

Entwicklung intelligenter, maschinennaher Dienste für die Mikrobearbeitung

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

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Marcus Friedrich Stolz
aus Heilbronn

Hauptberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c.
mult. E. Westkämper
Mitberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dieter Spath
Tag der Einreichung: 14.10.2005
Tag der mündlichen Prüfung: 29.05.2006

Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb der Universität Stuttgart
2006

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	15
1.1	Ausgangssituation	15
1.2	Problemstellung	17
1.3	Zielsetzung	19
1.4	Vorgehensweise	19
2	Grundlagen der Mikroproduktion	22
2.1	Einordnung der Mikrosystemtechnik	22
2.2	Technologien der Mikroproduktion	23
2.3	Prozessketten der Mikrozerspanung	25
2.4	Aktuelle Herausforderungen in der Mikrozerspanung	30
2.5	Ableitung des Handlungsbedarfs	32
3	Elektronische Dienstleistungen in der Produktion	34
3.1	Bedeutung produktionsnaher Dienstleistungen	34
3.2	Begriffliche Einordnung von Dienstleistungen	35
3.3	Mehrwertdienste im Lebenslauf technischer Systeme	37
3.4	E-Dienstleistungen für Werkzeugmaschinen	39
3.4.1	Entwicklungslinien des Teleservice	39
3.4.2	Technische Grundlagen	43
3.4.3	Beispiele aktueller E-Service-Lösungen	50
3.5	Systematische Entwicklung von E-Dienstleistungen	54
3.5.1	Service-Engineering	54
3.5.2	Entwicklung von E-Dienstleistungen nach KREIDLER	57
3.5.3	Defizite heutiger Ansätze in Bezug auf die Mikrobearbeitung	60
4	Rahmenbedingungen für die Entwicklung intelligenter Dienste	62
4.1	Technische Intelligenz als Basis der Dienstentwicklung	62
4.2	Anforderungen an intelligente Dienste	65
4.2.1	Allgemeine Anforderungen	67
4.2.2	Strukturelle Anforderungen	68
4.2.3	Ergonomische Anforderungen	70
4.2.4	Wirtschaftliche Anforderungen	72

5	Systematische Gestaltung intelligenter Dienste	73
5.1	Vorgehen zur Gestaltung intelligenter Dienste	73
5.2	Definition des Leistungsangebots	75
5.2.1	Identifizierung von Ansatzpunkten für Dienste	76
5.2.2	Leistungsdefinition	84
5.2.3	Planung der Dienstleistung	88
5.3	Bewertung intelligenter Dienste	93
5.3.1	Kosten und Erlöse des Dienst-Anbieters	94
5.3.2	Kosten und Erlöse des Betreibers	95
5.3.3	Erfolgsfaktoren wirtschaftlicher Dienste	97
5.4	Übersicht des Vorgehens zur Entwicklung intelligenter Dienste	98
6	Entwicklung intelligenter Dienste für die Mikrobearbeitung	99
6.1	Anwendung des Vorgehens auf Mikrobearbeitungsprozesse	99
6.1.1	Identifizierung von Ansatzpunkten für Dienste	99
6.1.2	Leistungsdefinition	104
6.1.3	Planung der Dienstleistung	110
6.2	Automatische Ausrichtung von Werkzeug und Werkstück	114
6.2.1	Gestaltung	114
6.2.2	Umsetzung	119
6.2.3	Test / Evaluierung	122
6.2.4	Fazit	125
6.3	Prozess-Monitoring	127
6.3.1	Gestaltung	127
6.3.2	Umsetzung	131
6.3.3	Test / Evaluierung	133
6.3.4	Fazit	135
6.4	Multimodale, ereignisbasierte Benachrichtigung	137
6.4.1	Gestaltung	137
6.4.2	Umsetzung	141
6.4.3	Test / Evaluierung	142
6.4.4	Fazit	144

