

---

# Abschlussbericht

---

Zuwendungsempfänger:  
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT

Förderkennzeichen:  
IN – 6048 / 16IN0525

---

Vorhabensbezeichnung:

**Entwicklung eines kombinierten Hartdreh- und Polierprozesses**  
**Akronym »HardPolish«**

---

Laufzeit des Vorhabens:

01.09.2007 - 31.08.2010 (kostenneutral verlängert bis 31.12.2010)

---

Berichtszeitraum:

01.09.2007 - 31.12.2010

---

---

## Inhaltsverzeichnis

<b>1. Allgemeines .....</b>	<b>3</b>
1.1. Aufgabenstellung und Zielsetzung .....	3
1.2. Voraussetzungen der Durchführung .....	4
1.3. Ablaufplan des Vorhabens .....	4
1.4. Wirtschaftlicher und technischer Hintergrund .....	5
1.5. Stand der Technik / Innovation .....	6
<b>2. Wissenschaftlich-technische Ergebnisse .....</b>	<b>9</b>
2.1. Festlegung von Demonstratoren, Toleranzen, Material, Werkzeuge .....	9
2.2. Entwicklung der Messsysteme zur Messung von Form, Maß und Rauheit.....	11
2.3. Entwicklung der Poliereinheit.....	12
2.4. Entwicklung der hochgenau verstellbaren Y-Achse der Hartdrehmaschine ...	13
2.5. Entwicklung einer B-Achse (Schwenkachse für die Polierspindel).....	13
2.6. Entwicklung einer Parkstation für die optischen Messsysteme .....	14
2.7. Integration der einzelnen Komponenten in das Maschinensystem und Bearbeitungstests .....	15
2.8. Fertigungstests des komplettierten Maschinensystems .....	18
<b>3. Zeitplan .....</b>	<b>21</b>
<b>4. Entwicklung des Verwertungsplans .....</b>	<b>22</b>
<b>5. Verwertung der Ergebnisse .....</b>	<b>22</b>
5.1. Verwertung .....	22
5.2. Veröffentlichungen.....	22
<b>6. Danksagung .....</b>	<b>22</b>

---

## 1. Allgemeines

### 1.1. Aufgabenstellung und Zielsetzung

Das übergeordnete Ziel des Projekts war die Entwicklung und prozesstechnologische Qualifizierung eines integrierten Fertigungssystems zur automatisierten Bearbeitung hochpräziser rotationssymmetrischer Umformwerkzeuge aus Hartmetall oder gehärtetem Stahl mittels Hartdrehen und Polieren in einer Maschine. Hierfür wurden neben einer Poliereinheit auch messtechnische Systeme entwickelt und in eine Hochpräzisionshartdrehmaschine integriert, die einen vollautomatisierten Fertigungsablauf erst ermöglichten. Kernarbeitspunkte des Projekts waren:

- Entwicklung einer Poliereinheit zur Integration in eine Hochpräzisionshartdrehmaschine,
- Entwicklung von Messsystemen zur in-process Messung von Rauheit, Form und Maß beim Hartdrehen,
- Weiterentwicklung des Hartdrehens hinsichtlich der Bearbeitung von speziellen Hartmetallsorten,
- Weiterentwicklung der Werkzeuge zum Hartdrehen von Hartmetall,
- Entwicklung einer Y-Achse zur Integration in eine Hartdrehmaschine zur hochgenauen Höheneinstellung der Drehwerkzeuge,
- Entwicklung einer Datenbank zur Auslegung des Polierprozesses nach dem Hartdrehen,
- Entwicklung der kombinierten Hartdreh-/Polierbearbeitung hinsichtlich bestmöglicher Ergebnisse durch einen Abgleich beider Prozesse aufeinander.

Durch das geplante Fertigungssystem sollte eine Verkürzung der Fertigungszeiten für hochpräzise, rotationssymmetrische Werkzeuge zur Kaltmassivumformung aus gehärtetem Stahl und Hartmetall realisiert werden. Durch die Komplettbearbeitung in einer Aufspannung sollten zudem die Rüst- und Nebenzeiten drastisch reduziert werden, so dass produzierende Unternehmen ihre Produkte erheblich kostengünstiger fertigen können.

Das geplante »HardPolish«-System grenzte sich vornehmlich durch seinen Automatisierungsgrad von nahezu 100 % gegenüber der aktuellen Fertigungskette ab. Diese gliederte sich derzeit in ein Vorbearbeitungsverfahren (Schleifen, Funkenerosion oder Hartdrehen) und ein anschließendes Finish-Verfahren (Polieren). Das Finishen mittels Polieren wurde derzeit manuell auf einer separaten Arbeitsstation durchgeführt, wodurch sowohl geringfügige Abweichungen als auch Ausschussproduktion durch verschiedene Werker auftreten konnten. Das im Projekt zu entwickelnde Fertigungssystem »HardPolish« ermöglichte somit erstmals weltweit die automatisierte, ausschussfreie und reproduzierbare Vor- und Endbearbeitung von hochpräzisen, rotationssymmetrischen Massivumformwerkzeugen in kürzester Zeit.

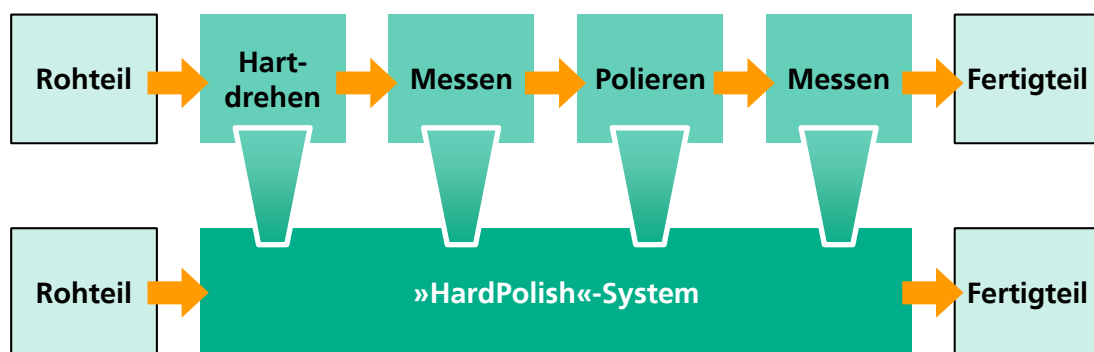


Abbildung 1-1: Schematische Darstellung des Projektziels von »HardPolish«

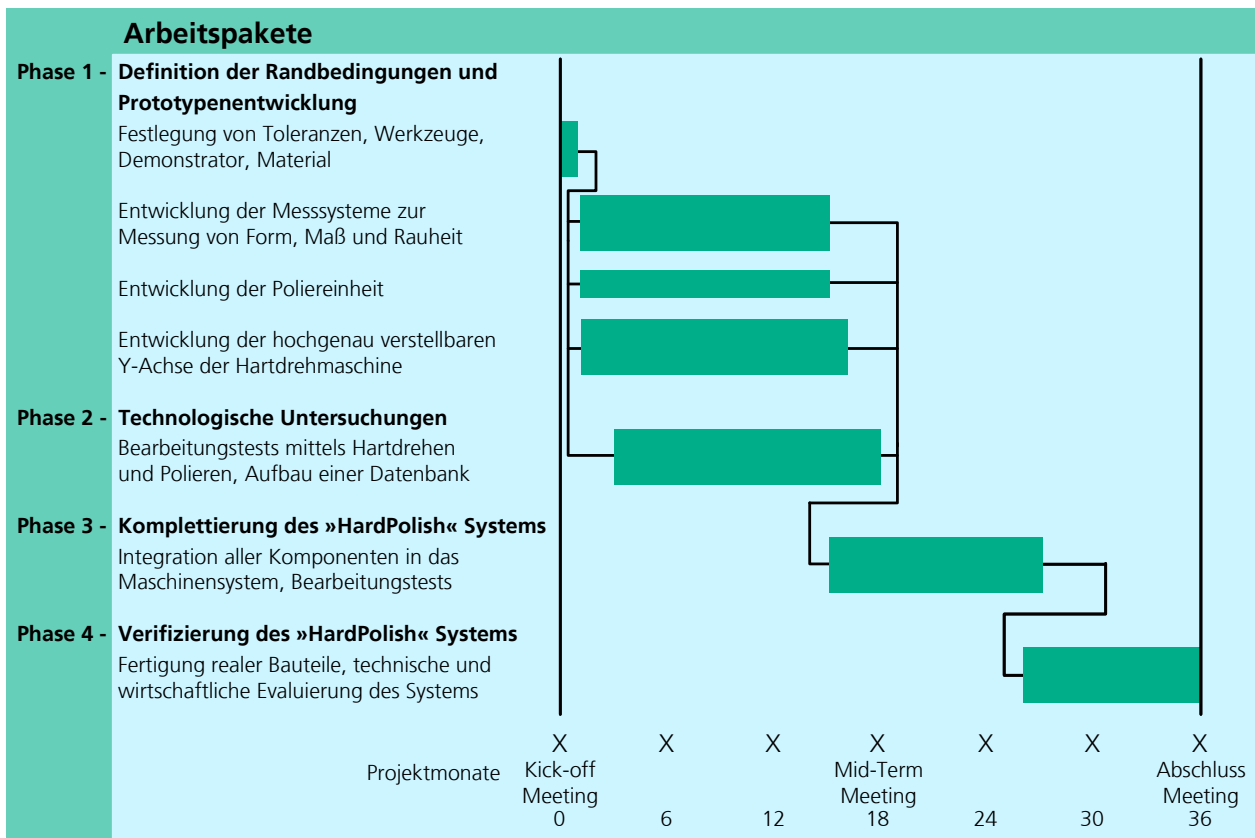
---

## 1.2. Voraussetzungen der Durchführung

Das Konsortium deckte forschungsseitig alle Kompetenzen ab, die für die Entwicklung eines produktfähigen »HardPolish«-Systems notwendig waren. Ebenso war das gesamte fertigungstechnische Know-how vertreten, das für die Prozessoptimierung und damit die Auslegung eines solchen Prototypen hinsichtlich der Prozesssicherheit sowie Erreichbarkeit von geforderten Qualitätsmerkmalen erforderlich war. In das Industriekonsortium waren Hersteller von Messsystemen (Trioptics, FRT) eingebunden, die durch ständige Weiterentwicklung ihrer Produkte auch in kundenspezifischer Hinsicht die für den Erfolg des Projektes erforderliche Flexibilität einbringen konnten. Sie kooperierten bei der Entwicklung mit dem MSR Bremen und banden die Firma Omicron in die Entwicklungsarbeiten des Rauheitsmesssystems mit ein. Weiterhin war ein Werkzeughersteller für Hartdrehwerkzeuge (Mößner) beteiligt, der die Fertigung der entsprechenden Werkzeuge nach Kundenwunsch anbietet und hinsichtlich der Standzeit ständig weiterentwickelt. Hinsichtlich der Polierbearbeitung waren zwei Firmen (SN-Spindeltechnik und Cloeren) im Projekt involviert. SN-Spindeltechnik fungierte hierbei vornehmlich in ihrer Eigenschaft als Spindelhersteller und war für die Entwicklung der zu integrierenden Poliereinheit verantwortlich. Die Firma Cloeren zeichnete für die Auswahl und Auslegung der Polierwerkzeuge und der dazugehörigen Abrasivstoffe sowie der Substrate verantwortlich. Des Weiteren war der Hersteller der Hochpräzisionsharddrehmaschinen der Marke Hembrug ins Konsortium eingebunden. Die technologischen Versuche des Projekts wurden am Fraunhofer IPT auf einer Hembrug Maschine des Typs Slantbed Mikrotorn 100CNC durchgeführt. Somit konnte auf das benötigte maschinenseitige Know-How für die Umsetzung des Projektvorhabens bezüglich der Integration der einzelnen Systeme in den Bearbeitungsraum einer Hartdrehmaschine und deren Anbindung an die Steuerung zurückgegriffen werden. Weiterhin entwickelte Hembrug im Projekt eine Y-Achse, die in die Maschine integriert wurde. Hierdurch wurden die benötigten Einrichtzeiten für die Drehwerkzeuge erheblich reduziert. Die Marktnähe wurde durch die Integration zweier Anwender (Bender und Ceratizit) realisiert. Hierdurch wurde die praxisbezogene Entwicklung des Systems gewährleistet. Darüber hinaus bestanden zahlreiche Kontakte der Forschungspartner zu weiteren potentiellen Anwendern. Diese sollten soweit als möglich in das Projekt einbezogen werden.

