



MATERIALS DATA SPACE®



MATERIALS DATA SPACE®

ECKPUNKTEPAPIER DES FRAUNHOFER-VERBUNDS MATERIALS

Fraunhofer-Verbund MATERIALS

Der Fraunhofer-Verbund Werkstoffe, Bauteile – MATERIALS bündelt die Kompetenzen der 15 materialwissenschaftlich orientierten Institute der Fraunhofer-Gesellschaft.

Materialforschung bei Fraunhofer umfasst die gesamte Wertschöpfungskette von der Entwicklung neuer und der Verbesserung bestehender Materialien über die Herstelltechnologie im industrienahen Maßstab, die Charakterisierung der Eigenschaften bis hin zur Bewertung des Einsatzverhaltens. Entsprechendes gilt für die aus den Materialien hergestellten Bauteile und deren Verhalten in Systemen.

Mit Schwerpunkt setzt der Verbund sein Know-how in den volkswirtschaftlich bedeutenden Handlungsfeldern Energie, Gesundheit, Mobilität, Informations- und Kommunikationstechnologie sowie Bauen und Wohnen ein, um über maßgeschneiderte Werkstoff- und Bauteilentwicklungen Systeminnovationen zu realisieren.

Der Verbund MATERIALS ist der größte Verbund innerhalb der Fraunhofer-Gesellschaft mit über 2500 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern und einem Jahresbudget von über 500 Millionen Euro.

EINE INITIATIVE ZUR IMPLEMENTIERUNG VON INDUSTRIE 4.0 IN WERKSTOFFINTENSIVEN WERTSCHÖPFUNGSKETTEN

»Materials Data Space® ist die Grundlage für die Werkstoffentwicklung, -herstellung und -verarbeitung innerhalb von Industrie 4.0«

Koordination für den Verbund MATERIALS:
Prof. Ralf Wehrspohn, Fraunhofer IMWS

Fraunhofer-Verbund MATERIALS

Geschäftsstelle
c/o Fraunhofer LBF
Bartningstraße 47
64289 Darmstadt

Telefon +49(0)6151 705262
ursula.eul@lbf.fraunhofer.de

INHALTSVERZEICHNIS

Inhaltsverzeichnis.....	2
Zusammenfassung.....	3
1 Motivation	4
2 Begriffsbildung »Materials Data Space« innerhalb von Industrie 4.0.....	5
3 Inhalte und Vernetzung des Materials Data Space.....	7
4 Roadmap zum Materials Data Space.....	15
5 Use Cases.....	18
5.1 Use Case 1: Faserverbundwerkstoffe / Faserverbundbauteile.....	18
5.2 Use Case 2: Metallverarbeitung / Metallformgebung	25
5.3 Use Case 3: Funktionswerkstoffe und intelligentes Recycling	31
Glossar.....	38
Impressum	40

ZUSAMMENFASSUNG

1 Studie »Werkstoffinnovationen für nachhaltige Mobilität und Energieversorgung«, Verein Deutscher Ingenieure e.V., 2014; acatech diskutiert, Werkstoffe als Motor für Innovationen, Hartwig Höcker (Hrsg.), acatech workshop, Berlin, 17. Oktober 2007

Neue Werkstoffe sind der entscheidende Treiber bei der Entwicklung innovativer Produkte im verarbeitenden Gewerbe. Schätzungen zufolge basieren heute bis zu 70 % aller neuen Erzeugnisse auf neuen Werkstoffen¹. Daher ist für eine erfolgreiche Implementierung von Innovationen innerhalb von **Industrie 4.0** die Berücksichtigung der Werkstoffe von zentraler Bedeutung. Der Fraunhofer-Verbund MATERIALS hat daher das Konzept des **Materials Data Space** als Grundlage für die Werkstoffentwicklung, -herstellung und -verarbeitung innerhalb von Industrie 4.0 entwickelt. So wie Material und Werkstoffe den substanzialen Träger für die Werkstücke und Bauteile liefern, ist der **Materials Data Space** das digitale Abbild davon. Er stellt digitalisiert alle relevanten Informationen zu Materialien und Werkstoffen in einer leistungsfähigen und unternehmensübergreifenden digitalen Infrastruktur über den gesamten Lebensdauerzyklus zur Verfügung.

