrauben, M 5, 15mm	von oben (Rückseite), mittig 230 N
Restgehäuse		seitlich, mittig 70 N

Tab. B.1: Verbindungstechnik, Greifflächen und Demontagekräfte beim Beovision 4000 3901

**PHILIPS „Siera“ 26588 K / 21 Z:**

<i>Bauteil</i>	<i>Art, Anzahl der Verbindungstechnik</i>	<i>Greiffläche, Greifkraft</i>
Rückwand	4 Schnappverbindungen	glatte Rückwand, mittig 13 N
Hochspannungs- anschlussplatine	1 Platinenstecker	linke oder rechte Außen- kante, mittig 5 N
Netzteil	1 KS, M4, Tiefe 4 mm; 1 zusätzlich: Schnappverbindung	linke Platinenkante, mittig 26 N
linke Rückwand- platine	1 KS, M4, Tiefe 4 mm; 1 Schnappverbindung	rechte Platinenkante, mittig 29 N
Hochspannungs- trafo	2 Sicherungsbügel aus Metall	mittig am Gehäuse 30 N
Ablenkeinheit	1 Spannschraube	umschließend 20 N
Bedieneinheit	1 KS, M3, Tiefe 3 mm; 1 Sollbruchstelle aus Kunststoff	an der linken oder rechten Seite 23 N
Bildröhre	4 Sechskantmuttern, M 6, Tiefe 10 mm	von oben (Rückseite), mittig 230 N
Restgehäuse		seitlich, mittig 75 N

Tab. B.2: Verbindungstechnik, Greifflächen und Demontagekräfte beim PHILIPS „Siera“

RFT Siesta TV 63 - 102:

<i>Bauteil</i>	<i>Art, Anzahl der Verbindungstechnik</i>	<i>Greiffläche, Greifkraft</i>
Rückwand	6 LS, M4, Tiefe 15 mm	glatte Rückwand, mittig 18 N
Hochspannungs- anschlussplatine	1 Platinenstecker	linke und rechte Außen- kante, rechts 5 N
Hauptplatine	eingeschoben (2 Schübe)	Hinterkante, Außenkante mittig 13 N
Ablenkeinheit	1 Sechskant-Sicherungsschraube in Schelle, M5, Tiefe 8 mm	umschließend 150 N
Bildröhre	4 Blechschrauben (Kreuzschlitz und Sechskant) 6.0, Tiefe 30 mm	von oben (Rückseite), mittig 200 N
2 Lautsprecher	je 2 Klemmverbindungen, oben und unten	mittig (Magnet) je3 N
IR-Platine	eingeschoben	Außenkante mittig 2 N
Restgehäuse		seitlich, mittig 45 N

Tab. B.3: Verbindungstechnik, Greifflächen und Demontagekräfte beim RFT „Siesta“

SHARP DV 6301 - S:

<i>Bauteil</i>	<i>Art, Anzahl der Verbindungstechnik</i>	<i>Greiffläche, Greifkraft</i>
Rückwand	8 KS, M4, Tiefe 15 mm; teilweise bis zu 30 mm versenkt zusätzlich: 2 Schnappverbindung	glatte Rückwand, mittig 30 N
Hochspannungs- anschlussplatine	1 Platinenstecker	linke und rechte Außen- kante, rechts 5 N
Hauptplatine	eingehängt	Hinterkante, rechts und links oben 21 N
Ablenkeinheit	1 Imbus-Sicherungsschraube in Schelle, M5, Tiefe 8 mm	umschließend 150 N
Bildröhre	4 Blechschrauben (Kreuzschlitz und Sechskant) 6.0, Tiefe 30 mm	von oben (Rückseite), mittig 200 N
2 Lautsprecher	je 2 KS, M3, Tiefe 10 mm	oben oder unten je3 N
IR-Platine	4 Schnappverbindungen	oben oder unten 2 N
Restgehäuse		seitlich, mittig 20 N

Tab. B.4: Verbindungstechnik, Greifflächen und Demontagekräfte beim SHARP DV 6301-S

## Anhang C: Umfrage zur Automatisierung der Demontage

### Fragebogen zur Automatisierung der Demontage

#### 1. Welche Automatisierungshemmnisse sehen Sie bei der Demontage elektrischer Altgeräte?

(Bitte bewerten Sie die einzelnen Antworten mit einer Punktzahl von 1 für nicht wichtig bis 5 für höchste Priorität.)

- Demontage der Geräte in annähernd Losgröße 1: .....
- Typen- und Variantenvielfalt: .....
- Produktgestaltung (z.Z. keine demontagefreundliche Gestaltung): .....
- Keine ausreichende Stückzahl einer Gerätegruppe, die für eine Automatisierung erforderlich ist (z.6. 180 Fernsehgeräte am Tag): .....
- starke Stückzahlschwankungen: .....
- Beschädigung der Geräte: .....
- Korrosion der Bauteile und Verbindungselemente: .....
- fehlende technische Lösungen (z.B. Werkzeuge, Bildverarbeitung): .....
- alterungs- und nutzungsbedingte Varianzen (Zustandsänderungen durch unsachgemäße Reparaturarbeiten, Ausschachtungen, Transportschäden): .....
- ..... :

#### 2. Welche alterungs- und nutzungsbedingten Varianten infolge von unsachgemäßen Reparaturarbeiten, Ausschachtungen, Transportschäden sind bei Altgeräten festzustellen:

(Bitte geben Sie in Prozent an, wie häufig die aufgeführten Zustandsänderungen auftreten)

- Positionsabweichungen von Verbindungselementen, Kabelsträngen oder Bauteilen infolge des robusten Handlings der Altgeräte während der Sammlung: .....%
- das Fehlen eines Bauteils oder eines Verbindungselementes infolge des Ausschachtens der zur Entsorgung anstehenden Geräte: .....%
- Schraubentypen wurden vertauscht, z.B. Anstelle einer Kreuzschlitzschraube ist eine Schlitzschraube vorhanden: .....%
- Schrauben sind überdreht und lassen sich mittels Schrauber nicht lösen: .....%
- Verbindungselemente sind festgerostet: .....%
- Bauteile sind beschädigt oder deformiert: .....%
- Bauteile oder Verbindungen sind innerhalb des Gehäuses verklemmt: .....%
- ..... :

### 3. Welche Anforderungen werden an automatisierte Demontagesystemen gestellt?

(Bitte bewerten Sie die einzelnen Antworten mit einer Punktzahl von 1 für nicht wichtig bis 5 für höchste Priorität.)

- Produktflexibilität: Ermöglichung der Demontage von Bildschirmgeräten unterschiedlicher Hersteller und Gerätegenerationen ohne Umrüsten: .....
- Produktzustandsflexibilität: Demontage von Produkten unterschiedlicher Anlieferungszustände (Flexibilität der Anlage bzgl. alterungs- und nutzungsbedingter Varianzen): .....
- hohe Funktionssicherheit, Verfügbarkeit: .....
- geringe Ausfallzeiten bedingt durch Reparaturen und Wartung: .....
- Bereitstellung von zerstörenden u. nicht zerstörenden Trenntechnologien: .....
- geringer Anteil typenspezifischer Werkzeuge: .....
- vollautomatischer Werkzeugwechsel: .....
- möglichst wenig Werkzeugwechsel: .....
- modularer Systemaufbau, der an wachsende Produktvielfalt anpassbar ist: .....
- geringer Aufwand zur Erweiterung u. Anpassung der Demontageaufgaben: .....
- hoher Automatisierungsgrad, auch an den Schnittstellen: .....
- Ausschleusmöglichkeit, um eine Systemblockierung zu vermeiden: .....
- Verträglichkeit mit vor- und nachgelagerten manuellen Arbeitsplätzen: .....
- Einhaltung der gesetzlichen Arbeitsschutzanforderungen: .....
- ..... :

### 4. Geben Sie bitte in Prozent an, welche konkreten (messbaren) Bedingungen Sie an eine automatisierte Demontage stellen bzgl.

