ABAG itm

Umstellung eines Fertigungsbereichs auf Trockenbearbeitung

Projektbericht

Im Auftrag der
ABAG-itm GmbH
Gesellschaft für innovative Technologie- und Managementberatung
Stauferstr. 15
70736 Fellbach

Projektträger
Carl Leipold Metallwarenfabrik GmbH
Schiltacher Straße 5
77709 Wolfach

Projektbegleitung
Fraunhofer Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung (FhG-ISI)
Breslauer Straße 48
76139 Karlsruhe

Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebstechnik (wbk)
Universität Karlsruhe
Kaiserstraße 12
76128 Karlsruhe

November 2001

Erarbeitung
Dominik Toussaint, Thomas Michler, Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung (ISI), Karlsruhe
Andreas Hühsam, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebstechnik (wbk), Karlsruhe

Für die kooperative Mitwirkung an diesem Projekt bedanken wir uns itm ganz besonders bei, Herrn Hartmut Hildebrand, Herrn Robert Kern, Herrn Erhard Rothfuß, Herrn Reinhold Spiekert,
Carl Leipold Metallwarenfabrik GmbH, Wolfach.

Die Durchführung dieses Modellprojekts sowie die wissenschaftliche Begleitung wurde mit Mitteln der Sonderabfallabgabe des Landes Baden-Württemberg unterstützt.

Herausgeber
ABAG-itm GmbH
Stauferstraße 15
70736 Fellbach
Tel.: 0711/951911-0
Fax: 0711/951911-20
E-mail: info@abag-itm.de
Internet: www.abag-itm.de

Projektleitung
Dipl.-Ing. Hermann Kißler

November 2001

Gedruckt auf: weiß matt gestrichen Offset chlorfrei gebleicht (Umschlag)

Alle Rechte der Verbreitung, auch durch Film, Funk und Fernsehen, fotomechanische Wiedergabe, auszugsweisen Nachdruck, oder Einspeicherung und Rückgewinnung in Datenverarbeitungsanlagen aller Art, sind vorbehalten.

Inhalt

Kurzfassung **4**

Produktionstechnische Aspekte 4

Ökologische Bewertung 5

Ökonomische Bewertung 6

1. Kühlschmierstoffe in der spanenden Metallbearbeitung **8**

1.1 Funktionen von und Anforderungen an Kühlschmierstoffe 9

1.2 Ansätze zur Reduzierung und Vermeidung von Kühlschmierstoffen 10

2. Veranlassung und Zielsetzung des Projekts **11**

3. Durchführendes Unternehmen **13**

4. Anforderungen der Trockenbearbeitung **15**

4.1 Funktionen des Kühlschmierstoffs 15

4.2 Lösungswege für die Trockenbearbeitung 17

4.2.1 Werkzeug 18

4.2.2 Technologie 20

4.2.3 Werkzeugmaschine 20

4.2.4 Minimalmengenschmiertechnik 22

4.2.5 Arbeitsumgebung 24

5. Realisierung der Trockenbearbeitung bei der Massenfertigung von Kleinbauteilen **26**

5.1 Überblick 26

5.2 Phase I – Fertigungstechnische Realisierung der Trockenbearbeitung 27

5.2.1 Methodisches Vorgehen 28

5.2.2 Beschreibung der Referenzbauteile 29

5.2.3 Grundlagenuntersuchungen 31
5.2.4 Umstellung der Fertigung - Bauteil 1 34
5.2.5 Umstellung der Fertigung - Bauteil 2 42
5.2.6 Bewertung der Fertigungsalternativen 49
5.3 Phase II – Maschinenseitige Realisierung der Trockenbearbeitung mittels Eigenbaumaschinen 51
5.3.1 Beschreibung des Referenzbauteils und seiner Fertigungsschritte 52
5.3.2 Grundkonzept der A 10-Maschine 53
5.3.3 Technische Beschreibung des Maschinengrundkonzepts 56
5.3.4 Erfahrungen und Verbesserungsmaßnahmen unter Produktionsbedingungen 59
5.4 Bewertung und Übertragbarkeit der Trockenfertigung 71

6. Ökologische Auswirkungen 73

6.1 Methodisches Vorgehen und Untersuchungsprogramm 73
6.2 Nassbearbeitung (A 2- / A 3-Maschinen) 75
6.2.1 Fertigungsablauf Nassbearbeitung 75
6.2.2 Ökologische Daten der Nassbearbeitung 83
6.3. Trockenbearbeitung (Mikron-Maschine) 87
6.3.1 Fertigungsablauf Trockenbearbeitung 87
6.3.2 Ökologische Daten der Trockenbearbeitung (Mikron) 92
6.4 Trockenbearbeitung (A 10-Maschine) 93
6.4.1 Fertigungsablauf Trockenbearbeitung (A 10-Maschine) 93
6.4.2 Ökologische Daten der Trockenbearbeitung (A 10-Maschine) 96
6.5 Vergleich zwischen Nass- und Trockenbearbeitung 97

7. Ökonomische Auswirkungen 102

7.1 Kostenvergleich 102
7.1.1 Methodisches Vorgehen 102
7.1.2 Stückkostenvergleich Bauteil 1 106
7.1.3 Stückkostenvergleich Bauteil 2 108
7.1.4 Schlussfolgerungen 110

7.2 Nutzwertanalyse 111
7.2.1 Methodisches Vorgehen 111
7.2.2 Ergebnisse der Nutzwertanalyse 116
7.3 Betriebswirtschaftliche Auswirkungen während der Entwicklungs- bzw. Umstellungsphase 119
7.3.1 Umstellungsaufwand Mikron 120
7.3.2 Umstellungs- und Entwicklungsaufwand A10-Maschine 122
7.4 Auswirkungen auf die Gestaltung der Arbeitsplätze 124
7.4.1 Arbeitsumgebung 124
7.4.2 Arbeitsinhalte 125

8. Literatur 127

Anhang zu Abschnitt 6 – Ökologische Auswirkungen 130

Input-Output-Tabellen der einzelnen Fertigungsschritte 130
Bauteil 1 – Nassbearbeitung (A 3-Maschine) 131
Bauteil 1 – Trockenbearbeitung (Mikron) 139
Bauteil 1 – Trockenbearbeitung (A 10-Maschine) 143
Bauteil 2 – Nassbearbeitung (A 2-Maschine) 146
Bauteil 2 – Trockenbearbeitung (Mikron) 153

Anhang zu Abschnitt 7 - Ökonomische Auswirkungen 157

A7-1 Auswahl der Methode für die Kostenvergleichsrechnung 157
A7-2 Typische betriebliche Rahmenbedingungen bei der Umstellung auf Trockenbearbeitung 158
A7-3 Spezifische Annahmen für die Durchführung der Kostenrechnung 159
A7-4 Kostenstruktur und Kalkulationsschema 159

Kurzfassung

Bei der spanabhebenden Metallbearbeitung stellen die mit dem Einsatz von Kühlschmierstoffen verbundenen Problematiken bezüglich Umwelt- und Arbeitsschutz nach wie vor ein zentrales Thema dar. Trotz erheblichen Aufwands und etlicher Nachteile (z.B. Entsorgung der entstehenden Abfälle, Toxizität, Gesundheitsgefährdung, Reinigungs- und Pflegeaufwand) werden in der spanenden Metallbearbeitung immer noch in großem Umfang Kühlschmierstoffe eingesetzt. Der am weitesten gehende Ansatz, die mit dem Kühlschmierstoffeinsatz verbundenen Umweltprobleme zu lösen, besteht in dem Verzicht auf Kühlschmierstoffe, d.h. dem Einsatz der Trockenbearbeitung. Zur Umsetzung dieser relativ neuen Technologie in den Produktionsbereich sind bisher jedoch kaum Erfahrungen verfügbar.

In Zusammenarbeit mit der ABAG-itm GmbH, Fellbach, förderte das Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg mit Mitteln aus der Sonderabfallabgabe dieses Modellprojekt zur praktischen Umsetzung der Trockenbearbeitung. Ziel des Modellprojekts war es, in einem mittelständischen Unternehmen, der Carl Leipold Metallwarenfabrik GmbH, Wolfach, einen ganzen Fertigungsbereich mit mehreren Werkzeugmaschinen auf Trockenbearbeitung umzustellen und die Prozessfähigkeit der Trockenbearbeitung in der Großserienproduktion nachzuweisen. Dabei sollten nicht nur fertigungstechnische und die Maschinenkonstruktion betreffende Fragestellungen untersucht werden. Vielmehr wurden die technischen, ökologischen und wirtschaftlichen Konsequenzen der Umstellung auf das gesamte Unternehmen betrachtet und exemplarisch ein ganzheitlicher Technologievergleich Nass-/Trockenbearbeitung durchgeführt.

Der vorliegende Projektbericht dokumentiert die vielfältigen Erfahrungen während des ca. fünf-jährigen Projekts und bewertet die erzielten Ergebnisse unter ganzheitlichen Aspekten. Er soll für Betriebe der metallverarbeitenden Branchen eine Hilfestellung bei eigenen Überlegungen zu einem möglichen Einsatz der Trockenbearbeitung bieten.

Produktionstechnische Aspekte

Nachdem Vorversuche die Machbarkeit der Trockenbearbeitung im Unternehmen prinzipiell bestätigt hatten, wurden zunächst zwei für die Trockenbearbeitung geeignete Maschinen eines renommierten Werkzeugmaschinenherstellers beschafft. Mit diesen Maschinen wurden am Beispiel zweier charakteristischer Bauteile des Unternehmens erste Erfahrungen mit der Trockenbearbeitung unter Produktionsbedingungen gesammelt. Aufbauend auf den gewonnenen Erfahrungen begann das Unternehmen mit der Konzeption und Konstruktion einer im Eigenbau hergestellten Trockenbearbeitungsmaschine, die an die spezifischen betrieblichen Bedingungen ausgerichtet ist (Messingwerkstoffe, Großserienproduktion, Abmessungen im unteren Zentimeterbereich). Nach erfolgreicher Erprobung des Prototypen wurden mittlerweile fünf weitere Werkzeugmaschinen dieses Typs gebaut und in Betrieb genommen. Sie arbeiten mit der gleichen Zuverlässigkeit wie die konventionellen Nassbearbeitungsmaschinen des Unternehmens.

Anpassung der Schnittbedingungen (Fertigungstechnik): Bei der Umstellung auf Trockenbearbeitung wurde für die eingesetzten Fertigungsverfahren (Drehen, Fräsen, Bohren, Sägen, Gewindeschneiden) keine einheitliche Tendenz hinsichtlich der Vorschub- und Schnittgeschwindigkeitsentwicklung festgestellt. Optimierungsversuche zeigten, dass im vorliegenden Anwendungsfall (verwendete Messinglegierung, geringe Spanungsdicke) beschichtete Werkzeuge infolge des erhöhten Schneidkantenradius keine Vorteile bei der Trockenbearbeitung von Messing bringen. Bearbeitungsoperationen mit einem hohen Reibanteil (z.B. Gewindeschneiden) konnten trocken erst durch den Einsatz eines Minimalmengenschmier-Systems (MMS) optimal realisiert werden.

Minimalmengenschmierung (MMS): Im Bearbeitungsprozess sollen minimale Mengen Schmierstoff zielgenau, in der richtigen Menge und zum richtigen Zeitpunkt an die Zerspanstelle herangeführt werden. Handelsübliche Systeme waren nicht in der Lage, die wegen der geringen Bauteilabmessungen sehr niedrigen Schmierstoffmengen (< 3 ml/h) prozesssicher zu gewährleisten. Das Problem der Überdosierung des Schmiermittels konnte im Verlauf des Projekts noch nicht zufriedenstellend gelöst werden.

Werkzeugmaschine: Auf Basis der Erfahrungen mit den extern beschafften Trockenbearbeitungsmaschinen wurden die Eigenbaumaschinen mit Vertikalbett konstruiert und eine strikte Trennung zwischen Arbeitsraum und staubempfindlichen Aggregaten verwirklicht. Der Großteil der Lager, die in der Regel mit einer Lebensdauerschmierung (Fett) versehen sind, ist dadurch staubsicher untergebracht. Führungen im Arbeitsraum wurden durch Abdeckungen geschützt. Maschinenseitige Ausfälle, die auf Lagerprobleme zurückzuführen sind, traten im Projektverlauf nicht auf.

Spanfluss: Der Spanfluss innerhalb der Eigenbaumaschine wurde durch die vertikale Anordnung der Bearbeitungsstationen im Arbeitsraum sichergestellt. Die Späne verlassen die im unteren Bereich trichterförmig aufgebaute Maschine nach unten (Neigungswinkel der Wandungen 55). Um unkontrolliertem Spanflug entgegenzuwirken, wurden an verschiedenen Stellen Spanleitvorrichtungen angebracht. Thermische Einflüsse waren nicht qualitätsmindernd.

Ökologische Bewertung

Die Bewertung der Umweltauswirkungen erfolgte als vergleichende Gegenüberstellung der Nass- und der Trockenbearbeitung. Hierbei wurden nicht nur die jeweils eingesetzten Werkzeugmaschinen betrachtet, sondern der gesamte Fertigungsablauf mit den relevanten Nachbehandlungsschritten und Nebenanlagen einbezogen. Basis der ökologischen Bewertung ist eine Stoffbilanz mit den Inputgrößen Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe inkl. Luft, Wasser und Energie sowie den Outputgrößen Produkte (Zwischenprodukte), Abfälle, Abwasser und Abluft. Signifikante Unterschiede zwischen der Nass- und der Trockenbearbeitung treten unter Umweltgesichtspunkten vor allem hinsichtlich der Abfälle, des Ölunfallrisikos und des Energieverbrauchs auf.

Abfälle und Emissionen: Erhebliche Verbesserungen ergeben sich bei der Trockenbearbeitung bezüglich des Schadstoffpotentials der Abfälle. Die Späne sind praktisch ölfrei und

führen bei der Verwertung zu entsprechend geringeren Emissionen. Dies kommt den Anforderungen der Verwerter der Metallspäne entgegen, die zunehmend niedrigere Ölgehalte fordern. Weitere ölhaltige Abfälle (Ölbinder, Putzlappen, Destillationsrückstand), die sich bei der Nassbearbeitung auf rund 40 g je 1.000 Teile summieren, reduzieren sich auf Werte unter 1 g je 1.000 Teile. Auch das Aufkommen lösemittelhaltiger Abfälle bzw. Rückstände (Kaltreiniger, Destillationsrückstand) ist deutlich verringert.

Risiko von Ölunfällen: Von dem Unternehmensbereich, in dem die Trockenbearbeitungsmaschinen aufgestellt sind, gehen keine potenziellen Umweltgefährdungen durch Ölunfälle aus. Aufwändige Vorkehrungen zur Begrenzung solcher Risiken können daher entfallen.

Energiebedarf: Bezüglich des teilespezifischen Energiebedarfs der Fertigungsalternativen zeigte sich, dass die Trockenbearbeitung und die Nassbearbeitung in vergleichbarer Größenordnung liegen, sofern bei der Trockenbearbeitung der Späneabtransport aus dem Bearbeitungsraum durch geeignete technische Detaillösungen (z.B. Arbeiten über Kopf, Leitbleche, schräge Flächen) ohne Drucklufteinsatz erfolgt. Andernfalls ist mit deutlich höheren Energieverbrauchswerten zu rechnen.

Ökonomische Bewertung

Voraussetzung für die breite Umstellung von Nass- auf Trockenbearbeitung ist die Aussicht auf damit verbundene ökonomische Vorteile. Ein Vergleich, der lediglich die Kosten einbezieht, greift jedoch zu kurz, da je nach Wettbewerbssituation für ein Unternehmen auch nicht-monetäre Einflussfaktoren und Kriterien für Investitionsentscheidungen von Bedeutung sind.

Kostenvergleich: Die Analyse der Kostensituation erfolgte in Form einer Kostenvergleichsrechnung. Das Referenzbauteil, das mit der Eigenbaumaschine produziert wird, kann gegenüber der herkömmlichen Nassbearbeitung merkliche Kostenvorteile verbuchen (5 bis 7 %). Die Einsparungen sind im wesentlichen auf die vereinfachte Nachbehandlung der Bauteile und den Wegfall einiger Nebenprozessschritten zurückzuführen (z.B. Spänezentrifuge, Schneidölmanagement). Das zweite Referenzbauteil, das mit den extern beschafften Trockenbearbeitungsmaschinen produziert wird, verursacht wegen des für diesen Bauteiltyp nicht angepassten Maschinenkonzepts gegenüber der Nassbearbeitung erheblich höhere umstellungsrelevante Kosten (Faktor 3).

Nutzwertanalyse: Die Bewertung der nicht-monetären Aspekte der Fertigungsalternativen „Beibehaltung der Nassfertigung", „Teilumstellung" und „Vollumstellung auf Trockenbearbeitung" erfolgte im Rahmen einer Nutzwertanalyse. Als wesentliche Ergebnisse lassen sich festhalten, dass aus Sicht des Unternehmens die Nassbearbeitung eindeutige Vorteile bezüglich technisch-prozessorientierter Kriterien aufweist (Flexibilität bezüglich der herstellbaren Bauteiltypen, Flexibilität bezüglich Auslastungsschwankungen). Die Prozesssicherheit, die im Rahmen der Nutzwertanalyse als wichtigstes Teilkriterium angesehen wurde, kann von allen drei Handlungsoptionen in fast gleicher Weise erfüllt werden. Die Alternative „Vollumstellung" hingegen dominiert bei denjenigen Teilkriterien, die eine

perspektivisch-strategische Zielrichtung haben (Image, Attraktivität der Arbeitsplätze, proaktive Standortsicherung). Bildet man über die genannten Teilkriterien, die vorher gegeneinander gewichtet wurden, einen Gesamtnutzwert, ist aus Sicht des Unternehmens die Teilumstellung mit geringem Vorsprung vor der Beibehaltung der Nassbearbeitung die vorteilhafteste Handlungsalternative.

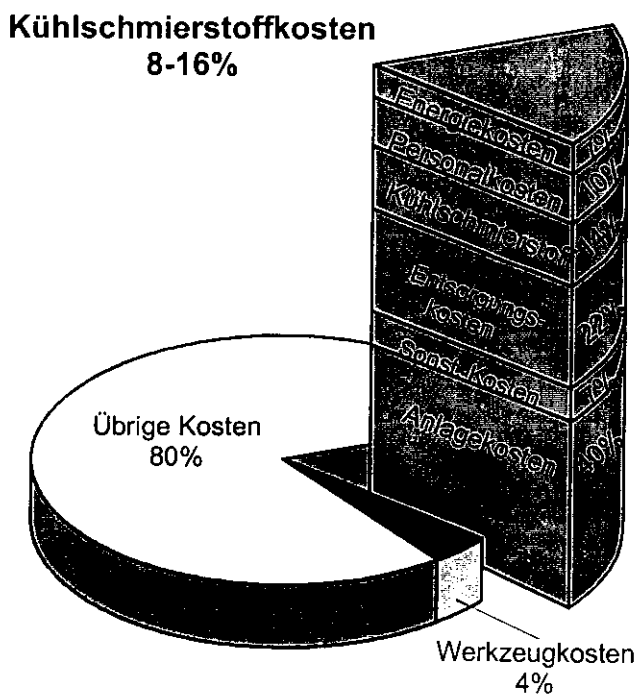
Umstellungsaufwand: Unternehmen, die ganz oder teilweise auf die Trockenbearbeitung umstellen wollen, haben neben den Investitionskosten weitere umstellungsbedingte Kosten zu tragen (z.B. Einfahraufwand, Personal- und Materialbedarf für Anpassungen der Maschinen). Weiter schlagen der Aufwand für organisatorische Umstellungen und die Schulung des Personals zu Buche. Diese Kosten lassen sich nur unvollständig bilanzieren; im vorliegenden Fall liegen sie im mittleren bis oberen sechsstelligen Bereich.

Arbeitsbedingungen: Mit der Umstellung auf die Trockenbearbeitung gehen für die Beschäftigten Verbesserungen der Arbeitsbedingungen einher, die zu einer hohen Akzeptanz der neuen Technologie führten. Neben der reduzierten Lärmbelastung durch die Kapselung der Trockenbearbeitungsmaschinen ist hier vor allem die ölfreie Arbeitsumgebung zu nennen, die erhebliche Entlastung bringt. Günstig ist ebenfalls der Wegfall der Lösemittelemissionen durch den entfallenden Kaltreinigereinsatz.

1. Kühlschmierstoffe in der spanenden Metallbearbeitung

Der Verlust der Wettbewerbsfähigkeit des Produktionsstandorts Deutschland ist seit etlichen Jahren immer wieder in der Diskussion. Im Vergleich zu den Nachbarstaaten, insbesondere zu den östlichen, werden unter anderem auch die hohen Umweltauflagen und die damit verbundenen Kosten beklagt, die die Produktion spürbar verteuern. Einen merklichen Kostenfaktor stellen bei der spanabhebenden Metallbearbeitung der Einsatz und die Entsorgung verbrauchter Kühlschmierstoffe als besonders überwachungsbedürftiger Abfall (Sonderabfall) dar. Es liegen eine Reihe von Untersuchungen - vor allem aus der Serienfertigung - vor, wonach die Kosten für den Einsatz und die Entsorgung des Kühlschmierstoffs spürbar über den Werkzeugkosten liegen (vgl. Abbildung 1-1; UBA 1993). Trotz bekannter Nachteile (z.B. Entsorgung, Toxizität, Gesundheitsgefährdung, Reinigungs- und Pflegeaufwand) werden in der spanenden Bearbeitung von Metallen immer noch in großem Umfang Kühlschmierstoffe verwendet. Die mit dem Kühlschmierstoffeinsatz verbundenen Probleme ließen sich vollständig lösen, wenn in Folge der technologischen Weiterentwicklung der Zerspanungsverfahren auf die Verwendung von Kühlschmierstoffen vollständig verzichtet werden könnte.

Abbildung 1-1: Anteil der Kühlschmierkosten an den Werkstückkosten im deutschen Maschinenbau



Quelle: Statistisches Bundesamt 1993

1.1 Funktionen von und Anforderungen an Kühlschmierstoffe

Kühlschmierstoffe erfüllen bei spanabhebenden Fertigungsprozessen eine Reihe wichtiger Funktionen. Im folgenden sind die drei wesentlichen Funktionen der Kühlschmierstoffe kurz dargestellt.

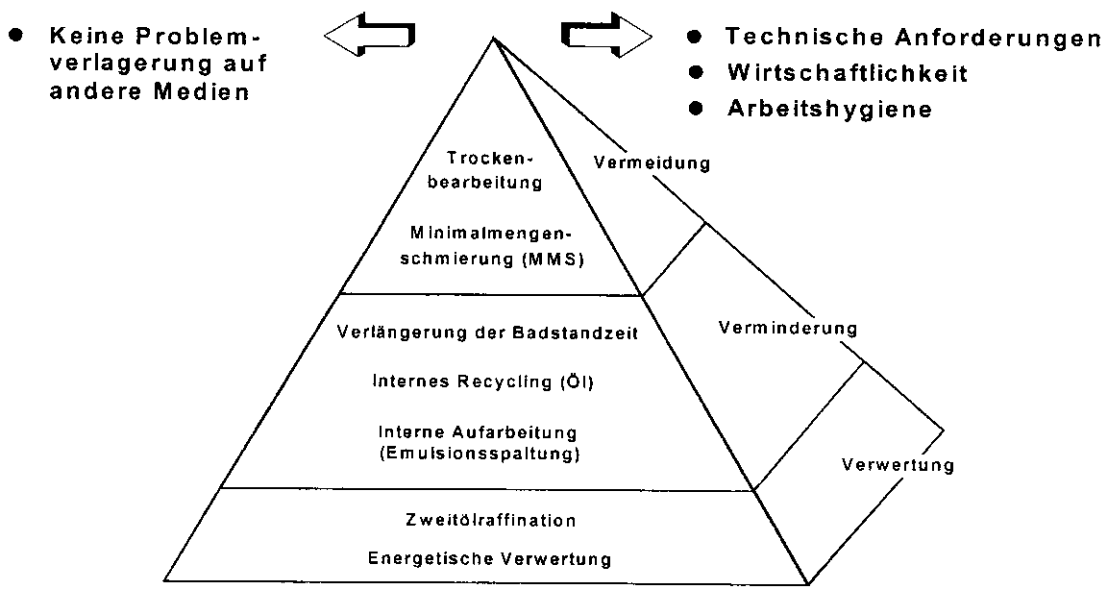
- **Schmieren**: Die Bildung eines Schmierstofffilms zwischen dem Werkzeug und dem zu zerspanenden Werkstoff bewirkt im wesentlichen eine Reduzierung der Wärmeentstehung durch Reibung am Schneidkeil. Die Trennung von Werkstück und Werkzeug in der Kontaktzone durch den Kühlschmierstoff führt darüber hinaus zu einem geringeren Werkzeugverschleiß, der durch Abhäsion und Abrasion hervorgerufen wird.
- **Kühlen**: Die zur Spanerzeugung erforderliche mechanische Energie wird an der Zerspanstelle (Scher- und Reibkräfte) fast vollständig in Wärme umgesetzt. Dabei nehmen das Werkstück ca. 5 bis 10 % und das Werkzeug ca. 10 bis 20 % der entstandenen Wärmemenge auf. Der überwiegende Anteil der Zerspanwärme (ca. 70 bis 80 %) wird durch die Späne abgeführt. Die Aufgabe des Kühlschmierstoffs besteht darin, einen Teil dieser Wärmemenge aufzunehmen und somit der thermischen Aufheizung der Komponenten im Bearbeitungsraum entgegenzuwirken. Folgen einer zu starken Erwärmung des Werkstoffes können beispielsweise unerwünschte Gefügeänderungen der Werkstückoberfläche, Eigenspannungen im Bauteil oder Überschreitungen der Toleranzmaße durch die thermische Ausdehnung des Maschinenbetts sein.
- **Spänetransport**: Kühlschmierstoffe haben in vielen Bearbeitungsfällen die Aufgabe, die entstehenden Späne von der Zerspanstelle abzutransportieren und sie den Auffangbehältern zuzuführen. Werden die Späne nicht schnell genug abgeführt, kann das Einklemmen der Späne zwischen Werkstück und Werkzeugschneide zu erheblichen Qualitätseinbußen (z.B. Oberflächengüte) und reduzierten Werkzeugstandzeiten führen.

Neben den eigentlichen technologischen Anforderungen müssen Kühlschmierstoffe zusätzlich arbeitsmedizinische und umweltbedingte Kriterien erfüllen. Gerade auf dem Sektor der Umweltverträglichkeit ist in den letzten Jahren bereits viel geleistet worden. Für Problembereiche, wie beispielsweise chlorierte Additive, PAK's, leicht nitrosierbare Agentien oder Schwermetalle, konnten alternative Lösungen entwickelt werden. Für den Anwender besteht heute allerdings immer noch die Problematik, aus der Fülle der angebotenen Produkte den für ihn geeigneten Kühlschmierstoff auszuwählen. Um größere Effektivität, d.h. größere Zerspanleistung bei gleichzeitiger Beachtung der genannten zusätzlichen Anforderungen zu gewährleisten, werden viele Additive - am Markt sind ca. 300 Produkte erhältlich - zur Verbesserung der Eigenschaften angeboten, so dass in der Praxis ein Kühlschmierstoff aus bis zu 30 Komponenten bestehen kann.

1.2 Ansätze zur Reduzierung und Vermeidung von Kühlschmierstoffen

Um die Belastung der Mitarbeiter, die Umweltrelevanz und die Kosten zu reduzieren, können bezüglich des Kühlschmierstoffeinsatzes eine Reihe verschiedener Maßnahmen durchgeführt werden (vgl. Abbildung 1-2). Der konsequente Schritt zur Vermeidung aller mit dem Einsatz von Kühlschmierstoffen verbundenen Probleme ist jedoch die Trockenbearbeitung. Mit Ausnahme weniger Einzelfälle ist eine sinnvolle und wirtschaftliche Durchführung jedoch nicht einfach durch das Abschalten der Kühlschmierstoffzufuhr zu erreichen, da die Funktionen des Kühlschmierstoffs auf andere Weise erfüllt werden müssen. Vielmehr muss der gesamte Fertigungsprozess den Anforderungen einer Trockenbearbeitung angepasst werden (Klocke/König 1995).

Abbildung 1-2: Vermeidung, Verminderung und Verwertung von Kühlschmierstoffen (ABAG 1997)



Bei Anwendungen, bei denen nicht vollständig auf eine Schmierung verzichtet werden kann, stellt die gezielte Minimalmengenschmierung (MMS) eine gute Alternative zur Nassbearbeitung dar. Wegen der im Vergleich verschwindend kleinen Schmierölvolumenströme, die dabei in den Zerspanprozess eingebracht werden, wird die MMS-Technik in der Regel der Trockenbearbeitung zugerechnet (Wassmer 1994).

2. Veranlassung und Zielsetzung des Projekts

Der Verzicht auf die Verwendung von Schneidölen hat vielfältige Auswirkungen auf die technische und organisatorische Ausgestaltung der Fertigung, die Art und Gestaltung der eingesetzten Maschinen und Aggregate, die Arbeitsbedingungen und die betriebliche Umweltsituation (Abfälle, Abwasser, Abluft, Bodenschutz, Arbeitshygiene, Gesundheitsschutz). So kann bei vollständiger Vermeidung von Schneidölen auf eine Reihe sonst notwendiger Nebenaggregate und Betriebsmittel verzichtet werden (z.B. Entölung der Späne, Entfettungsanlage zur Teilereinigung). Darüber hinaus kann ein Großteil der ölbehafteten Abfälle, die bei Reinigungsvorgängen anfallen (z.B. Ölbinder, Putzlappen), vermieden werden. Dies alles beeinflusst sowohl die Kostenstruktur und die Umweltverträglichkeit der Fertigung als auch die Arbeitsbedingungen und die Arbeitsorganisation.

Das Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg förderte aus den Mitteln der Sonderabfallabgabe in Zusammenarbeit mit der ABAG-itm GmbH ein Modellprojekt zur Vermeidung des Einsatzes von Kühlschmierstoffen bei der spanabhebenden Messingbearbeitung durch Trockenbearbeitung. Exemplarisch wurde hierbei ein Fertigungsbereich eines messingverarbeitenden Unternehmens, das als Kühlschmierstoff derzeit Schneidöle einsetzt, auf dieses umweltfreundliche Verfahren umgestellt. Mit dem Modellprojekt wurden die ökologischen und ökonomischen Implikationen des Kühlschmierstoffeinsatzes bzw. des Verzichts auf Kühlschmierstoffe ganzheitlich untersucht und einander gegenüber gestellt. Im einzelnen wurden mit dem Projekt folgende Ziele verfolgt:

- **Ganzheitlicher Technologievergleich Nass-/Trockenbearbeitung**: Von großer Bedeutung für die breite Anwendung der Trockenbearbeitung ist die Erfassung und Bewertung der ökologischen, wirtschaftlichen und arbeitsorganisatorischen Folgen einer Umstellung. Erst wenn sich nachweisen lässt, dass mit dieser Fertigungsweise bei zumindest gleichbleibender Produktqualität neben positiven Umwelteffekten (vor allem Abfallvermeidung) und einer Verbesserung der Arbeitsbedingungen auch wirtschaftliche Vorteile verbunden sind, ist mit einem verstärkten Interesse der Anwender und der sich immer noch zögerlich verhaltenden Maschinenhersteller zu rechnen. Das Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg fördert die Diffusion dieser Technologie in die breite Anwendung vor allem wegen der damit verbundenen positiven Auswirkungen auf das Sonderabfallaufkommen.
- **Nachweis der Prozessfähigkeit der Trockenbearbeitung**: Zum Zeitpunkt des Projektstarts befand sich die Technologie der Trockenbearbeitung noch in der Entwicklung. Daher waren nur wenige an die Trockenbearbeitung angepasste Werkzeugmaschinen am Markt verfügbar, eine Situation, die sich bis heute nicht grundlegend verbessert hat. Ursache hierfür sind vor allem fehlende Erfahrungen bei der großtechnischen, industriellen Fertigung unter Verzicht auf Kühlschmierstoffe. Dies gilt in verstärktem Maße für die Bearbeitung von Messingwerkstoffen und anderen leicht zerspanbaren Metallen (z.B. Aluminium), bei denen im Gegensatz zur Bearbeitung von Fe-Metallen nur geringe FuE-Aktivitäten zu verzeichnen sind. Durch die Umrüstung eines Fertigungsbereichs mit unterschiedlichen Verfahren (z.B. Drehen, Fräsen, Boh-

ren) sollte die Trockenbearbeitung in einem Modellbetrieb unter Produktionsbedingungen erprobt und ihre Prozessfähigkeit nachgewiesen werden. Als Maschinen sollten zunächst käufliche Maschinen (umgerüstete Nassbearbeitungsmaschinen) und anschließend ein eigenentwickelter Prototyp eingesetzt werden. Für den Prototyp sollte ein an die Anforderungen des untersuchten Betriebs angepasstes Maschinenkonzept für die Trockenbearbeitung (Totalvermeidung von Kühlschmierstoffen, ersatzweise mit Minimalmengenschmierung (MMS)) abgeleitet werden. Beide Maschinentypen wurden im jeweiligen Einsatzbereich bezüglich der Betriebsparameter wie beispielsweise Schnittgeschwindigkeit, Werkzeuggeometrie, Werkzeugwerkstoff, Werkzeugstandzeit, Produktqualität (z.B. Maßgenauigkeit, Gefüge) und Spanfluss optimiert. Da beim Verzicht auf Kühlschmierstoffe deren Transportfunktion für die Späne entfällt, lag ein wichtiger Aspekt der Arbeiten in der Erprobung technischer Lösungen zur Handhabung der Späne in der Maschine.

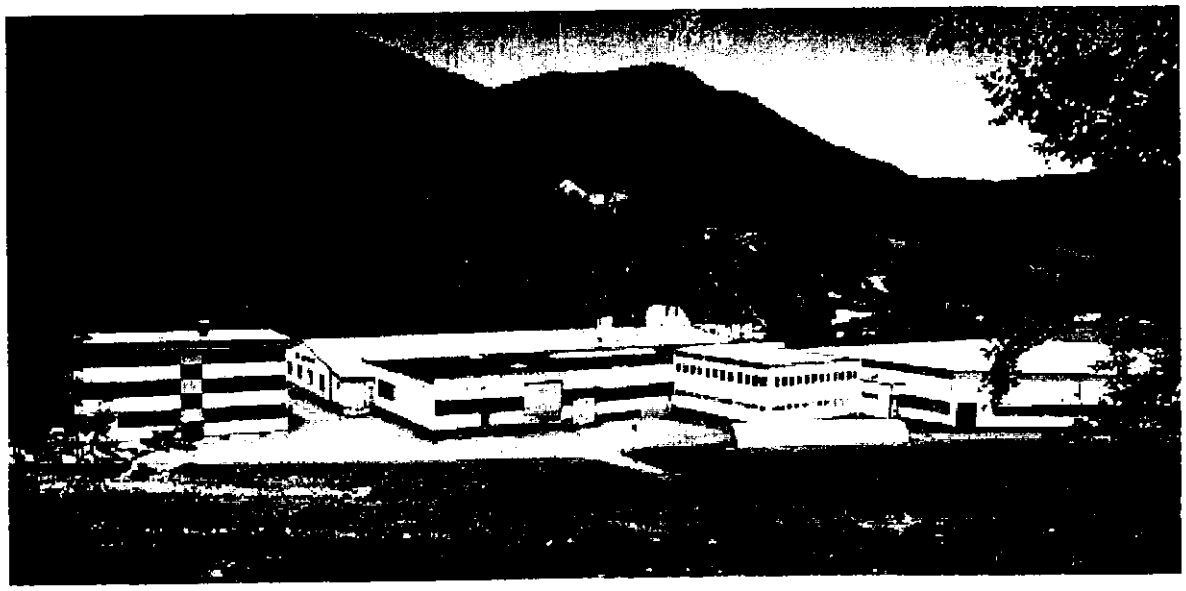
- **Umstellung eines vollständigen Produktionsbereichs**: Zielsetzung des Projekts war letztlich die Ausstattung eines ganzen Produktionsbereichs mit Werkzeugmaschinen zur Trockenbearbeitung. Diese sollten auf der Basis des Prototypen in einer Kleinserie hergestellt und zu einem selbstständig arbeitenden Produktionsbereich zusammen gefasst werden.

Das Projekt wurde in zwei Phasen durchgeführt. Phase I beinhaltete die Trockenbearbeitung zweier charakteristischer Bauteile mit Werkzeugmaschinen, die vom Hersteller für die Trockenbearbeitung umgerüstet wurden. Mit dem Einsatz dieser Maschinen wurden unter Produktionsbedingungen erste Erfahrungen mit der Trockenbearbeitung gemacht. Ziel der Phase I war in erster Linie ein prozesssicherer Dauerbetrieb der Maschinen und die Dokumentation der technischen, ökologischen und ökonomischen Rahmenbedingungen. In Phase II des Projekts wurden diese Erfahrungen für die Konzeption und Konstruktion von Werkzeugmaschinen verwendet, die das durchführende Unternehmen selbst herstellt. Ziel der Phase II war es, mit diesen Eigenbau-Maschinen einen ganzen Fertigungsbereich auf Trockenbearbeitung umzustellen. Im vorliegenden Abschlussbericht des Projekts werden beide Projektphasen integriert dokumentiert.

3. Durchführendes Unternehmen

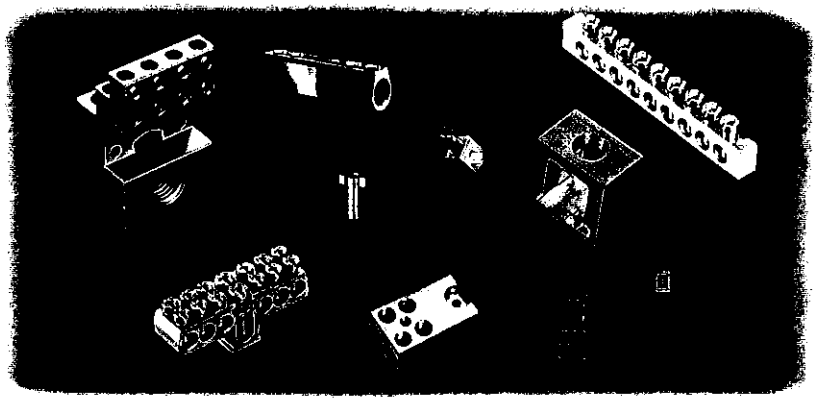
Die Carl Leipold Metallwarenfabrik GmbH in Wolfach (Leipold GmbH) ist eine von fünf Produktionsstätten der sich in Familienbesitz befindlichen Leipold-Gruppe. Gegründet wurde das Unternehmen 1919 von Carl Leipold in Nussbach bei Triberg, bevor 1926 der Umzug nach Wolfach und 1983 der komplette Umzug in die Schiltacher Straße, Wolfach erfolgte (vgl. Abbildung 3-1). Das Betriebsgelände hat eine Größe von ca. 18.000 m^2, wovon ca. 10.000 m^2 versiegelt bzw. überbaut sind. Es liegt an der Kinzig, deren Wasser zur ökologischen Energieerzeugung genutzt wird.

Abbildung 3-1: Carl Leipold Metallwarenfabrik GmbH, Wolfach

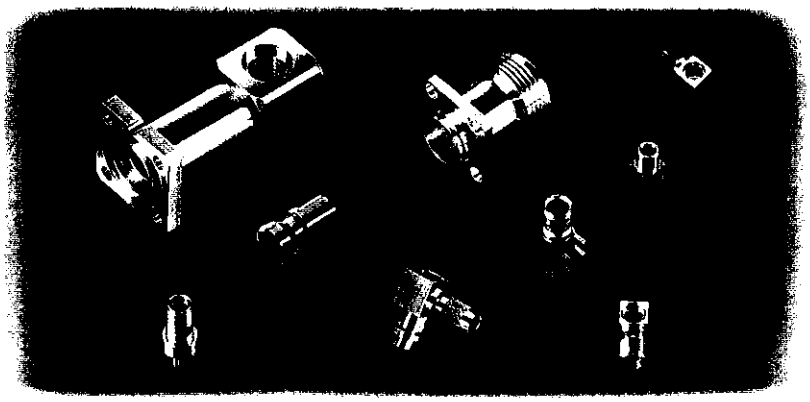


Am Standort in Wolfach beschäftigt das Unternehmen derzeit ca. 210 Mitarbeiter. Als Großserienhersteller in der Metallbearbeitung werden jährlich mehrere tausend Tonnen Messing und Stahl auf zum Teil speziell im Unternehmen entwickelten Werkzeugmaschinen zerspant. Die in Lohnfertigung hergestellten Produkte finden vorwiegend in der Hochfrequenztechnik, Sanitärtechnik, Elektro- und Elektronikindustrie, Hydraulik, Pneumatik und Automotive als Verbindungselemente ihren Einsatz (vgl. Abbildung 3-2 bis 3-5). Der Exportanteil des Unternehmens beträgt derzeit ca. 35 %. Die immer stärker werdende Einbindung in Entwicklungsprojekte der Kunden ist ein Meilenstein auf dem Weg zum Systemlieferant.

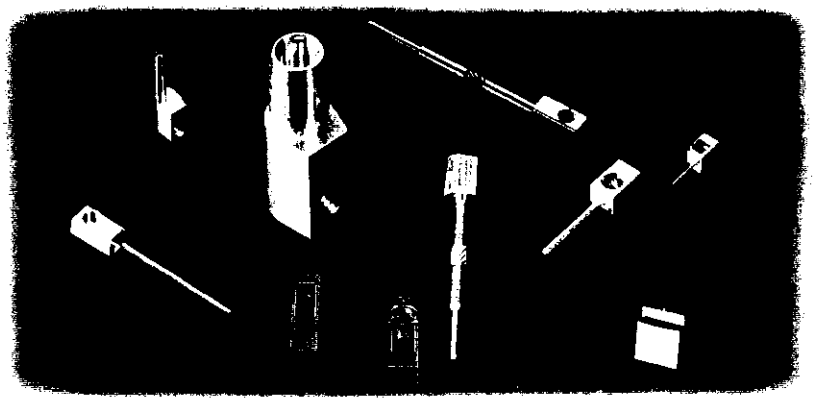
Abbildung 3-2: Auswahl aus dem Produktspektrum



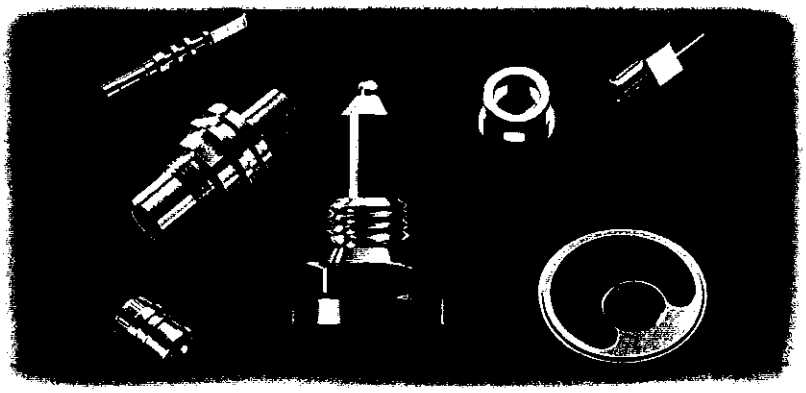
Elektroteile



HF-Teile



Klemmen



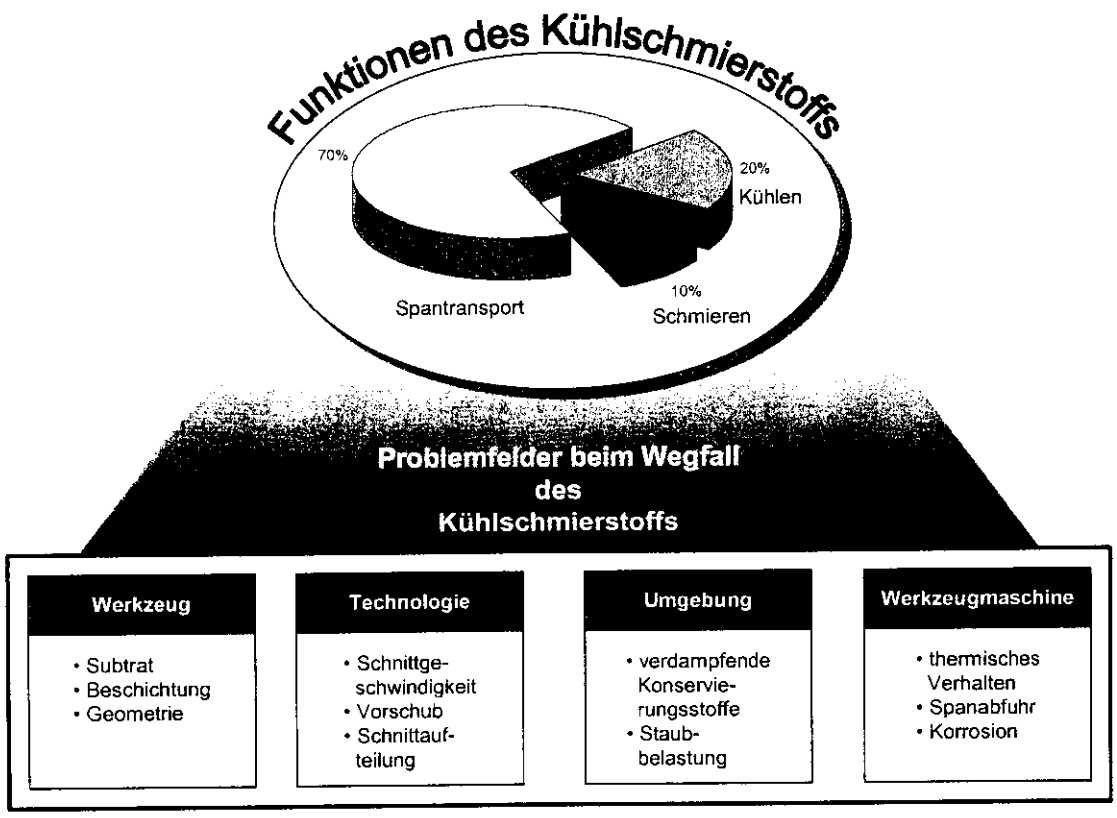
Sonstige Bauteile

4. Anforderungen der Trockenbearbeitung

4.1 Funktionen des Kühlschmierstoffs

Wie bereits in Abschnitt 1.1 dargestellt, erfüllen Kühlschmierstoffe bei der spanenden Metallbearbeitung eine Reihe von Funktionen. Die wesentlichen, bei Umsetzung der Trockenbearbeitung zu behandelnden Problemfelder können daraus abgeleitet werden (vgl. Abbildung 4-1). Kühlschmierstoffe (KSS) basieren in der Regel auf Mineralölprodukten und einer gewissen Anzahl von Additiven. Die häufigste Anwendungsform ist die Emulsion, wobei der Wasseranteil sehr hoch ist. Die Additive werden benötigt, um besondere Eigenschaften des KSS zu realisieren wie z.B. Stabilisieren der Emulsion, Erhöhen der Druckbelastung und Freihalten der Emulsion von Pilzen und Mikroorganismen.

Abbildung 4-1: Spannungsfeld Trockenbearbeitung



Geht man von der konventionellen Nassbearbeitung aus, so erfüllt der Kühlschmierstoff - primär an der Zerspanstelle, aber auch sekundär im Umfeld - die drei Aufgaben Schmieren, Kühlen und Spanabtransport. Im Folgenden werden diese Funktionen näher betrachtet, um Ansätze abzuleiten, die für die Umsetzung der Trockenbearbeitung unabdingbar sind.

Schmieren

Die Bildung eines Schmierstofffilms zwischen Werkzeug und zu zerspanendem Werkstückstoff bewirkt eine Reduzierung der Reibung und damit eine verringerte Wärmeentstehung an der Schneide. Insbesondere bei Verfahren mit einem hohen Werkzeugverschleiß, der auf Reibung und Anhaftung von Werkstückstoffen auf dem Werkzeug zurückzuführen ist, führt der Einsatz von Kühlschmierstoffen zu einer erheblichen Steigerung der Standzeit. Die Schmierfunktion des Kühlschmierstoffs wird nicht nur in der Wirkzone benötigt, sondern durch den Schmierfilm werden auch verschiedene Komponenten der Werkzeugmaschine (Führungen, Lager) gegen erhöhten Verschleiß und Korrosion geschützt.

Kühlen

Die durch die Hauptspindel bereitgestellte mechanische Energie wird an der Spanbildungszone durch Scher- und Reibkräfte fast vollständig in Wärme umgesetzt. Bekannt ist, dass Werkzeug und Werkstück einen relativ geringen Anteil dieser Wärme aufnehmen und der größte Anteil der Wärme (ca. 70 - 80 %) an die Späne abgegeben wird. Der Kühlschmierstoff soll einen Großteil dieser Spanwärme aufnehmen und damit eine Aufheizung der Werkzeugmaschine verhindern. Zudem trägt der Kühlschmierstoff zu einer gleichmäßigen Temperierung der gesamten Werkzeugmaschine bei, so dass weitere Wärmequellen, beispielsweise der Antriebe der Linear- und Rotationsachsen, kompensiert und thermisch bedingte Genauigkeitsverluste der Werkzeugmaschine reduziert werden.

Spanabtransport

Der Kühlschmierstoff übernimmt bei einer Großzahl von Fertigungsoperationen an der Zerspanstelle und im Arbeitsraum der Werkzeugmaschine die Aufgabe des Spanabtransports. Werden die Späne nicht prozesssicher und schnell von der Zerspanstelle abgeführt, kann das Verklemmen einzelner Späne zwischen Werkzeug und Werkstück zu inakzeptablen Qualitätseinbußen oder zu einem frühzeitigen Werkzeugversagen führen. Der Spanabtransport aus dem Arbeitsraum der Maschine ist zusätzlich von großer Bedeutung für die Vermeidung von Spannestern. Wie im vorigen Abschnitt erläutert, halten die Späne den größten Teil der thermischen Energie. Diese Energie wird durch die Spannester punktuell in die Maschine eingeleitet, so dass es zu Verzügen der Maschinenstruktur kommen kann. Dies hat negative Auswirkungen auf die Maschinengenauigkeit. Ebenfalls wird durch einen sicheren Spanabtransport der Arbeitsraum der Maschine in sauberem Zustand gehalten.

Ziel bei der Trockenbearbeitung muss sein, diese drei Funktionen des Kühlschmierstoffs geeignet zu substituieren. Gelingt dies, so ist es möglich Bauteile in der geforderten Qualität und unter gesetzten Kostenvorgaben herzustellen. Aufgrund der Vielfältigkeit der Probleme, die beim Wegfall des Kühlschmierstoffs entstehen, geht man davon aus, dass bei der Umstellung eines Fertigungsprozesses auf Trockenbearbeitung nicht nur einzelne Bereiche betrachtet werden können, sondern der Gesamtprozess analysiert werden muss.

4.2 Lösungswege für die Trockenbearbeitung

Sowohl in der Forschung als auch bei Beschichtungs- und Werkzeugherstellern sind mittlerweile umfangreiche Ansätze vorhanden, wie am Schneidkeil auf Kühlschmierstoffe verzichtet werden kann. Dabei werden sowohl Verfahren mit geometrisch bestimmter Schneide betrachtet als auch Verfahren mit geometrisch unbestimmter Schneide (Klocke/Beck 1997; Hoffmeister/Bock 1997; Westkämper et al. 1996). Zu beobachten ist, dass auch von der Werkzeugmaschinenindustrie zunehmend Konzepte angeboten werden, die eine Trockenbearbeitung ermöglichen (Horn 1998; Liebherr 1998).

Die Übersicht in Abbildung 4-2 zeigt für verschiedene Fertigungsverfahren mit mehrschneidigen Werkzeugen, mit welchen Lösungswegen bisher Erfolge bei Trockenbearbeitung erzielt worden sind.

Abbildung 4-2: Lösungen zur Trockenbearbeitung

Werkstoff / Verfahren	Aluminium		Stahl		Grauguss
	Gusslegierung	Knetlegierung	Hochlegierte Stähle, Wälzlagerstahl	Automatenstahl, Vergütungsstahl	GG20 - GGG70
Bohren Beschichtung	MMS (Ti,Al)N	MMS unbeschichtet	MMS (Ti,Al)N+MoS_2	Trocken TiN	Trocken TiN
Reiben Beschichtung	MMS (Ti,Al)N, PKD	MMS unbeschichtet	O	MMS PKD-Leiste	MMS PKD-Leiste
Gewinde-schneiden	MMS TiN	X	MMS TiN	O	MMS Ti(C,N)
Gewinde-formen	MMS CrN, WC/C	MMS	MMS	MMS Ti(C,N)	O
Tiefbohren Beschichtung	MMS (Ti,Al)N+MoS_2	X	X	MMS (Ti,Al)N+Movic	MMS
Fräsen Beschichtung	Trocken TiN+ MoS_2 CVD-Diamant	MMS unbeschichtet	MMS (Ti,Al)N+MoS_2	Trocken TiN	Trocken TiN
Wälzfräsen	X	X	O	Trocken	Trocken
Sägen	MMS	MMS	MMS	MMS	O
Räumen Beschichtung	X	X	Trocken Ti(C,N)-Multilayer	Trocken Ti(C,N)-Multilayer	O

X = keine prozesssicheren Anwendungsfälle bekannt

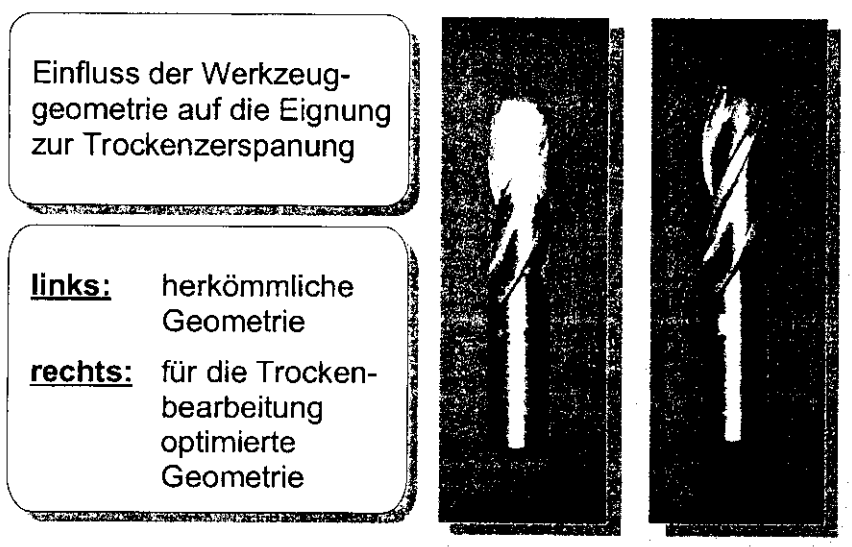
O = keine Forschungsaktivitäten

Bei unterschiedlichen Verfahren und Werkstückstoffen ist in vielen Fällen eine Trockenbearbeitung möglich. Die Lösungswege haben verschiedene Entwicklungsstadien erreicht und müssen daher unterschiedlich bewertet werden. Teilweise handelt es sich bei den dargestellten Lösungen um erste Grundsatzuntersuchungen (z.B. Tieflochbohren), teilweise wird die Trockenbearbeitung mit dem angegebenen Lösungsweg schon in der Serienfertigung eingesetzt (z.B. Fräsen von Aluminium, Bohren von Stahl, Wälzfräsen). Die Ergebnisse müssen zudem unter den jeweiligen Randbedingungen betrachtet werden. Als Beispiel sind die geforderte Bauteilqualität, der Vergütungszustand des Werkstückstoffs oder auch die eingesetzten Werkzeugmaschinen zu nennen. Eine direkte Übertragung der Lösungswege bei abweichenden Randbedingungen ist meist nicht erfolgreich.

4.2.1 Werkzeug

Der wichtigste Ansatz zur Umstellung auf die Trockenbearbeitung liegt in der Anpassung der Werkzeuge. Da bei der Trockenbearbeitung die Schneiden einer erhöhten thermischen Belastung ausgesetzt sind, ist zunächst zu prüfen, inwieweit das konventionelle (Nass)-Werkzeug den gestiegenen Anforderungen genügt. Dabei muss in der Regel die Werkzeuggeometrie (z.B. Frei- und Spanwinkel, Spanbrechernuten, Neigungswinkel) bei Fräswerkzeugen optimiert werden (vgl. Abbildung 4-3; Gießler 1997). Geänderte tribologische Zustände an der Spanfläche können beim trockenen Einsatz von Standard-Substraten zu signifikanten Leistungsverlusten führen. Dabei bleibt offen, ob zur Trockenbearbeitung ein vollkommen neuer Werkstoff eingesetzt werden muss (z.B. Wechsel von HSS auf Hartmetall) oder ob eine Verbesserung des konventionellen Substrats ausreicht. Eine zentrale Rolle bei der Trockenbearbeitung kommt sicherlich der Auswahl einer geeigneten Beschichtung zu, da durch verbesserte chemische Schichteigenschaften und optimierte Werkzeugvorbehandlungen im allgemeinen große Leistungsreserven erschlossen werden können (Lahres et al. 1997; Spath et al. 1995; Kaufeld 1996).

Abbildung 4-3: Einfluss der Werkzeuggeometrie auf die Fähigkeit eines Werkzeugs zur Trockenbearbeitung



Die Erfahrungen bei Versuchen zur Trockenbearbeitung haben gezeigt, dass der Einsatz von Beschichtungen zu einer erheblichen Steigerung der Leistungsfähigkeit der Werkzeuge führt. Die Beschichtung hat die Aufgabe, als Trennmittel zwischen Werkzeug und Span zu wirken. Dieses Trennmittel kann als harte oder als weiche Schicht ausgeführt sein. Harte Schichten wie z.B. TiN oder TiAlN wirken reibungsmindernd und wärmedämmend. Dadurch wird verhindert, dass durch die höheren Temperaturen bei der Trockenbearbeitung chemische Verschleißprozesse (Auskolkung) begünstigt werden. Weiche Schichten haben die Funktion, besonders geringe Reibwerte zwischen Werkzeug und Span zu realisieren. Die weiche Schicht wird durch den Einsatz des Werkzeugs verbraucht und wirkt gewis-

sermaßen als fester Schmierstoff. Beispiele für solche Schichten sind MoS_2- und kohlenstoffbasierte Schichten (Hühsam 2001).

Schichtsysteme sind heutzutage sehr unterschiedlich aufgebaut. Moderne Beschichtungen bestehen meist aus mehreren verschiedenen Schichten, wobei meist TiN als Grundschicht verwendet wird. Als Kombination mit der TiN-Grundschicht wird häufig eine weitere harte Schicht verwendet (z.B. TiCN) oder als Deckschicht eine weiche MoS_2-Beschichtung, so dass nach dem Abnutzen der Decklage für das Werkzeug weiterhin ein gewisser Verschleißschutz besteht.