Aus der Implementierung des **Materials Data Space** und der Durchgängigkeit von Material- und Werkstoffdatenflüssen in Wertschöpfungsketten ergeben sich zahlreiche Chancen:

- Neue Werkstoffe lassen sich durch die verbesserte Übersetzung der Zieleigenschaften in die dazu erforderliche Mikrostruktur deutlich schneller und wirtschaftlicher entwickeln.
- Lernende Fertigungsverfahren werden mittels virtueller Prozesskettensimulation und Echtzeitmesstechnik auf ihre Auswirkungen auf den Werkstoff im Bauteil rückgekoppelt. Dadurch lassen sich Bauteilfunktionalitäten und -qualitäten zielgerichtet und dynamisch im Prozess einstellen, die Ausbeute in der Fertigung erhöhen und die wirtschaftliche Fertigung von kleinen Losgrößen sicherstellen.
- Die Digitalisierung von Materialien und Werkstoffen über ihre gesamte Wertschöpfungskette erzeugt einen zusätzlichen Mehrwert, indem nicht nur der Werkstoff selbst, sondern auch seine digitale Repräsentation Gegenstand von Geschäftsmodellen werden können.

Entscheidende Voraussetzung dafür ist, dass auch der Werkstoff selbst Industrie-4.0-fähig wird. Das vorliegende Konzept wurde von der Carl Zeiss AG, der ZF Friedrichshafen AG und des Bereichs »Materialwissenschaft und Werkstofftechnik« der Geschäftsstelle der DFG gegengelesen und als vielversprechend bewertet. Viele weitere deutsche Unternehmen haben Interesse an Use-Cases zum Aufbau und zur Nutzung von **Materials Data Space** signalisiert.

1 MOTIVATION

Der Materialkostenanteil liegt im deutschen verarbeitenden Gewerbe zwischen 35 und 55 Prozent des Bruttoproduktionswertes und somit deutlich höher als der Energiekostenanteil (zwischen 2–8 Prozent). Oftmals sind es gerade diese hohen Materialkosten, welche die Einführung innovativer Technologien in die Produktion erschweren, wie sich am Beispiel des Einsatzes von CFK in der automobilen Großserie zeigt. Darüber hinaus führt der aktuell schwache Euro zu erhöhten Importpreisen bei Materialien und damit zu einem globalen Wettbewerbsnachteil der in Deutschland produzierenden Industrie. Für die Senkung des Materialkostenanteils in der Produktion, die Rückwärtsintegration in der Fertigung, die wirtschaftliche Herstellung auch kleiner Losgrößen und für die optimierte Nutzung von Werkstoffeigenschaften zur Verbesserung der Leistungsfähigkeit von Bauteilen ist die Durchgängigkeit von Material- und Werkstoffdaten über unternehmensinterne Prozessketten hinaus entlang ganzer Wertschöpfungsketten (z. B. Material-, Werkstoff- und Halbzeughersteller → Bauteilhersteller → Endnutzer/Bauteileinsatz → strategisches Recycling/Entsorgung) essentiell. Dadurch können Einkaufs- und Entwicklungskosten gesenkt, Entwicklungszeiten verkürzt, Werkstoffe zielgerichteter hergestellt und eingesetzt sowie Bauteilfunktionen und -qualität inklusive der Lebensdauer kontinuierlich verbessert werden. Die Durchgängigkeit im Material- und Werkstoffdatenfluss eröffnet neue Handlungsräume für die Realisierung materialintensiver Innovationen und neuer Geschäftsmodelle. Diese erzeugen einen zusätzlichen Mehrwert, indem nicht nur der Werkstoff selbst, sondern auch weitere Funktionalitäten (z. B. Werkstoffzustand, -eigenschaften und -modelle) verkauft werden können. Diese beschleunigen beim Kunden die Einführung neuer Materialien und Werkstoffe mit neuen Funktionen, besserer Weiterverarbeitung und ermöglichen eine Wiedernutzung und letztlich das Recycling. Durch strategisches Recycling und die genaue Kenntnis über Kritikalität von Elementen und Verbindungen wird die Nachhaltigkeit der genannten Innovationen unterstützt, damit auch in Zukunft autark und kostengünstig High-Tech-Werkstücke produziert werden können.

