

# Ganzheitliches Vorgehensmodell bei der Gestaltung von Hochgeschwindigkeits- Bearbeitungs-Prozessen

unter Berücksichtigung von Aspekten  
des ArbeitnehmerInnen- und Umweltschutzes

E. Wahlmüller, B. Reiß,  
J. Reischl, R. Hackl

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

**16/2005**

## **Impressum:**

Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber:  
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie  
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:  
Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien  
Leiter: DI Michael Paula

Liste sowie Bestellmöglichkeit aller Berichte dieser Reihe unter <http://www.nachhaltigwirtschaften.at>  
oder unter:

Projektfabrik Waldhör  
Nedergasse 23, 1190 Wien  
Email: [versand@projektfabrik.at](mailto:versand@projektfabrik.at)

# Ganzheitliches Vorgehensmodell bei der Gestaltung von Hochgeschwindigkeits- Bearbeitungs-Prozessen

unter Berücksichtigung von Aspekten  
des ArbeitnehmerInnen- und Umweltschutzes

Projektleiter:

DI Dr. Ewald Wahlmüller  
PROFACTOR

Projektpartner:

Burkhard Reiß,  
DI (Fh) Josef Reischl  
PROFACTOR

Roland Hackl  
PIESSLINGER

Steyr, Juni 2002

**Ein Projektbericht im Rahmen der Programmlinie**



Impulsprogramm Nachhaltig Wirtschaften

Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie



## Vorwort

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus der Programmlinie FABRIK DER ZUKUNFT. Sie wurde im Jahr 2000 vom Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie im Rahmen des Impulsprogramms Nachhaltig Wirtschaften als mehrjährige Forschungs- und Technologieinitiative gestartet. Mit der Programmlinie FABRIK DER ZUKUNFT sollen durch Forschung und Technologieentwicklung innovative Technologiesprünge mit hohem Marktpotential initiiert und realisiert werden.

Dank des überdurchschnittlichen Engagements und der großen Kooperationsbereitschaft der beteiligten Forschungseinrichtungen und Betriebe konnten bereits richtungsweisende und auch international anerkannte Ergebnisse erzielt werden. Die Qualität der erarbeiteten Ergebnisse liegt über den hohen Erwartungen und ist eine gute Grundlage für erfolgreiche Umsetzungsstrategien. Anfragen bezüglich internationaler Kooperationen bestätigen die in FABRIK DER ZUKUNFT verfolgte Strategie.

Ein wichtiges Anliegen des Programms ist es, die Projektergebnisse – seien es Grundlagenarbeiten, Konzepte oder Technologieentwicklungen – erfolgreich umzusetzen und zu verbreiten. Dies soll nach Möglichkeit durch konkrete Demonstrationsprojekte unterstützt werden. Deshalb ist es auch ein spezielles Anliegen die aktuellen Ergebnisse der interessierten Fachöffentlichkeit zugänglich zu machen. Durch die Homepage [www.FABRIKderZukunft.at](http://www.FABRIKderZukunft.at) und die **Schriftenreihe "Nachhaltig Wirtschaften konkret"** soll dies gewährleistet werden.

Dipl. Ing. Michael Paula

Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie



# Inhaltsverzeichnis

<b>INHALTSVERZEICHNIS</b>	<b>3</b>
<b>KURZFASSUNG</b>	<b>5</b>
<b>SUMMARY</b>	<b>8</b>
<b>1. EINLEITUNG</b>	<b>9</b>
<b>2. METHODIK</b>	<b>11</b>
2.1. ERHEBUNG DES IST-ZUSTANDES BEI PISSLINGER.....	11
2.2. ENTWICKLUNG DES PROZESS-MODELLS .....	12
2.3. VORGEHENSMODELL ZUR OPTIMIERUNG DES PROZESSES.....	13
<b>3. ERGEBNISSE DES PROJEKTS UND SCHLUSSFOLGERUNGEN</b>	<b>14</b>
3.1. ENTWICKLUNG DES VORGEHENSMODELLS .....	14
3.1.1. EXPERTEN-WORKSHOP UND AUFNAHME DER DATEN .....	14
3.1.2. FRÄSVERSUCHE .....	16
3.1.2.1. Planung und Durchführung.....	16
3.1.2.2. Ergebnisse.....	18
3.1.3. AEROSOLMESSUNGEN .....	22
3.1.3.1. Planung + Durchführung .....	22
3.1.3.2. Ergebnisse.....	23
3.2. IMPLEMENTIERUNG UND PRAXISTEST.....	27
3.2.1. SCHLUSSFOLGERUNGEN AUS DEN LABOVERSUCHEN .....	27
3.2.2. MITARBEITERBEFRAGUNG .....	29
3.2.2.1. Gestaltung .....	29
3.2.2.1. Ergebnisse.....	30
3.2.3. MITARBEITER-WORKSHOP .....	30
3.2.4. DEFINITION DES REFERENZARBEITSPLATZES .....	30
3.2.5. ERGEBNIS DER IMPLEMENTIERUNG.....	31
<b>AUSBLICK</b>	<b>33</b>
<b>LITERATUR</b> .....	<b>33</b>
<b>VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN</b> .....	<b>34</b>
<b>VERÖFFENTLICHUNGEN UND PRÄSENTATIONEN:</b> .....	<b>34</b>



# Kurzfassung

## Motivation und Ziele

Hochgeschwindigkeitsbearbeitung bzw. High-Speed-Cutting (HSC) ist ein Zerspanungsverfahren, bei dem die Schnittgeschwindigkeit, aber auch der Vorschub um ein Vielfaches höher ist als bei konventioneller Zerspanung. Die Zerspanungskräfte reduzieren sich um bis zu 30%, höhere Werkzeugstandzeiten und Vorteile bei der Bearbeitung komplizierter, für Resonanzschwingungen gefährdete Bauteile, sind Motivation für den Einsatz der HSC-Technologie. Umweltrelevante Vorteile ergeben sich durch höhere erzielbare Oberflächenqualitäten, wodurch nachfolgende Bearbeitungsgänge oft entfallen können.

Der Einsatz von Kühlschmierstoffen (KSS) ist weit verbreitet und aus technologischen Gründen der Zerspanung und Umformung im Allgemeinen unverzichtbar. Erhebliche Anteile des eingesetzten KSS werden bei der Bearbeitung zerstäubt und infolge des Wärmeeintrages im Zerspanungsprozess verdampft und gelangen so in die Arbeitsluft und in die Umwelt. KSS sind in der Regel wegen ihrer komplexen Rezeptur als gefährliche Arbeitsstoffe einzustufen; im Oktober 2001 ist in Österreich erstmals eine maximale Arbeitsplatzkonzentration (MAK) für KSS-Nebel festgelegt worden<sup>1</sup>. Aus Gründen des Arbeitsschutzes sind aufwändige Investitionen und hohe laufende Kosten für die Luftfilterung und die Belüftung der Produktionshallen notwendig. Ein nachhaltiger Ansatz zur Lösung der Problematik kann nur die Verhinderung oder weitgehende Vermeidung der Bildung von KSS-Nebeln im Fertigungsprozess selbst sein. Eine in jüngerer Vergangenheit bereits vielfach erfolgreich eingesetzte Strategie ist die Minimalmengenkühschmierung (MMKS), die gegenüber der konventionellen Überflutungsschmierung den KSS-Bedarf soweit reduziert, dass der eingesetzte KSS fast vollständig verbraucht wird und die KSS-Rückführung, seine aufwändige Reinigung sowie die Konservierung gegen mikrobiellen Befall bei langem Gebrauch entfällt. Die HSC Technologie ist besonders für den Einsatz von MMKS geeignet, da die beim Zerspanungsprozess entstehende

---

<sup>1</sup> Grenzwert-VO BGBl. II 253/2001

Wärme fast völlig mit dem Span abgeführt wird. Der Kühlbedarf an Werkstück und Werkzeug wird reduziert, weshalb geringere Mengen KSS erforderlich sind.

Beide Technologien, Hochgeschwindigkeitszerspanung und Minimalmengenkühlschmierung, stehen noch am Beginn ihrer Einführung in die industrielle Praxis. Hemmend für den breiten Einsatz dieser Technologien wirken der allgemeine Mangel an Erfahrung und Schwierigkeiten, die mit Besonderheiten der Technologie in Verbindung stehen. Aufgrund mangelnder Erfahrung müssen bis jetzt Bearbeitungsstrategien für jeden einzelnen zu fertigenden Bauteil experimentell gestützt erarbeitet werden.

In diesem Projekt wurde eine systematische Vorgehensweise zur Gestaltung und Optimierung von HSC-Prozessen für die Metallzerspanung aus ganzheitlicher Sicht entwickelt. Vor allem Aspekte des ArbeitnehmerInnen- und Umweltschutzes wurden neben den klassischen Faktoren Fertigungszeit, -qualität und -kosten in die Zielgrößenspezifikation des Prozessmodells berücksichtigt. Der Prozess wurde daher nicht als rein technologisches System betrachtet, sondern im besonderen Maße als Arbeitsplatz, an dem der/die MitarbeiterIn sicher, unter langfristiger Erhaltung und Stärkung der Arbeitsfähigkeit und -zufriedenheit und nicht zuletzt der Motivation tätig ist.

Ziel war es, exemplarisch die Vorgehensweise für die Gestaltung und Optimierung von HSC-Prozessen aufzuzeigen: Einerseits sollten Versuchs- und Testphasen möglichst keinen störenden Einfluss auf die laufende Produktion zeigen, andererseits wurden sämtliche relevanten Akteure im Betrieb in die Zielsetzung, Planung und Gestaltung der Prozess- und Arbeitsplatzoptimierung einbezogen und deren Erfahrungen und Ressourcen genutzt.

Die Prozessoptimierung wurde anhand eines konkreten Aluminium-Bauteiles, der bei der Firma Piesslinger bereits seit längerer Zeit erfolgreich mit HSC-Technologie und MMKS gefertigt wird, durchgeführt.

## **Ergebnisse**

Nach der detaillierten Aufnahme der relevanten Prozessdaten bei Piesslinger wurde das Prozessmodell entwickelt, das die Grundlage für die Vorgehensweise bei der Optimierung darstellte.

Für die technologische Optimierung wurden im Zerspanungslabor von Profactor Versuche hinsichtlich KSS-Einsatz, Kühlschmiersystem, Werkzeugtyp und Schnittdaten durchgeführt. Es konnten geeignete Kombinationen aus Werkzeugbeschichtung und

KSS-System bei minimierten Kühlmittleinsatz und erhöhter Vorschubgeschwindigkeit gefunden werden. Wird Emulsion eingesetzt, kann eine faktorielle Verringerung des Kühlschmierstoff-Einsatzes erreicht werden.

Die Nebemissionen in die Arbeitsluft wurden mit Hilfe eines Kaskaden-Impaktors gemessen und die Abhängigkeit der Aerosolbildung vom Kühlschmiersystem und von der aufgetragenen KSS-Menge ermittelt.

Mit Hilfe von internen Workshops und einer ausführlichen Mitarbeiterbefragung wurden die Erfahrungen und Vorschläge der Mitarbeiter zur Prozessoptimierung einbezogen und ein Referenzarbeitsplatz definiert und implementiert. Zu den gesetzten Maßnahmen zählen neben der Umstellung auf MMKS mit Emulsion verbesserte ergonomische Bedingungen für die MitarbeiterInnen, sowie die Beseitigung von organisatorischen Schwachstellen. Die störungsfreie Zuführung der Emulsion konnte mit den erhältlichen Pumpen-Düsen Systemen bisher nicht befriedigend realisiert werden. Die Entwicklung von prozesssicheren Minimalmengenkühschmiersystemen unter Einsatz von Emulsion sollte der Inhalt zukünftiger Forschungsvorhaben sein.