## 1.3. Ablaufplan des Vorhabens

Zu Beginn des Vorhabens wurden im Rahmen einer Kick-Off-Veranstaltung die wesentlichen Arbeitspunkte und Verantwortlichkeiten inkl. der Zeitpläne abgestimmt und festgelegt. Eine Übersicht des gesamten Arbeitsplans mit den Hauptaufgaben jeder Phase ist in Abbildung 2 dargestellt.



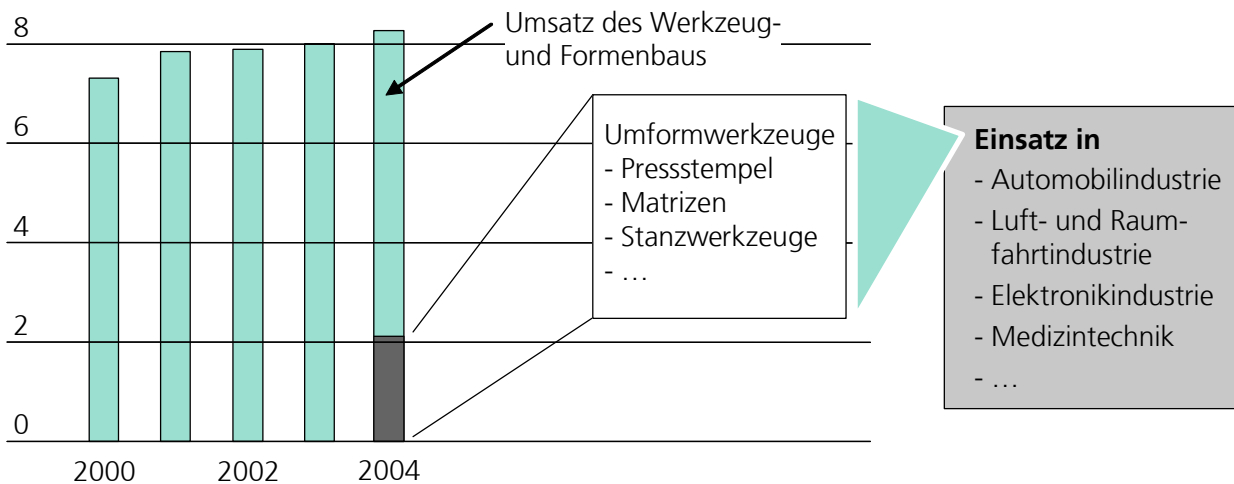
**Abbildung 1-2: Gesamtübersicht Arbeitsplan »HardPolish«**

#### 1.4. Wirtschaftlicher und technischer Hintergrund

Der Werkzeug- und Formenbau stellt einen der wichtigsten Wirtschaftszweige in Deutschland dar. So wurden nach Berechnungen des Verbands Deutscher Maschinen- und Anlagenbauer VDMA allein im Jahr 2004 Präzisionswerkzeuge mit einem Produktionswert von mehr als 8 Mrd. Euro hergestellt (Abbildung 3). Innerhalb dieser Gruppe stellen die Umformwerkzeuge einen wichtigen Anteil dar. Nach Angaben des europäischen Werkzeugbau-Verbands ISTMA betrug der mit Umformwerkzeugen erzielte Umsatz im Jahr 2003 ca. 2 Mrd. Euro. Betrachtet man zusätzlich, dass mit diesen Werkzeugen Produkte gefertigt werden, die in der Automobil-, der Luft- und Raumfahrtindustrie, der Medizin und der Elektronikindustrie Verwendung finden, so geht die Bedeutung der umformtechnischen Industrie weit über die oben aufgeführten Zahlen hinaus.

Die überwiegende Anzahl der Unternehmen im Bereich der Umformtechnik sind kleine und mittelständische Unternehmen (KMU). Diese sehen sich einem Markt gegenüber, der bei sinkenden Preisen ständig steigende Anforderungen an Oberflächengüte und Formgenauigkeit stellt. Berücksichtigt man zusätzlich die immer kürzer werdenden Produktentwicklungszeiten, so ist die Folge dieser Entwicklung ein steigender Aufwand in der Fein- und Endbearbeitung der z.T. sehr geometriekomplexen Bauteile. Dieser Umstand wird insbesondere in der Polierbearbeitung deutlich, wo nach wie vor sämtliche Operationen manuell durchgeführt werden. Die Konsequenz ist eine Verlagerung nicht nur einzelner Fertigungsschritte, sondern kompletter Fertigungsstätten in Niedriglohnländer einhergehend mit einem Abbau von Industriearbeitsplätzen in Deutschland. Um diese Entwicklung zu stoppen, müssen neue effizientere Bearbeitungstechnologien entwickelt und in die Industrie implementiert werden. Es sind insbesondere automatisierte Lösungen gefordert, um den Anteil der manuellen Arbeiten zu verringern und teure nicht wertschöpfende Tätigkeiten zu eliminieren.

10

**Umsatz in Mrd. Euro**

**Abbildung 1-3: Umsatz des Werkzeug- und Formenbaus 2004 und Anteil der Umformwerkzeuge nach VDMA**

### 1.5. Stand der Technik / Innovation

Heutzutage werden rotationssymmetrische Umformwerkzeuge aus gehärtetem Stahl oder aus Hartmetallen hergestellt, die durch Funkenerosions- oder Schleifprozesse in ihre Endkontur gebracht werden. Beide Prozesse gestalten sich jedoch extrem aufwändig, da durch die geringen Zeitspannungsvolumina lange Prozesszeiten die Konsequenz sind. Wird das Schleifen der Funkenerosion gegenübergestellt, können hierfür kürzere Herstellungszeiten notiert werden. Eine weitere und kürzere Alternative bietet hier die Zerspanung mit geometrisch definierter Schneide auf hochsteifen Maschinen. So haben bisherige Untersuchungen zum Hochpräzisionsharddrehen gezeigt, dass mit dieser Technologie eine Zeitersparnis von bis zu 75 % erzielt werden kann und diese somit eine wirtschaftliche Alternative zur herkömmlichen schleiftechnischen Bearbeitung darstellt.

Die Technologie des Hochpräzisionsharddrehens ist vornehmlich durch seine Flexibilität und die Fertigung von klein- und mittelgroßen Serien charakterisiert. Die erreichbaren Form- und Maßgenauigkeiten genügen zwar in den meisten Fällen den ständig steigenden Anforderungen, doch gerade in der Bearbeitung konturkomplexer Stirnflächen, wobei hohe Anforderungen an die Form- und Maßgenauigkeit des Bauteils gestellt werden, stoßen die mit dem Hochpräzisionsharddrehen erzielbaren Genauigkeiten häufig an ihre Grenzen. Die Gründe liegen vor allem im Werkzeugverschleiß, der gerade bei der Bearbeitung von Konturelementen starke Abweichungen von der Sollkontur verursachen kann. Manuelle Korrekturen der Werkzeugdaten sind daher notwendig, um die geforderten Toleranzklassen zu erreichen. Erschwerend kommt hinzu, dass durch den zunehmenden Einsatz von Hartmetall als Material für Umformwerkzeuge der Werkzeugverschleiß, begründet durch die gegenüber gehärteten Stählen sehr viel höhere Härte, besonders ausgeprägtes Verhalten zeigt.

Einen weiteren Punkt stellt die erreichbare Oberflächengüte dar. Zwar können durch das Präzisionsharddrehen gegenüber Schleifverfahren vergleichbare Oberflächengüten erzielt werden, dennoch ist zum Erfüllen der Bauteilrestriktionen eine poliertechnische Nachbehandlung notwendig. Diese wird bisher, selbst an einem Hochlohnstandort wie Deutschland, überwiegend manuell durchgeführt. Die Ursachen hierfür sind insbesondere in dem geringen Prozessverständnis zu suchen. Im Gegensatz zu herkömmlichen Zerspanprozessen, wie z.B. dem Drehen, ist der Polierprozess druck- und verweilzeitgesteuert. Kleinste Veränderungen am Anpressdruck oder an der Verweilzeit haben unmittelbar Einfluss auf das Abtragprofil und damit auf die Ausprägung der Oberflächentopografie.

---

Eine Automatisierung dieses Prozesses scheiterte bisher zum Einen daran, dass die verwendeten Maschinensysteme nicht die geforderten Freiheitsgrade aufwiesen und eine überlagerte Bewegung ausführen konnten. Diese ist jedoch zur Erzielung der geforderten hohen Oberflächengüten notwendig. Zum Anderen sind Maschinensteuerungssysteme, die eine verweilzeitgesteuerte Bearbeitung ermöglichen, derzeit nicht am Markt verfügbar und Gegenstand diverser Forschungsarbeiten. Weiterhin existiert insbesondere bei Hartmetallen bislang wenig systematisches Wissen über die tatsächlichen Abtragmechanismen, wodurch der Prozess im hohen Maß von der Erfahrung der Fachkraft abhängt und damit starken Qualitätsschwankungen unterliegt. Die derzeit durchgeführten manuellen Polieroperationen sind daher durch zahlreiche Iterationsschleifen und eine geringe Reproduzierbarkeit charakterisiert.