Abbildung 4-4: Einfluss der Beschichtung auf die Standzeit von Werkzeugen beim Fräsen unter identischen Bedingungen

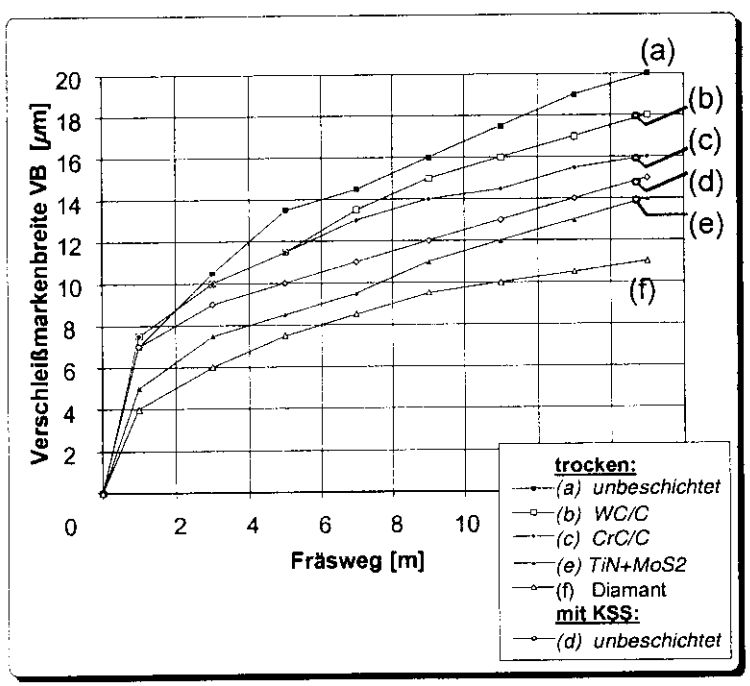


Abbildung 4-4 zeigt eindrucksvoll, welche Möglichkeiten durch die Beschichtungstechnik eröffnet werden können. Dort sind die Ergebnisse verschiedener Versuche aufgezeigt, die für die Operation Fräsen durchgeführt wurden (Fräsweg: 15 m). Wie nicht anders zu erwarten, zeigt bei trockener Bearbeitung der unbeschichtete Fräser (a) den größten Verschleiß. Der gleiche Fräser weist bei Verwendung von Kühlschmierstoff (d) einen 25 % geringeren Verschleiß auf. Üblicherweise lassen sich solche Verhältnisse nicht direkt auf den Standweg eines Fräsers in der Produktion übertragen. Es liegt jedoch auf der Hand, dass unbeschichtete und ungekühlte Fräser häufiger gewechselt werden müssen. Die Fräser (b) und (c) sind mit Hartstoffen beschichtet und daher besser vor der an der Wirkstelle herrschenden hohen Prozesstemperatur bei der Trockenbearbeitung geschützt. Die Folge dieses Schutzes ist an einer Minderung des Verschleißes von bis zu 20 % zu erkennen. Der mit einer Kombination aus Hart- und Schmierstoffschicht (Multilayer-Schicht) versehene

Fräser (e) zeigt Verschleißwerte, die sogar die kühlgeschmierte Anwendung übertreffen. Der Verschleiß beträgt hier nur noch 70 % des unbeschichteten Fräsers (a).

Polykristalliner Diamant (PKD) (f) zeichnet sich der trockener Zerspanung in der Paarung mit typischen Werkstoffen - vorzugsweise Aluminium und Aluminium-Legierungen - ebenfalls durch vergleichsweise kleine Reibwerte aus und ist zudem wesentlich verschleißfester. Dem stehen beim Einsatz von Diamant anstelle herkömmlicher Schneidstoffe allerdings die höheren Schneidstoffkosten und das eingeschränkte Einsatzspektrum dieses Schneidstoffs gegenüber. Schließlich können mit Diamant in den seltensten Fällen Eisenbasiswerkstoffe erfolgreich bearbeitet werden.

4.2.2 Technologie

Die eingesetzte Technologie darf nicht unabhängig vom Werkzeug betrachtet werden. Vielmehr müssen Werkzeug und Schnittbedingungen aufeinander abgestimmt sein. Bei neuartigen Beschichtungen müssen die Bearbeitungsdaten unbedingt angepasst werden, denn erst die Kombination aus angepasster Technologie und verbessertem Schneidstoff entscheidet über den Erfolg der Trockenbearbeitung. Es hat sich gezeigt, dass durch den Einsatz höherer Schnittwerte die entstehende Prozesswärme stärker im Span bleibt und dadurch das Werkstück thermisch weniger belastet wird.

Ein vielfach vernachlässigter Lösungsweg für die Realisierung der Trockenbearbeitung ist die Anpassung der Zerspanstrategie. Durch die fehlende Spülwirkung des KSS kommt es vor, dass sich Späne häufiger auf dem Bauteil ablagern und nachgeschaltete Bearbeitungsschritte dadurch behindert werden. Eine geschickte Gestaltung des Zerspanstrategie kann dieses Problem umgehen. So konnte beispielsweise bei der Trockenbearbeitung von Aluminium-Knetlegierungen gezeigt werden, dass durch geänderte Frässtrategien der Spanabtransport von der Zerspanstelle möglich wird (Doerfel 1997).

4.2.3 Werkzeugmaschine

Eine Schlüsselstellung für den Erfolg der Trockenbearbeitung nimmt die Werkzeugmaschine ein. Das größte Problem stellt hierbei der Spanabtransport dar, der schnell und prozesssicher erfolgen muss, damit die Späne die Wärme nicht an die Werkzeugmaschine abgeben können. Gelingt dies nicht, kann es zu thermischen Verlagerungen der Fertigungseinheit mit negativen Auswirkungen auf die Qualität der Bauteile führen.

Auch müssen geeignete Lösungswege gefunden werden, um die Maschine in Folge des fehlenden Korrosionsschutzes des Kühlschmierstoffs vor verfrühtem Verschleiß zu bewahren. Mittlerweile werden von einigen Werkzeugmaschinenherstellern Konzepte angeboten, die diese Forderungen erfüllen. Allerdings sind die am Markt verfügbaren Lösungen nicht für alle Bearbeitungsaufgaben geeignet.

Aus den mittlerweile gesammelten Erfahrungen der Trockenbearbeitungs"gemeinde" können Anforderungen an eine trockenbearbeitungsgerechte Werkzeugmaschine formuliert werden. Der Spanabtransport ist maschinentechnisch das eigentliche Kernproblem der Trockenbearbeitung und hat daher die größten Auswirkungen auf die Gestaltung der Maschine selbst und des Maschineninnenraums.

Vertikalbettbauweise

Ein für die Trockenbearbeitung grundsätzlich zu empfehlendes Maschinenkonzept stellt die Vertikalbettbauweise oder das Pick-Up-Prinzip dar. Bei der Vertikalbettbauweise werden Gruppen, die üblicherweise waagrecht im Arbeitsraum liegen, senkrecht aufgestellt. Dadurch wird ein Herunterfallen der Späne durch die Schwerkraft bewirkt. Das Pick-Up- oder Überkopf-Prinzip stellt eine Variante des Vertikalbetts für Drehmaschinen dar. Hierbei hängt das Werkstück an der Hauptspindel der Maschine. Die Hauptspindel übernimmt zusätzliche Handhabungsfunktionen. Bei diesem Prinzip fallen die Späne direkt nach unten, so dass noch nicht einmal ein kurzer Kontakt mit dem Maschinenbett erfolgt (Hüller-Hille 2000; INDEX 2000).

Ausgestaltung des Arbeitsraums

Durch das Vertikalbett ist die Anlagerung von Spänen auf dem Maschinentisch weitgehend ausgeschlossen. Allerdings bieten die Zusatzaggregate, wie z.B. Rundtische oder Werkstückaufnahmen genügend Fläche für das Anlagern von Spänen. Ebenfalls festzustellen ist, dass Spanförderer nicht die volle Breite des Arbeitsraums der Maschine abdecken können, so dass sich der Arbeitsraum nach unten hin verjüngen muss. Die Ausgestaltung des unteren Arbeitsraums nach dem Trichterprinzip erfordert Abschrägungen der Wände mit ausreichend großen Winkeln (ca. 50°-60° als Richtwert) und glatten Wandoberflächen (Horn 1998). Die Wände des Arbeitsraums sollten nach Möglichkeit keinerlei Vorsprünge und Absätze aufweisen, sondern lediglich aus senkrechten und geeignet geschrägten Wänden aufgebaut sein. Falls es dennoch zur Bildung von Spannestern kommt, können diese mit dem gezielten Einsatz von Rüttelblechen zu bestimmten Zeitpunkten abgerüttelt werden.

Der Einsatz von Druckluft zum Wegblasen der Späne innerhalb des Arbeitsraums bietet sich als einfache Lösung an, sollte aber nach Möglichkeit vermieden werden und nur in Ausnahmefällen eingesetzt werden. Sicherlich ist der Einsatz von Druckluft sinnvoll, wenn es um das Ausblasen von Werkzeugaufnahmen oder Werkstückspannvorrichtungen geht, nicht aber beim Freiblasen horizontaler Flächen. Durch den Drucklufteinsatz werden die Späne häufig unbeabsichtigt an empfindliche Funktionsstellen wie z.B. Führungen und Lagerungen gebracht, die sie ansonsten niemals erreichen würden.

Innere Abdichtung der Werkzeugmaschine

Der Arbeitsraum der trockenbearbeitungsgerechten Maschine muss frei von Leckölen oder den Austritten anderer Schmiermedien sein. Ölleckagen bilden zusammen mit Kleinspänen und Stäuben Entstehungskeime für Spannester. Führungen und Lagerungen sollten daher

dicht sein und wenn möglich über eine Fett-Lebensdauerschmierung verfügen. Ebenfalls wichtig ist die Dichtung von Lagern und Führungen gegenüber dem Eindringen von Spänen. Einmal eingedrungene Späne zerstören mit der Zeit die Dichtungen und führen zum frühzeitigen Ausfall des Lagers. Bei heißen Spänen und aggressiven Werkstückmaterialien sollten die Dichtungen zusätzlich mit einer metallischen Bewehrung ausgestattet sein oder durch Abdeckungen vor direktem Kontakt mit den Spänen geschützt sein (WBK 2000).

Kapselung und Schalldämmung der Maschine

Der Arbeitsraum der Maschine sollte gekapselt sein, um den Austritt von Emissionen des Prozesses wie z.B. Metallstäube und Aerosole zu verhindern. In der Regel sind die Temperaturen innerhalb des Arbeitsraums bei der Trockenbearbeitung deutlich höher als bei der Nassbearbeitung. Daher ist es erforderlich den Arbeitsraum zu belüften, um die im Inneren herrschenden Temperaturen niedrig zu halten. Um dennoch den Austritt von Stäuben und Aerosolen zu verhindern ist eine geeignete Reinigung der Abluft erforderlich. Dazu sollten regenerierbare Abscheidesysteme verwendet werden. Einfache Filter sind nicht sinnvoll, da sich das Filtervlies durch die Staubbeladung zu schnell zusetzt und die Be- und Entlüftung des Arbeitsraums nicht mehr gewährleistet ist.

Bei der Trockenbearbeitung fällt die schalldämmende Wirkung des Kühlschmierstoffs weg. Dadurch sind die Bearbeitungsgeräusche deutlich lauter wahrnehmbar. Die Maschineneinhausung sollte deshalb so gestaltet sein, dass Geräuschemissionen nicht nach außen dringen können. Zu beachten ist auch, dass Geräuschemissionen der Zusatzaggregate wie z.B. Entlüftungsgebläse und Absaugeinrichtungen nicht den vorgeschriebenen Grenzwert von 75 dB (A) überschreiten.

4.2.4 Minimalmengenschmiertechnik

Bei vielen Bearbeitungsoperationen stellt sich der Einsatz der Minimalmengenschmiertechnik (MMS) als eine kostengünstige, sichere und universell einsetzbare Alternative zur Nassbearbeitung dar. Bei der Minimalmengenschmierung wird das Werkzeug während der Zerspanung mit Hilfe von Druckluft mit kleinsten Mengen Öl bzw. MMS-Medium benetzt, um den notwendigen Schmiereffekt zu erreichen und damit die Reibung zwischen Span und Spanfläche des Werkzeugs zu reduzieren. Das Öl bzw. MMS-Medium wird mit Druckluft in sehr geringen Mengen (10-50 ml/h) zerstäubt und durch geeignete Düsen an die Bearbeitungsstelle transportiert.

Bei Minimalmengenschmiersystemen unterscheidet man verschiedene Gerätebauarten und Wirkprinzipien (vgl. Abbildung 4-5). MMS-Geräte mit einem drucklosen Vorratstank für das Medium haben den Vorteil, dass das Medium im Betrieb nachgefüllt werden kann. Allerdings benötigt man zur Schmierstoffförderung bei diesen Geräten eine Dosierpumpe, so dass der Geräteaufwand höher ist. Systeme mit druckbeaufschlagten Behältern sind einfacher aufgebaut, lassen aber wegen der fehlenden Steuerungsmöglichkeiten keine genaue Dosierung zu. Die Dosierung von Druckluft und Medium sollte getrennt einstellbar

sein, um gegebenenfalls mit höherem Druck arbeiten zu können. Dann können auch Späne aus tiefen Bohrungen druckluftunterstützt gefördert werden. Wegen der genaueren Dosierbarkeit des Mediums sind in der Regel Systeme mit Dosierpumpe zu bevorzugen.

Von entscheidender Bedeutung für die Wirksamkeit der Minimalmengenschmierung ist die Applikationstechnik in der Werkzeugmaschine. Diese muss an die spezifischen Randbedingungen der Fertigung angepasst werden, um die Zerspanstelle möglichst zielgenau mit den geringen Schmierstoffmengen zu versorgen.

Abbildung 4-5: Unterschiedliche Bauformen von MMS-Systemen

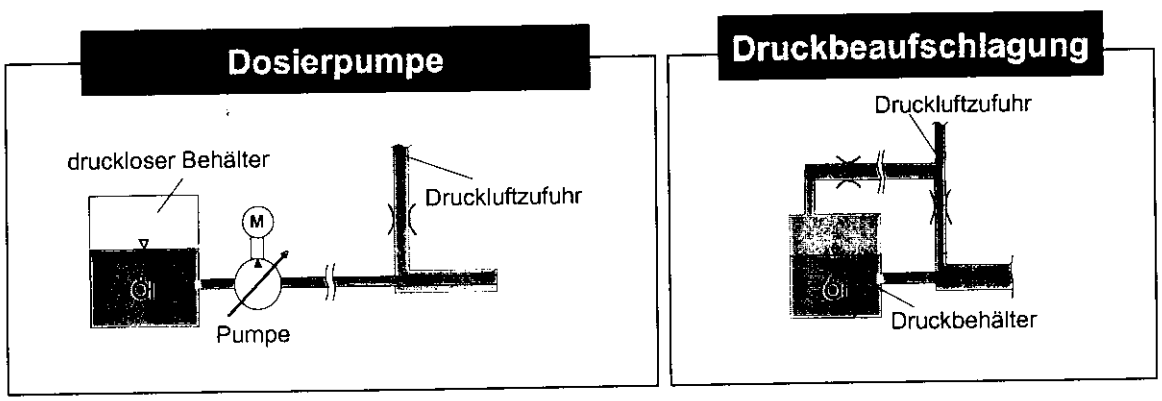
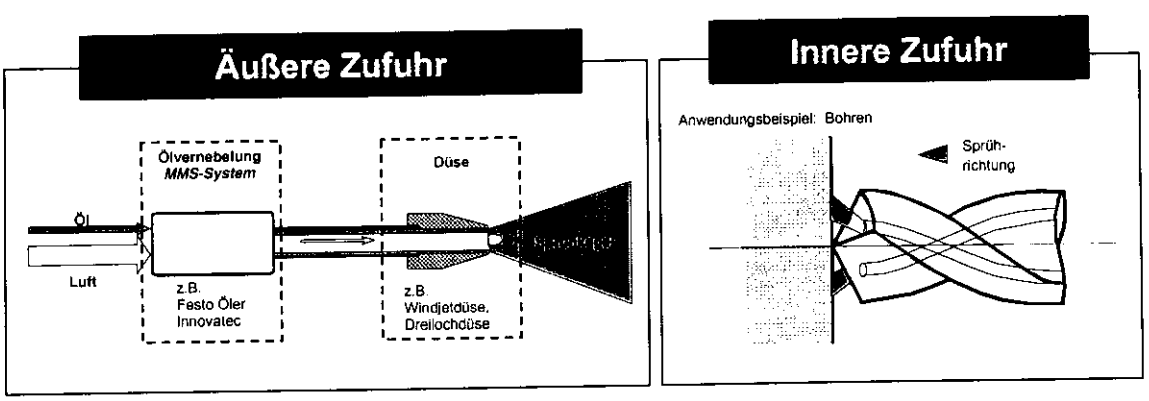


Abbildung 4-6: Vergleich der äußeren und inneren Zufuhr bei MMS



Grundsätzlich lässt sich bei MMS-Systemen zwischen äußerer (durch Düsen an der Spindel) und innerer (durch die Spindel und das Werkzeug) Zuführung des Öl-Luft-Gemisches unterscheiden (vgl. Abbildung 4-6). Bei der inneren Zufuhr des Mediums muss die Mischung von Öl und Luft in einer eigenen Mischkammer weit vor der Austrittsstelle erfolgen, wobei die Gefahr besteht, dass sich das Gemisch auf dem Weg zur Austrittsstelle wieder entmischt und größere Tröpfchen unregelmäßig austreten.

Ein Beispiel für das Einsatzgebiet der äußeren MMS-Zuführung ist die Fräsbearbeitung. Hier sind die Schnitttiefen so gering, dass eine ausreichende Benetzung des Werkzeugs

jederzeit gewährleistet ist. Systeme mit innerer Zuführung werden häufig bei Bohr- und Reiboperationen eingesetzt, da bei großen Bohrungslänge/Durchmesser-Verhältnissen (l/d > 3) eine Versorgung von außen nicht mehr sichergestellt werden kann. Diese Applikation hat sich als universell einsetzbar herausgestellt, allerdings ist sie nur mit einem hohen Investitionsaufwand sowohl an der Werkzeugmaschine als auch bei den Werkzeugen realisierbar. Schließlich muss das Werkzeug innere Kanäle aufweisen, durch die der Schmierstoff an die Wirkstelle transportiert werden kann. Der Durchmesser des Werkzeugs spielt ebenfalls eine Rolle, da innere Kanäle bei kleinem Werkzeugquerschnitt zu einer kritischen Schwächung des Werkzeugs führen. Die Werkzeugmaschine benötigt im Falle einer inneren Zuführung eine spezielle Spindel, durch die der Schmierstoff an das Werkzeug geliefert werden kann. Insbesondere bei den heute üblichen schnellen Hauptspindelsystemen werden an die benötigten Drehdurchführungen hohe Anforderungen gestellt.

Ein verfahrensbedingter Nachteil aller MMS-Systeme ist darin zu sehen, dass es gerade beim Einsatz von äußerst geringen Ölmengen zum Anhaften dünner Späne im Arbeitsraum der Maschine kommen kann (Palm 1999). Dies führt häufig zu einem erhöhten Reinigungsaufwand und zu einer Reduzierung der Lebensdauer einzelner Werkzeugmaschinenkomponenten. Zudem sollte zur Vermeidung von Ölnebelemissionen eine Absauganlage mit geeigneter Abscheideeinrichtung an der Werkzeugmaschine vorhanden sein.

Der Einsatz von Minimalmengenschmiersystemen erscheint aufgrund der im vorigen Abschnitt geschilderten Risiken erst dann sinnvoll, wenn durch Werkzeug- und Beschichtungsoptimierungen keine signifikanten Erfolge erzielt werden können. In einigen Fällen ist die Anwendung der Minimalmengenschmiertechnik jedoch der einzig gangbare Weg zur prozesssicheren Realisierung der Trockenbearbeitung.

Mittlerweile kann ein allgemein gültiges Lastenheft für die Anforderungen an MMS-Systeme angegeben werden (vgl. Tabelle 4-1).

4.2.5 Arbeitsumgebung

Die Arbeitsumgebung kann bei der Trockenbearbeitung durch verdampfende Konservierungsstoffe von Halbzeugen und Werkstücken sowie durch Feinstäube aus der Zerspanung belastet werden. Diese Emissionen müssen vermieden oder adäquat zurückgehalten werden, um nicht den Maschinenbediener einem erhöhten Gesundheitsrisiko auszusetzen oder Verpuffungen in der Werkzeugmaschine zu provozieren. Als Lösungsweg bietet sich auch deshalb die Installation von Absaugvorrichtungen mit entsprechenden Filtersystemen an.

Tabelle 4-1: Anforderungsliste an MMS-Systeme (WBK 2000)

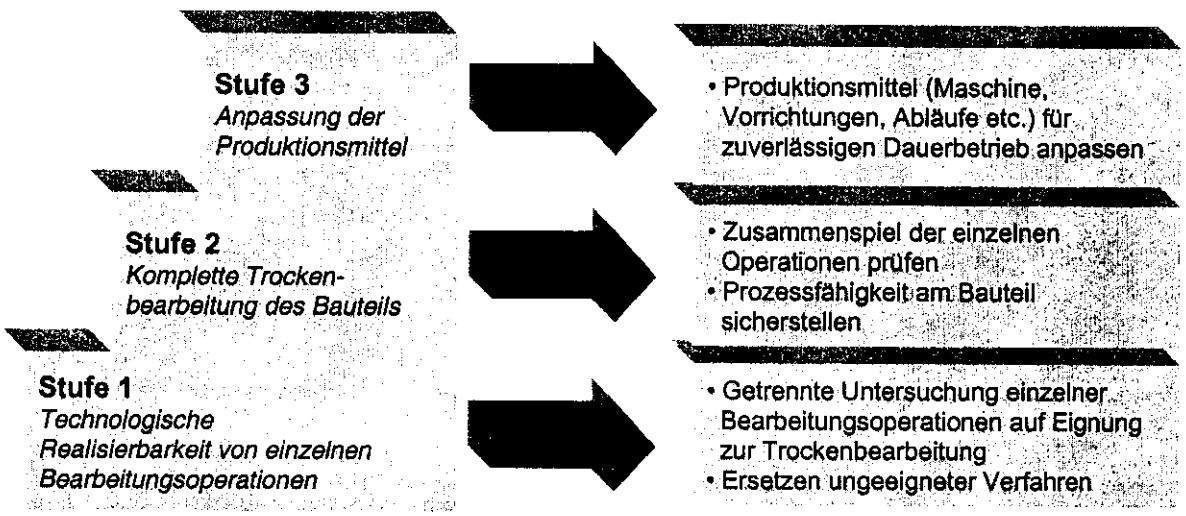
Art der Forderung	**Eigenschaft**	**Prio-rität**
Mindestforderung	Kleinste Einstellung der MMS-Menge (ca. 10 ml/h)	1
	Schnelles Ansprechverhalten des Systems bis zum Aufbau des Sprühnebels (ca. 3 s)	1
	Kein Nachtropfen	1
Festforderung	Geringe Lärmentwicklung im Betrieb	2
	Getrennte Einstellbarkeit von Flüssigkeits- und Druckluftstrom	1
	Exakte und vibrationsunempfindliche Einstellbarkeit der Düsen	1
	Überwachung der Funktion (Füllstand, Medientransport und Druckluft)	1
	Mögliche Ansteuerung des Systems durch die NC-Steuerung	2
	Geringe Nebelbildung	2
	Zielgenaue Benetzung im Bereich der Wirkstelle	1
	Forderungen des Arbeits- und Umweltschutzes einhalten	1
	Einfacher Wechsel des Mediums	2
	Verlustfreier Transport des Mediums bis zur Austrittsdüse (keine Leckagen in den Arbeitsraum)	1

5. Realisierung der Trockenbearbeitung bei der Massenfertigung von Kleinbauteilen

5.1 Überblick

Das Modellprojekt hat das Ziel einen Fertigungsbereich, der bisher unter Einsatz von Kühlschmierstoffen betrieben wird, auf Trockenbearbeitung umzustellen. Aus den allgemein bekannten Erfordernissen der Trockenbearbeitung (vgl. Abschnitt 4) muss eine derartiges Projekt in mehreren nacheinander folgenden Schritten angegangen werden.

Abbildung 5-1: Vorgehensweise bei der Umstellung auf Trockenbearbeitung



Im Groben betrachtet ist die Vorgehensweise zur Umstellung auf Trockenbearbeitung ein **dreistufiger Prozess** (vgl. Abbildung 5-1). Am Anfang der notwendigen Schritte (**Stufe 1**) steht die Frage der technologischen Realisierbarkeit, d.h. die herzustellenden Bauteile müssen hinsichtlich ihrer Eignung zur Trockenbearbeitung analysiert werden. Dazu gehören Untersuchungen zur trockenen Zerspanbarkeit des Werkstoffs mit den dafür vorgesehenen Fertigungsverfahren. Treten bei einem Verfahren unter Trockenbearbeitungsbedingungen Schwierigkeiten auf, muss nach einer geeigneten Lösung auf Seiten des Werkzeugs oder des eingesetzten Verfahrens gesucht werden. Als letzter Schritt steht die Substitution des problematischen Verfahrens durch ein geeigneteres Verfahren offen.

Der zweite Schritt (**Stufe 2**) besteht in der Analyse des gesamten Bearbeitungsprozesses des Bauteils. Oft tritt der Fall ein, dass jede Bearbeitungsoperation des Bauteils für sich alleine trocken funktioniert, bei der trockenen Komplettbearbeitung jedoch keine prozesssichere Fertigung möglich ist. In solchen Fällen muss die Bearbeitungsstrategie untersucht

werden und ggf. die Bearbeitungsabfolge des betroffenen Bauteils umgestellt werden. Häufig ist nach diesem Schritt festzustellen, dass eine prozesssichere Serienfertigung des betrachteten Bauteils im Prinzip möglich ist.

Der letzte Schritt (**Stufe 3**) des Umstellungsprozesses auf Trockenbearbeitung besteht in der Anpassung der Fertigungsanlagen, insbesondere der Werkzeugmaschinen. Auf herkömmlichen Maschinen ist eine Trockenbearbeitung in der Serie nicht möglich. Maschinenseitig müssen spezielle Vorkehrungen vor allem zur Kontrolle des Spanflusses vorhanden sein, da die trockene Serienproduktion empfindlicher auf Späne, Stäube und andere Verunreinigungen reagiert als die konventionelle Nassbearbeitung. Die bei der Trockenbearbeitung häufig angewendete Minimalmengenschmierung muss mit der Maschinensteuerung kommunizieren können. Auch müssen bezüglich der Dichtheit der Maschineneinhausung besondere Regeln beachtet werden.

Im Rahmen dieses Modellprojekts wird die Umstellung einer Massenfertigung von Kleinbauteilen durchgeführt. Der dazu eingeschlagene Weg entspricht der dargestellten, dreistufigen Vorgehensweise. Aus organisatorischen Gründen wurden innerhalb des Projekts die beiden ersten Stufen, d.h die fertigungstechnische Realisierung der Einzeloperationen und die Komplettbearbeitung zur **Phase I** der Umstellung zusammengefasst. Die Konzeption und der Aufbau der trockenbearbeitungsgerechten Werkzeugmaschine war Inhalt der zweiten Projektphase (**Phase II**).

5.2 Phase I – Fertigungstechnische Realisierung der Trockenbearbeitung

Das Ziel der Phase I bestand darin, vorhandene Teile von der Nassbearbeitung mit Schneidölen auf die Trockenbearbeitung umzustellen. Hierbei sollten die von der Nassbearbeitung her bekannten Eigenschaften der Bauteile wie z.B. Maßhaltigkeit und Oberflächengüte des Bauteils erhalten bleiben. Ebenso sollte gewährleistet sein, dass der Fertigungsprozess nach erfolgter Umstellung stabil und mit vergleichbarer Produktivität abläuft.

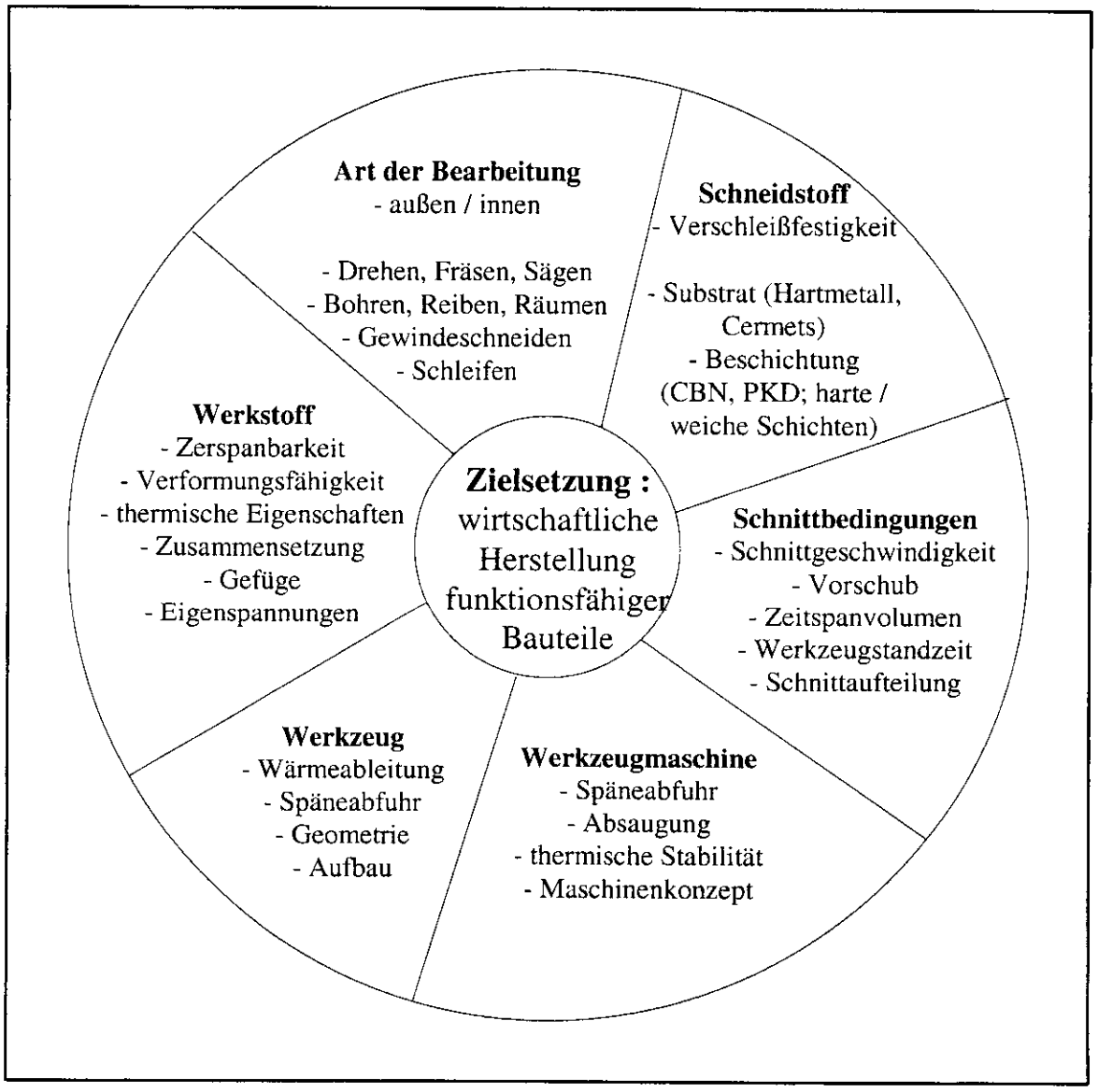
Zu Beginn von Phase I wurde die Frage nach der technologischen Machbarkeit beantwortet. Dazu wurden zwei für das Produktspektrum typische Bauteile betrachtet, wobei jeweils alle zur Herstellung des jeweiligen Bauteils eingesetzten Fertigungsverfahren (z.B. Bohren, Sägen, Gewindeschneiden, Drehen) bezüglich ihrer Eignung zur Trockenbearbeitung analysiert wurden.

Nach bestätigter technologischer Eignung zur Trockenbearbeitung wurden die Teile auf vom Hersteller umgerüsteten Nassbearbeitungsmaschinen (Mikron-Maschinen) trocken gefertigt.

5.2.1 Methodisches Vorgehen

Die Frage einer möglichen Realisierung von Trockenbearbeitungsverfahren ist sowohl methodisch als auch zeitlich auf verschiedenen Ebenen zu betrachten. Zum einen werden Ergebnisse und Erkenntnisse angestrebt, die sich kurzfristig, d.h. auf der Basis der derzeit eingesetzten Fertigungstechnologie (existierende Maschinen und Schneidstoffe) umsetzen lassen. Zum anderen werden Ergebnisse auch im Hinblick auf die Beschaffung der nächsten Generation von Werkzeugmaschinen und der zugehörigen Werkzeuge bei einer umfassenden Umstellung der spanenden Fertigungstechnologie in Richtung Trockenbearbeitung angestrebt (Phase II).

Abbildung 5-2: Einflussgrößen bei Trockenbearbeitung



Ausgehend vom Prozess ist es für eine Realisierung und Umsetzung der Trockenbearbeitung unumgänglich, alle Größen in die Betrachtungen einzubeziehen, die das Bearbeitungsergebnis beeinflussen, und ihre gegenseitigen Wechselwirkungen zu berücksichtigen (vgl. Abbildung 5-2).

Im Fokus der Betrachtungen steht das Bauteil. Zielsetzung ist es, unter Produktionsbedingungen im Trockenschnitt funktionsfähige Bauteile wirtschaftlich herzustellen. Aufgrund der vielfältigen Einflüsse erfordert dies jedoch, dass in Abhängigkeit von Werkstoff, Geometrie, Anforderungen an Genauigkeit, Oberflächen- und Randzonenausbildung sowie der durchzuführenden Bearbeitungsoperationen bei jeder Bearbeitungsaufgabe die Machbarkeit einer Trockenbearbeitung mit angepassten Werkzeugen und Werkzeugmaschinen zu prüfen und gegebenenfalls zu realisieren ist.

Methodisch kann die Trockenbearbeitung in verschiedene primäre Problemfelder und korrespondierende Untersuchungsbereiche unterteilt werden. Dies sind:

- Geeignete Schneidstofftechnologie,
- Anpassung der Werkzeugtechnologie, insbesondere die Abstimmung der Schneidenform (Werkzeugwinkel und Schneidenfeingeometrie),
- Optimierung der Schnittbedingungen (z.B. Schnittgeschwindigkeit, Vorschub) auf Basis obiger Änderungen,
- gegebenenfalls Einsatz von Minimalmengenschmiersystemen,
- Anpassung der Werkzeugmaschine zur Erreichung der geforderten Prozesssicherheit.

Hinzu kommen weitere Bereiche, die sich aus der Änderung der thermischen Bedingungen der Fertigung (Werkstück, Fertigungsmaschine) ergeben:

- Randschichtbeeinflussung am Werkstück (Oberflächengüte, Gefügeänderungen),
- thermische Dehnungen im Werkstück und daraus resultierende Formfehler nach der Bearbeitung,
- Positionierungsungenauigkeiten der Werkzeugmaschine und daraus resultierende Ungenauigkeiten bei der Bearbeitung.

5.2.2 Beschreibung der Referenzbauteile

Das Produktspektrum des beteiligten Unternehmens besteht größtenteils aus spanend hergestellten Messingkleinbauteilen für die Elektroindustrie (vgl. Abschnitt 3). Derartige Bauteile werden jährlich in millionenfacher Stückzahl benötigt.

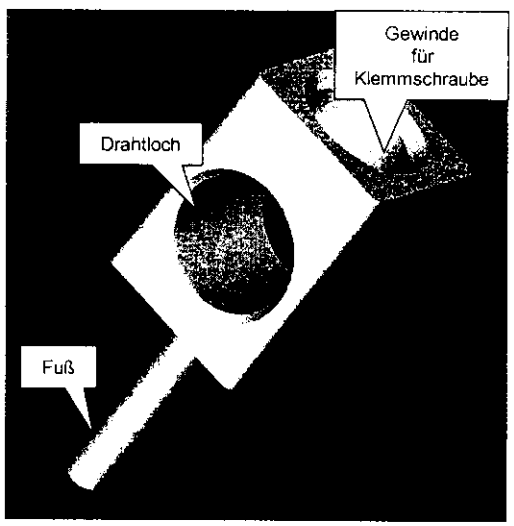
Charakteristisch für die Massenfertigung solcher Teile ist, dass das Rohmaterial in Form eines gezogenen Drahts als Coil oder als Stange angeliefert wird. Der Außendurchmesser

des Drahts entspricht in der Regel dem größten Durchmesser des Bauteils. Die zu verarbeitende Durchmesser liegen bei maximal 10 mm.

Bauteil 1

Das erste Referenzbauteil „Stiftklemme" (Bauteil 1; vgl. Abbildung 5-3) dient zur Befestigung von Signalleitungen o. ä. an Platinen der Elektroindustrie. Der Werkstückstoff ist Messing nach DIN 17 660 (CuZn38Pb1,5).

Abbildung 5-3: Bauteil 1



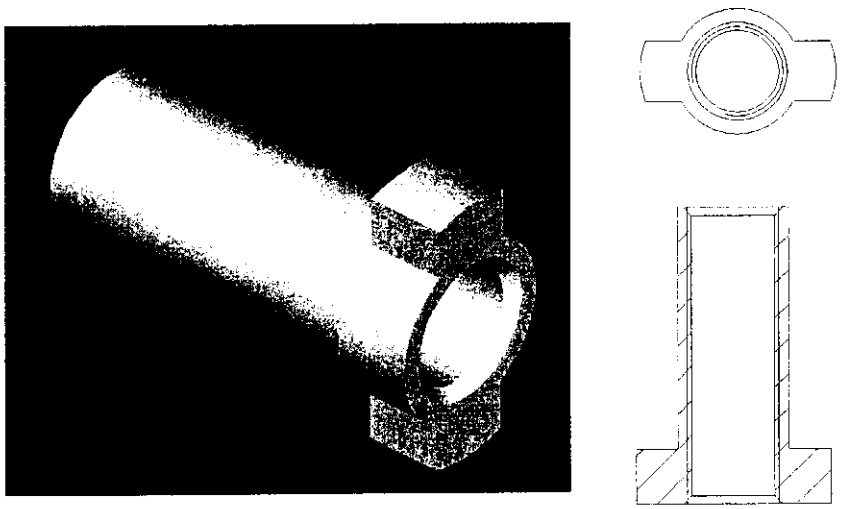
Die Stiftklemme ist ein prismatisches Bauteil, das drei Konstruktionsmerkmale besitzt. Der Fuß der Klemme ist als Stift ausgebildet. Mit ihm wird die Klemme mit der Platine verlötet. Das Durchgangsloch der Klemme nimmt den zu befestigenden Draht auf. Die Gewindebohrung am oberen Ende der Klemme enthält die Klemmschraube zur Befestigung des Drahts. Die Länge des Bauteils beträgt ca. 11 mm, das Kantenmaß liegt bei ca. 4 mm.

Die einzelnen Fertigungsschritte des Bauteils sind von der verwendeten Produktionsmaschine und der angewendeten Fertigungstechnik (nass oder trocken) abhängig. Die Beschreibung der Fertigungsschritte findet sich in Abschnitten 5.2.4.

Bauteil 2

Das zweite Referenzbauteil „Bördelbuchse" wird wie Bauteil 1 aus Messing gefertigt. Es unterscheidet sich von Bauteil 1 vor allem dadurch, dass es sich um einen rotationssymmetrischen Körper mit hohem Zerspanvolumen handelt. Das Bauteil weist ein über seine ganze Länge eingebrachtes Innengewinde auf. Die zur Fertigung des Gewindes erforderliche Bohrbearbeitung muss als verfahrenskritische Zerspanoperation eingestuft werden, denn die Bohrung besitzt ein sehr großes Längen/Durchmesser-Verhältnis (l/d). Hinzu kommt, dass die Wandstärke des Bauteils relativ gering ist (Bauteil 2; vgl. Abbildung 5-4).

Abbildung 5-4: Bauteil 2



Auch hier findet sich die Darstellung der Fertigungsschritte, die sich je nach angewandter Fertigungstechnologie stark voneinander unterscheiden, in Abschnitten 5.2.4.

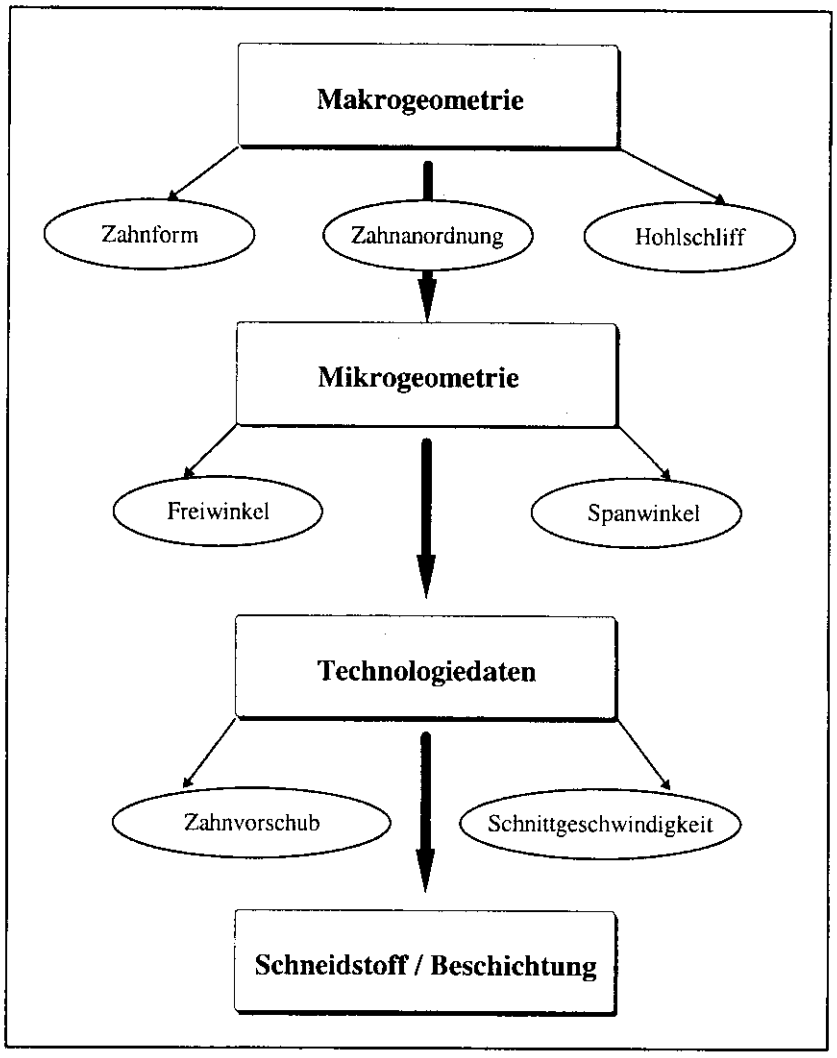
5.2.3 Grundlagenuntersuchungen

Untersuchungsprogramm

Für die Grundlagenuntersuchungen wurde das Sägen exemplarisch herausgegriffen, da dieses Fertigungsverfahren eine zentrale Rolle bei der Fertigung der Bauteile darstellt. Das Rohmaterial kommt in Form eines Drahts vom Coil in die Maschine und muss zur Herstellung der einzelnen Bauteile abgelängt werden. Gelänge es nicht, diesen Fertigungsschritt prozesssicher auf Trockenbearbeitung umzustellen, so wären alle weiteren Anstrengungen an anderen Fertigungsoperationen vergeblich. Zudem eignet sich das Sägen aufgrund seiner fertigungstechnischen Eigenschaften zum Sammeln von Erfahrungen mit möglichen Schwierigkeiten bei der Trockenbearbeitung und für das Auffinden allgemeiner Lösungsansätze für alle Verfahren mit unterbrochenen Schnitt (z.B. Fräsen, Räumen, Gewindeschneiden).

Die Untersuchungen wurden mit einer im Unternehmen entwickelten konventionellen Werkzeugmaschine durchgeführt. Diese Maschine wurde aus dem laufenden Produktionsprozess separiert, um alle Einflüsse, die sich aus dem Umfeld der Nassbearbeitung ergeben könnten (z.B. Ölnebel), auszuschließen. Die zeitliche und thematische Vorgehensweise im Sägeprozess erfolgte gemäß Abbildung 5-5.

Abbildung 5-5: Vorgehensweise und bearbeitete Problemfelder bei den Grundsatzuntersuchungen



Zunächst wurde die Werkzeugmakrogeometrie an die geänderten Randbedingungen angepasst, um den Spanabtransport von der Zerspanstelle trocken zu ermöglichen. Durchgeführte Änderungen beziehen sich auf die Zahnform und den Hohlschliff der Zähne (vgl. Abbildung 5-5). Gezielte Anpassungen der Werkzeugmikrogeometrie wie z.B. Anpassungen der Span- und Freiwinkel am Zahn dienten dazu, den Spanfluss zu verbessern. Im Rahmen weiterer Untersuchungen wurde geklärt, inwieweit die Werkstückqualität bzw. die Standzeiten durch Variation der technischen Daten (Vorschub pro Zahn, Schnittgeschwindigkeit) bei trockener Bearbeitung beeinflusst werden. Ausgehend von den Vorschüben und Schnittgeschwindigkeiten im Produktionsprozess wurden die Vorschübe und Schnittgeschwindigkeiten jeweils systematisch erhöht bzw. erniedrigt (vgl. Tabelle 5-1).

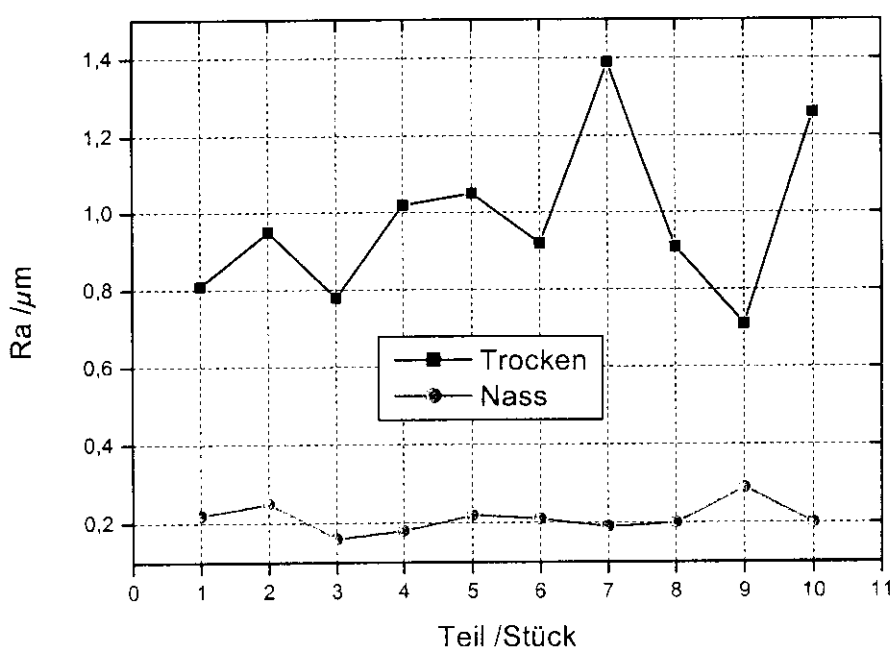
Tabelle 5-1: Variation der Schnittparameter Vorschub v_C und Schnittgeschwindigkeit f_Z unter Verwendung von Standardwerkzeugen beim Sägen

Vorschub v_C	**Schnittgeschwindigkeit f_Z**				
	0,25 x Standard	0,5 x Standard	Standard	1,5 x Standard	2 x Standard
0,25 x Standard			x	x	x
0,5 x Standard			x	x	x
Standard	x	x	x	x	x
1,5 x Standard	x	x	x	x	x
2 x Standard	x	x	x	x	x

Ergebnisse der Grundlagenuntersuchungen

Die Untersuchungen bei Standardbedingungen zeigen, dass die Oberflächengüte bei der Trockenbearbeitung mit der Rauheitsklasse N7-N8 (Nassbearbeitung Rauheitsklasse N5) im Toleranzbereich liegt (vgl. Abbildung 5-6). Der höhere Wert der Trockenbearbeitung gegenüber der Nassbearbeitung ist vor allem auf die Adhäsionsneigung des Messingwerkstoffes auf den Nebenfreiflächen im Bereich der Zahnecken zurückzuführen. Diese Verklebeneigung nimmt mit zunehmendem Vorschub je Zahn bei konstanter Schnittgeschwindigkeit zu. Eine Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit dagegen wirkt sich bis zu einer Grenze (2-fache Schnittgeschwindkeit) verklebungsmindernd aus.

Abbildung 5-6: Rauheitsvergleich zwischen Trocken- und Nassbearbeitung bei Standardschnittbedingungen beim Sägen



Die Variation der technologischen Daten zeigt ein Optimum der Standzeit des Werkzeugs bei doppeltem Vorschub je Zahn (bezogen auf die Produktionsbedingungen der Nassbearbeitung) und einer um 50 % erhöhten Schnittgeschwindigkeit. Die Oberflächenbeschaffenheit der Bauteile lag im Bereich der Rauheitsklasse N8. Der Ansatz, die Oberflächenqualität der Bauteile durch eine geeignete Beschichtung des Werkzeugs zu verbessern, erbrachte keine positiven Ergebnisse. Aufgrund des erhöhten Schneidkantenradius durch die Beschichtung und der geringeren Spanungsdicke kommt es zu erhöhter Reibung in der Kontaktzone und damit zu schlechteren Oberflächengüten, so dass ein beschichtetes Werkzeug nicht für die trockene Messingbearbeitung geeignet ist. Ebenfalls zeigte eine Spanwinkelvariation in Bezug auf eine Verbesserung der Oberflächengüte keine Vorteile. Zudem war bei einem größeren Spanwinkel eine starke Standzeitreduzierung zu verzeichnen.

Zusammenfassend bleibt für das Sägen festzuhalten, dass bei der Trockenbearbeitung der verwendeten Messinglegierung die besten Ergebnisse in Bezug auf die Standzeit bei einem doppelten Standardvorschub je Zahn sowie einer 1,5-fachen Standardschnittgeschwindigkeit unter Einsatz von Vollhartmetallwerkzeugen erzielt werden. Demgegenüber steht im Vergleich zur Zerspanung unter Verwendung von Kühlschmierstoffen jedoch eine Einbuße der Oberflächenqualität bei der Trockenbearbeitung. Grundsätzlich ist eine Messingbearbeitung ohne Kühlschmierstoff möglich, da die geforderten Werkstückqualitäten für das untersuchte Bauteilespektrum erreicht werden können. Die Werkzeugstandzeiten können sich jedoch gegenüber der Nassbearbeitung reduzieren.

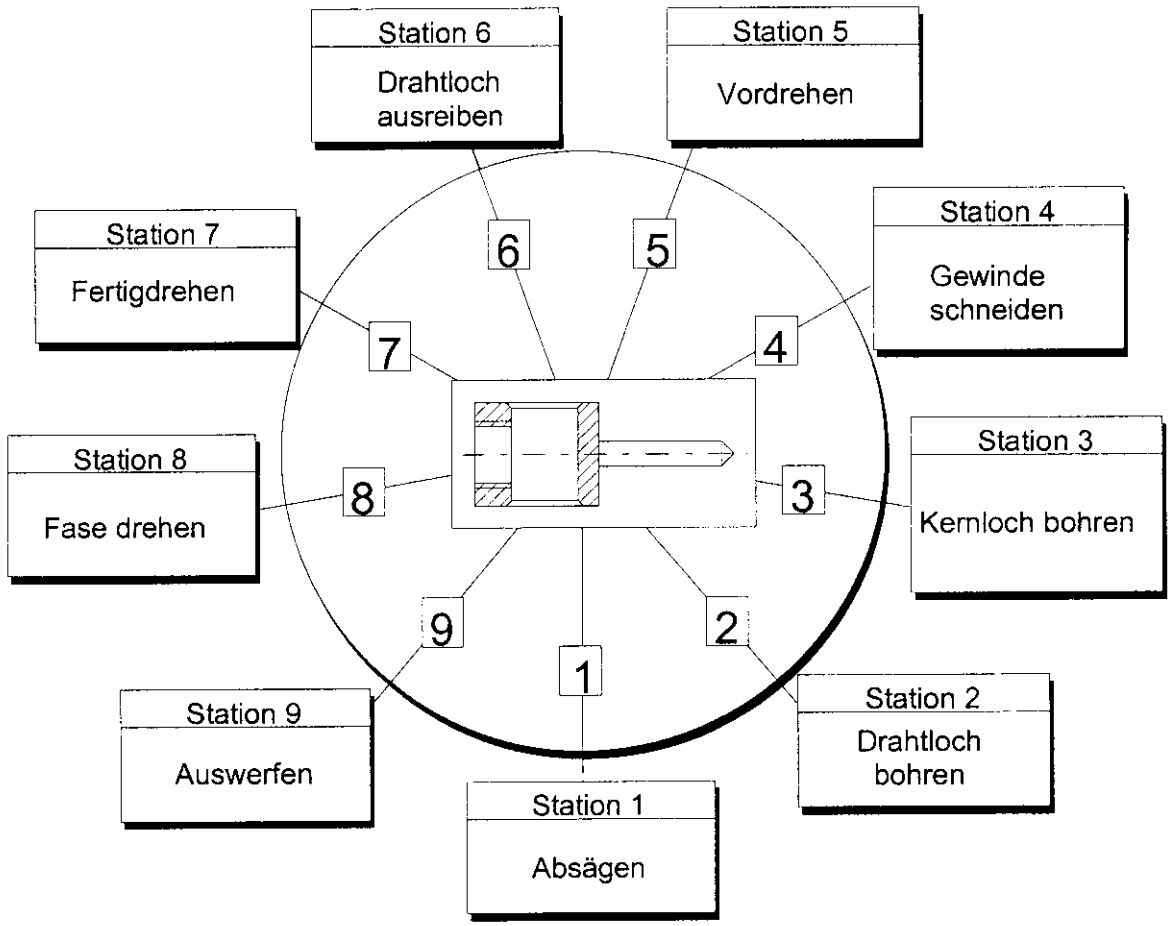
5.2.4 Umstellung der Fertigung - Bauteil 1

Analyse der Nassbearbeitung

Die Fertigung von Bauteil 1 unter KSS-Einsatz erfolgt in acht Bearbeitungsstufen auf einer Rundschalttellermaschine (A 3-Maschine). Der Aufbau der Steuerung und der Antriebe sind auf das Teilespektrum abgestimmt. Dabei sind zur Erzielung kurzer Umrüstzeiten die einzelnen Bearbeitungsstationen modular aufgebaut und werden über ein Werkstücktransportsystem miteinander verbunden. Die Bearbeitungsstationen können dabei in verschiedenen Maschinen zum Einsatz kommen.

Die Taktzeit beträgt 1,09 Sekunden pro Bauteil. Die Steuerung der Bearbeitungsstationen und des Werkstücktransportes erfolgt über Kurvenscheiben. Zur Übersicht ist in Abbildung 5-7 der schematische Aufbau der Maschine dargestellt.

Abbildung 5-7: Schematischer Aufbau der A 3-Maschine (Rundtaktmaschine) zur Herstellung von Bauteil 1



Zur Dokumentation der Nassbearbeitung wurden für alle acht Bearbeitungsschritte die wichtigsten fertigungstechnischen Kenngrößen erhoben. Dabei wurden nicht nur zerspantechnologische Parameter festgehalten, sondern auch maschinenbedingte Faktoren (z.B. Späneabtransport, Spindelanordnung) dokumentiert. In den Tabellen 5-2 und 5-3 sind exemplarisch die Daten für zwei Fertigungsschritte dargestellt. Hierbei wurden diejenigen Daten ausgewählt, die bei der Umstellung des Prozesses auf Trockenbearbeitung aller Voraussicht nach zu ändern sind.

Tabelle 5-2: Sägen

Sägen - Nassbearbeitung	
Steuerung	kurvengesteuert
Werkzeug	Kreissägeblatt DIN 1837
Werkstoff	HSS
Austauschkriterium	Gratbildung
Nachschliff	Spanfläche
Beschichtung	ohne
Standzeit	280.000 Teile
Schnittbedingungen	b = 1 mm v_c = 447 m/min t' = 4 mm
Spindelanordnung	waagrecht
Späneabfuhr	mit dem Öl

Tabelle 5-3: Bohren

Bohren - Nassbearbeitung	
Steuerung	kurvengesteuert
Werkzeug	2 Flächenspitzbohrer
Werkstoff	K 10
Austauschkriterium	Gratbildung
Nachschliff	Freifläche
Beschichtung	ohne
Standzeit	1.300.000 Teile
Schnittbedingungen	s = 1 mm v_c = 66 m/min
Spindelanordnung	senkrecht
Späneabfuhr	mit dem Öl

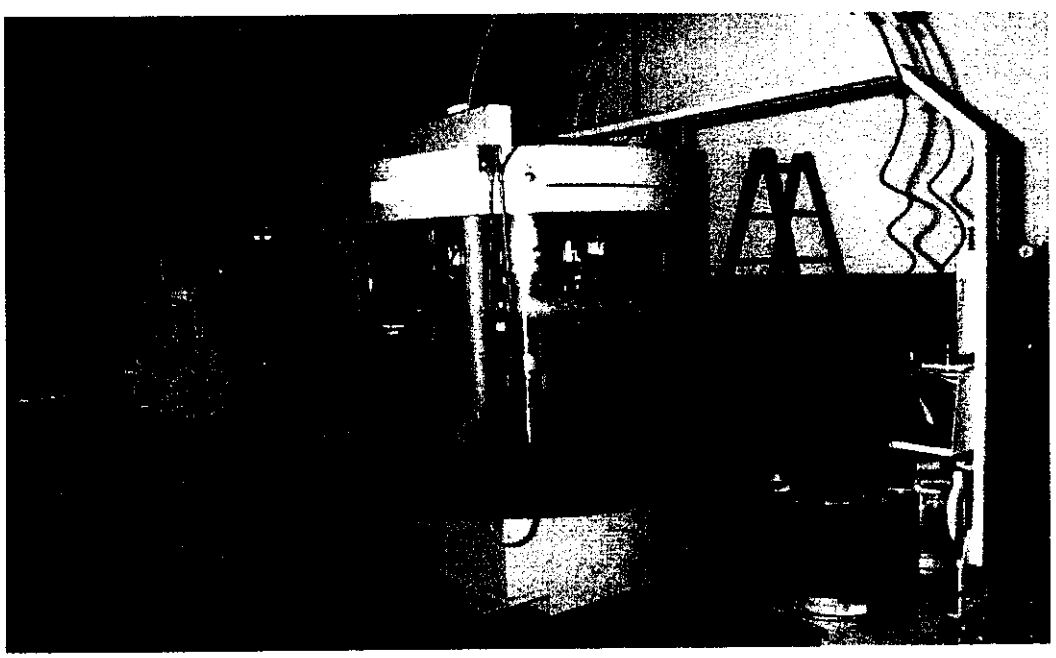
Analyse der Trockenbearbeitung

Bei Bauteil 1 kommen unterschiedliche Fertigungsverfahren des unterbrochenen und kontinuierlichen Schnitts zum Einsatz. Ähnlich wie bei der Nassbearbeitung wurden auch bei der Trockenbearbeitung alle fertigungstechnisch relevanten Daten dokumentiert. Basis für den folgenden Vergleich sind gleiche oder zumindest ähnliche Standzeiten der Werkzeuge. Zu Beginn des Projekts wurden die Prozesse unter Qualitätsrestriktionen optimiert. Anschließend wurden die Standzeiten der Werkzeuge entsprechend den in den Grundsatzuntersuchungen gefundenen Ansätzen verbessert. Grundsätzlich kann festgehalten werden, dass sowohl durch eine Änderung der Werkzeugmakrogeometrie als auch durch eine Be-

schichtung der Werkzeuge keine wesentlichen Verbesserungen des Bearbeitungsergebnisses erreicht werden konnten. Als erfolgreichster Weg zur Trockenbearbeitung der betrachteten Messinglegierung hat sich die Anpassung der Schnittparameter herausgestellt. Dies ist auch unter wirtschaftlichen Aspekten interessant, da so bei der Umstellung auf Trockenbearbeitung nicht mit erhöhten Werkzeugkosten (z.B. Ent- und Wiederbeschichten, erhöhter Werkzeuglagerbestand durch Spezialgeometrien) gerechnet werden muss.