7	Zusammenfassung und Ausblick	146
8	Summary	150
9	Literaturverzeichnis	153
10	Anhang	166

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Die Mikrosystemtechnik ist eine Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts. Sie verfügt über ein sehr großes Innovationspotenzial und eine enorm ansteigende Bedeutung am Weltmarkt [Bader02]. Die Vorteile mikrosystemtechnischer Lösungen sind dabei vor allem kleine Abmessungen, geringes Gewicht, niedriger Energieverbrauch, hohe Zuverlässigkeit und daraus resultierende niedrige Kosten [Hesselbach02]. Der Bedarf wird daher in Zukunft weiter zunehmen. Neben der Erhöhung der Funktionsdichte bisheriger Produkte erschließen sich auch zunehmend neue Anwendungsfelder, die sich erst durch die Miniaturisierung eröffnen. So ist die Mikrobearbeitung auch die Grundlage für künftige Produkte und Anwendungen im Bereich der Nanotechnologie. Erst mit ihrer Hilfe können die benötigten Nanoproduktionsanlagen überhaupt hergestellt werden. [Hesselbach02]

Die möglichen Anwendungen der Mikrosystemtechnik sind vielfältig, sowohl hinsichtlich des Einsatzfeldes als auch der Technologien. Mikrotechnische Produkte finden sich sowohl in sehr speziellen Bereichen, wie der Medizintechnik, als auch in vielen alltäglichen Produkten, vom Benutzer oftmals unbemerkt. Die fünf klassischen Hauptanwendungsgebiete für mikrosystemtechnische Bauteile sind die Telekommunikation, die Medizin- und Biotechnologie, die Automobilindustrie, der Instrumentations- und Gerätebau sowie die Uhrenindustrie [Elsner03], wobei sich in Zukunft sicher auch andere Anwendungsfelder, z.B. die Umwelttechnik, erschließen lassen [Spath04].

Dass der Einsatz bereits auf breiter Ebene erfolgt, zeigen die seit einigen Jahren zum Standard der Sicherheitstechnik gehörenden Airbags in Kraftfahrzeugen und deren Mikrosensoren. In der Medizintechnik, speziell in der minimalinvasiven Chirurgie, werden durch die Mikrosystemtechnik neue Behandlungsverfahren oftmals überhaupt erst möglich. Auch im Kommunikationssektor sind Mobiltelefone, Laptops oder Personal Digital Assistants (PDA) aus dem täglichen Leben nicht mehr wegzudenken. Ob als Festplattenleseköpfe, Luftlager oder Sensoren finden Mikrobauteile in diesen Geräten eine breite Anwendung. [Wulfsberg04a]

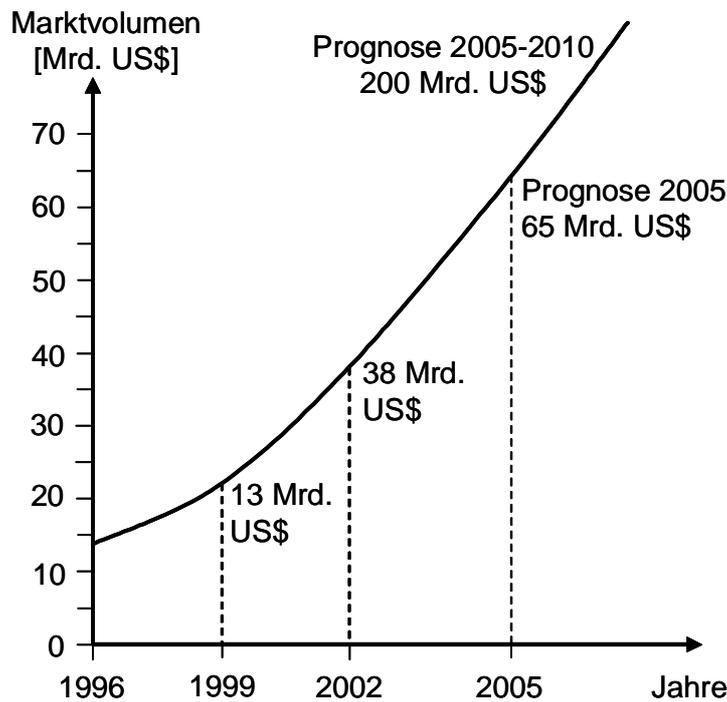


Abbildung 1: Entwicklung des weltweiten Umsatzes an Mikrosystemtechnik [NEXUS02, Steg04]

