

*gekürzte Fassung*

**Voruntersuchung:  
„Fertigungsbedingte Produkteigenschaften - FePro“**

**Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen**

Steinbachstr. 19  
52074 Aachen

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. F. Klocke, Dr.-Ing. C. Zeppenfeld, Dipl.-Ing. A. Pampus,  
Dipl.-Ing. P. Mattfeld

**Institut für Produktionstechnik, wbk, Universität Karlsruhe**

Kaiserstr. 12  
76131 Karlsruhe

o. Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer, Dipl.-Wirt.-Ing. J. Kotschenreuther, Dipl.-Ing. R. Pabst

**Fachgebiet Fertigungstechnik, Universität Ilmenau**

PF 10 05 65  
98684 Ilmenau

Prof. Dr.-Ing. habil. Johannes Wilden, Dipl.-Ing. Simon Jahn

21. Januar 2008

# 1 Inhalt

<b>1</b>	<b>INHALT .....</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG DES FORSCHUNGS- UND HANDLUNGSBEDARFS.....</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>ZIELSETZUNG UND VORHABENDURCHFÜHRUNG .....</b>	<b>5</b>
3.1	ZIELSETZUNG.....	5
3.2	VORHABENDURCHFÜHRUNG.....	5
3.3	ABGRENZUNG ZUR VORUNTERSUCHUNG PROFOB .....	7
<b>4</b>	<b>STAND DER TECHNIK .....</b>	<b>8</b>
<b>5</b>	<b>DARSTELLUNG SIGNIFIKANTER HANDLUNGSBEDARFE .....</b>	<b>10</b>
5.1	VERLÄSSLICHE VORHERSAGE DES PRODUKTFUNKTIONSVERHALTENS AUF BASIS DER FERTIGUNGSBEDINGT ERZIELTEN/ ERZIELBAREN OBERFLÄCHEN- UND RANDZONENEIGENSCHAFTEN .....	10
5.2	FLEXIBILISIERUNG VON FERTIGUNGSPROZESSKETTEN .....	11
5.2.1	<i>Austauschbarkeit von Prozesskettenelementen .....</i>	<i>11</i>
5.2.2	<i>Kombination/ Hybridisierung von Prozesskettenelementen.....</i>	<i>11</i>
5.2.3	<i>Einfluss der Fertigungshistorie auf Produkteigenschaft und Funktionsverhalten .....</i>	<i>12</i>
5.2.4	<i>Definition von Schnittstellen .....</i>	<i>12</i>
5.3	INTEGRATION VON BESCHICHTUNGSPROZESSEN IN DIE PROZESSKETTE .....	13
5.3.1	<i>Substratvorbereitung.....</i>	<i>13</i>
5.3.2	<i>Schichtnachbehandlung .....</i>	<i>14</i>
5.4	NEUE KENNWERTE UND KENNWERTSYSTEME FÜR PRODUKTEIGENSCHAFTEN.....	14
5.4.1	<i>Weiterentwicklung bestehender Kennwerte .....</i>	<i>15</i>
5.4.2	<i>Ermittlung neuer Kennwerte .....</i>	<i>15</i>
5.4.3	<i>Entwicklung von Kennwertsystemen .....</i>	<i>15</i>
<b>6</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG.....</b>	<b>16</b>
<b>7</b>	<b>PROJEKTFÖRDERUNG.....</b>	<b>17</b>

## 2 Zusammenfassung des Forschungs- und Handlungsbedarfs

Die Produktionsforschung leistet einen substantiellen Beitrag zur Steigerung der Innovations- und Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmen des produzierenden Gewerbes. Dies wird auch durch gezielte und zukunftsweisende produktionstechnologische Fördermaßnahmen erreicht. Auf nationaler Ebene werden durch das BMBF-Rahmenkonzept „Forschung für die Produktion von morgen“ (ProMorgen) kooperative vorwettbewerbliche, anwendungsnahe Forschungsprojekte zur Stärkung der industriellen Produktion – insbesondere auch in KMU-dominierten Wirtschaftszweigen - gefördert, die dazu beitragen, Deutschlands internationale Wettbewerbsfähigkeit zu sichern und zu verbessern.

Da die industrielle Produktion und ihr Umfeld enormen Veränderungen (Technologien, globale Entwicklung etc.) innerhalb kurzer Zeiträume unterworfen sind, wurde das Rahmenkonzept für neue Themen innerhalb der vier langfristig angelegten Handlungsfelder „Marktentwicklung und strategische Produktplanung“, „Technologien und Produktionsausrüstungen“, „Neue Formen der Zusammenarbeit produzierender Unternehmen“ und „Der Mensch und das wandlungsfähige Unternehmen“ offen gehalten („lernendes Programm“). Zuletzt wurden im Februar 2007 mit der unter Federführung des IUL D der Universität Dortmund (Prof. M. Kleiner) ausgearbeiteten Untersuchung zur Aktualisierung der Forschungsfelder für das Rahmenkonzept ProMorgen aktuelle prioritäre Forschungsthemen aufgezeigt.

Die Voruntersuchung „Fertigungsbedingte Produkteigenschaften“ (FePro) greift direkt die Erkenntnisse dieser Studie zum Handlungsfeld 2 „Technologien und Produktionsausrüstungen“, Themenfeld 5 auf:

***Durch eine fundierte Prozesskenntnis und eine gezielte Fertigungsprozesssteuerung müssen sekundäre Produkteigenschaften zusätzlich zu den primär geforderten Bauteileigenschaften hergestellt werden können. Dadurch kann die Bauteilfunktion verbessert, bzw. die Bauteilfunktionsdichte erhöht werden. Dies erfordert eine prozessgetriebene Produktentstehung, die neue Bauteilvarianten und Anwendungsspektren eröffnet und die Herstellung multifunktionaler und maßgeschneiderter Eigenschaften zum Ziel hat.***

Zur Wahrung der Wettbewerbsfähigkeit produzierender Unternehmen ist es notwendig, effektiv und effizient innovative Produkte zu generieren. Damit diese Produkte ihre Leistungen erfüllen können, müssen sie mit bestimmten Funktionalitäten ausgestattet sein. Diese können nur durch Fertigungsverfahren hergestellt werden.

