

Titel: Gewusst wie – Funktionsgerechte Produkteigenschaften aus Hartfeinbearbeitungsprozessen

Autor: Dr.-Ing. Bastian Maier, Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt.Ing. Stefan Tönissen

Firma: Grindaix GmbH, Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen

Zusammenfassung

Um den Anforderungen des Marktes gerecht zu werden, müssen Produkte ihre Funktion über einen definierten Zeitraum erfüllen. Die Menge der bekannten Kennwerte zur Definition von fertigungstechnisch zu erzeugenden Produkteigenschaften reicht zur Beschreibung des Funktionsverhaltens von Bauteilen jedoch nicht aus. Zudem ist der Zusammenhang von Eigenschaften der Bauteiloberfläche und -randzone mit dem Funktionsverhalten von Bauteilen in vielen Fällen nicht hinreichend bekannt. Dadurch kann das Bauteil nicht derart beschrieben werden, dass nach der Fertigung eine Erfüllung der gewünschten Funktionen sicher möglich ist. Weiterhin ist der Zusammenhang zwischen Prozessstellgrößen und dem Funktionsverhalten von Bauteilen bislang nicht ausreichend erforscht. Somit ist eine effiziente Auslegung von Technologien für die gezielte Beeinflussung von Bauteileigenschaften nicht möglich. Es ist daher notwendig, Methoden zu entwickeln, mit denen dieser Zusammenhang ermittelt und dargestellt werden kann.

Im Verbundprojekt PlanPP wird eine Methodik zur funktionsgerechten Prozessplanung in der Hartfeinbearbeitung entwickelt. Hierzu wird über die Definition neuer Kennwerte und Kennwertsysteme zur Beschreibung der Bauteiloberflächencharakteristik der Zusammenhang zwischen dem Funktionsverhalten und relevanten Oberflächenkennwerten hergestellt. Darauf aufbauend wird betrachtet, durch welche Prozesseinstellungen und mit welcher Sicherheit eine definierte Ausprägung der Kennwerte durch den Fertigungsprozess erreicht werden. Um diese Erkenntnisse anwendungsbezogen zur Verfügung zu stellen werden die Zusammenhänge in einem Softwarewerkzeug, dem Technologienavigator, abgebildet. Um die Anwendung verifizieren zu können, wird die Methodik an festgelegten Bauteilen mit bestimmten Funktionalitäten getestet. Dazu werden beispielhaft die Wälzfestigkeit von Hybrid-Wälzlagern und die Biegegeweichfestigkeit nach der Fertigung geprüft.

1 Motivation

Neben dem Werkstoff und der Wärmebehandlung sind die durch verschiedene Fertigungsverfahren erzeugten oberflächennahen Bereiche eines Bauteils von entscheidender Bedeutung für das Bauteilverhalten im Einsatz, da sie in nahezu allen Fällen der Praxis die höchstbeanspruchten Werkstückbereiche darstellen. Hohe Beanspruchungen und nicht an den Einsatzfall angepasste physikalische Eigenschaften der Bauteilrandzone führen zu ca. 85% aller Schadensfälle.

In der Regel erfolgt das Design eines Produkts durch Festlegen der durch das Produkt zu verwirklichenden Funktionalitäten. Jedem Bauteil werden definierte Funktionen zugewiesen, die diese zur Realisierung der Gesamtfunktionalität des Produkts erfüllen müssen. Dieser frühen Phase der Produktgestaltung schließt sich die Bauteilkonstruktion an, in der die makro- und mikrogeometrischen Eigenschaften (Oberflächenkennwerte und deren Ausprägung) der Bauteile und Komponenten festgelegt werden. Dies geschieht meist über heuristische Methoden und es ist nicht ausreichend bekannt, ob die festgelegten Anforderungen für die Sicherstellung der Bauteilfunktionalität angemessen und entscheidend sind (Gap 1).

Basierend auf Erfahrungswerten erfolgt nun in der Fertigungsplanung die Festlegung der Prozesskette (Gap 2). In der Produktion wird durch Try-and-Error- Methoden versucht, die geforderten Kennwerte zu erreichen. Durch unbekanntes Wirkzusammenhänge und

Störeinflüsse kommt es hierbei oft zu einer Abweichung von den Anforderungen (Gap 3). Darüber hinaus lassen sich die geforderten Kennwerte oft durch verschiedene Technologien erreichen.

Beispielsweise können Schleif- und Drehprozesse zu gleichen Rauheitskennwerten führen. Die dennoch in ihrer Charakteristik völlig verschiedenen Bauteiloberflächen werden durch die gewählten Kennwerte nicht erfasst (Gap 4). Das kann wiederum dazu führen, dass die erzeugte Bauteiloberfläche ein ganz anderes Funktionsverhalten aufweist als ursprünglich in der Bauteilkonstruktion geplant (Gap 5). Dies führt zu einer Über- oder Unterdimensionierung der Bauteile und damit zu einer ineffizienten Ausnutzung der Ressourcen.