Zwar existieren automatisierte Polierprozesse bereits in anderen Branchen, wie der Feinoptik oder der Halbleitertechnik. Diese sind jedoch aufgrund der in diesen Branchen verwendeten anderen Materialien (Glas oder monokristallines Silizium) sowie des im Vergleich zum Werkzeug- und Formenbaus relativ einfachen Geometriespektrums (sphärisch oder plan) nicht auf den hier vorliegenden Fall übertragbar. Darüber hinaus sind die Qualitätsanforderungen an die Reinheit und Schädigungsfreiheit der Oberflächen sowie an die Formgenauigkeit der Oberflächenkontur derart hoch, dass sie nur von hochausgebildeten Personal erzielt werden können und weit über die Anforderungen des Werkzeug- und Formenbaus hinausgehen. Für das hier anvisierte Produktspektrum sind vielmehr automatisierte Finishinglösungen gefragt, die schnell und flexibel in Abhängigkeit des Vorbearbeitungszustands die Oberfläche polieren und damit die Oberflächengüte erhöhen, ohne die zuvor erzielte Formgenauigkeit zu beeinträchtigen. Um Zeit- und Kosten zu sparen, müssen diese automatisierten Polierlösungen in herkömmlichen Hartdrehmaschinen integriert sein, so dass das Bauteil in einer Aufspannung durch einen Hartdrehprozess fein- und durch den anschließenden Polierprozess endbearbeitet werden kann.

Vor diesem Hintergrund ergibt sich als Innovation des »HardPolish«-Vorhabens die Entwicklung einer verweilzeitgesteuerten Poliereinheit inkl. einer adaptiven Steuerung, die in Abhängigkeit der Oberflächengüte die Polierdauer bestimmt. Diese wird in eine Hochpräzisionshartdrehmaschine integriert, so dass eine kombinierte Hartdreh- und Polieroperation in einer Aufspannung automatisiert durchgeführt werden kann. Zur optimalen zeitlichen Auslegung der nachfolgenden Polieroperation wird die Rauheit beim Hartdrehen durch ein neu auszulegendes in die Maschine integriertes Messsystem auf Basis von Laserstreulichtverfahren gemessen (in-process). Je nach Rauheitszielvorgabe wird die Polierdauer durch einen Abgleich mit einer durch Fertigungsversuche erstellten Datenbank ermittelt und der abschließende Polierschritt zeit- und ergebnisoptimal ausgeführt.

Darüber hinaus ist zum Erreichen eines zuverlässigen Hartdrehprozesses hinsichtlich Form und Maß eine Fehlerkompensation mit Hilfe von Messsystemen notwendig, um manuelle und zeitaufwändige Messschritte zu eliminieren. Dazu wird ein weiteres optisches Messsystem auf Basis von Specklekorrelationsverfahren für das vorliegende Produktspektrum entwickelt und in die Maschine integriert. Das Messsystem wird die ermittelten Abweichungen der Werkstücke zum Soll-Ist-Vergleich in die Steuerung der Maschine zurückführen, wodurch Prozessinstabilitäten aufgrund von Werkzeugverschleiß frühzeitig erkannt und kompensiert werden können. Das komplette System wird folgende Vorteile in sich vereinen:

- Hochpräzisionshartdrehmaschine, komplett hydrostatisch gelagert (Maschinenachsen, Spindel) zur Gewährleistung höchster Fertigungsgenauigkeiten für die Bearbeitung von gehärtetem Stahl und insbesondere Hartmetall,
- speziell für die harddrehtechnische Bearbeitung von Hartmetallen entwickelte Zerspanwerkzeuge,
- eine Poliereinheit zur Realisierung einer verweilzeitgesteuerten, automatisierten Poliebearbeitung mit definierten Anpressdrücken inkl. einer auf Polierversuchen aufgebauten Technologiedatenbank,
- ein optisches Messsystem auf Basis von Laserstreulichtmessungen für die Erfassung der Oberflächenrauheit im Nanometerbereich zur optimalen Auslegung der nachfolgenden Polieroperation,

- ein optisches Messsystem auf Basis von Specklekorrelationsverfahren zur Erfassung der Form- und Maßtoleranzen im Submikrometerbereich inkl. einer Ankopplung der Messdaten an die Maschinensteuerung zur Kompensation der Maß- und Formfehler.

Durch die Kombination beider Fertigungsverfahren in einer Maschine in Verbindung mit der automatisierten Fehlerkompensation, der in-process Rauheitsmessung sowie der daraus folgenden Auslegung der Polierbearbeitung wird eine erhebliche Zeitersparnis realisiert. Vornehmlich werden hierbei die bei der aktuellen Fertigungskette anfallenden Nebenzeiten beim Wechsel der Arbeitsstationen eliminiert. Weiterhin wird durch die automatisierte Auslegung der Polieroperation der abschließende Polierschritt nur noch so lange wie nötig ausgeführt. Eine erste Grobkalkulation der zu erwartenden Zeitersparnis lässt sich mit ca. 25% beziffern.

Abbildung 4 zeigt eine qualitative Gegenüberstellung der aktuellen zur geplanten Fertigungskette mit dem »HardPolish«-System.

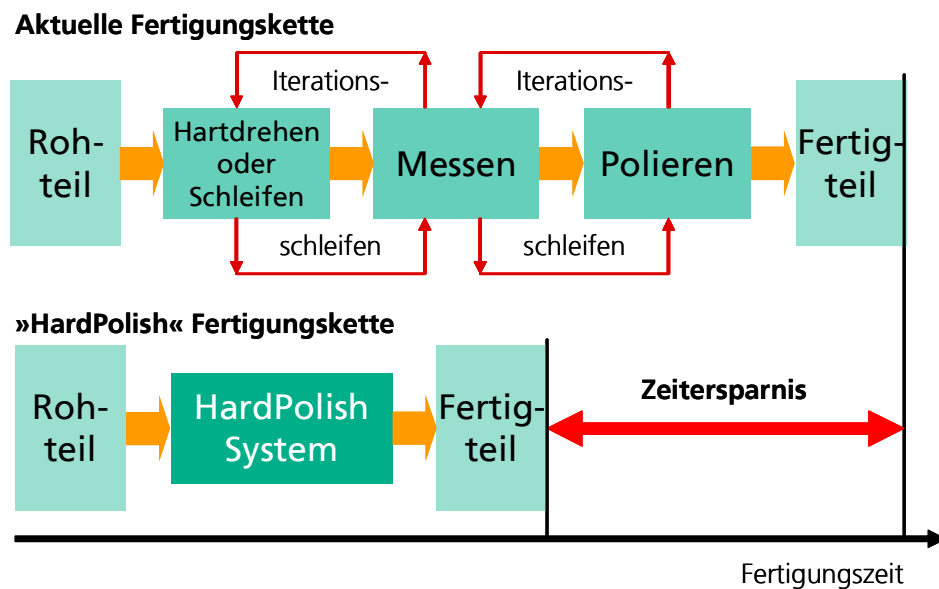


Abbildung 1-4: Qualitativer Vergleich der aktuellen und der geplanten Fertigungskette



## 2. Wissenschaftlich-technische Ergebnisse

### 2.1. Festlegung von Demonstratoren, Toleranzen, Material, Werkzeuge

Durch die Endanwender des Konsortiums (Cerazit, Bender) wurden Vorschläge für die zu bearbeitenden Demonstratoren inklusive der zu untersuchenden Materialien (Hartmetalle) gemacht. Abbildung 2-1 zeigt die technischen Zeichnungen der festgelegten Demonstratoren.

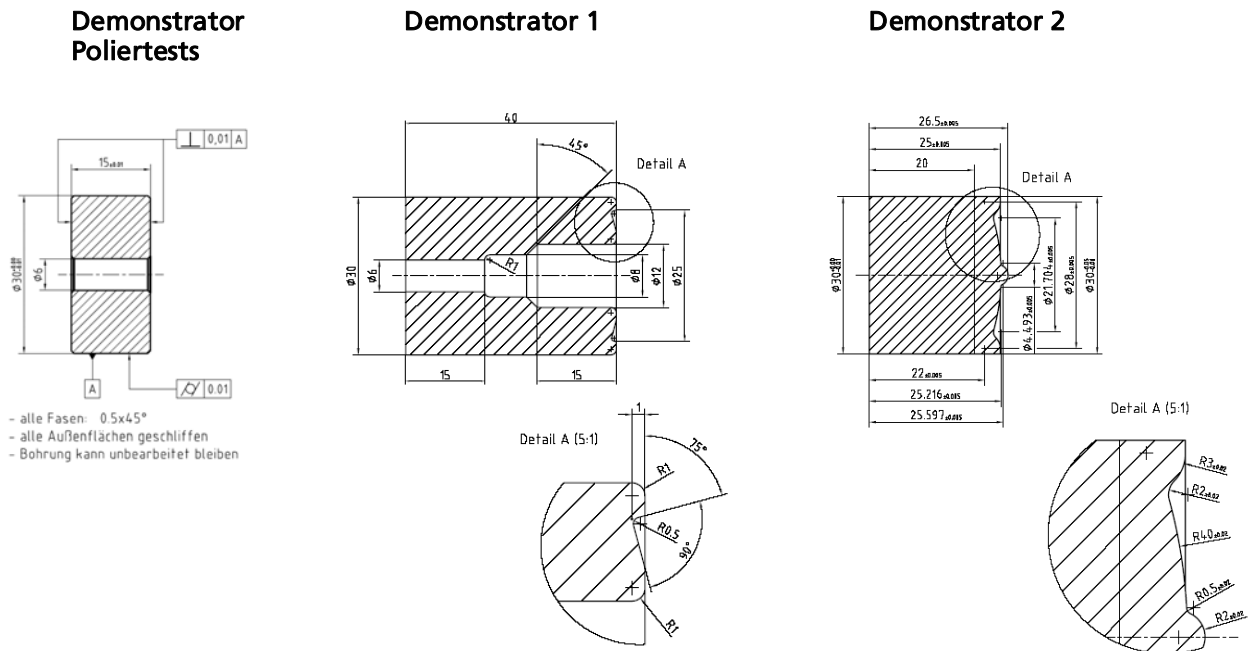


Abbildung 2-1 Demonstratoren

Die Demonstratoren 1 und 2 sind an reale Teile der Endanwender angelehnt und dienen im Projekt der Qualifizierung des zu entwickelnden HardPolish-Systems. Der Demonstrator Poliertests wird dazu verwendet, erste sequentielle Hartdreh- und Poliertests durchzuführen. Hierbei werden unterschiedliche Eckenradius-Vorschub-Kombinationen zur Herstellung verschiedener Oberflächentopographien durch das Hartdrehen eingesetzt. In Folge werden diese Oberflächen auf einer externen Station mit herkömmlichen Parametern poliert und messtechnisch untersucht. Somit können durch diese Voruntersuchungen geeignete Parameter für den kombinierten Prozess identifiziert werden.