- Produktflexibilität: Anzahl der demontierbaren Bildschirmgeräte unterschiedlicher Hersteller und Gerätegenerationen ohne Umrüsten: .....%
- Produktzustandsflexibilität: Anzahl der demontierbaren Bildschirmgeräte mit unterschiedlichen Anlieferungszuständen bzw. mit alterungs- und nutzungsbedingten Varianzen: .....%
- mind. Reproduzierbarkeit des Demontageablaufes bei Varianzen: .....%
- Mindest-Verfügbarkeit der Demontageanlage: .....%
- max. Ausfallzeiten bedingt durch Störungen, Reparaturen und Wartungen: .....%
- Amortisationszeit (wirtschaftliche Rückflussdauer) .....Jahre

## Liste der befragten Entsorgungs-, Recycling- und Zerlegebetriebe

Aqua Control Umwelttechnik GmbH	Pfenderstr. 2	51674 Wiehl
Bahrendt Recycling GmbH	Gutenbergerstr. 34	24536 Neumünster
Behindertenwerkstätten	Hans-Eder Str. 5	93413 Cham
Bergischer Recyclingdienst e.V.	Auf dem Brahm 99	42281 Wuppertal
Brahl GmbH	Marzaner Str. 35	13053 Berlin
Bresch Entsorgung GmbH	Leinestr. 18	24539 Neumünster
C+E Recycling GmbH	Postfach 129	16515 Orianienburg
CAR Components Recycling GmbH	Tomannweg 3	81673 München
CLEANAWAY Limited	The Drive Warley Brentwood	GB – Essex CM13 3BE
Citycomp mbH & Co	Sportallee 1	22335 Hamburg
Comp-Act	Langenkornweg 34	Kelsterbach
Computer- & Elektronikrecycling	Wilhem-Harting-Str. 4	32339 Espelkamp
Cover –tronic GmbH	Gewerbestr. 11	33181 Harren
CTM Demontage	Alt Biesdorf 53D	12683 Berlin
DE LUMA Recycling GmbH	Geusaer Str. 1	06217 Merseburg
Dell-Computer GmbH	Siemensstr. 18	63225 Langen
Demet Edelmetall Recycling AG & Co.	Siemensstrasse 20	63755 Alzenau
DGW	Röher Weg 4	71032 Böbingen
Durgeloh GmbH	Heinrich-Hertz-Str. 5	69190 Walldorf
ECOTRN GmbH	Brückenstr. 9	32549 Bad Oeynhausen
ECN Energy Engineering	Westerduinweg 3	NL-1755 ZG Petten
Edelhoff Entsorgung GmbH	Hegestück 20	58640 Iserlohn
Electronic Recycling GmbH	Otto-Hahn-Str. 1-3	63225 Langen
ELEKTROCYCLING GmbH	Landstrasse 91	38644 Goslar
Elektro-Geräte-Recycling GmbH	Deininghause Weg 95	44577 Castrop-Rauxel
Elektronik Produkt Recycling GmbH	Am Hafen 8-9	38112 Braunschweig
Elektroniksrott-Recycling H. Retzlaff	Harschenflether Weg 15	21682 Stade
ERV Elektronik-Recycling	Hainstr. 17	07545 Gera
Euromat Gesellschaft mbH	Fürstenstr. 7	47051 Duisburg
EVAS Entsorgung Verwertung	Ossietzkystrasse 6	70174 Stuttgart
Fischer & Schobert Elektronik GmbH	Danstedter Weg 5	38855 Heudeber
Fritz Schorfmann Erben	Tüschendorfer Damm 1	28879 Grasberg
FUCHS Recycling Gruppe	Allacher Str. 230e	80999 München
G&O Entsorgung GmbH	Malscher Str. 9	76448 Durmersheim
Geopro mbH	Postfach 4513	Castrop-Rauxel
Georg Dück AG	Rupert-Bodner Str.25	81245 München
GER Gesellschaft mbH	Endenicher Allee 130	53121 Bonn
Gerd Bröckmann GmbH	Tersteegenstr. 21a	42653 Solingen
Germann Entsorgung und Recycling	Quadebekstr. 6	23560 Lübeck

GWP Dr.Haag GmbH	Poststr. 6	71665 Enzweihingen
H. Dudek GmbH	Mollstr. 28	68165 Mannheim
HECKERT Umwelttechnik GmbH	Otto-Schmerbach-Strasse 19	09117 Chemnitz
Heitkamp Umwelttechnik GmbH	Heinrichstr. 67	44805 Bochum
Hellmann Computer Service GmbH	Dornierstrasse 9	49009 Osnabrück
Hennemann	Bussche-Münch-Str. 20	32339 Espelkamp
Hetzel & Co. Elektronik Recycling GmbH	Maybachstr. 18	90441 Nürnberg
IBM Deutschland GmbH	Senefelder Str. 2	63110 Rodgau
IER GmbH	Obereiderstr. 28	24768 Rendsburg
IMEXCO	Siemensstrasse 20	63755 Alzenau
INTER OEKO GmbH	Helbigstr. 46	16303 Schwedt
Inter Recycling AG	Fännring 1	CH-6403 Küsnacht am Rigi
Jade Stahl GmbH	Emsstr.29	26382 Wilhelmshaven
Kaatsch GmbH	Am Nordseekai 8	73207 Plochingen
Karl Nehlsen GmbH	Furtstr. 14	28759 Bremen
Klößner Rohrstoff-Recycling	Schürmannsstrasse	46242 Bottrop
Kluge Umweltschutz GmbH	Hülsermannshof 36	47179 Duisburg
L&H Recycling GmbH	Fünfeichener Weg 1	17094 Bargensdorf
L+N Recycling GmbH	Daimlerstr. 5	89312 Günzburg
Lausitzer Recycling GmbH	An der Eisenbahn 4	01099 Dresden
MEIJER Computer-Recycling	Neustrasse 24	42799 Leichlingen
Meltec Gesellschaft für Recycling	Albert-Zimmermann Str. 27	03130 Haidemühl
MG Metallrecycling	Hoverstr. 30	20354 Hamburg
MICROTEAM GmbH	Am Wolfsberg 17	28865 Lilienthal
MIREC B.V.	Dillenburgstraat 4	NL-5652 Eindhoven
Möhle GmbH	Hannoversche Str.65	38116 Braunschweig
MR Metallrecycling GmbH	Im Büchel	53577 Neustadt
Neue Arbeit Zollern Achaim e. V.	Hechinger Str. 120	72072 Tübingen
Nokia Data GmbH	Vogelsanger Weg 91	40470 Düsseldorf
Norddeutsche Affinerie AG	Alsterterasse 2	20354 Hamburg
Padeborner Recyclingcenter	Frankfurter Weg 60-62	33106 Padeborn
Parec GmbH	Halbestädter Str. 3-5	33106 Padeborn
R+T Entsorgung GmbH	Helenenstrasse 180	45143 Essen
RDE Elektronik-Recycling GmbH	Zeppelinstrasse 1	50259 Pulheim
Recycling Leuna-Werke GmbH	Am Haupttor	06237 Leuna
Recyclingpartner e. G.	Presselstr. 29	70191 Stuttgart
Reform GmbH	Hauptstr. 27	06268 Landgrafroda
RETHMANN GmbH	Brunnenstrasse 138	44536 Lünen
Rohrkohle Oel und Gas GmbH	Gleiwitzer Platz 3	46213 Bottrop
Rohstoff-Handels-GmbH	Ferdinand-Clasen-Str. 34	41812 Erkelenz
Rohstoffverwertung Reutlingen GmbH	Sondelfingerstr. 8	72760 Reutlingen