Es existieren also in der industriellen Praxis wesentliche Erkenntnislücken über den Zusammenhang zwischen der Prozess- bzw. Fertigungsebene und den Oberflächeneigenschaften der Bauteile einerseits sowie zwischen der Oberflächencharakteristik und dem Funktionsverhalten im Einsatz andererseits. Die bisher vorliegenden und verwendeten Kennwerte reichen nicht aus, um diesen Zusammenhang ausreichend zu beschreiben und zu beherrschen.

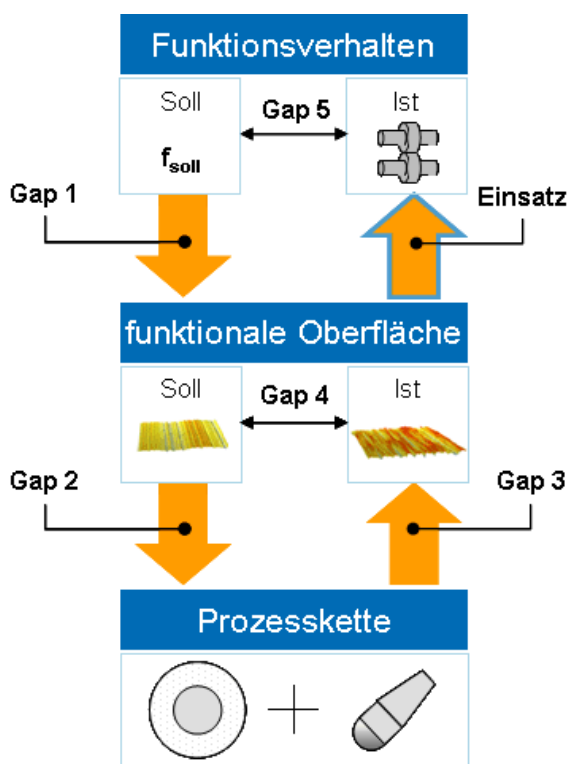


Abb. 1: -Modell der funktionsorientierten Fertigungstechnik

2 Projektidee

Ziel der Forschungsarbeiten ist die Entwicklung eines Planungswerkzeuges zur funktionsgerechten Auslegung und Herstellung von Produkteigenschaften für Prozesse der Hartfeinbearbeitung.

Es wird eine Methode zur funktionsgerechten Prozessplanung in der Hartfeinbearbeitung entwickelt. Hierzu wird über die Definition neuer Kennwerte und Kennwertsysteme zur Beschreibung der Bauteiloberflächencharakteristik der Zusammenhang zwischen dem Funktionsverhalten und relevanten Oberflächenkennwerten hergestellt. Darauf aufbauend wird betrachtet, wie die Kennwerte durch den Fertigungsprozess erreicht werden. Um diese Erkenntnisse anwendungsbezogen zur Verfügung zu stellen werden die Zusammenhänge in einem Softwarewerkzeug, dem Technologienavigator, abgebildet. Um die Anwendung verifizieren zu können, wird die Methodik an festgelegten Bauteilen mit bestimmten Funktionalitäten getestet. Dazu werden beispielhaft die Wälzfestigkeit von Hybrid-Wälzlagern

und die Biegewechselfestigkeit nach der Fertigung geprüft. Als Fertigungsverfahren werden das Außenrund-Umfangs-Querschleifen und das Hartdrehen, sowie die Verfahrenskombinationen Schleifen-Walzen und Hartdrehen-Walzen eingesetzt. Es wird ein allgemeingültiger Ansatz verfolgt, der es erlaubt, die Methodik auf weitere Bauteilgruppen, Funktionalitäten und Produkteigenschaften zu erweitern.

Der Function Footprint beschreibt die optimalen Ausprägungen von Oberflächenmerkmalen zur Erfüllung einer definierten Funktionalität. Anschließend sollen der Einfluss der Fertigungsfolge und deren Prozessparameter auf die erarbeiteten Kennwerte bzw. Kennwertsysteme systematisch ermittelt werden (Technology Footprint). So können unterschiedliche Prozessketten zu einer unter- oder überdimensionierten Ausprägung der Kennwerte führen, gleichbedeutend mit einer fehlenden Funktionserfüllung des Bauteils oder einer ineffizienten Ressourcen verschwendenden Auslegung der Fertigungskette. Daher gilt es die Kombination der Fertigungsverfahren und die jeweiligen Prozesseinstellung so zu wählen, dass die für eine geforderte Funktionalität optimale Ausprägung der Kennwertsysteme erreicht wird.