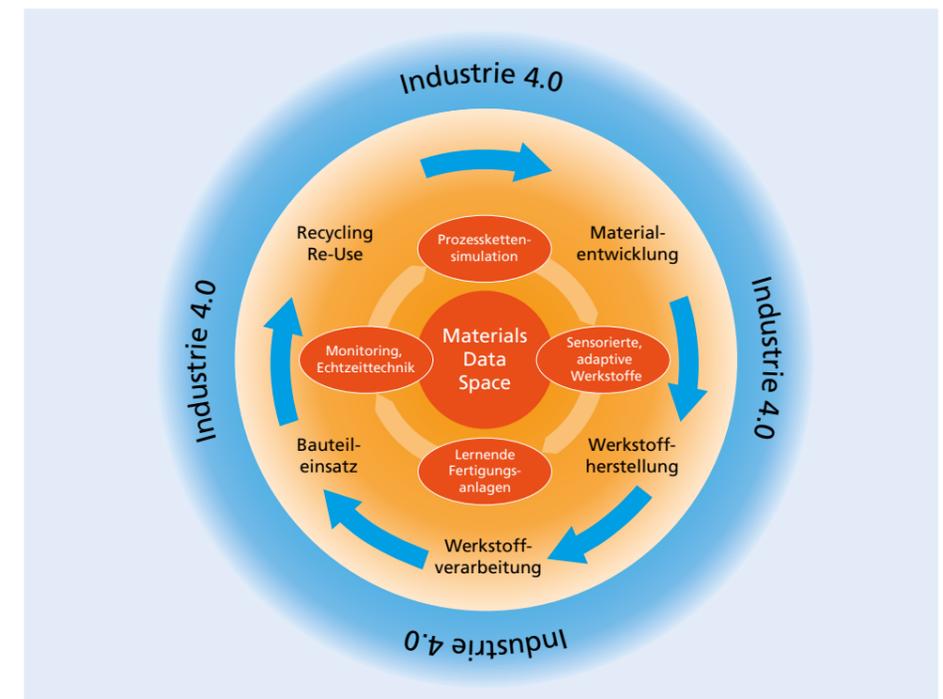
2 BEGRIFFSBILDUNG »MATERIALS DATA SPACE« INNERHALB VON INDUSTRIE 4.0

2 BITKOM, VDMA, ZVEI 2015: Umsetzungsstrategie Industrie 4.0 Ergebnisbericht der Plattform Industrie 4.0, April 2015.

3 <http://www.bmwi.de/DE/Themen/Industrie/industrie-4-0.html>

Nach Definition² der Plattform **Industrie 4.0** steht der Begriff **Industrie 4.0** »für die vierte industrielle Revolution, einer neuen Stufe der Organisation und Steuerung der gesamten Wertschöpfungskette über den Lebenszyklus von Produkten.« Durch die enge Verzahnung der Industrie mit der modernen Informations- und Kommunikationstechnik werden von der Idee über die Entwicklung, Fertigung, Nutzung und Wartung bis hin zum Recycling (inkl. der damit verbundenen Dienstleistungen) maßgeschneiderte Produkte nach individuellen Kundenwünschen (*on demand*, adaptiv, multifunktional, *by design*, kostengünstig, mit hoher Qualität) und bei kürzeren Innovationszyklen möglich.³ Basis ist die Verfügbarkeit relevanter Informationen in Echtzeit durch Vernetzung der an der Wertschöpfung beteiligten Instanzen, die Fähigkeit aus den Daten den optimalen Wertschöpfungsfluss abzuleiten, um echtzeitoptimierte und selbst organisierende, unternehmensübergreifende Wertschöpfungsnetzwerke zu etablieren, die sich nach unterschiedlichen Kriterien wie Kosten, Verfügbarkeit und Ressourcenverbrauch optimieren lassen. Mit diesen *Cyber-physikalischen Produktionssystemen* entsteht ein virtueller Raum, für den die Vision entwickelt werden kann, dass sich Werkstücke und Produkte autonom darin bewegen, d. h. in Wechselwirkung mit den Herstellungs- und Bearbeitungsmaschinen und -anlagen stehen und ihren eigenen Gestehungsprozess steuern sowie nachfolgend in analoger Wechselwirkung mit der Umgebung alle weiteren Etappen des Lebensdauerzyklus und auch das Recycling mit eigenständigen, proaktiven Wirkungen beeinflussen.