Vor diesem Hintergrund ist es nicht überraschend, dass die Mikrosystemtechnik in den letzten Jahren einen starken Zuwachs sowohl in der Forschung als auch im industriellen Einsatz verzeichnete. Der gesamte Mikrosystemtechnikmarkt hat sich zwischen 1996 und 2002 verdreifacht, wobei im Umfeld von IT-Anwendungen sowie in der Medizin und Biochemie die größten Anteile zu finden sind. Für die Zukunft werden verstärkt Innovationen im Konsumgüterbereich erwartet (Flachbildschirme, faseroptische Telekommunikation). Lag der weltweite Umsatz der Mikrosystemtechnik 1996 noch bei 13 Mrd. US-Dollar, so betrug er 2002 bereits 38 Mrd. US-Dollar. Das Ergebnis einer im Jahr 2002 durchgeführten Marktstudie des „Network of Excellence in Multifunctional Microsystems“ (NEXUS) prognostiziert für 2005 gar ein Umsatzvolumen von 65 Mrd. US-Dollar auf dem weltweiten Mikrosystemtechnikmarkt. Dieses starke Wachstum soll auch in den folgenden Jahren weiter anhalten (siehe Abbildung 1). [NEXUS98, NEXUS02, Steg04]

Um die prognostizierten Anstiegsraten am Mikrosystemtechnikmarkt tatsächlich realisieren zu können, müssen jedoch von herstellungstechnischer Seite die dafür notwendigen kostengünstigen und sicheren Fertigungsprozesse bereitgestellt werden. Hier besteht noch erheblicher Entwicklungsbedarf in der Forschung und der

industriellen Umsetzung. So kommt eine Studie zum internationalen Stand der Mikroproduktionstechnik zu dem Schluss, dass sich „trotz des auch weiterhin weltweit anerkannten Potenzials und Bedarfs an mikrosystemtechnischen Produkten [...] ein gewisser Stau in der Umsetzung von Forschungsergebnissen in die Praxis erkennen“ lässt. Als Grund hierfür werden Defizite in den industriell einsetzbaren Produktionstechniken genannt. [Hesselbach02]

Damit bewahrheitet sich die Prognose von WESTKÄMPER, der bereits 1999 die Entwicklung der Mikrosystemtechnik zu einer Schlüsseltechnologie des deutschen Maschinenbaus absah, für die wirtschaftliche Fertigungskonzepte bereitgestellt werden müssen, denn gerade die Fertigung von Mikro-Bauteilen bzw. von miniaturisierten Form- und Funktionselementen stellt die Mikrosystemtechnik vor neue Probleme. [Westkämper99]

1.2 Problemstellung

Neben der hohen Komplexität der Produkte und Prozesse sind hier unter anderem die hohen Investitionskosten zu nennen, die ökonomisch sinnvolle Produktionen nur bei sehr hohen Stückzahlen zulassen [Hesselbach03]. Hierbei kommen – neben den zumeist siliziumbasierten, maskengebundenen Verfahren – vermehrt alternative, werkzeuggebundene Fertigungsverfahren zum Einsatz, deren Ursprünge in der klassischen Fertigungstechnik liegen (z.B. Bohren, Fräsen, Lasern, Erodieren). Damit ist eine komplexe Geometriegestaltung bei einer hohen Werkstoffvielfalt möglich, wobei insbesondere die kurzen Fertigungszeiten und die hohe Flexibilität eine wirtschaftliche Fertigung im kleinen und mittleren Stückzahlenbereich ermöglichen [Elsner03].