Die Umstellung auf die Trockenbearbeitung erfolgte in Phase I mit einem am Markt erhältlichen Bearbeitungszentrum der Firma Mikron, das ursprünglich für die Nassbearbeitung entwickelt worden war, für die Trockenbearbeitung herstellerseitig jedoch mit einer Späneabsaugung ausgerüstet und geringfügig konstruktiv geändert wurde (vgl. Abbildung 5-8).

Abbildung 5-8: An die Trockenbearbeitung angepasste Werkzeugmaschine



Der Werkstücktransport erfolgt über eine Tellerschaltung mit Malteserkreuz. Im Unterschied hierzu wurde der Werkstücktransport in der Nassfertigung bisher über eine Kurvensteuerung realisiert. Bei der Mikron-Maschine besteht für Bauteil 1 die Möglichkeit, zwei Bauteile parallel zu bearbeiten, wobei die Sägeeinheit beide Linien versorgt. Durch die halbrunde Anordnung der beiden Bearbeitungsketten um die zentrale Steuereinheit können die geforderten hohen Stückzahlen der Serie in wesentlich kürzerer Zeit erreicht werden.

Der entscheidende Unterschied zwischen der alten Nass- und der neuen Trockenbearbeitungsmaschine ist darin zu sehen, dass durch den Einsatz anderer Spindeln mit höherem Drehzahlbereich höhere Schnittgeschwindigkeiten möglich sind. Daneben wurde eine Späneabsaugung installiert, um die anfallenden Späne schnell und so vollständig wie mög-

lich von der Zerspanstelle zu entfernen. Die Auslegung und Dimensionierung der Absaugung führt zu einer weniger guten Zugänglichkeit der einzelnen Bearbeitungsstufen und zusammen mit den hohen Umdrehungszahlen der Spindeln zu einem erhöhten Geräuschpegel.

Zu Beginn der Trockenfertigung mit der Mikron-Maschine zeigte sich, dass es bei der Absaugung in hohem Maße zu abrasivem Verschleiß der einzelnen Komponenten (z.B. Schläuche) kommt. Diesem Effekt kann aber durch eine geeignete Materialauswahl begegnet werden. Das größte Problem der Trockenbearbeitung liegt darin, dass einzelne Späne beim Werkstücktransport, in den Werkstückspannvorrichtungen, am Werkzeug und bei der Teileentladung verklemmen. Durch eine gezielte Anpassung der Absaugvorrichtung (Leistung, Anordnung der Saugdüsen, Optimierung des Strömungskanals) und durch Integration zusätzlicher Luftdüsen konnte ein prozesssicherer Einsatz der Maschine erreicht werden. Während der Produktion zeigte sich zudem, dass es zu erhöhtem Verschleiß an den bewegten Teilen der Werkzeugmaschine (Lager, Hebel) kommt. Ursache hierfür ist, dass mit dem Verzicht auf den Kühlschmierstoff auch dessen Schmierwirkung auf die Maschinenkomponenten entfällt.

Die kontinuierliche Optimierung des Zerspanprozesses über nunmehr 4 ½ Jahre Fertigungszeit und die stetige Detailverbesserung an der Mikron-Maschine haben dazu geführt, dass die Verfügbarkeit mittlerweile bis zu 90 % beträgt und bisher ca. 190 Millionen Teile trocken gefertigt werden konnten.

Vergleich zwischen Nass- und Trockenbearbeitung

Nass- und der Trockenbearbeitung werden zunächst hinsichtlich des Fertigungsablaufs miteinander verglichen. Diese Analyse zeigt, inwieweit Bearbeitungsoperationen entfallen, zusätzliche Fertigungsschritte zusammengelegt werden konnten oder neu hinzugefügt werden mussten. Aus Abbildung 5-9 lassen sich folgende Ergebnisse ableiten:

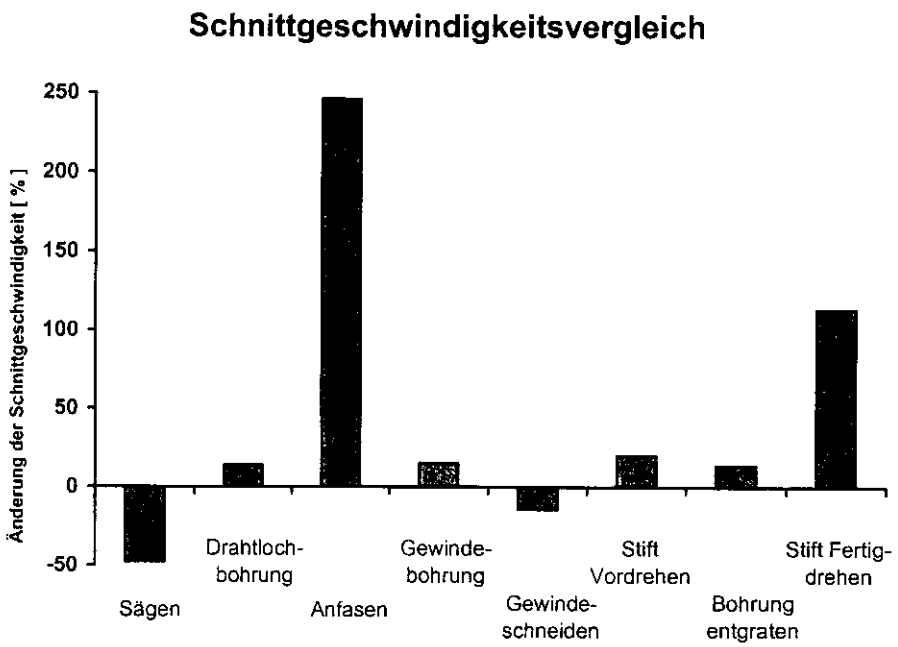
- Aufgrund der Änderung des Maschinenaufbaus, deren Ursache im Werkstücktransport liegt (Malteserkreuzsteuerung, halbrunde Anordnung der Bearbeitungseinheiten), weicht die Bearbeitungsfolge der Nass- und Trockenbearbeitung voneinander ab.
- Um die Taktzeit zu reduzieren, erfolgte bei der Trockenbearbeitung eine Aufteilung der Bearbeitungsoperationen auf eine größere Anzahl Schritte.
- Durch das Maschinenkonzept der Mikron-Maschine können mehrere Bearbeitungsschritte/Verfahren an einer Station durchgeführt werden. Dies beruht im wesentlichen auf der Möglichkeit, die Bearbeitungseinheiten sowohl horizontal als auch vertikal anzuordnen.

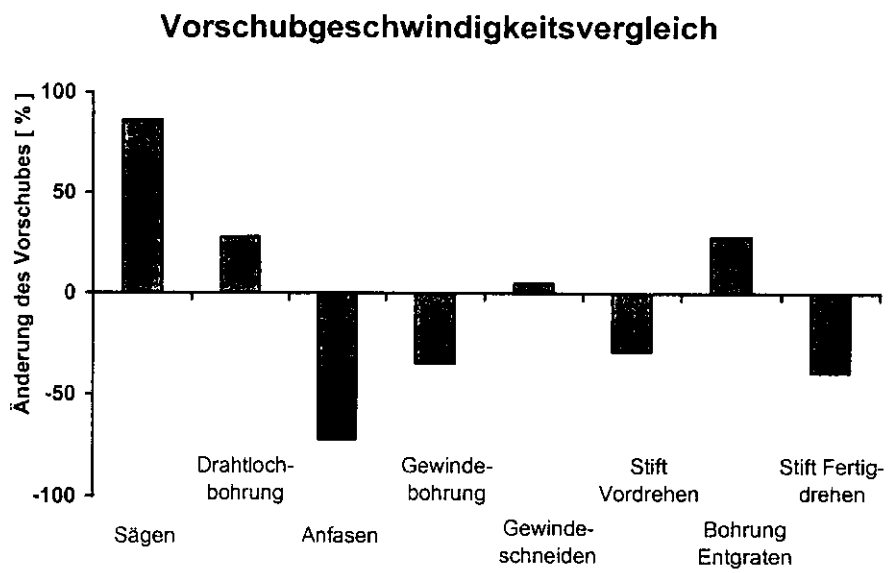
Abbildung 5-9: Vergleich des Fertigungsablaufs – Bauteil 1

Nassbearbeitung		Trockenbearbeitung	
Station		Station	
1 Zuführen Absägen		1 Zuführen Absägen	
		2 Zentrieren	
2 Drahtloch bohren mit Fase		3 Bohren	
3 Kernloch bohren und leicht ansenken		4 Anfasen	
4 Gewinde schneiden		5,6 Stift vordrehen Zentrieren Anfasen Gewinde	
5 Vordrehen		7,8 Plandrehen Gewindebohrung bohren	
6 Drahtloch ausreiben		9,10 Spitze fertigdrehen Stift vordrehen	
7 Fertigdrehen mit Fase		11,12 Stift fertigdrehen Gewinde- schneiden	
8 Fase drehen mit Führungsbuchse		13 Entgraten	
9 Auswerfen		14 Auswerfen	

Neben dem Fertigungsablauf wurden zwei wesentliche Fertigungsparameter (Vorschub und Schnittgeschwindigkeit) quantitativ miteinander verglichen. In Abbildung 5-10 sind die prozentualen Änderungen der Schnittbedingungen der jeweiligen Bearbeitungsstationen im Vergleich zur Nassbearbeitung mit Kühlschmierstoffen dokumentiert.

Abbildung 5-10: Trockenbearbeitung im Vergleich zur Nassbearbeitung - Bauteil 1





Man erkennt deutlich, dass es bei Umstellung auf Trockenbearbeitung für die unterschiedlichen Fertigungsstationen keine einheitliche Tendenz hinsichtlich Vorschub- und Schnittgeschwindigkeitsentwicklung gibt. Die Anpassungen an die geänderten Randbedingungen müssen jeweils auf den einzelnen Prozess bezogen erfolgen, wobei ein Trend zu erhöhten Schnittgeschwindigkeiten erkennbar ist. Dies ist darauf zurückzuführen, dass Restriktionen der Spindelleistung der Mikron-Maschine dazu führten, die Bearbeitungsoperationen bei höheren Drehzahlen zu realisieren. Im folgenden werden exemplarisch einzelne Fertigungsverfahren hinsichtlich ihrer Umstellung auf die Trockenbearbeitung erläutert.

Sägen

Wie in den Grundsatzuntersuchungen festgestellt, lässt sich durch Vorschubgeschwindigkeitserhöhungen die Adhäsionsneigung des Werkstoffes reduzieren. Dieser Trend zeigte sich auch unter Produktionsbedingungen, wobei es durch die erhöhten Spanungsdicken am Ende der Standzeit des Werkzeuges teilweise zu einer leichten Gratbildung an der Schnittkante kam. Ein rechtzeitiges Auswechseln des Werkzeuges ermöglicht aber einen prozesssicheren Einsatz, wobei es nur zu geringen Standzeitschwankungen kommt. Durch den Einsatz von Hartmetallwerkzeugen bei der Trockenbearbeitung gegenüber dem konventionellen HSS-Substrat bei der Nassbearbeitung konnten deutliche Taktzeitreduzierungen erreicht werden.

Drahtlochbohrung

Aufgrund der Einbauverhältnisse wurde bei der Mikron-Maschine eine horizontale Spindelanordnung eingeführt (Nassbearbeitung: senkrecht). Die beste Lösung für die Spanabfuhr, die Überkopfbearbeitung, konnte aufgrund geometrischer Restriktionen nicht realisiert werden.

Bei der Trockenbearbeitung wurde im Vergleich zur Nassbearbeitung eine Steigerung der Schnittgeschwindigkeit und des Vorschubs erreicht. Direkte Folge war eine Taktzeitreduzierung um 40 %. Bei der Nassbearbeitung wurden die Werkzeuge ausgewechselt, wenn es zu einer Gratbildung am Werkstück, beziehungsweise zum Werkzeugbruch kam. Bei der Trockenbearbeitung hingegen ist, ähnlich wie beim Sägen, das Werkzeugwechselkriterium eine ungenügende Qualität der Werkstückoberfläche. Eine Gefügebeeinflussung des Werkstückstoffes wurde nicht beobachtet.

Gewindeschneiden

Charakteristisch für das Gewindeschneiden sind geringe Spanungsdicken und kleine Freiwinkel am Werkzeug. Beides führt dazu, dass aus dem dadurch erhöhten Anteil an Reibarbeit bei der Zerspanung hohe Temperaturen resultieren. Bei der eingesetzten Messinglegierung führen die hohen Zerspantemperaturen der Trockenbearbeitung zu einem Verkleben des Werkstoffs am Werkzeug und auch am Werkstück. Diese spezifischen Bedingungen des Gewindeschneidens haben dazu geführt, dass in der Produktion ein Minimalmengenschmiersystem (MMS) eingesetzt werden musste. Das mit einer Kolbenpumpe arbeitende

MMS-System führt über eine Düse geringste Mengen an Schmierstoff (ca. 2 ml/h) zielgerichtet an die Zerspanstelle heran. Durch das MMS-System werden im wesentlichen zwei Funktionen erfüllt. Zum einem wird die Reibung durch das Schmiermedium reduziert, zum anderen unterstützt der Luftvolumenstrom des MMS-Systems den Späneabtransport von der Zerspanstelle in die Späneabsaugeinrichtung. Mit Hilfe des geringen Ölvolumenstromes des MMS-Systems wurde eine prozesssichere Zerspanung erreicht. Der Einsatz des MMS-Systems führte in der Mikron-Maschine jedoch zum Verkleben kleinster Späne im Umfeld der Gewindeschneideinheit, so dass regelmäßig eine sorgfältige Reinigung durchgeführt werden muss.

Stift Fertigdrehen

Diese Operation mit kontinuierlicher Spanabnahme konnte durch eine deutliche Schnittgeschwindigkeitssteigerung, verbunden mit einer Vorschubreduzierung, trocken realisiert werden. Mit dieser Änderung geht, ähnlich wie beim Sägen und der Herstellung der Drahtlochbohrung, eine Taktzeitreduzierung einher.

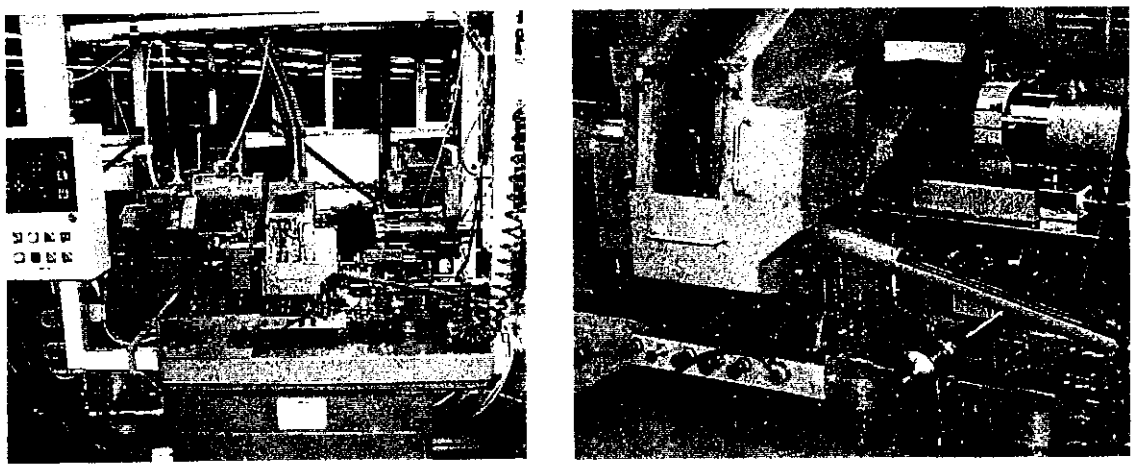
Abschließend bleibt festzustellen, dass das Trockenlegen der eigentlichen Zerspanstellen für das betrachtete Bauteil 1 - teilweise unter Verwendung eines MMS-Systems - erfolgreich möglich war. Auf Grund des Maschinenkonzepts der Mikron-Maschine ist damit eine deutliche Taktzeitreduzierung verbunden (Faktor 2,9), die sich positiv auf die Wirtschaftlichkeit auswirkt. Der fehlende Kühlschmierstoff in der Werkzeugmaschine führte zu einem höheren Instandhaltungsaufwand, hervorgerufen durch sich ablagernde Späne und den dadurch bedingten höheren Verschleiß. Durch nachträglich durchgeführte konstruktive Anpassungen der Mikron-Maschine konnte dieser Aufwand erheblich reduziert werden.

5.2.5 Umstellung der Fertigung - Bauteil 2

Analyse der Nassbearbeitung

Die Herstellung des Bauteils 2 erfolgt auf einer A 2-Maschine (Transfermaschine), wobei als Fertigungseinheiten einspindlige Drehmaschinen mit Abgreifeinrichtungen eingesetzt werden. Diese speziell an die Serienfertigung von Kleinteilen angepasste Maschine wurde von der Leipold GmbH im Eigenbau entwickelt und gefertigt. Der A 2-Maschinentyp zeichnet sich dadurch aus, dass durch die schnelle Umrüstung auf andere Werkstücke die Stillstandszeiten kurz sind. Die Spindelanordnungen sind waagrecht. Die Späne werden durch das Öl in integrierte Spänebehälter gespült. Das Öl übernimmt weiter die Aufgabe der Schmierung der gesamten Werkzeugmaschine und der Zusatzkomponenten. Die ölnebelhaltige Luft wird mit einer Absaugleistung von 8 m^3/min abgesaugt. Aufgrund einer Stückleistung von 54 Teilen/Minute werden hohe Anforderungen an den Werkstücktransport gestellt.

Abbildung 5-11: Nassbearbeitung mit der A 2-Maschine



Die Nassbearbeitung von Bauteil 2 erfolgt in vier Fertigungsstationen, wobei die Werkstücke in den Hauptspindeleinheiten in Spannzangen gehalten und in Greifern über Greiferbüchsen bzw. Spannzangen transportiert werden. Nach dem Richten und Spannen des Halbzeugs lässt sich der Arbeitsplan des Bauteils in folgende Stationen unterteilen (vgl. Tabelle 5-4).

Tabelle 5-4: Arbeitsplan Nassbearbeitung A 2-Maschine – Bauteil 2

Station	Fertigungsschritt
1	Drehen des äußeren Durchmessers und Bohren des 1. Innendurchmessers
2	Absägen der Bauteile
3	Bohren der Innenbohrung
4	Gewindeschneiden

Charakteristisch für die Nassbearbeitung ist, dass die geforderten Endmaße meist in einer Bearbeitungsstation hergestellt werden. Die Anordnung der einzelnen Bearbeitungsstationen zueinander ist so abgestimmt, dass gewährleistet ist, dass keine Späne der einzelnen Stationen die Zerspanung oder den Werkstücktransport der nachgeschalteten oder vorgeschalteten Station behindern.

Exemplarisch werden die Technologiedaten für die Fertigungsschritte Sägen und Bohren der Innenbohrung in den Tabellen 5-5 und 5-6 dargestellt.

Tabelle 5-5: Sägen

Sägen - Nassbearbeitung	
Steuerung	kurvengesteuert
Werkzeug	
Werkstoff	HSS
Austauschkriterium	Gratbildung
Nachschliff	Spanfläche
Beschichtung	ohne
Standzeit	61.000 Teile
Schnittbedingungen	f_z = 2,72 mm/U v_c = 622 m/min b = 0,8 mm t' = 6,5 mm
Spindelanordnung	waagrecht
Späneabfuhr	mit dem Öl

Tabelle 5-6: Langlochbohren

Langlochbohren - Nassbearbeitung	
Steuerung	kurvengesteuert
Werkzeug	
Werkstoff	HSS
Austauschkriterium	Gratbildung
Nachschliff	Freifläche
Beschichtung	ohne
Standzeit	180.000 Teile
Schnittbedingungen	s = 0,08 mm/U v_c = 66 m/min
Spindelanordnung	waagrecht
Späneabfuhr	mit dem Öl

Analyse der Trockenbearbeitung

Die Trockenbearbeitung des Bauteils 2 erfolgt ebenfalls auf einer Mikron-Maschine, wobei diese Maschine ähnlich aufgebaut ist wie die Mikron-Maschine zur Herstellung des Bauteils 1. Es konnten daher teilweise die maschinenspezifischen Lösungen und Erfahrungen der Trockenbearbeitung von Bauteil 1 übernommen werden. Infolge des Maschinenkonzepts können auch hier zwei Bauteile parallel gefertigt werden, wodurch sich die Ausbringung gegenüber der Nassbearbeitung verdoppelt. Die Steuerung der Einheiten erfolgt über

ein Malteserkreuz, wobei die Prozessüberwachung (z.B. Werkstücktransport, Form- und Maßkontrolle) über eine SPS-Steuerung realisiert wird. Größtes Problem bei der Trockenbearbeitung war auch hier der Späneabtransport, der letztlich durch den Einsatz und die Optimierung einer entsprechenden Absaugeinrichtung gelöst wurde.

Bei der technischen Realisierung der Trockenbearbeitung wurden zunächst die Technikdaten unter bestimmten Qualitätsanforderungen (z.B. Oberfläche, Gefüge, Aufschweißungen am Bauteil) an die geänderten Randbedingungen angepasst. Darauf aufbauend wurde analysiert, welche Modifikationen im Umfeld der Werkzeugmaschine notwendig sind. Ziel dieser iterativen und durch die Auswertung praktischer Erfahrungen geprägten Vorgehensweise war das Erreichen gleicher Taktzeit wie bei der Nassbearbeitung. Zudem zeigte sich, dass sich bei der Trockenbearbeitung die Werkzeugstandzeiten nur unwesentlich änderten.

In Tabelle 5-7 ist die Fertigungsfolge der Trockenbearbeitung von Bauteil 2 auf der Mikron-Maschine dargestellt. Ein Vergleich mit der Nassbearbeitung (vgl. Tabelle 5-4) zeigt, dass wesentlich mehr Bearbeitungsoperationen notwendig sind, um eine kühlschmierstoffreie Fertigung zu realisieren. Auch durch Optimierung der Werkzeugmakrogeometrie konnte bei der Einschnittbearbeitung keine reine Trockenbearbeitung ermöglicht werden. Für das Bohren des Innendurchmessers musste daher der aufwendigere Weg einer Schnittaufteilung gegangen werden, da bei dem vorliegendem l/d-Verhältnis von 4 eine Einschnittbearbeitung zum Verklemmen der Späne in der Wendelnut des Bohrwerkzeuges führte und eine Absaugung der Späne nicht möglich war.

Tabelle 5-7: Arbeitsplan Trockenbearbeitung Mikron-Maschine - Bauteil 2

Station	Fertigungsschritt
1	Zentrieren und Bohren des 1. Innendurchmessers
2	Plandrehen (oben) / Zentrieren und Anfasen (unten)
3	Vordrehen Außendurchmesser
4	Innendurchmesser Bohren 1. Schnitt
5	Innendurchmesser Bohren 2. Schnitt
6	Innendurchmesser Bohren 3. Schnitt
7	Gewindeschneiden
8	Fertigdrehen des Außendurchmessers

Die Operation Gewindeschneiden konnte, ähnlich wie bei Bauteil 1, nicht ohne den Einsatz eines Minimalmengenschmiersystems (MMS) realisiert werden.

Analog zur Nassbearbeitung wurden die Technologiedaten der Trockenbearbeitung dokumentiert. Untenstehend sind wiederum exemplarisch die Operationen Sägen und Bohren (3. Schnitt) wiedergegeben.

Tabelle 5-8: Sägen

Sägen - Trockenbearbeitung	
Steuerung	kurvengesteuert
Werkzeug	
Werkstoff	HM
Austauschkriterium	Profilmaß überschritten
Nachschliff	Spanfläche
Beschichtung	ohne
Standzeit	500.000 Teile
Schnittbedingungen	f_z = 2,72 mm/U v_c = 234,74 m/min t = 6,5 mm
Spindelanordnung	waagrecht
Späneabfuhr	Absauganlage

Tabelle 5-9: Langlochbohren (3. Schnitt)

Langlochbohren (3. Schnitt) - Trockenbearbeitung	
Steuerung	kurvengesteuert
Werkzeug	
Werkstoff	HM
Austauschkriterium	Lehrenhaltigkeit
Nachschliff	Freifläche
Beschichtung	ohne
Standzeit	180.000 Teile
Schnittbedingungen	s = 0,06 mm/U v_c = 72 m/min
Spindelanordnung	waagrecht
Späneabfuhr	Absauganlage

Vergleich zwischen Nass- und Trockenbearbeitung

Grundsätzlich kann festgehalten werden, dass sich trotz des veränderten Fertigungsablaufs bei der Trockenbearbeitung von Bauteil 2 auf der Mikron-Maschine (vgl. Tabelle 5-10) die Taktzeit nur geringfügig geändert hat. Die Mengenausbringung pro Zeiteinheit ist wegen der Möglichkeit der Mikron-Maschine, in parallelen Bearbeitungslinien gleichzeitig zu fertigen, jedoch doppelt so hoch wie bei der Nassbearbeitung.

Tabelle 5-10: Vergleich des Fertigungsablaufs - Bauteil 2

Nassbearbeitung		**Trockenbearbeitung**	
Station		Station	
		0	Absägen (außerhalb der Werkzeugmaschine)
1	Drehen Außen- und Innendurchmesser	1	Zentrieren und Bohren
2	Absägen	2	Plandrehen/Zentrieren und Anfasen
3	Bohren	3	Vordrehen
4	Gewindeschneiden	4 bis 6	Bohren Innendurchmesser (3 Schnitte)
		7	Gewindeschneiden
		8	Fertigdrehen außen

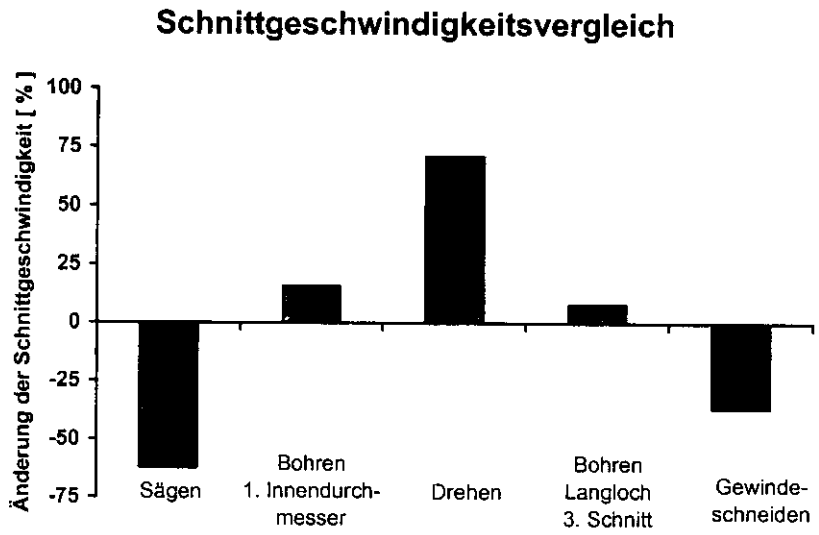
Ähnlich wie bei Bauteil 1 hat sich gezeigt, dass insbesondere durch die Implementierung einer wirksamen Absauganlage zum Späneabtransport ein prozesssicherer Betrieb möglich wird. Analog zu Bauteil 1 werden in Abbildung 5-12 die prozentualen Änderungen der Schnittbedingungen (Schnittgeschwindigkeit und Vorschub) dargestellt. Die Gegenüberstellung kann dabei nur für die auch in der Nassbearbeitung eingesetzten Fertigungsschritte erfolgen.

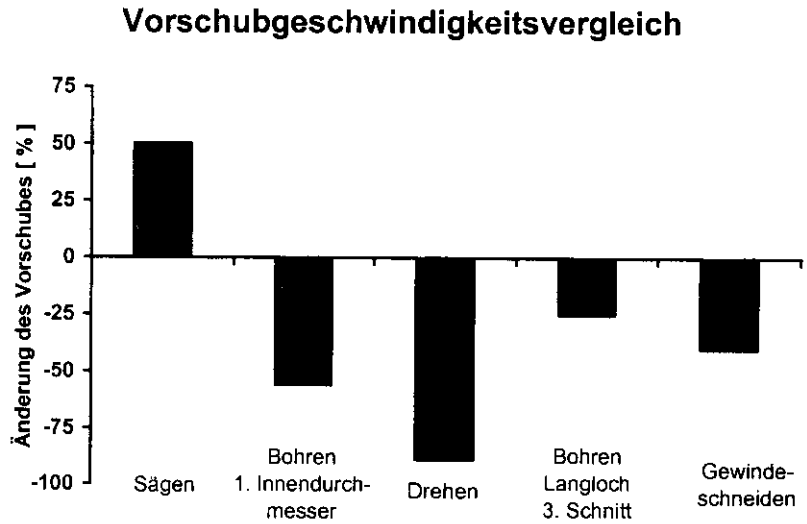
Beim Vergleich der Vorschubs- und Schnittgeschwindkeitsentwicklung von Bauteil 2 fällt auf, dass es auch hier, analog zu Bauteil 1, keine einheitlichen Tendenzen bei den verschiedenen Fertigungsverfahren gibt. Im folgenden werden exemplarisch einzelne Bearbeitungsprozesse miteinander verglichen.

Sägen

Durch die Reduzierung der Schnittgeschwindigkeit wird wie bei Bauteil 1 erreicht, dass die Klebeneigung des Werkstückstoffes gemindert wird. Bei dieser Operation wurde die Schnittgeschwindigkeit eingesetzt, die sich bereits bei dem Bauteil 1 als geeignet erwiesen hat. Durch die unterschiedliche Werkstückgeometrie kann jedoch nicht derselbe hohe Vorschub realisiert werden.

Abbildung 5-12: Trockenbearbeitung im Vergleich zur Nassbearbeitung - Bauteil 2





Drehen

Beim Drehen wurde die Schnittgeschwindigkeit gegenüber der Nassbearbeitung deutlich erhöht. Festzuhalten ist jedoch, dass der Absolutbetrag der Schnittgeschwindigkeit mit 136 m/min deutlich unterhalb der des Sägens liegt und für den Schneidstoff Hartmetall noch nicht die Warmfestigkeitsgrenze erreicht wird. Da die Taktzeit bei dieser Operation gleich bleiben konnte, war es möglich, den Vorschub des Werkzeuges entsprechend zurückzunehmen. Dadurch resultiert eine wesentlich geringere Werkzeugbelastung, die - verbunden mit der erhöhten Schnittgeschwindigkeit - zu einem reduzierten Verschleiß führt.

Gewindeschneiden

Die Umstellung des Gewindeschneidens auf Trockenbearbeitung erfolgte verfahrensbedingt mit einer Schnittgeschwindigkeitsreduzierung. Beim Gewindeschneiden entstehen durch die geometrisch engen Verhältnisse starke Reibkräfte, so dass das Werkzeug einer hohen thermischen und mechanischen Belastung unterliegt. Diese Belastungen konnten durch den Einsatz der MMS und eine Reduktion der Schnittdaten verringert werden. Die dadurch höhere Bearbeitungszeit wirkt sich in diesem Fall nicht auf die Taktzeit aus.

Abschließend bleibt auch bei dieser Bauteilgeometrie festzuhalten, dass eine Trockenbearbeitung fertigungstechnisch möglich ist. Auch bei Bauteil 2 zeigte sich, dass Zerspantechnik und Werkzeugmaschine an die geänderten Randbedingungen angepasst werden müssen.

5.2.6 Bewertung der Fertigungsalternativen

Nachfolgend werden aus den Erfahrungen mit der Trockenbearbeitung auf den Mikron-Maschinen in Projektphase I diejenigen Aspekte, die für die Trockenbearbeitung von Messingbauteilen in der Massenfertigung bedeutend sind, zusammengefasst sowie Lösungsansätze zur Übertragbarkeit auf andere Fertigungsaufgaben dargestellt. Zusätzlich wird auf Erkenntnisse hingewiesen, die für die Eigenkonstruktion von Werkzeugmaschinen in Phase II (vgl. Abschnitt 5.3) von Bedeutung sind.

Schmierung der Werkzeugmaschine

Da bei der Trockenbearbeitung der Kühlschmierstoff, der auch der Schmierung der Mechanik der Werkzeugmaschine dient, entfällt, muss für die Erhaltung der Funktionsfähigkeit der Trockenbearbeitungsmaschinen eine Schmierung der verschleißanfälligen mechanischen Teile (z.B. Kolben der Klemmstellen des Materialvorschubschlittens, sämtliche Führungen, Lagerungen, Getriebe, usw.) vorgesehen werden. Andernfalls kann es leicht zur Bildung von Passrost sowie zu Verschleiß durch Ablagerung von Feinspänen und Metallstaub kommen. Dies kann je nach Auslegung der Komponenten der Werkzeugmaschine beispielsweise durch eine Lebensdauerfüllung des jeweiligen Funktionsträgers mit Fett oder durch einen streng einzuhaltenden Schmier- und Wartungsplan der Maschine erreicht werden. Dieses Vorgehen ist bei der Nassbearbeitung nicht nötig, da die Komponenten der Werkzeugmaschine mit dem Kühlschmierstoff buchstäblich „geflutet" werden.

Sauberkeit von Werkstückmaterial und Werkzeugmaschine

Aufgrund des fehlenden reinigenden Schmierstoffstroms im Arbeitsbereich der Maschine muss besonders auf die Sauberkeit des zugeführten Werkstoffs geachtet werden. Da der zu zerspanende Werkstoff vom Herstellungsprozess des Lieferanten Verunreinigungen jedweder Art aufweisen kann (Schmutzrückstände, Metallpartikel, usw.) muss dafür gesorgt

werden, dass sich diese Verunreinigungen nicht als Abrieb an den Führungsbacken der Werkstoffführung der Werkzeugmaschine festsetzen, da dies im Laufe der Zeit zu einer Riefenbildung am Messingbauteil führen kann. Auch im Hinblick darauf, dass bei der Trockenbearbeitung nachgelagerte Prozessschritte entfallen können (z.B. Entfettungsanlage), sollten beispielsweise Ziehfettrückstände auf dem Halbzeug bereits von den Lieferanten entfernt werden.

Absaugung der Späne

Da die Sauberkeit vor allem im Hinblick auf die Spanfreiheit im Bereich der Klemmstellen gegeben sein muss, um das Risiko von Druckstellen auf den Werkstücken durch liegen gebliebene Späne zu vermindern, hat es sich bewährt, möglichst an jeder Bearbeitungseinheit speziell dafür angepasste Absaug- bzw. Druckluftvorrichtungen vorzusehen. Eine Absaugeinrichtung schützt die Werkzeuge sowohl vor der Gefahr einer Beschädigung durch liegen gebliebene Späne an der Wirkstelle, als auch vor anhaftenden Spänen am Werkzeug bei der Bearbeitung des nächsten Bauteils und ermöglicht so ein optimales Fertigungsergebnis. Die einzelnen Absaugeinrichtungen sind so zu kapseln, dass benachbarte Einheiten, Klemmstellen oder Führungseinheiten von eventuell herumfliegenden Spänen nicht beeinträchtigt werden. Die Gefahr von Spänenestern und deren Gefahrenpotential einer unkontrollierten thermischen Wärmeausdehnung wird dadurch zusätzlich gesenkt. Die Lösungen können je nach Fertigungsverfahren und Lage der Bearbeitungseinheiten zum Werkzeugmaschinentisch und zum bearbeitenden Werkstoff verschieden ausfallen.

Die erforderliche Absaugleistung jeder Einheit hängt stark von der anfallenden Spanmenge pro Zeiteinheit, der Spanform sowie von der Ausnutzung der Eigenschaften des jeweiligen Fertigungsverfahrens (z.B. Ausnutzung der Tangentialgeschwindigkeit der Späne) ab. Es ist offensichtlich, dass die Absaugleistung vom zerspanten Volumen und der Spanform abhängig ist. Um diesen Forderungen gerecht zu werden, bedarf es einer entsprechenden Ausstattung im Bereich der Vakuumpumpen und Kompressoren zur Bereitstellung der Absaug- bzw. Druckluftleistung.

Wegen der scharfen Späne und deren abrasiver Wirkung sind Absaugleitungen aus widerstandsfähigem Material vorzusehen. Wie sich in den Versuchsreihen herausstellte, haben dünnwandige Lamellenschläuche aus Polymerwerkstoffen wegen des schnellen Verschleißes, vor allem in gekrümmten Bereichen, eine zu geringe Lebensdauer.

Materialeigenspannungen

Überaus bedeutend ist die Vermeidung bzw. Beseitigung von Eigenspannungen im zu zerspanenden Material. Durch die fehlende Schmierung der Werkzeuge während des Schnitts und einer dadurch größeren Reibung, wirken sich Verklemmungen der Werkzeuge aufgrund innerer Materialspannungen noch stärker als bei der Nassbearbeitung auf die Standzeiten der Werkzeuge (Schmieren) und die Werkstückqualität (Schmierstellen) aus.

Diese Spannungen sind somit bei der Trockenbearbeitung unter allen Umständen zu vermeiden.

Da der zu zerspanende Werkstoff meist in Drahtform vom Lieferanten auf Spulen aufgewickelt zur Verarbeitung kommt, sind in ihm unvermeidlich Eigenspannungen vorhanden, die es zu beseitigen gilt. Dies kann mit Hilfe von Richtrollen geschehen. Ein Ansatz ist, nicht nur senkrechte Richtrollen einzusetzen, sondern das Material für den Trockenbearbeitungsprozess zukünftig sowohl waagerecht, als auch senkrecht zu richten. Torsionseigenspannungen können allerdings damit nicht eliminiert werden.

Zusätzlich können bei sehr starken Bearbeitungskräften in der Produktionslinie auch durch den jeweiligen Fertigungsprozess (Räumen, Fräsen mit großen Zahnvorschüben) unzulässig hohe spezifische Eigenspannungen in das Material induziert werden. Es ist daher auf eine zuverlässige Einspannung des Werkstückstoffes zu achten.

5.3 Phase II – Maschinenseitige Realisierung der Trockenbearbeitung mittels Eigenbaumaschinen

In Phase I konnte belegt werden, dass eine trockene Bearbeitung der ausgesuchten Bauteile mit angepasster Technologie möglich ist. Die Stückzeiten konnten bei vergleichbarer Bauteilgüte dabei konstant gehalten werden. Der Versuch, die trockene Fertigung mit umgerüsteten Nassbearbeitungsmaschinen durchzuführen, war zwar letztendlich erfolgreich, jedoch führte die erforderliche Spanabsaugung und der erhebliche Drucklufteinsatz zu einem hohen Energiebedarf (vgl. Abschnitt 6) und hohen Kosten. Die durch die Absaugungseinrichtung verursachten ungünstigen Raumverhältnissen im Arbeitsraum der Maschine sind vor allem bei Rüstarbeiten sehr störend. Weiter zeigte sich, dass der Pflegeaufwand der Mikron-Maschinen im Vergleich zur Nassbearbeitung trotz stetiger Optimierung recht hoch ist.

Durch den prinzipiellen Erfolge der Umstellung bestärkt und mit dem Erfahrungswissen der ersten Projektphase ausgestattet begann die Konstruktionsabteilung des Unternehmens damit, einen speziell für den Anwendungsfall „Massenfertigung von Messingkleinbauteilen" geeigneten Maschinentyp (A 10-Machine) zu entwickeln.

Die A 10-Maschine wurde zunächst als Prototyp aufgebaut und in den Versuchsbetrieb mit Bauteil 1 genommen. Der Fertigungsablauf unterscheidet sich maschinenbedingt von dem aus Phase I bekannten Ablauf mit der Mikron-Maschine. Mit Hilfe der versuchsweisen Serienfertigung auf dem Prototyp konnten weitere Erkenntnisse hinzugewonnen werden, die in die Serienmaschinen direkt einkonstruiert wurden.

Neben dem Ziel, mit diesen Werkzeugmaschinen eine prozesssichere und mit der Nassfertigung taktzeitidentische Trockenfertigung zu realisieren, wurde bei der Konstruktion der Maschine von vorne herein darauf geachtet, dass keine Absauganlage erforderlich ist.

Ebenfalls sollte der Pflegeaufwand dieser Maschine nicht höher als bei den Nassbearbeitungsmaschinen und eine leichte Umrüstbarkeit möglich sein.

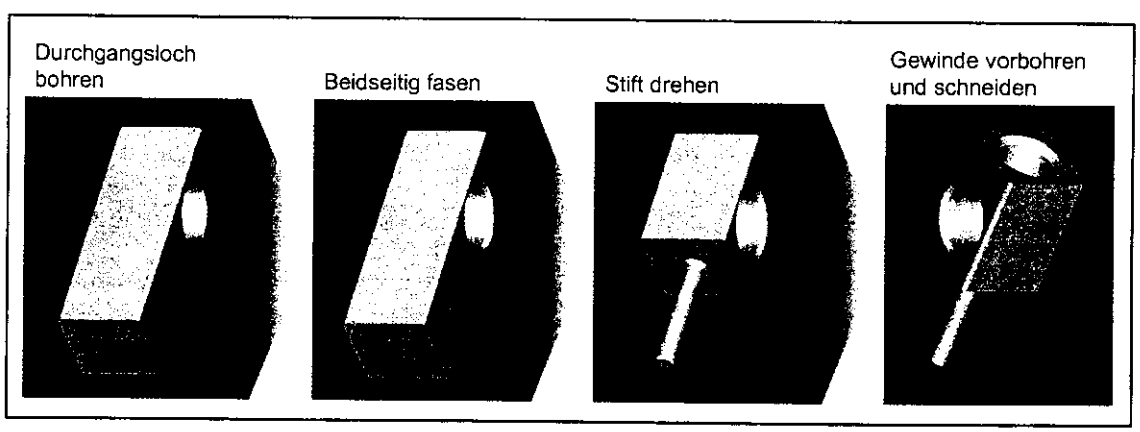
Entgegen der ursprünglichen Absicht konnte im Rahmen des Modellprojekts eine trockenbearbeitungsgerechte Eigenbau-Maschine nur für Bauteil 1 entwickelt und erprobt werden. In der Zukunft werden Eigenkonstruktionen, die auf andere Bauteilfamilien angepasst sind, folgen.

5.3.1 Beschreibung des Referenzbauteils und seiner Fertigungsschritte

Der Fertigungsprozess des Bauteils 1 auf der A 10-Maschine unterscheidet sich aufgrund des anderen Aufbaus der Werkzeugmaschine von dem aus Phase I bekannten Prozess der Mikron-Maschine. Das Ausgangsmaterial kommt auch hier vom Drahtcoil und muss zuerst in einer Richteinheit gerichtet werden, um Eigenspannungen im Material zu minimieren. Anschließend tritt das gerichtete Rohmaterial in die Werkzeugmaschine ein, wo der eigentliche Fertigungsprozess am Bauteil beginnt.

Zunächst wird das Durchgangsloch quer zum Draht gefertigt. Dazu wird die Bohrung mit einem Zentrierbohrer vorgesetzt, wodurch gleichzeitig die gewünschte Fase auf einer Seite der Bohrung entsteht. Nun wird das Durchgangsloch gebohrt und auf der gegenüberliegenden Seite ebenfalls gefast. Damit ist das Durchgangsloch in 3 Schritten gefertigt (vgl. Abbildung 5-13).

Abbildung 5-13: Fertigungsschritte des Bauteils 1



Nach dem Durchgangsloch wird das Teil mit dem Stift versehen. Der Stift wird mit einem beweglichen Werkzeug am Draht angedreht. Danach wird das Werkstück von einem Greifer aufgenommen und durch Absägen vom Drahtcoil getrennt. Der Greifer führt die fast fertiggestellte Stiftklemme der abschließenden Bearbeitung zur Herstellung des Gewindes für die Klemmschraube zu. Dabei wird zuerst ein Sackloch axial in die Klemme gebohrt und abschließend das Gewinde für die Klemmschraube angebracht. Insgesamt sind zur Fertigstellung des Bauteils 1 sieben Fertigungsschritte erforderlich.

5.3.2 Grundkonzept der A 10-Maschine

Die Realisierung der Fertigungsschritte des Referenzbauteils - und auch anderer Bauteile des Teilespektrums - unter Berücksichtigung der besonderen Anforderungen an die Fähigkeit zur prozesssicheren Trockenbearbeitung führte zu einem Maschinengrundkonzept, das im folgenden erläutert wird.

Die Maschine basiert auf dem Längstransferprinzip. Das bedeutet, dass das Rohmaterial auf einer Seite in die Maschine eintritt, mehrere Fertigungsstationen in der Maschine durchläuft und auf der anderen Seite als fertiges Bauteil wieder aus der Maschine austritt. Dieses Prinzip bietet sich für die Massenfertigung an, denn mit jedem Maschinentakt verlässt ein fertiges Bauteil die Maschine.

Wie bereits in Abschnitt 5.3.1 dargestellt, werden zur Fertigstellung des Bauteils sieben Fertigungsschritte benötigt. Sinnvollerweise werden Operationen, die sich auf das gleiche Konstruktionsmerkmal (z.B. Durchgangsloch für den Draht) beziehen, zu Gruppen zusammengefasst. Die maschinenseitigen Arbeitsschritte sind demnach:

(1) Richten des Werkstoffs in der Vorschubeinheit

(2) Spannen des Werkstoffs in der Hauptzange

(3) Quer- und Längsbearbeitung sowie trennen vom Coil
(d.h. Durchgangsloch bohren, Stiftfuß drehen und Absägen)

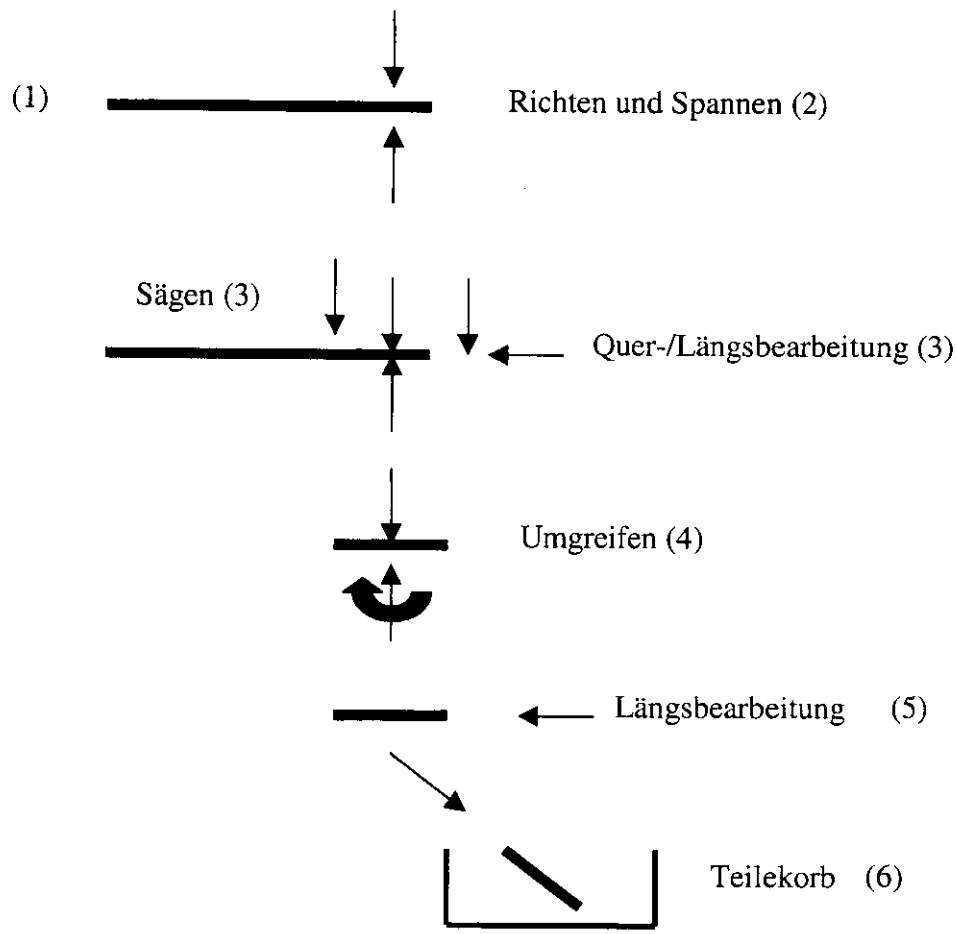
(4) Umgreifen des Teils durch den Greifer

(5) Rückwärtige Längsbearbeitung
(d.h. Gewinde für Klemmschraube)

(6) Auswurf der Teile in den Teilekorb

Da die Gefahr besteht, dass sich Messingspäne im Greifer oder dem Spannfutter ablagern, werden diese Stationen zu jedem Zeitpunkt durch Teile besetzt gehalten. Abbildung 5-14 zeigt den Ablauf der Fertigung schematisch.

Abbildung 5-14: Ablauf der Fertigung auf der A 10-Maschine - Bauteil 1



Der beschriebene Fertigungsablauf bedingt die Anordnung der Bearbeitungsstationen in der Werkzeugmaschine. Die Anordnung der einzelnen Baugruppen der Maschine ist in den Abbildungen 5-15 und 5-16 zu erkennen. Das Rohmaterial gelangt über die Vorschubeinheit von links in den Arbeitsraum der Maschine. Im Bearbeitungszentrum werden die einzelnen Operationen am Werkstück durchgeführt, wobei nach Abschluss der Bearbeitungsvorgänge das fertige Teil in den Teilekorb ausgeworfen wird. Die Späne fallen nach unten weg und werden vom Spanförderer in den Spankübel entsorgt. Der Arbeitsraum ist durch eine große Schiebetür zugänglich, die für den Einrichtbetrieb unbedingt erforderlich ist. Die Antriebsaggregate sind, sofern möglich außerhalb des Arbeitsraums angeordnet, so dass die Aggregate nicht durch Späne und Staub aus dem Prozess belastet werden. Die elektrischen Steuerungskomponenten werden aufgrund der höheren Anforderungen an Kühlung und Sauberkeit wie üblich in einem separaten Schaltschrank untergebracht.

Abbildung 5-15: Schematischer Aufbau der A 10-Maschine (Vorderansicht)

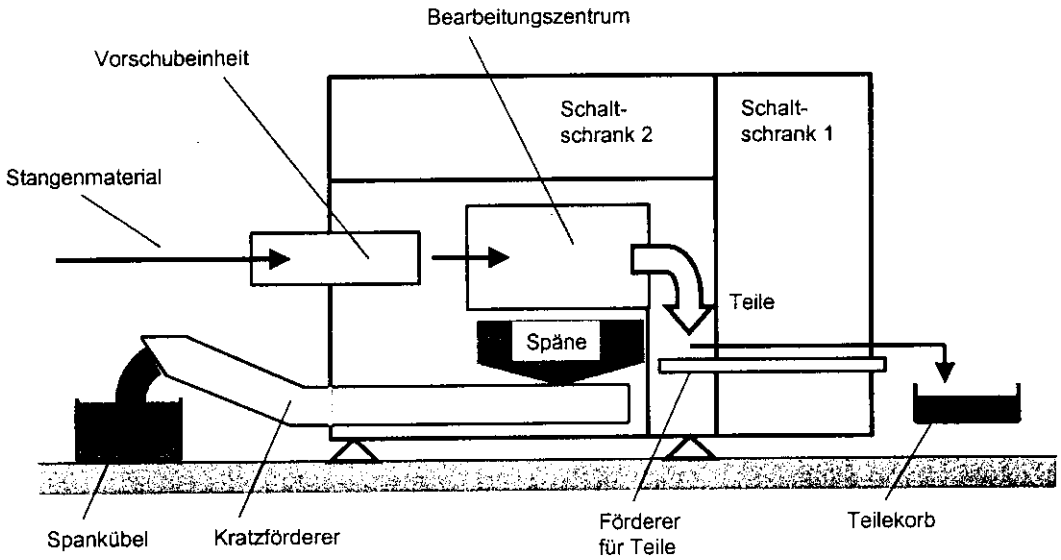
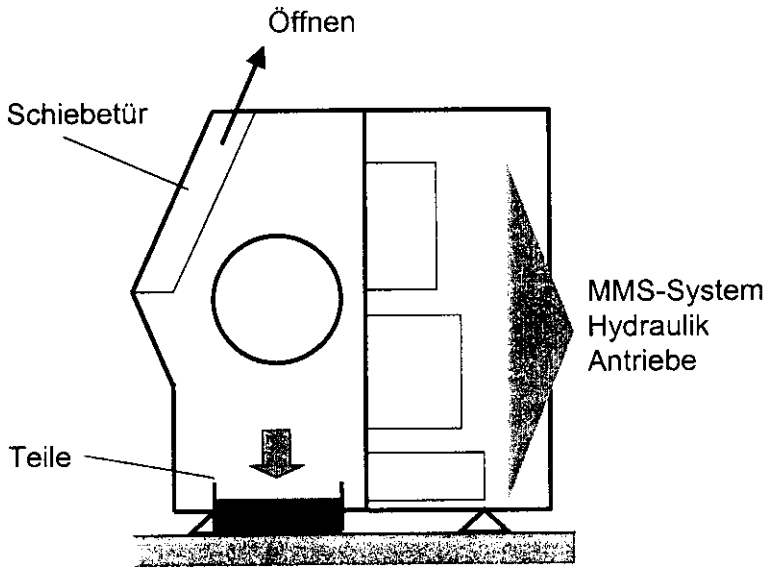


Abbildung 5-16: Schematischer Aufbau der A 10-Maschine (Seitenansicht)



Allgemeingültige Grundsätze für trockenbearbeitungsgerechte Maschinen (vgl. Tabelle 5-11 und Abschnitt 4) sind beim Entwurf der Maschine berücksichtigt und einkonstruiert worden. Ebenfalls wurden die in Phase I des Projekts gemachten spezifischen Erfahrungen bei der Trockenbearbeitung von Messing berücksichtigt (vgl. Abschnitt 5.2.5).

Tabelle 5-11: Allgemeine Konstruktionsprinzipien trockenbearbeitungsgerechter Werkzeugmaschinen

Konstruktionsprinzip	**Begründung**
Vertikalbettbauweise	freier Spänefall von der Bearbeitungsstelle
möglichst glatte und steile Ausgestaltung des Arbeitsraums und der Wände	keine Ablagerung von Spänen in der Maschine
horizontale Flächen sollten vermieden werden	s.o.
Öl-Leckagen (z.B. aus Hydraulik) müssen vermieden werden	Vermischung mit kleinen Spänen führt zu Anbackungen
Maschine sollte gekapselt sein	Austritt von Aerosolen bzw.. Metallstäuben verhindern
Absaugung des Arbeitsraums sollte möglich sein	Beseitigung von Nebeln und Stäuben sowie Kühlung des Arbeitsraums
Schalldämmung	Trockenbearbeitung ist durch fehlende Dämmwirkung des KSS lauter
MMS sollte in der Maschine integriert sein und von der NC angesteuert werden	besseres Handling und genaue Dosierung des MMS-Mediums

Durch die Ausführung der Maschine in Vertikalbettbauweise wird sichergestellt, dass Späne schwerkraftgeführt nach unten fallen und die Werkzeugmaschine schnell verlassen können. Damit ist eine Absaugung der Späne nicht notwendig. Die Maschine verfügt außerdem über eine Kapselung des Arbeitsraums gegenüber der Umgebung, wodurch – sofern erforderlich - die Möglichkeit zur definierten Be- und Entlüftung gegeben ist.

5.3.3 Technische Beschreibung des Maschinengrundkonzepts

Die A 10-Maschine ist für den Dreischichtbetrieb und die Massenfertigung vorgesehen. Für Kleinteile mit kurzen Bearbeitungshauptzeiten hat sich die Kurvensteuerung auch gegenüber den modernen NC-Steuerungen behauptet. Gründe dafür sind vor allem die bisher noch unschlagbare Geschwindigkeit bei gleichzeitig hoher Genauigkeit. Bei der hier beschriebenen Werkzeugmaschine hat man sich entschlossen ein hybrides Konzept, bestehend aus Kurvensteuerung und NC-Steuerung, zu realisieren. Demzufolge übernimmt die NC-Steuerung zentral die Steuerung der gesamten Maschine wobei die kurvengesteuerten Operationen der zeitlichen Vorgabe der NC-Steuerung folgen. Mit dieser Kombination wird versucht ein Optimum an Flexibilität und Schnelligkeit zu erreichen. Was die Schnelligkeit angeht, so hat man sich zum Ziel gesetzt den sogenannten Sekundentakt, d.h. in jeder Sekunde verlässt ein fertiges Teil die Maschine, einzuhalten und wenn möglich sogar zu unterbieten.

Das Gestell

Für kurvengesteuerte Operationen wird ein Gestänge benötigt, das die Vorschubbewegung von der Nockensteuerwelle auf das entsprechende Werkzeug überträgt. Das Gestänge ist besonders anfällig gegenüber Span- und Staubbelastungen, wie sie bei Trockenbearbeitung auftreten. Daher war es bei der Konzeption der A 10-Maschine von vorne herein klar, dass eine strikte Trennung zwischen dem staubbelasteten Arbeitsraum und dem Teil der Maschine, der die Nockensteuerwelle aufnimmt, bewerkstelligt werden muss.

Diese Grundanforderung führte zu einer vertikalen Maschinenplatte, die den Arbeitsraum vom Aggregatraum trennt; es wurde also das Konzept des Vertikalbetts angewendet. Die Grundform des Maschinengestells entspricht einem „T", so dass der Kontakt mit dem Hallenboden an drei Punkten gegeben ist. Die Maschine wird durch Schwingungsdämpfelemente vom Fußboden entkoppelt. Senkrecht zum „T" ist die vertikal angeordnete Maschinenplatte angebracht, die als Stahlschweißkonstruktion aus einem biegesteifen und thermostabilen Hohlprofil gefertigt ist. Wie bereits aus den Anforderungen an trockenbearbeitungsgerechte Maschine hervorgeht, ist ein gegen hohe Temperaturen unempfindlicher Aufbau der Maschine erforderlich, um die erhöhten Temperaturen im Arbeitsraum ohne Auswirkungen auf die Bauteilgenauigkeit, ausgleichen zu können.