---

RTB Umwelt GmbH	Berliner Str. 59	14467 Potsdam
RUHRPLAN Gesellschaft mbH	Am Kruppwald 24	46238 Bottrop
SBR Bildröhren Recycling Gesellschaft	Am Funkturm 2	66482 Zweibrücken
Schleswig Entsorgung GmbH	Kieler Strasse 45	24769 Rendsburg
Schmitt Recycling	Amselweg 3	61137 Schöneck
Schüller GmbH	Eichendorffstr. 2	89279 Straß-Nersingen
Schwab Entsorgung GmbH	Kantinenstr. 6	79106 Freiburg
Schwalbe GmbH	Nordlandweg 17	22145 Hamburg
SECUR GmbH	Werkstr. 5	07426 Königsee
Selecktronic R.J.A Heinsohn	Homburgsring 49	45529 Hattingen
SERO Entsorgung GmbH	Ostrower Damm 13	03046 Cottbus
SRO Spezial Recycling GmbH	Max-Eyth- Str. 47	46149 Oberhausen
Siemens Nixdorf AG	Frankfurter Weg 60	33106 Paderborn
TEL WEST Recycling GmbH	Gewerbestr.21	75015 Bretten
Thyssen Sonnenberg GmbH	Hans-Günter Sol Str. 1	40235 Düsseldorf
Trienekens GmbH	Gladbacher Strasse 106	41747 Viersen
USTEG Elektronik Recycling GmbH	Südbeckenstr. 9	76189 Karlsruhe
Van Balkom-Seeliger GmbH	Güterbahnhof 18	69115 Heidelberg
VICOR GmbH	Wilhelminenhofstr. 76/77	12459 Berlin
Vista elektronik Recycling	Oberlinder Str. 84	96515 Sonneberg
Von Roll MBB Recycling GmbH	Hagenauer Forst 27	86529 Schrobenhausen
Walter Trapp Rohstoffe GmbH	Franziusstr. 28	60314 Frankfurt
WDF-Demontagezentrum	Hoher Weg 19-21	46325 Borken
Weißer Rabe Soziale Betriebe GmbH	Industriestr. 30	81245 München
WEMEX Beteiligungsgesellschaft mbH	Schönhauser Allee 120	10437 Berlin
Werkstatt Frankfurt e. V. Recycling	Ober Str. 6	60386 Frankfurt
WM Recycling Umweltschutz	Frankfurter Str. 6	66606 St. Wedel
Woltermann Electronic GmbH	Am Gladeberg 10	37181 Hardegsen

---

## Liste der befragten Hersteller

Acer Computer	Kornkamp 4	22926 Ahrensburg
DAEWOO Electronics Deutschland	Otto-Hahn-Str. 21	35510 Butzbach
Fujitsu Computers	Siemensstr. 23	61348 Bad Homburg
Grundig AG	Kurgartenstr. 37	90762 Fürth
LG Electronics Deutschland GmbH	Jakob-Kaiser-Str.12	47877 Willich
Hewlett-Packard GmbH	Herrenberger Strasse 140	71034 Böblingen
JVC Deutschland GmbH	Grüner Weg 12	61169 Friedberg
LENCO Deutschland GmbH	Herrenpfad Süd	41334 Nettetal
Loewe Opta GmbH	Industriestrasse 11	96317 Kronach
miro Displays GmbH	Frankfurter Str. 233	63263 Neu-Isenburg
Mitsubishi Electric Europe B.V	Gothaer Strasse 8	40880 Ratingen
NEC Electronics (Europe) GmbH	Oberrather Str. 4	40472 Düsseldorf
Nokia GmbH	Meesmannstrasse 103	44807 Bochum
Panasonic Deutschland GmbH	Winsbergiring 15	22525 Hamburg
Philips Consumer Electronics	Building SK6, P.O. Box 80002	NL-5600 JB Eindhoven
PIONEER ELECTRONICS GmbH	Hanns-Martin-Schleyer-Strasse 35	47877 Willich
Saba GmbH	Otto-Hahn Str. 1A	69190 Walldorf
Sanyo-Fischer GmbH	Stahlgruberring 4	81829 München
Schneider GmbH & Co	Strandbaddamm 24	22880 Wedel
SHARP Elektronik GmbH	Sonninstrasse 3,	20097 Hamburg
Siemens AG	Wittelsbacherplatz 2	80312 München
Sony Deutschland GmbH	Hugo-Eckener-Str. 20	50829 Köln
Samsung Elektronik GmbH	Am Kronberger Hang 6	65824 Schwalbach
SEG	Robert Stolz Strasse 5	40470 Düsseldorf
TARGA ACTEBIS Computer GmbH	Lange Wende 43	59494 Soest
TELEFUNKEN GmbH	Sickingenstrasse 20-28	10553 Berlin
Toshiba Europe GmbH	Hammfelddamm 8	41460 Neuss
TENSAI AG	Steinengraben 40	CH-4002 Basel
THOMSON GmbH	Karl Wiechert Allee 74	30601 Hannover



# Anhang D: REFA-Zeitermittlungsverfahren

## Anhang D.1 REFA-Zeitaufnahmebögen (Mittelwert) für die manuelle Demontage

Z 1	REFA - Zeitaufnahmebogen <small>für Abläufe ohne Wiederholungen</small>				Ablage-Nr.	
				Blatt	von	Blättern

<b>Arbeitsaufgabe:</b> Fernsehgeräte Demontage						
<b>Auftrag Nr.</b>		<b>Menge m des Auftrages</b> 6		<b>Abteilung:</b>		<b>Kostenstelle</b>
<b>Datum der Zeitaufnahme:</b> 10.05.98		<b>Beginn</b> 9:37	<b>Uhrzeit:</b>	<b>Ende</b> 11:19	<b>Uhrzeit:</b>	<b>Dauer:</b> 102 min
		<b>Menge:</b> 1		<b>Menge:</b> 6		

	Zusammenstellung der Zeit je Einheit		Zeit in	Herkunft
	Grundzeit $t_g$		710,0 HM	(2.677,00 HM)
	Erholungszeit $t_{er}$ bei $z_{er} = 5\%$		35,5 HM	(133,85 HM)
	Verteilzeit $t_v$ bei $z_v = 15\%$		106,5 HM	(401,55 HM)
	sonstige Zuschläge			
	Zeit je Einheit $t_{e1}$		852,0 HM	(3.212,40 HM)
	$t_{e1} / t_{e100} / t_{e1000}$ in min/h			
Rüstzeit $t_r$ in min/h				