Die Weiterentwicklung spanabhebender Fertigungsverfahren bietet dabei für „die Miniaturisierung von Bauteilen und Komponenten ein großes Potenzial, um kostengünstig Mikrobauteile in mittleren Losgrößen zu fertigen. Besonders hinsichtlich Werkstoffauswahl, Geometriefreiheit, Oberflächengüte und Bearbeitungszeit zeichnet sich die Zerspanung aus.“ [Hesselbach02]

Ein besonders großes Potenzial kann unter den Verfahren der Mikrozerspanung beim Mikrofräsen realisiert werden, das wie in der konventionellen Fertigungstechnik als das flexibelste Verfahren angesehen werden kann. Es bietet zusätzlich zu den genannten Vorteilen der Mikrozerspanung die Möglichkeit der vollständigen 3D-Bearbeitung zur Erzeugung von Freiformflächen und nahezu beliebigen räumlichen Strukturen [Uhlmann03]. Damit stellt sich das Mikrofräsen auch als Wegbereiter für

den Mikrowerkzeug- und -formenbau dar [Schmidt01]. Dem Mikrofräsen wird dementsprechend von den in der Mikroproduktionstechnik technologisch führenden Nationen auch eine große Bedeutung unter den Verfahren der Mikrozerspannung beigemessen [Hesselbach02].

Auf dem Weg zu einem breiten Einsatz in einem modernen industriellen Umfeld müssen aber

- die Prozessfähigkeit erhöht,
- die Produktivität erhöht bzw. die Prozesszeiten verkürzt und
- nicht direkt wertschöpfende Aktivitäten reduziert werden. [Rother04]

Aus diesen Herausforderungen wurden innerhalb des vom BMBF geförderten Projekts „mikroPro“ die folgenden Ansätze für die Weiterentwicklung des Mikrofräsens abgeleitet [Hesselbach02]:

- Durchgehende CAD/CAM-Unterstützung
- Reproduzierbare und automatisierte Werkzeugeinrichtung
- Reproduzierbare und automatisierte Werkstückeinrichtung
- Integrierte Messtechnik
- erhöhte Prozessfähigkeit (Transparenz und Regelung)
- Werkstoffflexibilität (vor allem Bearbeitung von Stahl)
- Kostensenkung (Nebenzeiten reduzieren, Produktionsgeschwindigkeit erhöhen)

Innerhalb dieser Untersuchung wurde auch deutlich, dass sich auf dem Gebiet der Komponentenoptimierung aufgrund physikalischer Grenzen bereits ein gewisser Sättigungseffekt einzustellen scheint, während die prozessorientierten Ansätze noch ein großes Potenzial für Verbesserungen bieten. Dabei sind es insbesondere die Verfügbarkeit von prozessnahem Wissen sowie eine Unterstützung des Nutzers durch Automatisierung, die einen entscheidenden Einfluss auf die Prozessfähigkeit und Produktivität und damit auf die Wirtschaftlichkeit mikrotechnischer Fertigungsprozesse haben. Das prozessnahe Wissen beinhaltet in diesem Zusammenhang nicht nur die Planung von Prozessparametern, sondern alle Fähigkeiten und Kenntnisse, die zur Planung, Ausführung, Analyse und Optimierung eines Fertigungsprozesses erforderlich sind. Die Studie „mikroPro“ kommt in Bezug auf dieses prozessnahe Wissen zu dem Fazit, dass die genannten Anforderungen häufig das vorhandene Wissen beim Anwender übersteigen [Hesselbach02].

7 Zusammenfassung und Ausblick

Die Mikrosystemtechnik verfügt als eine Schlüsseltechnologie über ein großes Innovationspotential für die Zukunft. Um die angestrebten Wachstumsraten jedoch tatsächlich realisieren zu können, ist eine kostengünstige und sichere Fertigung der Mikrobauteile erforderlich. Dies gilt insbesondere für kleine Stückzahlen, bei denen vielfach Fertigungsverfahren zum Einsatz kommen, die ihren Ursprung in der klassischen Fertigungstechnik haben (z.B. Bohren, Fräsen, Lasern, Erodieren). Hierbei stehen der hohen Flexibilität in Bezug auf Werkstoff oder Geometrie hohe Anforderungen hinsichtlich der Fertigungssysteme und Prozessgestaltung gegenüber. Gerade letztere Anforderung übersteigt jedoch häufig das vorhandene Wissen des Anwenders. Daher wurden in der vorliegenden Arbeit am Beispiel des Mikrofräsens intelligente maschinennahe Dienste entwickelt, die den Nutzer bei der Schaffung und Verteilung von prozessnahe Wissen sowie bei der Automatisierung geeigneter Prozesse in der Mikrobearbeitung unterstützen sollen. Ziel der Arbeit ist es, durch die Unterstützung des Nutzers mit intelligenten maschinennahen Diensten, die Prozessfähigkeit und die Produktivität in der Mikrobearbeitung zu erhöhen.