Abb. 1: Schematische Darstellung der Struktur des **Materials Data Space** entlang der Wertschöpfungskette von der Materialentwicklung bis zum Bauteileinsatz und entlang des Produktlebenszyklus, von der Werkstoffherstellung bis zum Recycling sowie der Einbettung in **Industrie 4.0**.



So wie das Material den substanziellen Träger für die Werkstoffe, Werkstücke und Bauteile liefert, ist der **Materials Data Space** das digitale Abbild davon, deshalb ein notwendiger und integraler Bestandteil für **Industrie 4.0** und stellt digitalisiert alle relevanten Informationen zu den Werkstoffen und Bauteilen in einer leistungsfähigen und unternehmensübergreifenden digitalen Infrastruktur zur Verfügung. Dafür muss der **Materials Data Space** für die Datensouveränität und -sicherheit dieselben Anforderungen erfüllen wie der sogenannte Industrial Data Space⁴, eine Initiative der Fraunhofer-Gesellschaft zur Schaffung eines sicheren Datenraumes für Wertschöpfungsnetzwerke. Für die enge Interaktion zwischen beiden ist es naheliegend, dass beide eine ähnliche Strukturierung und Vernetzungsarchitektur besitzen sollten. Dabei geht die Vernetzung des **Materials Data Space** über die Wertschöpfungskette von **Industrie 4.0** mit ihrem Fokus auf die produzierende Wirtschaft hinaus und enthält Lebensdauerkonzepte (*end of live scenarios*) bis hin zu intelligentem Re-Use und strategischem Recycling.

Materials Data Space als intelligente digitale Vernetzung wird die Effizienz und das Innovationspotenzial materialintensiver Wertschöpfungsketten durch **Industrie 4.0** signifikant steigern, indem er diese mit Material- und Werkstoffwissen durchdringt, eine nichtinvasive sensorische Erfassung erlaubt und Entwicklern und Ingenieuren ermöglicht, die eingesetzten Werkstoffe in den jeweiligen Entwicklungsschritten als variable Systeme mit einstellbaren Eigenschaften zu begreifen und zu nutzen.

Der **Materials Data Space** speist sich über vier zentrale Interaktionsschnittstellen:

- Prozesskettensimulation
- Monitoring der dynamischen Eigenschaften der Werkstoffe entlang der gesamten Prozesskette und über die Produktlebensdauer in Echtzeit
- Sensorierte⁵, adaptive Werkstoffe (d. h. Industrie-4.0-fähige Werkstoffe)
- Lernende Fertigungsanlagen für die Werkstoffverarbeitung

4 <https://www.fraunhofer.de/content/dam/zv/de/presse-medien/2015/industrial-data-space-eckpunkte.pdf>

5 »sensortiert« bedeutet hier im engeren Sinne, die im Innern des Werkstoffs ablaufende Erfassung von Eigenschaftsveränderungen; im weiteren Sinne wird hier damit auch das Einprägen von außen zur Informationsspeicherung bezeichnet