<b>Arbeitsverfahren und Methode</b>						
<b>Verfahren:</b> Einzelarbeitsplatz (Versuchfeld = Modul aus jedem beliebigen Arbeitsverfahren)						
<b>Methode:</b> manuell						

Arbeitsgegenstand (Eingabe)	Benennung	Werkstoff	Zustand bei Eingabe	Zeichen -Nr.	Werkstoff Nr.	Maße, Formen, Gewichte
	Philips "Siera" 26588 k/21Z		Algerät			B= 750 mm
	Baujahr 1977					H= 510 mm
	Demontageschritte: 11 (21)					T= 460 mm
	Demontagezeit: 8:31 min. (32:08 min.)					g= 38,56 kg

Mensch	Name	Personalnummer	m	w	Alter	Dauer der Ausübung ähnlicher Aufgaben / der Untersuchten Aufgabe
	Dipl.-Ing. M. Nave		x			1 Monat / 2 Wochen

Berufsmittel	Benennung, Type	Anzahl	Betriebsmittel-Nr.	Baujahr	technische Daten, Zustand
	Kombizange, Seitenschneider, Hammer				W e r k z e u g
	Kreuz- u. Längsschlitz-Schraubendreher				W e r k z e u g
	Schraubenschlüssel, Hebewerkzeug				W e r k z e u g
	Knarre m. Verlängerung u. Nuß 8, 10				W e r k z e u g

<b>Umgebungseinflüsse</b>		<b>Entlohnung</b>

<b>Bemerkungen</b> <small>Messmittel elektr. Stoppuhr, elektr. Haushalts- und Personenwaage, Bandmaß (2m), Schiebellehre</small>	
<small>Arbeitsschutzmittel Lederschürze, Gesichtsschutz aus Plexiglas, Arbeitshandschuhe mit Pulsschutz</small>	

<b>Qualität des Arbeitsergebnisses</b>				
Bearbeiter Dipl.-Ing. A. Hucht	geprüft	Datum	gültig ab	bis

Abb. D.1 Vorderseite des Zeitaufnahmebogens Z1 (Mittelwert) für die manuelle Demontage des Fernsehgerätes Philips „Siera“ 26C768

Nr.	Ablaufabschnitt und Meßpunkt	Per- sonen- zahl	Be- zugs- menge	Einflußgröße Mefwert, Klasse	Zy	Übertrag:			$\sum \frac{L_i/n}{\bar{L}}$	$\frac{\bar{L}}{\bar{L}_i}$	$t = \frac{\bar{L}}{100 \bar{L}_i}$	Zeitart
						1	2	3				
1	Anschlußkabel durchtrennen	1	1	50g	L						8	HM
	Kabel in SB legen			t	8							
				F	8							
2	Rückwand abnehmen	1	1	1.200 g	L						17	HM
				t	17							
	Rückwand in SB legen			F	25							
3	Bildröhre belüften	1	1		L						33	HM
				t	33							
	Hammer u. schraubendreher ablegen			F	58							
4	rechte Rückwandplatine entnehmen	1	1	2.050 g	L						125	HM
				t	125							
	Platine ablegen			F	183							
5	linke Rückplatine ablegen	1	1	2.600 g	L						58	HM
				t	58							
	Platine ablegen			F	241							
6	Hochspannungseinheit entnehmen	1	1	1.310 g	L						55	HM
				t	55							
	HSB in SB legen			F	296							
7	2 Seitenplatten (links) entnehmen	1	2	425 g	L		67				33,5	HM
				t	67		2					
	Platine ablegen			F	363							
8	Bedienteinheit entnehmen	1	1	1.350 g	L						142	HM
				t	142							
	Bedienteinheit ablegen			F	505							
9	Anschlußplatine und Ablenkeinheit entnehmen	1	1	75 g (Anschl.-pl-)	L						38	HM
				t	38							
	beide Bauteile in SB legen			F	543							
10	Bildröhre entnehmen	1	1	20.500 g	L						150	HM
				t	150							
	Bildröhre in SB legen			F	693							
11	Kabelreste aus Gehäuse entfernen	1	1	50 g (Kabel)	L						17	HM
				t	17							
	Kabelreste u. Gehäuse in SB legen			F	710							
12	Kabel der linken Rückplatine entfernen	1	1	100 g	L						163	HM
				t	163							
	Kabel in SB legen			F	873							
13	Messingrahmen der linken Rückwandplatine entfernen	1	1	670 g	L						300	HM
				t	300							
	Messingrahmen in SB legen			F	1173							
14	Fe-Abdeckung demonstrieren	1	1	350 g	L						100	HM
				t	100							
	FE-Abdeckung in SB legen			F	1273							
15	Alu-Blech abnehmen	1	1	150 g	L						17	HM
				t	17							
	Alu-Blech in SB legen			F	1290							
16	Kabel der rechten Rückwandplatine entfernen	1	1	70 g	L						183	HM
				t	183							
	Kabel in SB legen			F	1473							
17	Messingrahmen der rechten Rückwandplatine entfernen	1	1	675 g	L						220	HM
				t	220							
	Messingrahmen in SB legen			F	1693							
Σ:												

Abb. D.2: Rückseite des Zeitaufnahmebogens Z1 (Mittelwert) für die manuelle Demontage des Fernsehgerätes Philips „Siera“ 26C768

Z 1E		Ergänzungsbogen zum REFA - Zeitaufnahmebogen Z1							Ablage-Nr.				
		Blatt							von	Blättern			
										<b>Übertrag:</b>			
Nr.	Ablaufabschnitt und Meßpunkt	Personen-zahl	Bezugs-menge	Einflußgröße Meßwert, Klasse	Zy	1	2	3	$\sum L/n$	$\bar{L}$	$t = \frac{\bar{L}}{100 \cdot \bar{t}_i}$	Zeitart	
									$\sum \bar{t}_i/n$	$\bar{\bar{t}}_i$			
18	Kabel der Seitenplatte entfernen	1	2	130 g	L				150		75	HM	
	Kabel in SB legen			t	150				2				
				F	1843								
19	Kabel der Bedieneinheit abtrennen	1	1	150 g	L						300	HM	
				t	300								
	Kabel in SB legen			F	2143								
20	Lautsprecher aus der Bedieneinheit ausbauen	1	1	200 g	L						112	HM	
				t	112								
				F	2255								
21	Platinen von Kunststoffrahmen trennen	1	2	300 g (Platinen)	L				422		211	HM	
				t	422				2				
	Rahmen und Platinen in SB legen			F	2677								
					L								
					t								
					F								
					L								
					t								
					F								
					L								
					t								
					F								
					L								
					t								
					F								
					L								
					t								
					F								
					L								
					t								
					F								
					L								
					t								
					F								
					L								
					t								
					F								
									$\sum$				

Abb. D.3: Ergänzungsbogen zum REFA-Zeitaufnahmebogens Z1 (Mittelwert) für die manuelle Demontage des Fernsehgerätes Philips „Siera“ 26C768

	Philips „Siera“ 26C768	B & O Beovision 4000 3901 TV	RFT SIESTA TV 63 - 102	Sharp DV - 6301 S
Manuelle Demontage	852,0 HM	846,0 HM	434,4 HM	516,0 HM
	8,52 min	8,46 min	4,34 min	5,16 min

Tab. D.1: Zeitaufnahmeergebnisse nach REFA (Mittelwert) für die manuelle Demontage