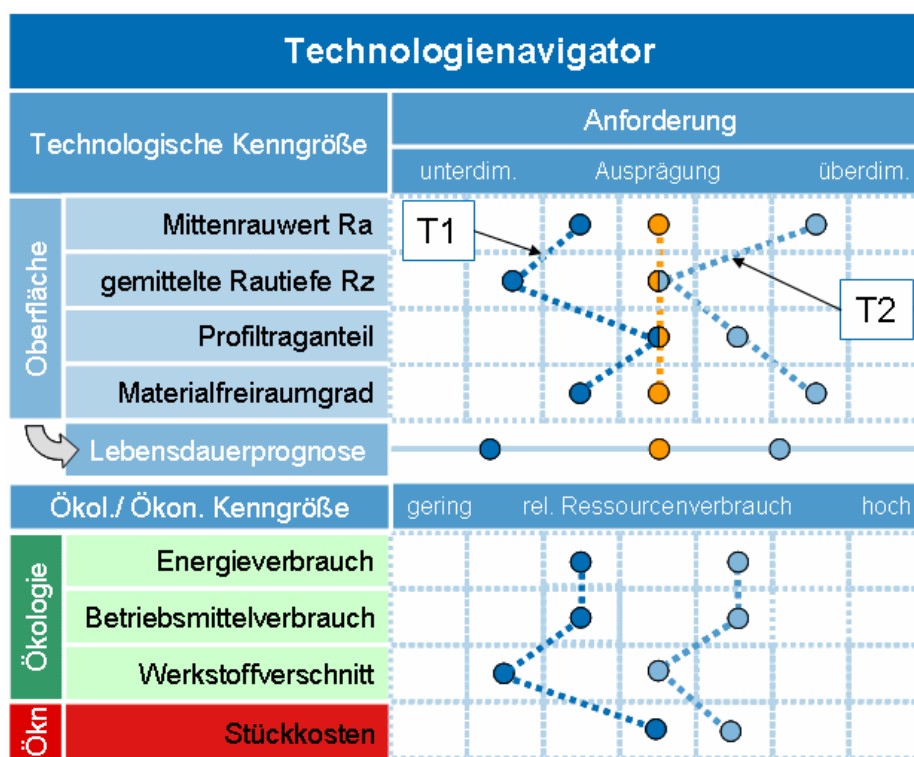


Abb. 2: Function und Technology Footprint

3 Methodik

Um das Funktionsverhalten systematisch und effizient zu optimieren, ist eine Methodik erforderlich, die eine Untersuchung des Einflusses der Prozesse sowie deren Parameter auf die spätere Bauteilfunktion ermöglicht. Zahlreiche wissenschaftliche Untersuchungen haben den Einfluss der Oberflächen- und Randzoneneigenschaften auf die Bauteilfunktion für unterschiedliche Funktionalitäten unterstrichen. Werden Oberflächen- und Randzoneneigenschaften variiert, so variiert auch die Anzahl der Belastungszyklen bis zum Eintritt eines definierten Bauteilversagenskriteriums. Diese Anzahl der Belastungszyklen soll in dieser Arbeit als „Funktionalität“ verstanden werden. Eine Variation der Oberflächen- und Randzoneneigenschaften kann durch eine unterschiedliche Wahl der Prozessparameter erreicht werden.

Innerhalb der Methodik, die in dem Projekt PlanPP erprobt werden soll, werden für zwei unterschiedliche Funktionalitäten verschiedene Prozessketten definiert. Für jede

Prozesskette werden darüber hinaus die Prozessparameter variiert. Daraufhin werden Analogiebauteile durch die unterschiedlichen Prozessketten und bei variierten Prozessparametern gefertigt, so dass insgesamt eine große Anzahl an unterschiedlichen Bauteilen in die Untersuchung einfließt. Nach Fertigung der Analogiebauteile erfolgt die Prüfung der Bauteilfunktionalität auf Analogieprüfständen.

Da eine ganzheitliche Variation der Prozessparameter auf Grund des Versuchsaufwands unmöglich ist, gilt es, geeignete Parameter zu identifizieren, um die Anzahl der Versuche realisierbar zu halten. Dazu werden basierend auf Expertenwissen sowie durch Literaturrecherchen für jeden Fertigungsprozess solche Parameter identifiziert, die einen sensitiven Einfluss auf die Oberflächen- und Randzoneneigenschaften besitzen.

In folgender Abbildung 3 ist eine Übersicht über die im BMBF-Projekt untersuchten Funktionalitäten sowie die untersuchten Prozessketten dargestellt. Im Projekt wird die Wälzfestigkeit sowie die Umlaufbiegefestigkeit betrachtet. Es wurden diese beiden Funktionalitäten ausgewählt, da sie von großer industrieller Relevanz sind. Darüber hinaus unterscheiden sich diese beiden Funktionalitäten in einem entscheidenden Punkt: Während bei der Umlaufbiegefestigkeit die größte Belastung an der Bauteiloberfläche vorliegt, tritt für die Wälzfestigkeit der größte Spannungszustand gemäß der Hertzschen Pressung unterhalb der Oberfläche auf. Dementsprechend erfolgt die Rissbildung bei einem auf Umlaufbiegung belasteten Bauteils in der Regel an der Oberfläche während bei einem wälzbelasteten Bauteil der Punkt der Rissinitiierung unterhalb der Oberfläche auftritt.