3 INHALTE UND VERNETZUNG DES MATERIALS DATA SPACE

Begreift man **Industrie 4.0** als die wachsende und letztlich durchgängige Digitalisierung der Produktion und der mit ihr vernetzten Bereiche, so wird sofort klar, dass dabei die Digitalisierung des Bereichs der eingesetzten Materialien und Werkstoffe mitgedacht werden muss. Trotz ihres hohen Beitrags zur Bruttowertschöpfung werden aber Material und Werkstoffe in den bisher vorliegenden Betrachtungen zu **Industrie 4.0** nur am Rande beachtet und wenn, dann als statisches Objekt für die Logistik und darüber hinaus bestenfalls noch als Gegenstand des Recyclings berücksichtigt. Die Rolle von Materialien und Werkstoffen entlang der Wertschöpfungskette ist aber im Wesentlichen dynamisch. Gerade die neuen Werkstoffentwicklungen (siehe Use Cases) zeigen, dass das zielgerichtete Einbeziehen der Veränderungen des Werkstoffs in den Verlauf des Produktionsprozesses zu Innovationen führt. Basis dafür sind Simulationen der gesamten Prozesskette, in der selbstverständlich die Veränderungen des Materials als substanzieller Bestandteil des Herstellungsprozesses in allen Stufen beschrieben werden müssen, um damit eine digitale »Soll-Vorgabe« für den gesamten Prozess zu liefern. Alle für die Prozesskettensimulation erforderlichen Material- und Werkstoffdaten sind Inhalt des **Materials Data Space**.

Die digitalen Simulationen des Material-, Werkstoff- und Bauteilverhaltens in den unterschiedlichsten Belastungssituationen (während der Verarbeitung, der Nutzung und des Recyclings) sind etablierter Forschungsgegenstand in der Materialwissenschaft und Werkstofftechnik. Sie sind als eine wesentliche Quelle für Innovationen im Material- und Werkstoffbereich von **Industrie 4.0** anzusehen und damit ist ihre Einbettung in das digitale Gesamtkonzept Industrial Data Space unverzichtbar. Damit die Prozesskettensimulationen die praktischen Material-, Werkstoff- und Bauteilveränderungen digital richtig beschreiben können, stützen sie sich auf Materialmodelle, denen typischerweise die eigenschaftsbestimmende Mikrostruktur der Materialien und Werkstoffe zugrunde liegt. Diese Materialmodelle werden bereits ab der Materialentwicklung in die digitalen Prozesse eingebunden und den Veränderungen während der Materialherstellung und -verarbeitung angepasst. Über die Vernetzung mit dem **Materials Data Space** kann für alle Stufen des Prozesses der Zugriff auf die jeweiligen Daten gesichert werden.

Mikrostruktur von Materialien und Werkstoffen zentral für Werkstoffverständnis

Darunter ist beginnend auf der atomaren Ebene, die bereits wesentliche Eigenschaften wie chemische Zusammensetzung, chemische Bindung, Härte und Festigkeit, optische Eigenschaften, Korrosionsbeständigkeit etc. bestimmt, über die Ebene der Kristallstruktur bis hin zur Gefüge-, Phasenebene, die ganz wesentlich die Verarbeitungseigenschaften festlegt, die hierarchisch geordnete, komplette Beschreibung des Materials oder

Werkstoffs (auch hybriden Werkstoffs) zu verstehen. Die Verknüpfung der jeweiligen Strukturebene mit den makroskopischen Eigenschaften wird als »Struktur-Eigenschafts-Beziehung« bezeichnet und ist das wesentliche Element zur Beschreibung des Material-, Werkstoff- und Bauteilverhaltens in den verschiedenen Belastungssituationen während der Verarbeitung, der Nutzung usw.

Die genaue Kenntnis der Prozess-Mikrostruktur-Eigenschafts-Beziehungen bietet auch die Basis für ein mikrostrukturbasiertes Materialdesign, das eine gezielte Entwicklung neuer bzw. innovativer Materialien und Werkstoffe mit vorgegebenen Eigenschaften ermöglicht. Die Umsetzung der Kenntnisse über die Mikrostruktur in digitale Materialmodelle bildet den Startpunkt für komplette Prozesskettensimulationen, die alle Stufen des Herstellungs- und Verarbeitungsprozesses und im erweiterten Sinn alle Situationen des Lebensdauerzyklus bis zum Recycling digital beschreiben können.

Die Mikrostruktur-Eigenschafts-Beziehungen schließen ebenso die inneren bzw. äußeren Grenzflächen zwischen unterschiedlichen Phasen bzw. Materialien ein. Diese Grenzflächen haben eine herausragende Rolle, wenn es beispielsweise um moderne Komposit- oder Hybridwerkstoffe wie etwa in kohlenstofffaserverstärkten Karosseriebauteilen oder einfach um die Kombinationen von Kautschuk und Reifencord in Autoreifen, um zwei Beispiele aus dem Automobilssektor zu nennen, geht.