Zum Erreichen dieses Ziels wurden in Kapitel 2 zunächst die Grundlagen der Mikroproduktion sowie Bedeutung und Anwendungsfelder dieser Verfahren untersucht. Davon ausgehend wurden die Prozessketten der Mikroproduktion im Allgemeinen, sowie des Mikrofräsens im Besonderen im Hinblick auf die aktuellen Herausforderungen analysiert. Hierbei zeigte sich, dass die Unterstützung der maschinennahen Prozesse durch intelligente elektronische Dienstleistungen auch in der Mikrobearbeitung einen viel versprechenden Ansatz zur Verbesserung von Prozessfähigkeit und Produktivität darstellen.

Im nächsten Schritt wurde in Kapitel 3 der aktuelle Stand der elektronischen Dienstleistungen in der Produktion analysiert. Hierbei wurden, ausgehend von einer Einordnung solcher Dienste in den Lebenslauf einer Maschine, die derzeitigen technischen Möglichkeiten sowie ausgewählte Realisierungsbeispiele beschrieben. Die anschließende Untersuchung aktueller Ansätze zur Entwicklung elektronischer Dienstleistungen (Service-Engineering) zeigte Defizite für den betrachteten Anwendungsbereich der intelligenten, maschinennahen Dienste auf. Daraus wurde der Handlungsbedarf für ein an die Mikrobearbeitung angepasstes Vorgehen zur Entwicklung intelligenter maschinennaher Dienste abgeleitet. Hierzu wurden in Kapitel 4

zunächst Rahmenbedingungen und Anforderungen für die Entwicklung intelligenter Dienste beleuchtet. Auf Basis dieser Grundlagen wurde schließlich in Kapitel 5 ein systematisches Vorgehen für die Entwicklung von intelligenten Diensten für die Mikrobearbeitung erarbeitet, mit dem Nutzer- und Umgebungsanforderungen systematisch in konkrete elektronische Dienste umgesetzt werden können.

Das entwickelte Vorgehen wurde in Kapitel 6 auf den Mikrofräsprozess angewandt. Auf Basis von Analysen an Referenzbauteilen wurden unter Zuhilfenahme des Verfahrens drei Dienste konzipiert, die ein besonders hohes Potenzial zur Erhöhung der Prozessfähigkeit und Produktivität in der Mikrobearbeitung aufweisen. Die Realisierbarkeit und der industrielle Nutzen der identifizierten maschinennahen intelligenten Dienste wurde durch Realisierung von Prototypen nachgewiesen und deren Verbesserungspotenzial anhand von Praxisbeispielen evaluiert. Im Einzelnen wurden die folgenden Dienste entwickelt:

1. *Automatisierte Ausrichtung von Werkzeug und Werkstück*

Der Dienst „Automatisierte Ausrichtung von Werkzeug und Werkstück“ reduziert die Prozesszeiten bei der Ausrichtung von Werkzeug und Werkstück insbesondere in der Serienfertigung. Dazu wurden eine maschinenintegrierte Messtechnik sowie geeignete Benutzerschnittstellen entwickelt, mit der ein automatisierter Einrichtprozess ermöglicht wird. Im Rahmen von Tests konnte beim Einsatz dieses Dienstes eine Reduktion der Gesamt-Prozesszeit um 51,4% erreicht werden. Des Weiteren ermöglicht dieser Dienst eine höhere Reproduzierbarkeit (Prozessfähigkeit) bei gleichzeitig geringerer Personalqualifikation.