Je Funktionalität werden vier verschiedene Prozessketten für die Fertigung der Analogiebauteile eingesetzt. In einem ersten Prozessschritt werden Rohteile gleichen Ausgangszustands entweder geschliffen oder hartgedreht. In einem zweiten Prozessschritt wird dann ein Teil der Bauteile hartglattgewalzt. Somit ermöglicht die Untersuchung eine genaue Ermittlung des Effekts des Hartglattwalzens. Es kann eine Aussage über den Effekt des Hartglattwalzens auf die Funktionalität durch den Vergleich mit Bauteilen, die nicht hartglattgewalzt wurden, getätigt werden. Gleichzeitig ermöglicht das Vorgehen auch eine Betrachtung des Einflusses des vorherigen Prozessschrittes. Es kann also ermittelt werden, inwieweit das Schleifen bzw. das Hartdrehen bei nachgeschalteter Hartglattwalzoperation vorteilhaft für die jeweilige Bauteilfunktion ist.

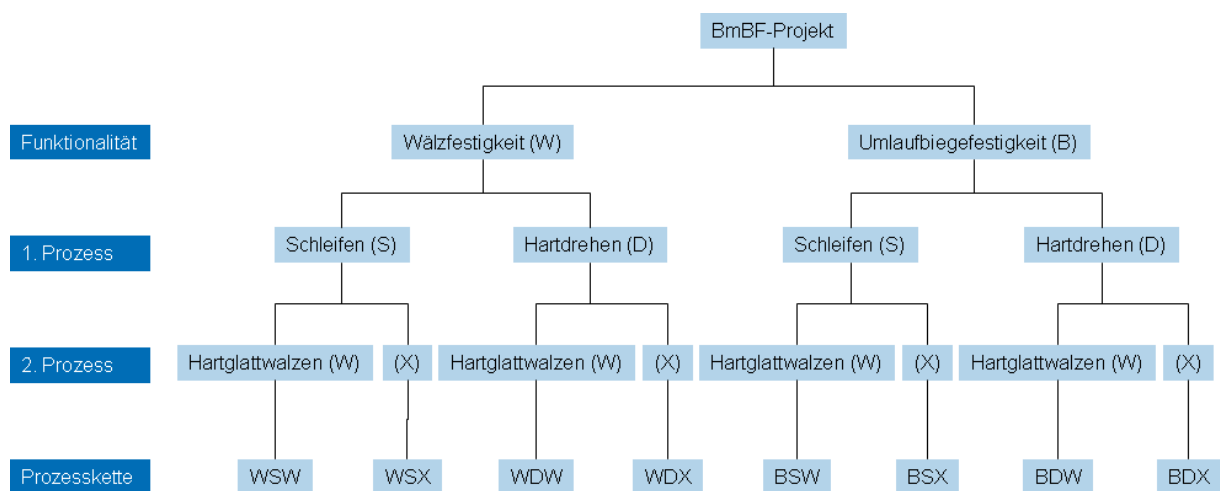


Abb. 3: Prozesskettenvariation für die ausgewählten Funktionalitäten

Da eine möglichst große Anzahl an Analogiebauteilen Voraussetzung für einen großen Erkenntnisgewinn ist, muss der Prüfstand eine effiziente Bauteilprüfung ermöglichen. Zur Prüfung der Bauteilfunktionalität „Wälzfestigkeit“ wird in dem BMBF-Projekt ein innovatives Prüfstandkonzept erprobt. Im Gegensatz zu herkömmlichen 2-Rollenprüfständen wird in dem Prüfstand der Ecoroll AG eine Prüfrolle durch drei Walzwerkzeuge wie in folgender Abbildung dargestellt belastet. Auf Grund der kleinen Radien der Walzwerkzeuge sowie der verhältnismäßig kleinen Radien der Prüfrolle, ermöglicht dieser Prüfstand die Realisierung

von relativ großen Hertzschen Pressungen bei vergleichsweise kleinen Kräften. Trotz der großen Hertzschen Pressungen ist also keine massive Prüfstandsauslegung erforderlich. Die Belastung der Prüfrollen kann kurz unterhalb der Fließgrenze des Werkstoffs erfolgen. Folglich kann mit kurzen Zeiten bis zum Versagen des Analogiebauteils gerechnet werden.

Neben den großen mechanischen Belastungen bietet das Prüfstandskonzept den Vorteil der Auswechselbarkeit der kugelförmigen Walzkörper. Somit können unterschiedliche Werkstoffpaarungen wie getestet werden. Dabei ist für das Projekt insbesondere die Materialpaarung Prüfrolle/Cronidur 30, Wälzkörper/ Si_3N_4 Keramik von Interesse, da diese Paarung in Hybridlagern des Projektpartners Cerobear Verwendung findet.