## Summary

In the metal working industry high-speed-cutting (HSC) in combination with minimal quantity cooling-lubrication promises a high potential for saving process materials. On the one hand costs of purchase and disposal of metal working fluids (MWF) decrease, on the other hand the reduction of dermal diseases and emissions of MWF-dusts are expected. The utilisation of these technologies is not spread widely, because reliable machining data are not available yet. Therefore the development of a practicable procedure for process optimisation is useful.

The milling process of an aluminium workpiece was optimised regarding environmental and occupational safety and health aspects. With the means of laboratory tests the consumption of MWF was decreased by substitution with an emulsion and strict minimisation of quantity. The emission of aerosol was measured with a low-pressure impactor, who allows the classification of particle size in the range between 20 and one micrometer.

The results of the laboratory tests and of the employee-interviews were discussed in workshops and an optimised “workplace of best practice” was defined. Organisational and ergonomic improvements were established additionally.

Overall the results of the implementation were positive, but the MWF-supply does not work satisfying by using such small quantities of emulsion. Therefore the need of research in minimal cooling lubrication systems with the use of emulsion is necessary.

# 1. Einleitung

In diesem Projekt wurde eine systematische Vorgehensweise zur Gestaltung und Optimierung von Hochgeschwindigkeitsbearbeitungsprozessen (HSC) für die Metallzerspannung aus ganzheitlicher Sicht entwickelt. Vor allem Aspekte des ArbeitnehmerInnen- und Umweltschutzes wurden neben den klassischen Faktoren Fertigungszeit, -qualität und -kosten in die Zielgrößenspezifikation des ebenfalls entwickelten Prozessmodells aufgenommen.

Hochgeschwindigkeitsbearbeitung bzw. High-Speed-Cutting (HSC) ist ein Zerspanungsverfahren bei dem die Schnittgeschwindigkeit, aber auch der Vorschub um ein Vielfaches höher ist, als bei konventioneller Zerspanung. Aufgrund der hohen Schnittgeschwindigkeiten reduzieren sich die Zerspanungskräfte bei HSC Bearbeitung um bis zu 30%. Neben höheren Werkzeugstandzeiten ergeben sich Vorteile bei der Bearbeitung komplizierter, für die Ausbildung von Resonanzschwingungen anfällige Bauteile. Umweltrelevante Vorteile der HSC-Bearbeitung ergeben sich dadurch, dass mit der Technologie höherwertige Oberflächequalitäten erreichbar sind, wodurch nachfolgende Bearbeitungsgänge in vielen Fällen entfallen können. Mit HSC Fräsen kann nahezu Schleifqualität erzielt werden.

Hemmend für die rasche Verbreitung dieser zukunftssträchtigen und umweltfreundlichen Technologie wirken der allgemeine Mangel an Erfahrung und Schwierigkeiten, die mit Besonderheiten der Technologie (bspw. fehlen teilweise HSC geeignete Werkzeuge) in Verbindung stehen. Bis jetzt müssen Bearbeitungsstrategien für jeden einzelnen zu fertigenden Bauteil experimentell ermittelt werden. Hauptsächlich fehlen aber Vorgehensweisen und Prozessmodelle, welche die vorhandene experimentelle Erfahrung systematisch nutzen, um eine zuverlässige, weitgehend theoretische Vorauslegung des Bearbeitungsprozesses zu ermöglichen

Wie in der konventionellen Fertigungstechnik ist auch bei der HSC-Zerspanung der Einsatz von Kühlschmierstoffen (KSS) in den meisten Fällen unverzichtbar. Zu den Hauptaufgaben des KSS zählen allgemein das Kühlen und die Schmierung. KSS gelten aufgrund ihrer chemischen Zusammensetzung i. d. R. als gefährliche Arbeitsstoffe. Die Risiken des KSS Einsatzes betreffen exponierte MitarbeiterInnen, Maschinen und Anlagen sowie die Umwelt. Ein häufig auftretendes Problem der Praxis ist beispielsweise,

dass ein Wechsel zu einem anderen Produkt, der auf technologische Vorteile, reduzierte Kosten oder verbesserte Umweltverträglichkeit abzielt, wegen auftretenden Hautunverträglichkeiten bei den Mitarbeitern scheitern kann. Besonders kritisch dabei ist, dass Hautunverträglichkeiten bei einzelnen MitarbeiterInnen meist erst nach erfolgter Einführung des neuen KSS im Produktionsprozess erkannt werden. In diesem Fall ist daher die frühzeitige Einbindung des Arbeitsmediziners, der Sicherheitsfachkräfte und der betroffenen Mitarbeiter in den Entscheidungsprozess anzustreben.

Die sich aus dem KSS-Einsatz ergebenden Risiken für Mensch und Umwelt aber auch die erheblichen Kosten verstärken die Bestrebungen, die Metallbearbeitung auf Minimalmengenkühlschmierung oder Trockenbearbeitung umzustellen. Die Vorteile dieser neuen Konzepte liegen darin, dass neben der Reduktion bzw. dem völligen Entfall der Entsorgungskosten für gebrauchten KSS die Metallspäne wegen ihren geringeren Verschmutzungsgrad auf höherem Niveau recycelt werden können. Bisher ist es allerdings aufgrund der Komplexität der Problematik nur in Einzelfällen gelungen, konventionelle Metallbearbeitungsprozesse erfolgreich auf Minimalmengenschmierung oder Trockenbearbeitung umzustellen.

Die HSC-Technologie ist besonders für den Einsatz neuer Kühlschmierstrategien wie MMKS und Trockenbearbeitung geeignet, da hier die beim Zerspanungsprozess entstehende Wärme fast völlig mit dem Span abgeführt wird. Der Kühlbedarf an Werkstück und Werkzeug wird somit reduziert, weshalb geringere Mengen an Kühlschmierstoff ausreichend sind. Da in vielen Fällen der Minimalmengenschmierung nach der Bearbeitung sowohl Werkstück als auch Werkstoff praktisch trocken sind, muss der eingesetzte Kühlschmierstoff in Form von Aerosolen und Dämpfen in die Arbeitsluft gelangt sein. Bisher nicht untersucht und daher weitgehend unbekannt ist, welche Auswirkungen der Einsatz der Minimalmengenkühlschmierung auf die Konzentration und die Eigenschaften der entstehenden KSS Aerosol- und Dampfemissionen (Aerosol-/Dampf-Massenverhältnis, Feinheit des Aerosolspektrums, etc.) hat. Da die in das System eingebrachte Zerspanungsenergie hauptsächlich als Wärme vom KSS aufgenommen wird, kann vermutet werden, dass sich bei Einsatz von Minimalmengenkühlschmierung der Anteil feinsten Aerosole, die durch Verbrennungs- und Kondensationsprozesse entstehen, erhöht.

## 2. Methodik

Grundlage für die Entwicklung des Vorgehensmodells zur optimalen Gestaltung von HSC-Bearbeitungsprozessen ist die Erstellung eines geeigneten Prozessmodells, das im Sinne der ganzheitlichen Betrachtung alle wesentlichen Inputgrößen erfasst und in die von allen Beteiligten definierten Zielgrößen unter Beachtung der Systemeigenschaften überführt. Im Sinne des systemischen Ansatzes sind jedoch sowohl die Zielgrößen als auch die Eingangsgrößen kontinuierlich zu überprüfen und den jeweiligen Gegebenheiten oder geänderten Randbedingungen anzupassen.

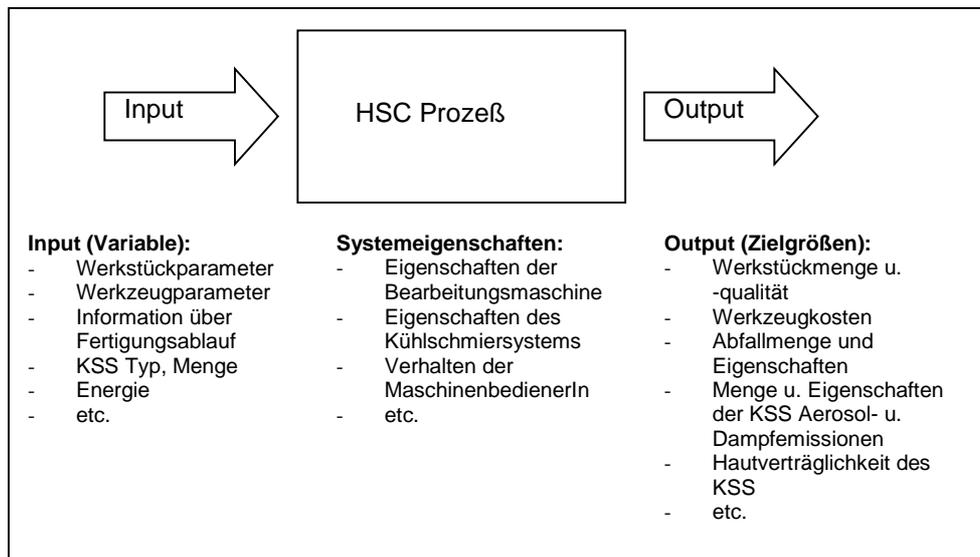


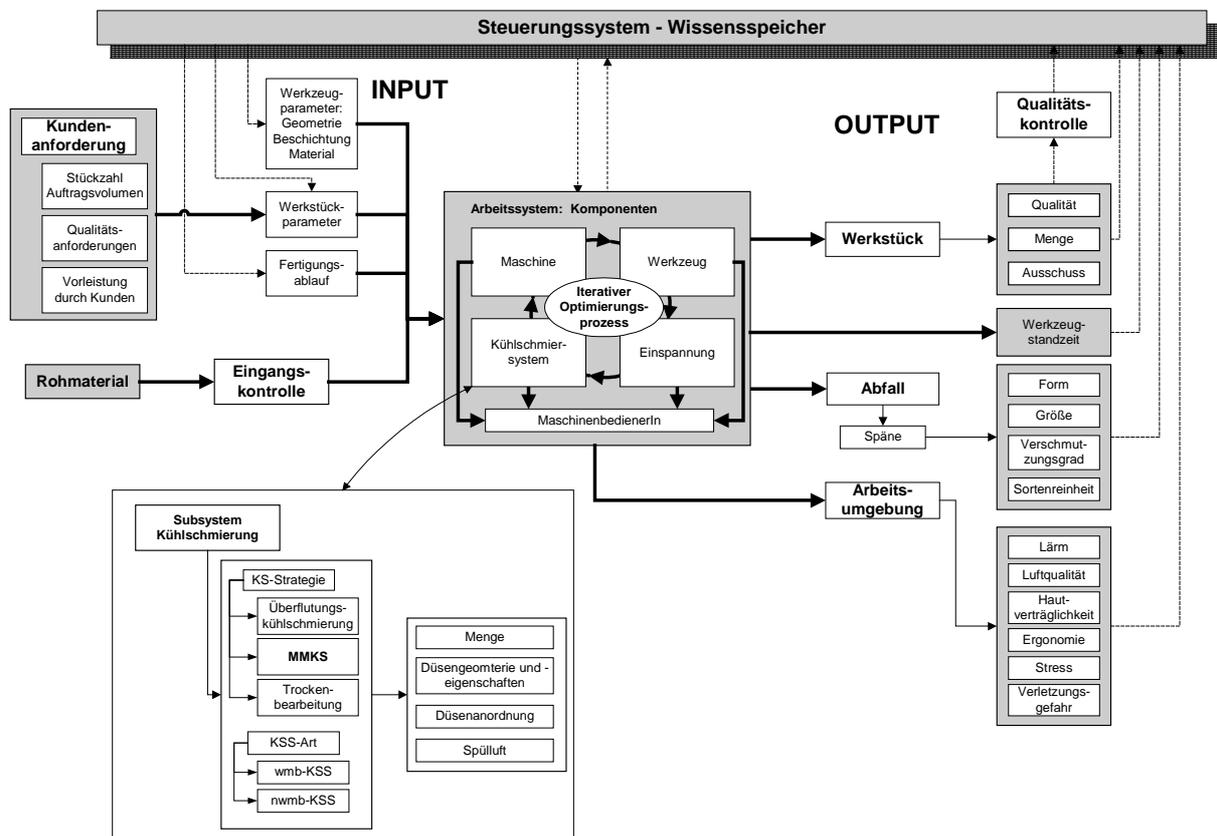
Abbildung 1: Modell des HSC-Bearbeitungsprozesses

### 2.1. Erhebung des IST-Zustandes bei Piesslinger

Der erste Schritt für die Erstellung des Prozessmodells ist die genaue Erhebung und Auswertung aller prozessrelevanten Daten, Informationsflüsse und Systemeigenschaften. Dabei müssen, um zielgerichtet die erwünschten und vorab definierten Aspekte der Optimierung erreichen zu können, die Systemgrenzen definiert werden und eine Fokussierung auf die wesentlichen Fragestellungen vorgenommen werden. So wurden zum Beispiel die der Hochgeschwindigkeits-Fräsbearbeitung vor- und nachgelagerten Bearbeitungsgänge nicht in die Betrachtung einbezogen.