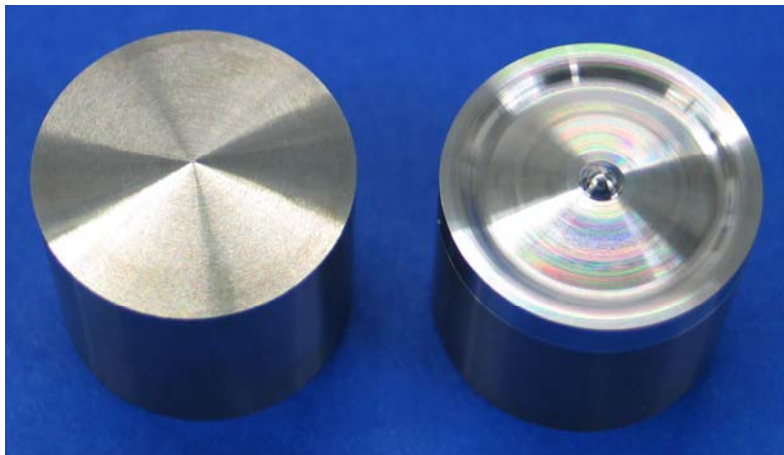
In Tabelle 2-1 sind die ausgewählten Hartmetallsorten mit ihren Legierungselementen und technischen Daten sowie die jeweilig für die Herstellung und Zurverfügungstellung zuständigen Projektpartner dargestellt.

Testmuster Nr.	Sorte	WC	Zusammensetzung [%]				Härte		Dichte [g/cm³]	Korngröße WC [µm]	Partner
			TIC + Ta(Nb)C	Co	Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	CrNi	HV 30	HRA			
1	G10	93,25	0,25	6,5	-	-	1550	-	14,86	2,5	Bender
2	G20	87,55	0,45	12	-	-	1275	-	14,25	2,5	
3	G10	93,35	-	6,5	0,15	-	-	91,6	14,9	1,0-3,0	
4	G20	87,5	-	12	0,5	-	-	89,7	14,22	1,0-2,0	
5	MG18	90	-	10	-	-	1680	-	-	0,5-0,8	Cerazit
6	KR15	91,5	-	-	-	8,5	1760	-	-	0,5-0,8	
7	HC20	94	-	6	-	-	1640 (HV10)	92,1	14,95	0,8-1,3	
8	BC30	88	-	12	-	-	1330 (HV10)	89,7	14,3	0,8-1,3	

Tabelle 2-1 Ausgewählte Hartmetallsorten

Aufgrund der ausgewählten Materialien und der Demonstratorgeometrien in Verbindung mit den festgelegten Toleranzen wurde als Schneidstoff für die Untersuchungen Dickschicht-CVD-Diamant ausgewählt und eine entsprechende Schnittstrategie zur Bearbeitung der Demonstratoren festgelegt. Hierfür wurden Schneiddeckenradien der Größe  $r_s = 1,2$  mm,  $r_s = 0,8$  mm und  $r_s = 0,4$  mm ausgewählt. Insbesondere bei der Bearbeitung der zweifach abgesetzten Bohrung von Demonstrator 1 sind Sonderwerkzeuge erforderlich, deren Herstellung aufgrund der großen Auskraglänge und geforderten Steifigkeit besondere Herausforderungen an die Firma Möbner stellen.

Im weiteren Projektverlauf wurde eine Prozessstrategie für das Hartdrehen von Demonstrator 2 festgelegt und angewendet. Abbildung 2-2 zeigt ein Rohteil und einen fertig gedrehten Demonstrator 2.

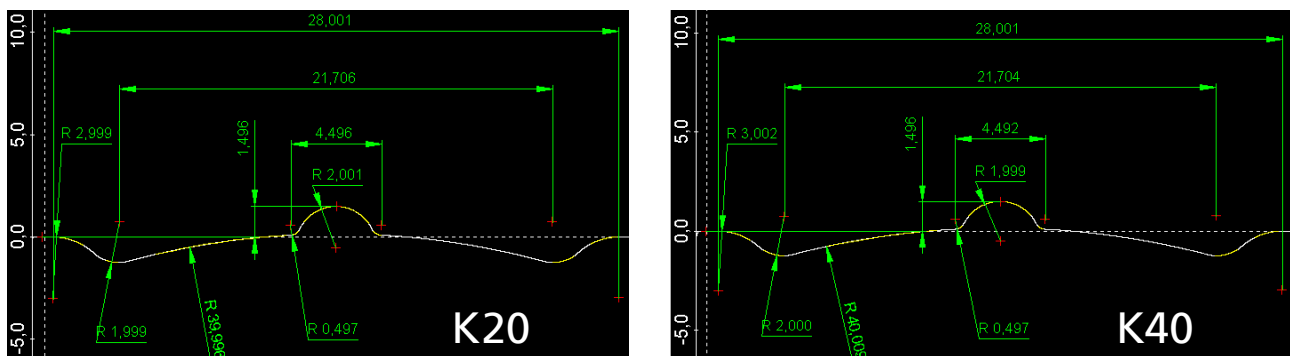


**Abbildung 2-2 Demonstrator 2 (Rohteil und fertig gedreht)**

Die Rauheitsergebnisse der Hartdrehversuche zeigten Abweichungen zu den in den Vorversuchen erreichten Oberflächenkennwerten. Als Gründe hierfür wurden folgende Punkte identifiziert:

- die Bearbeitung verschiedener Materialien mit nur einer Schneide, dadurch wechselnde Schneidkantenbelastung und in Folge kein kontinuierlicher Verschleißfortschritt
- ungünstige Schnittstrategie (Planeinstich) in Verbindung mit einem zu großen Planschlag des Bauteils, hierzu wird die Schnittstrategie in den folgenden Versuchen entsprechend angepasst
- Schartigkeit der Schneidkante, dadurch ungünstige Schnittbedingungen, erhöhter Verschleißfortschritt bis hin zu Ausbrüchen an der Schneidkante.

Der gemessene Werkzeugverschleiß war bei allen Schneiden im normalen Bereich. Die Anforderungen an Form- und Maßgenauigkeit der Bauteile konnten in allen Fällen eingehalten werden. Exemplarisch für alle Ergebnisse zeigt Abbildung 2-3 die Formmessschiebe zweier Demonstratoren.

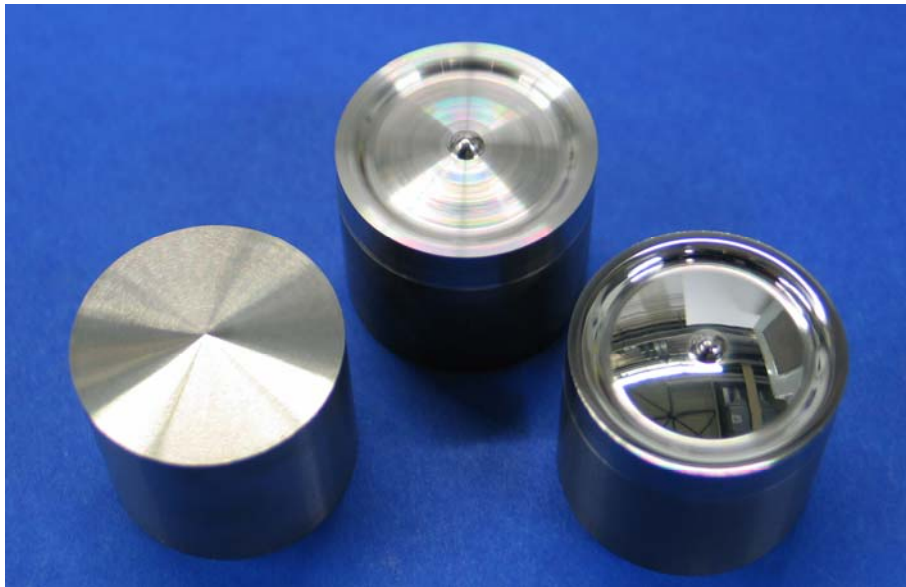


**Abbildung 2-3 Formmessschiebe Demonstrator 2**

---

Die durch Hartdrehen gefertigten Demonstratoren wurden nachträglich mittels manuellem Polieren nachbearbeitet. Für das Handpolieren wurden Werkzeuge mit einem dem PT Flor ähnlichen Poliermittelträger und einer Diamantpaste (3 µm) eingesetzt. Der Einfluss der betrachteten Hartmetallsorten auf das Abtragverhalten und die sich ausbildende Oberflächegüte ist gering. Folglich können zunächst alle Sorten mit einem Poliersystem bearbeitet werden. Alle HM-Sorten zeigten bei den eingesetzten Poliersystemen hohe Oberflächengüten. Ein mehrstufiger Polierprozess ist wahrscheinlich nicht notwendig. Der wesentliche Einfluss auf Polierverhalten ist in der dynamischen Veränderung des Poliermittelträgers zu sehen. Hierbei sind die Poliermittelkonzentration und die Anreicherung mit Polierabtrag im Poliermittelträger als Ursachen für einen nicht oder schwer zu reproduzierenden Polierprozess zu sehen.

Nach dem Polieren wurden die Demonstratoren nochmals einer Formmesseung unterzogen. Hierbei konnte keine wesentliche Veränderung hinsichtlich Form und Maß festgestellt werden. Somit waren die Maße aller Bauteile innerhalb der geforderten Toleranzen. Abbildung 2-4 zeigt ein Rohteil sowie einen gedrehten und einen polierten Demonstrator.



**Abbildung 2-4 Demonstrator 2 (Rohteil und fertig gedreht)**

In einem Zwischentreffen mit den Partnern Hembrug, SN Spindeltechnik, BIMAQ und Fraunhofer IPT wurde der für die zu integrierenden Messsysteme und die Polierspindel zur Verfügung stehende Bau- raum festgelegt.

## **2.2. Entwicklung der Messsysteme zur Messung von Form, Maß und Rauheit**

Für die zu entwickelnden Messsysteme zeichnete das MAQ (zu Beginn des Vorhabens: BIMAQ) aus Bremen verantwortlich. Die zu diesem Punkt durchgeführten Untersuchungen bzw. Erkenntnisse sind in den Berichten

[IN-6048\\_HardPolish\\_Zwischenbericht\\_BIMAQ\\_080411.pdf](#)

[IN-6048\\_HardPolish\\_Zwischenbericht\\_BIMAQ\\_090330.pdf](#)

[IN-6048\\_HardPolish\\_Zwischenbericht\\_BIMAQ\\_100427.pdf](#)

sowie im Abschlussbericht

[IN-6048\\_HardPolish\\_Abschlussbericht\\_MAQ\\_110524.pdf](#)

beschrieben.

### 2.3. Entwicklung der Poliereinheit

Für diesen Arbeitspunkt zeichnet vornehmlich die Firma SN Spindeltechnik verantwortlich. Das Lasten-/Pflichtenheft wurde auf Basis der festgelegten Demonstratoren aufgestellt und ist in Abbildung 2 dargestellt.

Ein erstes Konzept wird von SN Spindeltechnik entwickelt und auf dem nächsten Projekttreffen vorgestellt. Eine Besonderheit stellt der Werkzeugrevolver für die Polierwerkzeuge dar. Dies ist für die Erhaltung der Flexibilität des HardPolish-Systems bei gleichzeitiger Sicherung der vollständigen Automatisierbarkeit erforderlich. Dies wird insbesondere dadurch begründet, dass ein herzustellender konturkomplexer Hartmetallstempel (s. Demonstratoren 1 und 2, Abbildung 2-1) meist nicht mit nur einem Werkzeug poliert werden kann und entsprechend ein Werkzeugwechsel erforderlich ist. Dieser sollte in Bezug auf den anvisierten Automatisierungsgrad von nahezu 100 % ebenfalls automatisch durchgeführt werden können.