Der erforderliche Wandel von produktgesteuerter hin zu prozessgetriebener Bauteilentstehung bedarf umfassender Forschungsarbeit. Als Ergebnis der vorliegenden Studie „Fertigungsbedingte Produkteigenschaften“ wurden dazu folgende primäre Handlungsfelder in dieser Thematik als vorrangig eingestuft:

- **Verlässliche Vorhersage des Produktfunktionsverhaltens auf Basis der fertigungsbedingt erzielten/erzielbaren Oberflächen- und Randzoneneigenschaften**

Durch die Fertigungsverfahren werden Bauteilen bestimmte charakteristische Oberflächen- und Randzoneneigenschaften aufgeprägt. Diese fertigungsbedingten Eigenschaften unterscheiden sich je nach Fertigungsverfahren wesentlich voneinander und beeinflussen zentral das Funktionsverhalten der Bauteile im späteren Einsatz. Die kausalen Zusammenhänge und Interdependenzen zwischen Produkteigenschaften und Produktfunktionsverhalten sind noch weitgehend unbekannt und müssen grundlegend erforscht und beschrieben werden. Nur so kann das volle Potential gefertigter Komponenten genutzt werden.

- **Flexibilisierung von Fertigungsprozessketten**

Steigende Variantenvielfalt und sinkende Losgrößen bedingen flexible Fertigungs- und Produktionssysteme. Möglichkeiten zur Flexibilisierung stellen hier Prozessketten dar, deren Elemente bzw. Einzelprozesse austauschbar sind. Diese Modifikation der Prozessketten darf zu keiner Beeinträchtigung des Produktfunktionsverhaltens führen. Um diese Flexibilisierung der Prozessketten zu erreichen müssen sowohl die Schnittstellen zwischen den Einzelprozessen präzise beschrieben werden als auch der Einfluss der Fertigungshistorie auf das Produktfunktionsverhalten verstanden werden.

- **Integration von Beschichtungsprozessen in die Prozesskette**

Zur Erzielung spezieller Bauteileigenschaften und zur Optimierung der Bauteillebensdauer bedarf es in vielen Fällen des Einsatzes von Beschichtungen. Mangelnde Erkenntnisse in Bezug auf Substratvorbereitung und notwendige Endbearbeitung aufgebrachtener Dickschichten tragen derzeit dazu bei, dass kein vermehrter Einsatz dieser Schichten erfolgt. Beschichtungsprozesse müssen zur maximalen Ausnutzung der Verfahrenspotentiale in die Prozesskette integriert werden und die Wechselwirkungen der Beschichtungsprozesse mit vor- und nachgelagerten Verfahren (Substratvorbereitung, Schichtnachbearbeitung) müssen präzise analysiert und verstanden werden.

- **Neue Kennwerte und Kennwertsysteme für Produkteigenschaften**

Letztendlich kann eine Umsetzung der obigen Bedarfe nicht ohne eine Optimierung und Erweiterung der heute vorhandenen und eingesetzten Kennwerte zur Beschreibung von Produkten und deren Eigenschaften geschehen. Hier muss parallel zu allen genannten Forschungsaufgaben an der Entwicklung von alternativen und neuen Kennwerten und in gekoppelter Form an Kennwertsystemen geforscht werden, die zur Erreichung der angestrebten Ziele eingesetzt werden können.

Die Ergebnisse der Studie zu den einzelnen Themenfeldern werden in Kapitel 5 (Darstellung signifikanter Handlungsbedarfe) ausführlich dargestellt.

## **3 Zielsetzung und Vorhabensdurchführung**

### **3.1 Zielsetzung**

Übergeordnetes Gesamtziel der Voruntersuchung „Fertigungsbedingte Produkteigenschaften“ (FePro) war die Ermittlung vordringlicher Handlungsbedarfe für die künftige Forschung und Entwicklung in diesem Themenfeld. Dabei sollten der Stand der Technik, Entwicklungstrends und praxisorientierte Forschungspotentiale aufgezeigt werden. Die aufbereiteten und dokumentierten Ergebnisse der Untersuchung sollen es dem BMBF ermöglichen, den aktuellen und mittelfristigen Handlungsbedarf in dem Themenfeld „FePro“ umfassend bewerten zu können und auf dieser Grundlage weitere Themen für künftige Ausschreibungen von Wettbewerben zur Unterstützung anwendungsorientierter Forschung und Entwicklung im Rahmenkonzept „Forschung für die Produktion von morgen“ auszuwählen.

In die Untersuchungen wurden maßgebliche Bereiche der deutschen produzierenden Industrie aktiv einbezogen, so dass deren praxisrelevanter Forschungs- und Entwicklungsbedarf im Ergebnis der Voruntersuchung ausreichend Berücksichtigung finden kann.

Die Aufgabenstellung wurde als Gemeinschaftsarbeit eines kleinen Teams kompetenter Forschungseinrichtungen unter Leitung des von PTKA-PFT mit der Federführung beauftragten WZL Aachen bearbeitet.

### **3.2 Vorhabensdurchführung**

Das Vorhaben wurde federführend vom WZL der RWTH Aachen durchgeführt. Für die gleichwertige Mitarbeit im Unterauftrag des WZL konnten das WBK der Universität Karlsruhe (Prof. Fleischer) und das Fachgebiet Fertigungstechnik der TU Ilmenau (Prof. Wilden) gewonnen und arbeitsteilig eingebunden werden.

Gemeinsam mit dem WBK Karlsruhe und der TU Ilmenau wurden zur Bearbeitung der BMBF-Studie „Fertigungsbedingte Produkteigenschaften“ drei Teilziele definiert, die jeweils einem Meilenstein im Vorhabensverlauf entsprechen:

Das erste Teilziel war die Analyse des Stands der Technik sowie das Aufgreifen aktueller Entwicklungstrends und Forschungspotentiale.