## 2.2. Entwicklung des Prozess-Modells

In Anlehnung an das Modell zur lenkungsorientierten Systemmethodik nach Gomez wurden die Probleme für das vorliegende sozio-technische System ermittelt, klassifiziert und die Problemsituation strukturiert. „Probleme“ in systemischen Zusammenhang sind das Resultat von Veränderungen im Verhalten des betrachteten Systems und der für die Problemlösung relevanten Größen zwischen dem tatsächlichen Verhalten und dem sogenannten Normalverhalten. Das zu definierende Normalverhalten ist aber von den Akteuren zu definieren und unterliegt selbst Veränderungen und Adaptierungen. Die das Problem konstituierende Diskrepanz zwischen Normalverhalten und tatsächlichem Verhalten des Systems entsteht entweder durch Veränderung des tatsächlichen Verhaltens oder das Normalverhalten wird neu umschrieben.



**Abbildung 2: Prozessschema als Basis für das Vorgehensmodell**

Im vorliegenden Fall handelt sich folglich um die Veränderung der Perspektive bei der Abbildung der Realität, da der betrachtete Beispiel-Prozess bereits vor Beginn des Projektes gut eingeführt war. Der Bearbeitungsprozess soll aus einer ganzheitlichen (fertigungstechnischer, wirtschaftlicher, umweltgerechter und arbeitsmedizinischer) Sicht behandelt werden. Dadurch können neue Prozesse schneller eingeführt und be-

stehende nachhaltig optimiert werden. Aber auch die Möglichkeit der Umstellung auf alternative Technologien und Verfahrensweisen und deren Auswirkung auf das Gesamtsystem und auf die Umgebung kann schneller und einfacher erkannt werden.

Die Ergebnisse aus der Erhebung wurden im Projektteam, das sich aus betrieblichen Experten und Kennern des Prozesses, sowie aus den Fachkräften von Profactor zusammensetzt, diskutiert und es konnte ein ideales und anzustrebendes Prozessmodell entwickelt werden. Dieses besitzt tendenziell abstrakten Charakter, dient aber dem Team und den Entscheidungsträgern als Orientierungshilfe bei der Gestaltung und Optimierung von Bearbeitungsprozessen, damit auch scheinbar unbedeutende Schwachpunkte und Störgrößen richtig in das Gesamtsystem eingeordnet werden können. Die möglichen Auswirkungen vorgeschlagener Problemlösungen lassen sich besser vorher-sagen und abschätzen.

In der betrieblichen Praxis kann immer wieder beobachtet werden, dass bereits gewonnene Erfahrungen in die Planung und Steuerung von Prozessen nicht oder nur ungenügend einfließen oder gleichartige Fehler oft zwei- oder mehrmals unterlaufen.

### **2.3. Vorgehensmodell zur Optimierung des Prozesses**

Die konkrete Umsetzung im Projekt wurde anhand des Beispielprozesses HSC-Fräsen eines Aluminiumteils durchgeführt. Die im Folgenden angeführten Schritte der Prozess-optimierung wurden gesetzt:

- Experten-Workshop zur Aufnahme der unterschiedlichen Erwartungen an das Projekt
- Planung und Durchführung der Fräsversuche – prozessorientierte Optimierung im Labor
- Planung und Durchführung der Aerosolmessungen
- Erstellung eines Fragebogens und Durchführung der Mitarbeiter-Befragung
- Mitarbeiter-Workshop: Präsentation der Versuchsergebnisse und Definition des Referenzarbeitsplatzes
- Implementierung der festgelegten Maßnahmen und Reporting
- Diskussion über die Erfahrungen der Implementierung in einem weiteren Workshop

- Festlegung des weiteren Handlungsbedarfs

Die gewählte Vorgehensweise soll Mitarbeiter und Entscheidungsträger im Unternehmen auch nach Abschluss des Projektes befähigen und dazu anhalten, die betrieblichen Prozesse kontinuierlich und im Sinne des Nachhaltigen Wirtschaftens zu analysieren und entsprechend zu tätigen zu werden.

### **3. Ergebnisse des Projekts und Schlussfolgerungen**

#### **3.1. Entwicklung des Vorgehensmodells**

##### **3.1.1. Experten-Workshop und Aufnahme der Daten**

Zu Beginn des Projektes wurde am 4. 9. 2001 bei der Partnerfirma Piesslinger ein Kick-Off Workshop durchgeführt, mit dem Ziel, die Erwartungen der beteiligten Projektpartner Piesslinger und PROFACTOR abzuklären und die Anforderungen an ein ganzheitliches Vorgehensmodell zur Gestaltung und Optimierung von HSC-Bearbeitungsprozessen zu identifizieren. Die Teilnehmer am Workshop wurden so ausgewählt, dass die wesentlichen betriebsinternen Funktionen der Produktion bei Piesslinger abgedeckt wurden. Insgesamt nahmen 11 Personen am Workshop teil und zwar von Seiten

- Piesslinger: der Spartenleiter Metallwaren, der Projektverantwortliche, ein NC-Techniker (Schichtführer), der Leiter des technischen Dienstes und Sicherheitsfachkraft, der Betriebsratsobmann der Arbeiter sowie der betreuende Arbeitsmediziner

und von Seiten

- PROFACTOR: Herr Dr. Wahlmüller (Projektleiter), DI(FH) Weigl und DI(FH) Obermair (beide HSC-Technologie), Herr Riß (Umweltschutz und Arbeitssicherheit) sowie Herr Guhsl (Systemtechnik).

Nach der Vorstellung der Programmlinie ‚Fabrik der Zukunft‘ des bmvit und des Projekts wurden die Erwartungen und die Erfolgskriterien, die sich aus der Verantwortlichkeit und dem Erfahrungshorizont der einzelnen Personen ergeben, formuliert und diskutiert.

Die wichtigsten Erfolgskriterien für die Firma Piesslinger sind unter anderem die Verbesserung der Arbeitsbedingungen in bezug auf Raumluft und -klima, Lärm und Ergonomie, die Wertsteigerung von Reststoffen wie Aluminium-Späne, die Einsparung von

Einsatzstoffen wie Kühlschmierstoffe im Hinblick auf effektiven Ressourceneinsatz und Verbesserung der Luftqualität in der Produktionshalle, Erhöhung von Produktqualität und Produktivität und nicht zuletzt der Imagegewinn des Unternehmens durch Einsatz umweltschonender Technologien und durch Aspekte der Nachhaltigkeit. Die gesteigerte Mitarbeiterbindung an das Unternehmen, höhere Mitarbeiterzufriedenheit und Verringerung der Fluktuation sind zusätzlich Motivation für die Teilnahme am Projekt und prioritäre Ziele der Unternehmensführung.

Konkretes Erfolgskriterium für PROFACTOR ist die Überführung von bisher im Zerspannungslabor gewonnenen Erfahrungen bei HSC-Prozessen in eine Systematik, um Technologieparameter für reproduzierbare Prozessergebnisse zu gewinnen. Diese Systematik zur Gestaltung von HSC-Prozessen und die Überprüfung ihrer Anwendbarkeit anhand eines konkreten Bauteils werden als besonders wichtig für die weitere Verbreitung der HSC-Technologie angesehen. Wissenschaftliche Erkenntnisse im Bereich der Minimalmengenschmierung und ihre Auswirkung auf die Höhe der KSS Emissionen sowie auf die Feinheit des Aerosolspektrums werden erwartet.

Übergeordneter wirtschaftlicher und gesellschaftlicher Nutzen des Projekts ist die Anwendbarkeit und die Übertragbarkeit des Vorgehensmodells auf vergleichbare Prozesse, um die weitere Verbreitung der Zukunftstechnologie HSC zu unterstützen.

In Arbeitsgruppen wurden anschließend die Praxisanforderungen an das Vorgehensmodell entwickelt und die Zielgrößen bzw. die darauf wirkenden Einflussgrößen diskutiert. Als vordringlich wurde die einfache Praktikabilität des Vorgehensmodells in der betrieblichen Praxis erachtet, um die Übersichtlichkeit und Transparenz von Entscheidungen für alle Beteiligten zu erhöhen. Problematisch wurde eingeschätzt, dass einerseits relevante Daten meist nur lückenhaft vorhanden oder schlecht zuordenbar sind, andererseits das prozessbezogene Wissen der Mitarbeiter nur ungenügend dokumentiert wird. Entscheidungshilfen für die Auswahl von Komponenten und Referenzwerte für Einstellgrößen, Wenn-Dann-Checklisten bei der Implementierung oder Optimierung von bereits laufenden Prozessen sollen Elemente des Vorgehensmodells sein. Maßnahmen, die gesetzt werden müssen, damit den Anforderungen entsprochen werden kann, sind die Aufnahme des status quo zu Projektbeginn zur Dokumentation und Nachvollziehbarkeit der daraus resultierenden Veränderungen und die Einbindung des Maschinenpersonals in die Umsetzung. Die wichtigsten Zielgrößen sind die Stückzahl, die Ausschusshäufigkeit, die Luftqualität im Arbeitsbereich (KSS-Konzentration in der Luft),

Intensität des Hautkontaktes und Häufigkeit von Hautirritationen, der Wert der Reststoffe und die Zufriedenheit der Mitarbeiter.

Abschließend wurde die Notwendigkeit zur Durchführung einer Mitarbeiterbefragung betont, um einerseits die Zufriedenheit mit den Arbeitsbedingungen vor und nach der Implementierung von Änderungen und andererseits um das Erfahrungswissen der Maschinenführer nutzbar zu machen.