### Anhang D.2 Zeitermittlung nach REFA für die automatisierte Demontage

<b>Z 1</b>	<b>REFA - Zeitaufnahmebogen</b> für Abläufe ohne Wiederholungen	Ablage-Nr.  Blatt von Blättern				
<b>Arbeitsaufgabe:</b> automatische Fernsehgeräte- Demontage						
<b>Auftrag Nr.</b>	<b>Menge m des Auftrages</b> 6	<b>Abteilung:</b>				
<b>Datum der Zeitaufnahme:</b> 28.09.99	<b>Beginn Uhrzeit:</b> 9:15 <b>Menge:</b> 1	<b>Ende Uhrzeit:</b> 15:30 <b>Menge:</b> 6				
		<b>Kostenstelle</b>				
		<b>Dauer:</b> 375 min				
	<b>Zusammenstellung der Zeit je Einheit</b>	<b>Zeit in</b>	<b>Herkunft</b>			
	<b>Grundzeit <math>t_g</math></b>	968,0 HM				
	<b>Erholungszeit <math>t_r</math> bei <math>z_{er} =</math></b>	0%	0,0 HM			
	<b>Verteilzeit <math>t_v</math> bei <math>z_v =</math></b>	0%	0,0 HM			
	<b>sonstige Zuschläge</b>					
	<b>Zeit je Einheit <math>t_{e1}</math></b>	968,0 HM				
	$t_{e1} / t_{e100} / t_{e-1000}$ in min/h					
	<b>Rüstzeit <math>t_r</math> in min/h</b>					
	<b>Arbeitsverfahren und Methode</b>					
	<b>Verfahren:</b> Demontagezelle ("Einzelarbeitsplatz")					
<b>Methode:</b> automatisch						
Arbeitsgegenstand (Eingabe)	<b>Benennung</b>	<b>Werkstoff</b>	<b>Zustand bei Eingabe</b>	<b>Zeichen -Nr.</b>	<b>Werkstoff Nr.</b>	<b>Maße, Formen, Gewichte</b>
	Philips "Siera" 26588 k/21Z		Altgerät			B= 750 mm
	Baujahr 1977					H= 510 mm
	Demontageschritte: 9					T= 460 mm
	Demontagezeit: 9:41 min					g= 38,56 kg
Mensch	<b>Name</b>	<b>Personalnummer</b>	<b>m</b>	<b>w</b>	<b>Alter</b>	<b>Dauer der Ausübung ähnlicher Aufgaben   der Untersuchten Aufgabe</b>
Betriebsmittel	<b>Benennung, Type</b>	<b>Anzahl</b>	<b>Betriebsmittel-Nr.</b>	<b>Baujahr</b>	<b>technische Daten, Zustand</b>	
	Demontagezelle					
<b>Umgebungseinflüsse</b> keine Besonderheiten					<b>Entlohnung</b>	
<b>Bemerkungen</b>						
<b>Qualität des Arbeitsergebnisses</b>						
<b>Bearbeiter</b> Dipl.-Ing. M.Nave	<b>geprüft</b>	<b>Datum</b>	<b>gültig ab</b>	<b>bis</b>		

Nachdruck nur mit Genehmigung des REFA - Verband  
Beuth Verlag GmbH Berlin und Köln, Bestell-Nr. 37501

Abb. D.4: Vorderseite des Zeitaufnahmebogens Z1 für die automatisierte Demontage des Fernsehgerätes Philips „Siera“ 26C768

Nr.	Ablaufabschnitt und Meßpunkt	Personen- zahl	Be- zugs- menge	Einflußgröße Meßwert, Klasse	Zy	1	2	3	Übertrag:		t = $\frac{\bar{I} -}{100 \bar{I}_t}$	Zeitart
									$\frac{\sum L/n}{\sum t/n}$	$\frac{\bar{I}}{\bar{I}_t}$		
1	Rückwand abnehmen		1		L						110	HM
	Meißel ablegen, Schlitzschrauber aufn.				t	110						
					F	110						
2	Befestigung von Hauptplatine und Netzteil lösen		1		L						142	HM
					t	142						
	Klippbefestigungen abmeißeln				F	252						
3	Aufklappen von Netzteil und Hauptplatine		1		L						23	HM
					t	23						
	Anheben und Herumklappen der Hauptplatine				F	275						
4	Lösen verschiedener Kabelverbindungen		1		L						187	HM
					t	187						
	Schneiden einer 3. Kabelverbindung am Trafo				F	462						
5	Entnahme von Anschlußplatine , Netzteil, Hauptplatine und Trafo		1		L						115	HM
					t	115						
	Entnehmen u. Ablegen des Trafos				F	577						
6	Bildröhre belüften		1		L						38	HM
					t	38						
	Aufnahme des kleinen Parallelgreifers				F	615						
7	Entnahme der Ablenkeinheit		1		L						63	HM
					t	63						
	Meißel ablegen, Sechskantschrauber aufn.				F	678						
8	Bildröhre entnehmen		1		L						227	HM
					t	227						
	Aufnehmen u. ablegen der Bildröhre				F	905						
9	Bedienteil und Holzrehmen entnehmen		1		L						63	HM
					t	63						
	Restgehäuse wegziehen				F	968						
					L							
					t							
					F							
					L							
					t							
					F							
					L							
					t							
					F							
					L							
					t							
					F							
					L							
					t							
					F							
					L							
					t							
					F							
Σ:											968	

Abb. D.5: Rückseite des Zeitaufnahmebogens Z1 für die automatisierte Demontage des Fernsehgerätes Philips „Siera“ 26C768

	Philips „Siera“ 26C768	B & O Beovision 4000 3901 TV	RFT SIESTA TV 63 - 102	Sharp DV - 6301 S
Automatisierte Demontage	968,0 HM	1.093,0 HM	1.003,0 HM	1.195,0 HM
	9,68 min	10,93 min	10,03 min	11,95 min

Tab. D.2: Ergebnisse der Zeitermittlung nach REFA für die automatisierte Demontage

## Anhang E: Gewichtungsfaktor und Erfüllungsgrad für Variantenbewertung

Im Rahmen der Ermittlung der optimalen Demontagestrategie wurden die einzelnen Demontagestrategien anhand ausgewählter Schraubenverbindungen miteinander verglichen, um eine Vorzugsvariante auszuwählen [242].

Die Variantenauswahl erfolgte anhand einer Nutzwert-Analyse nach Zangenmeister [242]. In Tabelle E.1 sind die einzelnen Bewertungskriterien  $j$  und ihre Gewichtungsfaktoren  $\alpha_j$  einander gegenübergestellt. Diese Gewichtungsfaktoren  $\alpha_j$  ergeben sich aus folgendem Vergleich:

Bewertungskriterium $j$	Prozesszeit	Nebenzeiten	Flexibilität bzgl. Typ	Flexibilität bzgl. Größe	Flexibilität bzgl. Zustand	Positionieranforderung	Werkzeugstandzeiten	Verfahrenssicherheit	Zugänglichkeit	Prozesskräfte	Werkstoffabhängigkeit	Sortenreinheit	Summe	$\alpha_j := \text{Anteil} [\%]$
Prozesszeit	2	1	2	2	1	2	1	1	2	2	2	2	18	13,6%
Nebenzeiten	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	1	1	5	3,8%
Flexibilität bzgl. Typ	1	1	2	0	1	2	0	1	1	1	2	2	13	9,8%
Flexibilität bzgl. Größe	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	4	3,0%
Flexibilität bzgl. Zustand	0	2	2	2	1	2	0	1	1	1	1	1	13	9,8%
Positionieranforderung	1	2	1	2	1	2	0	1	1	1	2	2	15	11,4%
Werkzeugstandzeiten	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	1	1	5	3,8%
Verfahrenssicherheit	1	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	20	15,2%
Zugänglichkeit	1	2	1	2	1	1	1	1	1	2	2	2	15	11,4%
Prozesskräfte	0	2	1	2	1	1	2	0	1	2	2	2	14	10,6%
Werkstoffabhängigkeit	0	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	4	3,0%
Sortenreinheit	0	1	0	1	1	0	1	0	0	0	2	2	6	4,5%