Die Bearbeitungsseite ist die Maschinenvorderseite. Im Aggregatraum auf der Rückseite der Maschine befinden sich der Hauptantrieb, die Hydraulik, die Pneumatikversorgung und die Nebenaggregate (z.B. MMS-System), die vom Arbeitsraum vollständig abgekapselt sind und nicht mit den Spänen in Kontakt kommen können. Damit ist eine durchgängige Abtrennung zwischen Maschinenvorder- und Maschinenrückseite erreicht. Ein kompakt gebauter Schaltschrank befindet sich an der Seite und oberhalb des Bearbeitungsraums. Eine große Schiebetüre ermöglicht eine gute Zugänglichkeit des Arbeitsraums für Wartungs- und Rüstarbeiten.

Die durch den Bearbeitungsprozess erzeugten Späne fallen, geführt durch die Schwerkraft, frei nach unten in einen Kratzförderer mit Verschleißboden. Weiterhin sind alle nichtsenkrechten Flächen um ca. 55° geneigt, um eine gute Spanabfuhr zu gewährleisten. Im Arbeitsraum sind an kritischen Stellen Blasdüsen vorgesehen, um Spanablagerungen in Form von Nestern zu vermeiden.

Bei der Konstruktion der Maschine ist die Möglichkeit einer Staubabsaugung vorgesehen, die - falls notwendig - nachgerüstet werden kann. Auf das Absaugen der Späne direkt an den Bearbeitungsstationen wurde jedoch verzichtet. Neben den zusätzlichen Kosten würden auch die erforderlichen Schläuche der Absauganlage zu Behinderungen im Arbeitsraum führen.

Führungen und Lagerungen

Führungen und Lagerungen haben einen großen Einfluss auf die Arbeitsgenauigkeit der Werkzeugmaschine. Sie müssen eine hohe Herstellgenauigkeit, eine geringe Verformung,

und geringe Verschleißwerte aufweisen. Bei der A 10-Maschine sind alle Führungen und Lagerungen als Rollenführungen beziehungsweise Rollenlagerungen ausgelegt. Der Vorschubschlitten der Vorschubeinheit wird aus Geradführungen mit Kugelumlaufschuhen aufgebaut. Der Antrieb der Vorschubeinheit besteht aus einer elektromotorisch angetriebenen Kugelrollspindeleinheit. Der Greiferlängsschlitten ist ebenfalls mit Kugelumlaufschuhen versehen. Die Kugelumlaufschuhe sowie der Kugelgewindetrieb werden zentralölgeschmiert, wobei eine gezielte Rückführung des Öls erfolgt. Die Kugelumlaufschuhe sind durch einen Faltenbelag bzw. eine Blechabdeckung geschützt. Gleiches gilt für den Kugelgewindetrieb der Vorschubeinheit. Die Bearbeitungseinheiten werden in Kugelbüchsen gelagert und durch Lippenringe abgedichtet. Bei den Hebellagerungen werden Nadellager und bei den Kurvenrollen Nadelbüchsen verwendet. Die Haltbarkeit der Kugellager ist durch eine integrierte Fett-Lebensdauerschmierung gesichert.

Antriebe

Der Antrieb der Nockensteuerwelle erfolgt über einen frequenzgeregelten Kegelradgetriebemotor. Alle Bearbeitungseinheiten sind mit frequenzgeregelten Motoren ausgestattet.

Tabelle 5-12: Technische Daten der Antriebe

	Drehzahl /min	Leistung /kW	Drehmoment /Nm	Anmerkung
Hauptantrieb (Kegelgetriebe)	10-60	0,37	59	frequenzgeregelt
Bohreinheiten	12.000	0,25	--	frequenzgeregelt
Gewindeeinheiten	4.000	0,1	--	frequenzgeregelt
Dreheinheit	20.000	0,6	--	frequenzgeregelt

Hydraulik

Die Spannstationen in der Maschine werden hydraulisch betätigt. Das Hydraulikaggregat befindet sich auf der Maschinenrückseite, also vom eigentlichen Arbeitsraum getrennt. Der Spanndruck erreicht einen Maximalwert von 250 bar.

Wegmesssystem

Als Wegmesssystem für den Vorschubschlitten dient ein digital-absolutes Wegmesssystem mit Linearmaßstab. Es befindet sich unterhalb des Vorschubschlittens, um ein Eindringen der Späne zu vermeiden. Zusätzlich wurde zum Schutz vor eindringenden Spänen ein Trennblech zum Arbeitsraum hin angebracht. Die einzelnen Vorschubbewegungen der Bearbeitungseinheiten werden durch einstellbare Festanschläge begrenzt.

Steuerung

Die Vorschubbewegung der Bearbeitungseinheiten erfolgt über Kurven. Die Maschine wird mit SPS (speicherprogrammierte Steuerung) mit einer Positionierkarte für NC gesteuert. Zum Werkstoffvorschub und der Greiferschwenkbewegung dient ebenfalls eine NC-Achse. Die Synchronisation des Kurvenbahnantriebs wird mit Hilfe eines SPS-gesteuerten Nockenschaltwerks ermöglicht.

Weitere technische Daten

Weitere technische Daten der A 10-Maschine zeigt Tabelle 5-13.

Tabelle 5-13: Technische Daten der Werkzeugmaschine

Elektrik	U=400 V f=50 Hz P=20 kW	Steuerspannung 24 V
Aufstellfläche	6 m²	
Gewicht	2500 kg	

5.3.4 Erfahrungen und Verbesserungsmaßnahmen unter Produktionsbedingungen

Die Maschine wurde im Lauf des Jahres 1999 aufgebaut und Ende 1999 in den normalen Fertigungsbetrieb aufgenommen, wobei sie erfolgreich im Dreischichtbetrieb eingesetzt werden konnte. Dabei zeigte sich, dass das Maschinengrundkonzept richtig gewählt war. Einen Eindruck der A 10-Maschine liefert Abbildung 5-17. Gut zu erkennen ist der bereits schematisch beschriebene Aufbau der Maschine. Die Vorderseite der Werkzeugmaschine wird von der großen, nach oben verschieblichen Tür geprägt. Das große Sichtfenster in der Tür bietet ein günstiges Sichtfeld für die Prozessbeobachtung. Rechts der Schiebetür befindet sich das Bedienfeld der NC-Steuerung der Maschine. Unterhalb der Schiebetür ist die Verkleidung des Raums für herabfallende Späne und den Kratzförderer zu sehen. Hinter dem NC-Bedienfeld ist ein Teil des elektrischen Schaltschranks und des Schranks für die Aggregate zu erkennen. Das Material durchläuft die Maschine von links nach rechts. Die fertigen Teile verlassen die Maschine durch eine kleine Rutsche deren Austrittsöffnung an der unteren Kante der Maschine oberhalb des Teilekorbs zu erkennen ist (siehe Pfeil in Abbildung 5-17).

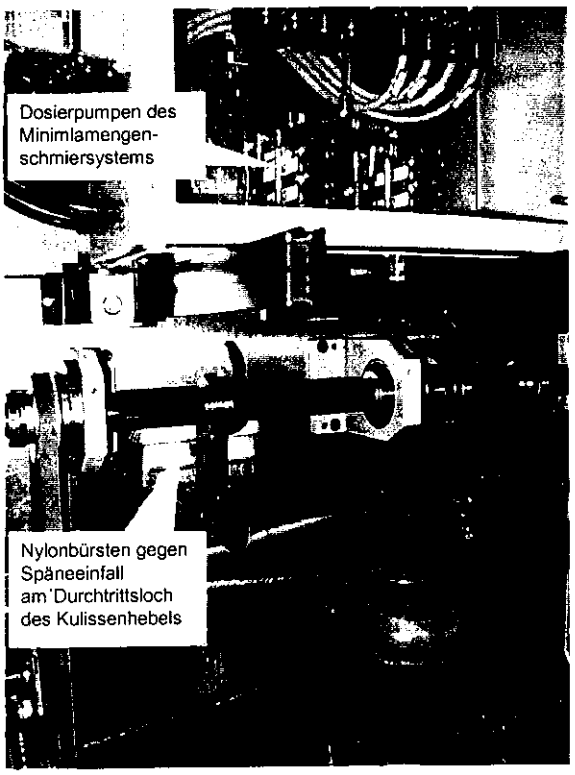
Abbildung 5-17: A 10-Maschine im Betrieb

Durch den Betrieb der Maschine unter realen Bedingungen konnten wichtige Erkenntnisse bezüglich der maschinenseitigen Anforderungen der Trockenbearbeitung gewonnen und bestätigt werden. Die Trennung der Nockensteuerung vom Arbeitsraum der Maschine hat sich als wichtiger Vorteil herausgestellt. Durch den Betrieb konnte gezeigt werden, dass so gut wie keine Späne oder sonstige Verunreinigungen durch die Löcher der Betätigungshebel vom Arbeitsraum in den Raum der Hilfsaggregate gelangen (vgl. Abbildung 5-18). Erreicht wurde dies durch das Verschließen der Löcher mit Nylonbürsten. Damit ist die Trennung von Arbeitraum und Aggregatraum auch praktisch gelungen und die Aggregate sind vor Spänen und Staub geschützt untergebracht.

Die vorgesehene Kapselung des Arbeitsraums zum Schutz der Umgebung vor Austritt von Spänen und Stäuben oder Dämpfen ist ebenfalls gelungen. Allerdings hat die vollständige Kapselung zu erhöhten Temperaturen innerhalb des Arbeitsraums geführt. Dadurch traten folgende Probleme auf, die bei der Nassbearbeitung bisher unbekannt waren.

- Das Rohmaterial kommt in Form eines Vierkantdrahts vom Coil. Der Draht ist herstellungsseitig oberflächlich mit Ziehfett verunreinigt. Die Fettreste führten bei der bisherigen Bearbeitung (insbesondere nass) zu keinerlei Problemen. Durch die erhöhte Temperatur der Bauteile bei der Trockenbearbeitung, die in der Größenordnung zwischen 60 und 90 °C liegt, schmolz das Ziehfett auf. Bei der Abkühlung der Bauteile traten lokale Fettkonzentrationen auf, die zu Störungen bei der Nachbearbeitung der Bauteile führten (vgl. Abschnitt 6.4) und die auch kundenseitig nicht akzeptiert wurden. Durch eine Umstellung des Halbzeugs auf entfettetes Rohmaterial konnte das Problem gelöst werden.

Abbildung 5-18: Antriebsraum der A 10-Maschine



- Die Teile sind je nach Umgebungstemperatur und Verschleißausprägung der Werkzeuge zwischen 60 und 90 °C warm. Auf die Genauigkeit der Bauteile hat dies keine negativen Auswirkungen. Allerdings sollte nun Hautkontakt mit den Bauteilen wegen Verbrennungsgefahr vermieden werden.
- Die Temperatur im Arbeitsraum der Maschine beträgt 45 bis 55 °C. Nachteilige Auswirkungen auf die Maschinengenauigkeit konnten nicht festgestellt werden. Die gemessenen Temperaturen liegen damit zwar deutlich höher als bei der Nassbearbeitung, durch die geringere Wärmekapazität der A 10-Maschine aufgrund des fehlenden Kühlmittels reagiert die Trockenbearbeitungsmaschine jedoch dynamischer, d.h. Warmlaufvorgänge sind kürzer und die Maschine erreicht schneller den Beharrungszustand. Damit können temperaturbedingte Kompensationsmaßnahmen an der Maschine beim Einrichtbetrieb deutlich schneller durchgeführt werden.
- Trotz der erhöhten Temperaturen im Arbeitsraum wurde bisher auf eine Zwangsbelüftung des Arbeitsraums verzichtet. Durch die Messingstaubbeladung der Abluft wären Folgemaßnahmen erforderlich (z.B. Reinigungsarbeiten, Filterwechsel), die ohne zwingenden Grund nicht sinnvoll sind.

Die Minimalmengenschmierung

Der Einsatz der Minimalmengenschmiertechnik wurde bei der Konzeption der Maschine von vorne herein berücksichtigt, denn Bohr- und Gewindeoperationen können meist nur mit Minimalmengenschmierung prozesssicher betrieben werden (vgl. Abschnitt 5.2). Das

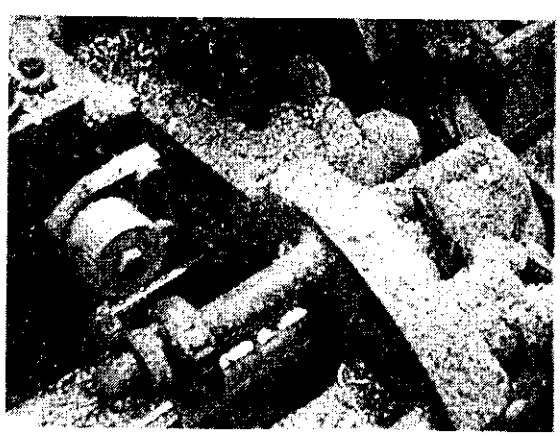
MMS-System wird bei der A 10-Maschine im rückwätigen Aggregatraum untergebracht (vgl. Abbildung 5-18). Die Schmierstellen im Arbeitsraum werden über Leitungen bzw. Schläuche erreicht, die durch die vertikale Trennwand hindurchgeführt sind.

Wie in Abschnitt 4.3 aufgezeigt, müssen geeignete MMS-Systeme Anforderungen bezüglich der Reaktionszeit (< 3 Sekunden) beim Aufbau des Sprühnebels, der Mindestdosiermenge des Aerosols (ca. 10 ml/h) und der Tropffreiheit nach Ausschalten des Systems erfüllen. Die Erfahrungen im Anwendungsfall der Trockenbearbeitung von Bauteil 1 zeigten, dass die Erfüllung der oben genannten Anforderungen nicht ausreichend war. Prinzipiell können folgende Anforderungen des Bauteils 1 an die MMS formuliert werden:

- Jedes Teil benötigt eine ausreichende Menge an Schmiermedium.
- Die Dosis des MMS-Mediums muss so eingestellt werden können, dass es nicht zu einem Überschuss kommt, der sich im Arbeitsraum anlagert und im Zusammenhang mit Spänen und Spanstaub zu Verklebungen führt.
- Jedes Teil hat eine Durchlaufzeit von 7 Sekunden durch die Maschine, so dass es sich nur für eine Sekunde an einer Bearbeitungsstation befindet. Die geforderten Ansprechzeiten für die MSS sind daher extrem kurz (< 1 Sekunde).

Ein Vergleich der Anforderungen an moderne MMS-Systeme (Abschnitt 4.3) und den Anforderungen des Bauteils 1 zeigt, dass marktübliche Systeme nicht in der Lage sind, diese Forderungen zu erfüllen. Wegen der Ansprechzeit des eingesetzten MMS-Systems von 3 Sekunden kann die MMS-Versorgung während der Fertigung nie abgeschaltet werden, weil sonst einige Teile die Maschine ungeschmiert passieren und eine prozesssichere Fertigung nicht mehr gewährleistet ist. Dadurch kam es zu einer überschüssigen Ausbringung von MMS-Medium in den Arbeitsraum mit den bekannten Problemen (vgl. Abbildung 5-19).

Abbildung 5-19: Verschmutzung des Arbeitsraums durch überschüssiges MMS-Medium und Späne



Für einen prozesssicheren Ablauf der Fertigung sind nach den Erfahrungen des Unternehmens ca. 2 bis 3 ml/h MMS-Medium erforderlich. Marktübliche Systeme orientieren sich an der Anforderungsliste von Abschnitt 4.3, die eine Mindestmenge von 10 ml/h vorsieht. Versuche, die Menge des Mediums zu senken, führten zu einer unregelmäßigen Ausbringung des MMS-Mediums, so dass nur einzelne Teile geschmiert und andere vollständig trocken bearbeitet wurden. Verbesserungen konnten bisher auch durch mehrfaches Tauschen des MMS-Systems nicht erreicht werden. Die Gründe für die zu hohe Ausbringungsmenge liegen vor allem in der angewandten Mischtechnik. Die Mischung findet mittels eines Kapillarrohrs nahe der Schmierstelle statt. Das Kapillarrohr wird von einem Mantelluftstrom umgeben der in einem koaxial zum Kapillarrohr angeordneten Rohr geführt wird. Nach dem Venturiprinzip reißt der Mantelluftstrom einzelne Tröpfchen aus dem Kapillarrohr mit und erzeugt auf diese Weise einen Schmiernebel. Die Anzahl mitgerissener Tröpfchen wird durch die Fördermenge der Dosierpumpe des MMS-Systems bestimmt. Die Dosierpumpe befindet sich bei der gewählten Anordnung außerhalb des Bearbeitungsraums im Aggregatraum der A 10-Maschine. Dadurch sind die Zufuhrleitungen recht lang. Bei Bearbeitungspausen wird die Dosierpumpe ausgeschaltet. Dabei kann es vorkommen, dass sich die Kapillare an der Austrittsstelle teilweise entleert und somit überschüssiges Minimalmengenschmiermedium in den Arbeitsraum gelangt. Beim erneuten Starten der Bearbeitung läuft der Prozess zunächst ungeschmiert. Die Länge der Übertragungsstrecke des MMS-Mediums führt zu einer Verzögerung, bis wieder Medium an der Schmierstelle austritt. Auf diese Weise müssen recht lange Anlaufzeiten in Kauf genommen werden, bis der Prozess wieder stabil läuft.

Eine zufriedenstellende Lösung für die MMS-Problematik konnte bisher nicht gefunden werden. Dabei wurden verschiedene MMS-Anlagen erprobt und auch unterschiedliche Schmiermedien verwendet. Insbesondere Systeme mit druckbeaufschlagtem Behälter erwiesen sich als zu träge, so dass trotz nicht ganz zufriedenstellender Funktion nun ein System mit Dosierpumpe eingesetzt wird.

Trockenbearbeitungsgerechte Gestaltung der Fertigungsstationen und des Arbeitsraums

Die Prinzipien zur Gestaltung der Fertigungsstationen und des Arbeitsraums wurden bereits in Abschnitt 5.3.2 beschrieben. Der Vorschub des Rohmaterials erfolgt mit der Vorschubeinheit. Sie hat die Aufgabe den Draht im Teiletakt (ca. 1 Sekunde) jeweils um eine Bauteillänge nachzuführen. Die Vorschubeinheit ist als lineargeführter Schlitten mit Kugelgewindetrieb aufgebaut und vollständig gekapselt. Der Vorschubschlitten wird lagegeregelt betrieben und verfügt zur Steigerung der Präzision über ein Wegmesssystem mit Linearglasmaßstab. Der Motor des Vorschubantriebs wird zusätzlich über einen Drehgeber geregelt. Prinzipiell kann der Drehgeber des Motors genutzt werden, um die Lage des Vorschubschlittens zu erfassen. Mögliche Quellen für Positionierungsfehler bestehen in Steigungsabweichungen der Kugelrollspindel. Diese Abweichungen sind aber von untergeordneter Bedeutung. Aufgrund dieser Erfahrungen wird beim Bau weiterer A 10-Maschinen auf den Linearmaßstab verzichtet. Damit sinkt auch der konstruktive und bauli-

che Aufwand für Schutzmaßnahmen gegen Spanflug und Verunreinigung des Linearmassstabs durch Stäube.

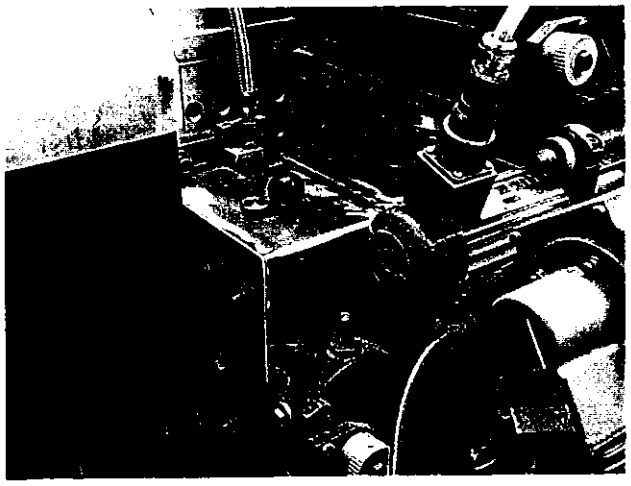
Die Spannzangen zum Spannen des Werkstücks waren bisher sensorisch überwacht. Diese Überwachungsfunktion wurde aus Gründen der Produktivitätssteigerung aufgegeben, da die Taktzeit der Maschine ohne Abfrage der Sensoren verkürzt werden konnte. Ebenfalls aus Gründen der Taktzeitverkürzung wurde auf die hydraulische Greiferbremse der Werkstückhandhabung verzichtet. In beiden Fällen konnte im laufenden Betrieb nachgewiesen werden, dass der Prozess auch ohne diese Maßnahmen sicher läuft.

Die Spannzangen verursachten ein weiteres Problem. Durch das Fehlen einer Spülwirkung durch den Kühlschmierstoff setzen sich die Zwischenräume der Spannzangen bei Trockenbearbeitung immer wieder mit Spänen zu. In der Folge nimmt die Spannkraft mit der Zeit ab. Nach etwa 4 Wochen Dauerbetrieb können die Teile nicht mehr sicher gehalten werden, so dass eine manuelle Reinigung der Zangen erfolgen muss. Die Reinigung ist nicht sehr zeitaufwändig. Versuche die Spannzangen gegenüber dem Eindringen von Spänen abzudichten, führten nicht zum Erfolg. Ein Lösungsansatz bestand in der Abdichtung der Zwischenräume durch elastische Materialien wie Gummi oder Silikon. Diese Abdichtungen wurden jedoch innerhalb kürzerer Zeit durch Späne zerstört.

Beim Betrieb der A 10-Maschine trat im Vergleich zur Nassbearbeitung ein unkontrolliert verlaufender Spanflug auf, so dass hier erhebliche Nacharbeiten an der Maschine erforderlich waren. Das Problem hierbei ist, dass insbesondere Späne einer bestimmte Größe und damit einer hohen kinetischen Energie nachgeschaltete Bearbeitungsprozesse behindern, indem sich die Späne zwischen Werkstück und Werkzeug setzen. Dies führt zu einem frühzeitigen Versagen des Werkzeugs und zu einer schlechten Werkstückoberfläche. Ein weiteres Problem durch den Spanflug besteht darin, dass Späne durch den Teileauswurf in den Teilekorb gelangen und somit die Teile vor der weiteren Verarbeitung bzw. dem Versand von Spänen befreit werden müssen. Dies würde einen zusätzlichen Arbeitsschritt bedeuten. Zur Behebung des Spanflugproblems wurde die Anordnung der Bearbeitungsstationen geändert und verschiedene Leitbleche bzw. Abdeckungen angebracht.

Für nachgeschaltete Prozesse waren die relativ großen Späne der Bohroperation aus den oben aufgeführten Gründen besonders störend. Die Station zur Fertigung der Querbohrung für das Drahtloch wurde deshalb durch eine Abdeckung nach oben hin gekapselt (vgl. Abbildung 5-20). Neben der Abdeckung wurde auch die Bearbeitungsrichtung des Bohrers umgedreht. Das Bohren erfolgte anfangs von oben, nun wird von unten gebohrt. Durch die Abdeckung und die geänderte Bearbeitungsrichtung fallen Späne nun nach unten in Richtung Kratzbandförderer. Ein Austreten der Bohrspäne nach oben ist nicht mehr möglich.

Abbildung 5-20: Abdeckung der Bohreinheit



Die Sägestation wurde zunächst ebenfalls mit einer Abdeckung versehen (vgl. Abbildung 5-21), die jedoch nach kurzer Einsatzdauer wieder entfernt wurde, da sich eine Kontrolle des Spanflugs nicht erreichen ließ.

Die Dreheinheit zur Fertigung des Stiftfußes wurde vollständig gekapselt ausgeführt. Drehspäne, die volumetrisch zu den größten erzeugten Spänen im Prozess gehören, fallen ohne Kapselung immer wieder in Richtung der Station „Gewindeschneiden" und stören den Bearbeitungsablauf. An der Unterseite der Dreheinheit wurde an der Kapselung ein Spantrichter angebracht, so dass die Späne nun direkt nach unten in Richtung Kratzbandförderer fallen.

Abbildung 5-21: Abdeckung der Säge

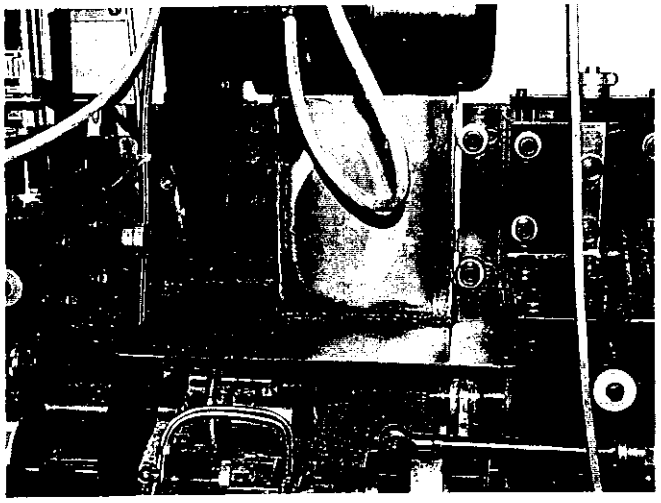
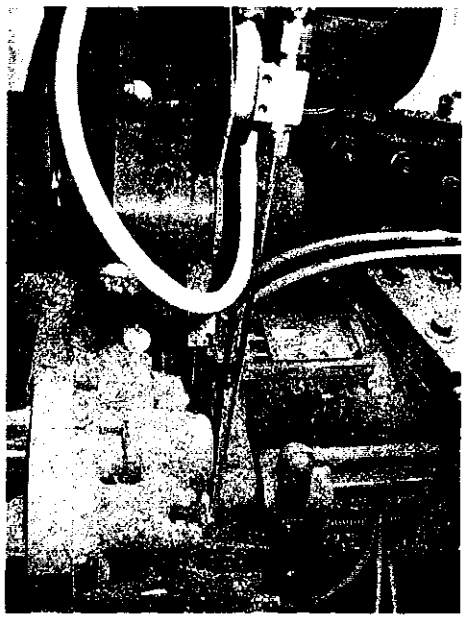


Abbildung 5-22: Die Stationen „Sägen", „Drehen" und „Gewinden"



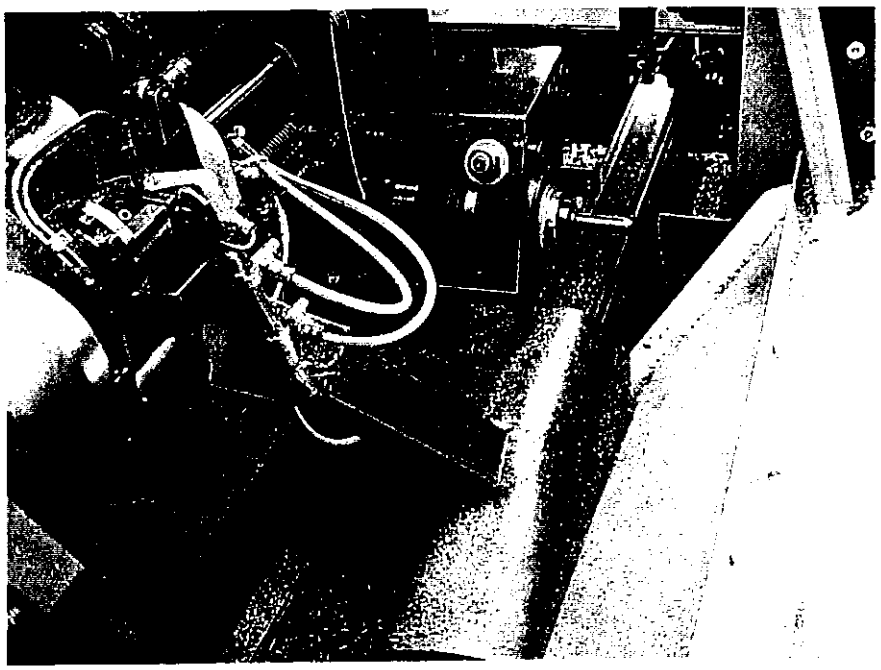
Eine weitere Abdeckung wurde am Teileförderband angebracht. Bisher fielen die fertigen Teile auf ein Förderband und wurden offen in Richtung Teilekorb abtransportiert. Dadurch kam es zu einer unerwünschten Vermischung von Spänen und Teilen. Das Förderband ist nun von oben her vollständig abgedeckt und die Teile fallen von der letzten Bearbeitungsstation („Gewindeschneiden") in einen Trichter der zum Teileförderband führt. Der Trichter ist gegen Spaneinfall zusätzlich durch eine Klappe gesichert, die sich nur kurz zum Durchlassen der Teile öffnet. Durch diese Maßnahme konnte die Vermischung der Teile mit Spänen erheblich reduziert werden (vgl. Abbildung 5-23).

Weitere Abdeckungen wurden erprobt, zeigten aber teilweise nur geringe Wirkung hinsichtlich einer Steigerung der Prozesssicherheit.

Die anfallenden Makro- und Mikrospäne zeigten bisher keinen Einfluss auf die Dauerfestigkeit der A 10-Maschine. In allen Führungen (v.a. Pinolen) konnten keine negativen Einflüsse durch Spaneinlagerungen festgestellt werden. Damit sind keine weiteren Maßnahmen zum Schutz der im Arbeitsraum befindlichen Komponenten erforderlich geworden.

Durch die ergriffenen Maßnahmen ist der Reinigungsaufwand bei der A 10-Maschine gegenüber einer vergleichbaren Nassbearbeitungsmaschine nur leicht erhöht.

Abbildung 5-23: Abdeckung des Teileförderbands und Zufuhrtrichter mit Klappe



Werkzeuge und Prozessparameter

Der Einsatz der Trockenbearbeitung ist für den Anwender nur lohnend, wenn die geforderten Bauteiltoleranzen eingehalten werden und mit der Nassbearbeitung vergleichbare Standmengen der Werkzeuge erzielt werden. Für Bauteil 1 werden übliche Toleranzen an die Maßhaltigkeit gestellt (ca. 0,05 mm). Die Oberfläche des Bauteils sollte nach Kundenforderung nicht schlechter als R_z=8 sein. Bei der Nassbearbeitung und bei der Trockenbearbeitung werden vom Unternehmen i.d.R. Oberflächenrauhigkeiten von R_z=3 - 4 μm erzielt.

Die Anforderungen an die Genauigkeit und die Oberflächenqualität lassen sich sowohl bei Nass- als auch bei Trockenbearbeitung einhalten. Als Kriterium für den Wechsel eines Werkzeugs wird die erzeugte Qualität des Bauteils herangezogen. Der Werkzeugwechsel erfolgt nach der genauen Kenntnis des Standvermögens des Werkzeugs routinemäßig nach der erreichten Einsatzdauer. Die Standmengen der Werkzeuge bei der Trockenbearbeitung und die Standmengenkriterien sind in Tabelle 5-14 zusammengestellt.

Tabelle 5-14: Standmengenkriterien und Standmengen der Operationen bei der Trockenbearbeitung (A 10-Maschine) im Vergleich zur Nassbearbeitung (A 3-Maschine)

Operation	**Standmengenkriterium**	**Standmenge Trockenbearbeitung (Nassbearbeitung = 100 %)**
Zentrieren der Querbohrung (Drahtloch)	Streuung der Ansenkung bzw. Mittigkeit der Bohrung	100 %
Querbohren (Drahtloch)	Maß und Oberfläche	57 %
Fasen der Querbohrung (Drahtloch)		50 %
Drehen (Stiftfuß)	Grat am Vierkant der Klemme	67 %
Sägen	Grat	1162 % [1]
Kernlochbohrung (Gewinde)	Maß und Mittigkeit der Bohrung	100 %
Gewindebohren (Klemmschraube)	Lehrenhaltigkeit und Grat	60 %

1) Umstellung von HSS- auf HM-Werkzeug

Zur Fertigung von Bauteil 1 mit der A 10-Maschine sind - wie in Abschnitt 5.3.1 dargelegt - insgesamt sieben Arbeitsschritte erforderlich. Einer kritischen Betrachtung hinsichtlich der Eignung auf Trockenbearbeitung müssen fünf dieser Arbeitsschritte unterzogen werden. Diese Arbeitsschritte sind in Tabelle 5-14 angegeben, wobei zusätzlich ein Vergleich der Technologiedaten erfolgt. Die beiden verbleibenden Arbeitsschritte „Zentrieren" und „Fasen" der Drahtlochbohrung können aufgrund der geringen Tiefe und Zerspanungsleistung ohne Probleme trocken durchgeführt werden.

In Tabelle 5-15 ist an den schwarz hinterlegten Feldern zu erkennen, dass zwei der fünf betrachteten Operationen völlig trocken ablaufen können. Dies ist zum einen das Sägen und zum anderen die Sacklochbohrung für das Gewinde. Bei der Säge handelt es sich eigentlich um einen Scheibenfräser, der zum Trennen des Drahts benutzt wird. Der Scheibenfräser hat gegenüber einer herkömmlichen Säge den Vorteil, dass er auch seitlich an der Scheibe Schneiden hat, die verhindern dass die Scheibe im Trennschlitz infolge von Wärmeausdehnung verklemmt. Das trockene Sacklochbohren des Gewindes erstaunt auf den ersten Blick. Allerdings ist zu bedenken, dass der Bohrer in die bereits vorhandene Querbohrung eintritt und deshalb nur eine geringe Bohrstrecke zu überwinden hat. Das Längen/Durchmesser-Verhältnis (l/d) des Lochs ist damit ausreichend klein (< 1,0).

Tabelle 5-15: Übersicht der relevanten Technologiewerte und der Schmiersituation

Operation	Nassbearbeitung (A 3)		Trockenbearbeitung (A 10)	
	v_c /m/min	f_z /mm	v_c /m/min	f_z /mm
Querbohren (Drahtloch)	65	0,13	85 (MMS 1,2 ml/h)	0,1
Drehen (Stift, Bez.-∅ 2 mm)	47	0,125	125 (MMS 1,2 ml/h)	0,05
Sägen	1100 (125 Zähne)	0,0087	1100 (160 Zähne)	0,0095
Längsbohren (Sackloch)	70	0,2	70	0,18
Gewindebohren (Klemmschraube)	15	--	14 (MMS 1,2 ml/h)	--

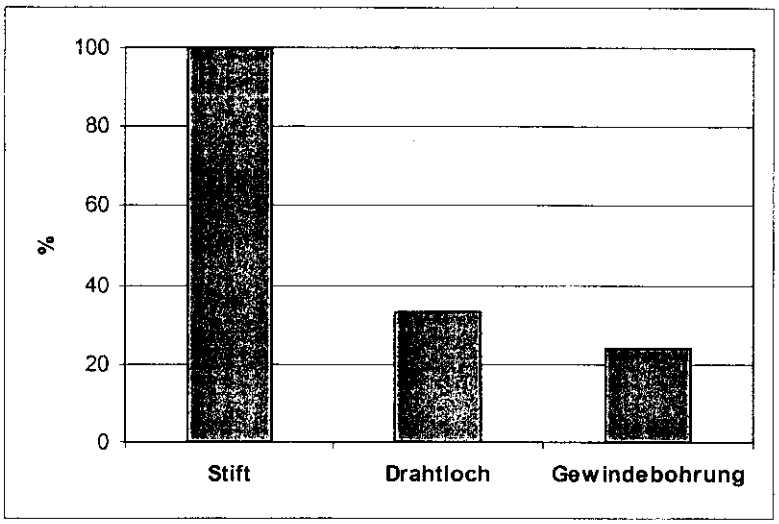
nass MMS trocken

Die übrigen drei der fünf Operationen müssen mit MMS-Systemen durchgeführt werden. Das Durchgangsloch der Querbohrung besitzt ein Länge/Durchmesser-Verhältnis von größer als eins (ca. 1,3) und kommt damit dem Tiefbohrbereich nahe. Um der Gefahr eines Spanstaus mit der Folge von Werzeugbruch zu begegnen, wurde diese Operation mit einem MMS-System versehen. Die Drehoperation zur Herstellung des Stiftfußes stellt die Operation mit dem größten Zerspanvolumen am Bauteil dar; vom vorhandenen Material werden 94 % zerspant. Aufgrund der hohen Zerspanleistung ist diese Operation in der Massenfertigung prozesssicher nur minimalmengengeschmiert durchzuführen (Werkzeugstandzeit). Die Schmierung der Bearbeitungsstelle erfolgt mit Hilfe einer Drehdurchführung durch die Spindel und ist quasi als innere Zufuhr des MMS-Mediums ausgebildet. Hierzu wird das MMS-Medium mit Druckluft vermischt und durch die Hohlspindel geblasen. Die Druckluftzufuhr wird nicht gesteuert betrieben, so dass immer ein Freiblasen der Zerspanstelle durch Druckluft gewährleistet ist. Aufgrund der engen räumlichen Verhältnisse an der Bearbeitungsstation „Drehen" ist eine solche Verfahrensweise für die Prozesssicherheit günstig. Andernfalls bestünde die Gefahr, dass sich Späne zwischen Werkzeug und Werkstück verklemmen.

Abbildung 5-24 zeigt das Verhältnis der Zerspanvolumina der relevanten Zerspanoperationen, bezogen auf die Drehoperation des Stiftfußes als Operation mit dem größten Zerspanvolumen. Demnach kommen diese Operationen auf 20 bis 30 % des Zerspanvolumens der Drehoperation.

Die Operation Gewindebohren (letzter Arbeitsgang) erfolgt minimalmengengeschmiert da es bekanntermaßen bei der Trockenbearbeitung sehr schnell zum Fressen des Gewindebohrers kommt. Diese Eigenschaft des Gewindebohrens ist auf die geometrisch bedingte, hohe Reibung zwischen Werkzeug und Werkstück zurückzuführen.

Abbildung 5-24: Zerspanvolumens der Verfahren mit nennenswerter Zerspanleistung (Drehen des Stifts = 100 %)



Bei allen Operationen, MMS-unterstützten oder letztlich trocken reakiesiert, wurden Versuche zur reinen Trockenbearbeitung mit unterschiedlich beschichteten Werkzeugen unternommen, um möglicherweise Standmengengewinne zu erzielen. Die Testergebnisse sind in Tabelle 5-16 zusammengestellt.

Keiner der durchgeführten Beschichtungstests erbrachte ein zufriedenstellendes Ergebnis. Der Einsatz von beschichteten Werkzeugen kann die MMS in diesen Fällen also nicht ersetzen.

Tabelle 5-16: Ergebnisse der Versuche mit beschichteten Werkzeugen

Operation	**Beschichtung**	**Ergebnis**
Bohren	TiN	Bearbeitung mit TiN besch. HSS Werkzeug möglich; zur Einhaltung der Standmenge größere Schmiermenge erforderlich als bei unbesch. Hartmetall → negativ
	DLC[1]	auf HM-Bohrer führt zu schlechter Oberfläche und Probleme mit Toleranzen → negativ
Gewinde-schneiden	DLC	Standmenge nicht erreicht → negativ
Sägen	CrNi	seitliche Reibung zu groß → negativ

[1] Diamond-Like-Carbon = diamantähnliche Kohlenstoffschicht

5.4 Bewertung und Übertragbarkeit der Trockenfertigung

In Phase I des Modellprojekts wurde die Basis für eine erfolgreiche Trockenbearbeitung von Messingkleinbauteilen gelegt. Dort konnte für beide Referenzbauteile nachgewiesen werden, dass sie prozesssicher trocken hergestellt werden können. Die Maßhaltigkeit und Oberflächengüte der Bauteile bleibt innerhalb der Toleranzgrenzen und ist mit den Bearbeitungsergebnissen der Nassfertigung vergleichbar. Es hat sich auch gezeigt, dass nicht nur bei der Trockenbearbeitung „normal"-großer Bauteile die Fertigungshauptzeit reduziert oder zumindest konstant gehalten werden kann, sondern auch bei den hier betrachteten Kleinbauteilen. Mit der eigenkonstruierten A 10-Maschine blieb die Produktivität bei der Trockenbearbeitung gegenüber der Nassbearbeitung konstant oder sie konnte gesteigert werden.

Die in Phase I erkannten Probleme, die vor allem im Zusammenhang mit der abrasiven Wirkung von Messingspänen stehen, konnten in Phase II erfolgreich beherrscht werden. Die Konstruktion der A 10-Maschine berücksichtigt die gängigen Regeln für trockenbearbeitungsgerechte Werkzeugmaschinen und zusätzlich die in Phase I gemachten Erfahrungen. Der Aufbau der Maschine ist modular, so dass ein hohes Maß an Flexibilität erreicht wird. Ebenfalls wurde beim Entwurf auf die Integration eines MMS-Systems geachtet, das für einige der erforderlichen Bearbeitungsoperationen den einzig gangbaren Weg zur Trockenbearbeitung darstellt.

Späneabtransport

Auf die Absaugung von Spänen konnte bei allen Serienfertigungstests mit der A 10-Maschine verzichtet werden was einen großen Fortschritt gegenüber Phase I darstellt. Probleme mit negativen Einflüssen von Spänen (Spanablagerung, Spananbackung, Spanflug) konnten größtenteils gelöst werden, wobei anzumerken bleibt, dass es zu erheblichen Ablagerungen auf den einzelnen im Arbeitsraum der Maschine angeordneten Bearbeitungseinheiten kommt. Diese Spanablagerungen stören jedoch nicht den prozesssichern Ablauf der Fertigung. Die erforderlichen Reinigungsmaßnahmen sind kaum höher als bei den Nassbearbeitungsmaschinen.

Minimalmengenschmierung

Noch nicht zufriedenstellend gelöst werden konnte das Problem einer geeigneten MMS-Applikationstechnik. Die Dosierung des Mediums erfolgt in den benötigten, sehr geringen Mengen nicht zuverlässig, so dass eigentlich immer mit einem Überschuss gearbeitet werden muss. Dieser Überschuss an MMS-Medium führt zu den erwähnten Ablagerungen der Späne im Arbeitsraum. Dieses Problem sollte in Zukunft nochmals systematisch angegangen werden.

Erhöhte Temperaturen

Im Rahmen der Serienfertigungstests wurde im Arbeitsraum der A 10-Maschinen eine erhöhte Temperatur festgestellt. Der Arbeitsraum der Maschine während der Laufzeit des Modellprojekts gekapselt und nicht belüftet. Trotz der Temperaturen von fast 50 °C konnten keine negativen Einflüsse auf die Maßhaltigkeit der Bauteile oder die Einsatzfähigkeit der Maschine festgestellt werden. Dennoch sollte man hier die Möglichkeit der Belüftung erwägen, wobei die Abluft aufgrund der vorhandenen Staub- und Ölnebelbeladung einer Reinigung bedarf.

Übertragbarkeit

Als Ergebnis des Umstellungsprojekts zeigte sich, dass die prozesssichere Massenfertigung von Messingkleinbauteilen mit Trockenbearbeitungsmaschinen ohne Einbußen der Bauteilqualität oder der Produktivität möglich ist. Die von der Leipold GmbH konzipierte und aufgebaute A 10-Maschine stellt insgesamt ein schlüssiges Konzept für die Trockenbearbeitung dar.

Auch im Rahmen dieses Modellprojekts hat sich die in Abschnitt 5.1 skizzierte dreistufige Vorgehensweise bei der Umstellung der Fertigung auf Trockenbearbeitung als nützliche und verallgemeinerbare Orientierung erwiesen. Diesem Vorgehen entsprechend schließt sich an die Prüfung der technologischen Realisierbarkeit der Trockenlegung der Einzeloperationen (Schnittbedingungen, Werkzeugoptimierung, Werkzeugbeschichtungen, MMS-System, alternative Fertigungsoperationen) die Sicherstellung der prozesssicheren, trockenen Komplettbearbeitung des Bauteils an. Dieser Schritt erfordert in der Regel eine Umstellung der Bearbeitungsabfolge, da häufig gegenseitige Beeinflussungen der Fertigungsoperationen bestehen. Schließlich müssen die Produktionsmittel, d.h. die Werkzeugmaschinen, das Teilehandling und andere Vorrichtungen angepasst werden.

Trotz dieses verallgemeinerbaren und systematischen Vorgehens hat sich einmal mehr bestätigt, dass die Umstellung einer bestehenden Fertigung von „nass auf trocken" immer einen werkstückspezifischen individuellen Lösungsweg erfordert, so dass allgemeingültige Lösungen und Prinzipien immer nur zu einem Teil behilflich sein können.

6. Ökologische Auswirkungen

6.1 Methodisches Vorgehen und Untersuchungsprogramm

Die Bewertung der Umweltauswirkungen erfolgt als Gegenüberstellung zwischen der bestehenden Fertigungsweise mit Schneidölen (Nassbearbeitung, A 2- und A 3-Machine) und der Trockenbearbeitung mit den beiden Maschinentypen Mikron und A 10-Maschine (Eigenbau). Hierbei werden nicht nur die Werkzeugmaschinen selbst untersucht, sondern es wird auch das Umfeld der Fertigung mit den relevanten Nachbehandlungsschritten und Nebenanlagen betrachtet. In der vorliegenden Arbeit soll jedoch keine vollständige betriebliche Umweltbilanz erstellt werden. Der Bilanzraum umfasst also nicht den gesamten Betrieb, sondern nur die von der Umstellung betroffenen Bereiche. Dies sind die Werkzeugmaschinen sowie ihre anteilige Nutzung an den nachfolgenden Bearbeitungsschritten und Nebenanlagen.

Bei der Umstellung der Nassbearbeitung auf die Trockenbearbeitung treten im durchführenden Unternehmen gleichzeitig zwei substanzielle Änderungen ein. Die erste Änderung besteht in der Trockenlegung des Fertigungsprozesses. Zum anderen wird die bisherige ältere Werkzeugmaschine durch modernere und leistungsfähigere Maschinen ersetzt, wobei die Mikron-Maschine ein anderes Maschinenkonzept (Rundtaktmaschine) hat und prinzipiell auch für die Nassbearbeitung geeignet ist. Die A 10-Maschine hingegen behält das alte Maschinenkonzept bei, ist aber nicht mehr für die Nassbearbeitung geeignet.

Die vorliegende Untersuchung zielt auf den Vergleich zwischen Trocken- und Nassbearbeitung ab. Bei der Bewertung der unterschiedlichen Umweltauswirkungen der betrachteten Fälle ist deshalb zu prüfen, welche Effekte auf den allgemeinen technischen Fortschritt und bei der Mikron auf das andere Maschinenkonzept zurück zu führen sind und welche Effekt der Umstellung des Verfahrens von Nass- auf Trockenbearbeitung zu zurechnen sind. Dabei muss in Kauf genommen werden, dass sich beide Effekte nicht immer vollständig trennen lassen.

Tabelle 6-1 zeigt den „Kontenrahmen" einer vollständigen betrieblichen Umweltbilanz (LfU 1994). In diesem Kontenrahmen sind alle relevanten In- und Outputgrößen enthalten, die die Umweltbeeinträchtigungen eines Produktionsbetriebs beschreiben. Da keine vollständige betriebliche Umweltbilanz erstellt wird, liegt der vorliegenden Untersuchung auch nur eine Teilmenge des dargestellten Kontenrahmens zugrunde. Die in die Untersuchung einbezogenen In- und Outputgrößen sind in Tabelle 6-1 durch Fettdruck hervorgehoben. Als Inputgrößen werden die Umlaufgüter sowie Luft, Wasser (Trinkwasser) und Energie (Strom), als Outputgrößen die Produkte (Zwischenprodukte) Abfälle, Abwasser und die Abluft betrachtet.

Zunächst wird der Fertigungsablauf der Nass- und der Trockenbearbeitung jeweils als schematisches Blockschaltbild dargestellt (vgl. Abschnitte 6.2.1, 6.3.1, 6.4.1; Abbildungen 6-1, 6-5, 6-7). Als Hauptprozess sind dort diejenigen Schritte des Fertigungsprozesses bezeichnet, mit denen das produzierte Bauteil direkt in Berührung kommt. Der Hauptprozess setzt sich aus dem eigentlichen Fertigungsschritt - der Bearbeitung des Halbzeugs in der Werkzeugmaschine - und den Nachbehandlungsanlagen zur Reinigung und Entgratung der Bauteile zusammen. Den Hauptprozessstufen sind meist Nebenprozesse beigeordnet, mit denen die nicht ins Produkt eingehenden Stoffströme behandelt werden. Bei den Nebenprozessen handelt es sich meist um Trennprozesse, mit denen die Stoffströme, die an die Arbeitsumgebung oder die Umwelt abgegeben werden, behandelt werden, um im Hinblick auf eine Verwertung oder Entsorgung möglichst sortenreine und konzentrierte Abfallströme zu erzeugen.

Tabelle 6-1: Kontenrahmen einer vollständigen betrieblichen Umweltbilanz (LfU 1994; in der Untersuchung berücksichtigte Elemente sind fett gedruckt)

INPUT	OUTPUT
1. LIEGENSCHAFTEN	**1. PRODUKTE**
1.1 Boden	**1.1 Halbzeuge / Zwischenprodukte**
1.2 Gebäude	1.2 Fertigprodukte
2. ANLAGEGÜTER	2. ABGÄNGE
2.1 betriebstechnische Anlagen	2.1 Liegenschaften
2.2 elektrische Kommunikation	2.2 Anlagen
2.3 Einrichtungen	
2.4 Fuhrpark	
3. UMLAUFGÜTER	**3. ABFÄLLE** [1]
3.1 Rohstoffe	**3.1 Abfälle zur Verwertung**
3.2 Halb- und Fertigware	**3.2 Abfälle zur Beseitigung**
3.3 Hilfsstoffe	**3.3 Sonderabfälle zur Verwertung**
3.4 Betriebsstoffe	**3.4 Sonderabfälle zur Beseitigung**
4. WASSER	**4. ABWASSER**
4.1 Trinkwasser	**4.1 Menge**
4.2 Brauchwasser	**4.2 Belastung**
4.3 Regenwasser	
5. LUFT	**5. ABLUFT**
5.1 Menge	**5.1 Menge**
5.2 Belastung	**5.2 Belastung**
6. ENERGIEBEDARF	6. ENERGIEABGABE
6.1 Strom	6.1 Strom
6.2 Heizöl	6.2 Heizenergie
6.3 Erdgas	6.3 Restenergie (Wärme, Licht, Lärm)
6.4 Fernwärme	
6.5 Treibstoffe	

1) gegenüber LfU 1994 geändert wg. Terminologie Kreislaufwirtschaftsgesetz

Der Bilanzraum für die Bestandsaufnahme der Stoffströme der Nass- und der Trockenbearbeitung entspricht den Blockschaltbildern 6-1, 6-5 und 6-7. Der Bilanzraum ist so festgelegt, dass alle Prozessschritte, auf die die Umstellung auf die Trockenbearbeitung einen Einfluss hat, einbezogen sind.

Auf der Grundlage des jeweiligen Blockschaltbilds werden die Stoffströme und der Energiebedarf verfolgt und teilespezifisch als In- und Output bilanziert. Grundlage der Stoff- und Energiebilanzen sind gemessene Daten (z.B. Wägungen, Strommessungen), Planungsdaten, Daten der Anlagenhersteller, Daten aus dem Einkauf sowie Schätzwerte. Besonderer Wert wurde auf die Erstellung einer plausiblen und vollständigen Schneidöl-Bilanz der Nassbearbeitung gelegt.

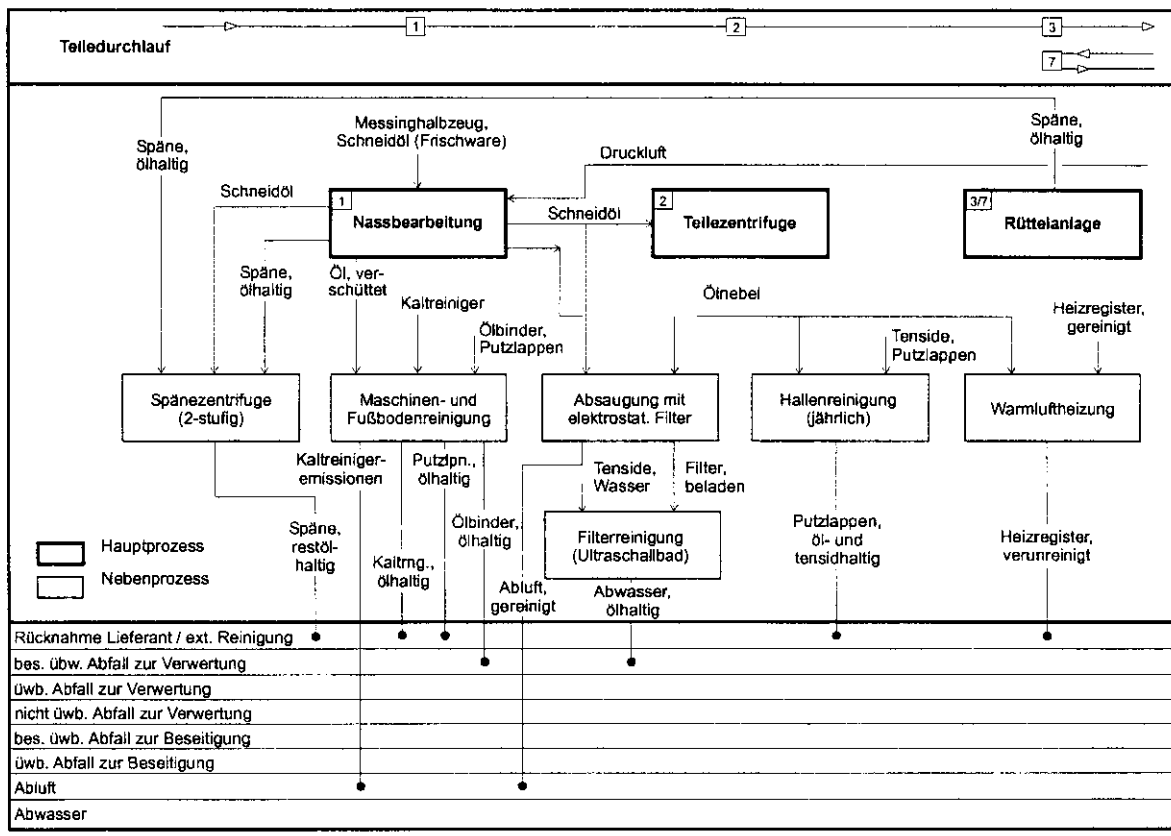
Eine Reihe von Maschinen und Prozessen werden von allen gefertigten Bauteilen gleichermaßen in Anspruch genommen. Die Zuordnung der anteiligen Umweltbeanspruchung erfolgt über die Masse oder die Anzahl der gefertigten Bauteile. Dies stellt vor allem bei der Betrachtung der Entfettungsanlage, bei der die Bauteileoberfläche eine geeignetere Bezugsgröße wäre, eine relativ grobe Näherung dar. Dies lässt sich jedoch nicht umgehen, da die Oberfläche des Bauteilespektrums einer Jahresproduktion nicht bekannt ist und nur mit erheblichem Aufwand erhoben werden könnte.

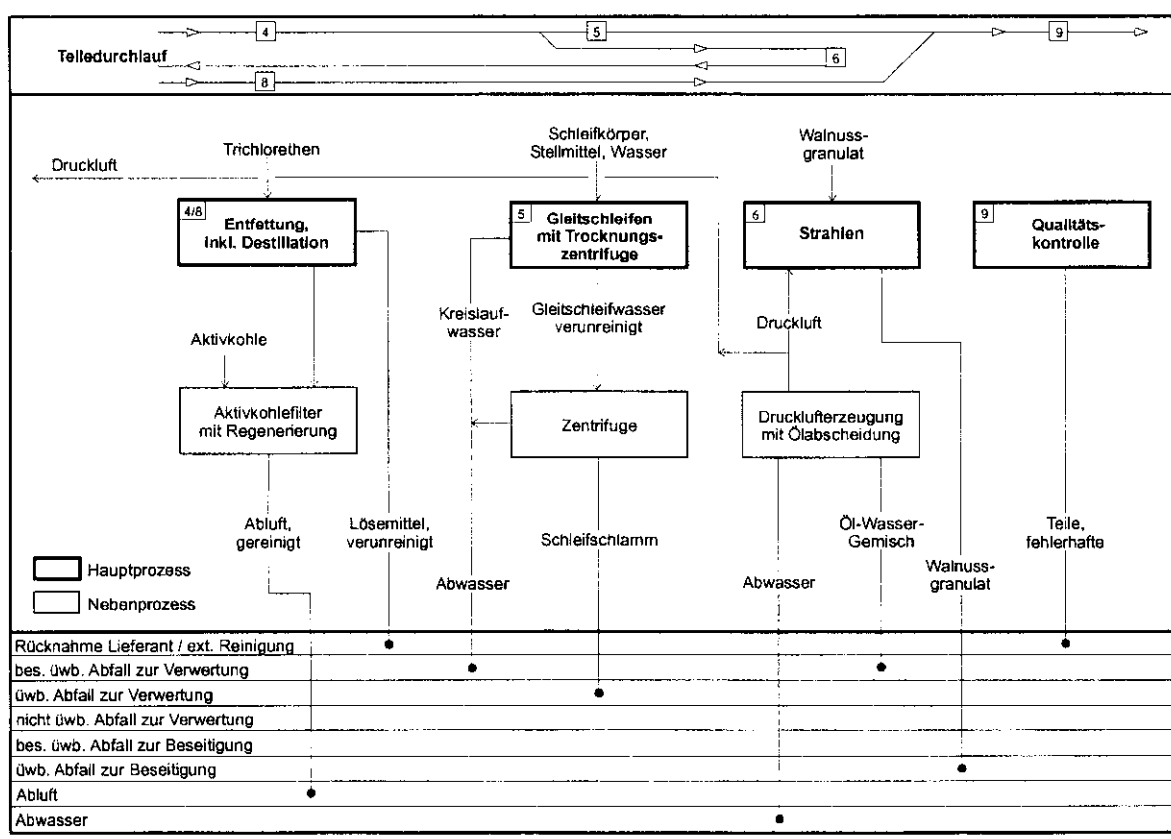
6.2 Nassbearbeitung (A 2- / A 3-Maschinen)

6.2.1 Fertigungsablauf Nassbearbeitung

Der schematische Fertigungsablauf der Nassbearbeitung ist in Abbildungen 6-1 dargestellt. Die folgende Beschreibung der Fertigung orientiert sich am Teiledurchlauf durch die Hauptprozessschritte. Die zugeordneten Nebenprozessschritte werden gemeinsam mit den jeweiligen Hauptprozessen erläutert. Für die Nassbearbeitung bedeutet dies, dass die Hauptprozessschritte: Werkzeugmaschine, Teilezentrifuge, Rüttelanlage, Entfettungsanlage, Strahlanlage, Gleitschleifanlage und Drucklufterzeugung mit den zugehörigen Nebenanlagen bilanziert werden. Neben dem Teiledurchlauf, der in der Nachbehandlung teilespezifisch variiert, sind in den Blockschaltbildern auch die wichtigsten Stoffströme angegeben. Für diejenigen Stoffe, die den Bilanzraum verlassen (Output-Ströme), ist der Verbleib angegeben (Rücknahme durch Lieferanten bzw. Behandlung/Reinigung außerhalb des Abfallregimes, Abfallverwertung bzw. -beseitigung, Abluft, Abwasser).