Von Seiten Piesslinger wurden im Anschluss die zuvor als relevant eingeschätzten Ziel- und Einflussgrößen aufgenommen und dokumentiert. Interview-ähnliche Gespräche über die bestehende Vorgehensweise bei der Durchführung von Prozesseinführungen und Optimierungen sowohl bei Piesslinger als auch im Zerspanungslabor von PROFACTOR wurden geführt. Die Erfahrungen bei Piesslinger als produzierender Betrieb spiegeln in erster Linie die Anforderungen an eine störungsfreie Produktion unter Einhaltung von Qualitäts- und Produktivitätsanforderungen wider. Bei den Aktivitäten von PROFACTOR als Forschungsinstitut standen in erster Linie Datengenerierung und -sammlung, Verallgemeinerungen und Wissensgenerierung im Vordergrund des handlungsbestimmenden Interesses.

Zur Feststellung der Nebemissionen wurde von der TU-Wien die Emission von Kühlschmierstoff-Nebel im Abluftstrom des Maschinenraums mittels Kaskaden-Impaktor gemessen, um in einem Vorher-Nachher-Vergleich die Wirksamkeit von getroffenen Maßnahmen überprüfen zu können.

Der betreuende Arbeitsmediziner vom AMD-Linz erhob den Status der Hautsituation der betroffenen MitarbeiterInnen, um die möglichen Auswirkungen von KSS-Wechsel feststellen zu können.

### **3.1.2. Fräsversuche**

Ziel der Fräsversuche im Zerspanungslabor von PROFACTOR ist die technologische Optimierung des HSC-Prozesses mit besonderer Berücksichtigung des KSS-Verbrauchs.

#### *3.1.2.1. Planung und Durchführung*

Bei der Planung der Laborversuche wurde darauf geachtet, dass der Versuchsaufwand möglichst gering gehalten wird, ohne die Aussagekraft der Ergebnisse zu schwächen. Dabei wurde das Erfahrungswissen sowohl aus der Produktion der Firma Piesslinger

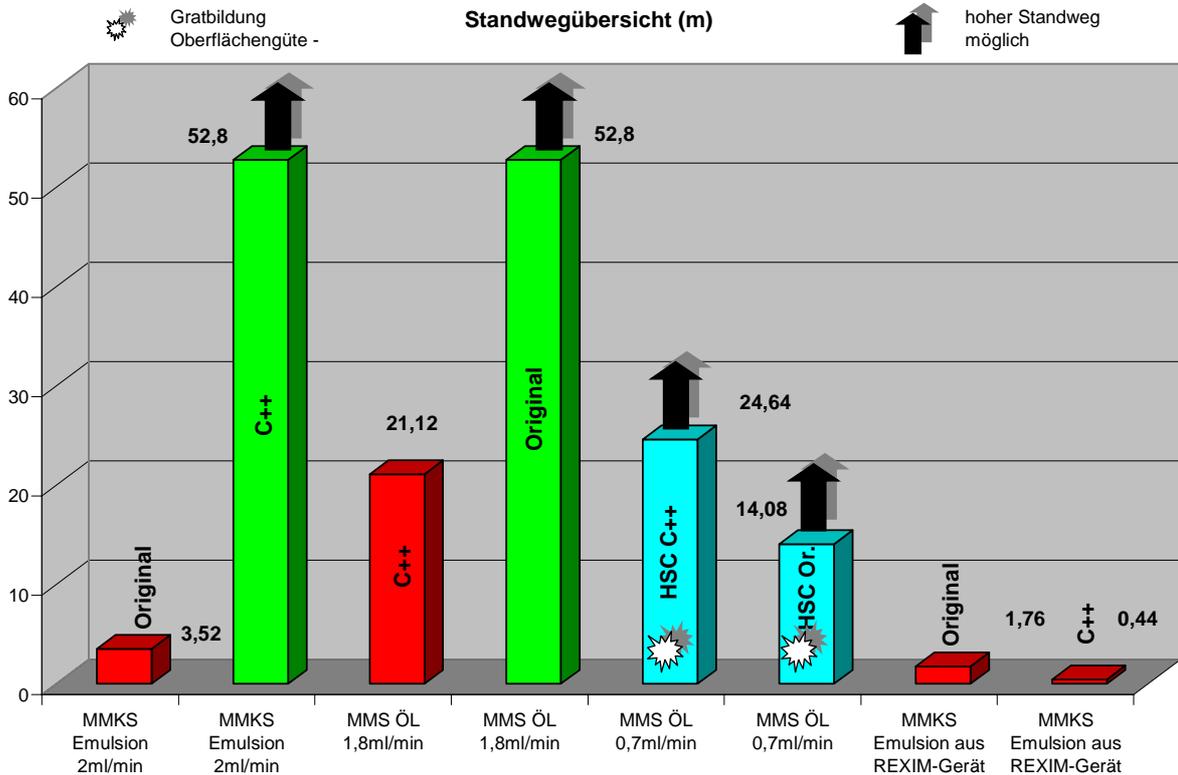
als auch aus dem mechanischen Labor bei PROFACTOR berücksichtigt. Als Referenzwerkstück wurde ein Aluminium-Dekorteil für eine Kaffeemaschine gewählt, der bereits seit längerer Zeit bei Piesslinger in großen Stückzahlen gefertigt wird. Um den Materialaufwand für die Fräsversuche gering zu halten, wurden pro Werkstück mehrere geometrisch ähnliche Schnittkurven programmiert, die Schnittbedingungen blieben dabei jedoch erhalten.

Variiert wurden die folgenden Parameter:

- Werkzeug und Werkzeugbeschichtung
- Kühlschmier-Strategie:   Minimalmengenschmierung (MMS) mit Öl  
  Minimalmengen Kühlschmierung (MMKS) mit Emulsion  
  Trockenbearbeitung mit Druckluftzufuhr
- Zugeführte KSS-Menge
- Änderung der Fräsfolge im Maschinenprogramm
- Drehzahl
- Vorschub

Insgesamt wurden 31 verschiedene Einstellungen getestet.

### 3.1.2.2. Ergebnisse



**Abbildung 3: Auswahl einiger Werkzeug-Standwege mit verschiedenen Einstellparametern**

Abbildung 3 zeigt die Standwege (m) für jene beiden Werkzeuge „Schafffräser Beschichtung Original“ und „Schafffräser Beschichtung C++“, deren Beschichtung als einzige befriedigende Standzeiten erwarten ließen. Auf der X-Achse ist die jeweilige (Kühl)Schmiermittelart und der aufgebrauchte Mengenstrom dargestellt. Die mit HSC gekennzeichneten Ergebnisse entstanden aus Fräsversuchen mit der CNC-Programmvariante HSC, alle anderen Fräsversuche wurden mit dem Originalprogramm durchgeführt.

Die höchsten Standwege lassen sich mit der Beschichtung C++ unter Einsatz von Minimalmengenkühlschmierung mit Emulsion (ca. 2ml/min) und mit der Beschichtung Original unter Einsatz von Minimalmengenschmierung mit Öl (ca. 1,8ml/min) erzielen.

Beim Einsatz von Minimalmengenschmierung (ca. 0,7ml/min) und der CNC-Programmvariante HSC lassen sich auch hohe Standwege erzielen. Bei dieser Variante zeigte sich jedoch eine nicht den Anforderungen entsprechende Qualität der bearbeiteten Flächen. Gründe dafür ist der in zwei Ebenen unterteilte Schnitt in Zusammenhang mit der

relativen Instabilität des Werkstücks und die notwendigen, mindestens doppelt so hohen, Vorschubwerte.

Mit der Beschichtung Original unter Einsatz von Minimalmengenkühlschmierung mit Emulsion (ca. 2ml/min) und der Beschichtung C++ unter Einsatz von Minimalmengen-schmierung mit Öl (ca. 1,8ml/min) ergeben sich geringe Werkzeugstandwege.

Beim Einsatz von Emulsion aus dem ACCU-LUBE Dosiergerät (Einstellung ca. 70 Hübe/min) zeigen beide Werkzeugbeschichtungen sehr geringe Werkzeugstandwege.

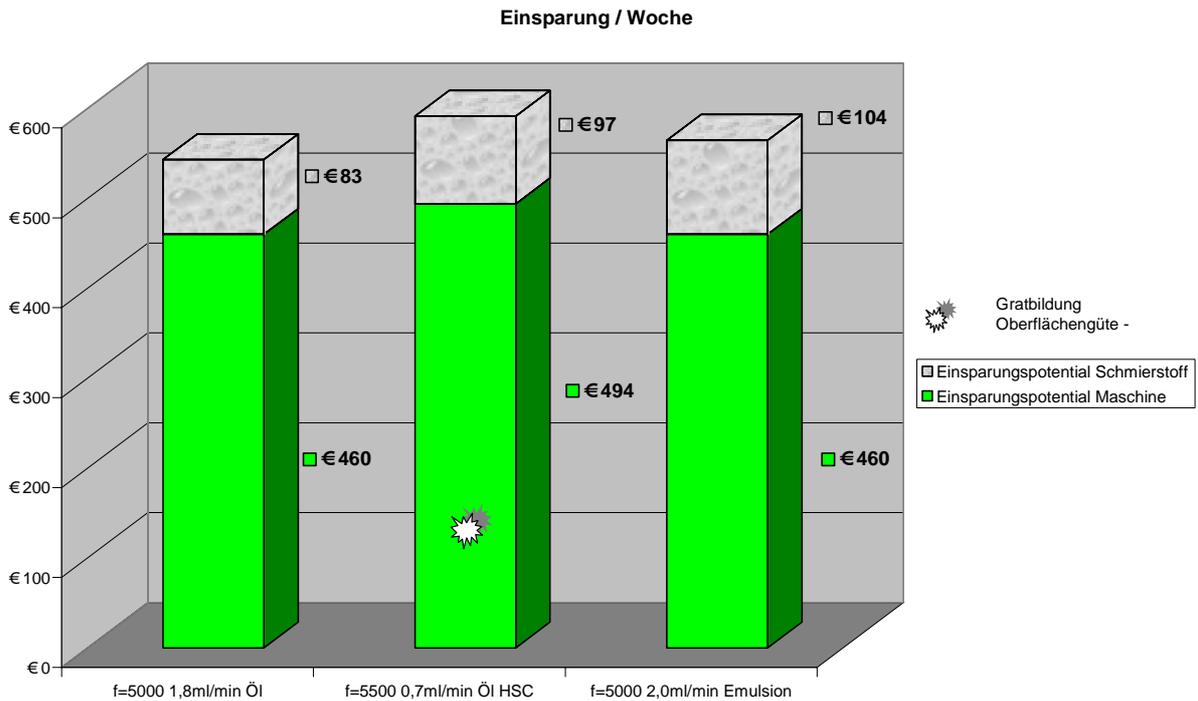
Der möglichst effiziente Einsatz von KSS ist ein wichtiger Schritt zu einer umweltfreundlichen und zugleich wirtschaftlichen Fertigung. Eines der wichtigsten Projektziele war die Ermittlung der für die Serienproduktion notwendigen minimalen (Kühl-)Schmierstoffmenge. Diese hat auf die Umgebungsbedingungen im Fertigungsbereich und die Belastung der Mitarbeiter wesentliche Auswirkungen.

Bisher wurde bei der Bearbeitung des Beispielteils ca. 1 Liter Schmierstoff (Öl ACCU-LUBE LB-10000) pro Schicht (reine Bearbeitungszeit ca. 152 Minuten) verbraucht. Dies entspricht einem Schmierstoffverbrauch von ca. 6,6 ml/min.