2. *Prozess-Monitoring*

Der Dienst „Prozess-Monitoring“ ermöglicht die Fern-Überwachung von Mikrofräsprozessen während der Bearbeitung (in-situ) über ein virtuelles Bauteilmodell. Damit werden Abweichungen und Fehler bereits während der Bearbeitung erkannt und es können frühzeitig korrigierende Maßnahmen eingeleitet werden. Darüber hinaus eignet sich der Dienst als Informationsplattform bei der Bereitstellung prozessnahen Wissens im Rahmen einer Technologieberatung.

3. *Ereignisbasierte Benachrichtigung*

Mit dem Dienst „Ereignisbasierte Benachrichtigung“ werden Maschinenstillstände durch eine schnelle Benachrichtigung im Fehlerfall verkürzt. Dazu wurde ein System entwickelt, das den Nutzer bei einem Ereignis in der Maschinensteuerung anhand eines Eskalationsplans benachrichtigt, wobei das jeweils

geeignete Kommunikationsmedium (SMS, E-Mail, Web, Sprache) zum Einsatz kommt.

Mit der Anwendung des entwickelten Verfahrens wurde nachgewiesen, dass es für die Entwicklung von maschinennahen intelligenten Diensten in der Mikrobearbeitung geeignet ist. Des Weiteren wurde durch die prototypische Realisierung und Evaluierung von ausgewählten Diensten nachgewiesen, dass durch den Einsatz von maschinennahen und intelligenten Diensten die Prozessfähigkeit und Produktivität in der Mikrobearbeitung deutlich gesteigert werden kann.

Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde gezeigt, dass sich mit Hilfe eines prozessorientierten Ansatzes intelligente Dienste für das Mikrofräsen identifizieren und umsetzen lassen. Auf dieser Basis sollte in der Zukunft eine Weiterentwicklung auf den folgenden Feldern erfolgen:

- *Realisierung weiterer Dienste*

Die entwickelten Dienste basieren ausschließlich auf den beiden größten Zeitanteilen des Mikrofräsens. Durch die Berücksichtigung weiterer Prozesse lassen sich zusätzliche Dienste umsetzen und damit neue Potenziale für die Mikrobearbeitung realisieren. So könnten beispielsweise Dienste im Umfeld der NC-Programmoptimierung oder der Instandhaltungsunterstützung einen nachhaltigen Beitrag zur Prozessverbesserung leisten.

- *Weiterentwicklung der dargestellten Dienste*

Bereits bei der Beschreibung der einzelnen Dienste wurden Potenziale zu deren Weiterentwicklung dargestellt. Dabei bestehen insbesondere beim Dienst für das Prozess-Monitoring umfangreiche Möglichkeiten. So könnte zum Beispiel über die Integration von prozessbegleitenden Zerspannsimulationen eine Funktionalität zur proaktiven Prozessregelung (look-ahead) realisiert werden.

- *Integration der Dienste in eine vorhandene Service-Plattform*

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Dienste für die Evaluation nur prototypisch realisiert, für eine industrielle vermarktbare Lösung ist aber die Integration in vorhandene Service-Plattformen erforderlich.

Das erarbeitete Verfahren und die entwickelten intelligenten maschinennahen Dienste stellen den ersten Schritt in Richtung Ausbau der Schlüsseltechnologie Mikrobearbeitung dar. Die Realisierung weiterer Dienste sowie die Weiterentwicklung

der bereits entwickelten Dienste müssen als logische Konsequenz zum kontinuierlichen Ausbau der technologischer Kompetenz und Wettbewerbssicherung folgen. Die Integration der Dienste in vorhandene Service-Plattformen schafft neue Wertschöpfungspotenziale für Hersteller und Kunden von Mikrobearbeitungslösungen in der Zukunft.

8 Summary

As a key technology micro system engineering has a large potential for innovation in the future. In order to realize the desired growth rates, economical and safe manufacturing processes for the micro parts are necessary. This applies in particular to small batch sizes in which often manufacturing processes are used that have their origin in classical manufacturing technologies (e.g. boring, milling, lasering, eroding). Here the high flexibility of these processes regarding material or geometry faces the high requirements in terms of production system and process design. Especially the last requirement frequently exceeds the available knowledge of the users. For this reason and by the example of micro milling in this thesis intelligent machine-oriented services were developed, which support the user with the creation and distribution of process-oriented knowledge as well as with the automation of the technological processes in micromachining. The primary task of this thesis is to support the user with intelligent machine-oriented services in order to increase process capability and productivity in micromachining.