Bevor die Poliereinheit vollständig in die Maschine integriert und an die Steuerung angeschlossen ist, wird für die ersten Tests ein externes Steuergerät (Notebook) und eine geeignete Stromversorgung bzw. ein geeigneter Frequenzumrichter eingesetzt.

Hinsichtlich der Schwenkbarkeit der Poliereinheit wird SN Spindeltechnik eng mit Hembrug kooperieren und eine Lösung erarbeiten.

#### ■ Lasten-/Pflichtenheft für die Poliereinheit (Basis: Restriktionen der Demonstratoren)

- zwischen 0° und 90° zur Hauptspindel der 100CNC
    - frei schwenkbar
    - angetrieben
    - über Maschinensteuerung anwählbar
  - Magazin für automatischen Werkzeugwechsel der Polierwerkzeuge (Werkzeugrevolver)
  - Standardwerkzeugaufnahme
  - Zuführung des Poliermittels durch die Polierwerkzeuge
    - Drehdurchführung bei externem Reservoir und flüssigem Poliermittel
    - Kolben bei Werkzeugreservoir und Polierpasten
  - Kraft- bzw. Drucksteuerung axial und radial möglich
  - mögliche Konzepte zum Druckaufbau
    - hydraulisch
    - pneumatisch
    - mechanisch
  - Spritzschutz für flüssige Poliermittel
- #### ■ Technische Daten
- |                                       |            |
|---------------------------------------|------------|
| – maximale Drehzahl:                  | 6000 1/min |
| – Rundlaufgenauigkeit:                | ≤ 5 µm     |
| – kraft- bzw. druckgesteuert          | ≥ 2 bar    |
| – minimale Spindelleistung            | ca. 150 W  |
| – maximale Auskraglänge der Werkzeuge | 60 mm      |

**Abbildung 2-5 Lasten-/Pflichtenheft der Poliereinheit**

Ein erstes Konzept wurde von SN Spindeltechnik entwickelt und im Rahmen des anvisierten Projekttreffens vorgestellt. Die Polierspindel lag dem Fraunhofer IPT vor und konnte in Zusammenarbeit mit Hembrug im Rahmen der weiteren Umbaumaßnahmen (s. Kapitel 2.7) der Maschine integriert werden.

Der Werkzeugrevolver für die Polierwerkzeuge ist zunächst nicht entwickelt worden, da zuerst Fertigungsversuche mit der Polierspindel durchgeführt werden müssen, um mögliche Änderungen der Auslegung der Polierspindel ohne größeren Aufwand realisieren zu können. Liegt die finale Polierspindel vor, wird der Werkzeugrevolver an das dann bestehende System angepasst (entwickelt, gefertigt und montiert). Dieses Polierwerkzeugwechselsystem ist für die Erhaltung der Flexibilität des HardPolish-

Systems bei gleichzeitiger Sicherung der vollständigen Automatisierbarkeit erforderlich. Dies wird insbesondere dadurch begründet, dass ein herzustellender konturkomplexer Hartmetallstempel (s. Demonstratoren 1 und 2, Abbildung 2-1) meist nicht mit nur einem Werkzeug poliert werden kann und entsprechend ein Werkzeugwechsel erforderlich ist. Dieser sollte in Bezug auf den anvisierten Automatisierungsgrad von nahezu 100 % ebenfalls automatisch durchgeführt werden können.

## 2.4. Entwicklung der hochgenau verstellbaren Y-Achse der Hartdrehmaschine

Das Pflichtenheft für die höhenverstellbare Y-Achse ist in Abbildung 2-6 dargestellt. Hierzu wird Hembrug ein Konzept ausarbeiten und auf dem nächsten Projekttreffen präsentieren.

- Pflichtenheft für die justierbare Y-Achse
  - Höhenverstellung
    - Bereich  $\pm 1 \text{ mm}$
    - Genauigkeit  $\pm 0,1 \text{ }\mu\text{m}$
  - Realisierung der Höhenverstellung und der Achsklemmung
    - piezoaktorisch
    - hydraulisch
    - pneumatisch
  - Erreichung der für den Hartdrehprozess notwendigen Steifigkeit

Abbildung 2-6 Pflichtenheft für die höheneinstellbare Y-Achse

Für die höhenverstellbare Y-Achse ist seitens Hembrug eine konstruktive Detaillierung (Finalisierungsgrad: 90%) durchgeführt worden und auf dem dritten Projekttreffen vorgestellt worden. Die Fertigung der Komponenten begann, sobald die konstruktive Detaillierung final abgeschlossen war.

Die höhenverstellbare Y-Achse ist seitens Hembrug konstruktiv detailliert und gefertigt worden.

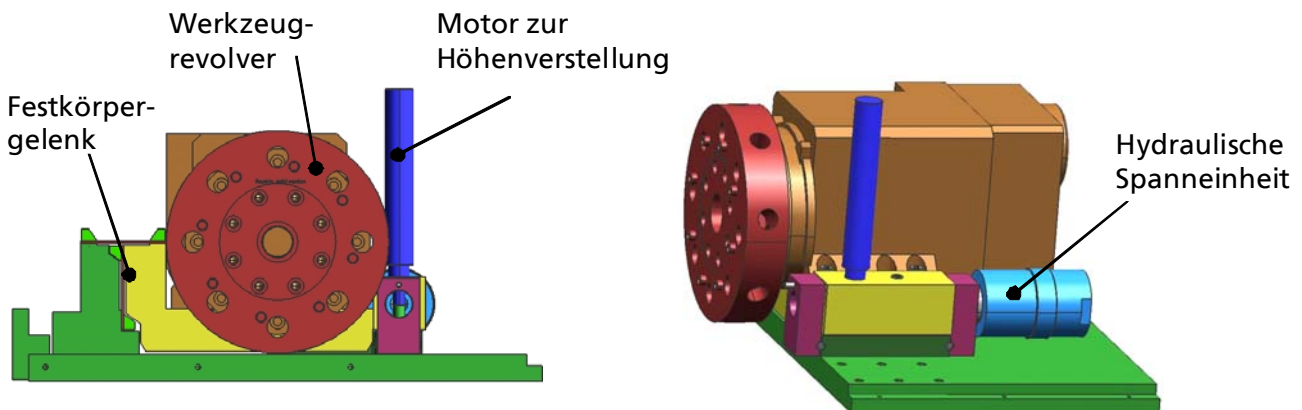
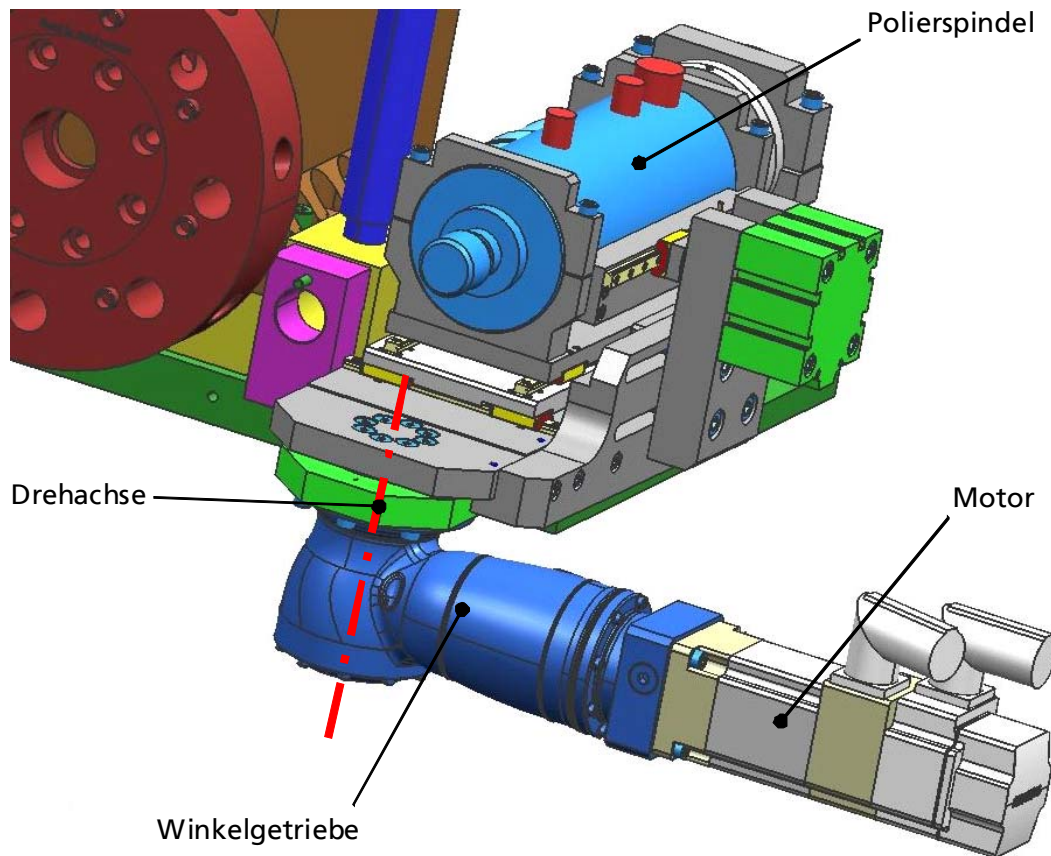


Abbildung 2-7: 3D-Modell der konstruktiven Auslegung der Y-Achse

## 2.5. Entwicklung einer B-Achse (Schwenkachse für die Polierspindel)

Auf dem Projekttreffen im Oktober 2008 wurde vom Konsortium beschlossen, eine Schwenkachse (B-Achse) für die Polierspindel zu entwickeln. Hierdurch soll gewährleistet werden, konturkomplexe Bauteile mit unterschiedlichen Anstellwinkeln (Polierachse zu der zu polierenden Oberfläche) bearbeiten zu können. Hierdurch wird eine größere Flexibilität des gesamten Kombinationsprozesses erreicht. Diese Entscheidung bildet ein zusätzliches Arbeitspaket zum ursprünglichen Arbeitsplan.

Hinsichtlich der Schwenkbarkeit der Poliereinheit wurde in einem Zwischentreffen mit SN Spindeltechnik, Hembrug und dem Fraunhofer IPT ein Grobkonzept entwickelt, welches durch Hembrug detailliert werden sollte. Aufgrund von Kapazitätsproblemen seitens Hembrug konnten die zur Entwicklung der B-Achse erforderlichen Arbeiten jedoch nicht im vorher festgelegten Zeitrahmen durchgeführt werden. Hierdurch entstand ein Verzug gegenüber dem ursprünglichen Arbeitsplan von ca. 3 Monaten. Um weitere Verzögerungen weitgehend auszuschließen, wurde die Entwicklung und Detaillierung sowie die Fertigung der einzelnen Komponenten der B-Achse vom Fraunhofer IPT durchgeführt.