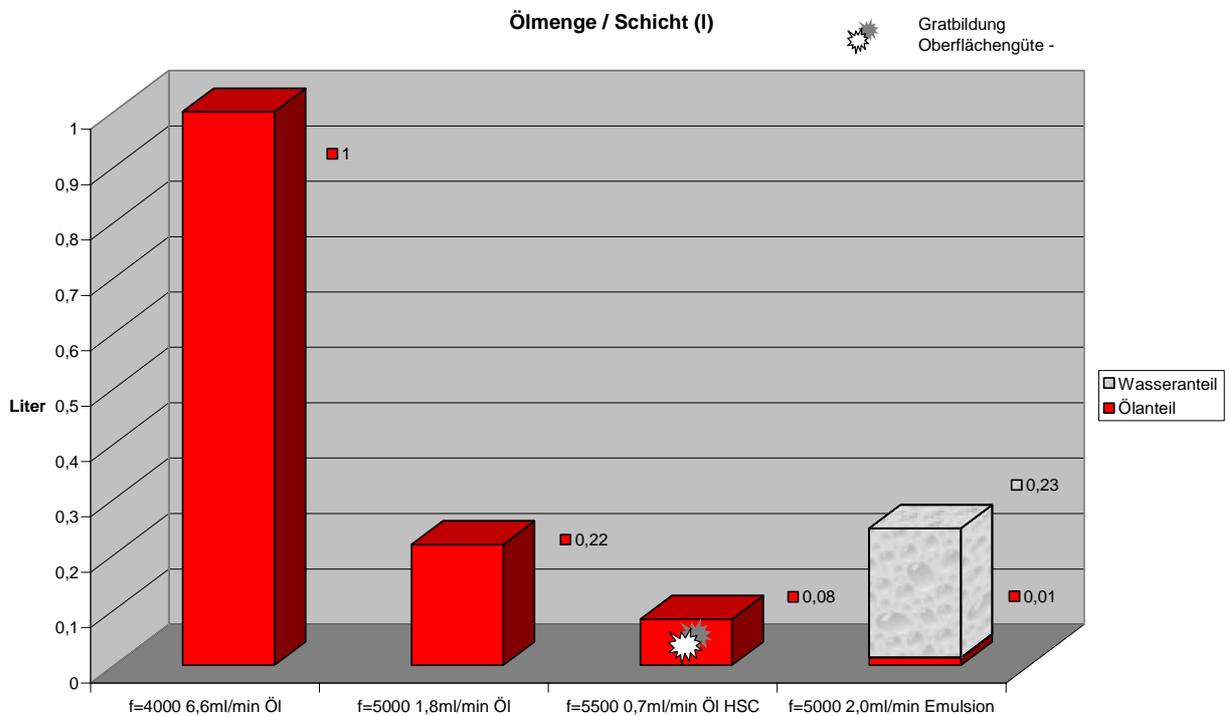
- Der (Kühl-)Schmierstoffverbrauch konnte durch Änderung bzw. richtiger Auswahl folgender Parameter um ca. 75% verringert werden:
- Werkzeugbeschichtung
- korrekte Einstellung der Sprühdüsen
- Vorschubwert (von  $f = 4000$  mm/min auf  $f = 5000$  mm/min erhöht)
- Art des (Kühl-)Schmierstoffs

Beim Einsatz einer Minimalmengenkühlschmierung mit Emulsion sind aufgrund der niedrigen Schmierstoffkonzentration (6% Öl, 94% Wasser) die geringsten Auswirkungen auf die Umgebung zu erwarten. Zusätzlich wirkt sich der Einsatz der Minimalmengen-kühlschmierung mit Emulsion positiv auf das Ergebnis des Fertigungsprozesses selbst aus.

Durch die Optimierung der Schnittparameter (Erhöhung des Vorschubes von 4000 auf 5000 bzw. 5500 mm/s) und die Verringerung der (Kühl-) Schmierstoffmenge ergeben sich folgende Einsparungspotenziale (Abbildung 4):



**Abbildung 4: Einsparungspotenzial an KSS- und Maschinen-Kosten nach der Prozessoptimierung**

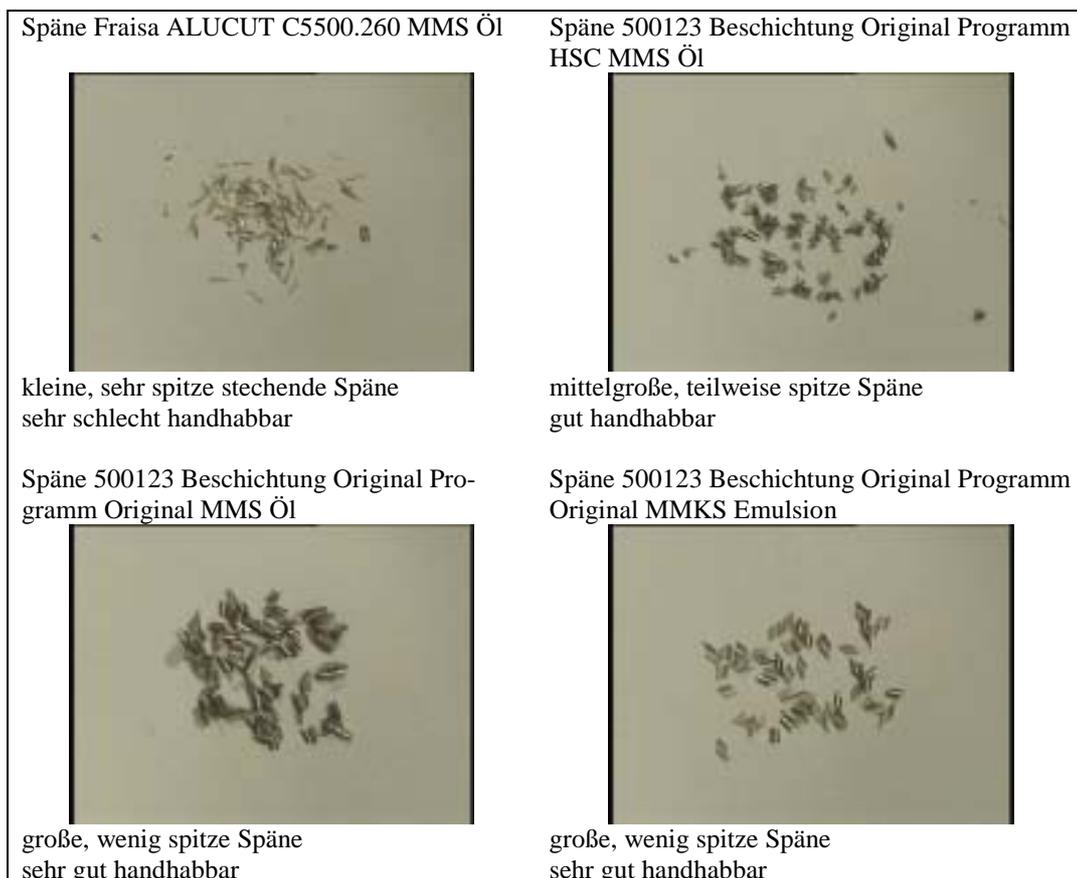


**Abbildung 5: KSS-Verbrauch derzeit und nach der Optimierung**

Abbildung 5 zeigt den KSS-Bedarf pro Schicht bei Verbrauchsreduktion und bei Wechsel von Öl auf die 6%-ige Öl-in-Wasser Emulsion.

Der am Reststoffmarkt erzielbare Preis für Aluminium-Abfall ist stark vom Verschmutzungsgrad abhängig. Die eingebrachte KSS-Menge beeinflusst daher unmittelbar die Qualität des Reststoffes Aluminium. Wird anstelle von Minimalmengenschmierung mit Öl auf Minimalmengen Kühlschmierung mit Emulsion umgestellt sinkt die Verunreinigung der Späne weiter stark ab, weil ein großer Teil des Wassers während bzw. nach der Fräsbearbeitung verdunstet.

Für die Handhabbarkeit der Späne ist deren Form ein wichtiges Merkmal. Zu scharfkantige, spitze oder zu kleine Späne können die Haut mechanisch verletzen und wirken sich negativ auf die Mitarbeiterzufriedenheit aus. Deshalb wurden bei den Fräsversuchen die Späne qualitativ bewertet:

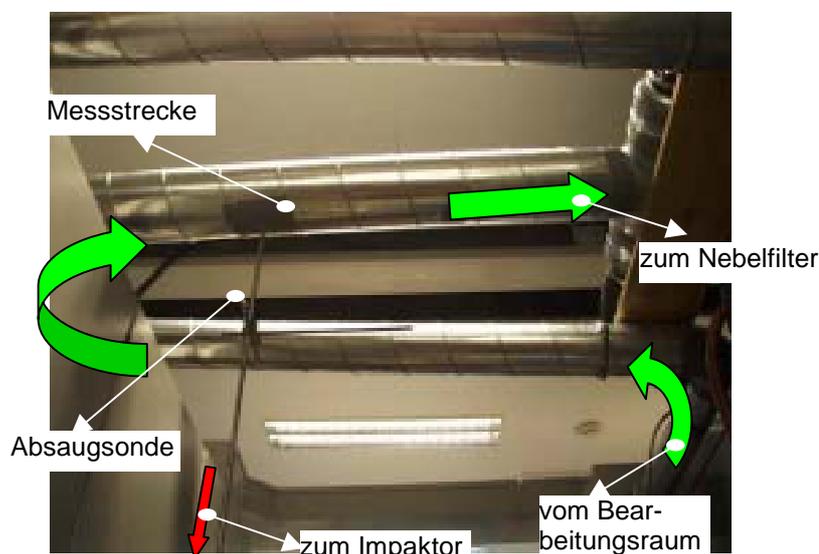


**Abbildung 6: Form und Handhabbarkeit der Späne**

### 3.1.3. Aerosolmessungen

#### 3.1.3.1. Planung + Durchführung

Die Aerosolmessungen sollen Auskunft darüber erteilen, inwieweit die Bildung von Aerosolen beim Zerspanungsvorgang von der gewählten Kühlschmier-Strategie und der aufgetragenen Menge abhängt. Als messbare Größen wurden die Aerosolgesamtkonzentration und die Partikelgrößenverteilung im toxikologisch relevanten Durchmesserbereich zwischen 20 µm und unter 1 µm gewählt. Für derartige Messaufgaben eignet sich der Niederdruck-Kaskadenimpaktor (Low-pressure Impactor), da er einerseits wegen der gravimetrischen Auswertung der einzelnen Fraktionen keine spezielle Kalibrierung benötigt, wie sie bei photometrischen Systemen notwendig sind, und andererseits für die einzelnen Partikelfraktionen scharfe Trennkurven („cut-off“) aufweist. Die Messungen wurden gemeinsam mit dem Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und technische Biowissenschaften der TU-Wien durchgeführt. Messort war eine speziell angefertigte gerade Messstrecke im Absaugbereich des Bearbeitungsraumes vor dem installierten Nebelfilter (Abbildung 7). Die Messungen wurden in Anlehnung an die VDI 2066 „Staubmessung in strömenden Gasen“ Blatt 1 „Übersicht“ und Blatt 5 „Fraktionierte Staubmessung nach dem Impaktorverfahren“ durchgeführt.



**Abbildung 7: Messstrecke und Probennahmesonde gemäß VDI 2066**

Um auf den Abscheidefolien des Impaktors die für die gravimetrische Auswertung ausreichende Substanzmenge zu erhalten (Abbildung 8 rechts), wurde die Probenahmezeit auf drei Stunden pro Versuch festgelegt.