Abbildung 6-1: Nassbearbeitung - Schematischer Ablauf der Fertigung





Werkzeugmaschine (1)

Der **Werkzeugmaschine** (A 2- / A 3-Maschine), die teilespezifisch eine Reihe verschiedener Bearbeitungsstationen enthält, wird das Messinghalbzeug als Stangenware oder als Coils zugeführt. Das Schneidöl wird über flexible Zuführungsschläuche auf die Zerspanstelle geleitet. Die Messingspäne, die mit dem Schneidöl ausgeschwemmt werden, sind stark ölhaltig und werden in Auffangbehältern gesammelt. Die gefüllten Spänebehälter werden manuell zu einer zweistufigen **Spänezentrifuge** transportiert. Dort werden sie bis auf einen Restölgehalt von ca. 2,8 % entölt (Mittelwert) und in den Spänebunker abgeworfen. Von dort werden die Späne an den Halbzeughersteller zurück gegeben. Der Restölgehalt von 2,8 % ermöglicht eine Verwertung der Messingspäne, führt aber beim Halbzeughersteller zu entsprechenden Emissionen. Der Halbzeughersteller beabsichtigt deshalb, zukünftig geringere Restölgehalte zu fordern. Das in der Zentrifuge abgetrennte Schneidöl wird in den Schneidölkreislauf zurück geführt.

Beim Zerspanvorgang kommt es zur Bildung feiner Öltröpfchen (Aerosole) und Öldämpfe. Um die Belastung der Hallenluft mit dem entstehenden Ölnebel zu reduzieren, sind die Maschinen gekapselt und mit einer **Absaugung** versehen. Die Absaugung erfolgt bisher zentral, wird aber Zug um Zug auf dezentrale Absauganlagen für die Einzelmaschinen umgestellt. Für die vorliegende Bilanzierung wird davon ausgegangen, dass alle betrachteten Maschinen mit einer eigenen Absauganlage ausgerüstet sind. Die Absauganlagen enthalten einen **elektrostatischen Filter**, in dem der Ölnebel abgeschieden wird. Die Ölbelastung der gereinigten Abluft, die in die Halle geführt wird, liegt bei 4 mg/m^3 und unterschreitet den Grenzwert von 10 mg/m^3. Das abgeschiedene Schneidöl wird zu den Werkzeugmaschinen zurückgeführt. Die elektrostatischen Filter werden regelmäßig in einem **Ultraschallbad** unter Verwendung von Tensiden gereinigt. Die verbrauchte Reinigungsemulsion ist ein besonders überwachungsbedürftiger Abfall und wird einem zugelassenen Entsorgungsunternehmen zur Verwertung überlassen.

Die Abluft der Absauganlagen enthält trotz der Filtration in geringem Umfang feine Öltröpfchen. Ein Teil dieses Ölnebels setzt sich in der Halle ab und wird bei der **jährlichen Hallenreinigung** mit Putzlappen und Reinigungsmitteln (Tenside) entfernt. Die Putzlappen werden extern gereinigt und wiederverwendet.

Die Halle ist mit einer Warmluftheizung ausgestattet. Beim Umluftbetrieb der Heizung setzt sich der Ölnebel auf den Heizregistern ab. Im Anschluss an die Heizperiode erfolgt die **Reinigung der Heizregister** in einer benachbarten Tankstelle mit einem Dampfstrahlgerät. Das Öl wird im tankstelleneigenen Ölabscheider zurückgehalten und entsprechend entsorgt.

Die **Lagerung und Bereitstellung des Schneidöls** ist in Abbildung 6-1 nicht dargestellt. Wegen des Umweltrisikos, das von derartigen Anlagen ausgeht, soll jedoch kurz auf die Schneidölversorgung der Werkzeugmaschinen eingegangen werden. Im Keller der Werkhalle befindet sich ein Tank von 20 m^3 Inhalt zur Lagerung des frischen Schneidöls. Der Frischöltank ist über eine Rohrleitung mit der Tankanlage für das Kreislauföl (3 mal 5 m^3),

die sich neben der Spänezentrifuge befindet, verbunden. Sinkt das Niveau in den Kreislauföltanks ab, wird aus dem Frischöltank nachgefüllt. Die Tanks sind gemäß den Vorschriften des Wasserhaushalts-Gesetzes (WHG) durch Auffangwannen gesichert. Von den Kreislauftanks geht ein flächendeckendes Rohrsystem aus, das an der Hallendecke angebracht ist. Die Befüllung der Maschinen erfolgt über Zapfpistolen, die an das Rohrsystem angeschlossen sind. Im Regelbetrieb treten Ölverluste aus der Schneidölbereitstellung nur beim Befüllen der Maschinen auf.

Die **laufende Reinigung** der Werkzeugmaschinen (z.B. verschüttetes Öl) erfolgt mit **Putzlappen**. Die gesammelten ölhaltigen Putzlappen werden nach ihrer Reinigung in einem externen Textilreinigungsbetrieb wiederverwendet. In der Produktionshalle befindet sich eine **Kaltreinigerstation** für Reinigungsarbeiten im Zusammenhang mit Wartungs- und Umrüstarbeiten an den Werkzeugmaschinen. Der verunreinigte Kaltreiniger wird zur Aufarbeitung an den Lieferanten zurück gegeben. Es lässt sich nicht vermeiden, dass während der Fertigung Schneidöl auf den Fußboden gelangt. Das verschüttete Öl wird mit einem saugfähigen Granulat (**Ölbinder**) aufgenommen. Der ölbeladene Binder ist ein besonders überwachungsbedürftiger Abfall und wird einem zugelassenen Entsorgungsunternehmen zur Verwertung überlassen.

Teilezentrifuge (2)

Im Anschluss an die Fertigung mit der Werkzeugmaschine werden die Werkstücke in der Teilezentrifuge von anhaftendem Schneidöl befreit. Das Schneidöl wird in den Ölkreislauf zurückgeführt. Die Entölung ist nicht vollständig, da aufgrund von Adhäsionskräften ein dünner Ölfilm auf der Teileoberfläche verbleibt. Infolge des Ölfilms bleiben an der Teileoberfläche auch kleine Messingspäne haften. Diese Späne lassen sich in der Teilezentrifuge nicht abtrennen.

Rüttelanlage (3)

In der Rüttelanlage werden die auf der Teileoberfläche anhaftenden Messingspäne entfernt. Näherungsweise kann angenommen werden, dass die Späne vollständig abgeschieden werden. Diese Späne werden zusammen mit den Spänen aus der Werkzeugmaschine in der Spänezentrifuge entölt.

Entfettungsanlage (4/8)

Im Anschluss an die Grobreinigung der Werkstücke in der Teilezentrifuge und der Rüttelanlage wird die anhaftende Ölschicht in einer gekapselten Entfettungsanlage entfernt. Die Entfettung erfolgt mit einem chlorierten Lösemittel (Trichlorethen). Das Lösungsmittel wird anlagenintern im geschlossenen Kreislauf geführt. Hierzu enthält die Entfettungsanlage eine **Destillationsstufe**, in der das Öl und weitere Verunreinigungen (z.B. Metallpartikel, Walnussgranulatstaub aus der Strahlanlage) aus dem Lösungsmittel abgetrennt werden. Der Destillationsrückstand wird gemeinsam mit verbrauchtem Lösemittel, das in regelmäßigen Abständen ausgetauscht wird (ca. alle 4 Wochen), an den Lieferanten zur Redestilla-

tion zurückgegeben. Zur Vermeidung von Lösemittelemissionen ist die Entfettungsanlage mit einem **Aktivkohlefilter** ausgerüstet. Die Aktivkohle wird anlagenintern regeneriert, wobei keine Abfälle entstehen.

Gleitschleifen und Strahlen (5/6)

Die entfetteten Bauteile werden anschließend entweder in der Gleitschleif- oder der Strahlanlage entgratet. Beim **Gleitschleifen**, das zur Behandlung von Werkstücken mit Außengraten eingesetzt wird, werden Wasser und ein Stellmittel zugegeben. Das Gleitschleifwasser wird zentrifugiert, so dass sich die partikulären Verunreinigungen abscheiden (Metallpartikel, keramischer Abrieb der Schleifkörper) und das Wasser im Kreislauf geführt werden kann. Dieses Kreislaufwasser wird vierteljährlich in einer Abwasserbehandlungsanlage durch Zugabe von Flockungsmitteln gereinigt, um Partikel zu entfernen, die sich trotz des Zentrifugierens im Lauf der Zeit anreichern. Der Zentrifugenschlamm und der sich absetzende Flockungsschlamm werden gemeinsam einem zugelassenen Entsorgungsunternehmen als überwachungsbedürftiger Abfall zur Verwertung überlassen. Das auszutauschende Wasser, das gelöste Messingbestandteile (Kupfer, Zink) und in geringem Umfang Öl enthält wurde analysiert und kann entsprechend den Vorgaben des Entsorgungsunternehmens gemeinsam mit den anderen Öl-Wasser-Emulsionen des Betriebs verwertet werden.

Bauteile mit Innengraten werden durch **Strahlen** mit einem Granulat aus Walnussschalen entgratet. Mit der Zeit wird das Granulat zerstört, so dass das Unterkorn abgetrennt und als hausmüllähnlicher Gewerbeabfall beseitigt werden muss. Die gestrahlten Bauteile durchlaufen zur Endreinigung nochmals die Rüttelanlage und die Entfettungsanlage, um anhaftende Partikel (Walnussgranulat-Abrieb) zu entfernen. Der Granulatabrieb aus der Rüttelanlage gelangt zusammen mit den Spänen in den Spänebunker und verbrennt bei der Späneverwertung. In der Entfettungsanlage gelangt der Abrieb in den Destillationsrückstand.

Qualitätskontrolle (9)

Ist die Nachbehandlung durch Gleitschleifen oder Strahlen (inkl. Entfettung) abgeschlossen, erfolgt eine Prüfung der Bauteile. Die Anzahl fehlerhafter Bauteile liegt unterhalb 1 ‰.

Drucklufterzeugung

Die Strahlanlage und ein Teil der Werkzeugmaschinen sind an das Druckluftnetz (7 bar) des Betriebs angeschlossen. Die Druckluft wird durch einen drehzahlgeregelten Schraubenkompressor (Frequenzumrichter) bereitgestellt. Das ölhaltige Kompressorkondensat wird in einer Öltrenneinrichtung behandelt. Die ölreiche Phase ist ein besonders überwachungsbedürftiger Abfall und wird einem zugelassenen Entsorgungsunternehmen zur Verwertung überlassen. Die Wasserphase wird in die Kanalisation eingeleitet.

Fertigungsablauf Nassbearbeitung der Bauteile 1 und 2

Die Fertigungsabläufe der beiden untersuchten Bauteile sind in Abbildung 6-2 dargestellt. Im Anschluss an die Werkzeugmaschine gelangen die Bauteile in die Teilezentrifuge und die Rüttelanlage. Nach der Entfettung werden die Bauteile entgratet (Bauteil 1: Strahlen; Bauteil 2: Gleitschleifen). Die gestrahlten Bauteile 1 werden vor der Qualitätskontrolle nochmals in der Entfettungsanlage gereinigt.

Abbildung 6-2: Fertigungsablauf Nassbearbeitung

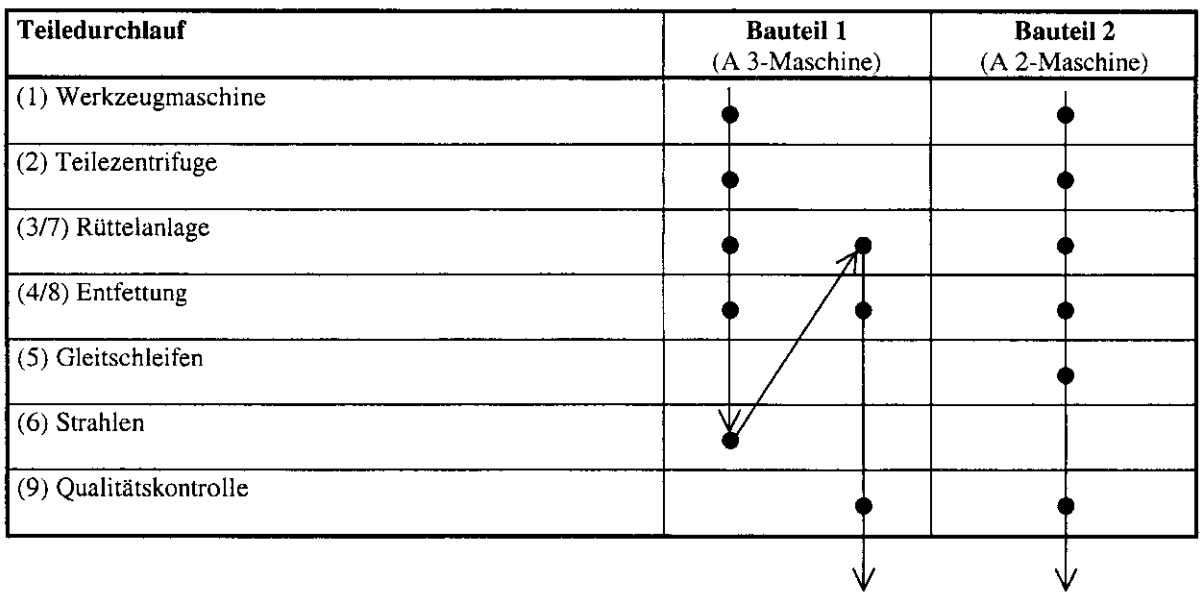


Tabelle 6-2: Bauteil 1 - Input-Output-Tabelle der Nassbearbeitung (A 3-Maschine)

Gesamtbilanz Nassbearbeitung - Bauteil 1 (A 3-Maschine)

Input (Mengenangaben pro 1.000 Teile)				Output				
Nr.	**Stoff bzw. Stoffbestandteile, Energie**	**Menge**	**Herkunft**	**Nr.**	**Stoff bzw. Stoffbestandteile**	**Menge**	**wohin?**	**EAV-Schlüssel**
E 1	Messinghalbzeug	1.530,0 g	Zulieferer	P 1	Fertigteile	414,2 g	Kunde	
E 2	Schneidöl (Frischware)	54,3 g	Zulieferer	R 1	Messingspäne, 2,8 % Restölgehalt	1.148,0 g	Rücknahme durch Halbzeughersteller	kein Abfall
E 3	Wasser (Filterreinigung)	gering	Wasserversorgung	R 2	Emulsion, öl- und tensidhaltig	gering	externe Verwertung	12 01 09*
E 4	Reinigungsmittel (Filterreinigung)	gering	Zulieferer	R 3	Putzlappen, öl- und tensidhaltig	13,6 g	Textilreinigung ext.	kein Abfall
E 5	Putzlappen, gereinigt (Maschinen-, Hallenreinigung)	9,7 g	Textilreinigung extern	R 4	Kaltreiniger, ölhaltig	0,7 g	Rücknahme durch Zulieferer	kein Abfall
E 6	Kaltreiniger	2,4 g	Zulieferer	R 5	Kaltreinigeremission	2,2 g	Atmosphäre	kein Abfall
E 7	Ölbinder	2,3 g	Zulieferer	R 6	Ölbinder, ölhaltig	5,1 g	externe Verwertung	15 02 99D1*
E 8	Reinigungsmittel (jährliche Hallenreinigung)	gering	Zulieferer	R 7	Heizregister, verunreinigt	-.-	Reinigung extern (Tankstelle)	kein Abfall
E 9	Heizregister, gereinigt	-.-	Reinigung ext. (Tankstelle)	R 8	Trichlorethen, ölhaltig und verunreinigt	19,3 g	Rücknahme durch Zulieferer	kein Abfall
E 10	Trichlorethen	15,0 g	Zulieferer	R 11	Strahlmittel, verbraucht	gering	Beseitigung	hmä. Gewerbeabf.
E 13	Strahlmittel (Walnussgran.)	2,3 g	Zulieferer	R 12	Messingteile, fehlerhaft	gering	Rücknahme durch Halbzeughersteller	kein Abfall
E99	elektrische Energie	2,25 kWh	Eigenstromerzeugung, EVU	R 13	Abwasser aus Öltrenneinrichtung Kompressor	gering	Kanalisation	Abwasser
				R 14	Emulsion, ölhaltig aus Öltrenneinrichtung Kompressor	gering	externe Verwertung	12 01 09*

gering: Mengen sind vernachlässigbar klein

Tabelle 6-3: Bauteil 2 - Input-Output-Tabelle der Nassbearbeitung (A 2-Maschine)

Gesamtbilanz Nassbearbeitung - Bauteil 2 (A 2-Maschine)								
Input (Mengenangaben pro 1.000 Teile)				**Output**				
Nr.	**Stoff bzw. Stoffbestandteile, Energie**	**Menge**	**Herkunft**	**Nr.**	**Stoff bzw. Stoffbestandteile**	**Menge**	**wohin?**	**EAV-Schlüssel**
E 1	Messinghalbzeug	1.640,0 g	Zulieferer	P 1	Fertigteile	486,0 g	Kunde	
E 2	Schneidöl (Frischware)	58,5 g	Zulieferer	R 1	Messingspäne, 2,8 % Restölgehalt	1.187,2 g	Rücknahme durch Halbzeughersteller	kein Abfall
E 3	Wasser (Filterreinigung, Gleitschleifen)	3 ml	Wasserversorgung	R 2	Emulsion, öl- und tensidhaltig	gering	externe Verwertung	12 01 09*
E 4	Reinigungsmittel (Filterreinigung)	gering	Zulieferer	R 3	Putzlappen, öl- und tensidhaltig	16,7 g	Textilreinigung ext.	kein Abfall
E 5	Putzlappen, gereinigt (Maschinen-, Hallenreinigung)	11,8 g	Textilreinigung extern	R 4	Kaltreiniger, ölhaltig	0,7 g	Rücknahme durch Zulieferer	kein Abfall
E 6	Kaltreiniger	2,4 g	Zulieferer	R 5	Kaltreinigeremissionen	2,2 g	Atmosphäre	kein Abfall
E 7	Ölbinder	2,9 g	Zulieferer	R 6	Ölbinder, ölhaltig	6,2 g	externe Verwertung	15 02 99D1*
E 8	Reinigungsmittel (jährliche Hallenreinigung)	gering	Zulieferer	R 7	Heizregister, verunreinigt	-.-	Reinigung extern (Tankstelle)	kein Abfall
E 9	Heizregister, gereinigt	-.-	Reinigung ext. (Tankstelle)	R 8	Trichlorethen, ölhaltig und verunreinigt	19,3 g	Rücknahme durch Zulieferer	kein Abfall
E 10	Trichlorethen	15,0 g	Zulieferer	R 9	Schleifschlamm	1 g	externe Verwertung	12 02 02
E 11	Schleifkörper	1 g	Zulieferer	R 10	Abwasser, öl- und metallhaltig (Gleitschleifen)	2 ml	externe Verwertung	12 01 09*
E 12	Stellmittel	gering	Zulieferer	R 12	Messingteile, fehlerhafte	gering	Rücknahme durch Halbzeughersteller	kein Abfall
E99	elektrische Energie	1,43 kWh	Eigenstromerzeugung, EVU	R 13	Abwasser aus Öltrenneinrichtung Kompressor	gering	Kanalisation	Abwasser
				R 14	Emulsion, ölhaltig aus Öltrenneinrichtung Kompr.	gering	externe Verwertung	12 01 09*

gering: Mengen sind vernachlässigbar klein

6.2.2 Ökologische Daten der Nassbearbeitung

6.2.2.1 Input-Output-Bilanz der Fertigungskette

Die Input-Output-Bilanzen der Prozessketten der beiden Bauteile 1 und 2 sind in den Tabellen 6-2 und 6-3 zusammengestellt. Diesen Gesamtbilanzen liegt jeweils eine detaillierte Aufnahme der einzelnen Stoffströme innerhalb des Bilanzraums zu Grunde (vgl. Anhang zu Abschnitt 6). Die Gesamtbilanz zeigt, dass bei der Nassbearbeitung vor allem die öl- und lösemittelhaltigen Output-Ströme von Bedeutung sind (R 1, R 3, R 4, R 5, R 6, R 8). Die anderen Output-Ströme sind bezüglich der Menge und der Inhaltsstoffe von geringer Bedeutung.

6.2.2.2 Schneidölbilanz

Das eingesetzte Schneidöl ist derjenige Produktionshilfsstoff, der im wesentlichen für die Schädlichkeit der Abfälle verantwortlich ist. Tabelle 6-4 zeigt eine Gegenüberstellung der Schneidölbilanzen der Bauteile 1 und 2. Man erkennt, dass sich die benötigten Schneidölmengen bei beiden Bauteile unterscheiden, der prozentuale Anteil von Kreislauföl (80 bis 90 %) und frischem Schneidöl (10 bis 20 %) jedoch in ähnlicher Größenordnung liegt.

Tabelle 6-4: Schneidölbilanz der Nassbearbeitung

	Bauteil 1 (A 3-Maschine)		**Bauteil 2** (A 2-Maschine)	
	Menge (g/1.000 Teile)	Anteil	Menge (g/1.000 Teile)	Anteil
Schneidölbedarf je 1.000 Teile	518,0	100 %	356,7	100 %
davon:				
- *Kreislauföl*	*463,7*	*89,5 %*	*298,2*	*83,6 %*
- *Frischware*	*54,3*	*10,5 %*	*58,5*	*16,4 %*
Schneidölverluste je 1.000 Teile	54,3	100 %	58,5	100 %
davon ausgetragen über:				
- *Späne*	*32,1*	*59,2 %*	*33,2*	*56,8 %*
- *Lösemittel, verunreinigt*	*13,6*	*25,1 %*	*16,0*	*27,3 %*
- *Lappen (Maschinenreinigung)*	*4,0*	*7,3 %*	*4,9*	*8,3 %*
- *Ölbinder (Fußbodenreinigung)*	*2,7*	*5,0 %*	*3,3*	*5,7 %*
- *Absaugung (Hallenabluft)*	*1,9*	*3,4 %*	*1,1*	*1,9 %*
- *Abwasser*	*gering*	*gering*	*gering*	*gering*

Ebenfalls vergleichbar ist die Verteilung der Schneidölverluste auf die verschiedenen ölhaltigen Abfallarten. Es zeigt sich, dass der überwiegende Teil der Schneidölverluste durch den Restölgehalt der zentrifugierten Späne (55 bis 60 %) und durch das in der Entfettungsanlage entfernte Haftöl (25 bis 27 %) ausgetragen wird. Der Anteil des bei der Maschinen- und Fußbodenreinigung entfernten Schneidöls beläuft sich auf 13 bis 14 %, während der von den Absauganlagen in die Hallenluft abgegebene Ölanteil, der sich überall in der Halle niederschlägt und bei der jährlichen Hallenreinigung entfernt wird, zwischen 2 und 3,5 % liegt. Zur Veranschaulichung der Wege, die das Schneidöl in der Fertigung nimmt, ist der Schneidölkreislauf von Bauteil 1 in den Abbildungen 6-3 und 6-4 grafisch dargestellt.

Abbildung 6-3: Schneidölkreislauf (Sankey-Diagramm) - Bauteil 1 (Angaben in g/1.000 Teile)

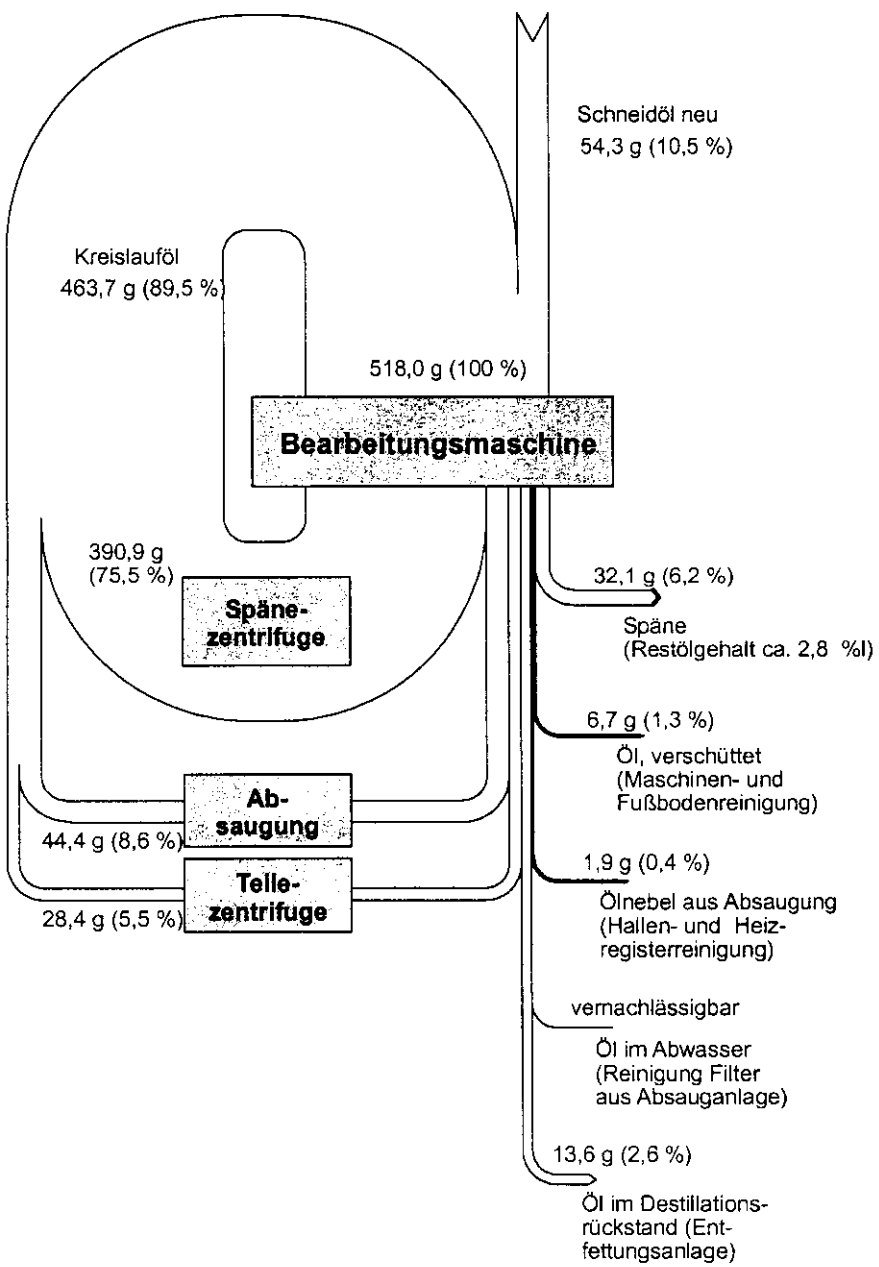
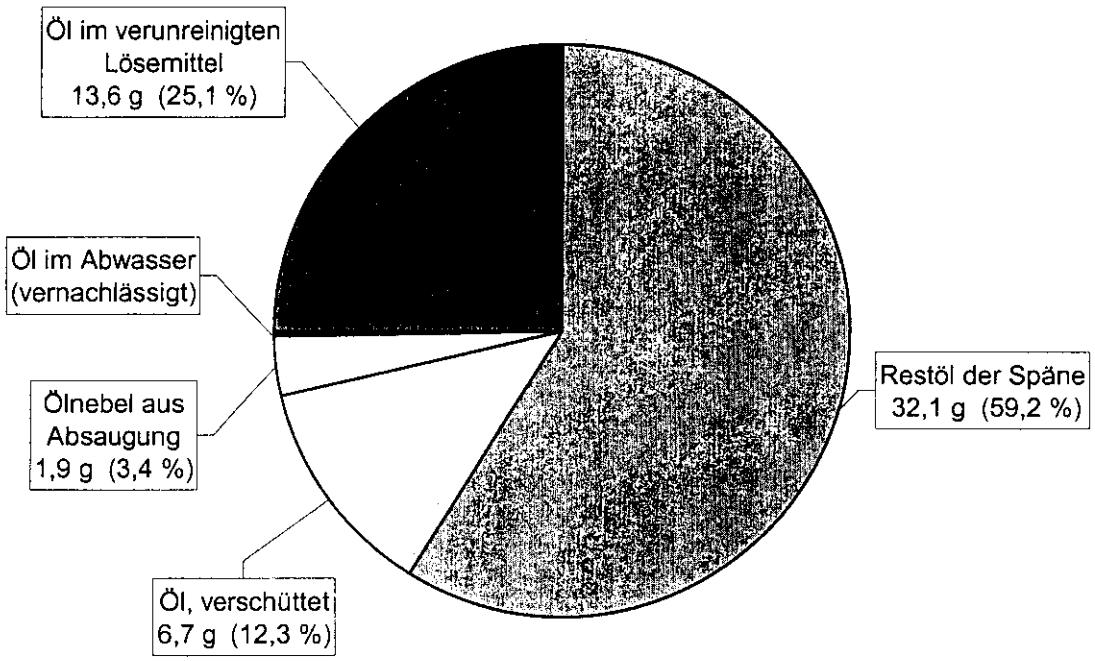


Abbildung 6-4: Verteilung des Schneidölverbrauchs auf die Abfallströme - Bauteil I (Angaben in g/1.000 Teile)



6.2.2.3 Verbleib der Output-Ströme und Entsorgung der Abfälle

Der überwiegende Anteil der Schneidölverluste wird außerhalb des Abfallregimes behandelt. Knapp 60 % des ausgeschleusten Schneidöls gelangen mit den Spänen (R 1) zum Halbzeughersteller zurück. Dort werden die Späne als Sekundärrohstoff eingeschmolzen, wobei das Schneidöl unter unkontrollierten Bedingungen thermisch umgesetzt wird. Etwa 25 % des Schneidöls gelangen mit dem verunreinigten Lösemittel (R 8) über die Rücknahme durch den Zulieferer zu einem Verwertungsbetrieb, der das Lösemittel (Trichlorethen) zurückgewinnt. Der dort entstehende Destillationsrückstand wird gemäß der Altölverordnung verwertet. Immerhin rund 7 % der Schneidölverluste gelangen mit den Putzlappen (R 3) zu einem Textilreinigungsbetrieb und von dort zur kommunalen Kläranlage. 5 % des Schneidöls werden mit dem Ölbinder (R 6) gebunden und als Abfall energetisch verwertet. Der verunreinigte Kaltreiniger (R 4) wird vom Lieferanten zur Aufarbeitung zurückgenommen. Der weitaus größte Anteil des eingesetzten Kaltreinigers verdunstet und gelangt als VOC-Emission in die Atmosphäre (R 5).

Alle anderen Abfall- und Abwasserströme, die direkt mit der Fertigung zusammenhängen, sind vernachlässigbar klein. Ölhaltige Abwässer (R 2, R 10, R 14) werden einem zugelassenen Entsorgungsunternehmen zur Verwertung übergeben (Emulsionsspaltung; thermische Verwertung des Ölanteils). Die Heizregister (R 7) werden in einer Tankstelle, die über Leichtstoffabscheider verfügt, gereinigt. Der Metallgehalt der Gleitschleifschlämme (R 9) ist so hoch, dass eine metallurgische Verwertung möglich ist. Die Strahlmittelreste (R 11; Walnussschalenbruch) sind schadstoffarm und werden dem hausmüllähnlichen Gewerbeabfall zugegeben. Fehlerhafte Teile (R 12) werden zusammen mit den Spänen vom Halbzeughersteller zurückgenommen und verwertet. Das schadstoffarme Abwasser aus der Öltrenneinrichtung der Kompressorenanlage (R 13) wird nach vorheriger Prüfung der Einleitwerte in die Kanalisation gegeben.

6.2.2.4 Energiebedarf

Der Energiebedarf der Nassfertigung der Bauteile 1 und 2 ist in Tabelle 6-5 zusammengestellt. Der größte Anteil des Gesamtenergiebedarfs (ca. 80 bis 85 %) wird in beiden Fällen von den Werkzeugmaschinen benötigt. Ein weiterer wichtiger Energieverbraucher ist die Entfettungsanlage, die bei Bauteil 1 zweimal durchlaufen wird. Ebenfalls einen nennenswerten Energiebedarf weist die Drucklufterzeugung für die Fertigung von Bauteil 2 auf. Alle anderen Aggregate sind bezüglich des Energiebedarfs von geringer Bedeutung.

Tabelle 6-5: Energiebedarf der Nassbearbeitung

	Bauteil 1 (A 3-Maschine)		**Bauteil 2** (A 2-Maschine)	
	Strombedarf (Wh/1.000 Teile)	Anteil	Strombedarf (Wh/1.000 Teile)	Anteil
- *Werkzeugmaschine inkl. Absaugung*	*1.760*	*78,2 %*	*1.204*	*84,2 %*
- *Druckluft Werkzeugmaschine*	-.-	-.-	*81*	*5,8 %*
- *Spänezentrifuge*	*46*	*2,1 %*	*48*	*3,4 %*
- *Teilezentrifuge*	*5*	*0,2 %*	*2*	*0,1 %*
- *Rütteln*	*13*	*0,6 %*	*3*	*0,2 %*
- *Entfetten*	*397*	*17,6 %*	*79*	*5,5 %*
- *Gleitschleifen*	-.-	-.-	*12*	*0,8 %*
- *Strahlen (inkl. Druckluft)*	*30*	*1,3 %*	-.-	-.-
Gesamtenergiebedarf	2.251	100,0 %	1.429	100,0 %

6.3. Trockenbearbeitung (Mikron-Maschine)

6.3.1 Fertigungsablauf Trockenbearbeitung

Die Beschreibung des schematischen Verlaufs der Trockenfertigung mit der Mikron-Maschine erfolgt analog der Darstellung der Nassbearbeitung. Die Prozesskette ist in Abbildung 6-5 als Blockschaltbild dargestellt.

Werkzeugmaschine (1)

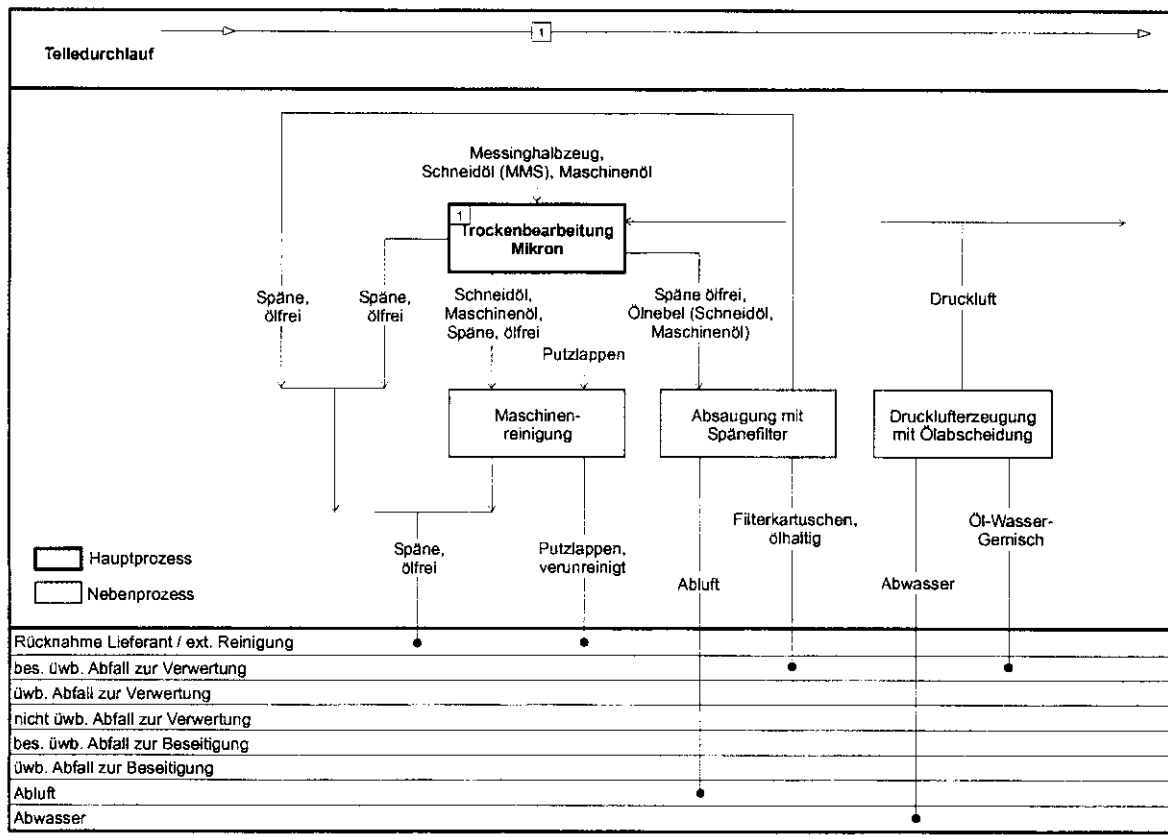
Im Unterschied zur Nassbearbeitung sind den **Mikron-Maschinen** Ablängvorrichtungen vorgeschaltet, in denen das Messing-Halbzeug mit einer Säge auf das erforderliche Maß gebracht wird. Die Zuführung der abgelängten Teile von der Sägestation in die Werkzeugmaschine erfolgt mittels Druckluft. Einzelne Bearbeitungsstationen der Mikron werden durch ein Minimalmengenschmiersystem (MMS) gezielt mit geringsten Kühlschmierstoffmengen versorgt. Die Späne werden aus dem Bearbeitungsraum der gekapselten Werkzeugmaschinen über eine Ringleitung mit einer **Absauganlage** entfernt. Zum Freihalten störanfälliger Bereiche wird **Druckluft** eingesetzt. Die Späne sind praktisch ölfrei und lassen sich daher umweltverträglicher verwerten als die restölhaltigen Späne aus der Nassbearbeitung. Ein Durchlaufen der Spänezentrifuge ist nicht mehr erforderlich. In den **Abluftfiltern**, die dreimal jährlich gewechselt werden, scheiden sich feinste Messingpartikel und Öltröpfchen ab. Die ölverunreinigten Filterkartuschen sind ein besonders überwachungsbedürftiger Abfall und werden einem zugelassenen Entsorgungsunternehmen zur Verwertung überlassen.

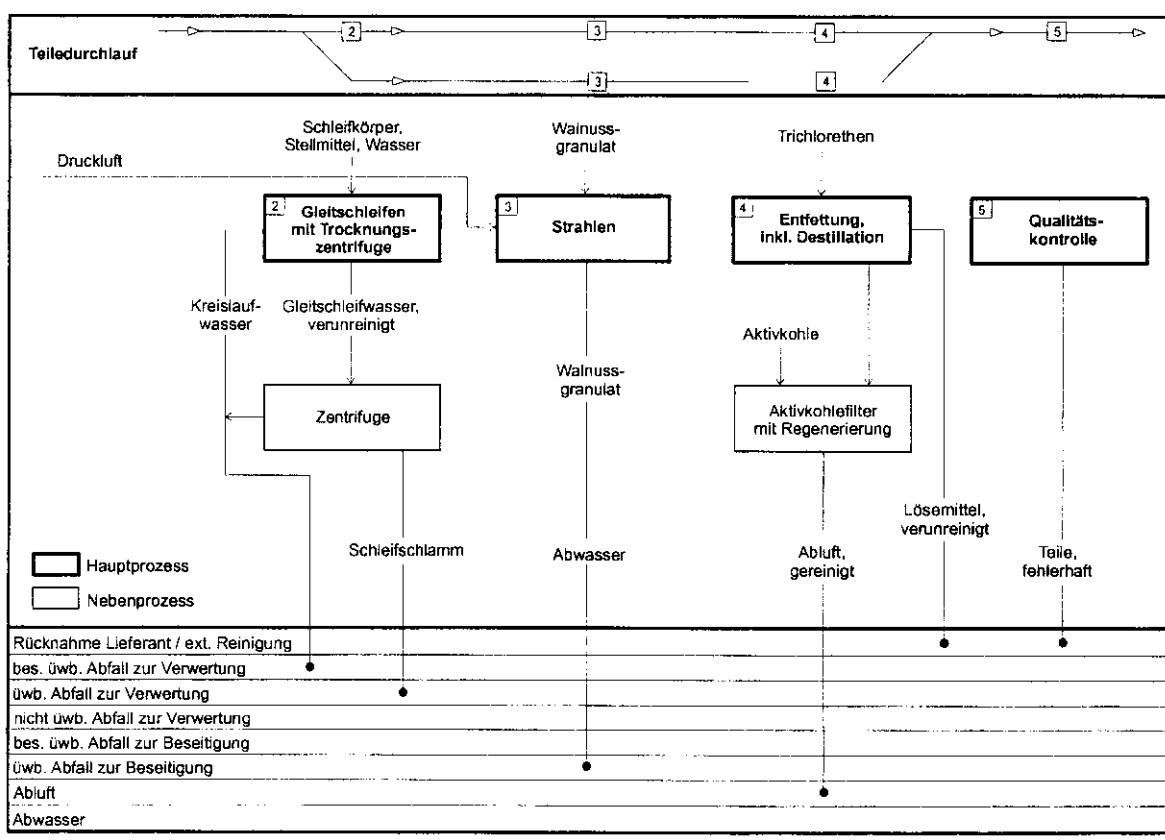
Etwa zweimal wöchentlich werden die **Maschinen gereinigt**. Hierzu werden die Messingspäne mit einem Industriestaubsauger entfernt und den anderen Spänen zugegeben. Ölhaltige Putzlappen fallen nur noch in geringen Mengen an. Bei der Trockenbearbeitung werden praktisch keine Reinigungsarbeiten mehr an der Kaltreinigerstation durchgeführt.

Gleitschleifen und Strahlen (2/3)

Die Rohteile aus der Trockenbearbeitung sind praktisch ölfrei. Die Bearbeitungsstationen Teilezentrifuge, Rüttelanlage und Entfettung können deshalb entfallen. In der **Strahlanlage** werden die Bauteile entgratet. Fallweise müssen sie in der **Gleitschleifanlage** vorbehandelt werden. Die Funktionsweise der Strahl- und der Gleitschleifanlage wurde bereits in Abschnitt 2 erläutert.

Abbildung 6-5: Trockenbearbeitung (Mikron) - Schematischer Ablauf der Fertigung





Entfettungsanlage (4)

Im Anschluss an das Strahlen werden die Bauteile zur Entfernung der Staubschicht in die Entfettungsanlage gegeben. Da die Teile praktisch ölfrei sind, wird durch die trocken hergestellten Bauteile nur Walnussschalenstaub in die Entfettungsanlage eingetragen. Ebenfalls eingetragen werden die auf dem auf unbearbeiteten Bauteiloberflächen befindliche Ziehmittelrückstände aus der Halbzeugherstellung. Für diesen Reinigungsschritt ist bei der Trockenbearbeitung prinzipiell auch eine lösemittelfreie Reinigungsanlage geeignet, die sinnvollerweise aber erst dann projektiert wird, wenn ein maßgeblicher Teil der Fertigung auf Trockenbearbeitung umgestellt ist.

Qualitätskontrolle (5)

Ist die Nachbehandlung durch Gleitschleifen oder Strahlen (inkl. Entfettung) abgeschlossen, erfolgt eine Prüfung der Bauteile. Auch bei der Trockenbearbeitung mit der Mikron-Maschine ist die Quote fehlerhafter Bauteile kleiner als 1 ‰.

Drucklufterzeugung

Neben der Strahlanlage sind alle Trockenbearbeitungsmaschinen an das Druckluftnetz (7 bar) angeschlossen. Im Vergleich zu den Nassbearbeitungsmaschinen ist der Druckluftbedarf der Mikron-Trockenbearbeitungsmaschinen erheblich höher (vgl. Anhang).

Fertigungsablauf Trockenbearbeitung (Mikron) der Bauteile 1 und 2

Die Fertigungsabläufe der beiden Bauteile sind in Abbildung 6-6 dargestellt. Im Anschluss an die Fertigung wird Bauteil 1 gestrahlt und in der Entfettungsanlage gereinigt. Bauteil 2 durchläuft vor dem Strahlen die Gleitschleifanlage. Anschließend erfolgt die Qualitätskontrolle.

Abbildung 6-6: Fertigungsablauf Trockenbearbeitung (Mikron)

Teiledurchlauf	**Bauteil 1** (Mikron)	**Bauteil 2** (Mikron)
(1) Werkzeugmaschine	●	●
(2) Gleitschleifen		●
(3) Strahlen	●	●
(4) Entfettung	●	●
(5) Qualitätskontrolle	●	●
	↓	↓

Tabelle 6-6: Bauteil 1 - Input-Output-Tabelle der Trockenbearbeitung (Mikron)

Gesamtbilanz Trockenbearbeitung (Mikron) - Bauteil 1								
Input (Mengenangaben pro 1.000 Teile)				**Output**				
Nr.	**Stoff bzw. Stoffbestandteile, Energie**	**Menge**	**Herkunft**	**Nr.**	**Stoff bzw. Stoffbestandteile**	**Menge**	**wohin?**	**EAV-Schlüssel**
E 1	Messinghalbzeug	1.530,0 g	Zulieferer	P 1	Fertigteile	414,2 g	Kunde	
E 14	Schneidöl (MMS)	0,36 g	Zulieferer	R 15	Messingspäne, ölfrei	1.115,8 g	Rücknahme durch Halbzeughersteller	kein Abfall
E 15	Maschinenöl	1,75 g	Zulieferer					
E 16	Filter	0,5 g	Zulieferer	R 16	Filterkartuschen, ölhaltig	0,7 g	externe Verwertung	15 02 99D1
E 5	Putzlappen, gereinigt (Maschinenreinigung)	gering	Textilreinigung extern	R 17	Putzlappen, verunreinigt	gering	Textilreinigung ext.	kein Abfall
				R 11	Strahlmittel, verbraucht	gering	Beseitigung	hmä. Gewerbeabf.
E 13	Strahlmittel (Walnussgran.)	2,3 g	Zulieferer					
E 10	Trichlorethen	15,0 g	Zulieferer	R 8	Trichlorethen, verunreinigt (ölarm)	5,7 g	Rücknahme durch Zulieferer	kein Abfall
E99	elektrische Energie	2,98 kWh	Eigenstromerzeugung, EVU	R 12	Messingteile, fehlerhaft	gering	Rücknahme durch Halbzeughersteller	kein Abfall
				R 13	Abwasser aus Öltrenneinrichtung Kompressor	gering	Kanalisation	Abwasser
				R 14	Emulsion, ölhaltig aus Öltrenneinrichtung Kompr.	gering	externe Verwertung	12 01 09

gering: Mengen sind vernachlässigbar klein

Tabelle 6-7: Bauteil 2 - Input-Output-Tabelle der Trockenbearbeitung (Mikron)

Gesamtbilanz Trockenbearbeitung (Mikron) - Bauteil 2								
Input (Mengenangaben pro 1.000 Teile)				**Output**				
Nr.	**Stoff bzw. Stoffbestandteile, Energie**	**Menge**	**Herkunft**	**Nr.**	**Stoff bzw. Stoffbestandteile**	**Menge**	**wohin?**	**EAV-Schlüssel**
E 1	Messinghalbzeug	1.640,0 g	Zulieferer	P 1	Fertigteile	486,0 g	Kunde	
E 14	Schneidöl (MMS)	1,23 g	Zulieferer	R 15	Messingspäne, ölfrei	1.154,0 g	Rücknahme durch Halbzeughersteller	kein Abfall
E 15	Maschinenöl	2,63 g	Zulieferer					
E 16	Filter	0,8 g	Zulieferer	R 16	Filterkartuschen, ölhaltig	1,1 g	externe Verwertung	15 02 99D1
E 5	Putzlappen, gereinigt (Maschinenreinigung)	gering	Textilreinigung extern	R 17	Putzlappen, verunreinigt	gering	Textilreinigung ext.	kein Abfall
				R 9	Schleifschlamm	1 g	externe Verwertung	12 02 02
E 11	Schleifkörper	1 g	Zulieferer	R 10	Abwasser, öl- und metallhaltig (Gleitschleifen)	2 ml	externe Verwertung	12 01 09
E 12	Stellmittel (Gleitschleifen)	0,5 g	Zulieferer					
E 3	Wasser	3 ml	Wasserversorger	R 11	Strahlmittel, verbraucht	gering	Beseitigung	hmä. Gewerbeabf.
E 13	Strahlmittel (Walnussgran.)	2,3 g	Zulieferer	R 8	Trichlorethen, verunreinigt (ölarm)	3,3 g	Rücknahme durch Zulieferer	kein Abfall
E 10	Trichlorethen	15,0 g	Zulieferer					
E99	elektrische Energie	3,96 kWh	Eigenstromerzeugung, EVU	R12	Messingteile, fehlerhaft	gering	Rücknahme durch Halbzeughersteller	kein Abfall
				R 13	Abwasser aus Öltrenneinrichtung Kompressor	gering	Kanalisation	Abwasser
				R 14	Emulsion, ölhaltig aus Öltrenneinrichtung Kompr.	gering	externe Verwertung	12 01 09

gering: Mengen sind vernachlässigbar klein

6.3.2 Ökologische Daten der Trockenbearbeitung (Mikron)

6.3.2.1 Input-Output-Bilanz der Fertigungskette

Die Input-Output-Bilanzen der Prozessketten der betrachteten Bauteile 1 und 2 sind in den Tabellen 6-6 und 6-7 zusammen gestellt. Analog der Nassbearbeitung liegen der Gesamtbilanz auch hier die Stoffströme innerhalb des Bilanzraums zugrunde, die im Anhang zu Abschnitt 6 enthalten sind.

6.3.2.2 Verbleib der Outputströme und Entsorgung der Abfälle

Der mengenmäßig bedeutendste Output-Strom der Trockenbearbeitung sind die Messingspäne (R 15), die im Unterschied zur Nassbearbeitung keine messbaren Ölanteile mehr enthalten. Da bisher nur ein kleiner Teil der Fertigung auf Trockenbearbeitung umgestellt ist, kommt dieser Vorteil derzeit ökologisch kaum (geringere Emissionen beim Einschmelzen der Späne) und ökonomisch (höhere Vergütung) noch nicht zum Tragen. Da die ölfreie Spänemenge noch sehr klein ist wird sie aus logistischen Gründen noch mit den ölhaltigen Spänen der Nassfertigung im Spänebunker zusammengeführt. Das Aufkommen an Putzlappen (R 7) ist ebenso wie deren Ölgehalt erheblich reduziert, was zu einer Entlastung des Abwassers des Textilreinigungsbetriebs führt. Das verunreinigte Lösemittel der Entfettungsanlage (R 7), das den trocken hergestellten Bauteilen zuzurechnen ist, beinhaltet ebenfalls kein Öl mehr, sondern nur noch feinste Metallspäne, Strahlmittelstaub und Ziehmittelreste. Trotzdem ist es wegen seines Lösemittelgehalts über ein Rücknahmesystem zu entsorgen. Weitere Abfälle mit problematischen Inhaltsstoffen stellen nur die Filterkartuschen (R 16) der Absauganlagen (besonders überwachungsbedürftiger Abfall zur Verwertung) sowie die aus der Nassbearbeitung bereits bekannten öl- und metallhaltigen Abfälle der Kompressorenanlage und der Gleitschleifanlage dar.

6.3.2.3 Energiebedarf

Der Energiebedarf der mit der Mikron-Machine trocken hergestellten Bauteile 1 und 2 ist in Tabelle 6-8 zusammengestellt. Im Unterschied zur Nassbearbeitung ist der Energiebedarf trotz der geringeren Anzahl der Prozessschritte deutlich höher. Ursache ist der erhebliche Druckluftbedarf der Mikron-Maschinen, der trotz einer modernen Kompressorenanlage (Schraubenkompressor, Drehzahlregelung mit Frequenzumrichter) zwischen 60 und 70 % der benötigten Energiemenge verursacht. Ein weiterer wichtiger Energieverbraucher ist auch bei der Trockenbearbeitung die Entfettungsanlage, während die anderen Prozessschritte bezüglich des Energiebedarfs von geringer Bedeutung sind.

Tabelle 6-8: Energiebedarf der Trockenbearbeitung (Mikron)

	Bauteil 1 (Mikron)		**Bauteil 2** (Mikron)	
	Strombedarf (Wh/1.000 Teile)	Anteil	Strombedarf (Wh/1.000 Teile)	Anteil
- *Werkzeugsmaschine inkl. Absaug.*	*1.015*	*34,1 %*	*1.064*	*26,9 %*
- *Druckluft Werkzeugmaschine*	*1.732*	*58,2 %*	*2.771*	*70,0 %*
- *Gleitschleifen*	-.-	-.-	*12*	*0,3 %*
- *Strahlen (inkl. Druckluft)*	*30*	*1,0 %*	*30*	*0,8 %*
- *Entfetten*	*198*	*6,7 %*	*79*	*2,0 %*
Gesamtenergiebedarf	2.975	100,0 %	3.956	100,0 %

6.4 Trockenbearbeitung (A 10-Maschine)

Entgegen den ursprünglichen Planungen konnten im Projektzeitraum an dem selbst entwickelten Maschinentyp A 10 nur Untersuchungen mit Bauteil 1 durchgeführt werden.

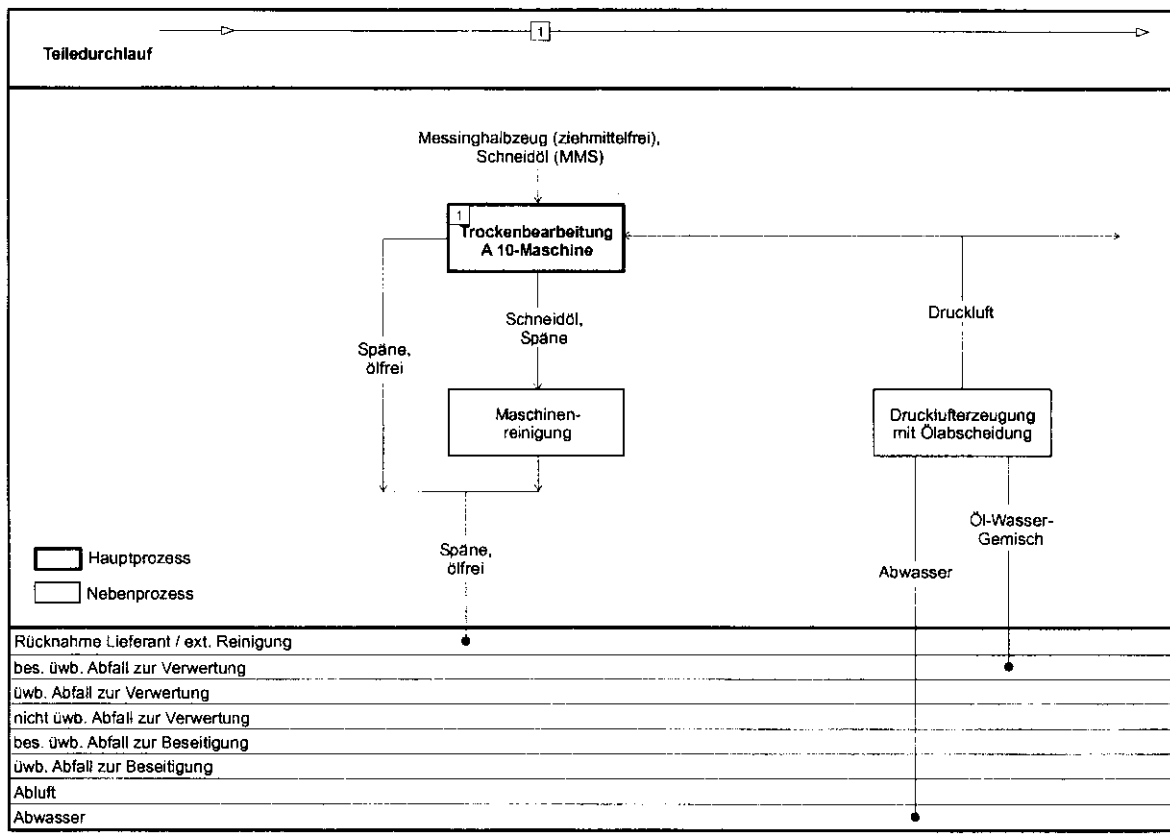
6.4.1 Fertigungsablauf Trockenbearbeitung (A 10-Maschine)

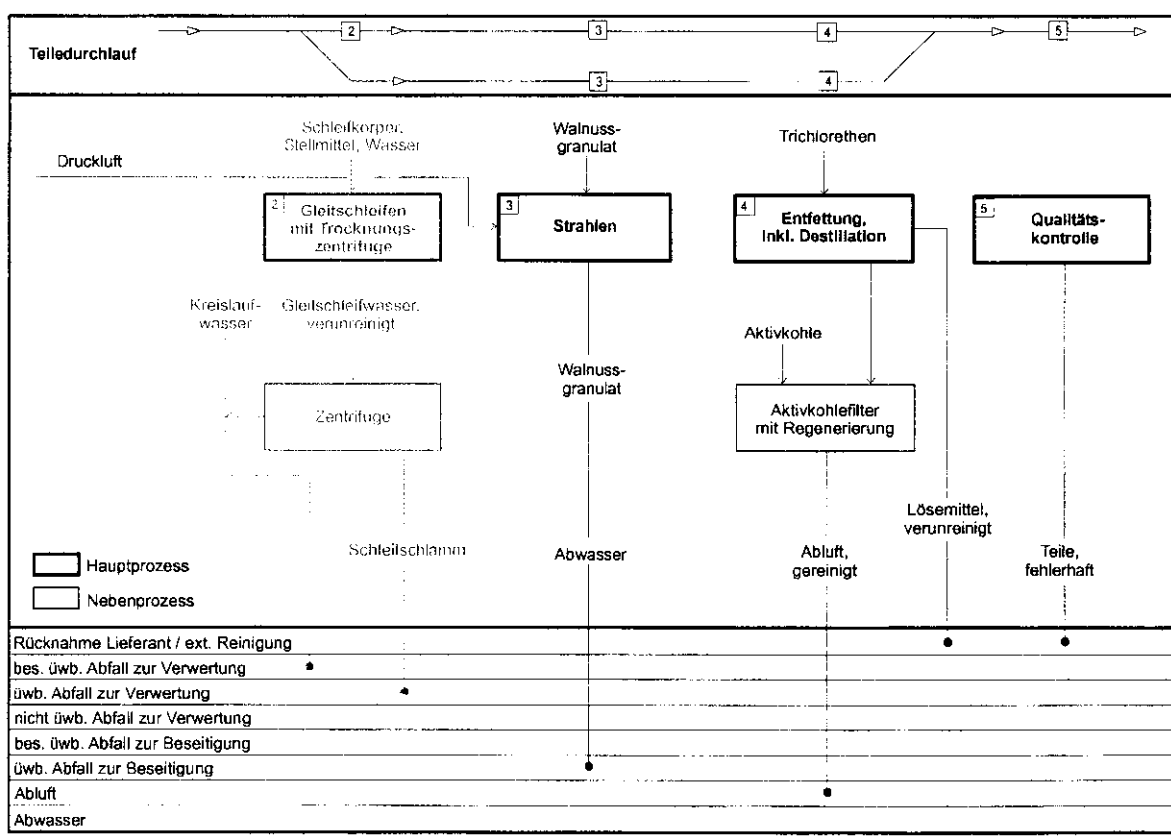
Der schematische Verlauf der Trockenfertigung mit der A 10-Maschine ist bezüglich der nachgelagerten Prozessschritte in Abbildung 6-7 schematisch dargestellt.