Tab. E.1: Ermittlung des Gewichtungsfaktors  $\alpha_j$

Die Bewertung der einzelnen Gewichtungsfaktoren untereinander erfolgt nach dem folgenden Schema:

- 1 Punkt: das X-Kriterium und das Y-Kriterium sind gleichgewichtet,
- 0 Punkte: das Y-Kriterium ist wichtiger als das X-Kriterium,
- 2 Punkte: das X-Kriterium ist wichtiger als das Y-Kriterium.

Die Bewertung der einzelnen Kriterien entspricht dabei der allgemeinen Einschätzung seitens der Industrie, welche im Rahmen der Fragebogenumfrage ermittelt wurden.

Die Bewertung der einzelnen Demontagestrategien je Bewertungskriterium erfolgt in Tabelle E.2. Der Erfüllungsgrad  $E_{ij}$  beschreibt, wie gut die einzelne Demontagestrategievariante  $i$  das Bewertungskriterium  $j$  erfüllt. Der Wert „eins“ bedeutet, dass das entsprechende Kriterium durch die Demontagestrategievariante sehr schlecht erfüllt wird. Bei einer sehr guten Erfüllung werden fünf Punkte vergeben.

Bewertungskriterium j	Demontagestrategievariante i																																			
	Schraubwerkzeug							Kernbohrer							Schr.-kopf abfräsen						Schraube ausfräsen						Trennschleifer									
	Person 1	Person 2	Person 3	Person 4	Person 5	Person 6	Erfüllungsgrad E <sub>j</sub>	Person 1	Person 2	Person 3	Person 4	Person 5	Person 6	Erfüllungsgrad E <sub>j</sub>	Person 1	Person 2	Person 3	Person 4	Person 5	Person 6	Erfüllungsgrad E <sub>j</sub>	Person 1	Person 2	Person 3	Person 4	Person 5	Person 6	Erfüllungsgrad E <sub>j</sub>	Person 1	Person 2	Person 3	Person 4	Person 5	Person 6	Erfüllungsgrad E <sub>j</sub>	
Prozesszeit	5	5	5	5	4	5	4,8	3	3	4	3	2	4	3,0	3	3	2	4	5	4	5	4,7	1	1	1	2	1	1	1,2	3	3	3	4	2	3	3,0
Nebenzeiten	1	2	1	1	1	1	1,2	5	4	5	5	5	4	4,7	5	4	5	5	5	4	5	4,7	5	4	5	5	4	5	4,8	5	5	5	5	4	5	4,8
Flexibilität bzgl. Typ	3	2	3	2	5	3	3,0	5	5	5	5	5	5	5,0	5	5	5	5	5	5	5,0	5	5	5	4	5	5	4,8	5	5	5	5	5	5	5,0	
Flexibilität bzgl. Größe	4	3	5	4	5	4	4,2	3	4	2	3	4	2	3,0	3	3	2	4	3	3	3,0	5	5	5	5	5	5	5,0	5	5	5	4	5	5	4,8	
Flexibilität bzgl. Zustand	1	1	2	1	1	1	1,2	5	5	5	4	5	5	4,8	5	5	4	5	5	5	4,8	5	5	5	5	5	5	5,0	5	5	5	5	5	5	5,0	
Positionieranforderung	2	2	3	1	2	2	2,0	2	2	3	2	1	2	2,0	2	2	3	1	2	2	2,0	4	3	4	5	3	4	3,8	4	3	4	4	3	4	3,7	
Werkzeugstandzeiten	5	5	5	5	5	5	5,0	1	1	1	2	1	1	1,2	1	1	1	2	1	1	1,2	2	3	2	1	2	1	1,8	1	1	1	2	1	1	1,2	
Verfahrenssicherheit	4	4	3	4	5	4	4,0	3	3	2	4	3	4	3,2	3	2	2	4	3	3	3,0	4	3	4	3	3	4	3,5	4	4	3	4	3	4	4,0	
Zugänglichkeit	5	5	4	5	5	5	4,8	5	5	4	5	5	5	4,8	3	2	3	4	3	2	2,8	1	1	1	1	2	1	1,2	1	1	1	1	1	1	1,2	
Prozesskräfte	5	5	5	4	5	5	4,8	2	3	1	2	1	3	2,0	3	3	2	4	3	3	3,0	4	4	3	5	3	4	3,8	3	4	2	3	3	2	2,8	
Werkstoffabhängigkeit	5	5	5	5	5	5	5,0	3	3	4	2	3	3	3,0	4	3	4	3	4	4	3,7	1	1	1	1	1	2	1,2	4	4	5	4	3	4	4,0	
Sortenreinheit	5	5	5	5	5	5	5,0	3	3	2	3	2	3	2,7	3	3	2	3	2	3	2,7	2	1	3	2	2	1	1,8	2	1	2	1	2	2	1,7	

Tab. E.2: Ermittlung des Erfüllungsgrades  $E_{ij}$

Um den subjektiven Eindruck bei der Einschätzung der Einflussfaktoren zu reduzieren, wurden zum einen der Gewichtungsfaktor  $\alpha_j$  mit Hilfe der Repräsentativerhebung durch Auswertung der Umfrage bei Herstellern und Zerlegebetrieben ermittelt. Zum anderen wurde der Erfüllungsgrad  $E_{ij}$  durch 6 Personen – 2 Personen des Fraunhofer Institutes für Materialfluss und Logistik, 2 Personen des Zerlegebetriebes BRAHL GmbH und 2 Personen des Zerlegebetriebes MIREC B.V. – unabhängig von einander ermittelt. Hierzu wurden vor der Bewertung die einzelnen Bewertungskriterien definiert sowie deren Einflussfaktoren beschrieben, so dass alle 6 Personen eine gleiche Ausgangsbasis besaßen.

Die Gesamtbewertung der einzelnen Demontagestrategievarianten  $i$  erfolgt anschließend durch die Multiplikation des Gewichtungsfaktors  $\alpha_j$  mit dem Erfüllungsgrad  $E_{ij}$ , so dass man die jeweilige Punktzahl  $P_{ij}$  erhält. Die Summe aller  $P_{ij}$  stellt den Bewertungsfaktor für die Demontagestrategievariante  $i$  dar. Die Ergebnisse der Variantenbewertung sind der Tabelle 4.8 in Abschnitt 4.3 zu entnehmen.

## Anhang F: Kostenbetrachtungen

Szenario - Nr.	Schichten(aut) x	Schichten(man) y	Verfügbarkeit	Lohnkosten pro Person p.a.
Szenario 1	1	1	80%	38.500 EUR p.a.
Szenario 2	1	1	90%	38.500 EUR p.a.
Szenario 3	2	1	80%	38.500 EUR p.a.
Szenario 4	2	1	90%	38.500 EUR p.a.
Szenario 5	3	1	80%	38.500 EUR p.a.
Szenario 6	3	1	90%	38.500 EUR p.a.