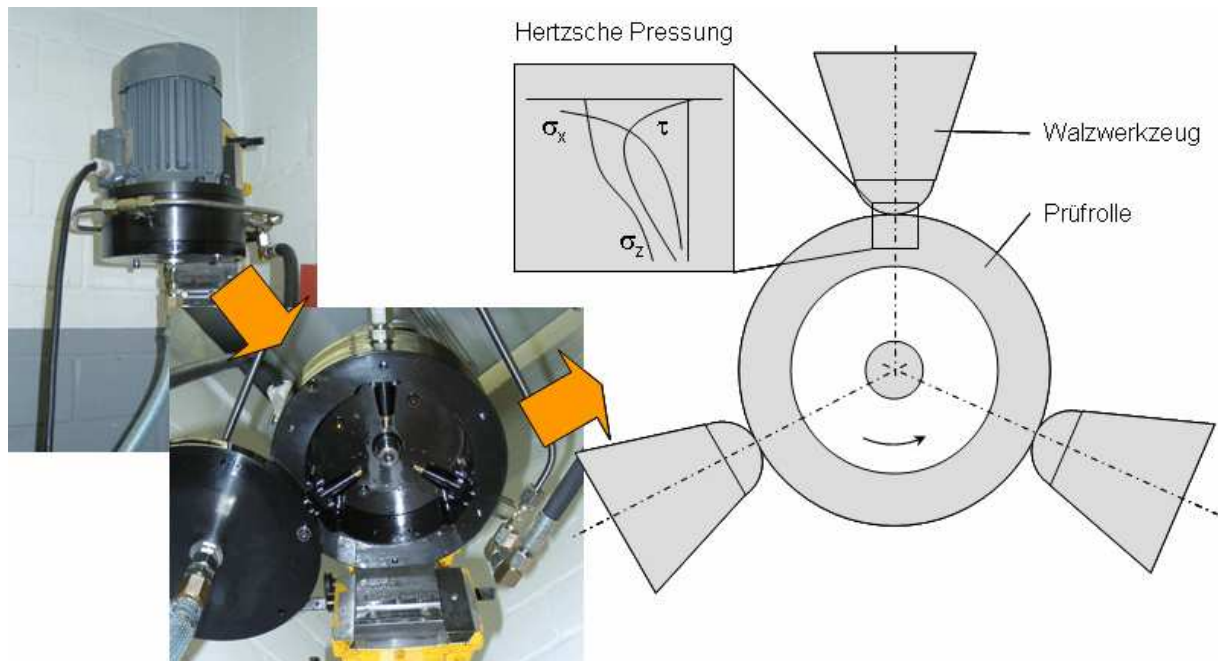


Abb. 4: Prüfstand Wälzfestigkeit (Quelle: Ecoroll AG)

Für die Prüfung der Bauteilfunktionalität „Umlaufbiegefestigkeit“ kommt ebenfalls ein innovatives Prüfstandskonzept zur Anwendung. Für kleine Probendurchmesser ist der Einfluss der Oberflächen- und Randzoneneigenschaften auf die Bauteilfunktionalität bereits nachgewiesen. Für große Bauteildurchmesser ist der Einfluss noch ungeklärt, da geeignete Prüfstände auf Grund der bei großen Durchmessern auftretenden Kräfte sehr massiv ausgelegt sein müssen. Im Rahmen des BMBF-Projekts wird daher erstmals ein besonders massiver Prüfstand konstruiert und gebaut, der die Prüfung von Bauteilen mit einem Durchmesser von bis zu 40mm ermöglicht.

Wie weiter oben ausgeführt hängt die Anzahl der Belastungszyklen bis zum Erreichen des Versagenskriteriums vom Zustand der technischen Oberfläche und der Randzone ab. In der Vergangenheit ist es nicht gelungen, den Zustand der technischen Oberfläche und der Randzone durch einen einzelnen topographischen Kennwert zu beschreiben und mit diesem Kennwert das Funktionsverhalten des Bauteils für die Wälzfestigkeit sowie die Umlaufbiegefestigkeit zu erklären. Neben der Topographie sind bei der Beschreibung der Oberfläche und der Randzone beispielsweise auch der Eigenspannungszustand sowie das Mikrohärtprofil zu berücksichtigen. Anstelle eines einzelnen Kennwerts ist der Zustand einer technischen Oberfläche folglich durch einen Vektor an Eigenschaften zu beschreiben.