Hierzu wurde vom Werkzeugmaschinenlabor eine ausführliche Literaturrecherche durchgeführt. Relevante Ansätze der „ProMorgen-Studie“ (Unterpunkte 5.2.5.1 bis 5.2.5.5) sowie weiterführende Fragestellungen aus abgeschlossenen eigenen Forschungsprojekten wurden dabei aufgegriffen und aufbereitet. Zur Identifizierung von Trends und Potentialen fand zum Abschluss dieser ersten Phase am 28.06.07 der öffentliche Workshop 1 statt, der Experten auf dem Gebiet Produktionstechnik aus Industrie und Wissenschaft zusammenführte (1. Meilenstein).

Die Thematik der „fertigungsbedingten Produkteigenschaften“ umfasst einen weiten Bereich der Produktionstechnik, der von der Konstruktion über die Fertigung bis hin zum Bauteileinsatz reicht. Daher war es erforderlich, einzelne Forschungsbereiche abzugrenzen und thematisch festzulegen. Die zukünftigen Forschungsbedarfe aus Industriesicht wurden innerhalb des Workshops in den Untergruppen

- Fahrzeugbau / Antriebe
- Luftfahrt / Turbinenbau
- Werkzeug- und Formenbau

erarbeitet, diskutiert und abschließend im Plenum der gesamten Teilnehmerschaft vorgestellt.

Das zweite Teilziel implizierte die Aufbereitung der Ergebnisse der Analysephase sowie die Konkretisierung der inhaltlichen Struktur und die detaillierte Erfassung industrieller FE-Bedarfe auf breiter Basis. Dazu wurde im Zeitraum Juni bis November 2007 eine Fragebogenaktion durchgeführt. Inhaltlich behandelt der Fragenkatalog, der an insgesamt 1000 KMUs versandt wurde, folgende Themenfelder:

- Umformende Fertigungsverfahren
- Hartbearbeitung (Schleifen, Hartzerspanung)
- Weichbearbeitung
- Beschichtungstechnologien
- Energieeffizienz
- Übergreifende Themen (Messtechnik, Verfahrenssubstitution)

Die Rückläuferquote lag mit etwa 100 ausgewerteten Bögen bei ca. 10%. Durch die Auswertung und Aufbereitung der Fragebogenaktion (2. Meilenstein) konnten die folgenden Handlungsfelder ausgemacht werden, in denen Vertreter der Industrie vorrangigen Handlungsbedarf der Forschung und Entwicklung sehen:

- Sicherstellung der Funktionssicherheit von (Maschinen-) Komponenten
- Steigerung der Leistungsfähigkeit der Produkte
- Klärung der Kompatibilität mit/ Beeinflussung von Folgeprozessen
- Klärung von Machbarkeiten schon während der Konstruktion und Arbeitsplanung

Grundlegend war der Tenor der Aussagen dahingehend, dass produzierende Firmen/ KMU in Zukunft verstärkt im Bereich „fertigungsbedingte Produkteigenschaften“ investieren wollen. In der Gesamtheit deckten sich die Ergebnisse aus Recherche, Befragung und 1. Workshop sehr gut mit den Resultaten aus der Fragebogenaktion.

Als drittes Teilziel galt die Verifizierung der gesammelten Erkenntnisse, die weitere Präzisierung sowie die Aufbereitung zur Verwendung der gewonnenen Informationen. Hierzu fand im Rahmen eines zweiten Workshops am 11.12.07 ein öffentlicher Diskurs statt (3. Meilenstein). Die an FePro beteiligten Forschungseinrichtungen WZL, WBK und FT-TU IL stellten die erarbeiteten FE-Bedarfe der Fachöffentlichkeit zur Diskussion. Ergebnis war die Bestätigung, Gewichtung und Priorisierung von FE-Themenfeldern zu FePro. Abschließend erfolgte die

Dokumentation in Form des hier vorliegenden Ergebnisberichts in Kurzfassung. Nach Vorhabensende 02/08 wird durch das WZL auf der Basis dieses Dokuments ein detaillierter Ergebnisbericht ausgefertigt und veröffentlicht.

### **3.3 Abgrenzung zur Voruntersuchung PROFOB**

Mit einem Zeitvorlauf von ca. 4-6 Wochen wurde parallel zu FePro eine weitere Voruntersuchung für das Rahmenkonzept „Forschung für die Produktion von morgen“ zum Thema „Produktionstechnik zur Erzeugung Funktionaler Oberflächen“ (PROFOB) durchgeführt.

Die „Schnittmenge“ beider Vorhaben bildet der Themenkomplex „Oberflächentechnologien / Beschichtungstechnik“. Um inhaltliche Doppelungen auszuschließen und die thematische Abgrenzung beider Vorhaben zu gewährleisten wurde auf Anregung des PTKA-PFT frühzeitig und kontinuierlich der Informationsaustausch beider Vorhaben auf dem Teilgebiet „Oberflächentechnologien/Beschichtungstechnik“ gepflegt (FePro: WZL; PROFOB: FhG-IST).

Die inhaltliche Abgrenzung FePro / PROFOB stellt sich wie folgt dar:

Aus fertigungstechnologischer Sicht liegt der Fokus bei FePro auf Bauteilen, die durch die „konventionellen Kerntechnologien“ wie beispielsweise Drehen, Fräsen, Schleifen und Umformen in makroskopischer Skalierung aus Halbzeugen hergestellt werden können. Am fertigen Bauteil wird im Hinblick auf die Funktion und die fertigungsbedingten Produkteigenschaften die Bauteilrandzone und die Oberflächentopographie als Ergebnis der Einflüsse **aller** zur Herstellung des Bauteils notwendigen vorangegangenen Fertigungsschritte betrachtet.

Bei PROFOB ist **nur** die Oberflächenstruktur und –funktionalität in mikroskopischer Skalierung originäres Ziel der Untersuchungen. Es werden lediglich diejenigen speziellen Fertigungsverfahren betrachtet, mit denen sich die derartige Strukturen und Funktionalitäten erzielen lassen.

## 4 Stand der Technik

Die industrielle Produktion von Gütern aus metallischen Werkstoffen erfolgt durch das Zusammenspiel vieler einzelner Fertigungsprozessschritte. Ausgehend vom Rohteil erfolgt durch die Fertigungsverfahren eine schrittweise Änderung der Produkteigenschaften, bis die Vorgaben erreicht werden.