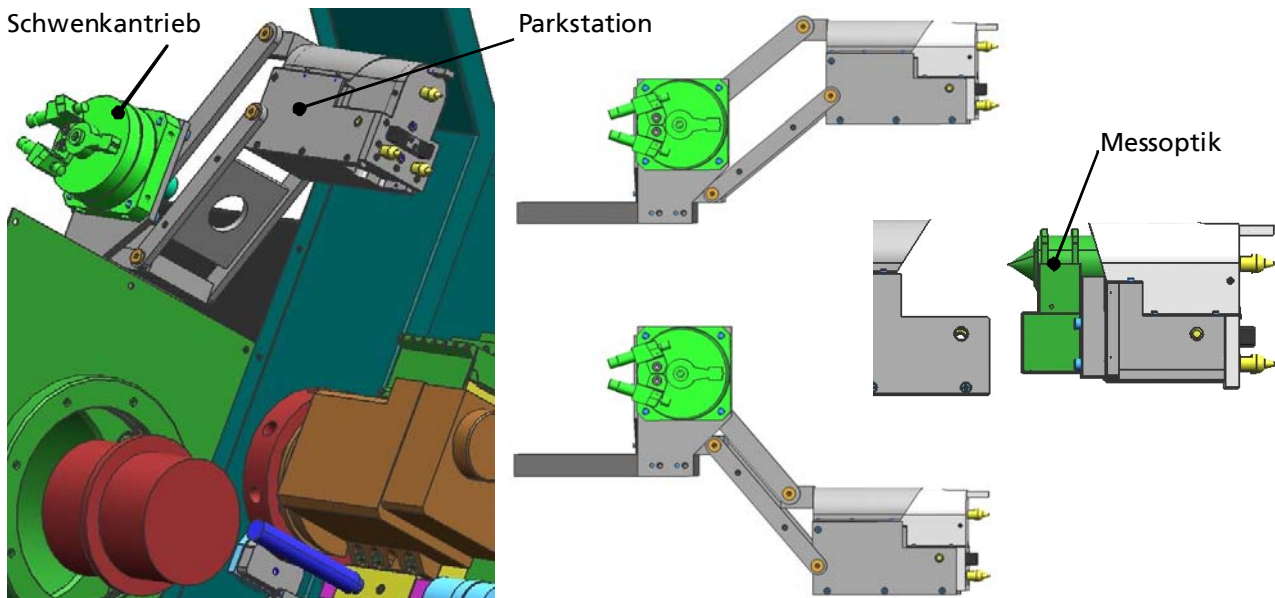


**Abbildung 2-8: 3D-Modell der konstruktiven Auslegung der B-Achse inklusive Polierspindel**

## 2.6. Entwicklung einer Parkstation für die optischen Messsysteme

Für den Einsatz der vom MAQ aus Bremen entwickelten Messsysteme ist eine Parkstation erforderlich, welche die Messsysteme während den spanenden Bearbeitungen (Harddrehen, Polieren) in einer Parkposition fixiert und vor Abfallprodukten der Bearbeitungen (Späne, Polierschlamm) schützt. Nach der Harddrehbearbeitung wird die Einheit, bestehend aus Greifersystem und Messköpfen in den Bearbeitungsraum eingeschwenkt und an den Werkzeugrevolver übergeben. Nach der Übergabe schwenkt die Parkstation aus dem Bearbeitungsraum und die Messungen werden ausgeführt. Hiernach schwenkt die Parkstation erneut ein, die Messeinheit wird wieder übergeben und schwenkt zurück in die Parkposition.

Für die Entwicklung und Fertigung der Parkstation nebst Messeinheit mit Greifersystem war das Fraunhofer IPT verantwortlich.



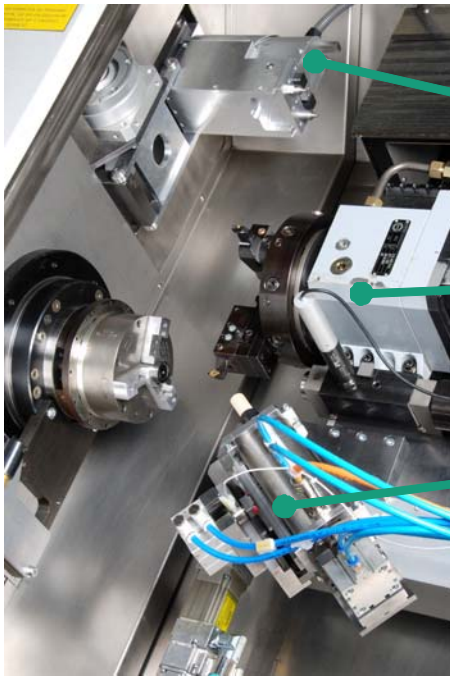
**Abbildung 2-9: 3D-Modell der konstruktiven Auslegung der Schwenkeinheit inklusive Messoptik**

## **2.7. Integration der einzelnen Komponenten in das Maschinensystem und Bearbeitungstests**

Sämtliche Entwicklungen und Fertigungen der zusätzlichen Komponenten (Messsysteme, Poliereinheit mit B-Achse, höhenverstellbare Y-Achse, Parkstation) sind abgeschlossen. Der darauf folgende Arbeitspunkt der Integration der einzelnen Komponenten in die Hochpräzisionshardtdrehmaschine »Hembrug 100CNC« ist hinsichtlich der Poliereinheit mit B-Achse, der höhenverstellbaren Y-Achse sowie der Parkstation ebenfalls abgeschlossen. Die Inbetriebnahme und Anbindung an die Steuerung der jeweiligen Komponenten wurde auch durchgeführt und können mittels des CNC-Bearbeitungsprogramms angesprochen und gesteuert werden. Die Funktionalität des neuen Bearbeitungssystems wurde anhand von ersten Bearbeitungstests geprüft.

Die Integration der Messsysteme hat einen additiven Charakter und umfasst eher Arbeiten im kleineren Umfang an der Maschine und wird nach der Finalisierung der Funktionalität des Bearbeitungssystems in Zusammenarbeit mit dem MAQ aus Bremen durchgeführt.

Der ursprüngliche Zeitrahmen sah vor, die mechanischen Komponenten (Y-Achse, B-Achse, Poliereinheit) bis September 2009 in die Maschine integriert zu haben. Aufgrund der Verzögerungen hinsichtlich der B-Achse und weiterer Kapazitätsprobleme beim Umbau der Maschine ist die Integration inklusive der Inbetriebnahme erst Ende April 2010 erfolgt. Diese Integration umfasste umfangreiche Umrüstungs- und Umbauarbeiten der bestehenden Maschine.



Schwenkarm in Parkposition mit Messkopf und optischen Messmittel für Form und Rauheit, steuerbar über M-Befehle

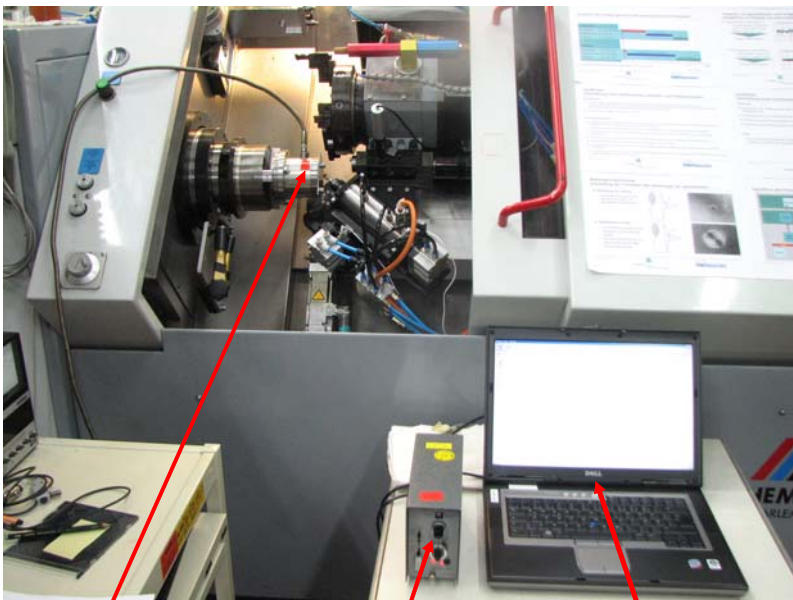
Höhenverstellbarer Werkzeugrevolver (Y-Achse), steuerbar über externen Rechner

Polierspindel inklusive Kraftregelung, steuerbar über M-Befehle

**Abbildung 2-10: HardPolish System**

Nach der Integration aller Komponenten in die Maschine wurde die Kraftregelung für die Polieroperation entwickelt. Die folgenden Abbildungen zeigen das Vorgehen hierfür und die erarbeiteten Erkenntnisse und Ergebnisse.

Zunächst wurden die Regelparameter der Kraftregelung ermittelt



Kraftmessdose

Messverstärker

Messrechner

**Versuchsziel:**

- Überprüfen der Kraftanzeige an der Maschine
- Ermittlung der Auswirkungen der einzelnen Regelparameter
- Messen der Regelzeit
- Ermittlung von optimalen Parametern für die Kraftregelung

**Abbildung 2-11: Versuchsaufbau zur Ermittlung der Regelparameter der Kraftregelung**

Hierbei wurden Abweichungen von der Kraftmessdose in der Spindel zu den gemessenen Kräften der Sensoren an der Polierspindel festgestellt.



### Vorgehen:

- Versuchsreihe 1: Anfahren der Kraftmessdose mit unterschiedlichen Kräften
- Versuchsreihe 2: Anfahren der Kraftmessdose mit immer der gleichen Kraft

### Ergebnis:

- Kraftschwankungen und Kraftabweichungen
- Kraftabweichungen liegen im Mittel im Bereich von 5 bis 10 N

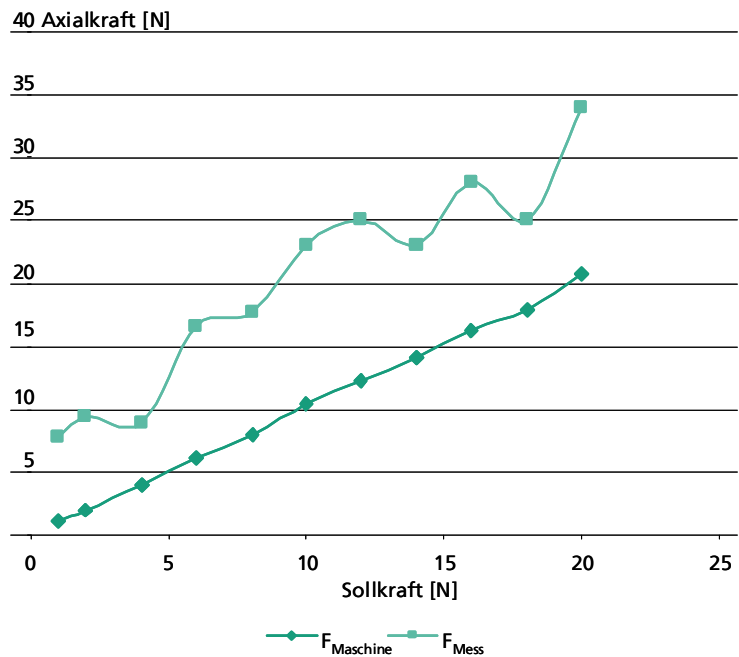
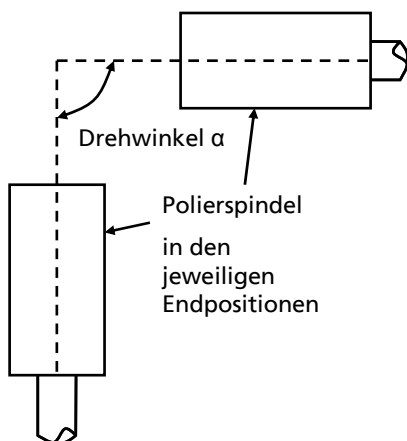


Abbildung 2-12: Abweichungen der gemessenen Kraft von Kraftmessdose und Spindelsensoren

Diese Abweichungen wurden auf die jeweilige Spindellage zurückgeführt. Um diesen Effekt zu beschreiben und die Einflüsse zu eliminieren wurden weitere Versuche durchgeführt.