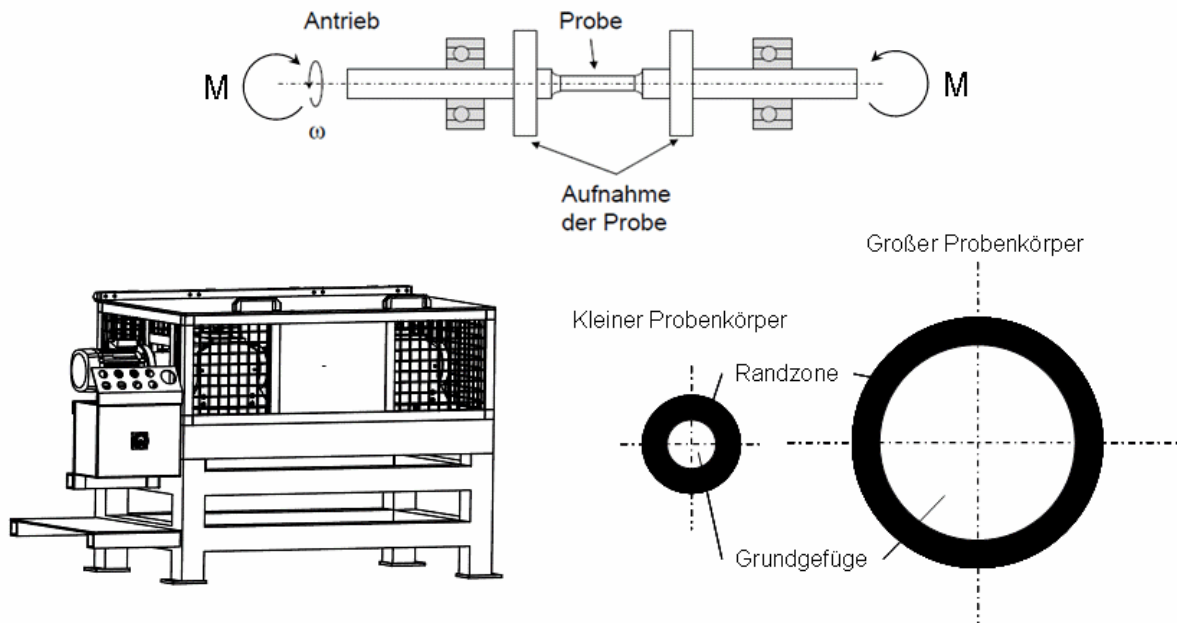


Abb. 5: Prüfstand Umlaufbiegefestigkeit (Quelle: Ecoroll AG)

Zur Beschreibung der Topographie sowie der Randzone sind in der Literatur hunderte Kennwerte definiert. Das Projekt versucht aus den bestehenden Kennwerten diejenigen zu identifizieren, die das Funktionsverhalten am besten erklären können. Dazu werden für jede Oberfläche möglichst viele Kennwerte ermittelt und es wird geprüft, welche Kennwerte die Variation der Funktionalität widerspiegeln.

Neben bereits definierten Kennwerten sollen auch neue, funktionsbezogene Kennwerte definiert werden. Bei der Definition neuer Kennwerte werden zwei Ansätze verfolgt. Für die versagensinduzierte Kennwertbildung werden aus den praktischen Versuchen sowie aus der Literatur die relevanten Versagensursachen identifiziert. Der Versagensursache liegen ein Verschleißmechanismus und eine Verschleißursache zu Grunde.

Für die Wälzfestigkeit ist die Verschleißursache die dynamische Hertzsche Pressung, deren Maximum in einer Tiefe z unterhalb der Oberfläche auftritt. In dieser Tiefe z liegt der Rissinitiierungspunkt. Es ist bereits bekannt, dass über das Fertigungsverfahren der Eigenspannungszustand und somit die Lage des Maximums der Hertzschen Pressung beeinflusst werden kann. Der Verschleißmechanismus ist die Risspropagation vom Rissinitiierungspunkt bis zur Werkstückoberfläche. Erreicht ein Riss die Oberfläche, so brechen nach und nach Pittings aus und das Bauteil versagt. Durch das Verständnis von Verschleißursache und Verschleißmechanismus wird offensichtlich, dass zur Erklärung der Funktionalität „Wälzfestigkeit“ nicht allein die Topographie sondern vielmehr auch der Eigenspannungszustand in entsprechenden Kennwerten zu berücksichtigen ist.

Neben der versagensinduzierten Kennwertbildung soll im Projekt auch die messdateninduzierte Kennwertbildung verfolgt werden. Durch neuartige Messverfahren und durch softwaretechnische Auswertung ist es möglich, aus den Messdaten neuartige Kennwerte zu generieren. So wird es beispielsweise durch die Weißlichtinterferometrie möglich, dreidimensionale Oberfläche zu erfassen und am Computer zu untersuchen. Allerdings entstammen die gegenwärtig verbreiteten Kennwerte einer Zeit, in der in der Oberflächenmesstechnik vor allem auf Tastschnittverfahren zurückgegriffen wurde. Die konventionellen Kennwerte basieren auf zweidimensionalen Tastschnitten, die für die Kennwertbildung auf eine verhältnismäßig geringe Datenbasis zurückgreifen. Kennwerte, die aus einer dreidimensionalen Vermessung der Oberfläche gewonnen werden, finden jedoch zur Zeit noch wenig Anwendung in der Praxis. Es gilt in dem Projekt zu evaluieren, inwieweit dreidimensionale Kennwerte Vorteile bei der Beschreibung der Oberfläche und Erklärung des Funktionsverhaltens bieten.