Die Anforderungen an Bauteile wurden stets anhand ihrer zugeordneten Funktion definiert. Sind die Funktionen, die ein Bauteil zu erfüllen hat, nur vergleichsweise gering, so fallen die Anforderungen entsprechend gering aus. Technologische Entwicklungen der letzten Jahre haben dazu geführt, dass die Anforderungen an Bauteile stetig gestiegen sind. Dabei haben sich sowohl die Leistungsdichte, wie auch die Funktionsvielfalt erhöht. Unter der Erhöhung der Leistungsdichte versteht man beispielsweise, dass bei einer Welle die zu übertragende Drehzahl und das Moment gesteigert werden, während Wellengeometrie und –material gleichbleiben. Die Funktionsvielfalt beschreibt den Zusammenhang, dass von einem Bauteil nun mehrere Funktionen übernommen werden. Für das Beispiel der Welle heißt das, dass hier nicht nur Drehzahl und Moment übertragen werden, sondern zusätzlich noch die Wälzlagerung direkt von der Wellenoberfläche übernommen wird.

Die Anforderungen an Bauteile werden grundsätzlich über Kenngrößen definiert, wie die gemittelte Rautiefe  $R_z$  oder den Rundlauf bei einem Lagersitz. Makro- oder mikrogeometrische Kenngrößen beschreiben dabei stets die maximal zulässige Abweichung von der geometrischen Idealform. Diese Definition von Anforderungen hat in der Vergangenheit bei „normalen“ Anforderungen ausgereicht, um die den Bauteilen zugeordnete Funktion sicherzustellen. Komplexe Funktionen, die hohe und vielfältige Anforderungen an Produkte stellen, können oftmals nicht über diese Kenngrößen definiert werden, da die Zusammenhänge zwischen den Bauteileigenschaften (bestimmt durch Konstruktion und Fertigung) und dem Funktionsverhalten nicht bekannt oder nicht beschreibbar sind. Da die geforderten Eigenschaften nicht exakt beschrieben werden können sind Fehlfunktionen oftmals erst nach der Fertigstellung des Produktes offensichtlich.

Die oberflächennahen Bereiche, die durch das Fertigungsverfahren maßgeblich beeinflusst werden, sind neben dem Werkstoff und der Wärmebehandlung von entscheidender Bedeutung für das Bauteilverhalten, da sie in nahezu allen Fällen der technischen Praxis die höchstbeanspruchten Werkstückbereiche darstellen. Hohe Beanspruchungen in Kombination mit oftmals nicht an den Einsatzfall angepassten physikalischen Eigenschaften der äußeren Werkstückrandzone führen zu ca. 85 % aller Schadensfälle. Einer funktionsgerechten Optimierung der Oberflächeneigenschaften kommt somit eine entscheidende Stellung bei der Fertigung zu.

Die Oberflächeneigenschaften eines Bauteils werden bestimmt durch die makro- und mikrogeometrische Gestalt sowie durch die physikalischen und chemischen Eigenschaften der Randzone in Form von Härtegradienten, Eigenspannungszuständen und Gefügeausbildungen. Unter der Randzone versteht man den Volumenanteil eines Werkstücks, der nach außen durch

die Werkstückoberfläche und nach innen durch eine Fläche homogenen Grundgefüges begrenzt wird. Eine Abgrenzung der Ausdehnung der Randzone gestaltet sich oft schwierig, da sie vom Bearbeitungsprozess abhängt und von der Tiefe, bis zu der die für die Bauteilfunktion wichtigen Eigenschaften reichen. Veränderungen der Randzone können in die Bereiche

- Gefüge,
- Festigkeit (Härte) und
- Eigenspannungen

thematisch unterteilt werden, wobei diese nicht isoliert untersucht werden können, sondern immer zusammen betrachtet werden müssen. So geht eine Gefügeveränderung bei einem Stahlwerkstoff, beispielsweise beim Wechsel in ein extrem feinkörniges martensitisches Gefüge immer mit einem Wechsel in der Härte und im Eigenspannungsprofil einher.

Handlungsbedarf besteht hinsichtlich der fundierten Beschreibung von Produkteigenschaften, die einen grundsätzlichen nachgewiesenen direkten Einfluss auf das Funktionsverhalten von Bauteilen haben. Darüber hinaus ist derzeit unbekannt, wie sich unterschiedlich gefertigte Oberflächen auf die Produkteigenschaften und somit das Funktionsverhalten auswirken. So weist eine gedrehte Oberfläche trotz gleicher Rz-Werte eine völlig andere Mikrogeometrie und Randzonenbeeinflussung als Produkteigenschaft auf wie eine geschliffene. Diese Eigenschaft wirkt sich aber direkt auf die Funktion und die Lebensdauer des Bauteils aus. Eine vollständige Erfassung und Beschreibung der wirklich wichtigen für die Funktion relevanten Eigenschaften erfolgt jedoch nicht.

Derzeit funktioniert das bisherige Vorgehen noch bei vielen Anwendungsfällen, da neben den wenigen geforderten Kenngrößen zur Produktbeschreibung noch empirisches Wissen der Prozessplanung mit in die Fertigung einfließt. Aber auch hier werden bei einigen Produkten Grenzen erreicht, wo bei ein und demselben Bauteil mit einer Fertigungsprozessfolge die Produkteigenschaften und –funktion erreicht wird und mit einer anderen Prozessfolge nicht. Die Zusammenhänge sind jedoch unklar und oftmals nicht reproduzierbar.

Durch die gezielte Steuerung der Fertigungsverfahren sowie die Anwendung neuer hybrider Prozesse mit unterschiedlichen Wirkmechanismen können bisher nicht realisierbare Produkteigenschaften implementiert werden. Dies gelingt nur durch ein tiefgreifendes Prozessverständnis und stellt somit einen „Kopierschutz“ für das Produkt dar, da die Kompetenz nicht mehr nur im Produkt selbst sondern auch im Fertigungsprozess steckt.