Werkzeugmaschine (1)

Die A 10-Maschine benötigt im Unterschied zur Mikron-Maschine keine separate Ablängvorrichtung. Damit entfällt die pneumatische Förderung der abgelängten Rohteile in den Bearbeitungsraum, die einen maßgeblichen Anteil am Druckluft- und Energiebedarf der Mikron-Maschine ausmacht. Auch die A 10-Maschine benötigt bei einzelnen Bearbeitungsschritten ein Minimalmengenschmiersystem (MMS) zur gezielten Versorgung der Spanstelle mit geringsten Kühlschmierstoffmengen. Darüber hinaus werden keine weiteren Schmierstoffe benötigt. Der Spänetransport aus dem Bearbeitungsraum, der bei der Mikron-Maschine durch eine Absaugung der einzelnen Fertigungsstationen erfolgt, wird bei der A 10-Maschine dadurch gelöst, dass durch eine entsprechende Gestaltung des Bearbeitungsraums und durch Überkopfarbeiten die Späne durch die natürliche Schwerkraft nach unten fallen und über geneigte Leitbleche auf einen Förderer gelangen, der sie aus der Maschine transportiert. Es ist nur noch ein geringer Drucklufteinsatz erforderlich, um die Späne von störanfälligen Bereichen fernzuhalten. Die Späne sind praktisch ölfrei und lassen sich - wie bei der Mikron-Maschine - ohne weitere Vorbehandlung umweltverträglich verwerten.

Abbildung 6-7: Trockenbearbeitung (A 10-Maschine) - Schematischer Ablauf der Fertigung (Gleitschleifen entfällt bei Bauteil 1)





Etwa zweimal wöchentlich werden die **Werkzeugmaschinen gereinigt**. Hierbei werden Spänenester, die sich während des Betriebs bilden, mit Pinsel und Handfeger abgekehrt. Sie fallen nach unten und werden mit den während der Bearbeitung entstehenden Spänen aus der Maschine ausgetragen. Putzlappen werden nicht mehr verwendet.

Strahlen (2/3)

Während der Bearbeitung mit der A 10-Maschine erwärmen sich die Bauteile auf Temperaturen bis ca. 90 °C. Diese Temperaturen führen bei dem üblicherweise verwendeten Messing-Halbzeug zu einem Schmelzen der Ziehmittelrückstände. Das Ziehmittel, das auf dem Halbzeug ursprünglich als dünner Film vorliegt, erkaltet nach der Bearbeitung der Bauteile auf den nicht bearbeiteten Oberflächen in Form von Tröpfchen. Diese Tröpfchen beeinträchtigen den Strahlprozess, indem sie zum Verklumpen des Strahlmittels führen. Erst durch den Einsatz entfetteter Halbzeuge, die der Halbzeughersteller bereitstellen konnte, ließ sich die **Strahlanlage** (vgl. Abschnitt 6.2) wieder störungsfrei betreiben.

Entfettungsanlage (4)

Im Anschluss an das Strahlen werden die Bauteile zur Entfernung der Staubschicht in die Entfettungsanlage gegeben. Da die Teile ölfrei sind, wird nur Walnussschalenstaub in die Entfettungsanlage eingetragen. Wie bereits in Abschnitt 6.2 erwähnt, ist nach einer Vollumstellung des Betriebs auf Trockenbearbeitung eine lösemittelfreie Reinigung der Teile denkbar.

Qualitätskontrolle (5)

Ist die Nachbehandlung durch Strahlen (inkl. Entfettung) abgeschlossen, erfolgt eine Prüfung der Bauteile. Auch bei der Trockenbearbeitung mit der A 10-Maschine ist die Quote fehlerhafter Bauteile kleiner als 1 ‰.

Drucklufterzeugung

Neben der Strahlanlage sind alle Trockenbearbeitungsmaschinen an das Druckluftnetz (7 bar) angeschlossen. Im Vergleich zur Trockenbearbeitung mit der Mikron ist der Druckluftbedarf der A 10-Maschine fast um den Faktor 10 reduziert. Entsprechend niedrig ist der Energiebedarf.

Fertigungsablauf Trockenbearbeitung (A 10-Maschine) für Bauteil 1

Der Fertigungsablauf von Bauteil 1 ist in Abbildung 6-8 dargestellt. Im Anschluss an die Fertigungsmaschine wird Bauteil 1 gestrahlt und in der Entfettungsanlage gereinigt. An die Fertigung schließt sich die Qualitätskontrolle an.

Abbildung 6-8: Fertigungsablauf Trockenbearbeitung (A 10-Maschine)

Teiledurchlauf	**Bauteil 1** (A 10-Maschine)
(1) Werkzeugmaschine	
(2) Gleitschleifen	
(3) Strahlen	
(4) Entfettung	
(5) Qualitätskontrolle	

6.4.2 Ökologische Daten der Trockenbearbeitung (A 10-Maschine)

6.4.2.1 Input-Output-Bilanz der Fertigungskette

Die Input-Output-Bilanz der Prozesskette für die Herstellung von Bauteil 1 mit der A 10-Maschine ist in Tabelle 6-10 und dargestellt. Analog der Nassbearbeitung und der Trockenbearbeitung auf der Mikron-Maschine liegt der Gesamtbilanz auch hier eine Betrachtung der Stoffströme innerhalb des Bilanzraums zugrunde, die im Anhang zu Abschnitt 6 enthalten ist. Wie bei der Mikron-Maschine entstehen bis auf die Späne und geringe Mengen an Destillationsrückständen praktisch keine Abfälle mehr.

6.4.2.2 Verbleib der Output-Ströme und Entsorgung der Abfälle

Der mengenmäßig bedeutendste Output-Strom der Trockenbearbeitung mit der A 10-Maschine sind die Messingspäne (R 15), die wie bei der Mikron-Maschine kein Öl mehr enthalten. Die Verwertung der ölfreien Späne stellt aus ökologischer Sicht kein Problem dar. Das verunreinigte Lösemittel (R 8), das den trocken hergestellten Bauteilen zuzurechnen ist, beinhaltet wie bei der Mikron-Maschine ebenfalls kaum noch Öl und wegen des ziehmittelfreien Halbzeugs auch keine Ziehmittelrückstände mehr. Weitere Abfälle mit problematischen Inhaltsstoffen stellen wie bei der Mikron-Maschine nur die ölhaltigen Abfälle der Kompressorenanlage dar.

6.4.2.3 Energiebedarf

Der Energiebedarf des mit der A 10-Maschine trocken hergestellten Bauteils 1 ist in Tabelle 6-9 zusammengestellt. Gegenüber der Nassbearbeitung ist der Energiebedarf insgesamt um 31 % geringer. Dies ist vor allem auf die fehlende Absauganlage und den geringen Druckluftbedarf zurückzuführen, der gegenüber der Mikronmaschine um fast das 10-fache niedriger liegt.

Tabelle 6-9: Energiebedarf der Trockenbearbeitung (A 10-Maschine)

	Bauteil 1 (A 10-Maschine)	
	Strombedarf (Wh/1.000 Teile)	Anteil
- *Werkzeugmaschine*	*1.125*	*72,9 %*
- *Druckluft Werkzeugmaschine*	*190*	*12,3 %*
- *Gleitschleifen*	-.-	-.-
- *Strahlen (inkl. Druckluft)*	*30*	*2,0 %*
- *Entfetten*	*198*	*12,8 %*
Gesamtenergiebedarf	1.543	100,0 %

6.5 Vergleich zwischen Nass- und Trockenbearbeitung

Vergleicht man die Trocken- und die Nassbearbeitung hinsichtlich des Aufkommens der nicht ins Produkt eingehenden Output-Ströme, unterscheiden sich die Verfahren nur unwesentlich. Deutliche Vorteile weist die Trockenbearbeitung jedoch bei der Schadstoffbelastung (im wesentlichen Öl) der Output-Ströme auf. Das Späneaufkommen verringert sich um den Anteil des Restölgehalts und führt bei der Verwertung zu entsprechend geringeren Emissionen. Die sonstigen ölhaltigen Abfälle (Ölbinder, verunreinigte Lösemittel), die sich bei der Nassbearbeitung zusammen mit den ölhaltigen Putzlappen auf rund 40 g/1.000 Teile summieren, reduzieren sich auf etwa 1 g/1.000 Teile bei der Trockenbearbeitung mit der Mikron-Maschine (Filterkartuschen der Absauganlage) und entfallen bei der Trockenbearbeitung mit der A 10-Maschine fast ganz. Die Lösemittelrückstände aus der Entfettungsanlage verringern sich wegen des fehlenden Ölanteils bei der Trockenbearbeitung auf weniger als ein Drittel, bleiben aber wegen des Lösemittelgehalts schadstoffhaltig. Bei einer vollständigen Umstellung auf die Trockenbearbeitung ist denkbar, die bisherige Entfettung auf ein lösemittelfreies Verfahren umzustellen.

Zu der wesentlich verbesserten Lage im Bereich der Schadstoffbelastung kommt bei der Trockenbearbeitung als positiver Umwelteffekt hinzu, dass bei einer weitgehenden oder gar vollständigen Umstellung der Fertigung die im Betrieb umlaufende Schneidölmenge erheblich verringert würde. Damit würde sich das Eintrittsrisiko umweltgefährdender Störfälle reduzieren. Auf die aufwendigen Vorkehrungen zur Vermeidung von Ölunfällen kann im Trockenfertigungsbereich ganz verzichtet werden.

Tabelle 6-10: Bauteil 1 - Input-Output-Tabelle der Trockenbearbeitung (A 10-Maschine)

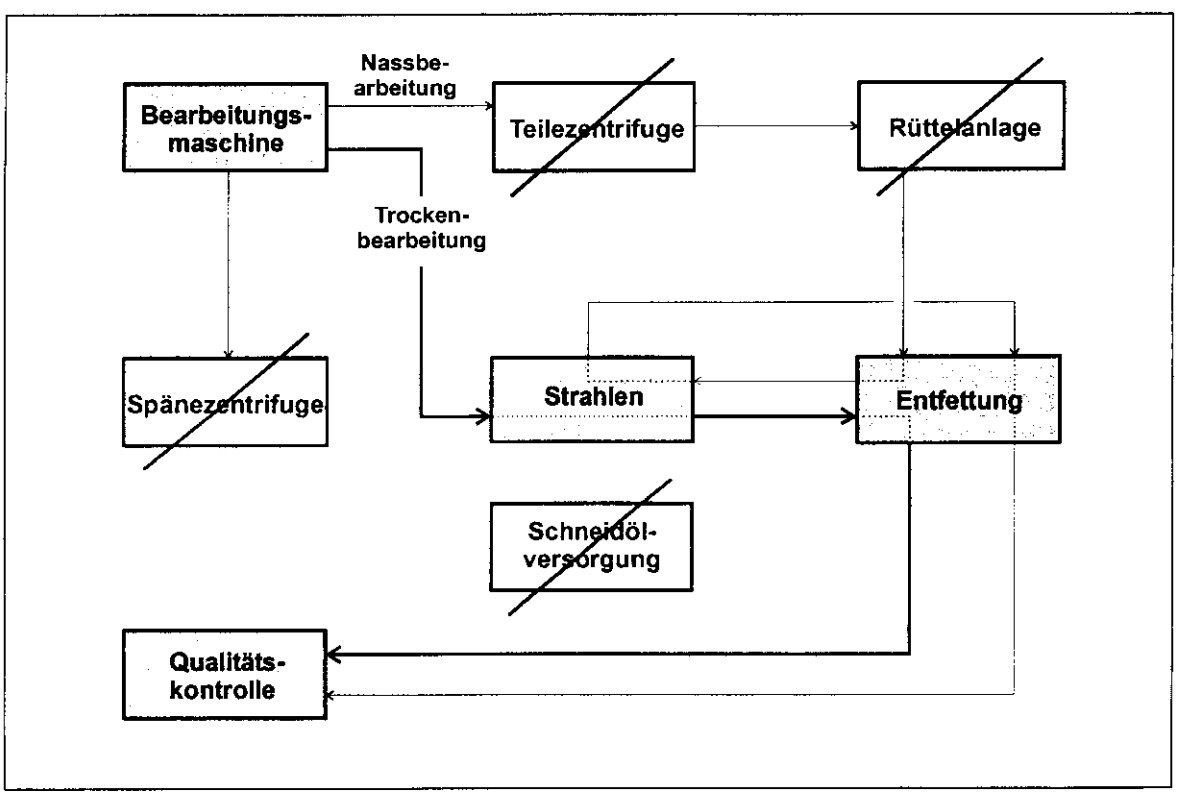
Gesamtbilanz Trockenbearbeitung (A 10-Maschine) - Bauteil 1								
Input (Mengenangaben pro 1.000 Teile)				**Output**				
Nr.	**Stoff bzw. Stoffbestandteile, Energie**	**Menge**	**Herkunft**	**Nr.**	**Stoff bzw. Stoffbestandteile**	**Menge**	**wohin?**	**EAV-Schlüssel**
E 17	Messinghalbzeug (entfettet)	1.530,0 g	Zulieferer	P 1	Fertigteile	414,2 g	Kunde	
E 15	Schneidöl (MMS)	0,90 g	Zulieferer	R 15	Messingspäne, ölfrei	1.115,8 g	Rücknahme durch Halbzeughersteller	kein Abfall
E 5	Putzlappen, gereinigt (Maschinenreinigung)	gering	Textilreinigung extern	R 11	Strahlmittel, verbraucht	gering	Beseitigung	hmä. Gewerbeabf.
E 13	Strahlmittel (Walnussgran.)	2,3 g	Zulieferer	R 8	Trichlorethen, verunreinigt (ölarm)	5,7 g	Rücknahme durch Zulieferer	kein Abfall
E 10	Trichlorethen	15,0 g	Zulieferer	R 12	Messingteile, fehlerhaft	gering	Rücknahme durch Halbzeughersteller	kein Abfall
E99	elektrische Energie	1,54 kWh	Eigenstromerzeugung, EVU	R 13	Abwasser aus Öltrenneinrichtung Kompressor	gering	Kanalisation	Abwasser
				R 14	Emulsion, ölhaltig aus Öltrenneinrichtung Kompr.	gering	externe Verwertung	12 01 09

gering: Mengen sind vernachlässigbar klein

Tabelle 6-11: Vergleich des Abfallaufkommens der Nass- und der Trockenbearbeitung

	Nassbearbeitung		**Trockenbearbeitung**		**Trockenb.**
	(A 3) Bauteil 1	(A 2) Bauteil 2	(Mikron) Bauteil 1	(Mikron) Bauteil 2	(A 10) Bauteil 1
Abfallaufkommen davon:	1.186,0 g	1.232,4 g	1.122,2 g	1.161,4 g	1.121,5
- *Späne*	*1.148,0 g*	*1.187,2*	*1.115,8 g*	*1.154,0 g*	*1.115,8 g*
- *sonst. Abfälle ölhaltig*	*39,5 g*	*43,7 g*	*0,7 g*	*1,1 g*	*gering*
- *sonst. Abfälle ölfrei*	*gering*	*3,0 g*	*5,7 g*	*6,3 g*	*5,7 g*
- *sonstige Aggregate*	*0,491 kWh*	*0,144 kWh*	*0,228 kWh*	*0,121 kWh*	*0,228 kWh*

Abbildung 6-9: Vereinfachung des Fertigungsablaufs durch Trockenbearbeitung (Bauteil 1)



Die Trockenbearbeitung ist mit einer Vereinfachung des gesamten Fertigungsablaufs verbunden, da die Verfahrensschritte Spänezentrifuge, Teilezentrifuge und Rüttelanlage ersatzlos entfallen (vgl. Abbildung 6-9). Aus fertigungstechnischer Sicht werden dadurch die Prozesssicherheit verbessert und die Durchlaufzeiten verkürzt, aus ökologischer Sicht fallen weniger und schadstoffärmere Abfälle an. In dieser Hinsicht unterscheiden sich die beiden Maschinentypen der Trockenbearbeitung Mikron- und A 10-Maschine nur marginal.

Betrachtet man den Gesamtenergiebedarf der Verfahrensalternativen (vgl. Tabelle 6-12), so zeigt sich, dass der teilespezifische Energiebedarf für Bauteil 1 bei der Trockenbearbeitung mit der Mikron-Maschine gegenüber der Nassbearbeitung auf der A 3-Maschine um 32 % erhöht ist. Bei Bauteil 2 liegt die Steigerung des Energiebedarfs der Trockenbearbeitung auf der Mikron sogar um 275 % über der Nassbearbeitung mit der A 2-Maschine. Die Trockenbearbeitung von Bauteil 1 mit der A 10-Maschine benötigt hingegen 31 % weniger Energie als die Nassbearbeitung auf der A 3-Maschine.

Die Ursache für den hohen Energiebedarf der Trockenfertigung auf der Mikron-Maschine ist der erhöhte Druckluftbedarf. Er wird im wesentlichen von den außerhalb der Werkzeugmaschine angeordneten Sägestationen und der pneumatischen Zuführung der Bauteile in die Maschinen sowie den Druckluftdüsen zum Abblasen der Späne im Bearbeitungsraum hervorgerufen. Ein Teil des Druckluftmehrbedarfs (Sägestation, pneumatische Zuführung) und des damit verbundenen Energiebedarfs würde in ähnlicher Größenordnung entstehen, wenn die Mikron-Maschinen mit Schneidöl betrieben würden. Er darf deshalb nicht der Technologie der Trockenbearbeitung angelastet werden. Der Druckluftbedarf zur Späneentfernung ist bei der Trockenbearbeitung mit der A 10-Maschine durch konstruktive Maßnahmen (Überkopfbearbeitung, schräge Flächen, Leitbleche) auf ein Minimum reduziert, d.h. auch bei der Trockenbearbeitung lassen angepasste technische Lösungen einen energieeffizienten Betrieb zu.

Nimmt man die Drucklufterzeugung aus den oben genannten Gründen von der Betrachtung aus, weist die Trockenbearbeitung mit der Mikron-Maschine für Bauteil 1 einen deutlich geringeren Energiebedarf auf als die Nassbearbeitung auf der A 3-Maschine. Dies gilt in ähnlicher Weise auch für die Fertigung von Bauteil 2. Die beiden Trockenbearbeitungsmaschinen (Mikron, A 3-Maschine) sind bei der Herstellung von Bauteil 1 bezüglich des um den Druckluftbedarf verminderten Energiebedarfs vergleichbar.

Der Energiebedarf für den Betrieb der Nebenanlagen ist bei der Trockenbearbeitung wegen des Wegfalls verschiedener Prozessschritte naturgemäß reduziert. Bei Bauteil 1 verringert er sich um mehr als 50 %, bei Bauteil 2 um 16 %.

Tabelle 6-12: Vergleich des Energiebedarfs der Nass- und der Trockenbearbeitung

	Nassbearbeitung		**Trockenbearbeitung**		**Trockenb.**
	(A 3)	(A 2)	(Mikron)	(Mikron)	(A 10)
	Bauteil 1	Bauteil 2	Bauteil 1	Bauteil 2	Bauteil 1
Energiebedarf davon:	2,251 kWh	1,429 kWh	2,975 kWh	3,956 kWh	1,543 kWh
- *Maschine inkl. Absaugung*	*1,760 kWh*	*1,204 kWh*	*1,015 kWh*	*1,064 kWh*	*1,125 kWh*
- *Druckluft Maschine*	-.-	*0,081 kWh*	*1,732 kWh*	*2,771 kWh*	*0,190 kWh*
- *sonstige Aggregate*	*0,491 kWh*	*0,144 kWh*	*0,228 kWh*	*0,121 kWh*	*0,228 kWh*

7. Ökonomische Auswirkungen

Voraussetzung für die Umstellung von Nass- auf Trockenbearbeitungsprozesse ist die Aussicht auf damit verbundene ökonomische Vorteile. Es wäre allerdings zu kurz gegriffen, würde man in einen Vergleich lediglich die Kosten einbeziehen. Je nach Wettbewerbssituation sind für ein Unternehmen bei einer Investitionsentscheidung auch andere Einflussfaktoren von Bedeutung. Für eine aussagefähige Bewertung der Fertigungsalternativen ist es deshalb unerlässlich, auch nicht-monetäre Wettbewerbskriterien einzubeziehen.

Ziel der nachfolgenden ökonomischen Betrachtung ist es, die Umstellung auf Trockenbearbeitung unter diesen umfassenden betriebswirtschaftlichen Aspekten zu analysieren und auftretende Effekte zu dokumentieren. Zum anderen sollen aus den erzielten Ergebnissen dieses Projekts und aus den gewonnenen Erfahrungen Umsetzungshilfen für Drittbetriebe abgeleitet werden.

Bei den Kriterien, die eine Entscheidung zwischen Nass- und Trockenbearbeitung beeinflussen können, nehmen die Kosten eine Sonderrolle ein. Dies liegt daran, dass die Kosten im Gegensatz zu anderen Bewertungskriterien in der Regel mehr oder weniger exakt rechnerisch ermittelbar sind; bei nicht-monetären Bewertungskriterien existieren dagegen häufig große Spielräume und Unschärfen bei der Quantifizierung.

Um einerseits die detailreichen und von Unternehmen als besonders wichtig angesehenen Aussagen einer Kostenbetrachtung zu erhalten und andererseits auch weitere entscheidungsrelevante Bewertungskriterien zu berücksichtigen, wurde die ökonomische Bewertung als Kombination aus Kostenvergleich und Nutzwert-Analyse konzipiert, wobei die Ergebnisse beider Analysen nicht zu einer einzigen Entscheidungsgröße zusammen geführt wurden. Andernfalls besteht immer die Gefahr, dass möglicherweise wichtige und entscheidungsrelevante Informationen überdeckt werden.

7.1 Kostenvergleich

7.1.1 Methodisches Vorgehen

In die vorliegende Kostenbetrachtung sind nur diejenigen Kosten eingegangen, die sich bei einer Umstellung von Nass- auf Trockenbearbeitung ändern. Alle Kosten, die von der Umstellung unabhängig sind (z.B. Materialkosten, Kosten der Unternehmensverwaltung) wurden nicht erfasst. Es handelt sich also um einen Kostenvergleich, der als Ergebnis den Kostenunterschied unterschiedlicher Fertigungsvarianten ausweist, nicht jedoch Angaben über die gesamten Herstellungskosten macht.

Für die wirtschaftliche Bewertung wurde die Auswahl der zu untersuchenden Fertigungsverfahren auf rein technische Alternativen beschränkt, da organisatorische Varianten aufgrund des geringen Umstellungsgrads (noch) nicht zu beobachten waren [2].

Bei der ökonomischen Bewertung der Verfahrensalternativen besteht die bereits im Zusammenhang mit dem ökologischen Vergleich angesprochene Schwierigkeit (vgl. Abschnitt 6.1), dass sich mit den neuen Werkzeugmaschinen gleichzeitig Maschinenkonzept und Fertigungsverfahren (nass, trocken) ändern. Auch hier ist deshalb darauf zu achten, dass die eintretenden ökonomischen Effekte soweit als möglich differenziert werden.

Die für den Kostenvergleich verwendete Methode folgt den Prinzipien der Stückkostenrechnung auf Vollkostenbasis. Die Gründe, die zu dieser Konzeption des Kostenvergleichs geführt haben, sowie die methodischen Grundlagen des Berechnungsverfahrens sind im Anhang zu Abschnitt 7 erläutert.

Bei der Anwendung von Methoden der Vollkostenrechnung ergibt sich das Problem der Zurechnung der Gemeinkosten auf die Kostenträger, also auf die in die Analyse einbezogenen Bauteile 1 und 2. Das Ergebnis einer Kostenvergleichsrechnung hängt bei hohen Gemeinkostenanteilen - wie sie im Untersuchungsfall vorliegen - sehr stark von der Art der Verteilung auf die Kostenträger ab. Um die Gemeinkosten möglichst verursachungsgerecht und nachvollziehbar auf die Kostenträger zu verteilen, wurde ein Drei-Ebenen-Modell konzipiert (vgl. Abbildung 7-1).

- **Bereichsebene**: Es wird gedanklich unterstellt, dass es im Unternehmen einen abgrenzbaren Bereich für die Nass- und die Trockenbearbeitung gibt. Kosten, die sich weder dem einen noch dem anderen Bereich eindeutig zuordnen lassen (z.B. Pförtner, Buchhaltung), werden im weiteren nicht berücksichtigt. Dies ist deshalb zulässig, da die beiden Fertigungstechnologien die Höhe dieser Kosten nicht beeinflussen. Diejenigen Kostenarten, die sich dem jeweiligen Bereich direkt zuordnen lassen (Bereichs-Einzelkosten; z.B. Spänezentrifuge für die Nassbearbeitung, Hallenreinigung), haben die Eigenschaft, dass sie nicht eindeutig den Kostenstellen der nächst tieferen Ebene, den einzelnen Werkzeugmaschinen zugeordnet werden können. Sie stellen die Gemeinkosten der Maschinenebene dar.
- **Maschinenebene**: Auf der Maschinenebene fungieren die Werkzeugmaschinen als Kostenstellen. Für die Zurechnung der Kosten der Bereichsebene, die für die Maschinenebene Gemeinkosten darstellen, benötigt man einen Verteilungsschlüssel. Die Verteilung der Bereichskosten auf die Werkzeugmaschinen erfolgt entsprechend dem Anteil der einzelnen Maschine am Gesamtmaterialdurchsatz des Bereichs. Auch auf der Maschinenebene fallen Kosten an, die genau derjenigen Werkzeugmaschine, die die Kosten verursacht, zugeordnet werden können (Maschinen-Einzelkosten; z.B. Abschreibung der Maschine, Wartung). Die Summe aus direkt zurechenbaren Kosten

---

2 Im Betrachtungszeitraum waren fünf Werkzeugmaschinen für die Trockenbearbeitung in Betrieb. Diese Trockenbearbeitungsmaschinen deckten zu diesem Zeitpunkt ca. 7,5 % der gesamten Ausbringungsmenge des Unternehmens ab.

und aufgeteilten Gemeinkosten ergeben die Kosten der Maschinenebene, die wiederum die Gemeinkosten der Kostenträgerebene darstellen.

- **Kostenträger(Bauteile-)ebene**: Für die einzelnen Bauteile – die **Kostenträger**, die auf einer Maschine gefertigt werden – stellen die Kosten der Maschinenebene Gemeinkosten dar. Diese werden entsprechend dem Anteil der Zeit, die für die Herstellung des Bauteils benötigt wird (Maschinenlaufzeit), an der Gesamtlaufzeit der Maschine verteilt. Diese aufgeteilten Gemeinkosten und die den einzelnen Teilen direkt zuordenbaren Kosten (Kostenträger-Einzelkosten; z.B. Werkzeuge, Qualitätssicherung) ergeben zusammen die **umstellungsrelevanten Stückkosten** [3], anhand derer die Fertigungsalternativen bewertet werden.

Unter Kostengesichtspunkten werden folgende Fertigungsalternativen betrachtet:

- Die **vollständige Nassfertigung** sowie
- die zum Untersuchungszeitpunkt vorzufindende Situation der **Teilumstellung**
- die **Vollumstellung**.

Die Alternative **vollständige Nassbearbeitung** beschreibt den Zustand **vor** der Einführung der Trockenbearbeitung. Die gesamte Produktion erfolgt unter Einsatz von Schneidöl.

Teilumstellung bedeutet, dass nicht alle Werkzeugmaschinen auf die Trockenbearbeitung umgestellt sind bzw. durch Trockenbearbeitungsmaschinen ersetzt wurden. Unter diesen Umständen fertigt ein Unternehmen einen Teil seiner Produkte auf Nassbearbeitungsmaschinen und den anderen Teil auf Trockenbearbeitungsmaschinen. Die Kostenbetrachtung beschränkt sich auf den Fall, dass die zu analysierenden Bauteile 1 bzw. 2 auf einer der Trockenbearbeitungsmaschinen hergestellt werden und im Bereich der Nassbearbeitung andere Bauteile produziert werden. Der Fall, dass dieselben Bauteile gleichzeitig nass und trocken gefertigt werden, wird hier nicht betrachtet.

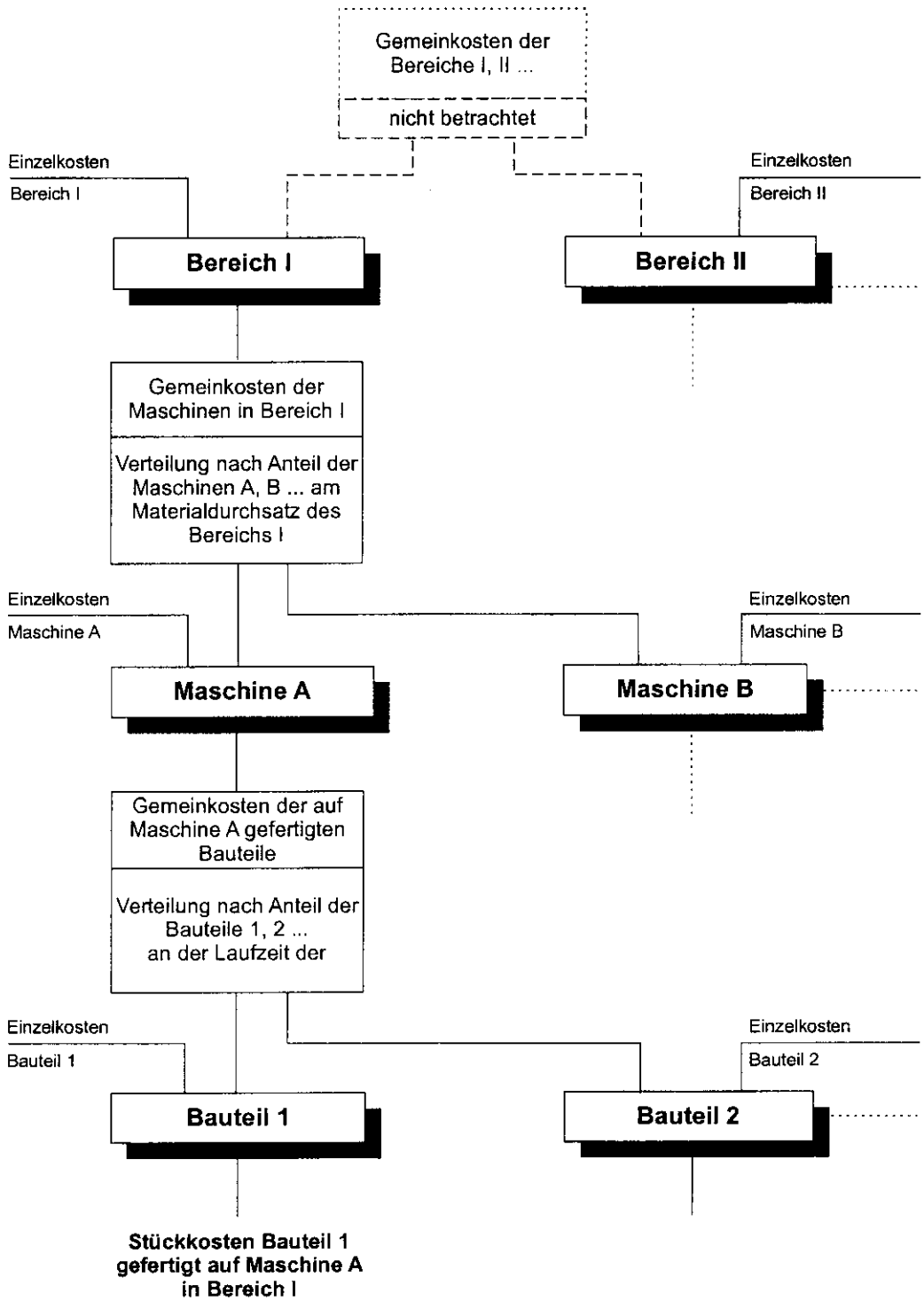
Die **vollständige Umstellung** auf Trockenbearbeitung wurde ebenfalls in die Kostenbetrachtung aufgenommen, obwohl hierfür explizit noch keine Daten verfügbar waren. Deshalb wurden die Daten, die für den Fall der Teilumstellung ermittelt wurden, auf den Fall der Vollumstellung hochgerechnet.

Bei der Kostenvergleichsrechnung wird vorausgesetzt, dass die in den Vergleich einbezogenen Nass- bzw. Trockenbearbeitungsmaschinen durch den jeweiligen Artikel (Bauteil 1 bzw. 2) vollständig ausgelastet werden. Für andere Fälle sind die Ergebnisse des Kostenvergleichs nicht ganz zutreffend. Für genauere Ergebnisse müsste dem dann vorzufindenden Bauteilemix je Werkzeugmaschine Rechnung getragen werden.

---

[3] Die Stückkosten werden deshalb als umstellungsrelevant bezeichnet, weil in der vorliegenden Untersuchung im Unterschied zu einer Betrachtung aller Kosten nur die umstellungsrelevanten Kosten berücksichtigt sind.

Abbildung 7-1: Das Drei-Ebenen-Modell der Kostenberechnung

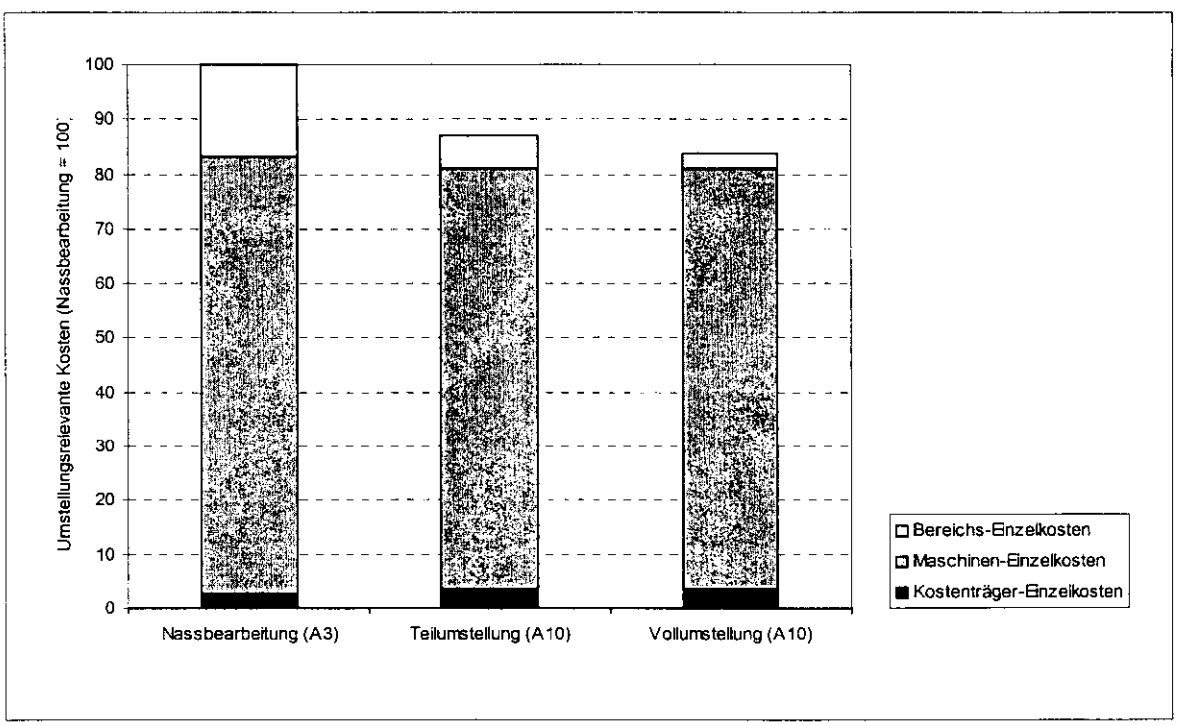


7.1.2 Stückkostenvergleich Bauteil 1

Bauteil 1 wird im Fall der Trockenbearbeitung auf einer A 10-Maschine hergestellt. Für die konventionelle Herstellung dieses Artikels wurde dem Kostenvergleich eine A 3-Maschine zu Grunde gelegt. Die Konzeptionen dieser beiden Werkzeugmaschinen sind vergleichbar.

Wie Abbildung 7-2 zeigt, weist die vollständige Nassbearbeitung gegenüber den anderen beiden Alternativen Kostennachteile auf. Bezogen auf die Nassbearbeitung fallen die (umstellungsrelevanten) Stückkosten der Teilumstellung um ca. 13 % günstiger aus. Im Fall der Trockenbearbeitung ergibt sich sogar eine Verringerung um etwa 16 %. Bezogen auf die tatsächlichen Herstellkosten (Nassbearbeitung) wird mit dem Umstieg auf Trockenbearbeitung ein Kostenvorteil von ca. 5 % (Teilumstellung) bzw. 7 % (Vollumstellung) erzielt.

Abbildung 7-2: Zusammensetzung der umstellungsrelevanten Stückkosten - Bauteil 1



Vergleich Nassbearbeitung / Trockenbearbeitung (Voll- bzw. Teilumstellung)

Wie Abbildung 7-2 zeigt, sind die Kostenunterschiede hauptsächlich auf die **bereichsspezifischen Kosten** zurückzuführen. Diese Kosten fallen für die Nassbearbeitung höher aus, da der „Bereich" Nassbearbeitung aufgrund der kalkulatorischen Kosten für Anlagen (Zins und Abschreibung) mit wesentlich höheren Kosten belastet wird als der „Bereich" Trockenbearbeitung. Der Grund für die höheren Anlagenkosten liegt darin, dass bei der Nass-

bearbeitung einige kostenintensive Anlagen für Nebenprozesse benötigt werden, auf die im Fall der Trockenbearbeitung verzichtet werden kann (z.B. Elektrofilter, Spänezentrifuge). Zwar muss bei der Trockenbearbeitung mit höheren Investitionen für die Presslufterzeugung gerechnet werden, jedoch ist das Einsparpotenzial durch den Wegfall der Nebenaggregate weitaus größer. Auch wenn der Rückgang für die Teilumstellung weniger deutlich ausfällt als für die Vollumstellung, gilt diese Beobachtung unabhängig vom Umstellungsgrad.

Zum Kostenvorteil der Trockenbearbeitung (Teil- und Vollumstellung) tragen auch die **maschinenspezifischen Kosten** bei. Obwohl dem Stückkostenvergleich Maschinen mit vergleichbarem Maschinenkonzept zu Grunde liegen, schlägt die Nassbearbeitungsmaschine dennoch mit einem höheren Investitionsvolumen zu Buche. Da mit der Abschreibung, den Zinsen und den Wartungskosten die relevanten Kostenblöcke proportional zur Investitionshöhe variieren, verursacht die Nassbearbeitungsmaschine höhere Kosten als die Trockenbearbeitungsmaschine. Dieser Kostenunterschied würde noch deutlicher ausfallen, wäre für die Trocken- und für die Nassbearbeitungsmaschine jeweils die gleiche Laufzeit pro Jahr zu Grunde gelegt worden. Aufgrund der neuen Technologie erreicht die Trockenbearbeitungsmaschine jedoch derzeit (noch) nicht die Jahresstunden der Nassbearbeitungsmaschine.

Auf der Betrachtungsebene der **Kostenträger** kehrt sich der Trend um. Die Trockenbearbeitung weist hier Nachteile gegenüber der Nassbearbeitung auf. Der Grund liegt zum einen darin, dass die Werkzeugkosten für die Trockenbearbeitung höher sind. Zum anderen ist die Personalbindung bei der Trockenbearbeitung größer. Für das Beaufsichtigen des Prozesses sind deshalb (geringfügig) höhere Personalkosten anzusetzen. Da die Kostenträger-Einzelkosten jedoch nur einen geringen Teil der betrachteten Kosten ausmachen, bleibt der Einfluss dieses Kostentrends begrenzt und reicht bei weitem nicht aus, die geringeren Kosten der Bereichs- und der Maschinenebene auszugleichen.

Vergleich Trockenbearbeitung Teilumstellung / Trockenbearbeitung Vollumstellung

Vergleicht man die beiden Trockenszenarien miteinander, so erkennt man geringfügige Vorteile der Vollumstellung gegenüber der Teilumstellung. Die Ursache für den vergleichsweise geringen Kostenunterschied liegt darin, dass der größte Kostenblock – die anteiligen Maschineneinzelkosten – unverändert bleibt. Dies ist unmittelbar einleuchtend, da unterstellt wurde, dass Bauteil 1 auf ein und derselben Werkzeugmaschine hergestellt wird. Zudem bleiben auch die Kostenträgereinzelkosten unverändert. Auch dies ist plausibel, da die Höhe der einfließenden Kosten (z.B. Werkzeug- Qualitätssicherungskosten) unabhängig vom Umstellungsgrad ist, d.h. davon, ob an anderer Stelle im Betrieb weitere Nass- bzw. Trockenbearbeitungsmaschinen eingesetzt werden.

Der Kostenunterschied zwischen der Teil- und der Vollumstellung wird allein von den bereichsspezifischen Kosten verursacht. Hier zeigen sich für die Teilumstellung Kostennachteile, da die Aufstellung von Trockenbearbeitungsmaschinen eine Raumabtrennung in der Werkstatt erfordert. Ohne räumliche Abtrennung würde der Ölnebel des Nassbearbei-

tungsbereichs die Funktionsfähigkeit der Trockenbearbeitungsmaschinen beeinträchtigen. Durch die getrennte Aufstellung der Werkzeugmaschinen entstehen nicht nur Investitionskosten für die notwendigen baulichen Veränderungen, vielmehr wird auch aus arbeitsorganisatorischen Gründen mit Mehraufwand bei den Personalkosten zu rechnen sein. Der Trockenbearbeitungsbereich im Szenario der Teilumstellung umfasst nämlich nicht die Anzahl von Maschinen, die den sonst üblichen Schichtbetrieb auslasten könnte. Deshalb haben die Maschinenführer der Trockenbearbeitungsmaschinen zusätzlich noch einige konventionelle Maschinen zu beaufsichtigen. Dies bedeutet zusätzliche Wege und einen nicht optimalen Überblick über den Zustand der zu beaufsichtigenden Maschinen.

7.1.3 Stückkostenvergleich Bauteil 2

Der Kostenvergleich für Bauteil 2 basiert auf der Gegenüberstellung einer Mikron-Werkzeugmaschine für die Trockenbearbeitung, während die Nassbearbeitung mit einer A 2-Maschine erfolgt.

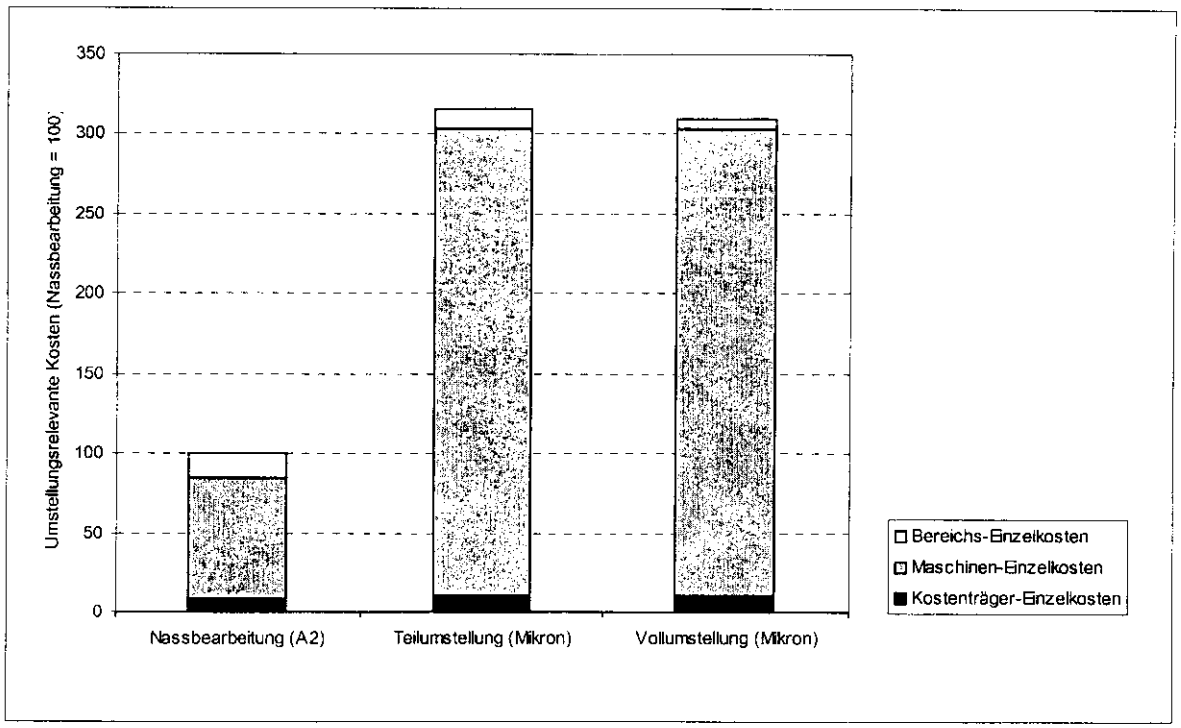
Im Gegensatz zu den Ergebnissen der Kostenbetrachtung von Bauteil 1 zeigt sich für Bauteil 2, dass die Trockenbearbeitung wesentlich höhere Kosten verursacht als die Herstellung mit Schneidöl auf der A 2-Maschine. Die umstellungsrelevanten Kosten betragen im Fall der Trockenbearbeitung mehr als das Dreifache der Nassbearbeitungskosten. Hierbei spielt es kaum eine Rolle, ob es sich um eine Teilumstellung oder eine Vollumstellung handelt.

Vergleich Nassbearbeitung / Trockenbearbeitung (Voll- bzw. Teilumstellung)

Der Kostenunterschied zwischen Nass- und Trockenbearbeitung liegt hauptsächlich in den **Maschineneinzelkosten** begründet. Die Mikron-Maschine ist in ihren Anschaffungskosten etwa um den Faktor zehn teurer als die A 2-Maschine, in der Mengenleistung liegt sie jedoch nur um gut das Doppelte über der Vergleichmaschine. Daher beeinflussen die größeren Anschaffungskosten für die Mikron und die damit verbundenen Aufwendungen für Abschreibung, Zins und Wartung das Kostenbild erheblich.

Auch die **Kostenträgereinzelkosten** tragen – wenn auch in weitaus geringerem Maße – dazu bei, dass die Nassbearbeitung kostengünstiger ausfällt. Hierbei sind insbesondere die Rüstkosten von Bedeutung, da die Erfahrung zeigt, dass im Vergleich zur A 2-Maschine für das Umrüsten der Mikron-Maschine auf Bauteil 2 etwa der fünffache Aufwand benötigt wird.

Abbildung 7-4: Zusammensetzung der umstellungsrelevanten Stückkosten - Bauteil 2



Auf der Betrachtungsebene der **bereichsspezifischen Kosten** zeigt sich im Gegensatz zu den beiden anderen Kostenebenen die Trockenbearbeitung als das günstigere Produktionsverfahren. Durch die Umlegung der bereichsspezifischen Kosten auf die einzelnen Werkzeugmaschinen werden die Mikron-Maschinen zwar mit in absoluten Zahlen höheren Kosten belastet als die A 2-Maschinen, die größere Mengenleistung der Mikron-Maschinen bewirkt jedoch, dass sich dieser Kostenblock bezogen auf die Kostenträger letztlich auf einen geringeren Betrag reduziert. Da die Bereichseinzelkosten nur einen Bruchteil der umstellungsrelevanten Gesamtkosten darstellen, beeinflussen sie das Ergebnis nur wenig zu Gunsten der Trockenbearbeitung.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass ist die Fertigung von Bauteil 2 auf der Mikron aus betriebswirtschaftlicher Sicht nicht effizient ist. Die Kombination Bauteil 2 / Mikron sollte nur dann gewählt werden, wenn z.B. aus Auslastungsgründen keine anderen Maschinen zur Verfügung stehen, mit Bauteil 2 kostengünstiger hergestellt werden kann.

Vergleich Trockenbearbeitung Teilumstellung / Trockenbearbeitung Vollumstellung

Für die beiden Trockenbearbeitungsszenarien ergeben sich nur geringe Kostenunterschiede. Die Teilumstellung erweist sich um 2 % teurer als die Vollumstellung. Analysiert man die Kosten hinsichtlich der drei Betrachtungsebenen, stellt sich heraus, dass für den Kostenunterschied allein die bereichsspezifischen Kosten ausschlaggebend sind. Hier sind dieselben Ursachen zu benennen, die schon für Bauteil 1 diskutiert worden sind: Notwendige bauliche Veränderungen zur räumlichen Trennung von Nass- und Trockenbereich und ein etwas

höherer Personalaufwand bei der Beaufsichtigung der Maschinen bewirken bei der Teilumstellung höhere bereichsspezifische Kosten.

7.1.4 Schlussfolgerungen

Aus der Kostenanalyse lassen sich die folgenden Schlussfolgerungen ziehen:

- Mit der Konstruktion der Eigenbaumaschine A 10 ist es im betrachteten Unternehmen gelungen, eine Trockenbearbeitungsmaschine zu entwickeln und zu bauen, die den spezifischen fertigungstechnischen Anforderungen gerecht wird und gleichzeitig kostengünstiger produziert, als die älteren Nassbearbeitungsmaschinen. Auch wenn man annehmen kann, dass bei einer Neukonstruktion der Nassbearbeitungsmaschinen ebenfalls Produktivitätsfortschritte erzielt worden wären, lässt sich zumindest festhalten, dass die Trockenbearbeitungstechnologie Produktivitätsfortschritten nicht im Wege steht.
- Die Produktion mit den neuen Trockenbearbeitungsmaschinen ist jedoch nicht grundsätzlich kostengünstiger als die Nassfertigung. Die Kostenanalyse für Bauteil 2 zeigt, dass es vom jeweiligen Bauteil abhängen kann, ob die Herstellung unter Kostengesichtspunkten besser auf einer Nass- oder auf einer Trockenbearbeitungsmaschine erfolgen soll. Bei Bauteil 2 reicht die größere Produktivität der Mikron-Maschine nicht aus, die mit den höheren Anschaffungskosten verbundenen Kostenarten (Abschreibung, Zins, Wartung) zu kompensieren. Hierfür ist jedoch weniger das Konzept der Trockenbearbeitung ursächlich, als vielmehr die unter Effektivitätsaspekten nicht optimale Kombination von Werkstück und Werkzeugmaschine. Wegen der insgesamt höheren Kosten empfiehlt sich eine Herstellung von Bauteil 2 auf den untersuchten Mikron-Maschinen nur dann, wenn die Nassbearbeitungskapazitäten auf den alten Werkzeugmaschinen vollständig ausgeschöpft sind und die Trockenbearbeitungsmaschinen noch Kapazitäten frei haben. In diesem Fall kann mit der Herstellung von Bauteil 2 auf der Mikron zumindest noch ein Deckungsbeitrag erwirtschaftet werden.
- Der große Gemeinkostenblock (bestehend aus den Bereichs- und den Maschineneinzelkosten) deutet auf eine große Anfälligkeit des wirtschaftlichen Betriebs der Nass- bzw. der Trockenbearbeitungsmaschinen hinsichtlich Auslastungsschwankungen hin. Bei den Mikron-Maschinen stellt sich dieses Problem in verschärfter Form, da sie eine deutlich größere Kapitalintensität aufweisen. Der Zwang zu hoher Auslastung bei der Einführung dieser Maschinen wird daher zunehmen. Falls die Mikron-Maschine z.B. aufgrund von Störungen, Wartungsarbeiten oder Nachfragerückgang nicht produzieren kann, ist der wirtschaftliche Schaden aufgrund des höheren Gemeinkostenanteils größer. Dieser Effekt ist jedoch nicht der Trockenbearbeitungstechnik an sich anzulasten, da die Höhe der Investitionen und damit auch die Abschreibungen und die Zinskosten in erster Linie durch das Maschinenkonzept hervorgerufen werden. Optimale Auslastung kann vor diesem Hintergrund beispielsweise dadurch erreicht werden, dass auftretende kleinere Maschinenstörungen schnell durch das vor Ort tätige Personal behoben werden. Wird den vor Ort tätigen Facharbeitern zudem der Handlungsspielraum eingeräumt, dass sie eine rüstzeitoptimierte Reihenfolgeplanung sowie die Verfügbarkeitsplanung von Personal,

Material und Werkzeugen selbst vornehmen, lassen sich die Voraussetzungen für eine bessere Auslastung schaffen.

- Mit zunehmendem Umstellungsgrad steigen die Gemeinkosten der Nassbearbeitung. Die hierdurch eintretende Erhöhung der Stückkosten bleibt bei geringen Umstellungsgraden noch gering. Das bedeutet, dass der Einstieg in die Trockenbearbeitung kaum kostenmäßige Nachteile für die Nassbearbeitung mit sich bringt.
- Der Einstieg in die Trockenbearbeitung zieht über die Investitionskosten für die neuen Maschinen hinaus weitere Kosten nach sich. Ein Teil dieser Kosten sind nur für solche Betriebe anzusetzen, die einen Mix von Nass- und Trockenbearbeitung beibehalten wollen (z.B. räumliche Abtrennung von Trocken- und Nassbearbeitungsbereich). Diese Kosten für eine „gemischte" Fertigung verteuern die mit Trockenbearbeitungsmaschinen hergestellten Kostenträger im Vergleich zu solchen Betrieben, die auf den Einsatz von Kühlschmierstoffen von vorne herein vollständig verzichten. Insgesamt bleibt dieser Kosteneffekt jedoch vergleichsweise gering.

7.2 Nutzwertanalyse

7.2.1 Methodisches Vorgehen

Mit Hilfe der Nutzwertanalyse können komplexe Handlungsalternativen entsprechend den Präferenzen der Entscheidungsträger bezüglich eines multidimensionalen Zielsystems bewertet werden. Hierzu werden je Handlungsalternative sogenannte Nutzwerte bestimmt. Als Handlungsempfehlung wählt man diejenige Alternative, deren Nutzwert am größten ist.

Die Nutzwertanalyse wurde in einem von ISI und TBS moderierten Diskussionsprozess (Workshop) im Unternehmen durchgeführt. Als betriebliche Experten nahmen ein Mitglied der Geschäftsleitung, der Produktionsleiter, der Entwicklungsleiter und der Teamsprecher Trockenbearbeitung sowie ein Mitarbeiter aus dem Controlling und der Beauftragte für Umweltschutz und Arbeitssicherheit teil, die ihre langjährigen Erfahrungen aus dem Umstellungsprojekt einbrachten. Der Workshop diente dazu, die Bewertung der Handlungsalternativen im Zusammenhang mit der Einführung der Trockenbearbeitung zu objektivieren. Trotzdem ist bei der Interpretation der Ergebnisse von Nutzwertanalysen immer darauf zu achten, dass sich wegen der persönlichen Einschätzungen und Erfahrungen der beteiligten Experten subjektive Färbungen nicht völlig ausschließen lassen.

Die Nutzwertanalyse wurde in mehreren Schritten durchgeführt, die im folgenden kurz erläutert sind:

(1) Festlegen der technischen Alternativen

Zunächst wurden von dem Expertenkreis die zu bewertenden Handlungsoptionen festgelegt. Im vorliegenden Fall stehen als technische Alternativen zur Auswahl:

- **Vollständige Nassbearbeitung,**
- **teilweise** Umstellung auf die **Trockenbearbeitung** (Teilumstellung) und
- **vollständige** Umstellung auf **Trockenbearbeitung** (Vollumstellung).

Für die Alternative **Teilumstellung** war festzulegen, welcher Umstellungsgrad für die Fertigung gelten soll. Entsprechend der aktuellen Situation im betrachteten Betrieb wurde ein Umstellungsgrad von etwa 10 % zu Grunde gelegt. Obwohl die technische Alternative **Vollumstellung** derzeit nicht realisiert ist, wurde sie dennoch als dritte technische Alternative in die Nutzwertanalyse einbezogen. Dies ist deshalb zulässig und sinnvoll, da die an der Nutzwertanalyse beteiligten Experten zum Analysezeitpunkt bereits einige Jahre Erfahrungen mit der Trockenbearbeitung sammeln konnten und es ihnen in soweit möglich war, fundierte Einschätzungen abzugeben.

(2) Identifizieren von Bewertungskriterien auf der Grundlage der spezifischen Anforderungen des Unternehmens

Neben den Kosten sind für den Markterfolg eines Unternehmens eine Reihe weiterer Einflussgrößen maßgebend. Gemeinsam mit den betrieblichen Experten wurde deshalb ein unternehmensspezifischer Katalog von Kriterien entwickelt, die für die Bewertung der drei Fertigungsalternativen von Bedeutung sind. Die Kriterien sind in Tabelle 7-1 erläutert.

Tabelle 7-1: Kriterien zur Bewertung der Fertigungsalternativen

Kriterium	Erläuterung der Kriterien und Bedeutung für das untersuchte Unternehmen
Flexibilität bezüglich der Vielfalt herstellbarer Bauteiltypen	Mit diesem Kriterium wird bewertet, inwiefern es die Fertigungsalternativen ermöglichen, Varianten und Ergänzungen zum bestehenden Produktprogramm herzustellen. Die Flexibilität bezüglich der Typenvielfalt stellt für den untersuchten Betrieb ein wichtiges Kriterium dar, da gefertigten Artikel werden ausschließlich im Kundenauftrag hergestellt werden. Es werden häufig Artikel in Auftrag gegeben, die in ähnlicher Form bereits früher gefertigt wurden, in der speziellen Ausprägung bislang jedoch nicht zum Produktprogramm des Unternehmens zählten. Die Fertigung solcher Varianten darf für das Unternehmen keine Hürde darstellen.

Kriterium	Erläuterung der Kriterien und Bedeutung für das untersuchte Unternehmen
Flexibilität bezüglich Auslastungsschwankungen	Dieses Kriterium bezieht sich auf die Auswirkungen eines geringeren Auftragseingangs auf die Kosten der hergestellten Bauteile. Eine Fertigungsalternative, die auf Dauer eine hohe Auslastung voraussetzt (z.B. wegen eines hohen Fixkostenanteils), birgt das Risiko, dass das Unternehmen bei relativ geringem Auftragsrückgang bereits in die Verlustzone gerät. Die Notwendigkeit, auf unterschiedliche Auslastung reagieren zu können, kann sich z.B. aus einer schwankenden Nachfrage ergeben. Die hohe Bedeutung, die die Flexibilität bezüglich Auslastungsschwankungen für das untersuchte Unternehmen hat, ermisst sich angesichts der prinzipiell hohen Auslastung des derzeit bestehenden Maschinenparks. Der wichtigste Einflussfaktor auf die Flexibilität bezüglich Auslastungsschwankungen ist die Kapitalintensität der Maschinen.
Prozesssicherheit	Der störfallbedingte Stillstand von Maschinen oder Anlagen bedeutet nicht nur direkte wirtschaftliche Einbußen aufgrund von Produktionsausfall und Reparaturkosten. Als weitere Folge kann auch die Einhaltung von Lieferterminen in Frage gestellt sein. Für das untersuchte Unternehmen ist die Prozesssicherheit der Maschinen ein wichtiges Beurteilungskriterium. Es stehen kaum Reservekapazitäten zur Verfügung, um einen Produktionsausfall aufholen zu können, so dass der wirtschaftliche Schaden störfallbedingter Maschinenstillstände als kritisch angesehen wird. Für die Nutzwertanalyse wurde dieses Kriterium unterteilt in die Prozesssicherheit der Werkzeugmaschinen und die Prozesssicherheit der Nebenprozessschritte, da diese in Folge der Umstellung auf Trockenbearbeitung ebenfalls modifiziert wurden.
Image	Das Image eines Unternehmens, technisch fortschrittlich und umweltverträglich zu produzieren macht es für die Kunden zu einem attraktiven Partner. Ein zulieferndes Unternehmen mit umweltverträglicher Produktion, dessen Kunden Wert auf die Umweltverträglichkeit der eigenen Produkte legen und ihre Lieferanten entsprechend auswählen, kann gegenüber seinen Konkurrenten dann Wettbewerbsvorteile verbuchen. Ein positives Image kann aber auch gegenüber der (Fach-)Öffentlichkeit und den Behörden Vorteile einbringen. Ein Unternehmen, das in der Region dafür bekannt ist, sich für die Umwelt einzusetzen und neu Technologien anzuwenden, wird evtl. bei der Personalrekrutierung auf weniger Probleme stoßen. Ebenso kann man vermuten, dass die Zusammenarbeit mit den Genehmigungsbehörden reibungsärmer verläuft, wenn bekannt ist, dass ein Unternehmen Wert auf den Einsatz technisch fortschrittlicher und umweltschonender Verfahren legt. Da das untersuchte Unternehmen als Zulieferer am Markt operiert, ist insbesondere die auf die Kunden bezogene Image-Wirkung einer technisch fortschrittlichen und umweltverträglichen Produktion von Bedeutung.