Tab. F.1: Darstellung der betrachteten Szenarien

Szenario	Jahresdurchsatz		Arbeitskräfte (AK)	
	Stückzahlen p.a. je automat. Demontagezelle	Stückzahlen p.a. je manuelle Arbeitskraft	Arbeitskräfte für automat. Demontage	Arbeitskräfte für manuelle Demontage
Szenario 1, 1 Schicht, 80% Verfügbarkeit	10.849 Stück	12.220 Stück	0,5 AK	1,5 AK
Szenario 2, 1 Schicht, 90% Verfügbarkeit	12.205 Stück	12.220 Stück	0,5 AK	1,5 AK
Szenario 3, 2 Schichten, 80% Verfügbarkeit	21.698 Stück	12.220 Stück	1,0 AK	3,0 AK
Szenario 4, 2 Schichten, 90% Verfügbarkeit	24.411 Stück	12.220 Stück	1,0 AK	3,0 AK
Szenario 5, 3 Schichten, 80% Verfügbarkeit	32.548 Stück	12.220 Stück	1,5 AK	4,0 AK
Szenario 6, 3 Schichten, 90% Verfügbarkeit	36.616 Stück	12.220 Stück	1,5 AK	4,0 AK

Tab. F.2: Ermittlung des Personalbedarfes je Szenario

Szenario	Personalkosten p.a.	
	automatisierte Demontage	manuelle Demontage
Szenario 1, 1 Schicht, 80% Verfügbarkeit	19.250 EUR p.a.	57.750 EUR p.a.
Szenario 2, 1 Schicht, 90% Verfügbarkeit	19.250 EUR p.a.	57.750 EUR p.a.
Szenario 3, 2 Schichten, 80% Verfügbarkeit	38.500 EUR p.a.	115.500 EUR p.a.
Szenario 4, 2 Schichten, 90% Verfügbarkeit	38.500 EUR p.a.	115.500 EUR p.a.
Szenario 5, 3 Schichten, 80% Verfügbarkeit	57.750 EUR p.a.	154.000 EUR p.a.
Szenario 6, 3 Schichten, 90% Verfügbarkeit	57.750 EUR p.a.	154.000 EUR p.a.

Tab. F.3: Ermittlung der Personalkosten pro Jahr je Szenario



Arbeitsmittel	Einzelpreis [EUR]	manueller Demontagearbeitsplatz		automatische Demontagezelle	
		Bedarf	Gesamtpreis [EUR]	Bedarf	Gesamtpreis [EUR]
Werkbänke	275 EUR	1 Stck	275 EUR		
Werkzeuge u. Werkzeugwagen	275 EUR	1 Stck	275 EUR		
Sammel- u. Transportbehälter	275 EUR	1 Stck	275 EUR	1 Stck	275 EUR
Gabelstapler pro AP	20.500 EUR	0,25 Stck	5.125 EUR	1 Stck	20.500 EUR
Demontageroboter	67.000 EUR			1 Stck	67.000 EUR
Handhabungsroboter	80.000 EUR			1 Stck	80.000 EUR
Demontagewerkzeuge	12.500 EUR			1 Stck	12.500 EUR
Greifer und Sauger	15.000 EUR			1 Stck	15.000 EUR
Werkzeugwechselsystem	12.500 EUR			1 Stck	12.500 EUR
Fördertechnik	20.000 EUR			1 Stck	20.000 EUR
Bildverarbeitungssystem	35.000 EUR			1 Stck	35.000 EUR
Identifikationssystem	20.000 EUR			1 Stck	20.000 EUR
Leitstandrechner	5.000 EUR			1 Stck	5.000 EUR
Sicherheitstechnik	2.500 EUR			1 Stck	2.500 EUR
Software - Lizenzen	20.000 EUR			1 Stck	20.000 EUR
<b>SUMME [EUR]</b>			<b>5.950 EUR</b>		<b>380.275 EUR</b>
<b>SUMME AfA 5 Jahre [EUR]</b>			<b>1.190 EUR</b>		<b>76.055 EUR</b>

Tab. F.4: Investitionskosten je Demontagesystem

Szenario	Bedarf an AP in der manuellen Demontage	Staplerbedarf in der manuellen Demontage	Gesamtkosten [EUR]	Afa jährlich (5 Jahre lineare Abschreibung)
Szenario 1, 1 Schicht, 80% Verfügbarkeit	1 AP	1 Stapler	21.325 EUR	4.265 EUR
Szenario 2, 1 Schicht, 90% Verfügbarkeit	1 AP	1 Stapler	21.325 EUR	4.265 EUR
Szenario 3, 2 Schichten, 80% Verfügbarkeit	2 AP	1 Stapler	22.150 EUR	4.430 EUR
Szenario 4, 2 Schichten, 90% Verfügbarkeit	2 AP	1 Stapler	22.150 EUR	4.430 EUR
Szenario 5, 3 Schichten, 80% Verfügbarkeit	3 AP	1 Stapler	22.975 EUR	4.595 EUR
Szenario 6, 3 Schichten, 90% Verfügbarkeit	3 AP	1 Stapler	22.975 EUR	4.595 EUR

Tab. F.5: Gesamtinvestitionen und jährliche Abschreibung je Szenario für die manuelle Demontage

Jahr j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Szenario</b>										
Szenario 1, 1 Schicht, 80% Verfügbarkeit	1.066 € p.a.	853 € p.a.	640 € p.a.	427 € p.a.	213 € p.a.	1.000 € p.a.	800 € p.a.	600 € p.a.	400 € p.a.	200 € p.a.
Szenario 2, 1 Schicht, 90% Verfügbarkeit	1.066 € p.a.	853 € p.a.	640 € p.a.	427 € p.a.	213 € p.a.	1.000 € p.a.	800 € p.a.	600 € p.a.	400 € p.a.	200 € p.a.
Szenario 3, 2 Schichten, 80% Verfügbarkeit	1.108 € p.a.	886 € p.a.	665 € p.a.	443 € p.a.	222 € p.a.	1.000 € p.a.	800 € p.a.	600 € p.a.	400 € p.a.	200 € p.a.
Szenario 4, 2 Schichten, 90% Verfügbarkeit	1.108 € p.a.	886 € p.a.	665 € p.a.	443 € p.a.	222 € p.a.	1.000 € p.a.	800 € p.a.	600 € p.a.	400 € p.a.	200 € p.a.
Szenario 5, 3 Schichten, 80% Verfügbarkeit	1.149 € p.a.	919 € p.a.	689 € p.a.	460 € p.a.	230 € p.a.	1.000 € p.a.	800 € p.a.	600 € p.a.	400 € p.a.	200 € p.a.
Szenario 6, 3 Schichten, 90% Verfügbarkeit	1.149 € p.a.	919 € p.a.	689 € p.a.	460 € p.a.	230 € p.a.	1.000 € p.a.	800 € p.a.	600 € p.a.	400 € p.a.	200 € p.a.

Tab. F.6: Kapitalkosten R<sub>j</sub> der manuelle Demontage je Szenario

Jahr j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Kapitalkosten R <sub>j</sub>	19.014 € p.a.	15.211 € p.a.	11.408 € p.a.	7.606 € p.a.	3.803 € p.a.	5.000 € p.a.	4.000 € p.a.	3.000 € p.a.	2.000 € p.a.	1.000 € p.a.