## 5 Darstellung signifikanter Handlungsbedarfe

Die Notwendigkeit technologischer Innovationen begründet sich darin, dass zur Erhöhung der Wettbewerbsfähigkeit Produkte mit erhöhter Leistungsfähigkeit bereitgestellt werden müssen. Innovationen entstehen entweder aus den Bedürfnissen des Marktes (Market pull), oder aus der Kompetenz der Hersteller/ Entwickler (Technology push). Um einen weiteren Wettbewerbsvorteil zu erhalten, müssen zukünftig die durch die Fertigungstechnologien eingebrachten Produkteigenschaften besser verstanden und auch genutzt werden. Dies führt auf der einen Seite zu einem erhöhten Kundennutzen (Funktionsintegration) und auf der anderen Seite zu einer Prozessoptimierung, die in einer Kostenreduktion resultieren kann.

Ergebnisse der Studie zeigen, dass es zukünftig eine Vielzahl neuer Produkte mit multiplen Funktionen geben wird, die darüber hinaus aus unterschiedlichen Werkstoffverbänden zusammengesetzt sein können. Die Aufgabe der Fertigungstechnik ist es, die bestmögliche Bearbeitungsstrategie für diese neuen Produkte, aber auch für die bestehenden Produkte im Sinne einer Produktverbesserung, bereitzustellen. Nur die gezielte Nutzung der Einflüsse der Fertigungsverfahren auf das Bauteil ermöglicht es

- a) ohne schadhafte Beeinflussungen der Komponenten zu produzieren und
- b) notwendige Werkstückeigenschaften quantifizierbar und reproduzierbar einzubringen.

Vor diesem Hintergrund wurden in der BMBF-Studie „Fertigungsbedingte Produkteigenschaften“ folgende Handlungsfelder als elementar ermittelt.

### **5.1 Verlässliche Vorhersage des Produktfunktionsverhaltens auf Basis der fertigungsbedingt erzielten/ erzielbaren Oberflächen- und Randzoneneigenschaften**

Eine Vorhersage bezüglich des Produkteinsatzverhaltens eines Bauteils auf Basis seiner Fertigungshistorie und –merkmale ist heute nicht Stand der Technik. Es existiert keine Möglichkeit, über einen Rückschluss von einem gewünschten Einsatzverhalten eines Bauteils auf die optimale Fertigungsstrategie zu folgern. Die kausalen Zusammenhänge zwischen Fertigungsverfahren, Produkteigenschaften und dessen Einsatzverhalten sind bisher nicht vollständig beschrieben. Vielmehr basiert die Entwicklung eines Produktes heutzutage auf empirischen Daten und Erfahrung und in vielerlei Hinsicht auf einem Trial and Error Verfahren.

Produkteigenschaften, die innerhalb der Fertigungskette in einem Produkt implementiert werden, jedoch scheinbar nicht zur Funktionserfüllung dienen, werden bei der Funktionsbeschreibung nicht betrachtet. Als Beispiel kann hier die Festigkeitssteigerung bei umformtechnisch hergestellten Bauteilen dienen, die zwar in der Bauteilauslegung keine Rolle spielt, das Einsatzverhalten aber deutlich beeinflusst.

Es müssen Modelle entwickelt werden, die eine Vorhersage des Produktfunktionsverhaltens in Abhängigkeit der durch den Fertigungsprozess eingebrachten Produkteigenschaften ermöglichen. Dies bedingt ebenfalls, dass nicht nur die für das Funktionsverhalten wesentlichen Produkteigenschaften identifiziert und messbar gemacht werden, sondern insbesondere die kausalen Zusammenhänge zwischen den Fertigungsverfahren und den ausgebildeten Oberflä-

chen- und Randzoneneigenschaften verstanden sind und zur gezielten Prozessauslegung genutzt werden können.

## **5.2 Flexibilisierung von Fertigungsprozessketten**

Bei der Frage nach der idealen Prozesskette wurden in der FePro-Studie in Zusammenarbeit mit der Industrie folgende elementaren Aspekte herausgearbeitet. Zum einen muss eine Fertigungsabfolge zur Herstellung eines Bauteils dessen Funktionserfüllung über der gesamten Bauteillebensdauer sicher gewährleisten. Zum zweiten sollte vor dem Hintergrund der Flexibilisierung von Prozessketten ein Prozessschritt durch einen anderen flexibel ersetzt werden können, ohne dass eine Beeinträchtigung der Funktionalität und Lebensdauer des Bauteils hervorgerufen wird. Ein zukünftiges Ziel der Forschung und Entwicklung muss es sein, einzelne Prozesskettenelemente auf Basis definierter Schnittstellen und Übergabepunkte austauschbar bzw. hybridisierbar zu machen.

### **5.2.1 Austauschbarkeit von Prozesskettenelementen**

Einzelne Prozesse sollten für eine maximale Flexibilisierung in der Prozesskette adaptiv austauschbar sein. Entscheidend ist, dass jede Fertigungskette das gleiche Bearbeitungsergebnis realisiert. Das heißt: die Bauteilfunktionalität bleibt unverändert, obgleich die angewandten Fertigungsverfahren verschiedenartig gewählt werden. In diesem Zusammenhang ist es wesentlich, die Einflüsse der einzelnen Prozesse auf die Funktionalitäten des Bauteils zu kennen. Kausale Wirkzusammenhänge zwischen Prozessen und Produkteigenschaften bzw. Produktfunktionalitäten müssen klar definiert sein. An diesem Punkt gibt es derzeit noch signifikante Defizite und großen Forschungsbedarf. Die Beschreibung der Einflüsse von einzelnen Fertigungsverfahren innerhalb einer Prozesskette auf die Funktion des Bauteils im späteren Einsatz kann noch nicht konsistent vorgenommen werden, da bis dato keine systematische Zuordnung einzelner Fertigungsverfahren zu den Bauteileigenschaften existiert. Des Weiteren fehlt eine durchgängige Beschreibung der durch Einzelprozesse eingebrachten Änderungen von Bauteileigenschaften über den kompletten Fertigungsprozess (siehe 5.2.3 Einfluss der Fertigungshistorie auf Produkteigenschaft und Funktionsverhalten).