Kriterium	Erläuterung der Kriterien und Bedeutung für das untersuchte Unternehmen
Attraktivität der Arbeitsplätze	Bei der Attraktivität des Arbeitsplatzes steht im Mittelpunkt, wie die betroffenen Mitarbeiter den Arbeitsplatz an den Maschinen beurteilen. Für Unternehmen ist eine hohe Attraktivität deshalb wichtig, da dies positive Auswirkungen auf die Einsatzbereitschaft und die Motivation des Personals hat. Die Attraktivität des Arbeitsplatzes wird durch vielerlei Merkmale beeinflusst, wie z.B. durch - den Wegfall/Verringerung gesundheitlicher Risiken (Lärm, Arbeitsstoffe etc.), - Sauberkeit des Arbeitsplatzes - ganzheitliche Anforderungen an die Beschäftigten (wodurch nicht nur kurzzyklische, monotone Arbeiten zu verrichten sind, sondern auch Anforderungen an die kognitiven Fähigkeiten der Beschäftigten gestellt werden) - innovative Technik, die das Ansehen der Arbeitsplätze steigert. Das Unternehmen möchte aus eigener Überzeugung seinen Mitarbeitern attraktive Arbeitsplätze anbieten. Zusätzlich erleichtert dies auch die Personalrekrutierung in einer eher strukturschwachen Region, so dass die Arbeitsplatzattraktivität als Bewertungskriterium als relevant eingeschätzt wird.
Proaktive Standortsicherung	Hinter dem Kriterium proaktive Standortsicherung stehen die Aussichten, die eine Fertigungsalternative eröffnet, auf sich abzeichnende, in der Zukunft liegende Entwicklungen (z.B. Fertigungstechnik, Umweltanforderungen) angemessen reagieren zu können. Für das untersuchte Unternehmen ist dieses Kriterium deshalb wichtig, da die Entsorgungssicherheit der Produktionsrückstände langfristig gewährleistet werden muss sowie zukünftig Kostensteigerungen bei der Entsorgung vermieden werden sollen. Auch die Beherrschung zukünftiger Techniktrends wird als wichtige Komponente für eine strategische Wettbewerbsfähigkeit angesehen.

(3) Gewichtung der Bewertungskriterien

Die verschiedenen Kriterien zur Bewertung der Handlungsoptionen sind für den Anwender im allgemeinen nicht von gleicher Bedeutung. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, werden die Bewertungskriterien relativ zueinander gewichtet. Hierzu wurden die betrieblichen Experten um ihre Einschätzung gebeten, welche Bedeutung die Bewertungskriterien unter den herrschenden Marktbedingungen im Vergleich zueinander haben. Im Ergebnis wurden die Kriterien entsprechend Tabelle 7-2 gewichtet.

Tabelle 7-2: Gewichtungsfaktoren der Bewertungskriterien (normiert auf 100 %)

Flexibilität bzgl. Typenvielfalt	Flexibilität bzgl. Auslastung	Prozesssicherheit	Image	Attraktivität Arbeitsplätze	Proaktive Standortsicherung
16 %	23 %	39 %	5 %	10 %	7 %

(4) Analyse der Alternativen hinsichtlich der Bewertungskriterien und Ermittlung der Erfüllungsgrade

Der Vergleich der Fertigungsalternativen (Nassbearbeitung / Teilumstellung / Vollumstellung) wurde durchgeführt, indem die betrieblichen Experten für jedes Bewertungskriterium abschätzten, welche Fertigungsalternative das jeweilige Kriterium im Vergleich zu den anderen Fertigungsalternativen wie gut erfüllt. Auch hier gilt - wie bereits bei den Gewichtungsfaktoren - dass es eine objektive Bestimmung der Erfüllungsfaktoren nicht geben kann: Weder die Bewertungskriterien selbst, noch der Einfluss der Alternativen auf die Bewertungskriterien lässt sich mathematisch begründen oder herleiten, sondern es gehen die im Diskussionsprozess objektivierten Erfahrungen und Einschätzungen der Expertenrunde in die Erfüllungsgrade ein. Die Ergebnisse der Ermittlung der Erfüllungsgrade finden sich in Tabelle 7-3.

Tabelle 7-3: Erfüllungsgrade (normiert auf 100 %)

	Flexibilität bzgl. Typenvielfalt	**Flexibilität bzgl. Auslastung**	**Prozesssicherheit**	**Image**	**Attraktivität Arbeitsplätze**	**Proaktive Standortsicherung**
Nassbearbeitung	49 %	51 %	33 %	23 %	9 %	23 %
Teilumstellung	43 %	42 %	33 %	36 %	32 %	36 %
Trockenbearbeitung	8 %	7 %	34 %	41 %	59 %	41 %

(5) Vergleich der Fertigungsalternativen

Auf der Basis der Gewichte der Bewertungskriterien (Schritt 3) und der Erfüllungsgrade der zu untersuchenden Verfahren (Schritt 4) wurden die Nutzwerte ermittelt. Die Ergebnisse aus der Nutzwertanalyse geben Hinweise auf die Frage, welche Fertigungsalternaive unter welchen betrieblichen Rahmenbedingungen günstiger erscheint.

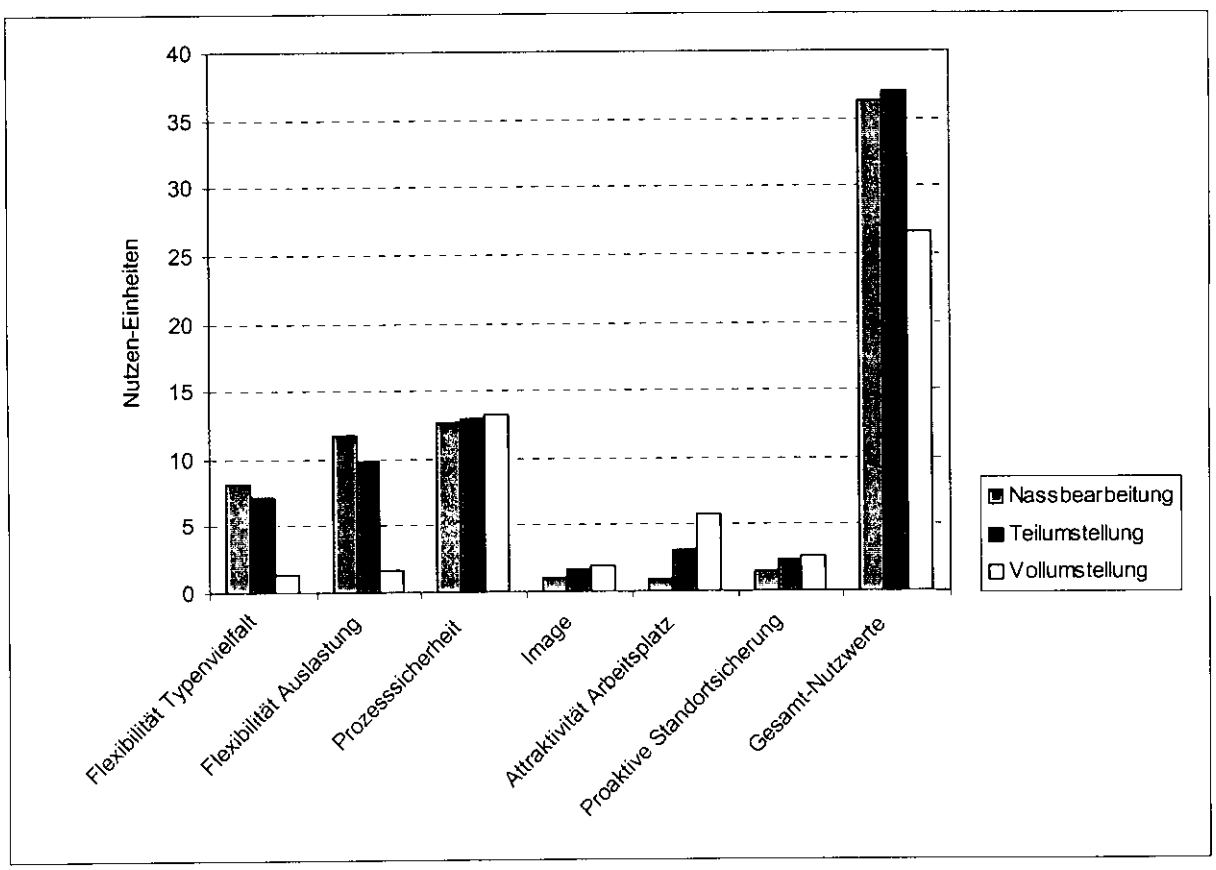
Die Durchführung von Nutzwertanalysen beinhaltet immer auch unternehmensspezifische und subjektive Einschätzungen der Beteiligten. Der nicht zu verhindernde Spielraum bei der Ermittlung der Nutzwerte hat zur Konsequenz, dass auch die Ergebnisse - die Nutzwerte selbst - interpretationsbedürftig sind und nicht als absolutes Maß einer „besseren" oder „schlechteren" Eignung der einen oder anderen Alternative gelten können. Vielmehr soll die Nutzwertanalyse aufzeigen, warum Alternativen besser abschneiden als andere. Vor allem aber kann die Nutzwertanalyse zur Diskussion anregen, welche Schwerpunkte das Unternehmen in seiner Wettbewerbsstrategie setzen will bzw. gesetzt hat und wie gut sich die zur Auswahl stehenden Alternativen hierfür eignen.

7.2.2 Ergebnisse der Nutzwertanalyse

Im Gegensatz zur Kostenbetrachtung sind die Ergebnisse der Nutzwertanalyse nicht bauteilabhängig. Die Handlungsalternativen werden hinsichtlich der Auswirkungen auf das gesamte Unternehmen betrachtet.

Ermittelt man anhand der Erfüllungsgrade (Tabelle 7-3) und der Gewichtungsfaktoren (Tabelle 7-2) den Gesamtnutzwert der drei Fertigungsalternativen, erkennt man, dass unter den zugrunde liegenden Voraussetzungen und Einschätzungen die Vollumstellung gegenüber den beiden Alternativen Nassbearbeitung und Teilumstellung Nachteile aufweist (vgl. Abbildung 7-6). Während die Gesamtnutzwerte von Nassbearbeitung und Teilumstellung nahezu identisch sind, hat die Vollumstellung betriebsbezogen einen um rund 25 % niedrigeren Wert.

Abbildung 7-6 : Gesamtnutzwerte und Teilnutzwerte



Der Gesamtnutzwert der drei Fertigungsalternativen ergibt sich aus der Summe der verschiedenen Teilnutzwerte, die in Abbildung 7-6 gezeigt sind. Die Interpretation des Gesamtnutzwertes erfordert deshalb eine Analyse der Teilnutzwerte:

Die **Flexibilität** der Maschinen bezüglich des mit ihnen produzierbaren Werkstückspektrums (**Typenvielfalt**) ist je nach Betrachtungshorizont differenziert zu beurteilen. In kurz-

fristiger Betrachtungsweise ist dieses Bewertungskriterium für die Nassbearbeitungsmaschinen höher zu bewerten als für die Trockenbearbeitungsmaschinen. Diese Bewertung gründet darauf, dass neu hinzukommende Werkstückvarianten mit Nassbearbeitungsmaschinen ohne aufwändige Anpassungsleistungen hergestellt werden können. Für die erstmalige Herstellung von Bauteilen mit der Trockenbearbeitungstechnologie müssten jedoch mittels Versuchsreihen erst die optimalen Schnittparameter und Werkzeugkonfigurationen ermittelt werden. Deshalb wird die Alternative Vollumstellung deutlich geringer bewertet als die Nassbearbeitung bzw. die Teilumstellung, die einen mit ca. 10 % noch recht geringen Umstellungsgrad aufweist. Da die Bauteil-Flexibilität mit ca. 16 % ein mittleres Gewicht aufweist (vgl. Tabelle 7-2), spiegelt sich der große Unterschied in der Bewertung der Alternativen auch im Gesamtnutzwert wieder.

Mit fortschreitender Einsatzdauer von Trockenbearbeitungsmaschinen werden für mehr und mehr Werkstücke und Fertigungsanforderungen Erfahrungen gesammelt werden können. Da man mit der Trockenbearbeitungsmaschine A 10 aufgrund der Maschinenkonzeption im Prinzip ein breiteres Produktspektrum abdecken kann, ist anzunehmen, dass dieser heute empfundene Nachteil der Trockenbearbeitung in Zukunft weniger stark zum Tragen kommt oder vollständig verschwindet. Spielt man dieses Szenario in der Nutzwertanalyse durch, ergibt sich, dass der Gesamtnutzwert der Vollumstellung in diesem Fall nur noch unwesentlich hinter den anderen beiden Alternativen zurückbleibt.

Der wichtigste Einflussfaktor auf die **Flexibilität** bezüglich **Auslastungsschwankungen** ist die Kapitalintensität der Maschinen. Wie im Zuge der Kostenbetrachtung näher ausgeführt ist, war vor allem mit der Einführung der Mikron-Trockenbearbeitungsmaschinen aber auch durch die A 10-Maschinen eine Steigerung der Kapitalintensität zu verzeichnen. Sofern die höheren Investitions- und weitere Folgekosten nicht durch gestiegene Produktivität ausgeglichen werden können, ist der Zwang zur höheren Auslastung der Trockenbearbeitungsmaschinen somit vorprogrammiert. Aus diesem Grund wird die Vollumstellung auf Trockenbearbeitung mit einem geringeren Erfüllungsgrad bewertet als die vollständige Nassbearbeitung. Die Teilumstellung wird beim derzeitigen Stand der Umstellung an den Wert der Nassbearbeitung angenähert. Da diesem Kriterium das zweithöchste Gewicht (23 %) zugewiesen wurde, schlagen die deutlichen Bewertungsunterschiede zwischen Vollumstellung und Nassbearbeitung sich auch im Gesamtnutzwert nieder.

Für das Kriterium der **Prozesssicherheit** spielt insbesondere der Stand der Technik eine Rolle. Die Werkzeugmaschinen für die Nass- und Trockenbearbeitung werden von den betrieblichen Experten beim derzeitigen Stand der Erfahrungen als vergleichbar ausgereift angesehen. Die geringen Unterschiede in den Teilnutzwerten ergeben sich daraus, dass bei der Trockenbearbeitung einige Nebenprozesse und damit auch Störquellen entfallen. Da diese Nebenprozesse jedoch sehr stabil laufen, wird deren Auswirkung auf die Prozesssicherheit insgesamt nur als gering eingeschätzt. Trotz des höchsten Gewichts des Kriteriums „Prozesssicherheit“ (39 %) führt es wegen des geringen Unterschieds in dem Erfüllungsgrad zu keinem deutlichen Einfluss auf den Gesamtnutzwert.

Die Trockenbearbeitung trägt nach Einschätzung der betrieblichen Experten dazu bei, das **Image** des Unternehmens im Außenraum zu verbessern. Die Unterschiede zwischen den Fertigungsalternativen erreichen aber nicht so große Unterschiede, wie sie bei anderen Kriterien gesehen werden Zudem ist auch das Gewicht dieses Kriteriums gering (5 %), so dass der Außenwirkung der Trockenbearbeitung zwar eine Bedeutung, aber keine große Bedeutung beigemessen wird.

Die **Attraktivität des Arbeitsplatzes** erhöht sich beim Einsatz der Trockenbearbeitungstechnologie im Vergleich zur herkömmlichen Nassbearbeitung deutlich. Insbesondere das höhere Ansehen, das die Beschäftigten an den Trockenbearbeitungsmaschinen innerhalb der Belegschaft des Unternehmens erfahren, führt zu einer deutlich besseren Bewertung der Vollumstellung. Ebenso wird das Arbeiten mit einer neuen Technologie als Ursache für die Übernahme von mehr Verantwortung und damit einer größeren Zufriedenheit am Arbeitsplatz empfunden. Auch spielt die größere Sauberkeit am Arbeitsplatz eine wichtige Rolle in der Bewertung der verschiedenen Alternativen. Insgesamt lässt sich somit ein vergleichsweise großer Unterschied in der Bewertung der Vollumstellung und der Nassbearbeitung begründen. Aufgrund der mäßigen Bedeutung der Arbeitsplatzattraktivität im Vergleich zu anderen Kriterien (7 %), kann das gute Ansehen der Arbeitsplätze im Trockenfertigungsbereich den Gesamtnutzwert der Vollumstellung nicht signifikant erhöhen.

Bei der **proaktiven Standortsicherung** ist nach Ansicht der Experten bereits der Einstieg in die Trockenbearbeitung ausreichend, um die mit diesem Kriterium verbundenen Ziele – etwa die Ankopplung an moderne technologische Entwicklungen oder die Antizipation erwarteter Umweltstandards – zu erreichen. Daher wird die Teilumstellung ähnlich hoch bewertet wie die Vollumstellung. Demgegenüber fällt die Nassbearbeitung in der Bewertung ab. Aufgrund des mittleren Gewichts dieses Kriteriums (10 %) bleibt der Beitrag zum Gesamtnutzwert eher klein.

Zusammenfassend lassen sich aus der Nutzwertanalyse folgende Schlüsse ziehen:

- Die Nassbearbeitung hat eindeutige Vorteile bezüglich der Bewertungskriterien, die sich auf flexibilitätsorientierte Merkmale beziehen (Flexibilität bezüglich der Vielfalt der herstellbaren Bauteiltypen, Flexibilität bezüglich Auslastungsschwankungen).
- Die Vollumstellung dominiert dann, wenn andere Orientierungen ins Blickfeld rücken, z.B. perspektivisch-strategische oder mitarbeiterorientierte Zielrichtungen.
- Die Teilumstellung ist in allen Bewertungskriterien jeweils zwischen den anderen beiden Alternativen zu finden.

In der Gesamtbewertung kommt zum Ausdruck, dass die Vorteile der Nassbearbeitung in den flexibilitätsbezogenen Bewertungskriterien nicht von den Vorteilen der Vollumstellung in den Kriterien mit perspektivisch-strategischer Zielrichtung kompensiert werden können. Lediglich dann, wenn man im Kriterium Flexibilität bezüglich Typenvielfalt eine längerfristige Betrachtung wählt, werden die Gesamtnutzwerte der drei Alternativen vergleichbar.

Abstrahiert man von der hier zu Grunde gelegten Gewichtung, stellen sich vor dem Hintergrund der Bewertungen die Konsequenzen für eine Entscheidung folgendermaßen dar:

- Eine Entscheidung für die Nassbearbeitung bedeutet, dass sich das Unternehmen für die kurzfristig erfolgversprechende Option entschließt. Die Nassbearbeitung ist eine ausgereifte Technologie, deren technische Stärken und Schwächen bekannt sind und beherrscht werden. Die Wettbewerbsstrategie des Unternehmens könnte und sollte bei dieser Alternative auf das Anstreben der Kostenführerschaft hinauslaufen. Ggf. lassen sich Produktivitätssteigerungen durch neue leistungsstarke Nassbearbeitungsmaschinen erzielen.
- Eine Entscheidung für die Vollumstellung ist zwar auch aus technisch orientierter Sicht dadurch vertretbar, dass die Prozesssicherheit gewährleistet werden kann. Jedoch sind vorher insbesondere die Kosten und die Produktivität der Trockenbearbeitungsmaschinen zu prüfen. Die in der Zukunft liegenden Chancen der Trockenbearbeitung sollten von Unternehmen, die den Weg der Vollumstellung gehen wollen, als besonders wichtig eingeschätzt werden. Diese Entscheidungsstrategie zielt insofern auf die konsequente Umsetzung einer Wettbewerbsstrategie, die auf Differenzierung und auf Antizipation möglicher Umfeldeinflüsse setzt.
- Fällt die Entscheidung für die Teilumstellung, können damit die Flexibilitätsnachteile der Vollumstellung begrenzt und die Nachteile der Nassbearbeitung in den strategischen Kriterien jedenfalls teilweise kompensiert werden.

Davon ausgehend, dass ein Unternehmen, das sich mit dem Gedanken trägt, die Fertigung auf Trockenbearbeitung umzustellen, diesen Übergang sukzessive vornehmen wird, reduziert sich die Entscheidung auf die Alternativen Beibehaltung der vollständigen Nassbearbeitung und Teilumstellung. Die Vollumstellung steht in der Realität - zumindest anfangs - nicht zur Entscheidung an, da sich der Zustand der Teilumstellung auch auf dem Weg zur Vollumstellung ergibt. Ein sukzessives Vorgehen hat die entscheidenden Vorteile, dass

- der Grad der Umstellung nicht bereits von Anfang an festzulegen ist, sondern im Laufe der Zeit, d.h. mit fortschreitender Reife der Trockenbearbeitungstechnologie und mit sich deutlicher abzeichnenden Umfeldeinflüssen, ein jeweils optimaler Umstellungsgrad eingestellt werden kann, und
- die Teilumstellung ohne große Verluste rückgängig gemacht werden kann, sofern sich hierfür die Notwendigkeit ergeben sollte. Das Umstellungsrisiko ist unter diesem Gesichtspunkt als gering zu bewerten.

7.3 Betriebswirtschaftliche Auswirkungen während der Entwicklungs- bzw. Umstellungsphase

Unternehmen, die in die Trockenbearbeitung einzusteigen wollen, haben während der Umstellungsphase vielschichtige umstellungsspezifische Kosten zu tragen. Beim unter-

suchten Unternehmen lassen sich aus betriebswirtschaftlicher Perspektive Umstellungspfade für die Trockenbearbeitung nachzeichnen. Im erste Fall handelt es sich um die externe Beschaffung von Trockenbearbeitungsmaschinen eines Werkzeugmaschinenherstellers und die hierbei notwendigen Aufwendungen, während im zweiten Fall die Eigenkonstruktion angepasster Trockenbearbeitungsmaschinen zu betrachten ist.

7.3.1 Umstellungsaufwand Mikron

Mit der Mikron-Maschine wurde auf ein bislang im Unternehmen nicht im Einsatz befindliches Maschinenkonzept gesetzt. Vom Beginn des Auswahlprozesses für die Werkzeugmaschine bis zu ihrem produktiven Einsatz wurde ein Zeitraum von insgesamt drei Jahren benötigt.

Technische Anpassung

Die technische Anpassung der Mikron-Maschinen begann mit der Festlegung des Teilespektrums, das ohne Verwendung von Schneidöl hergestellt werden sollte. Zudem waren die Parameter für die Maschinenauslegung zu spezifizieren. Die Maschinenparameter mussten für die Mikron-Maschine deshalb neu definiert werden, da das Bauteilspektrum untersuchten Unternehmens ein wesentlich größeres Zerspanvolumen aufweist als die Produkte, für die die Mikron-Maschine ursprünglich konzipiert war. In einem weiteren Schritt wurden die Werkzeuge für die Trockenbearbeitung ausgewählt und optimiert. Während der Betriebsphase zeigte sich, dass die Lagerungen im Bearbeitungsraum wesentlich verbessert sowie die Absaugung der Späne und die Werkstoffzuführung weiter entwickelt werden mussten. Dies erfolgte zu guten Teilen im untersuchten Unternehmen selbst, aber auch in Kooperation mit dem Werkzeugmaschinenhersteller. Der personelle Aufwand für die Anpassung der Mikron-Maschine an die Produktionsanforderungen kann für das untersuchte Unternehmen mit etwa drei Mannjahren (130 TDM) beziffert werden. Obschon die Mikron-Maschine während dieser Zeit auch produktiv genutzt wurde, war eine beträchtliche Mindernutzung aufgrund störungsbedingter Ausfälle zu beobachten.

Bau-Investitionen

Neben der Beschaffung der Werkzeugmaschinen wurde in den Neubau einer Halle investiert. Die Aufstellung der Mikron-Maschine in der Halle der konventionellen Nassfertigung war nicht möglich, da die dortige ölhaltige Umgebungsluft den Betrieb der Trockenbearbeitungsmaschinen beeinträchtigte. Ein Neubau hätte sich für das Unternehmen dann erübrigen können, wenn der Nassbearbeitungsbereich vom Bereich der Trockenbearbeitungsmaschinen durch technische Maßnahmen ausreichend hätte getrennt werden können und wenn nicht gleichzeitig mit der Umstellung auf Trockenbearbeitung Kapazitätserweiterungen geplant gewesen wären.

Organisationsbedingte Kosten

Die Einführung der Mikron-Maschinen erforderte außer den Aufwendungen für die Anpassung der Technik an die betriebsspezifischen Anforderungen auch eine Anpassung der Organisation an die neue Technologie. Unter dem Begriff „Organisation" ist hier die Einbindung der Mikron in die betrieblichen Abläufe zu verstehen. Hierzu zählen der Materialfluss ebenso wie die Bereitstellung von Informationen (z.B. Arbeitspläne) und die Art, wie die Arbeit an den Mikron-Maschinen organisiert wird.

Organisationsbedingte Kosten im Rahmen der Einführung der Mikron-Maschinen wurden dadurch verursacht, dass die Maschinenführer nicht vollständig durch ihre Arbeit an den (zunächst) zwei neu beschafften Mikron-Maschinen ausgelastet waren. Deshalb zählen zusätzlich noch weitere, konventionelle Maschinen zu ihrem Zuständigkeitsbereich. Aufgrund der räumlichen Gegebenheiten (separate Halle für die Trockenbearbeitung) werden zusätzliche Wege verursacht, wenn ein Maschinenführer vom Nass- in den Trockenbearbeitungsbereich wechselt. Weitere Einbußen in der Effektivität entstehen dadurch, dass die Maschinenführer, die sowohl für die Nass- wie auch für die Trockenbearbeitung zuständig sind, weniger Übersicht über die Werkzeugmaschinen ihres Zuständigkeitsbereichs haben. So kann es vorkommen, dass ein Maschinenführer frühzeitige Signale einer Werkzeugmaschine nicht bemerkt, da er sich gerade im anderen Fertigungsbereich aufhält. Die Folge sind vergleichsweise aufwändigere Maßnahmen zur Fehlerbeseitigung bis hin zum Maschinenstillstand. Über den Zeitraum von drei Jahren entstand hierdurch ein Aufwand für Personalkosten in Höhe von etwa 1,5 Mannjahren. Dieser Aufwand für die organisatorische Einbindung der Mikron-Maschinen in den betrieblichen Ablauf nahm mit fortschreitender Dauer der Einführungsphase ab.

Für den Materialfluss sind mit dem Einstieg in die Trockenbearbeitung neue zusätzliche Wege einzurichten bzw. es ist der bestehende Materialfluss zu überdenken. So erfordert die Errichtung eines räumlich separaten Trockenbearbeitungsbereichs beispielsweise neue Wege für die Materialbereitstellung. Darüber hinaus ist mit einer getrennten Behandlung der Späne aus dem Trocken- und dem Nassbearbeitungsbereich auch der Spänetransport zu überdenken.

Mit den Mikron-Maschinen wurde ein neues Fertigungsverfahren eingeführt, das (unabhängig von der Trockenbearbeitung) die Anpassung der Arbeitspläne erforderte.

Schulungsaufwand / Einarbeitungsaufwand

Das Personal muss für die neue Fertigungstechnologie geschult werden ist. Für die Aufwandsabschätzung ist zu beachten, dass die Betroffenen bislang noch keine Möglichkeit hatten, über die Besonderheiten der Trockenbearbeitung Erfahrungen zu sammeln. Deshalb dürfte der Schulungsaufwand gerade während der Umstellungsphase auf die Trockenbearbeitung überdurchschnittlich hoch ausfallen. Nach der Schulung müssen die Betroffenen das Erlernte in die Praxis umsetzen und Erfahrungen mit der neuen Technologie sammeln. Während dieser Phase ist mit weiteren Einbußen in der Effektivität zu rechnen. Da mit den

Mikron-Maschinen eine Technologie eingeführt worden ist, die noch nicht auf die Produktionsbedingungen des Unternehmens angepasst war, zeigen sich hierbei jedoch Abgrenzungsprobleme zu den Kosten für die technische Anpassung, denn die Erfahrungen, die die Betroffenen im Umgang mit den Mikron-Maschinen sammelten, flossen unmittelbar in technische Anpassungen und Weiterentwicklungen ein.

Materialaufwand

Der Zusatzaufwand in der Umstellungsphase für gestiegenen Materialaufwand bzw. Ausschuss kann vernachlässigt werden.

7.3.2 Umstellungs- und Entwicklungsaufwand A10-Maschine

Bei der A10-Maschine hat das Unternehmen sich die Aufgabe gestellt, eine an die spezifischen Belange der Produktion angepasste Trockenbearbeitungsmaschine selbst zu konstruieren und zu bauen. Hierzu konnten die langjährigen Erfahrungen aus der Entwicklung konventioneller Werkzeugmaschinen für den Eigenbedarf genutzt werden und auf die Umstellungserfahrungen mit den Mikron-Maschinen zurück gegriffen werden.

Technische Entwicklung

Der Aufwand lag zu Beginn der Entwicklungsarbeiten in der Suche nach einem geeigneten Werkstückspektrum für die Trockenbearbeitungsmaschine. Zunächst wurde versucht, in das Werkstückspektrum, das für die Konzeption der Trockenbearbeitungsmaschine maßgeblich sein sollte, auch solche Werkstücke einzubeziehen, für die noch keine (mit den Mikron-Maschinen gewonnenen) Erfahrungen der Trockenbearbeitung vorlagen. Hierzu wurde ein Team aus Personen der beteiligten Abteilungen gebildet. Im Verlauf eines halben Jahres wurde das geeignete Werkstückspektrum erarbeitet.

An die Definition des Werkstückspektrums schlossen sich erste Fertigungsversuche auf herkömmlichen Maschinen an, jedoch ohne Verwendung von Schneidöl. In diesen Versuchen wurde Material im Wert von ca. 5.000 DM verbraucht. An Personalkosten fielen sowohl Kosten für den Maschinenführer als auch für das Konstruktionspersonal an.

Als Ergebnis der Vorversuche zeigte sich, dass für die neu zu entwickelnden Trockenbearbeitungsmaschinen das gleiche Werkstückspektrum, das auch mit den Mikron-Maschinen gefertigt wird, zu Grunde gelegt werden sollte.

Die Entwicklungsarbeiten an der Trockenbearbeitungsmaschine nahmen etwa ein Jahr in Anspruch. Während dieser Zeit wurde die Trockenbearbeitungsmaschine konzipiert, konstruiert und eingefahren. Zudem wurden Optimierungen – beispielsweise bezüglich der Minimalmengenschmierung - vorgenommen und die Teile- und Späneabführung entwickelt.

Für die Wahl des Werkstoffs bestanden keine Alternativen, da die Kunden die zu verwendenden Legierungen vorgeben. Allerdings konnte das für die Trockenbearbeitung zu verwendende Halbzeug dahingehend optimiert werden, dass der Rückstand von Ziehfett auf der Oberfläche reduziert wurde. Die übliche Menge und Art des Ziehfetts erwies sich als problematisch, da es aufgrund der höheren Bearbeitungstemperaturen zu unerwünschten Ablagerungen auf der Oberfläche kam.

Organisationsbedingte Kosten

In einem weiteren Arbeitsschritt musste auch die bestehende Arbeitsorganisation an die neuentwickelte Maschine angepasst werden. Da das Werkstückspektrum für die A 10-Maschine identisch mit dem der Mikron-Maschine ist, konnte man bei den notwendig werdenden organisatorischen Anpassungen teilweise auf die bereits durchgeführten Arbeiten zurückgreifen. Die Fertigungsunterlagen waren an die neue A 10-Maschine anzupassen. Der personelle Aufwand hierzu lag bei ca. einer Woche.

Schulungsaufwand / Einarbeitungsaufwand

Der Aufwand für Schulung und Einarbeitung kann im Falle der eigenentwickelten Trockenbearbeitungsmaschinen noch weniger beziffert werden als für die Mikron-Maschinen. Die Entwicklung der Maschinen, deren Anwendung und Optimierung waren vielmehr ein integrierter und iterativer Prozess.

Als Schlussfolgerung kann festgehalten werden, dass sowohl für die Anpassung der Mikron-Maschine als auch für die Entwicklung der A 10-Maschine erhebliche Kosten zu tragen waren. Erschwerend kommt hinzu, dass der Prozess der Anpassung bzw. Entwicklung nicht kontinuierlich verlief, sondern auch technische Misserfolge und Rückschläge aufwies. Hierdurch schob sich der Zeitpunkt bis zum Erreichen einer zufriedenstellenden Produktivität wiederholt hinaus. Insgesamt besteht im betrachteten Unternehmen rückblickend die Einschätzung, dass der Sprung in die neue Technologie der Trockenbearbeitung für ein mittelständisches Unternehmen ein Wagnis darstellt, das ohne flankierende finanzielle Förderung kaum hätte eingegangen werden können.

7.4 Auswirkungen auf die Gestaltung der Arbeitsplätze

7.4.1 Arbeitsumgebung

Lärmbelastung

Am Arbeitsplatz konventioneller A 3-Maschinen beträgt die Lärmbelastung 84,7 dBA[4]. An den Mikron-Maschinen wurde anfänglich ein Wert von 85,0 dBA ermittelt, womit die Mikron-Maschinen eine höhere Geräuschemission aufwiesen als die Maschinen im Nassbereich. Die Optimierung und Anpassung der Mikron-Maschinen an die betrieblichen Trockenbearbeitungsprozesse erforderten technische Änderungen an der Maschinenperipherie, wodurch der Lärm-Durchschnittspegel auf 81,0 dBA gesenkt wurde.

Der Lärmpegel einer (separat stehenden) A 10-Maschine konnte gegenüber den Mikron-Maschinen noch weiter auf 70,9 dBA gesenkt werden. Entscheidend hierfür ist der wesentlich geringere Bedarf an Druckluft für den Werkstück- und Spänetransport in einer A 10-Maschine. Misst man den Lärmpegel direkt am Arbeitsplatz einer A 10-Maschine im Trockenbearbeitungsbereich, machen sich die höheren Arbeitsgeräusche der Mikron-Maschinen bemerkbar. Als Messergebnis erhält man dann 73,3 dBA.

Durch den Einsatz der Trockenbearbeitungsmaschinen konnte der Lärmpegel somit in der Produktionshalle insgesamt erheblich gesenkt werden. Ähnliche Lärmreduzierungen ließen sich sicherlich auch an den konventionellen Werkzeugmaschinen erreichen, wenn sie mit entsprechenden Kapselungen versehen würden.

Belastung der Hallenluft

Die Ölkonzentration in der Hallenluft ist im Trockenbearbeitungsbereich sehr viel geringer als im Bereich der konventionellen Werkzeugmaschinen. Ölbelastungen im Trockenbereich können nur noch durch den Einsatz der Minimalmengenschmierung (MMS) entstehen, die mit geringsten Dosiermengen arbeiten. Messungen liegen bisher nicht vor, es finden sich jedoch auf dem Hallenboden keine Ölniederschläge und auch die Geruchswahrnehmung signalisiert keine Ölbelastung der Raumluft. Dies ist natürlich auch darauf zurückzuführen, dass die Gehäuse der A 10-Maschinen vollständig gekapselt sind.

Messungen zur Höhe der Metallstaubbelastung konnten während der Projektlaufzeit nicht durchgeführt werden, sollen aber im Verlauf der turnusmäßigen Überprüfungen nachgeholt werden. Wegen der Maschinenkapselung ist auch hier zu erwarten, dass die Belastung der Hallenluft mit metallischen Stäuben gering ist. Sollte es in Zukunft erforderlich werden,

---

[4] Die Messwerte geben den Durchschnittspegel („äquivalenter Dauerschallpegel") für einen Zeitraum von 8 Stunden an.

die Maschinen wegen der hohen Bearbeitungstemperaturen zu öffnen (Kühlung durch Konvektion) muss die Frage der Staubbelastung genauer untersucht und gegebenenfalls durch den Einbau von Filtern Abhilfe geschaffen werden.

Auch der Umgang mit Kaltreiniger, der immer auch mit einer gewissen Belastung der Raumluft verbunden ist, reduziert sich im Trockenbearbeitungsbereich fast vollständig. Da die Werkstücke ohne Verwendung von Schneidöl produziert werden, ist vor dem Messen und Prüfen keine Reinigung der Bauteile mit Kaltreiniger mehr nötig. Die Kaltreinigerstation bleibt somit im Nassbearbeitungsbereich, wo sie auch für den gelegentlich anfallenden Reinigungsbedarf aus dem Trockenbearbeitungsbereich genutzt wird.

7.4.2 Arbeitsinhalte

Ausgangspunkt für eine Betrachtung der Arbeitsinhalte ist die bestehende Arbeitsorganisation im Bereich der Nassbearbeitung. Dort sind die Maschinenführer nicht nur für das Einrichten und den Betrieb der Maschinen ihres Verantwortungsbereichs zuständig, sondern auch für „periphere" Tätigkeiten wie Qualitätssicherung, Maschinenwartung und Hallenreinigung (z.B. Boden, Lampen). Zum Teil erfordern diese Tätigkeiten, dass die Maschinenführer in intensiven Kontakt mit Öl bzw. mit ölhaltigen Produktionsrückständen (Späne, Abrieb etc.) und mit Kaltreiniger kommen. Diese Tätigkeiten sind bei den Betroffenen unbeliebt. Zudem ist ein Teil der Arbeiten dadurch geprägt, dass sie nur geringe Ansprüche an die Kenntnisse und Fertigkeiten der Betroffenen stellen.

Im Bereich der Trockenbearbeitung ist der Anteil dieser "unbeliebten" Tätigkeiten deutlich geringer. Zum einen fallen bestimmte Tätigkeiten nicht mehr an (z.B. Ölschlamm abpumpen; Umgang mit Kaltreiniger), zum anderen sind Tätigkeiten aufgrund des Wegfalls des Schneidöls deutlich weniger "schmutzbehaftet" (z.B. Säubern der Maschine von Spänen). Auch der Anteil weniger anspruchsvoller Tätigkeiten ist im Bereich der Trockenbearbeitung geringer. So muss beispielsweise für die Hallenreinigung deutlich weniger Arbeitszeit aufgewendet werden.

Die Tätigkeiten, die direkt an den neuen Werkzeugmaschinen auszuführen sind, erfordern grundsätzlich erhöhte Aufmerksamkeit und größere Sorgfalt. So können die im Bearbeitungsraum einer A 10-Maschine liegengebliebenen Späne nicht einfach mit Öl weggeschwemmt werden, sondern müssen sorgfältig von Hand entfernt werden. Da bei dieser Art der Maschinenreinigung immer eine gewisse Menge Restspäne im Bearbeitungsraum der Maschine verbleibt, muss insbesondere der Werkzeugwechsel mit großer Sorgfalt vorgenommen werden.

Hinzu kommt, dass der Umgang mit den teureren Trockenbearbeitungsmaschinen bei den Betroffenen mit einem höheren Verantwortungsgefühl verbunden ist. Den Maschinenführern ist bewusst, dass insbesondere die Ersatzteile für die Mikron-Maschinen hohe Kosten verursachen und – was weitaus größeren wirtschaftlichen Schaden bedeuten kann – dass während der Beschaffungszeiten die Produktion ausfällt.

Ein weiterer Aspekt der Arbeitsgestaltung betrifft die Einbeziehung der Betroffenen nicht nur in den Entwicklungsprozess der Trockenbearbeitungsmaschine, sondern auch in die Gestaltung der Arbeitsabläufe. Im untersuchten Unternehmen wurden die Betroffenen von Beginn an am Projekt der Trockenbearbeitung beteiligt. Bereits die Erstellung der technischen Spezifikation der Maschinen und die Auswahl des zu fertigenden Teilespektrums erfolgte unter Beteiligung von Maschinenführern. In der Phase der Optimierung lieferten sie wichtige Informationen für die Anpassung der Maschinen an die spezifischen Bearbeitungsaufgaben. Sie gaben aber auch entscheidende Anregungen für technische und organisatorische Lösungen, die letztendlich umgesetzt wurden. Diese intensive Form der Beteiligung stellt derzeit immer noch ein spezifisches Merkmal der Arbeitsinhalte im Trockenbearbeitungsbereich dar, da hier das Verbesserungspotential sicherlich noch nicht ausgeschöpft ist[5].

Versucht man die Einflüsse der Trockenbearbeitung auf die Arbeitsinhalte zu werten, so gilt es zu beachten, dass zwei Aspekte der Arbeitsgestaltung – erhöhte Aufmerksamkeit und Sorgfalt sowie ein höheres Verantwortungsgefühl – bei den Betroffenen durchaus auch zu übermäßigen Belastungen bzw. Beanspruchungen führen können. Im Falle des betrachteten Unternehmens ergab sich aus den geführten Gesprächen jedoch, dass die Arbeit im Trockenbearbeitungsbereich im Vergleich zur konventionellen Produktion eine deutliche inhaltliche Aufwertung erfahren hat. Hierbei ist der Vergleich zwischen Trocken- und Nassbearbeitungsbereich durchaus zulässig, da sich im Unternehmen die Art der Arbeitsorganisation und damit die Zuständigkeiten und die Verantwortlichkeiten zwischen diesen beiden Bereichen nicht unterscheiden.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass es natürlich auch Gestaltungsdimensionen gibt, die unabhängig davon sind, ob die eingesetzte Werkzeugmaschine mit oder ohne Schneidöl betrieben wird. So werden Gestaltungsansätze wie „Anreicherung mit planerischen Tätigkeiten" bzw. „Gruppenarbeit" von der Trockenbearbeitungstechnologie weder befördert noch blockiert.

---

[5] Dass die Beteiligung der Betroffenen gerade im Trockenbearbeitungsbereich so prägend für die Arbeitsinhalte ist, liegt an der Gestaltbarkeit sowohl der Technik wie auch der Organisation in dieser frühen Phase der Anwendung. Im Nassbearbeitungsbereich haben es die Maschinenführer dagegen mit ausgereifter Technik und bekannten organisatorischen Abläufen zu tun, wodurch deren Beteiligung über das betriebliche Vorschlagswesen oder ähnliche Mechanismen kanalisiert werden.

8. Literatur

Zitierte Literatur

ABAG: Moderne Kühlschmierstoffe oder Trockenbearbeitung. Tagung der ABAG Fellbach in Mannheim, 14. Oktober 1997.

Doerfel, O.: Trockenfräsen mit konventioneller Technologie. Tagungsband zum Abschlussmeeting „Trockenfräsen von Alu-Knetlegierungen, Daimler-Benz Forschungszentrum Ulm, 1997.

Gießler, J.: Trockenzerspanungsgerechte Fräswerkzeuge. Tagungsband zum Abschlussmeeting Trockenfräsen von Alu-Knetlegierungen, Daimler-Benz Forschungszentrum Ulm, 1997.

Hoffmeister, H.-W.; Bock, R.: Umweltverträgliche Schleifbearbeitung durch Ressourcenschonung. VDI-Berichte 1339, 1997.

Horn, W.: Entwicklung von Maschinen für Bohren und Gewinden mit innerer Minimalmengenschmierung. VDI-Berichte 1375, 1998.

Hüller-Hille: Firmenschrift „Trockenspecht". Hüller-Hille GmbH, Ludwigsburg, 2000.

Index: Firmenschrift „Vertical-Line". INDEX-Werke, Hahn & Tessky, Plochingen, 2000.

Kaufeld, M.: Bearbeiten mit diamantbeschichteten Werkzeugen. Werkstatt und Betrieb 129/5, 1996.

Klocke, F.; Beck, T.: Potentiale der Kühlschmierstoffreduzierung beim Schleifen. VDI-Berichte 1339, 1997.

Lahres, M.; Müller-Hummel, P.; Doerfel, O.: Applicability of different hard coatings in dry milling of aluminium alloys. Surface and coating technology 91, page 116-121, 1997.

LfU: Umweltmanagement in der metallverarbeitenden Industrie - Leitfaden zur EG-Umwelt-Audit-Verordnung. Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LfU), Karlsruhe, April 1994.

Liebherr: Das Verzahnmaschinenprogramm. Firmenprospekt der Liebherr Verzahntechnik GmbH, 1998.

Hühsam, A.: Dry Milling of Aluminium Die-Cast Alloy; MaterialsWeek 2001, München. Statusseminar des BMBF-Projekts „Trockenschmierstoffschichten für die umweltschonende und innovative Fertigung".

Palm, Ingo: Trockenbearbeitung aus Anwendersicht – Einsatzerfahrungen und Ausblicke. VDI-Band 1485, 1999.

Schmidt, J.; Doerfel, O.; Fillibeck, J.; Hühsam, A.: Trockenbearbeitung – Die Herausforderung für die Zerspanungstechnik. VDI-Band 1485, 1999.

Schmidt, J.; Hühsam, A.: Technologienetz Trockenbearbeitung – Wege zur angewandten Trockenbearbeitung in der Produktion. VDI-Band 1532, 2000.

Spath, D.; Anklam, H.-J.; Voß, E.; Vogt, W.; Meon, P.: Realisierung der Trockenbearbeitung mit beschichteten HSS-Werkzeugen durch innovative PVD-Schichten. Statusseminar Oberflächen- und Schichttechnologien, Mainz, 29.-31.05.1995.

WBK: Anwenderseminar Technologienetz Trockenbearbeitung. wbk, Karlsruhe, 19.09.2000.

Westkämper, E.; Bock, R.; Hoffmeister, H.-W.: Umweltgerechte Prozessgestaltung. VDI-Berichte 1240, 1996.

Weitere Literatur

BAW: Anteil der Kühlschmierkosten im deutschen Maschinenbau. Bundesamt für Wirtschaft (BWA), 1991.

Fritz; Schulze: Fertigungstechnik. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1995.

Gießler, J.; Rudolph, W.: Schrittweise zum trockenen Fräsen und Gewindebohren. Werkstatt und Betrieb, 128 (1995) 3.

Javor-Sandor, M.: Beschichtung von Funktionsflächen im ARC-PVD-Prozeß. Dissertation an der TH Berlin, Carl Hanser Verlag, München Wien, 1995.

Klocke, F.; König, W.: Trocken zerspanen. VDI-Z 137 (1995) 3/4.

König, W.; Fieber, M.: Kontaktbedingungen beim Einsatz beschichteter Werkzeuge. Tribologie + Schmierungstechnik, 42 (1995) 3.

Kress, D.; Fleischer, R.: Präzisions-Aufbohren und -Reiben mit Minimalmengenschmierung. Werkstatt und Betrieb 128 (1995) 1/2.

Kurth, J.; Durst, R.: Entwicklungstrends bei Zerspanwerkzeugen. VDI-Z, 137 (1995) 3/4.

Lahres, M.; Füßer, J.: Diamantschichten für die industrielle Anwendung. mo 49 (1995) 9.

Ophey, L.: Hochleistungswälzfräsen ohne Kühlschmierstoffe. Werkstatt und Betrieb, 127 (1994) 5.

Paatsch, W.: Optimiertes Bauteilverhalten. mo 49 (1995) 9

Pulker, H.: Verschleiß-Schutzschichten unter Anwendung der CVD/PVD-Verfahren. Expert Verlag, 1985.

Sahm, D.; Schneider, T.: Geht es auch ohne? Werkstatt und Betrieb 128 (1995) 1/2.

Schamschula, R.: Spanende Fertigung - Verfahren, Werkzeuge und Maschinen der spanenden Bearbeitung. Springer-Verlag, Heidelberg, 1976.

Wassmer, R.: Verschleißentwicklung im tribologischen System Fräsen. Forschungsbericht der Universität Karlsruhe WBK, 1994.

Anhang zu Abschnitt 6 - Ökologische Auswirkungen

Input-Output-Tabellen der einzelnen Fertigungsschritte

Bauteil 1 – Nassbearbeitung (A 3-Maschine)
Bauteil 1 – Trockenbearbeitung (Mikron)
Bauteil 1 – Trockenbearbeitung (A 10-Maschine)

Bauteil 2 – Nassbearbeitung (A 2-Maschine)
Bauteil 2 – Trockenbearbeitung (Mikron)

Ophey, L.: Hochleistungswälzfräsen ohne Kühlschmierstoffe. Werkstatt und Betrieb, 127 (1994) 5.

Paatsch, W.: Optimiertes Bauteilverhalten. mo 49 (1995) 9

Pulker, H.: Verschleiß-Schutzschichten unter Anwendung der CVD/PVD-Verfahren. Expert Verlag, 1985.

Sahm, D.; Schneider, T.: Geht es auch ohne? Werkstatt und Betrieb 128 (1995) 1/2.

Schamschula, R.: Spanende Fertigung - Verfahren, Werkzeuge und Maschinen der spanenden Bearbeitung. Springer-Verlag, Heidelberg, 1976.

Wassmer, R.: Verschleißentwicklung im tribologischen System Fräsen. Forschungsbericht der Universität Karlsruhe WBK, 1994.

Anhang zu Abschnitt 6 - Ökologische Auswirkungen

Input-Output-Tabellen der einzelnen Fertigungsschritte

Bauteil 1 – Nassbearbeitung (A 3-Maschine)
Bauteil 1 – Trockenbearbeitung (Mikron)
Bauteil 1 – Trockenbearbeitung (A 10-Maschine)

Bauteil 2 – Nassbearbeitung (A 2-Maschine)
Bauteil 2 – Trockenbearbeitung (Mikron)

Bauteil 1 – Nassbearbeitung (A 3-Maschine)

1. – Werkzeugmaschine

Input (Mengenangaben pro 1.000 Teile)				Output				
lfd. Nr.	**Stoff bzw. Stoffbestandteile, Energie**	**Menge**	**Herkunft**	**lfd. Nr.**	**Stoff bzw. Stoffbestandteile**	**Menge**	**wohin?**	**Abfallschlüsssel** [1]
E 1	Messinghalbzeug	1.530,0 g	Halbzeughersteller	ZP 1	Rohteile mit Öl und Spänen *- Teile* *- Späne* *- Öl*	508,4 g *414,2 g* *50,5 g* *43,7 g*	Teilezentrifuge	
E 2	Schneidöl (Frischware)	54,3 g	Zulieferer					
E 99	elektr. Energie	1.523 Wh	EVU					
I 1	Schneidöl (Kreislauf) *davon:*	463,7 g *390,9 g* *44,4 g* *28,4 g*	interne Rückgewinnung *- Spänezentrifuge* *- Absaugung* *- Teilezentrifuge*	I 2	Späne, ölhaltig *- Späne* *- Öl*	1.486,7 g *1.065,3 g* *421,3 g*	Spänezentrifuge	
				I 3	Öl, verschüttet	6,7 g	Maschinen- und Fußbodenreinigung	
				I 4	Schneidöl, zerstäubt	46,3 g	Absaugung	

1.1 – Spänezentrifuge

Input (Mengenangaben pro 1.000 Teile)				Output				
lfd. Nr.	**Stoff bzw. Stoffbestandteile, Energie**	**Menge**	**Herkunft**	**lfd. Nr.**	**Stoff bzw. Stoffbestandteile**	**Menge**	**wohin?**	**Abfallschlüsssel** [1]
E 99	elektr. Energie	46,1 Wh	EVU	I 1.1	Schneidöl (Kreislauf)	390,9 g	Werkzeugmaschine	
I 2	Späne, ölhaltig *- Späne* *- Öl*	1.486,7 g *1.065,3 g* *421,3 g*	Werkzeugmaschine	R 1	Späne mit 2,8 % Restöl *- Späne* *- Öl*	1.148,0 g *1.115,8 g* *32,1 g*	Rücknahme durch Halbzeughersteller	kein Abfall
I 5	Haftspäne, ölhaltig *- Späne* *- Öl*	52,2 g *50,5 g* *1,7 g*	Rüttelanlage					

1) Schlüssel nach dem EAV (Europäisches Abfallartenverzeichnis); besonders überwachungsbedürftige Abfälle: Fettdruck

1.2 – Absaugung

Input (Mengenangaben pro 1.000 Teile)				Output				
lfd. Nr.	**Stoff bzw. Stoffbestandteile, Energie**	**Menge**	**Herkunft**	**lfd. Nr.**	**Stoff bzw. Stoffbestandteile**	**Menge**	**wohin?**	**Abfallschlüsssel** [1]
E 99	elektr. Energie	236,7 Wh	EVU	I 1.2	Schneidöl (Kreislauf)	44,4 g	Werkzeugmaschine	
I 4	Schneidöl, zerstäubt	46,3 g	Werkzeugmaschine (Zerspanstelle)	I 7	Ölnebel, diffus	1,9 g	Reinigung Halle und Warmluftheizung	
I 6	Elektrofilter, gereinigt		Filterreinigung	I 8	Elektrofilter, verunreinigt – *Öl*	*gering*	Filterreinigung	

1.2.1 – Filterreinigung

Input (Mengenangaben pro 1.000 Teile)				Output				
lfd. Nr.	**Stoff bzw. Stoffbestandteile, Energie**	**Menge**	**Herkunft**	**lfd. Nr.**	**Stoff bzw. Stoffbestandteile**	**Menge**	**wohin?**	**Abfallschlüsssel** [1]
E 3	Wasser	gering	Wasserversorgung extern	I 6	Elektrofilter, gereinigt		Absaugung	
E 4	Reinigungsmittel (Tensid)	gering	Zulieferer	R 2	Emulsion, öl- und tensidhaltig	gering	externe Verwertung	12 01 09*
I 8	Elektrofilter, verunreinigt – *Öl*	*gering*	Absauganlage					

1) Schlüssel nach dem EAV (Europäisches Abfallartenverzeichnis); besonders überwachungsbedürftige Abfälle: *

1.3 - Maschinen- und Fußbodenreinigung

Input (Mengenangaben pro 1.000 Teile)				Output				
lfd. Nr.	**Stoff bzw. Stoffbestandteile, Energie**	**Menge**	**Herkunft**	**lfd. Nr.**	**Stoff bzw. Stoffbestandteile**	**Menge**	**wohin?**	**Abfallschlüsssel** [1]
E 5	Putzlappen	9,7 g	Textilreinigung extern	R 3	Putzlappen, ölhaltig *- Putzlappen* *- Öl*	13,6 g *9,7 g* *4,0 g*	Textilreinigung extern	kein Abfall
E 6	Kaltreiniger	1,5 g	Zulieferer					
E 7	Ölbinder	2,3 g	Zulieferer	R 4	Kaltreiniger, ölhaltig *- Kaltreiniger* *- Ö*	0,7 g *0,2 g* *0,5 g*	Rücknahme durch Zulieferer	
I 3	Öl verschüttet	6,7 g	Werkzeugmaschine					
				R 5	Kaltreinigeremissionen	2,2 g	Atmosphäre	kein Abfall
				R 6	Ölbinder, ölhaltig *- Ölbinder* *- Öl*	5,1 g *2,3 g* *2,7 g*	externe Verwertung	15 02 99D1*

1.4 - Hallenreinigung (jährlich)

Input (Mengenangaben pro 1.000 Teile)				Output				
lfd. Nr.	**Stoff bzw. Stoffbestandteile, Energie**	**Menge**	**Herkunft**	**lfd. Nr.**	**Stoff bzw. Stoffbestandteile**	**Menge**	**wohin?**	**Abfallschlüsssel** [1]
E 5	Putzlappen	gering	Textilreinigung extern	R 3	Putzlappen, öl- und tensidhaltig	gering	Textilreinigung extern	kein Abfall
E 8	Reinigungsmittel (Tensid	gering	Zulieferer					
I 7	Ölnebel diffus	gering	Absauganlage					

1) Schlüssel nach dem EAV (Europäisches Abfallartenverzeichnis); besonders überwachungsbedürftige Abfälle: *

1.5 - Reinigung Warmluftheizung

Input (Mengenangaben pro 1.000 Teile)				Output				
lfd. Nr.	**Stoff bzw. Stoffbestandteile, Energie**	**Menge**	**Herkunft**	**lfd. Nr.**	**Stoff bzw. Stoffbestandteile**	**Menge**	**wohin?**	**Abfallschlüsssel** [1]
E 9	Heizregister, gereinigt		Reinigung extern (Tankst.)	R 7	Heizregister, verunreinigt		Reinigung extern (Tankstelle)	kein Abfall
I 7	Ölnebel, diffus	gering	Absauganlage					

2. – Teilezentrifuge

Input (Mengenangaben pro 1.000 Teile)				Output				
lfd. Nr.	**Stoff bzw. Stoffbestandteile, Energie**	**Menge**	**Herkunft**	**lfd. Nr.**	**Stoff bzw. Stoffbestandteile**	**Menge**	**wohin?**	**Abfallschlüsssel** [1]
ZP 1	Rohteile mit Öl und Spänen	508,4 g	Werkzeugmaschine	ZP 2	Rohteile mit Haftöl und Spänen	480,0 g	Rüttelanlage	
	- Teile	*414,2 g*			*- Teile*	*414,2 g*		
	- Späne	*50,5 g*			*- Späne*	*50,5 g*		
	- Öl	*43,7 g*			*- Haftöl*	*15,3 g*		
E 99	elektr. Energie	4,9 Wh	EVU	I 1.3	Kreislauföl	28,4 g	Werkzeugmaschine	

1) Schlüssel nach dem EAV (Europäisches Abfallartenverzeichnis); besonders überwachungsbedürftige Abfälle: *

3. – Rüttelanlage

Input (Mengenangaben pro 1.000 Teile)				Output				
lfd. Nr.	**Stoff bzw. Stoffbestandteile, Energie**	**Menge**	**Herkunft**	**lfd. Nr.**	**Stoff bzw. Stoffbestandteile**	**Menge**	**wohin?**	**Abfallschlüsssel** [1]
ZP 2	Rohteile mit Haftöl und Spänen - *Teile* - *Späne* - *Öl*	480,0 g *414,2 g* *50,5 g* *15,3 g*	Teilezentrifuge	ZP 3	Rohteile mit Haftöl - *Teile* - *Öl*	427,8 g *414,2 g* *13,6 g*	Entfettungsanlage	
				I 5	Haftspäne,ölhaltig - *Späne* - *Öl*	52,2 g *50,5 g* *1,7 g*	Spänezentrifuge	
E99	elektr. Energie	6,6 Wh	EVU					

4. – Entfettungsanlage

Input (Mengenangaben pro 1.000 Teile)				Output				
lfd. Nr.	**Stoff bzw. Stoffbestandteile, Energie**	**Menge**	**Herkunft**	**lfd. Nr.**	**Stoff bzw. Stoffbestandteile**	**Menge**	**wohin?**	**Abfallschlüsssel** [1]
ZP 3	Rohteile mit Haftöl - *Teile* - *Öl*	427,8 g *414,2 g* *13,6 g*	Rüttelanlage	ZP 4	Rohteile, entfettet	414,2 g	Strahlen	
				R 8	Trichlorethen, ölhaltig und verunreinigt - *Öl* - *Trichlorethen* - *sonstiges (Metall- und Walnussgranulatabrieb)*	19,3 g *13,6 g* *gering* *gering*	Rücknahme durch Zulieferer	kein Abfall
E 10	Trichlorethen	15,0 g	Spänezentrifuge					
E 99	elektr. Energie	198,3 Wh	EVU					