Tab. F.7: Kapitalkosten R<sub>j</sub> der automatisierten Demontage (szenariounabhängig)

Flächenbedarf für eine automatisierte Demontagezelle	25 m <sup>2</sup>
Flächenbedarf für einen manuellen Arbeitsplatz	36 m <sup>2</sup>
Mietkosten pro Quadratmeter pro Monat	9,0 EUR/m <sup>2</sup>

Tab. F.8: Flächenbedarf je Einheit und Mietkosten

Szenario - Nr.	Mietkosten pro Jahr	
	automatisierte Demontage	manuelle Demontage
Szenario 1, 1 Schicht, 80% Verfügbarkeit	2.700 EUR p.a.	3.888 EUR p.a.
Szenario 2, 1 Schicht, 90% Verfügbarkeit	2.700 EUR p.a.	3.888 EUR p.a.
Szenario 3, 2 Schichten, 80% Verfügbarkeit	2.700 EUR p.a.	7.776 EUR p.a.
Szenario 4, 2 Schichten, 90% Verfügbarkeit	2.700 EUR p.a.	7.776 EUR p.a.
Szenario 5, 3 Schichten, 80% Verfügbarkeit	2.700 EUR p.a.	11.664 EUR p.a.
Szenario 6, 3 Schichten, 90% Verfügbarkeit	2.700 EUR p.a.	11.664 EUR p.a.

Tab. F.9: Mietkosten pro Jahr je Szenario

Szenario - Nr.	Instandhaltungskosten pro Jahr	
	automatisierte Demontage	manuelle Demontage
Szenario 1, 1 Schicht, 80% Verfügbarkeit	3.803 EUR p.a.	213 EUR p.a.
Szenario 2, 1 Schicht, 90% Verfügbarkeit	3.803 EUR p.a.	213 EUR p.a.
Szenario 3, 2 Schichten, 80% Verfügbarkeit	3.803 EUR p.a.	222 EUR p.a.
Szenario 4, 2 Schichten, 90% Verfügbarkeit	3.803 EUR p.a.	222 EUR p.a.
Szenario 5, 3 Schichten, 80% Verfügbarkeit	3.803 EUR p.a.	230 EUR p.a.
Szenario 6, 3 Schichten, 90% Verfügbarkeit	3.803 EUR p.a.	230 EUR p.a.

Tab. F.10: Instandhaltungskosten pro Jahr je Szenario

Jahr j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Szenario</b>										
Szenario 1 manuell: 1,5 Arbeitskräfte	67.183 EUR p.a.	135.884 EUR p.a.	206.157 EUR p.a.	278.055 EUR p.a.	351.633 EUR p.a.	427.682 EUR p.a.	505.540 EUR p.a.	585.266 EUR p.a.	666.923 EUR p.a.	750.575 EUR p.a.
Szenario 2 manuell: 1,5 Arbeitskräfte	67.183 EUR p.a.	135.884 EUR p.a.	206.157 EUR p.a.	278.055 EUR p.a.	351.633 EUR p.a.	427.682 EUR p.a.	505.540 EUR p.a.	585.266 EUR p.a.	666.923 EUR p.a.	750.575 EUR p.a.
Szenario 3 manuell: 3 Arbeitskräfte	129.035 EUR p.a.	261.314 EUR p.a.	396.939 EUR p.a.	536.020 EUR p.a.	678.665 EUR p.a.	825.559 EUR p.a.	976.269 EUR p.a.	1.130.91 7 EUR p.a.	1.289.62 7 EUR p.a.	1.452.52 6 EUR p.a.
Szenario 4 manuell: 3 Arbeitskräfte	129.035 EUR p.a.	261.314 EUR p.a.	396.939 EUR p.a.	536.020 EUR p.a.	678.665 EUR p.a.	825.559 EUR p.a.	976.269 EUR p.a.	1.130.91 7 EUR p.a.	1.289.62 7 EUR p.a.	1.452.52 6 EUR p.a.
Szenario 5 manuell: 4 Arbeitskräfte	171.638 EUR p.a.	347.665 EUR p.a.	528.222 EUR p.a.	713.450 EUR p.a.	903.497 EUR p.a.	1.098.91 9 EUR p.a.	1.299.49 7 EUR p.a.	1.505.39 1 EUR p.a.	1.716.76 7 EUR p.a.	1.933.79 6 EUR p.a.
Szenario 6 manuell: 4 Arbeitskräfte	171.638 EUR p.a.	347.665 EUR p.a.	528.222 EUR p.a.	713.450 EUR p.a.	903.497 EUR p.a.	1.098.91 9 EUR p.a.	1.299.49 7 EUR p.a.	1.505.39 1 EUR p.a.	1.716.76 7 EUR p.a.	1.933.79 6 EUR p.a.

Tab. F.11: Kumulierte Gesamtkosten der manuellen Demontage je Szenario

Jahr j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Szenario</b>										
Szenario 1 automati- siert: 1 Schicht, 80% Verfügbarkeit	120.822 EUR p.a.	238.418 EUR p.a.	352.806 EUR p.a.	464.004 EUR p.a.	572.031 EUR p.a.	625.850 EUR p.a.	679.338 EUR p.a.	732.516 EUR p.a.	785.404 EUR p.a.	838.023 EUR p.a.
Szenario 2 automati- siert: 1 Schicht, 90% Verfügbarkeit	120.822 EUR p.a.	238.418 EUR p.a.	352.806 EUR p.a.	464.004 EUR p.a.	572.031 EUR p.a.	625.850 EUR p.a.	679.338 EUR p.a.	732.516 EUR p.a.	785.404 EUR p.a.	838.023 EUR p.a.
Szenario 3 automati- siert: 2 Schichten, 80% Verfügbarkeit	140.072 EUR p.a.	277.495 EUR p.a.	412.306 EUR p.a.	544.539 EUR p.a.	674.232 EUR p.a.	750.367 EUR p.a.	826.840 EUR p.a.	903.693 EUR p.a.	980.967 EUR p.a.	1.058.70 3 EUR p.a.
Szenario 4 automati- siert: 2 Schichten, 90% Verfügbarkeit	140.072 EUR p.a.	277.495 EUR p.a.	412.306 EUR p.a.	544.539 EUR p.a.	674.232 EUR p.a.	750.367 EUR p.a.	826.840 EUR p.a.	903.693 EUR p.a.	980.967 EUR p.a.	1.058.70 3 EUR p.a.
Szenario 5 automati- siert: 3 Schichten, 80% Verfügbarkeit	159.322 EUR p.a.	316.573 EUR p.a.	471.806 EUR p.a.	625.074 EUR p.a.	776.433 EUR p.a.	874.883 EUR p.a.	974.343 EUR p.a.	1.074.87 1 EUR p.a.	1.176.52 9 EUR p.a.	1.279.38 3 EUR p.a.
Szenario 6 automati- siert: 3 Schichten, 90% Verfügbarkeit	159.322 EUR p.a.	316.573 EUR p.a.	471.806 EUR p.a.	625.074 EUR p.a.	776.433 EUR p.a.	874.883 EUR p.a.	974.343 EUR p.a.	1.074.87 1 EUR p.a.	1.176.52 9 EUR p.a.	1.279.38 3 EUR p.a.

Tab. F.12: Kumulierte Gesamtkosten der automatisierten Demontage je Szenario