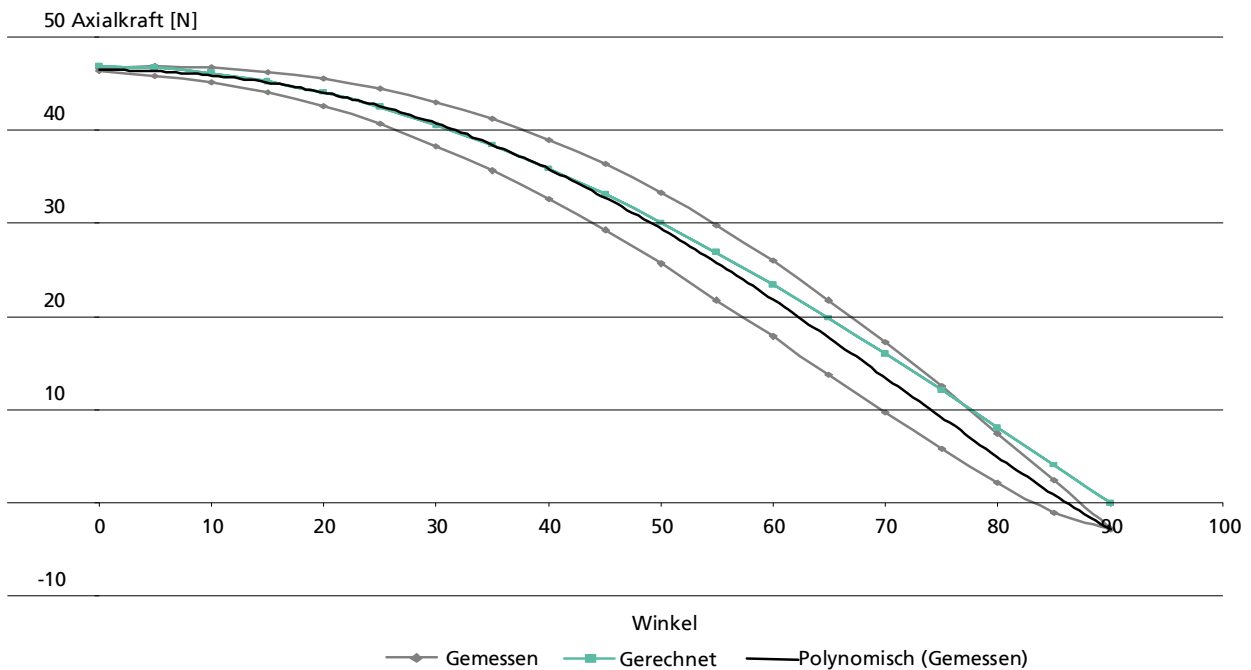


### Vorgehen:

- Spindel wurde ohne Last von 90 auf 0 und dann wieder auf 90 Grad geschwenkt
- Kräfte der Sensoren wurden aufgezeichnet
- Kompensationswerte wurden berechnet
- Differenz der Kräfte der Sensoren und der Kompensationswerte sollte null ergeben
- Drehzahl: 100 1/min
- Spindelkühlung: An

Abbildung 2-13: Ermittlung des Einflusses der Spindellage auf die Kraft

Hierbei wurden mehrere Spindellagen angefahren und die entsprechenden Kraftwerte notiert. In ein Diagramm eingetragen, ergaben sich zwei Kurven, die eine Abweichung darstellen, die wiederum durch ein Polynom ausgeglichen werden sollte.

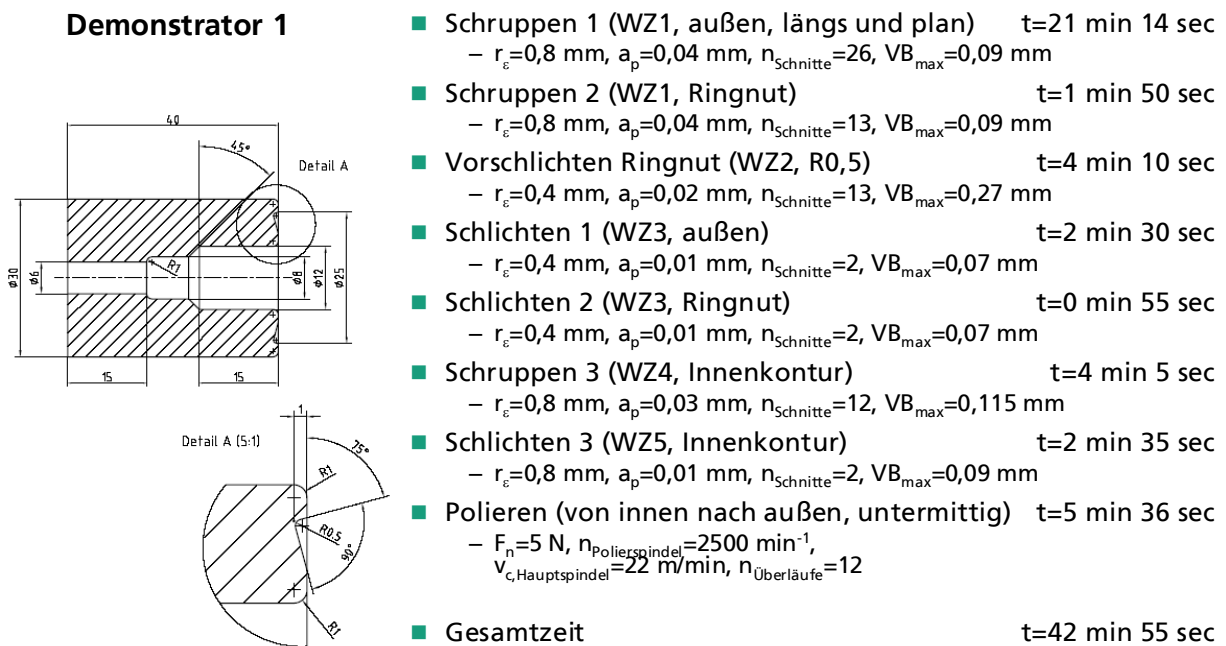


**Abbildung 2-14: Vergleich der gemessenen und berechneten Axialkraft**

Durch die polynomische Kompensationsstrategie konnte ein in den erforderlichen Grenzen konstanter Polierprozess gewährleistet werden

## 2.8. Fertigungstests des komplettierten Maschinensystems

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Fertigungstests des HardPolish-Systems dargestellt. Abbildung 2-15 zeigt die Auflistung der Fertigungsstrategie von Demonstrator 1 mit den einzelnen Schritten und den jeweiligen Zeitaufwänden.



**Abbildung 2-15: Fertigungsstrategie Demonstrator 1**

In Abbildung 2-16 sind die mit dem HardPolish-System erreichten Rauheitsverbesserungen an den unterschiedlichen Materialien des Demonstrator 1 dargestellt. Die Polierdauer betrug ca. 5,5 Minuten. Abbildung 2-17 zeigt den Demonstrator jeweils als Rohteil, fertig gedreht und poliert.

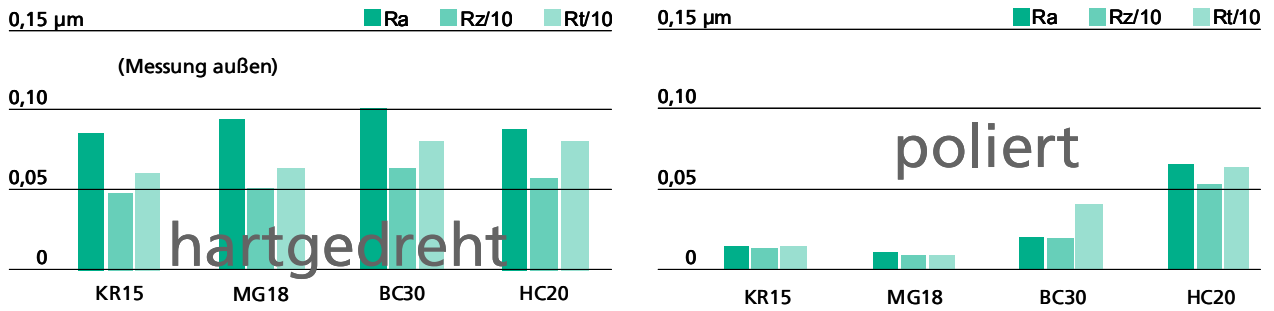


Abbildung 2-16: Rauheitsergebnisse nach der Polieroperation (Demonstrator 1)

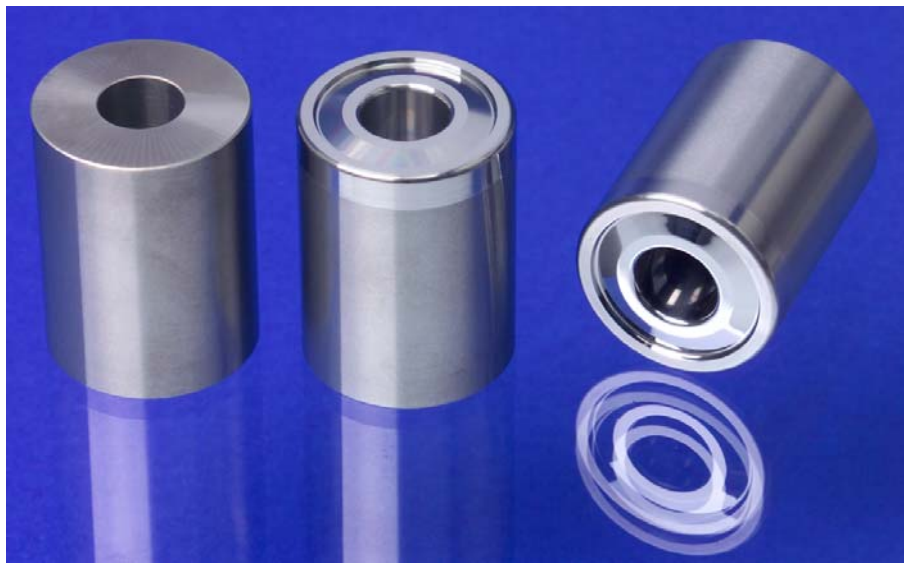
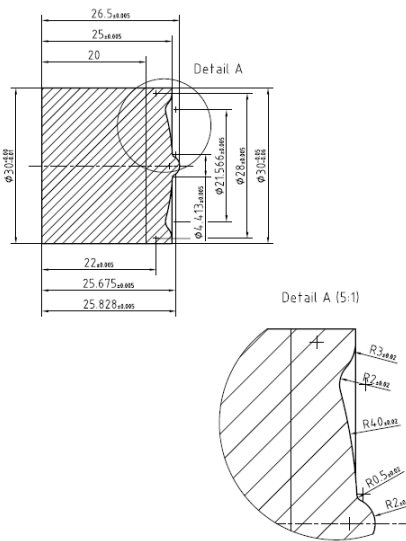


Abbildung 2-17: Demonstrator 1, Rohteil, gedreht, poliert

Abbildung 2-18 zeigt die Auflistung der Fertigungsstrategie von Demonstrator 2 mit den einzelnen Schnitten und den jeweiligen Zeitaufwänden.