1) Schlüssel nach dem EAV (Europäisches Abfallartenverzeichnis); besonders überwachungsbedürftige Abfälle: *

5. - Gleitschleifen (entfällt)

Input (Mengenangaben pro 1.000 Teile)				Output				
lfd. Nr.	**Stoff bzw. Stoffbestandteile, Energie**	**Menge**	**Herkunft**	**lfd. Nr.**	**Stoff bzw. Stoffbestandteile**	**Menge**	**wohin?**	**Abfallschlüsssel** [1]

6. – Strahlen

Input (Mengenangaben pro 1.000 Teile)				Output				
lfd. Nr.	**Stoff bzw. Stoffbestandteile, Energie**	**Menge**	**Herkunft**	**lfd. Nr.**	**Stoff bzw. Stoffbestandteile**	**Menge**	**wohin?**	**Abfallschlüsssel** [1]
ZP 4	Rohteile, entfettet	414,2 g	Entfettungsanlage	ZP 6	Rohteile, entgratet, behaftet mit Strahlmittel	414,2 g	Rüttelanlage	
E 13	Strahlmittel	2,3 g	Lieferant					
E 99	elektr. Energie	5,2 Wh	EVU	R 11	Strahlmittel, verbraucht	gering	Beseitigung	hmä. Gewerbeabfall
I 99	Druckluft	225 l	Drucklufterzeugung					

7. – Rüttelanlage

Input (Mengenangaben pro 1.000 Teile)				Output				
lfd. Nr.	**Stoff bzw. Stoffbestandteile, Energie**	**Menge**	**Herkunft**	**lfd. Nr.**	**Stoff bzw. Stoffbestandteile**	**Menge**	**wohin?**	**Abfallschlüsssel** [1]
ZP 6	Rohteile, entgratet, behaftet mit Strahlmittel	414,2 g	Strahlen	ZP 7	Rohteile, entgratet, behaftet mit Strahlmittelresten	414,2 g	Entfettungsanlage	
E 99	elektr. Energie	6,6 Wh	EVU					

1) Schlüssel nach dem EAV (Europäisches Abfallartenverzeichnis); besonders überwachungsbedürftige Abfälle: *

8. – Entfettungsanlage

Input (Mengenangaben pro 1.000 Teile)				Output				
lfd. Nr.	**Stoff bzw. Stoffbestandteile, Energie**	**Menge**	**Herkunft**	**lfd. Nr.**	**Stoff bzw. Stoffbestandteile**	**Menge**	**wohin?**	**Abfallschlüsssel** [1]
ZP 7	Rohteile, entgratet, behaftet mit Strahlmittelresten	414,2 g	Rüttelanlage	ZP 5	Fertigteile vor Qualitätskontrolle	414,2 g	Qualitätskontrolle	
E 99	elektr. Energie weitere Inputs siehe 4. - Entfettungsanlage	198,3 Wh gering	EVU	R 8	Trichlorethen, verunreinigt (Strahlmittelreste bereits beinhaltet in 4. - Entfettungsanlage als "Sonstiges")		Rücknahme durch Zulieferer	kein Abfall

9. – Qualitätskontrolle

Input (Mengenangaben pro 1.000 Teile)				Output				
lfd. Nr.	**Stoff bzw. Stoffbestandteile, Energie**	**Menge**	**Herkunft**	**lfd. Nr.**	**Stoff bzw. Stoffbestandteile**	**Menge**	**wohin?**	**Abfallschlüsssel** [1]
ZP 5	Fertigteile vor Qualitätskontrolle	414,2 g	Entfettungsanlage	P 1	Fertigteile	414,2 g	Kunde	
				R 12	Messingteile, fehlerhafte	gering	Rücknahme durch Halbzeughersteller	kein Abfall

1) Schlüssel nach dem EAV (Europäisches Abfallartenverzeichnis); besonders überwachungsbedürftige Abfälle: *

99. – Drucklufterzeugung

Input (Mengenangaben pro 1.000 Teile)				Output				
lfd. Nr.	**Stoff bzw. Stoffbestandteile, Energie**	**Menge**	**Herkunft**	**lfd. Nr.**	**Stoff bzw. Stoffbestandteile**	**Menge**	**wohin?**	**Abfallschlüsssel** [1]
E 99	elektr. Energie	25,1 Wh	EVU	I 99	Druckluft	225 l	Strahlen	
				R 13	Abwasser	gering	Kanalisation	
				R 14	Emulsion, ölhaltig aus Öltrenneinrichtung Kompressor	gering	externe Verwertung	12 01 09*

1) Schlüssel nach dem EAV (Europäisches Abfallartenverzeichnis); besonders überwachungsbedürftige Abfälle: *

Bauteil 1 – Trockenbearbeitung (Mikron)

1. – Werkzeugmaschine

Input (Mengenangaben pro 1.000 Teile)				Output				
lfd. Nr.	**Stoff bzw. Stoffbestandteile, Energie**	**Menge**	**Herkunft**	**lfd. Nr.**	**Stoff bzw. Stoffbestandteile**	**Menge**	**wohin?**	**Abfallschlüsssel** [1]
E 1	Messinghalbzeug	1.530 g	Halbzeughersteller	ZP 8	Rohteile, ölfrei	414,16 g	Gleitschleifen	
E 14	Schneidöl (MMS)	0,36 g	Zulieferer	R 15	Späne, ölfrei	1.115,8 g	Rücknahme durch Halbzeughersteller	kein Abfall
E 15	Maschinenöl	1,75 g	Zulieferer					
E 99	elektr. Energie (inkl. Absaugung)	1.015 Wh	EVU	I 9	Späne, ölfrei; Metallstaub; Ölnebel	gering	Absaugung, Maschinenreinigung	
I 99	Druckluft	15.530 l	Drucklufterzeugung	I 10	Schneid-, Maschinenöl	gering	Maschinenreinigung	

1.1 – Absaugung

Input (Mengenangaben pro 1.000 Teile)				Output				
lfd. Nr.	**Stoff bzw. Stoffbestandteile, Energie**	**Menge**	**Herkunft**	**lfd. Nr.**	**Stoff bzw. Stoffbestandteile**	**Menge**	**wohin?**	**Abfallschlüsssel** [1]
E 16	Filter	0,5 g	Zulieferer	R 16	Filterkartuschen, ölhaltig	0,7 g	externe Verwertung	15 02 99D1*
E 99	elektr. Energie		bereits bei Bearbeitungsmaschine enthalten					
I 9	Späne, ölfrei; Metallstaub; Ölnebel	gering	Werkzeugmaschine					

1) Schlüssel nach dem EAV (Europäisches Abfallartenverzeichnis); besonders überwachungsbedürftige Abfälle: *

1.2 – Maschinenreinigung

Input (Mengenangaben pro 1.000 Teile)				Output				
lfd. Nr.	**Stoff bzw. Stoffbestandteile, Energie**	**Menge**	**Herkunft**	**lfd. Nr.**	**Stoff bzw. Stoffbestandteile**	**Menge**	**wohin?**	**Abfallschlüsssel** [1]
E 5	Putzlappen	gering	Textilreinigung extern	R 14	Späne, ölfrei	gering	Rücknahme durch Halbzeughersteller	kein Abfall
E 99	elektr. Energie	gering	EVU	R 17	Putzlappen, verunreinigt	gering	Textilreinigung extern	kein Abfall
I 9	Späne, ölfrei; Metallstaub; Ölnebel	gering	Werkzeugmaschine					
I 10	Schneidöl-, Maschinenöl	gering	Werkzeugmaschine					

2. – Gleitschleifen (entfällt)

Input (Mengenangaben pro 1.000 Teile)				Output				
lfd. Nr.	**Stoff bzw. Stoffbestandteile, Energie**	**Menge**	**Herkunft**	**lfd. Nr.**	**Stoff bzw. Stoffbestandteile**	**Menge**	**wohin?**	**Abfallschlüsssel** [1]

3. – Strahlen

Input (Mengenangaben pro 1.000 Teile)				Output				
lfd. Nr.	**Stoff bzw. Stoffbestandteile, Energie**	**Menge**	**Herkunft**	**lfd. Nr.**	**Stoff bzw. Stoffbestandteile**	**Menge**	**wohin?**	**Abfallschlüsssel** [1]
ZP 8	Rohteile, ölfrei	414,2 g	Werkzeugmaschine	ZP 6	Rohteile, entgratet, behaftet mit Strahlmittel	414,2 g	Entfettungsanlage	
E 13	Strahlmittel	2,3 g	Lieferant	R 12	Strahlmittel, verbraucht	gering	Beseitigung	hmä. Gewerbeabfall
E 99	elektr. Energie	5,2 Wh	EVU					
I 99	Druckluft	225 l	Drucklufterzeugung					

1) Schlüssel nach dem EAV (Europäisches Abfallartenverzeichnis); besonders überwachungsbedürftige Abfälle: *

4. – Entfettungsanlage

Input (Mengenangaben pro 1.000 Teile)				Output				
lfd. Nr.	**Stoff bzw. Stoffbestandteile, Energie**	**Menge**	**Herkunft**	**lfd. Nr.**	**Stoff bzw. Stoffbestandteile**	**Menge**	**wohin?**	**Abfallschlüsssel** [1]
ZP 6	Rohteile, entgratet, behaftet mit Strahlmittel	414,2 g	Strahlen	ZP 5	Fertigteile vor Qualitätskontrolle	414,2 g	Qualitätskontrolle	
E 10	Trichlorethen	15,0 g	Lieferant	R 8	Trichlorethen, verunreinigt (ölarm)	5,7 g	Rücknahme durch Zulieferer	kein Abfall
E 99	elektr. Energie	198,3 Wh	EVU					

5. – Qualitätskontrolle

Input (Mengenangaben pro 1.000 Teile)				Output				
lfd. Nr.	**Stoff bzw. Stoffbestandteile, Energie**	**Menge**	**Herkunft**	**lfd. Nr.**	**Stoff bzw. Stoffbestandteile**	**Menge**	**wohin?**	**Abfallschlüsssel** [1]
ZP 5	Fertigteile vor Qualitätskontrolle	414,2 g	Entfettungsanlage	P 1	Fertigteile	414,2 g	Auslieferung	
				R 12	Messingteile, fehlerhafte	gering	Rücknahme durch Halbzeughersteller	kein Abfall

1) Schlüssel nach dem EAV (Europäisches Abfallartenverzeichnis); besonders überwachungsbedürftige Abfälle: *

99. – Drucklufterzeugung

Input (Mengenangaben pro 1.000 Teile)				Output				
lfd. Nr.	**Stoff bzw. Stoffbestandteile, Energie**	**Menge**	**Herkunft**	**lfd. Nr.**	**Stoff bzw. Stoffbestandteile**	**Menge**	**wohin?**	**Abfallschlüsssel [1)]**
E 99	elektr. Energie (Bearbeitungsmaschine)	1.732 Wh	EVU	I 99	Druckluft	15.503 l 225 l	Werkzeugmaschine Strahlen	
	elektr. Energie (Strahlen)	25,1 Wh	EVU	R 13	Abwasser	gering	Kanalisation	
				R 14	Emulsion, ölhaltig aus Öltrenneinrichtung Kompressor	gering	externe Verwertung	12 01 09*

1) Schlüssel nach dem EAV (Europäisches Abfallartenverzeichnis); besonders überwachungsbedürftige Abfälle: *

Bauteil 1 – Trockenbearbeitung (A 10-Maschine)

1. – Werkzeugmaschine

Input (Mengenangaben pro 1.000 Teile)				Output				
lfd. Nr.	**Stoff bzw. Stoffbestandteile, Energie**	**Menge**	**Herkunft**	**lfd. Nr.**	**Stoff bzw. Stoffbestandteile**	**Menge**	**wohin?**	**Abfallschlüsssel** [1]
E 17	Messinghalbzeug (entfettet)	1.530 g	Halbzeughersteller	ZP 8	Rohteile, ölfrei	414,16 g	Gleitschleifen	
E 15	Schneidöl (MMS)	0,90 g	Zulieferer	I 9	Späne, ölfrei; Metallstaub; Ölnebel	gering	Maschinenreinigung	
E 99	elektr. Energie (inkl. Absaugung)	1.125 Wh	EVU	R 15	Späne, ölfrei	1.115,8 g	Rücknahme durch Halbzeughersteller	kein Abfall
I 99	Druckluft	1.706 l	Drucklufterzeugung					

1.1 – Absaugung (entfällt)

Input (Mengenangaben pro 1.000 Teile)				Output				
lfd. Nr.	**Stoff bzw. Stoffbestandteile, Energie**	**Menge**	**Herkunft**	**lfd. Nr.**	**Stoff bzw. Stoffbestandteile**	**Menge**	**wohin?**	**Abfallschlüsssel** [1]

1.2 – Maschinenreinigung

Input (Mengenangaben pro 1.000 Teile)				Output				
lfd. Nr.	**Stoff bzw. Stoffbestandteile, Energie**	**Menge**	**Herkunft**	**lfd. Nr.**	**Stoff bzw. Stoffbestandteile**	**Menge**	**wohin?**	**Abfallschlüsssel** [1]
I 9	Späne, ölfrei; Metallstaub; Ölnebel	gering	Werkzeugmaschine	R 15	Späne, ölfrei	gering	Rücknahme durch Halbzeughersteller	kein Abfall

1) Schlüssel nach dem EAV (Europäisches Abfallartenverzeichnis); besonders überwachungsbedürftige Abfälle: *

2. – Gleitschleifen (entfällt)

Input (Mengenangaben pro 1.000 Teile)				Output				
lfd. Nr.	**Stoff bzw. Stoffbestandteile, Energie**	**Menge**	**Herkunft**	**lfd. Nr.**	**Stoff bzw. Stoffbestandteile**	**Menge**	**wohin?**	**Abfallschlüsssel** [1]

3. – Strahlen

Input (Mengenangaben pro 1.000 Teile)				Output				
lfd. Nr.	**Stoff bzw. Stoffbestandteile, Energie**	**Menge**	**Herkunft**	**lfd. Nr.**	**Stoff bzw. Stoffbestandteile**	**Menge**	**wohin?**	**Abfallschlüsssel** [1]
ZP 8	Rohteile, ölfrei	414,2 g	Werkzeugmaschine	ZP 6	Rohteile, entgratet, behaftet mit Strahlmittel	414,2 g	Entfettungsanlage	
E 13	Strahlmittel	2,3 g	Lieferant					
E 99	elektr. Energie	5,2 Wh	EVU	R 11	Strahlmittel, verbraucht	gering	Beseitigung	hmä. Gewerbeabfall
I 99	Druckluft	225 l	Drucklufterzeugung					

4. – Entfettungsanlage

Input (Mengenangaben pro 1.000 Teile)				Output				
lfd. Nr.	**Stoff bzw. Stoffbestandteile, Energie**	**Menge**	**Herkunft**	**lfd. Nr.**	**Stoff bzw. Stoffbestandteile**	**Menge**	**wohin?**	**Abfallschlüsssel** [1]
ZP 6	Rohteile, entgratet, behaftet mit Strahlmittel	414,2 g	Strahlen	ZP 5	Fertigteile vor Qualitätskontrolle	414,2 g	Qualitätskontrolle	
E 10	Trichlorethen	15,0 g	Lieferant	R 8	Trichlorethen, verunreinigt (ölarm)	5,7 g	Rücknahme durch Zulieferer	kein Abfall
E 99	elektr. Energie	198,3 Wh	EVU					

1) Schlüssel nach dem EAV (Europäisches Abfallartenverzeichnis); besonders überwachungsbedürftige Abfälle: *

Bauteil 1 – Trockenbearbeitung (A 10-Maschine)

1. – Werkzeugmaschine

Input (Mengenangaben pro 1.000 Teile)				Output				
lfd. Nr.	**Stoff bzw. Stoffbestandteile, Energie**	**Menge**	**Herkunft**	**lfd. Nr.**	**Stoff bzw. Stoffbestandteile**	**Menge**	**wohin?**	**Abfallschlüsssel [1)]**
E 17	Messinghalbzeug (entfettet)	1.530 g	Halbzeughersteller	ZP 8	Rohteile, ölfrei	414,16 g	Gleitschleifen	
E 15	Schneidöl (MMS)	0,90 g	Zulieferer	I 9	Späne, ölfrei; Metallstaub; Ölnebel	gering	Maschinenreinigung	
E 99	elektr. Energie (inkl. Absaugung)	1.125 Wh	EVU	R 15	Späne, ölfrei	1.115,8 g	Rücknahme durch Halbzeughersteller	kein Abfall
I 99	Druckluft	1.706 l	Drucklufterzeugung					

1.1 – Absaugung (entfällt)

Input (Mengenangaben pro 1.000 Teile)				Output				
lfd. Nr.	**Stoff bzw. Stoffbestandteile, Energie**	**Menge**	**Herkunft**	**lfd. Nr.**	**Stoff bzw. Stoffbestandteile**	**Menge**	**wohin?**	**Abfallschlüsssel [1)]**

1.2 – Maschinenreinigung

Input (Mengenangaben pro 1.000 Teile)				Output				
lfd. Nr.	**Stoff bzw. Stoffbestandteile, Energie**	**Menge**	**Herkunft**	**lfd. Nr.**	**Stoff bzw. Stoffbestandteile**	**Menge**	**wohin?**	**Abfallschlüsssel [1)]**
I 9	Späne, ölfrei; Metallstaub; Ölnebel	gering	Werkzeugmaschine	R 15	Späne, ölfrei	gering	Rücknahme durch Halbzeughersteller	kein Abfall

1) Schlüssel nach dem EAV (Europäisches Abfallartenverzeichnis); besonders überwachungsbedürftige Abfälle: *

2. – Gleitschleifen (entfällt)

Input (Mengenangaben pro 1.000 Teile)				Output				
lfd. Nr.	**Stoff bzw. Stoffbestandteile, Energie**	**Menge**	**Herkunft**	**lfd. Nr.**	**Stoff bzw. Stoffbestandteile**	**Menge**	**wohin?**	**Abfallschlüsssel** [1]

3. – Strahlen

Input (Mengenangaben pro 1.000 Teile)				Output				
lfd. Nr.	**Stoff bzw. Stoffbestandteile, Energie**	**Menge**	**Herkunft**	**lfd. Nr.**	**Stoff bzw. Stoffbestandteile**	**Menge**	**wohin?**	**Abfallschlüsssel** [1]
ZP 8	Rohteile, ölfrei	414,2 g	Werkzeugmaschine	ZP 6	Rohteile, entgratet, behaftet mit Strahlmittel	414,2 g	Entfettungsanlage	
E 13	Strahlmittel	2,3 g	Lieferant					
E 99	elektr. Energie	5,2 Wh	EVU	R 11	Strahlmittel, verbraucht	gering	Beseitigung	hmä. Gewerbeabfall
I 99	Druckluft	225 l	Drucklufterzeugung					

4. – Entfettungsanlage

Input (Mengenangaben pro 1.000 Teile)				Output				
lfd. Nr.	**Stoff bzw. Stoffbestandteile, Energie**	**Menge**	**Herkunft**	**lfd. Nr.**	**Stoff bzw. Stoffbestandteile**	**Menge**	**wohin?**	**Abfallschlüsssel** [1]
ZP 6	Rohteile, entgratet, behaftet mit Strahlmittel	414,2 g	Strahlen	ZP 5	Fertigteile vor Qualitätskontrolle	414,2 g	Qualitätskontrolle	
E 10	Trichlorethen	15,0 g	Lieferant	R 8	Trichlorethen, verunreinigt (ölarm)	5,7 g	Rücknahme durch Zulieferer	kein Abfall
E 99	elektr. Energie	198,3 Wh	EVU					

1) Schlüssel nach dem EAV (Europäisches Abfallartenverzeichnis); besonders überwachungsbedürftige Abfälle: *

5. – Qualitätskontrolle

Input (Mengenangaben pro 1.000 Teile)				Output				
lfd. Nr.	**Stoff bzw. Stoffbestandteile, Energie**	**Menge**	**Herkunft**	**lfd. Nr.**	**Stoff bzw. Stoffbestandteile**	**Menge**	**wohin?**	**Abfallschlüsssel** [1]
ZP 5	Fertigteile vor Qualitätskontrolle	414,2 g	Entfettungsanlage	P 1	Fertigteile	414,2 g	Auslieferung	
				R 12	Messingteile, fehlerhafte	gering	Rücknahme durch Halbzeughersteller	kein Abfall

99. – Drucklufterzeugung

Input (Mengenangaben pro 1.000 Teile)				Output				
lfd. Nr.	**Stoff bzw. Stoffbestandteile, Energie**	**Menge**	**Herkunft**	**lfd. Nr.**	**Stoff bzw. Stoffbestandteile**	**Menge**	**wohin?**	**Abfallschlüsssel** [1]
E 99	elektr. Energie (Bearbeitungsmaschine)	190 Wh	EVU	I 99	Druckluft	1.706 l 225 l	Werkzeugmaschine Strahlen	
	elektr. Energie (Strahlen)	25,1 Wh	EVU	R 13	Abwasser	gering	Kanalisation	
				R 14	Emulsion, ölhaltig aus Öltrenneinrichtung Kompressor	gering	externe Verwertung	12 01 09*

1) Schlüssel nach dem EAV (Europäisches Abfallartenverzeichnis); besonders überwachungsbedürftige Abfälle: *

Bauteil 2 – Nassbearbeitung (A 2-Maschine)

1. – Werkzeugmaschine

Input (Mengenangaben pro 1.000 Teile)				Output				
lfd. Nr.	**Stoff bzw. Stoffbestandteile, Energie**	**Menge**	**Herkunft**	**lfd. Nr.**	**Stoff bzw. Stoffbestandteile**	**Menge**	**wohin?**	**Abfallschlüsssel** [1]
E 1	Messinghalbzeug	1.640,0 g	Halbzeughersteller	ZP 1	Rohteile mit Öl und Spänen *– Teile* *– Späne* *– Öl*	642,0 g *486,0 g* *36,8 g* *119,2 g*	Teilezentrifuge	
E 2	Schneidöl (Frischware)	58,5 g	Zulieferer					
E 99	elektr. Energie	1.105 Wh	EVU					
I 1	Schneidöl (Kreislauf) *davon:*	298,2 g *190,8 g* *5,4 g* *102,0 g*	interne Rückgewinnung *– Spänezentrifuge* *– Absaugung* *– Teilezentrifuge*	I 2	Späne, ölhaltig *– Späne* *– Öl*	1.340,0 g *1.117,2 g* *222,8 g*	Spänezentrifuge	
I 99	Druckluft	730 l	Drucklufterzeugung	I 3	Öl, verschüttet	8,2 g	Maschinen- und Fußbodenreinigung	
				I 4	Schneidöl, zerstäubt	6,5 g	Absaugung	

1.1 – Spänezentrifuge

Input (Mengenangaben pro 1.000 Teile)				Output				
lfd. Nr.	**Stoff bzw. Stoffbestandteile, Energie**	**Menge**	**Herkunft**	**lfd. Nr.**	**Stoff bzw. Stoffbestandteile**	**Menge**	**wohin?**	**Abfallschlüsssel** [1]
E 99	elektr. Energie	47,7 Wh	EVU	I 1.1	Schneidöl (Kreislauf)	190,8 g	Werkzeugmaschine	
I 2	Späne, ölhaltig *– Späne* *– Öl*	1.340,0 g *1.117,2 g* *222,8 g*	Werkzeugmaschine	R 1	Späne mit 2,8 % Restöl *– Späne* *– Öl*	1.187,2 g *1.154,0 g* *33,2 g*	Rücknahme durch Halbzeughersteller	kein Abfall
I 5	Haftspäne, ölhaltig *– Späne* *– Öl*	38,0 g *36,8 g* *1,2 g*	Rüttelanlage					

1) Schlüssel nach dem EAV (Europäisches Abfallartenverzeichnis); besonders überwachungsbedürftige Abfälle: *

1.2 – Absaugung

Input (Mengenangaben pro 1.000 Teile)				Output				
lfd. Nr.	**Stoff bzw. Stoffbestandteile, Energie**	**Menge**	**Herkunft**	**lfd. Nr.**	**Stoff bzw. Stoffbestandteile**	**Menge**	**wohin?**	**Abfallschlüsssel** [1]
E 99	elektr. Energie	99,1 Wh	EVU	I 1.2	Schneidöl (Kreislauf)	5,4 g	Werkzeugmaschine	
I 4	Schneidöl, zerstäubt	6,5 g	Werkzeugmaschine (Zerspanstelle)	I 7	Ölnebel, diffus	1,1 g	Reinigung Halle und Warmluftheizung	
I 6	Elektrofilter, gereinigt		Filterreinigung	I 8	Elektrofilter, verunreinigt – *Öl*	*gering*	Filterreinigung	

1.2.1 – Filterreinigung

Input (Mengenangaben pro 1.000 Teile)				Output				
lfd. Nr.	**Stoff bzw. Stoffbestandteile, Energie**	**Menge**	**Herkunft**	**lfd. Nr.**	**Stoff bzw. Stoffbestandteile**	**Menge**	**wohin?**	**Abfallschlüsssel** [1]
E 3	Wasser	gering	Wasserversorgung extern	I 6	Elektrofilter, gereinigt		Absaugung	
E 4	Reinigungsmittel (Tensid)	gering	Zulieferer	R 2	Emulsion, öl- und tensidhaltige	gering	externe Verwertung	12 01 09*
I 8	Elektrofilter, verunreinigt – *Öl*	*gering*	Absauganlage					

1) Schlüssel nach dem EAV (Europäisches Abfallartenverzeichnis); besonders überwachungsbedürftige Abfälle: *

1.3 - Maschinen- und Fußbodenreinigung

Input (Mengenangaben pro 1.000 Teile)				Output				
lfd. Nr.	**Stoff bzw. Stoffbestandteile, Energie**	**Menge**	**Herkunft**	**lfd. Nr.**	**Stoff bzw. Stoffbestandteile**	**Menge**	**wohin?**	**Abfallschlüsssel** [1]
E 5	Putzlappen	11,8 g	Textilreinigung extern	R 3	Putzlappen, ölhaltig - *Putzlappen* - *Öl*	16,7 g *11,8 g* *4,9 g*	Textilreinigung extern	kein Abfall
E 6	Kaltreiniger	2,4 g	Zulieferer					
E 7	Ölbinder	2,9 g	Zulieferer	R 4	Kaltreiniger, ölhaltig - *Kaltreiniger* - *Öl*	0,7 g *0,2 g* *0,5 g*	Rücknahme durch Zulieferer	kein Abfall
I 3	Öl, verschüttet	8,2 g	Werkzeugmaschine					
				R 5	Kaltreinigeremissionen	2,2 g	Atmosphäre	kein Abfall
				R 6	Ölbinder, ölhaltig - *Ölbinder* - *Öl*	6,2 g *2,9 g* *3,3 g*	Verwertung extern	15 02 99D1*

1.4 – Hallenreinigung (jährlich)

Input (Mengenangaben pro 1.000 Teile)				Output				
lfd. Nr.	**Stoff bzw. Stoffbestandteile, Energie**	**Menge**	**Herkunft**	**lfd. Nr.**	**Stoff bzw. Stoffbestandteile**	**Menge**	**wohin?**	**Abfallschlüsssel** [1]
E 5	Putzlappen	gering	Textilreinigung extern	R 3	Putzlappen, öl- und tensidhaltig	gering	Textilreinigung extern	kein Abfall
E 8	Reinigungsmittel (Tensid)	gering	Zulieferer					
I 7	Ölnebel, diffus	gering	Absauganlage					

1) Schlüssel nach dem EAV (Europäisches Abfallartenverzeichnis); besonders überwachungsbedürftige Abfälle: *

1.5 - Reinigung Warmluftheizung

Input (Mengenangaben pro 1.000 Teile)				Output				
lfd. Nr.	**Stoff bzw. Stoffbestandteile, Energie**	**Menge**	**Herkunft**	**lfd. Nr.**	**Stoff bzw. Stoffbestandteile**	**Menge**	**wohin?**	**Abfallschlüsssel** [1]
E 9	Heizregister, gereinigt		Reinigung extern (Tankst.)	R 7	Heizregister, verunreinigt		Reinigung extern (Tankstelle)	kein Abfall
I 7	Ölnebel, diffus	gering	Absauganlage					

2. – Teilezentrifuge

Input (Mengenangaben pro 1.000 Teile)				Output				
lfd. Nr.	**Stoff bzw. Stoffbestandteile, Energie**	**Menge**	**Herkunft**	**lfd. Nr.**	**Stoff bzw. Stoffbestandteile**	**Menge**	**wohin?**	**Abfallschlüsssel** [1]
ZP 1	Rohteile mit Öl und Spänen	540,0 g	Werkzeugmaschine	ZP 2	Rohteile mit Haftöl und Spänen	540,0 g	Rüttelanlage	
	- Teile	*486,0 g*			*- Teile*	*486,0 g*		
	- Späne	*36,8 g*			*- Späne*	*36,8 g*		
	- Öl	*17,2 g*			*- Haftöl*	*17,2 g*		
E 99	elektr. Energie	2,0 Wh	EVU					
				I 1.3	Kreislauföl	102,0 g	Werkzeugmaschine	

1) Schlüssel nach dem EAV (Europäisches Abfallartenverzeichnis); besonders überwachungsbedürftige Abfälle: *

3. – Rüttelanlage

Input (Mengenangaben pro 1.000 Teile)				Output				
lfd. Nr.	**Stoff bzw. Stoffbestandteile, Energie**	**Menge**	**Herkunft**	**lfd. Nr.**	**Stoff bzw. Stoffbestandteile**	**Menge**	**wohin?**	**Abfallschlüsssel** [1]
ZP 2	Rohteile mit Haftöl und Spänen *- Teile* *- Späne* *- Öl*	54,0 g *486,0 g* *36,8 g* *17,2 g*	Teilezentrifuge	ZP 3	Rohteile mit Haftöl *- Teile* *- Öl*	502,0 g *486,0 g* *16,0 g*	Entfettungsanlage	
				I 5	Haftspäne, ölhaltig *- Späne* *- Öl*	38,0 g *36,8 g* *1,2 g*	Spänezentrifuge	
E99	elektr. Energie	2,6 Wh	EVU					

4. – Entfettungsanlage

Input (Mengenangaben pro 1.000 Teile)				Output				
lfd. Nr.	**Stoff bzw. Stoffbestandteile, Energie**	**Menge**	**Herkunft**	**lfd. Nr.**	**Stoff bzw. Stoffbestandteile**	**Menge**	**wohin?**	**Abfallschlüsssel** [1]
ZP 3	Rohteile mit Haftöl *- Teile* *- Öl*	502,0 g *486,0 g* *16,0 g*	Rüttelanlage	ZP 4	Rohteile, entfettet	486,0 g	Gleitschleifen, Strahlen	
E 10	Trichlorethen	15,0 g	Spänezentrifuge	R 8	Trichlorethen, ölhaltig und verunreinigt *- Öl* *- Trichlorethen* *- sonstiges (Metall- und Walnussgranulatabrieb)*	19,3 g *16,0 g* *gering* *gering*	Rücknahme durch Zulieferer	kein Abfall
E 99	elektr. Energie	79,3 Wh	EVU					

1) Schlüssel nach dem EAV (Europäisches Abfallartenverzeichnis); besonders überwachungsbedürftige Abfälle: *

5. - Gleitschleifen (inkl. Trocknung und Schlammzentrifuge)

Input (Mengenangaben pro 1.000 Teile)				Output				
lfd. Nr.	**Stoff bzw. Stoffbestandteile, Energie**	**Menge**	**Herkunft**	**lfd. Nr.**	**Stoff bzw. Stoffbestandteile**	**Menge**	**wohin?**	**Abfallschlüsssel [1)]**
ZP 4	Rohteile, entfettet	486,0 g		ZP 5	Fertigteile vor Qualitätskontrolle	486,0 g	Qualitätskontrolle	
E 3	Wasser	3 ml	Wasserversorger	R 9	Schleifschlamm	1 g	externe Verwertung	12 02 02
E 11	Schleifkörper	1 g	Lieferant	R 10	Abwasser, öl und metallhaltig	2 ml	externe Verwertung	12 01 09*
E 12	Stellmittel	gering	Lieferant					
E 99	elektr. Energie	11,63 Wh	EVU					

6. – Strahlen (entfällt)

Input (Mengenangaben pro 1.000 Teile)				Output				
lfd. Nr.	**Stoff bzw. Stoffbestandteile, Energie**	**Menge**	**Herkunft**	**lfd. Nr.**	**Stoff bzw. Stoffbestandteile**	**Menge**	**wohin?**	**Abfallschlüsssel [1)]**

7. – Rüttelanlage (entfällt)

Input (Mengenangaben pro 1.000 Teile)				Output				
lfd. Nr.	**Stoff bzw. Stoffbestandteile, Energie**	**Menge**	**Herkunft**	**lfd. Nr.**	**Stoff bzw. Stoffbestandteile**	**Menge**	**wohin?**	**Abfallschlüsssel [1)]**

1) Schlüssel nach dem EAV (Europäisches Abfallartenverzeichnis); besonders überwachungsbedürftige Abfälle: *

8. – Entfettungsanlage (entfällt)

Input (Mengenangaben pro 1.000 Teile)				Output				
lfd. Nr.	**Stoff bzw. Stoffbestandteile, Energie**	**Menge**	**Herkunft**	**lfd. Nr.**	**Stoff bzw. Stoffbestandteile**	**Menge**	**wohin?**	**Abfallschlüsssel** [1]

10. – Qualitätskontrolle

Input (Mengenangaben pro 1.000 Teile)				Output				
lfd. Nr.	**Stoff bzw. Stoffbestandteile, Energie**	**Menge**	**Herkunft**	**lfd. Nr.**	**Stoff bzw. Stoffbestandteile**	**Menge**	**wohin?**	**Abfallschlüsssel** [1]
ZP 5	Fertigteile vor Qualitätskontrolle	486,0 g	Gleitschleifen	P 1	Fertigteile	486,0 g	Kunde	
				R 12	Messingteile, fehlerhaft	gering	Rücknahme durch HAlbzeughersteller	kein Abfall

99. – Drucklufterzeugung

Input (Mengenangaben pro 1.000 Teile)				Output				
lfd. Nr.	**Stoff bzw. Stoffbestandteile, Energie**	**Menge**	**Herkunft**	**lfd. Nr.**	**Stoff bzw. Stoffbestandteile**	**Menge**	**wohin?**	**Abfallschlüsssel** [1]
E 99	elektr. Energie	81,37 Wh	EVU	I 99	Druckluft	730 l	Werkzeugmaschine	
				R 13	Abwasser	gering	Kanalisation	
				R 14	Emulsion, ölhaltig aus Öltrenneinrichtung Kompressor	gering	externe Verwertung	12 01 09*

1) Schlüssel nach dem EAV (Europäisches Abfallartenverzeichnis); besonders überwachungsbedürftige Abfälle: *

Bauteil 2 – Trockenbearbeitung (Mikron)

1. – Werkzeugmaschine

Input (Mengenangaben pro 1.000 Teile)				Output				
lfd. Nr.	**Stoff bzw. Stoffbestandteile, Energie**	**Menge**	**Herkunft**	**lfd. Nr.**	**Stoff bzw. Stoffbestandteile**	**Menge**	**wohin?**	**Abfallschlüsssel** [1]
E 1	Messinghalbzeug	1640 g	Halbzeughersteller	ZP 8	Rohteile, ölfrei	486,0 g	Gleitschleifen	
E 14	Schneidöl (MMS)	1,23 g	Zulieferer	R 15	Späne, ölfrei	1154 g	Rücknahme durch Halbzeughersteller	kein Abfall
E 15	Maschinenöl	2,63 g	Zulieferer					
E 99	elektr. Energie	1064 Wh	EVU	I 9	Späne, ölfrei; Metallstaub; Ölnebel	gering	Absaugung	
I 99	Druckluft	24.849 l	Drucklufterzeugung	I 10	Schneid-, Maschinenöl	gering	Maschinenreinigung	

1.1 – Absaugung

Input (Mengenangaben pro 1.000 Teile)				Output				
lfd. Nr.	**Stoff bzw. Stoffbestandteile, Energie**	**Menge**	**Herkunft**	**lfd. Nr.**	**Stoff bzw. Stoffbestandteile**	**Menge**	**wohin?**	**Abfallschlüsssel** [1]
E 16	Filter	0,8 g	Zulieferer	R 16	Filterkartuschen, ölhaltig	1,1 g	externe Verwertung	15 02 99D1*
E 99	elektr. Energie		bereits in Bearbeitungsmaschine enthalten					
I 9	Späne, ölfrei; Metallstaub; Ölnebel	gering	Werkzeugmaschine					

1) Schlüssel nach dem EAV (Europäisches Abfallartenverzeichnis); besonders überwachungsbedürftige Abfälle: *

1.2 – Maschinenreinigung

Input (Mengenangaben pro 1.000 Teile)				Output				
lfd. Nr.	**Stoff bzw. Stoffbestandteile, Energie**	**Menge**	**Herkunft**	**lfd. Nr.**	**Stoff bzw. Stoffbestandteile**	**Menge**	**wohin?**	**Abfallschlüsssel** [1]
E 5	Putzlappen	gering	Textilreinigung extern	R 15	Späne, ölfrei	gering	Rücknahme durch Halbzeughersteller	kein Abfall
E 99	elektr. Energie	gering	EVU	R 17	Putzlappen, verunreinigt	gering	Textilreinigung extern	kein Abfall
I 9	Späne, ölfrei; Metallstaub; Ölnebel	gering	Werkzeugmaschine					
I 10	Schneid-, Maschinenöl	gering	Werkzeugmaschine					

2. – Gleitschleifen (inkl. Trocknung und Schlammzentrifuge)

Input (Mengenangaben pro 1.000 Teile)				Output				
lfd. Nr.	**Stoff bzw. Stoffbestandteile, Energie**	**Menge**	**Herkunft**	**lfd. Nr.**	**Stoff bzw. Stoffbestandteile**	**Menge**	**wohin?**	**Abfallschlüsssel** [1]
ZP 8	Rohteile, ölfrei	486,0 g	Werkzeugmaschine	ZP 9	Rohteile, teilentgratet	486,0 g	Strahlen	
E 11	Schleifkörper	1 g	Lieferant	R 9	Schleifschlamm	1 g	externe Verwertung	12 02 02
E 12	Stellmittel	0,5 g	Lieferant	R 10	Abwasser, öl- und metallhaltig	2 ml	externe Verwertung	12 01 09*
E 3	Wasser	3 ml	Wasserversorger					
E 99	elektr. Energie	11,6 Wh	EVU					

1) Schlüssel nach dem EAV (Europäisches Abfallartenverzeichnis); besonders überwachungsbedürftige Abfälle: *

3. – Strahlen

Input (Mengenangaben pro 1.000 Teile)				Output				
lfd. Nr.	**Stoff bzw. Stoffbestandteile, Energie**	**Menge**	**Herkunft**	**lfd. Nr.**	**Stoff bzw. Stoffbestandteile**	**Menge**	**wohin?**	**Abfallschlüsssel** [1]
ZP 9	Rohteile, teilentgratet	486,0 g	Werkzeugmaschine	ZP 6	Rohteile, entgratet, behaftet mit Strahlmittel	486,0 g	Entfettungsanlage	
E 13	Strahlmittel	2,3 g	Lieferant					
E 99	elektr. Energie	5,2 Wh	EVU	R 11	Strahlmittel, verbraucht	gering	Beseitigung	hmä. Gewerbeabfall
I 99	Pressluft	225 l	Presslufterzeugung					

4. – Entfettungsanlage

Input (Mengenangaben pro 1.000 Teile)				Output				
lfd. Nr.	**Stoff bzw. Stoffbestandteile, Energie**	**Menge**	**Herkunft**	**lfd. Nr.**	**Stoff bzw. Stoffbestandteile**	**Menge**	**wohin?**	**Abfallschlüsssel** [1]
ZP 6	Rohteile, entgratet, behaftet mit Strahlmittel	486,0 g	Strahlen	ZP 5	Fertigteile vor Qualitätskontrolle	486,0 g	Qualitätskontrolle	
E 10	Trichlorethen	15,0 g	Lieferant	R 8	Trichlorethen, verunreinigt (ölarm)	3,3 g	Rücknahme durch Zulieferer	kein Abfall
E 99	elektr. Energie	198,3 Wh	EVU					

5. – Qualitätskontrolle

Input (Mengenangaben pro 1.000 Teile)				Output				
lfd. Nr.	**Stoff bzw. Stoffbestandteile, Energie**	**Menge**	**Herkunft**	**lfd. Nr.**	**Stoff bzw. Stoffbestandteile**	**Menge**	**wohin?**	**Abfallschlüsssel** [1]
ZP 5	Fertigteile vor Qualitätskontrolle	486,0 g	Entfettungsanlage	P 1	Fertigteile	486,0g	Auslieferung	
				R 12	Messingteile, fehlerhaft	gering	Rücknahme durch Halbzeughersteller	kein Abfall

1) Schlüssel nach dem EAV (Europäisches Abfallartenverzeichnis); besonders überwachungsbedürftige Abfälle: *

99. – Drucklufterzeugung

Input (Mengenangaben pro 1.000 Teile)				Output				
lfd. Nr.	**Stoff bzw. Stoffbestandteile, Energie**	**Menge**	**Herkunft**	**lfd. Nr.**	**Stoff bzw. Stoffbestandteile**	**Menge**	**wohin?**	**Abfallschlüsssel [1)]**
E 99	elektr. Energie (Bearbeitungsmaschine)	2.771 Wh	EVU	I 99	Druckluft	24.849 l 225 l	Werkzeugmaschine Strahlen	
	elektr. Energie (Strahlen)	25,1 Wh	EVU	R 13	Abwasser	gering	Kanalisation	
				R 14	Emulsion, ölhaltig aus Öltrenneinrichtung Kompressor	gering	externe Verwertung	12 01 09*

1) Schlüssel nach dem EAV (Europäisches Abfallartenverzeichnis); besonders überwachungsbedürftige Abfälle: *

Anhang zu Abschnitt 7 - Ökonomische Auswirkungen

Für die Durchführung der Kostenvergleichsrechnung wurde zunächst ein Berechnungsverfahren konzipiert, mit dessen Hilfe die monetären Auswirkungen des Umstellungsprojektes analysiert werden können. Hierzu wurde unter Zugrundelegung des im betrachteten Unternehmen verwendeten Kostenrechnungsverfahrens ein Konzept für die Stückkostenrechnung entwickelt. Das Kostenrechnungsverfahren wurde um spezifische, die Umstellung berücksichtigende Aspekte ergänzt. Es zeigte sich, dass nicht sämtliche Kostendaten, die für den Vergleich zwischen Nass- und Trockenbearbeitung benötigt wurden, aus dem Buchhaltungs- bzw. Kostenrechnungswesen des Unternehmens abrufbar waren. Deshalb wurde in Zusammenarbeit mit dem Unternehmen eine Konzeption für die empirische Fundierung der noch fehlenden Daten entwickelt, die entsprechenden Erhebungen wurden durchgeführt und die Ergebnisse in das Kalkulationsschema eingegeben.

A7-1 Auswahl der Methode für die Kostenvergleichsrechnung

Mit dem Kostenvergleich sollen die monetären Auswirkungen der Umstellung von Trocken- auf Nassbearbeitung ermittelt werden. Unter den für das Unternehmen herrschenden Voraussetzungen

- feststehende Zeitpunkte für die Einführung der Trockenbearbeitungsmaschinen und
- kaum in ihrer Höhe schwankende relevante Kostenarten

bietet sich unter methodischen Gesichtspunkten ein statisches Verfahren der Stückkostenrechnung an. Ein bedeutender Vorteil statischer Verfahren liegt darin, dass man im Vergleich zu dynamischen Verfahren nicht auf Prognosen für die Kostenentwicklung in einer weit in die Zukunft reichenden Zeitspanne angewiesen ist.

Für die durchgeführte Kostenanalyse wurde die Methode der Vollkostenrechnung gewählt. Die Vollkostenrechnung weist gegenüber den Ansätzen zur Teilkostenrechnung zwar den Nachteil auf, dass Gemeinkosten zu berücksichtigen sind und diese Gemeinkosten mit den hiermit einhergehenden Problemen der Zurechenbarkeit möglichst "verursachungsgerecht" auf die nächst tiefere Betrachtungsebene weiterzugeben sind. Allerdings besitzen die Vollkostenansätze eine Reihe entscheidender Vorteile:

- Die Methoden der Vollkostenrechnung führen in jedem Fall zu entscheidungsrelevanten Ergebnissen, während dies bei Methoden der Teilkostenrechnung prinzipiell nicht der Fall ist; Aussagen zur Vorteilhaftigkeit einer Investitionsalternative lassen sich bei Modellen der Teilkostenrechnung nur dann eindeutig treffen, wenn eine Alternative eine andere Alternative in sämtlichen zu betrachtenden Deckungsbeiträgen dominiert. Da

dies in der Regel nicht vorausgesetzt werden kann, wurde dem zu entwickelnden Kostenrechnungsverfahren das Konzept der Vollkostenrechnung zugrunde gelegt.

- Die Stückkostenrechnung auf der Basis der Vollkostenrechnung weist gerade in kleinen und mittleren Unternehmen weite Verbreitung auf; diese Praxisnähe bürgt für eine gewisse Vertrautheit im Umgang mit diesem Kalkulationsschema in diesem Unternehmenskreis. Die Wahl der Vollkostenrechnung als Methode zur Bewertung monetärer Unterschiede zwischen Nass- und Trockenbearbeitung erfolgt somit auch angesichts der Anforderungen an eine umsetzungsorientierte Begleitung des Modellprojekts.

A7-2 Typische betriebliche Rahmenbedingungen bei der Umstellung auf Trockenbearbeitung

Bevor mit der Analyse der Kosten begonnen werden kann, ist insbesondere auf folgende Rahmenbedingungen hinzuweisen, die für das Umstellungsprojekt im untersuchten Unternehmen typisch waren. Es darf angenommen werden, dass diese Rahmenbedingungen auch bei anderen Unternehmen auftreten, die sich mit der Umstellung auf die Trockenbearbeitung befassen.

Zum einen werden Kostenunterschiede bei der Umstellung auf Trockenbearbeitung nicht nur aufgrund eines verminderten bzw. wegfallenden Einsatzes von Schneidöl hervorgerufen. Bedeutende betriebswirtschaftliche Auswirkungen sind im Zuge der Umstellung auch dadurch zu erwarten, dass herkömmliche Nassbearbeitungsmaschinen zum Teil durch modernere, leistungsfähigere Werkzeugmaschinen ersetzt werden. Dadurch werden zugleich Produktivitätssteigerungen hervorgerufenen, die auch unabhängig von einem Umstieg auf Trockenbearbeitung auftreten können.

Der Kostenvergleich konnte letztlich nur unter den Bedingungen der o.a. Überlagerungseffekte durchgeführt werden. Im Betrachtungszeitraum wurden für die Trockenbearbeitung beispielsweise wesentlich leistungsfähigere Maschinen der Firma Mikron beschafft. Deshalb können die sich ergebenden Kostenunterschiede nicht mehr dahingehend aufgeteilt werden, welcher Anteil nun auf die Umstellung auf Trockenbearbeitung entfällt und welcher Anteil auf die gesteigerte Produktivität technisch leistungsfähigerer Werkzeugmaschinen zurückzuführen ist.

Der zweite bei der Kostenbetrachtung zu berücksichtigende Aspekt lag darin, dass das Unternehmen die Umstellung auf Trockenbearbeitung aufgrund beschränkter Investitionsmittel nicht in einem Schritt vollzieht. Deshalb war der Kostenvergleich so anzulegen, dass die Möglichkeit eines sukzessiven Ersatzes der bestehenden Werkzeugmaschinen durch Trockenbearbeitungsmaschinen abgebildet werden kann. Letztendlich kann mit dem entwickelten Instrument sogar eine vollständige Umstellung auf Trockenbearbeitung simuliert werden.

A7-3 Spezifische Annahmen für die Durchführung der Kostenrechnung

Um das Berechnungsschema nicht übermäßig kompliziert zu gestalten, musste eine Reihe vereinfachender Annahmen getroffen werden. Trotz dieser Vereinfachung werden die Ergebnisse in ihrem Aussagegehalt nur unwesentlich geschmälert, so dass die ermittelten Zahlenwerte über Trendaussagen hinaus auch quantitative Aussagen zulassen. Im einzelnen liegen den Berechnungen folgende Annahmen zugrunde:

- Statische Betrachtungsweise: Konstante Entsorgungskosten, Lohnkosten, etc.
- Vollauslastung für Nass- und Trockenbearbeitung.
- Rüstkosten, Werkzeugkosten und Kosten für Qualitätssicherung sind hochgerechnet auf eine Vergleichsperiode von einem Jahr.
- Auf Maschinenebene gibt es variable und fixe Gemeinkosten. Während die fixen Gemeinkosten konstant bleiben, verändern sich die variablen Gemeinkosten proportional zum Mengendurchsatz.
- Es werden nur solche Kosten erfasst, deren Höhe durch die Umstellung auf Trockenbearbeitung beeinflusst wird. Da beispielsweise die Höhe der Materialkosten unabhängig von der Art des Verfahrens ist, bleibt diese Kostenart unberücksichtigt.
- Ein sog. Opportunitätserlös fällt nicht an, da für Späne ohne Ölreste bis auf weiteres keine höheren Verkaufserlöse erzielt werden können als für Späne mit anhaftenden Ölresten.

A7-4 Kostenstruktur und Kalkulationsschema

Die Anwendung der Methoden der Vollkostenrechnung ist dadurch gekennzeichnet, dass sich prinzipiell das Problem der Zurechnung von Gemeinkosten auf die Kostenträger ergibt. Das Ergebnis einer Kostenvergleichsrechnung hängt unter diesen Bedingungen stark von der Art der Verteilung der Gemeinkosten auf die Kostenträger ab. Mit der im folgenden vorgestellten Strukturierung der Kosten werden primär die Ziele verfolgt,

- eine der Kostenverursachung angemessene Verteilung der Gemeinkosten zu ermöglichen und transparent zu machen, und
- darauf zu achten, dass die im Unternehmen bereits vorhandenen Daten so weit wie möglich in den Kostenvergleich übernommen werden können. Hierdurch sollte der zusätzliche Aufwand für die Erhebung der benötigten Daten auf ein Minimum reduziert werden.

Aus diesen Gründen wurde für die Kostenvergleichsrechnung ein Drei-Ebenen-Modell mit "Bereichs-", "Maschinen-" und "Kostenträgerebene" entwickelt.

Bereichsebene

Die erste und umfassendste Ebene unterscheidet lediglich zwischen einem Unternehmensbereich, in dem die Produkte unter Verwendung von Schneidöl hergestellt werden, und einem anderen Unternehmensbereich, in dem ausschließlich Trockenbearbeitungsmaschinen genutzt werden. Diese Aufteilung zwischen Nass- und Trockenbearbeitungsbereich ist zunächst fiktiv; sie braucht nicht unbedingt betrieblicherseits z.B. durch räumliche Trennung realisiert worden sein.

Da in den Kostenvergleich lediglich solche Kosten einfließen, die auf die Umstellung von Nass- auf Trockenbearbeitung zurückzuführen sind, treten auf Bereichsebene **keine Gemeinkosten** auf. Anders verhält es sich mit den **Einzelkosten** auf Bereichsebene. Hierunter sind Kosten zu verstehen, die einem der beiden Bereiche eindeutig zugeordnet werden können. Hierbei handelt es sich im wesentlichen um folgende Kostenarten (vgl. im einzelnen Tabelle A7-1):

- Abschreibungen auf die Peripherieanlagen (Hierunter sind solche Anlagen zu verstehen, deren Vorhandensein für den Betrieb des gesamten Trocken- oder Nassbearbeitungsbereichs benötigt wird und nicht etwa nur für den Betrieb einzelner Werkzeugmaschinen. Ein Beispiel für eine Peripherieanlage ist die Entfettungsanlage, die sämtliche im Nassbearbeitungsbereich und im Trockenbereich produzierten Artikel unabhängig von der Maschine, auf welcher sie hergestellt wurden, reinigt.
- Kosten für Hilfs- und Betriebsstoffe (sofern sie nicht einer speziellen Werkzeugmaschine zugeordnet werden können, sondern nur dem gesamten Trockenbearbeitungs- bzw. Nassbearbeitungsbereich; z.B. Granulat für die Strahlmaschinen).
- Personalkosten (dto., z.B. Personalkosten für die Reinigung von Ölfiltern).
- Energiekosten (dto., z.B. Energiekosten für Elektrofilter).
- Kosten für die Entsorgung und Reinigung (dto. z.B. Entsorgungskosten für Altöl).
- Weitere relevante Kosten, wie die Kosten, die nur für die Teilumstellung anfallen.

Gemäß den Grundsätzen der Vollkostenrechnung sind die auf Bereichsebene anfallenden Kosten auf Kostenstellen der nächsttieferen Ebene zu verrechnen. Für diesen Schritt der Verrechnung ist deshalb zunächst zu bestimmen, welche Kostenstellen zweckmäßigerweise eingerichtet werden sollen.

Maschinenebene

Da im Rahmen der Umstellung auf Trockenbearbeitung einzelne bzw. - im Endausbau - alle Werkzeugmaschinen ohne Schneidöl betrieben werden sollen, bietet es sich an, als Kostenstellen die einzelnen Werkzeugmaschinen zu betrachten. Somit erhält man als zweites Strukturierungselement die einzelnen Werkzeugmaschinen.

Auf der Maschinenebene werden nun die Kosten je Werkzeugmaschine betrachtet. Da es nicht möglich ist, die auf Bereichsebene anfallenden Kosten eindeutig bestimmten Maschi-

nen zuzuordnen, sind diese Kosten bezüglich der Werkzeugmaschinen als **Gemeinkosten** aufzufassen und möglichst verursachungsgerecht unter Verwendung von Hilfsgrößen (Schlüsseln) auf die einzelnen Werkzeugmaschinen zu verteilen. Zur Verrechnung dieser Kosten auf die einzelnen Maschinen ist zunächst deren Höhe zu bestimmen.

Bei der Ermittlung der Kostenhöhe ist zu beachten, dass bestimmte Gemeinkostenarten (hier: die Bereichseinzelkosten) von der Anzahl der vorhandenen Werkzeugmaschinen bzw. von der Anzahl der hergestellten Artikel abhängen (variable Gemeinkosten auf Maschinenebene), während die Höhe anderer Gemeinkostenarten hiervon unbeeinflusst bleibt (fixe Gemeinkosten auf Maschinenebene). So sind z.B. die Energiekosten für den Betrieb der Peripherieanlagen größtenteils abhängig von der Produktionsmenge des Nassbearbeitungsbereichs (variable Gemeinkosten), während die kalkulatorischen Abschreibungen auf die Peripherieanlagen unabhängig vom Produktionsvolumen anfallen (fixe Gemeinkosten).

Der Einfachheit halber wird bei der Ermittlung der Höhe der variablen Gemeinkosten davon ausgegangen, dass sich diese Kosten proportional zum Produktionsvolumen verhalten, dass also mit fortschreitender Umstellung auf Trockenbearbeitung die variablen Gemeinkosten der Nassbearbeitungsmaschinen proportional sinken. Die fixen Gemeinkosten bleiben dagegen bei der Verteilung auf die Werkzeugmaschinen jeweils in ihrer vollen Höhe erhalten (diese fixen Gemeinkosten fallen idealtypisch erst im "letzten" Umstellungsschritt auf Trockenbearbeitung weg).

Nachdem die Höhe der Gemeinkosten ermittelt ist, ist für die Verrechnung der Gemeinkosten auf die Werkzeugmaschinen ein geeigneter Verteilungsschlüssel zu finden. Dieser Verteilungsschlüssel sollte sowohl die Kostenverursachung widerspiegeln als auch möglichst einfach anzuwenden sein. In Anlehnung an die im Unternehmen praktizierte Vorgehensweise erfolgt die Verrechnung der Gemeinkosten auf die Maschinen unter Zugrundelegung des Materialdurchsatzes: Die Höhe der Gemeinkosten, die auf eine Werkzeugmaschine weiterverrechnet werden, bestimmt sich nach dem Anteil dieser Werkzeugmaschine am Gesamtdurchsatz.

Eine Besonderheit ergab sich unter den spezifischen Produktionsbedingungen im Unternehmen dadurch, dass die Ölkühlungsanlage nur von einem Teil der Werkzeugmaschinen beansprucht wird. Die von der Ölkühlungsanlage verursachten Kosten sind deshalb nur diesem Teil des Maschinenparks als Gemeinkosten zuzurechnen. Um dies zu berücksichtigen, wird ein Faktor errechnet, der die Gemeinkosten ohne Ölkühlungskosten zu den gesamten Gemeinkosten in Beziehung setzt.

Neben den Gemeinkosten fallen auch auf Maschinenebene **Einzelkosten** an, die ohne die Notwendigkeit der Verwendung von Verteilungsschlüsseln direkt den betrachteten Werkzeugmaschinen zugerechnet werden können. Im einzelnen handelt es sich bei diesen Einzelkosten um

- die Abschreibung der betrachteten Werkzeugmaschine,
- den kalkulatorischen Zins,

- Wartungs- und Instandhaltungskosten sowie
- Energiekosten.

Die Summe aus Gemein- und Einzelkosten ergibt die Gesamtkosten auf Maschinenebene. Die Gesamtkosten auf Maschinenebene sind nun auf die einzelnen Kostenträger weiterzuverrechnen.

Kostenträgerebene (Bauteileebene)

Da die auf Maschinenebene ermittelten Kosten nur mit Hilfe einer geeigneten Schlüsselvariablen auf die zu verkaufenden Bauteile (die Kostenträger) weiterverrechnet werden können, stellen sie für die Kostenträger Gemeinkosten dar. Die Weiterverrechnung dieser Kosten erfolgt unter Zugrundelegung der maschinenspezifischen Laufzeiten pro Jahr, indem je Werkzeugmaschine der Maschinenstundensatz ermittelt wird. Die Multiplikation des Maschinenstundensatzes mit der Hauptzeit für die Herstellung eines Bauteils ergibt den aus den Gemeinkosten resultierenden Teil der Stückkosten.

Neben den Gemeinkosten sind auf Kostenträgerebene auch die folgenden Einzelkosten zu berücksichtigen:

- Werkzeugkosten,
- Qualitätssicherungskosten,
- Rüstkosten sowie
- weitere Personalkosten.

Bezieht man die Summe aus den Gemein- und den Einzelkosten auf die Anzahl der innerhalb einer bestimmten Periode (z.B. pro Jahr) produzierten Kostenträger, so erhält man die gesamten **umstellungsbedingten** Stückkosten.

Der Vergleich der auf diese Art ermittelten Stückkosten zeigt nicht nur, inwiefern sich die Herstellungskosten bei einem vollständigen Umstieg von Nass- auf Trockenbearbeitung ändern, vielmehr können - wie in Abschnitt 7 geschehen - hiermit auch Ergebnisse für eine teilweise Umstellung ermittelt werden.