Zur Bewältigung der dargestellten Defizite und zur konsistenten Beschreibung der Schnittstellen zwischen den einzelnen Fertigungsverfahren einer Prozesskette, reichen die in der heutigen industriellen Praxis eingesetzten Kennwerte zur Bestimmung von Bauteileigenschaften vielfach nicht aus. Hier besteht dringender Handlungsbedarf sowohl in der Weiterentwicklung von bestehenden Kennwerten als auch in deren Neuentwicklung (siehe 5.4 Neue Kennwerte und Kennwertsysteme).

### **5.2.2 Kombination/ Hybridisierung von Prozesskettenelementen**

Steigende Forderungen der Absatzmärkte nach innovativen Produkten und zunehmende Konkurrenz aus Niedriglohnländern zwingen die Produktionsunternehmen in Hochlohnländern zum Aufbau neuer technologischer Kompetenzen. Die Fertigung innovativer Produkte scheitert oft an den technologischen Grenzen existierender Produktionssysteme und -prozesse. Hybriden Fertigungsverfahren wird ein hohes Potential zur Umsetzung hoher technologischer

Anforderungen und zur Realisierung innovativer Produkte vorhergesagt. Bisherige Entwicklungen hybrider Fertigungsverfahren basieren meist auf intuitiver oder zufälliger Lösungsfindung. Es existiert bisher keine methodische Unterstützung zur Entwicklung hybrider Produktionstechnologien.

Über die Kombination unterschiedlicher Wirkmechanismen, wie es für hybride Verfahren typisch ist, werden den Bauteilen neue Eigenschaften aufgeprägt. Aufgrund der höheren Komplexität hybrider Verfahren ist eine Vorhersage der Bauteileigenschaften und in Folge des Produktfunktionsverhaltens im Vergleich zu „konventionellen“ Verfahren deutlich schwieriger. Diese Zusammenhänge zwischen Fertigungsprozess, Produkteigenschaften und Produktfunktionsverhalten müssen erforscht und beschrieben werden, um das volle Potential hybrider Prozesse nutzen zu können.

### **5.2.3 Einfluss der Fertigungshistorie auf Produkteigenschaft und Funktionsverhalten**

Zur Einstellung geforderter Bauteileigenschaften wird der Fokus vielfach auf die Endbearbeitung innerhalb einer Prozesskette gelegt. Beim Fertigen von Getriebewellen wird im abschließenden Schleifprozess beispielsweise sowohl die Maßhaltigkeit als auch die benötigte Oberflächenrauheit des Bauteils eingestellt und so die primären Bauteilmerkmale/ -eigenschaften erzeugt. Vorangestellte Fertigungsschritte werden allenfalls isoliert betrachtet und autark optimiert.

Die Produkteigenschaften und in Folge das Bauteilverhalten im späteren Einsatz im Getriebe werden jedoch nicht ausschließlich durch den letzten Fertigungsprozess eingebracht sondern sind ein Ergebnis aller durchgeführten Prozessschritte. Die Wechselwirkungen zwischen den separaten Fertigungsverfahren (Fertigungshistorie) hat oftmals einen großen Einfluss auf die Funktionserfüllung des Bauteils. Diese Zusammenhänge sind bis heute nicht ausreichend verstanden und beschreibbar. Hier besteht dringender Forschungsbedarf.

### **5.2.4 Definition von Schnittstellen**

Die in den vorangestellten Kapiteln dargestellte Flexibilisierung der Prozesskette und die ganzheitliche Betrachtung aller Fertigungsschritte in einer Prozesskette bedingt die physikalische Definition von Schnittstellen zwischen den einzelnen Prozesskettenelementen. Eine gezielte Übergabe von Bauteileigenschaften zwischen den Prozessschritten ist dabei wichtig für die Nutzung der einzelnen Verfahrenspotentiale.

Eine wesentliche Frage in diesem Zusammenhang bezieht sich auf die Bauteilbeschaffenheit/ -eigenschaften zwischen den Prozesskettenelementen. Dies bedeutet konkret, dass beschrieben werden muss, wie der (Zwischen-)Zustand des Bauteils aussehen muss, damit er für den aktuell betrachteten Prozess, gleichzeitig aber auch für den Folgeprozess, ideal ist und die Erfüllung der Produktfunktion gewährleistet. Die ganzheitliche Definition von Schnittstellen innerhalb einer Prozesskette muss als Grundlage für die Forschung und Entwicklung zum Thema „Flexibilisierung von Prozessketten“ verstanden werden.

### **5.3 Integration von Beschichtungsprozessen in die Prozesskette**

Die Integration von Beschichtungsprozessen für Dickschichten in komplexe Prozessketten ist derzeit noch nicht Stand der Technik. Im Wesentlichen tragen gegenwärtig die mangelnden Erkenntnisse und der wissenschaftliche Erkenntnisstand im Bezug auf Substratvorbereitung vor dem Beschichten und der notwendigen Endbearbeitung dazu bei, dass kein vermehrter Einsatz entsprechender Schichten erfolgt.

Ein wesentlicher Forschungsbedarf besteht insbesondere in der Substratvorbereitung (Bauteilkonditionierung). Derzeit können die Anforderungen an die Oberfläche zu beschichtender Bauteile nicht exakt definiert werden. Dies liegt daran, dass viele Mechanismen der Interaktion zwischen Beschichtungswerkstoff und Substrat noch nicht hinreichend bekannt sind, um exakte Anforderungen an die Oberfläche zu definieren. Dies trifft vor allem für das Beschichten mittels thermischen Spritzen zu.

Zur Parallelstudie „Produktionstechnik zur Erzeugung funktionaler Oberflächen“ (ProFob) besteht nach intensiven Gesprächen eine klare thematische Abgrenzung. Die FePro-Studie behandelt ausschließlich Dickschichtsysteme und hier den Bereich Substratvorbehandlung und Schichtnachbearbeitung. ProFob fokussiert sich auf den Bereich Dünnschichttechnologien. Diese verlangen gegenüber dicken Schichten nach anders gearteter Substratvorbereitung. Eine Schichtnachbearbeitung im Sinne von definiertem Materialabtrag entfällt bei den meisten Anwendungen von Dünnschichten vollständig. Die Eigenständigkeit beider Untersuchungen ist gewährleistet.