Für die Zerspanung wurden quaderförmige Aluminium-Blöcke, die die gleiche Legierung wie der betrachtete Bauteil aufweisen, eingesetzt, und somit über die Versuchsdauer gleichmäßige Bedingungen ohne Werkstückwechsel herrschen. Drei verschiedene Kühlschmiersysteme (Konventionelle Überflutung mit Emulsion, Minimalmengenschmierung mit Emulsion und Minimalmengenschmierung mit Öl) wurden betrachtet und für die beiden Minimalmengensysteme die aufgebrauchte KSS-Menge variiert. Um den Einfluss der KSS-Aufbringung (Düseneigenschaft, Luftdruck) einschätzen zu können, wurden auch Versuche ohne Zerspanung und rotierendem Werkzeug durchgeführt. Zusätzlich wurde die Hintergrundbelastung der Luft im Raum ermittelt.



**Abbildung 8: Zerlegter Kaskadenimpaktor (links) und zwei Folien mit abgeschiedenen KSS (rechts)**

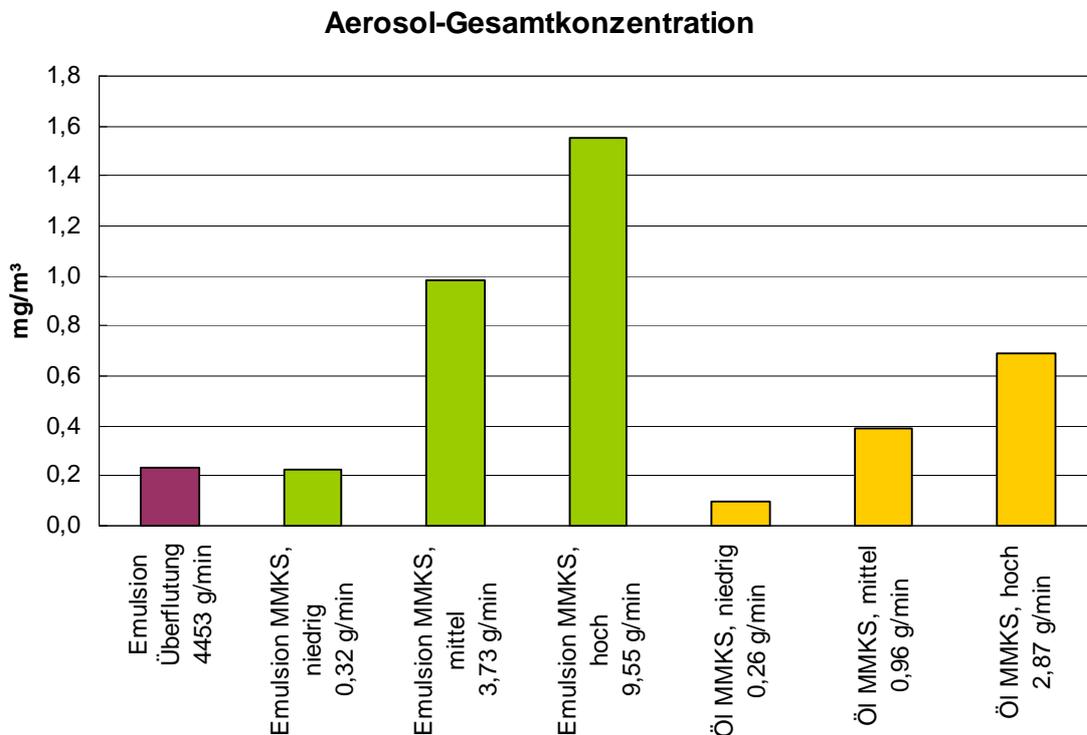
Bei den Versuchen mit Emulsionsanwendung wurde im Abstrom des Impaktors die KSS-Dampfphase an Adsorptionsharz gebunden und gemäß dem Messverfahren der Bundesanstalt für Arbeitssicherheit St. Augustin BIA 3110 mit FTIR-Spektroskopie quantitativ ausgewertet.

### 3.1.3.2. Ergebnisse

#### **(a) Gesamtkonzentration**

Aus den Messungen mit dem Kaskadenimpaktor an der Fräsmaschine bei PROFAC-TOR ist für beide Minimalmengen-Kühlschmiersysteme (Öl und Emulsion) ein klarer

Zusammenhang zwischen eingebrachter KSS-Menge und Aerosol-Konzentration im Abstrom der Werkzeugmaschine erkennbar (Abbildung 9).



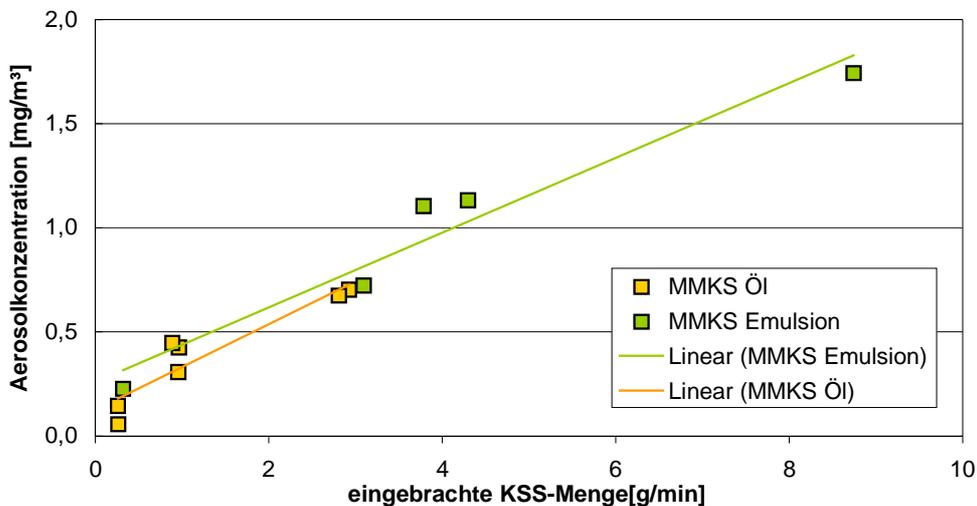
**Abbildung 9: Gesamtaerosolkonzentration in Abhängigkeit vom Kühlschmiersystem**

Die in den Diagrammen angegebenen Werte sind um die Hintergrundbelastung der Hallenumgebung bereinigt. Der Hintergrund wurde bei ausgeschalteter Schmierung, stehendem Werkzeug sowie mit eingeschalteter Maschinenabsaugung aufgenommen. Die so ermittelten Werte liegen für MMKS mit Emulsion zwischen 0,23 mg Aerosol pro m<sup>3</sup> Luft, wenn der KSS-Eintrag 0,32g/min beträgt, und 1,55 mg/m<sup>3</sup> (9,55 g/min), für Öl zwischen 0,10 mg/m<sup>3</sup> (0,26 g/min) und 0,69 mg/m<sup>3</sup> (2,87 g/min). Für vergleichbaren KSS-Eintrag von ca. 3 g/min wurden für beide Systeme Konzentrationen um 0,75 bis 0,8 mg/m<sup>3</sup> gemessen.

Die Aerosol-Gesamtkonzentration für die Überflutung mit Emulsion beträgt 0,23 mg/m<sup>3</sup>. Während bei der Überflutungsschmierung der KSS mit einem Strahl beinahe drucklos aufgebracht wird, benötigen MMKS-Systeme Druckluft zur Unterstützung der Zerstäubung und teilweise als Treibmittel. Daraus ergibt sich für MMKS-Systeme tendenziell stärkere Vernebelung als bei Überflutungssysteme, die nur durch konsequente Minimierung des KSS-Verbrauchs kompensiert werden kann. (Abbildung 10)

### Aerosol-Gesamtkonzentration

MMKS: Öl und Emulsion, Werte korrigiert mit Blindwert



**Abbildung 10: Aerosolkonzentration der MMKS-Systeme in Abhängigkeit der auf-gebrachten KSS-Menge**

Ein Einfluss der Zerspanung auf die Aerosolbildung ist bei der vorliegenden Bearbeitung (Fräsen von Aluminium) nicht signifikant, wie Kontrollmessungen ohne Werkzeug-eingriff aber ansonsten gleichen Bedingungen ergaben.

#### (b) Partikelgrößenverteilung

Die Konzentrationen der einzelnen Partikeldurchmesser können in sogenannten Emis-sionsfaktoren dargestellt werden. Anhand der Emissionsfaktoren kann auf die Lungen-gängigkeit des Aerosols und im Weiteren auf die toxikologische Relevanz eines Aero-sols geschlossen werden. Für die Überflutungs-Kühlschmierung zeigt sich das Maxi-mum der Tröpfchenmasse zwischen 1 und 2,5µm Partikeldurchmesser, aber auch An-teile bis 20 µm konnten gemessen werden. Für beide MMKS-Systeme liegt das Emis-sions-Maximum im Größenbereich unter 1 µm, Partikel über 5 µm sind hingegen kaum zu finden (Abbildung 11).