Hier müssen in den Material Data Space nicht nur die Eigenschaften der jeweiligen Komponenten aufgenommen werden, sondern es ist auch das Verhalten an den jeweiligen Grenzflächen datentechnisch einzuschließen, da z. B. kritische Schwachstellen, sei es mangelnde Adhäsion oder beginnende Korrosion aufgrund von Kapillareffekten, an den Grenzflächen entstehen und zum Versagen führen können.

Für die experimentelle Aufklärung der Struktur-Eigenschafts-Beziehungen werden hochentwickelte Techniken der Mikrostrukturdiagnostik sowie der mikro- und makroskopischen Prüfverfahren eingesetzt. Dabei charakterisieren die Prüfverfahren im Wesentlichen die Eigenschaften, so dass bei Eigenschaftsänderungen immer auch eine Korrelation zu den aktuellen Veränderungen der Mikrostruktur hergestellt werden muss, um die Materialmodelle entsprechend weiterzuentwickeln.

Die Daten aus der Mikrostrukturdiagnostik, den Prüfungen und die daraus abgeleiteten digitalen Materialmodelle speisen den **Materials Data Space** und bilden das Kernstück einer digitalen Material- und Werkstoffbeschreibung.

Definiert die Prozesskettensimulation die »Soll-Vorgabe«, so wird durch ein durchgehendes Monitoring der Materialien, Werkstoffe und Bauteile entlang der gesamten Prozesskette und weiterführend über die Produktlebensdauer im Wesentlichen in Echtzeit der »Ist-Stand« erfasst. Im Soll-Ist-Vergleich ist es dann möglich, Abweichungen im laufenden Prozess zu entdecken und als Steuergrößen für die Anpassung der Prozessführung zu nutzen bzw. während der Nutzungsdauer des Bauteils dessen aktuellen Zustand mit dem Zielwert zu vergleichen. Alle Daten aus dem durchgängigen Monitoring speisen den **Materials Data Space**. Das Monitoring in Echtzeit leisten typischerweise zerstörungsfreie Inline-Prüftechnologien, die mikro- oder makroskopische Daten liefern. Zur Ergänzung der Datenbasis für nachfolgende Neu- oder Weiterentwicklungen im Material-, Werkstoff- und Technologiebereich werden zusätzlich invasive und Offline-Verfahren genutzt.

Im Bereich der **Materialentwicklung** ist es erforderlich, die neuen Materialien jeweils umfassend neu experimentell bezüglich ihrer Eigenschaften und der Mikrostruktur zu bewerten (s. Kasten Mikrostruktur). Für kurze Entwicklungszyklen sind dazu Hochdurchsatzraten-Untersuchungsmethoden entwickelt worden bzw. noch zu entwickeln. Auf Basis der Mikrostruktur-Eigenschafts-Beziehungen können gezielt neue Materialien entwickelt werden, die vorgegebene Eigenschaften aufweisen (mikrostrukturbasiertes Materialdesign). Der **Materials Data Space** ist für diesen Bereich im übertragenen Sinn als ein Baukasten anzusehen, aus dem für Material- und Werkstoffinnovationen oder -optimierungen neue Bausteine entnommen oder neu verknüpft werden können. Um dieses Prinzip umzusetzen, muss der **Materials Data Space** eine entsprechende Datenstruktur aufweisen, die es allen Stakeholdern in der Material- und Werkstoffentwicklung möglich macht, nach definierten Regeln auf die Daten zuzugreifen und neue Daten einzuspeisen. Mit Blick auf die ganze Wertschöpfungskette bietet die Material- und Werkstoffentwicklung das größte Potenzial für die Erhöhung der Materialeffizienz, z. B. durch die Substitution teurer Ausgangskomponenten, die Entwicklung neuer, kostengünstigerer Materialien und Werkstoffe und/oder die Reduzierung des Materialeinsatzes bei mindestens gleicher Funktionalität (siehe Use Case 3). Die aus den mikrostrukturellen Untersuchungsergebnissen einschließlich der grenzflächenspezifischen Daten abgeleiteten digitalen Material- und Werkstoffmodelle sind die Basis für durchgängige Prozesskettensimulationen, anhand derer bereits zu Beginn die Eignung neuer Werkstoffe für spezifische Verarbeitungsschritte und für spätere Anwendungen eingeschätzt werden kann (s. Beispiel-Kasten). Die mikrostrukturbasierte Technologieoptimierung nutzt entlang der gesamten Wertschöpfungskette das Potenzial der Kenntnis der mikrostrukturellen Veränderungen durch die einzelnen Prozessschritte (auch einschließlich der makroskopischen, durch die Verarbeitung beeinflussten Material- und Werkstoffkennwerte) für die Erhöhung der Produktionseffizienz, z. B. durch energiereduzierte Bearbeitung, geringere Fehlerquoten, höhere Zuverlässigkeit und Lebensdauer der Produkte. Die Daten aus der mikrostrukturbasierten Technologieoptimierung fließen ebenfalls in den