#### **5.3.1 Substratvorbereitung**

Um unterschiedliche Verfahren auf ihre Eignung zur Vorbereitung eines Bauteils auf einen nachfolgenden Beschichtungsprozess beurteilen zu können, ist es notwendig, zunächst die Anforderungen an den zu beschichtenden Substratbereich zu definieren, die zu einer optimalen Schichthaftung führen. Dazu ist die genaue Kenntnis der auftretenden Haftmechanismen zwischen der Schicht und dem Grundwerkstoff notwendig. An diesen Kenntnissen mangelt es jedoch. Um die Anforderungen quantifizierbar beschreiben zu können, ist es notwendig, die Gesamtheit der Konditionierung zu betrachten, die sich im wesentlichen aus Veränderungen der Oberflächenstruktur (Topographie) und der Randzoneneigenschaften (Eigenspannung, Versetzungsdichte, Zusammensetzung, Deckschichten) zusammensetzt. Können die Einflüsse der Konditionierung der Oberfläche bestimmt werden, ist im nächsten Schritt die Wirkung auf die Schichthaftung zu untersuchen.

Ist in die Fertigungskette eines Bauteils der Beschichtungsprozess zu integrieren, muss bisher vor dem Beschichten die Oberfläche entsprechend konditioniert werden. Diese Oberflächenvorbereitung wird heute in einem separaten Prozess (meist Strahlen) durchgeführt. Liegen jedoch Erkenntnisse vor, die eine optimale Konditionierung ermöglichen, könnte in Zukunft auf den zusätzlichen Prozessschritt der Konditionierung verzichtet werden. Bereits bei der Halbzeugherstellung könnten alle Voraussetzungen bezüglich Oberfläche und Randzone für das anschließende Beschichten geschaffen werden.

### 5.3.2 Schichtnachbehandlung

Ein weiterer wesentlicher Punkt, der maßgeblichen Einfluss auf die Funktionalität des Gesamtproduktes hat, ist das Endbearbeiten der Schichten. Hierbei darf die Schicht nicht beschädigt werden und die Anforderungen an die Oberfläche müssen eingehalten werden. Um eine vollständige Funktionserfüllung zu gewährleisten, ist die gezielte Einstellung der geforderten Maße und Toleranzen sowie der Oberflächentopographie notwendig. Bei Dickschichten ist eine maschinelle Endbearbeitung in der Regel unumgänglich. Aufgrund der hohen Verschleißbeständigkeit der Schichten werden jedoch erhöhte Anforderungen an die Nachbearbeitungsverfahren gestellt. War lange Zeit die Endbearbeitung harter Werkstoffen nur mittels zeitintensiver Schleifverfahren möglich, ergab sich in den vergangenen Jahren durch die Entwicklung neuer Werkstoffe für das Fräsen und Drehen die Möglichkeit, die Schleifbearbeitung bei Bulk-Material zu substituieren. Diese Verfahren stellen jedoch aufgrund der hohen Kräfte und der notwendigen Genauigkeit erhöhte Anforderungen an die Maschinensteifigkeit, die in den letzten Jahren für neue Prozesse, wie z.B. Hartbearbeitung, realisiert werden konnten. Dadurch lassen sich die Prozesszeiten gegenüber der Schleifbearbeitung, bei gleichem Endresultat, deutlich reduzieren.

Aufgrund der besonderen Struktur von Dickschichten, die aus dem Beschichtungsprozess resultieren (wie Aufmischung beim Auftragschweißen oder der Schichtaufbau beim thermischen Spritzen aus einzelnen Partikeln), ist eine Anpassung des Endbearbeitungsprozesses im Vergleich zum Bulk-Material notwendig.

Weiteres Merkmal thermisch gespritzter Schichten ist die je nach Beschichtungsverfahren unterschiedlich hohe Porosität der Schicht. Diese ist in der Regel je nach Anforderung beim Beschichtungsprozess einzustellen und wirkt sich ebenfalls auf die Nachbearbeitung aus. Die Nachbehandlung kann aber auch zur gezielten Einstellung von Festigkeitswerten genutzt werden. Durch das maschinelle Einbringen von Spannungen, beispielsweise beim Drehen, kann eine Härtesteigerung erfolgen, z. B. bei metastabilen Manganstählen. Auch im Bereich dieser fertigungsbedingten Produkteigenschaften, die aus dem Zusammenwirken von Prozess und Werkstoff resultieren, besteht aus heutiger Sicht Forschungsbedarf.

### 5.4 Neue Kennwerte und Kennwertsysteme für Produkteigenschaften

Ein Großteil der heute produzierten Bauteile lässt sich durch unterschiedliche Fertigungsverfahren gleichermaßen herstellen. Wenn gewährleistet werden kann, dass das fertige Bauteil die gewünschten Anforderungen erfüllt, wird im Allgemeinen das kostengünstigste Verfahren zur Produktion angewendet. Um sicherzustellen, dass bestimmte Produkteigenschaften erfüllt sind, existieren z.B. Maß-, Form- und Lagetoleranzen die das Bauteil allgemeingültig beschreiben. Viele dieser üblichen Zeichnungsangaben können mit mehreren Verfahren hergestellt werden.

Eine gesicherte Funktionserfüllung des Bauteils im späteren Einsatz kann dabei trotz Einhaltung aller Toleranzen jedoch nicht in jedem Fall gewährleistet werden. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass bestehende „statische“ Kennwerte zur Beschreibung des (dynamischen) Funktionsverhaltens vieler innovativer Bauteile oftmals nicht ausreichen.

#### **5.4.1 Weiterentwicklung bestehender Kennwerte**

Bestehende Kennwerte reichen nicht aus, um Produkteigenschaften umfassend zu beschreiben. Im Regelfall werden auch heute noch dreidimensionale Strukturen über zweidimensionale Messverfahren erfasst. Viele Bauteilprüfungen erfolgen sogar noch qualitativ z.B. über Sichtprüfungen (z.B. der Traganteil bei Gleitlagern).