## Demonstrator 2



- Schruppen außen längs (WZ1) t=1 min 0 sec  
 –  $r_{\epsilon}=1,2$  mm,  $a_p=0,02$  mm,  $n_{\text{Schnitte}}=2$ ,
- Schruppen Kontur (WZ2) t=23 min 29 sec  
 –  $r_{\epsilon}=1,2$  mm,  $a_p=0,04$  mm,  $n_{\text{Schnitte}}=42$ ,  $VB_{\text{max}}=0,18$  mm
- Vorschlichten Kontur (WZ3) t=1 min 12 sec  
 –  $r_{\epsilon}=0,4$  mm,  $a_p=0,02$  mm,  $n_{\text{Schnitte}}=6$ ,  $VB_{\text{max}}=0,03$  mm
- Schlichten Kontur (WZ4) t=2 min 29 sec  
 –  $r_{\epsilon}=0,4$  mm,  $a_p=0,01$  mm,  $n_{\text{Schnitte}}=2$ ,  $VB_{\text{max}}=0,04$  mm
- Polieren t=6 min 48 sec  
 (von außen nach innen, untermittig)  
 –  $F_n=5$  N,  $n_{\text{Polierspindel}}=2\ 500$  min<sup>-1</sup>,  
 $V_{c,\text{Hauptspindel}}=22$  m/min,  $n_{\text{Überläufe}}=12$
- Gesamtzeit t=34 min 58 sec

Abbildung 2-18: Fertigungsstrategie Demonstrator 2

In Abbildung 2-19 sind die mit dem HardPolish-System erreichten Rauheitsverbesserungen an den unterschiedlichen Materialien des Demonstrator 2 dargestellt. Die Polierdauer betrug ca. 7 Minuten. Abbildung 2-20 zeigt den Demonstrator jeweils als Rohteil, fertig gedreht und poliert.

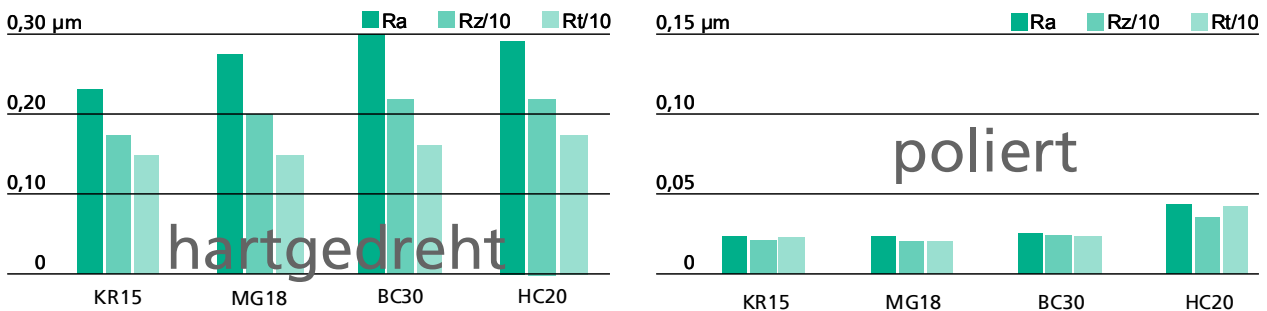


Abbildung 2-19: Rauheitsergebnisse nach der Polieroperation (Demonstrator 2)



Abbildung 2-20: Demonstrator 2, Rohteil, gedreht, poliert

---

Hinsichtlich der Fertigungstests kann final zusammengefasst werden:

#### Hartdrehen

- Die Rauheitsergebnisse der damaligen Hartdrehversuche zeigten Abweichungen zu den in den Vorversuchen erreichten Oberflächenkennwerten. Die vermuteten Gründe hierfür waren:
  - a. die Bearbeitung verschiedener Materialien mit nur einer Schneide, dadurch wechselnde Schneidkantenbelastung und in Folge kein kontinuierlicher Verschleißfortschritt
  - b. ungünstige Schnittstrategie (Planeinstich) in Verbindung mit einem zu großen Planschlag des Bauteils
  - c. Schartigkeit der Schneidkante, dadurch ungünstige Schnittbedingungen, erhöhter Verschleißfortschritt bis hin zu Ausbrüchen an der Schneidkante.
- Die Rauheitsergebnisse der aktuellen Versuche bewegten sich in dem erwarteten Bereich von ca.  $R_a = 0,2 \mu\text{m}$ . Hinsichtlich der damaligen Gründe kann Folgendes festgestellt werden:
  - zu a.: Die wechselnde Belastung lag auch in diesen Versuchen vor, wodurch der vermutete Einfluss ausgeschlossen werden kann.
  - zu b.: Die Schnittstrategie bei Demonstrator 1 war optimal, die Strategie bei Demonstrator 2 wurde entsprechend angepasst. Ein zu großer Planschlag der Bauteile wurde durch Vermessen und Auswahl der entsprechenden Bauteile vermieden.
  - zu c.: Es wurden Werkzeuge verwendet, die eine vergleichbare Schartigkeit aufwiesen. Hierdurch kann ebenfalls dieser Einfluss weitgehend ausgeschlossen werden.
- Fazit der vorhergehenden Ausführungen: Die unerwartet hohen Rauheitswerte der früheren Versuchsergebnisse können auf die ungünstige Schnittstrategie und den dadurch bedingten erhöhten Schneidkantenverschleiß zurück geführt werden.
- Ausbrüche an den Werkstückkanten konnten durch eine Anpassung der Schnittstrategie (Schnitt in Richtung des stützenden Materials) in den betroffenen Bereichen vermieden werden.
- Eine aktive Kühlung wurde mittels einer »Cold Gun« eingesetzt. Hierbei wurde die gekühlte Luft gezielt auf die bearbeitende Schneide gelenkt. Wie aus den vorherigen Ergebnissen bekannt, wird hierdurch der Werkzeugverschleiß erheblich verringert.
- Durch Verringerung des Werkzeugverschleißes konnten in Folge die Rauheitsergebnisse verbessert werden.
- Der gemessene Werkzeugverschleiß war bei allen Schneiden im normalen Bereich.
- Die Anforderungen an Form- und Maßgenauigkeit der Bauteile konnten in allen Fällen eingehalten werden.
- Die Einstellung der Y-Höhe nahm pro Werkzeug ca. 5 -10 Minuten in Anspruch.
- Die Einstellung der exakten Radien dauerte pro Werkzeug ca. 20 Minuten.

#### Polieren

- Alle Demonstratorbauteile konnten mit dem HardPolish System nach dem Hartdrehen poliert werden.
- Die Kraftregelung ist zum derzeitigen Zeitpunkt noch nicht optimal, liefert jedoch gute Ergebnisse.
- Die Form- und Maßgenauigkeiten wiesen beim konkaven Radius 0,5 mm leichte Abweichungen auf, die auf die Werkzeugverrundung des Polierfilzes zurückzuführen sind.
- 

### 3. Zeitplan

Durch das zusätzliche Arbeitspaket der B-Achse hat sich der ursprünglich geplante Arbeitsplan insgesamt um ca. 3 Monate verschoben. Durch weitere Kapazitätsprobleme beim Umbau der Versuchsmaschine entstand ein zusätzlicher Verzug. Hierdurch sieht sich das Konsortium nicht mehr in der Lage, den geplanten Projektarbeitsplan zu erfüllen. Aus diesem Grund wurde vom Konsortium rechtzeitig

---

über eine kostenneutrale Projektverlängerung beraten. Das Ergebnis dieser Beratung ist die Beantragung einer kostenneutralen Verlängerung des Projekts bis zum 31.12.2010.

Unter Berücksichtigung des erläuterten Verzugs verliefen die Projektarbeiten bis zur Erstellung dieses Berichts jedoch planmäßig.

#### **4. Entwicklung des Verwertungsplans**

Die Verwertungspläne der Projektziele haben sich während der Projektlaufzeit weder auf Seiten des IPT, noch auf Seiten der anderen Projektpartner verändert.

#### **5. Verwertung der Ergebnisse**

##### **5.1. Verwertung**

Bei der vorwettbewerblichen Forschung schließt nach erfolgreicher Durchführung des Projektes die Umsetzung der Ergebnisse an. Dazu steht am Ende der Projektlaufzeit der Prototyp des HardPolish-Systems beim IPT in Aachen zur Verfügung.

Die beteiligten Projektpartner erweitern durch die Mitarbeit am Projekt ihre Kompetenz im Bereich der kombinierten Hartdreh- und Polierbearbeitung deutlich. Durch die bereits erwähnten Vorteile des entwickelten Prototypen bieten sich Anknüpfungspunkte für weitergehende Forschungs- und Entwicklungsprojekte.

Im Anschluss an die Projektlaufzeit kann das HardPolish-System eigenständig Fertigungsaufgaben übernehmen. Nach einer Ausweitung der Testphase soll das entwickelte Fertigungssystem schließlich zur Serienreife gebracht werden.

##### **5.2. Veröffentlichungen**

Innerhalb des Projektes ergab sich aus den Projektergebnissen bisher keine Veröffentlichung. Jedoch sind Veröffentlichungen in wissenschaftlichen Zeitschriften bereits geplant.

#### **6. Danksagung**

Im Namen des Fraunhofer IPT und speziell der Hardpolish-Arbeitsgruppe bedankt sich Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Dr. h.c. Fritz Klocke als Projektkoordinator beim Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) für die Förderung des Projektes Hardpolish. Besonderer Dank für die Unterstützung geht an den Projektträger, die VDIVDE-IT GmbH, und an alle Projektpartner für die gelungene Zusammenarbeit und Unterstützung.