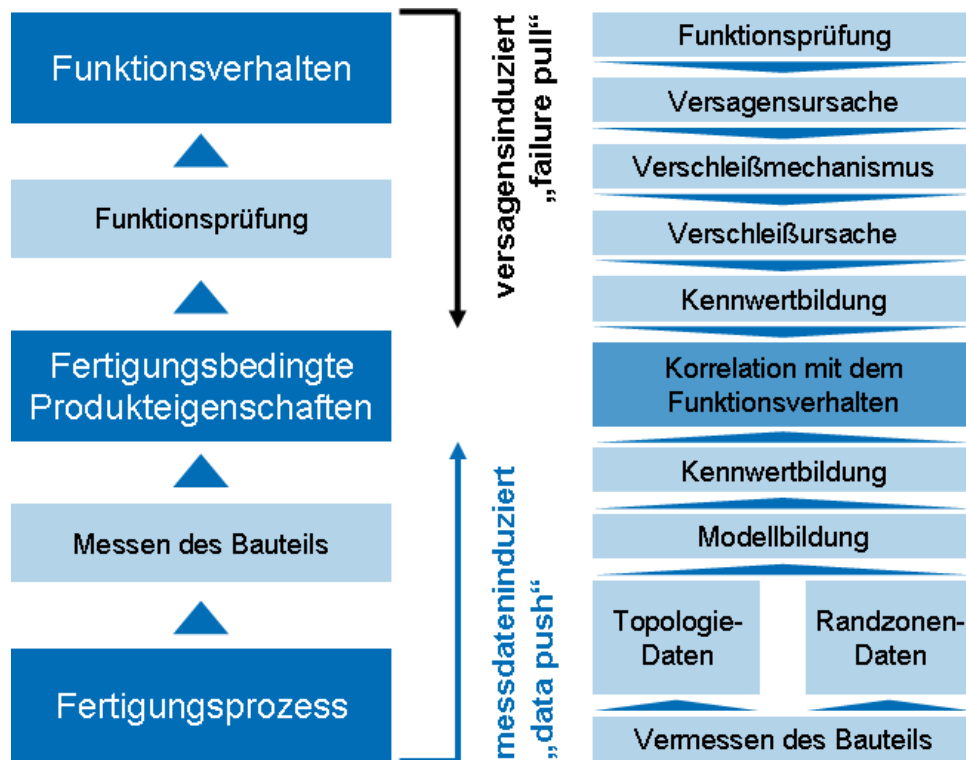


Abb. 6: Modell zur messdaten- und versagensinduzierten Kennwertbildung)

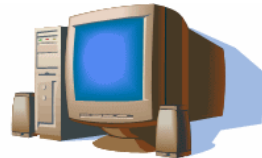
4 Softwaretool „Technologienavigator“

Die Projekterkenntnisse und die erarbeitete Methodik soll im Technologienavigator verfügbar und erweiterbar umgesetzt werden. Dabei soll der Technologienavigator langfristig dem Benutzer folgende Möglichkeiten bieten: Bei der Auslegung der Technologiekette und der jeweiligen Bearbeitung für einen definierten Anwendungsfall soll der Benutzer zukünftig nach Eingabe der Belastungsart, die für das Bauteil im Einsatz vorliegt (z.B. Wälzbelastung), über den Technologienavigator die für diese Funktionalität relevanten Oberflächenmerkmale und Kennwertsysteme erfahren. Nach der Eingabe weiterer Randbedingungen der Anwendung wie beispielsweise Werkstoff, Geometrie und Anforderungen sowie der gewünschten Lebensdauer gibt der Technologienavigator die dazu erforderlichen Ausprägungen der Oberflächenmerkmale aus. Anschließend erhält der Nutzer über den Technologienavigator mögliche Fertigungsketten und die jeweiligen Prozesseinstellungen, welche die Erreichung der geforderten Ausprägungen erlauben. Über einen Abgleich mit den unternehmensspezifischen Randbedingungen, wie im Unternehmen verfügbare Technologien, erfolgt eine Reduktion des Lösungsraums und damit die unternehmensgerechte Auswahl einer Fertigungskette zur funktionsgerechten Prozessauslegung.

Zur Erreichung des vorgenannten Ziels muss der Technologienavigator zunächst die Erfassung der relevanten Technologie- und Versuchsdaten (Prozessebene), der entwickelten Kennwerte und Kennwertsystem (Bauteileigenschaftsebene) und der Funktionseigenschaften wie Lebensdauer, Verschleißerscheinungen, etc. (Funktionalitätsebene) ermöglichen. Durch die zu entwickelnden Modelle sollen dann später Technologiedaten, Kennwertsysteme und Funktionalität miteinander verknüpft werden und die Zusammenhänge ebenfalls im Technologienavigator abgebildet werden.