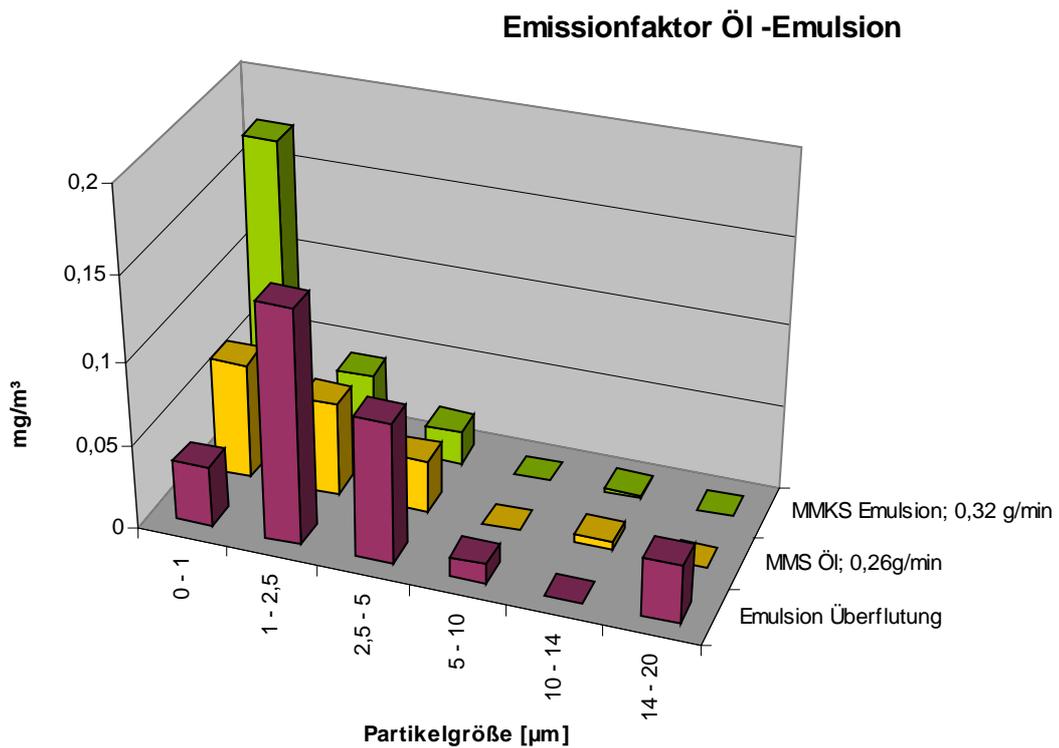


Abbildung 11: Emissionsfaktoren für Überflutung, MMS-Öl und MMKS-Emulsion

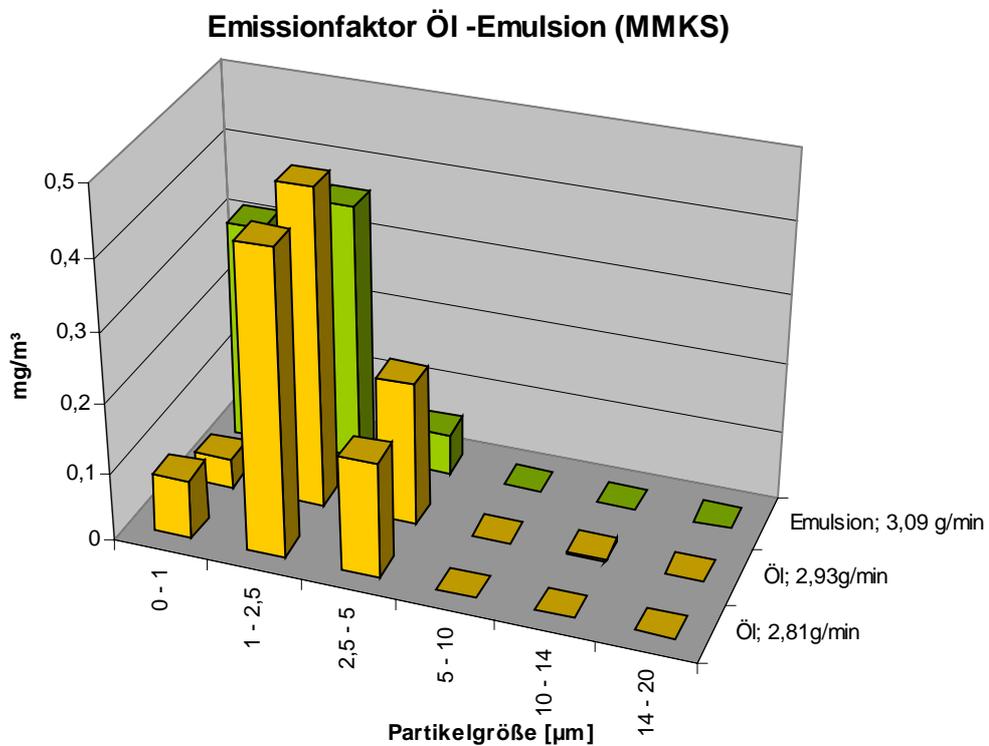
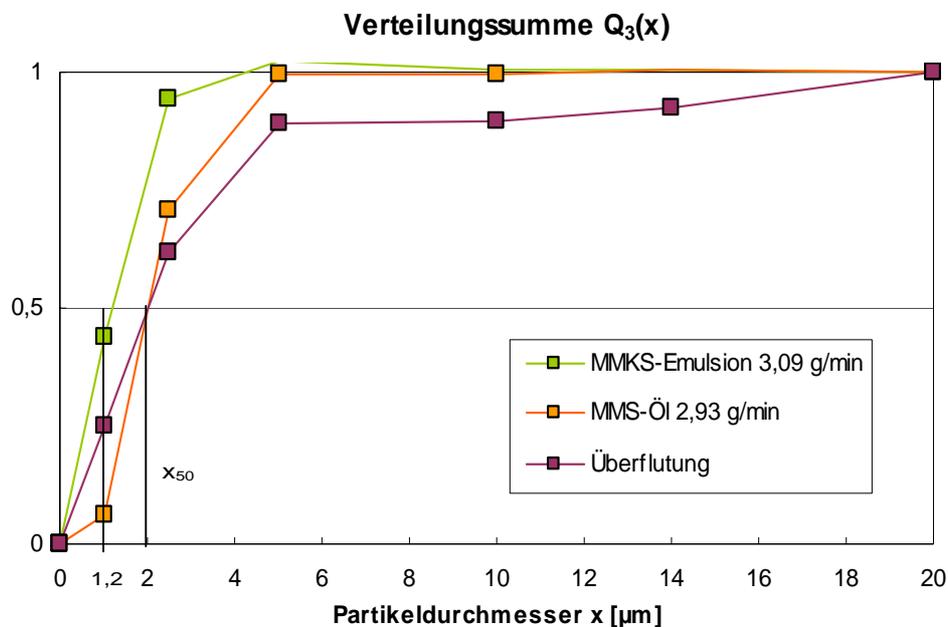


Abbildung 12: Emissionsfaktoren – Vergleich MMKS-Öl und MMS-Emulsion bei gleichem KSS-Eintrag

Vergleicht man die Emissionsfaktoren für die beiden MMKS-Systeme bei ähnlichem KSS-Eintrag (Ca. 3 ml/min), sieht man, dass bei der Öl-Anwendung das Maximum bei größeren Durchmessern liegt.



**Abbildung 13: Verteilungssumme und der Medianwert  $x_{50}$  der Partikelgrößenverteilung**

Der Medianwert  $x_{50}$ , jener Partikeldurchmesser der das gesamte Sample in massenbezogenen zwei gleich große Teile trennt, kann aus der Verteilungssumme der Partikelgrößenverteilung (Abbildung 13) entnommen werden. Sowohl für die Überflutungsschmierung als auch für die Öl-MMS liegt dieser Wert bei 2 µm, während er bei der Emulsions-MMKS mit 1,2 µm deutlich kleiner ist.

Die Messungen der Dampfphase für die Emulsionsanwendungen ergaben für die Überflutungs-Kühlschmierung 5,5 mg/m<sup>3</sup> und für die MMKS durchschnittlich mit 4,3 mg/m<sup>3</sup> etwas weniger. Die Schwankung liegt zwischen 3,4 und 4,9 und zeigt keine erkennbare Abhängigkeit von der aufgetragenen KSS-Menge.

## 3.2. Implementierung und Praxistest

### 3.2.1. Schlussfolgerungen aus den Laboversuchen

Aus den Fräsversuchen konnte jeweils eine günstige Kombination aus Fräserbeschichtung und Kühlschmiersystem – Minimalmengenschmierung mit optimierten Öl-

Einsatz und MMKS unter Verwendung von Emulsion – ermittelt werden. Es wurde daher eine Gegenüberstellung der bekannten oder potenziellen Vor- und Nachteile dieser beiden Systeme vorgenommen, um eine Entscheidungsgrundlage für eventuelle Systemänderungen zu bieten. Beim Einsatz von Minimalmengenschmierung mit optimierter Ölmenge sind in der Serienfertigung folgende Vorteile und Probleme zu erwarten:

- + gute Oberflächenqualität des Werkstücks
- + lange Werkzeugstandzeiten
- + guter Korrosionsschutz für die Maschine

Problemfelder:

- hoher Reinigungsaufwand für die Werkstücke nach der Fertigung
- erschwerte Qualitätskontrolle (Überprüfung auf Kratzer, ...)
- verölter Arbeitsraum (hoher Reinigungsaufwand)
- verunreinigte Spannvorrichtung (hoher Reinigungsaufwand, ev. Qualitätsproblem)
- Einstellung der Düsenposition sehr kritisch (Wirkung der MMS verschlechtert sich bei falscher Düsenposition sehr stark; Düsen müssen nach jedem Werkzeugwechsel von ausgebildetem Personal neu eingestellt werden)
- niedrige Qualität der anfallenden Späne (mit Öl verunreinigt)
- Hautkontakt mit Öl (führt zu gesundheitlichen Beeinträchtigungen der Mitarbeiter z. B. Hautausschläge)
- Belastung der Atemluft mit Öl-Nebel (führt zu gesundheitlichen Beeinträchtigungen der Mitarbeiter z. B. Hustenreiz)
- Verschmutzung des gesamten Produktionsbereichs (Ölfilm legt sich auf Decken, Wänden, Maschinen usw. ab und bildet in Verbindung mit Staub starke Verunreinigungen)
- teurer Schmierstoff

Durch die Umstellung auf Minimalmengenkühlschmierung mit Emulsion können viele dieser Einflussfaktoren positiv beeinflusst werden. Eine völlige Entlastung der Mitarbeiter ist allerdings nicht möglich. Beim Einsatz von Minimalmengenkühlschmierung mit

optimierter Emulsionsmenge in der Serienfertigung sind folgende Vorteile und Probleme zu erwarten:

Vorteile:

- + gute Oberflächenqualität des Werkstücks
- + lange Werkzeugstandzeiten
- + geringer Werkstückreinigungsaufwand (dünnflüssige Emulsion)
- + leichtere Qualitätskontrolle, weil die Werkstückoberflächen praktisch trocken und sauber sind
- + relativ sauberer Arbeitsraum
- + saubere Spannvorrichtung
- + Einstellung der Düsenposition unkritisch (breiter Sprühkegel, einfach zu justierendes System, Zeitersparnis bei jedem Werkzeugwechsel)
- + höhere Qualität der anfallenden Späne
- + geringe Belastung der Atemluft (reduziert die gesundheitlichen Beeinträchtigungen der Mitarbeiter)
- + geringere Verschmutzung des Produktionsbereichs
- + sehr kostengünstiger Kühlschmierstoff
- + geringerer Rohstoffeinsatz

Probleme:

- eingeschränkter Korrosionsschutz für die Maschine
- Hautkontakt mit Emulsion (kann zu gesundheitlichen Beeinträchtigungen der Mitarbeiter führen z.B. Hautausschläge, ...)

### **3.2.2. Mitarbeiterbefragung**

#### *3.2.2.1. Gestaltung*

Der im Kick-Off Workshop formulierten Notwendigkeit zur Akzeptanz und Einbindung der Maschinen- und Schichtführer in das Projekt wurde Rechnung getragen, indem in Zusammenarbeit mit einem Arbeitspsychologen ein spezifischer Mitarbeiter-

Fragebogen entwickelt wurde. In ausführlichen Interviews wurden Arbeitsbedingungen, Umweltbewusstsein, Qualitätsanforderungen, Verbesserungsvorschläge sowie Aspekte der Störungsbehebung und der subjektiven Bewältigbarkeit des technischen Systems behandelt. Befragt wurden neun Maschinenführer und drei Schichtführer in jeweils gut einstündigen Hintergrundinterviews mit beinahe 50 Fragen. Die Bewertung der einzelnen Problemfelder erfolgte einerseits quantitativ nach dem Schulnotensystem als auch qualitativ durch verbale Beschreibung und Verbesserungsvorschläge.

#### *3.2.2.2. Ergebnisse*

Die Auswertung der Mitarbeiterbefragung gab kurz gefasst folgendes Bild:

Besonders gute Bewertungen erhielten die Frage nach dem Prestige der HSC-Arbeitsplätze im Allgemeinen und die Zufriedenheit über die Erledigung der Arbeit ohne Zeitdruck, die sich mit dem fehlenden Akkord-System erklären lässt. Besonders negativ wird die Belastung durch die Hallenluft gesehen, hier im Besonderen die Sprühnebel. Es besteht hohes Qualitätsbewusstsein, es wird aber mehr Information über die Qualitätsziele und mehr Transparenz bei der Erfüllung dieser Ziele gewünscht.

#### **3.2.3. Mitarbeiter-Workshop**

Im Mitarbeiter-Workshop wurden die Ergebnisse der Befragung präsentiert, die vorrangigen Problemfelder herausgegriffen und über Verbesserungsvorschläge diskutiert. Diese waren im Themenkomplex „Arbeitsbedingungen“ die Absaugung, Beleuchtung, Haut, sparsamer KSS-Einsatz und Sonstiges. Im Themenbereich „Qualität“ wurde vor allem der horizontale Informationsfluss zwischen den Arbeitsschichten und der vertikale zwischen Schichtführer und Maschinenführer behandelt.

Als Ergebnis des Workshops und der Vorversuche wurde vereinbart, dass in der zweiten Phase des Projekts (Implementierungsphase) ein Referenzarbeitsplatz gestaltet wird, der den bisherigen Erkenntnissen und den Anforderungen nach Steigerung der Qualität und nach Verbesserung der Arbeitsbedingungen Rechnung trägt.