Auch bei der Erfassung mit 3D-Messsystemen werden Oberflächenstrukturen häufig über Kennzahlen beschrieben, die auf zweidimensionalen Messwerten basieren. Es fehlt an dieser Stelle eine Charakterisierung auf höherer Ebene. Eine Beschreibung basierend auf Mittelwerten ( $R_a$ ,  $R_z$ , ...) reicht nicht aus. Somit wird eine Erweiterung der bestehenden Kennwerte mit dreidimensionalen Werten notwendig.

#### **5.4.2 Ermittlung neuer Kennwerte**

Innovative Produkteigenschaften können heutzutage reproduzierbar in ein Bauteil implementiert werden, jedoch fehlt es oftmals an adäquaten Kennwerten zur Beurteilung der erzielten Produkteigenschaft und Vorhersage des Funktionsverhaltens des Produkts. An dieser Stelle müssen neue Kennwerte entwickelt werden, die präzise und unter Industriebedingungen messbar und anwendbar sind. Voraussetzung ist, dass dabei auf eine Funktionsorientierung der Kennwerte geachtet wird. Kausale Zusammenhänge zwischen statischen Kennwerten und dynamischen Funktionsverhalten müssen zuverlässig und einfach beschrieben werden können.

In diesem Zusammenhang muss beantwortet werden, wie sensitiv sich einzelne Produkteigenschaften auf die Funktionserfüllung über der Lebensdauer auswirken und ob eine sichere Funktionserfüllung über der Bauteillebensdauer durch Kennwerte darstellbar ist.

#### **5.4.3 Entwicklung von Kennwertsystemen**

Neben der Forschung an bekannten und neuen Kennwerten muss es Anstrengungen zur Entwicklung von Fertigungsprozessmodellen geben, die eine systematische Erreichung von Kennwertsätzen ermöglichen. D.h., dass einzelne, bisher isoliert betrachtete Kennwerte mit weiterentwickelten und auch neuen Kennwerten zu Kennwertsystemen verknüpft werden müssen.

Mittels dieser Kennwertsysteme soll der Zustand eines Bauteils so beschrieben werden, dass sie eine Vorhersage des Produktfunktionsverhaltens ermöglichen. Idealerweise werden solche Kennwertsysteme mittels eines Sensors/ Sensorsystems aufgenommen und verarbeitet, die möglichst zerstörungsfrei, industrietauglich und flexibel eine umfassende Aussage über die Produkteigenschaften eines Bauteils und dessen Verhalten im Einsatz über den gesamten Lebenszyklus erlauben. Hier besteht deutlicher Handlungsbedarf.

## 6 Zusammenfassung

Durch eine fundierte Prozesskenntnis und eine gezielte Fertigungsprozesssteuerung können sekundäre Produkteigenschaften zusätzlich zu den primär geforderten Bauteileigenschaften hergestellt werden. Die primären Produkteigenschaften sind dabei die, welche für die Funktion des Bauteils erforderlich sind, beispielsweise das Übertragen einer Kraft. Sekundäre Produkteigenschaften sind für zusätzliche Funktionen erforderlich, beispielsweise eine hohe chemische Beständigkeit.

Durch die gezielte Integration und Nutzung sekundärer Produkteigenschaft kann die Bauteilfunktion verbessert, bzw. die Bauteilfunktionsdichte erhöht werden. Dies wird jedoch oftmals erst möglich durch eine prozessgetriebene Produktentstehung, die neue Bauteilvarianten und Anwendungsspektren eröffnet und die Herstellung multifunktionaler und maßgeschneiderter Eigenschaften zum Ziel hat.

Mit der Voruntersuchung "Fertigungsbedingte Produkteigenschaften" (FePro) wurde der vorrangliche Handlungsbedarf für Forschung und Entwicklung in diesem Themenfeld ermittelt. Dabei wurden der Stand der Technik, Entwicklungstrends und praxisorientierte Forschungspotentiale aufgezeigt. Die aufbereiteten und dokumentierten Ergebnisse der Untersuchung ermöglichen es dem BMBF, das Themenfeld Fertigungsbedingte Produkteigenschaften umfassend zu bewerten und relevante Wettbewerbsthemen für das Rahmenkonzept "Forschung für die Produktion von morgen" auszuwählen. In die Untersuchungen wurden maßgebliche Bereiche der deutschen produzierenden Industrie aktiv einbezogen.

Als vordringliche Haupthandlungsfelder wurden nach Abschluss der Studie folgende Thematiken herausgestellt:

- **Vorhersage des Produktfunktionsverhaltens auf Basis der fertigungsbedingten Oberflächen- und Randzoneneigenschaften**
- **Flexibilisierung von Fertigungsprozessketten**
- **Integration von Beschichtungsprozessen in die Prozesskette**
- **Neue Kennwerte und Kennwertsysteme für Produkteigenschaften**

Die identifizierten Forschungs- und Handlungsbedarfe wurden ausführlich unter Einbeziehung von Beispielen vorgestellt und diskutiert.

Zur Wahrung der Wettbewerbsfähigkeit ist es notwendig, effektiv und effizient innovative Produkte zu generieren. Damit diese Produkte ihre Leistungen erfüllen können, müssen sie mit bestimmten Funktionalitäten ausgestattet sein. Diese können nur durch Fertigungsverfahren hergestellt werden. An oben aufgeführten Stellen ist es daher dringend notwendig Forschungsarbeit zu leisten, um die Wettbewerbsfähigkeit Deutschland auf einem hohen Niveau zu stabilisieren.

## **7 Projektförderung**

**Dieses Forschungsprojekt wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) innerhalb des Rahmenkonzeptes "Forschung für die Produktion von morgen" unter dem Förderkennzeichen 02 PU 1010 gefördert und vom Projektträger Forschungszentrum Karlsruhe (PTKA), Bereich Produktion und Fertigungstechnologien (PFT) betreut.**

**Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.**