Benutzer



Technologienavigator

Eingabe der Belastungsart



Ausgabe relevanter
Oberflächenmerkmale und
Kennwertsysteme

Eingabe der Randbedingungen
der Anwendung und der
gewünschten Lebensdauer



Ausgabe der Ausprägungen der
Oberflächenmerkmale und
Kennwertsysteme

Ausgabe von verschiedenen
Fertigungsketten und der
optimalen Prozesseinstellungen

Eingabe der unternehmens-
spezifischen Randbedingungen



Reduktion des Lösungsraums

Abb. 7: Prinzip der Benutzer-Software-Interaktion des Technologienavigators

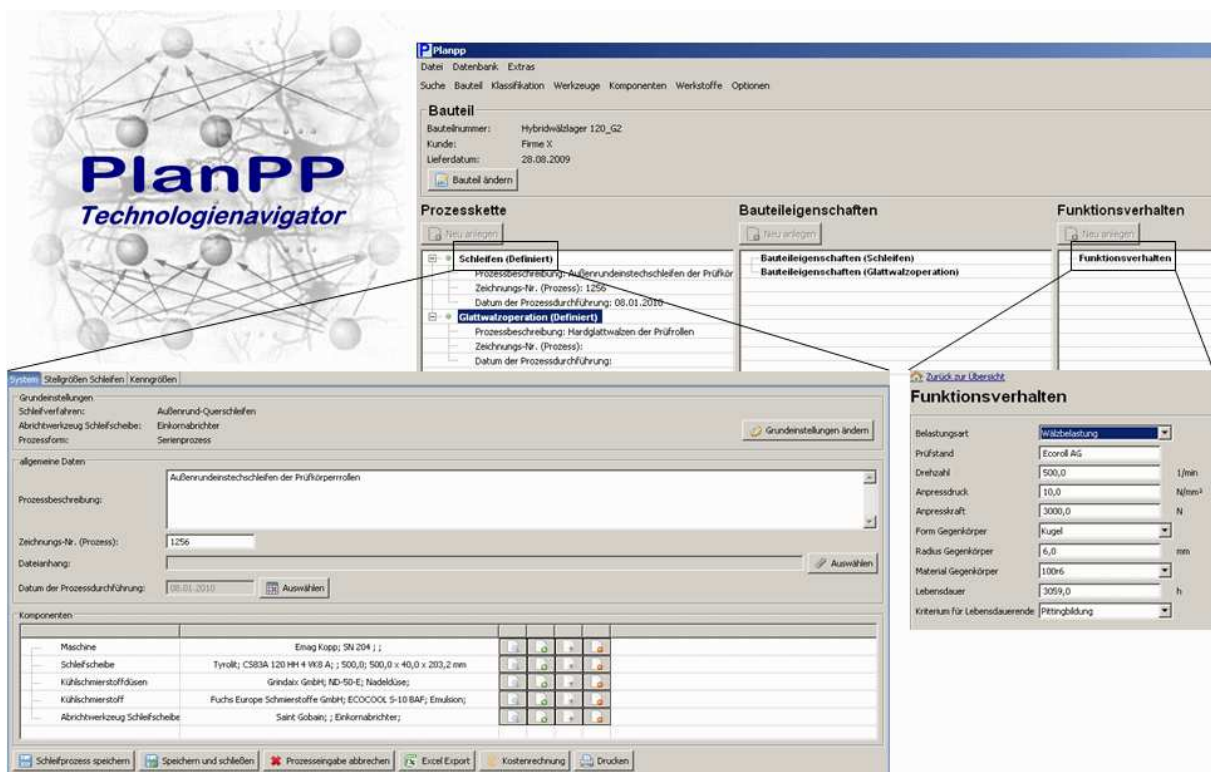


Abb. 8: Auszug aus der softwaretechnischen Umsetzung des Technologienavigators

Die Erfassung der drei genannten Ebenen konnte bereits softwaretechnisch umgesetzt werden. Zum einen können alle Bauteile oder Prüfkörper, Werkzeuge für die Fertigungsprozesse, Werkstoffe und sonstigen Systemkomponenten verwaltet werden. Dem zu bearbeitenden Bauteil können verschiedene Fertigungsschritte zugeordnet werden, welche dann mit ihren Systemkomponenten und Prozessstellgrößen im Detail erfasst werden. Neben der Erfassung der Bauteileigenschaften hinsichtlich Topographiekenwerten

und Randzoneneigenschaften ist die Beschreibung des Funktionsverhaltens auf Prüfständen möglich.

Diese technologische Erfassung des gesamten Fertigungs- und Funktionssystem ist die Grundlage für die im weiteren Projektverlauf zu entwickelnde modelltechnische Abbildung der Zusammenhänge zwischen Prozess-, Bauteileigenschafts- und Funktionalitätsebene.