#### **3.2.4. Definition des Referenzarbeitsplatzes**

Die Gestaltung des Referenzarbeitsplatzes beinhaltet die folgenden Maßnahmen:

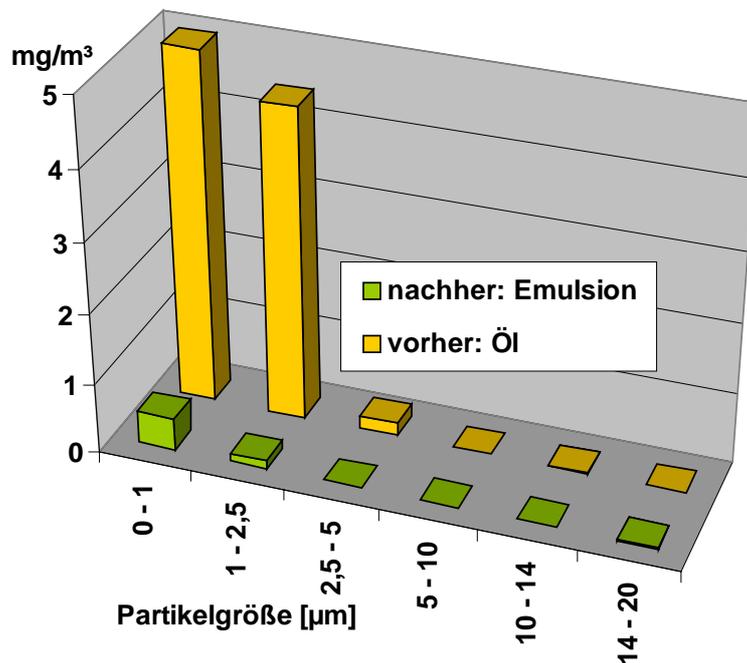
- Umstellung von Öl-MMKS auf Emulsion mit optimierten KSS-Einsatz
- Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit

- Verbesserung der Beleuchtung und individuelle Einstellbarkeit zur Entlastung der Augen bei der Qualitätskontrolle
- Anschaffung und Einsatz von höhenverstellbaren Paletten und gedämpfter, rutschfester Fußmatten
- Verbesserte Kommunikation durch geregelten Informationsfluss bei der Schichtübergabe auf Maschinen- und Schichtführerebene
- Verbindliche Verantwortlichkeiten für die Wartung der Luftfilter
- Beseitigung organisatorischer Mängel wie die exakte Vergabe von Artikelnummern für unterschiedlich beschichtete Fräser
- Einbeziehung der Ziele „Arbeits- und Umweltschutz“, „Arbeitsplatzqualität und Mitarbeiter-Zufriedenheit“ sowie „Qualitätsbewusstsein“ in den kontinuierlichen Verbesserungsprozess (KVP).

### **3.2.5. Ergebnis der Implementierung**

Der wichtigste Eingriff in den Produktionsprozess stellt der Wechsel zur Minimalmengenschmierung mit Emulsion dar. Die ersten Erfahrungen zeigen, dass die Fertigung mit den im Labor ermittelten und um 25% erhöhten Vorschubgeschwindigkeiten und der minimierte Einsatz von KSS auch im praktischen Einsatz möglich ist. So konnte bei erhöhter Vorschubgeschwindigkeit und verringertem KSS-Einsatz verbesserte Oberflächenqualität und gleichbleibend hohe Werkzeugstandzeit realisiert werden. Späne und bearbeitete Werkstücke sind praktisch trocken und kaum verölt. Das erleichtert die Reinigung und Qualitätskontrolle der Werkstücke und verringert den Verschmutzungsgrad der Späne mit Fremdstoffen und somit die Recyclierfähigkeit. Wegen der geringeren Verklebungs- und Anpackungsneigung der Späne vereinfacht sich die Reinigung des Maschinenraums. Insgesamt wurden die gesetzten Maßnahmen und die sich ergebenden Auswirkungen auf die Arbeitsplatzsituation von den Maschinenführern sehr positiv aufgenommen.

Vergleichende Messungen ergaben eine faktorielle Verringerung der Nebemissionen von ca. 10 mg/m<sup>3</sup> auf 0,6 mg/m<sup>3</sup> (Abbildung 14). Voraussetzung dafür ist die konsequente Beibehaltung der aufgetragenen Emulsionsmenge von 2 ml/min. Die verbesserte Luftqualität in der Produktionshalle wurde von den MitarbeiterInnen wahrgenommen und positiv beurteilt.



**Abbildung 14: Emissionsfaktoren vor und nach der Optimierung**

Probleme ergaben sich mit dem Aufbringungssystem für die Emulsion, da sich die eingesetzte Zweistoffdüse im geforderten Regelbereich nicht stabil einstellen lässt. Es wurden häufig kurze Unterbrechungen des Strahls festgestellt, was den sofortigen Werkzeugbruch zur Folge hat. Die speziell für die Minimalmengenschmierung mit Öl entwickelten und optimierten Pumpen-Düsen-Systeme versagen hingegen beim Einsatz mit wässrigen Systemen. Recherchen bei Anbietern derartiger Systeme blieben für die vorgegebene Spezifikation ergebnislos.

Aus diesen Gründen und wegen des anhaltenden Produktionsdruckes, der die Bereitschaft der für die Produktion verantwortlichen Schichtführer zu Änderungen im Prozess sinken lässt, wurde die System-Umstellung befristet rückgängig gemacht, solange die Frage des Aufbringungssystems nicht geklärt werden kann. Eine abschließende arbeitsmedizinische Bewertung der Hautverträglichkeit des neu eingesetzten Produktes kann wegen der kurzen Erprobungsphase von einigen Tagen nicht gegeben werden.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass technische Innovationen und Optimierungen, die unmittelbar in den Arbeitsbereich der Mitarbeiter eingreifen, frühzeitig kommuniziert werden müssen, um Einwände rechtzeitig ausräumen zu können. Es gilt, das

Wissen und die Ressourcen der Mitarbeiter für die Optimierung zu nutzen und die Lösungskompetenz des Teams in konstruktivem und vorbehaltlosem Klima zu entwickeln. Die gewählte Vorgehensweise im Sinne zur Optimierung des Prozesses hat sich als geeignetes und erfolgversprechendes Werkzeug erwiesen und lässt sich für andere Prozesse adaptieren und anpassen.

## **Ausblick**

Aus den genannten Unzulänglichkeiten bei der Dosierung und Aufbringung der Emulsion, wie sie in der Implementierungsphase aufgetreten sind, lässt sich für den Bereich der Minimalmengenkühlschmierung der weitere Forschungs- und Entwicklungsbedarf ableiten: Bisher wurde die MMKS fast ausschließlich mit reinen Öl-Systemen realisiert, da angenommen wird, dass die Kühlwirkung gegenüber der Schmierung vernachlässigbar ist. Die Ergebnisse der Fräsversuche zeigen hingegen, dass im vorliegenden Fall mit geringsten Emulsionsmengen sehr gute Bearbeitungsergebnisse zu erreichen sind. Die Aufbringungssysteme sind jedoch dahingehend zu adaptieren und zu optimieren. Der Einsatz von MMKS mit Emulsion als Verlustschmierung bietet die Chance Kühlschmierstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen mit einfacher Rezeptur einzusetzen, da sich die Probleme der Haltbarkeit, des Keimbefalls und des sich daraus ergebenden Biocideinsatzes erübrigen. Der aus Sicht der Toxikologie problematischen Bildung feinsten Aerosole bei der Zerstäubung in Zweistoffdüsen (Druckluft und KSS) sollte durch gezieltes Düsendesign und punktgenauer Aufbringung entgegengewirkt werden.

## **Literatur**

Gomez P., Malik F., Oeller K.-H.: Systemmethodik; Grundlagen einer Methodik zur Erforschung und Gestaltung soziotechnischer Systeme; Verlag Paul Haupt; Bern & Stuttgart, 1975.

Weinert K.: Trockenbearbeitung und Minimalmengenkühlschmierung, Springer Verlag, Berlin, 1998.

Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften (Hrsg.), BIA-Report 7/96: Kühlschmierstoffe, Eigenverlag, Sankt Augustin, 1996.

Grenzwert-VO BGBl. II 253/2001

VDI 2066: Manuelle Staubmessung in strömenden Gasen, Verband Deutscher Ingenieure (Hrsg.), Beuth Verlag, Berlin, 1993.

BIA 3110: Isokinetisches Probenahmesystem (IPS) zur Messung der Konzentration partikel- und dampfförmiger Stoffe in strömender Luft durch Teilstromentnahme. Messung von Gefahrstoffen, BIA-Arbeitsmappe IV/94, Erich Schmidt Verlag, Bielefeld.

## Verzeichnis der Abbildungen

Abbildung 1: Modell des HSC-Bearbeitungsprozesses

Abbildung 2: Prozessschema als Basis für das Vorgehensmodell

Abbildung 3: Auswahl einiger Werkzeug-Standwege mit verschiedenen Einstellparametern

Abbildung 4: Einsparungspotenzial an KSS- und Maschinen-Kosten nach der Prozessoptimierung

Abbildung 5: KSS-Verbrauch derzeit und nach der Optimierung

Abbildung 6: Form und Handhabbarkeit der Späne

Abbildung 7: Messstrecke und Probennahmesonde gemäss VDI 2066

Abbildung 8: Zerlegter Kaskadenimpaktor (links) und zwei Folien mit abgedichtetem KSS (rechts)

Abbildung 9: Gesamtaerosolkonzentration in Abhängigkeit vom Kühlschmierersystem

Abbildung 10: Aerosolkonzentration der MMKS-Systeme in Abhängigkeit der aufgetragenen KSS-Menge

Abbildung 11: Emissionsfaktoren für Überflutung, MMS-Öl und MMKS-Emulsion

Abbildung 12: Emissionsfaktoren – Vergleich MMKS-Öl und MMS-Emulsion bei gleichem KSS-Eintrag

Abbildung 13: Verteilungssumme und der Medianwert  $x_{50}$  der Partikelgrößenverteilung

Abbildung 14: Emissionsfaktoren vor und nach der Optimierung

## Veröffentlichungen und Präsentationen:

Projekt „Fabrik der Zukunft“ – Strategien zur Reduktion von Kühlschmierstoffen bei HSC-Prozessen mit einem Ausblick auf Schleifanwendungen. Vortrag. 3. Steyrer Schleiftagung, 18./19. 4. 2002, Fachveranstaltung des Fachverbandes Österreichischer Präzisionswerkzeugschleifer

Optimierung von HSC-Prozessen aus ganzheitlicher Sicht. Posterpräsentation. Nachhaltigkeitssymposium 2002 „Voraus denken – Zukunft schenken“, 22. 2. 2002, Wien, Hofburg, Veranstalter: WKÖ, BMLFUW, WWF.

Entwicklung eines Vorgehensmodells zur Optimierung von HSC-Prozessen aus ganzheitlicher Sicht. Posterpräsentation, XVI<sup>th</sup> World Congress on Safety and Health at Work, 26.-31. 5. 2002, Wien, Veranstalter: Allgemeine Unfallversicherungsanstalt, Hauptverband der österreichischen Sozialversicherungsträger, Internationale Vereinigung für Soziale Sicherheit, Internationales Arbeitsamt.

Projekt „Fabrik der Zukunft“ – Optimierung von HSC-Prozessen aus ganzheitlicher Sicht. Fachvortrag, Netzwerk Gesundheit TIC Steyr, 14./15. 6. 2002.