To fulfill this task in chapter 2 the basics of micro production were described and importance and application fields of these technologies were examined. Based on this the process chains of micro production were analysed in general, and then the micro milling process in particular, each regarding the current industrial and scientific challenges. The analysis showed that the supporting of machine-oriented processes using intelligent electronic services can provide a promising approach for the improvement of process capability and productivity.

As the next step the state of the art of electronic services in production was analyzed in chapter 3. Based on a classification of such services along the machine's life cycle, the current technological potentials and selected realised examples were described. The following investigation of actual approaches for the design of electronic services (service engineering) showed deficits in the field of intelligent, machine-oriented services. From this the demand for a specially adapted procedure for the development of intelligent machine-oriented services for micromachining was derived. According to that in chapter 4 basic conditions and requirements for the development of intelligent services were discussed. On this basis in chapter 5 a systematic procedure for the development of intelligent services for micromachining

was finally designed, with which user and environmental requirements can be systematically transferred into concrete electronic services.

In chapter 6 this procedure was applied to the micro milling process. On the basis of reference part analyses three services were designed using of the procedure, which showed a particularly high potential for increasing process capability and productivity in micromachining. The feasibility and industrial benefit of the identified machine-oriented intelligent services were proven by the realization of prototypes. The room for improvement was evaluated on the basis of practical examples. In detail the following services were developed:

1. *Automated referencing of tool and workpiece*

The service "automated referencing of tool and workpiece" reduces the process time for referencing tool and workpiece especially in series production. Therefore a machine-integrated measuring system and user interfaces were developed, with which an automated setting-up process is possible. Within practical tests a reduction of the total process time of 51,4% was achieved using this service. Furthermore this service increases reproducibility (process capability) with smaller demand for personnel qualification at the same time.

2. *Process monitoring*

The service "process monitoring" enables the remote visualisation and supervision of micro milling processes during the machining (in-situ) through a virtual model of the workpiece. Thus deviations and errors can be recognised already during the process and promptly correcting measures can be introduced. Furthermore the service can be used as information platform and provide process-near knowledge for technology consulting.

3. *Event-based notification*

The service "event-based notification" helps shortening machine failtimes in case of an error by fast user notification. Therefore a system was developed, which informs the user after a defined event in the machine's control system on the basis of an escalation plan, using the most suitable communication medium (SMS, e-mail, web, voice).

With the application of the developed procedure it was proved that it is suited for the development of machine-oriented intelligent services in micromachining. Furthermore it was proven by the prototypical realisation and evaluation of selected

services, that by using machine-oriented intelligent services the process capability and productivity in micromachining can be distinctly increased.

In this thesis it was shown that using a process orientated approach intelligent services for micro milling can be identified and realized. On this basis enhancements should take place in the future on the following fields:

- *Realisation of further services*

The realised services are exclusively based on the two largest time slices in micro milling. By the consideration of further processes additional services can be realised and thus fructify new potentials for micromachining. As an example services in the fields of optimizing numerical-control programs or maintenance support could make an effective contribution for process improvement.

- *Improvement of the newly designed services*

During the description of the individual services already their potential for improvement was discussed. Especially for the process monitoring service there should exist extensive possibilities, e.g. to realise a functionality for proactive process control (look-ahead) by integration of a simulation of the cutting process.

- *Integration of the services into an existing service platform*

In the context of this work the evaluated services were only realized as prototypes, whereas for an industrial solution the integration into existing service platforms is necessary.

The developed procedure and the realised intelligent machine-oriented services represent a next step in the development of the key technology micromachining. The realization of further services as well as the enhancement of the already developed services are to follow as the logical consequence of the continuous improvement of technological competence. The integration of the services into existing service platforms creates new potentials for increased added value for manufacturers and customers of micromachining solutions in the future.