Materials Data Space und stehen damit auch für die Weiterentwicklung der Prozessketten-simulationen bereit.

Im Bereich der **Werkstoffherstellung und Werkstoffverarbeitung** ist die Wechselwirkung des Materials mit den Produktionsanlagen nicht nur aus technologischer Sicht in die Prozesskettensimulation mit einzubeziehen, sondern auch für Effizienzbewertungen. Spätestens ab hier liefert der **Materials Data Space** nicht nur die digitale Basis für die Optimierung von Material- und Werkstoffeigenschaften im Sinne der oben beschriebenen Mikrostruktur-Eigenschafts-Beziehungen und im Sinne einer Technologieoptimierung, sondern über die intelligente digitale Vernetzung mit anderen Bereichen des Industrial Data Space auch eine Entscheidungsplattform für ökonomische (business decision supporting system) und/oder ökologische Bewertungen (*life cycle assessment, Re-Use, Recycling*).

In der **Industrie 4.0** liefert der Industrial Data Space die notwendigen Daten für die betriebs-technische Steuerung (inklusive optimierter Instandhaltung und Ersatzteilbereitstellung), die Technologieanpassung bzw. -optimierung und die Logistik. In Bezug auf die Material-, Werkstoff- und Bauteildaten wird dabei auf zwei Quellen des **Materials Data Space** zurückgegriffen:

- 1. Monitoring im umfassenden Sinn (wie oben beschrieben)
- 2. Daten von sensorierten und adaptiven Werkstoffen (siehe Use Cases)

Moderne Entwicklungen haben den Weg aufgezeigt, dass es möglich sein wird, die bisherige passive Rolle von Materialien und Werkstoffen im Rahmen von **Industrie 4.0** um eine aktive Rolle zu ergänzen. Sensorierte Werkstoffe und Bauteile können ihren aktuellen Zustand (Ausgangs-/Bearbeitungszustand) selbst erfassen, aktiv in den **Materials Data Space** einspeisen und in einem *Cyber-physikalischen Produktionssystem* damit den Herstellungs-, Bearbeitungs- und Montagemaschinen Daten zur Steuerung ihres eigenen Gesteigungsprozesses liefern. Werkstoffe werden damit Industrie 4.0-fähig. So kann im direkten Austausch mit der jeweiligen Produktionsanlage internes Feedback zur Anpassung an den gerade zu bearbeitenden Werkstoff, zur Qualitätssicherung, zur Technologieoptimierung usw. gegeben werden. Die Vorteile, wenn Daten mit dem Werkstück bzw. Bauteil selbst transportiert und nicht über eine Zuordnung indirekt aus dem **Materials Data Space** bezogen werden müssen, liegen auf der Hand. Es ergibt sich eine autarke Wechselbeziehung zwischen Material bzw. Werkstoff und Maschine in einem sehr kurzen Steuerkreis. Die Verwechslungsgefahr ist nahe Null – ein Vorteil insbesondere bei örtlich getrennt ablaufenden Fertigungsschritten (z. B. Halbzeug → Weiterverarbeitung; Bauteilherstellung → Bauteileinbau). Verfügen die sensorierten Werkstoffe bzw. Bauteile zusätzlich über adaptive Komponenten, können sie sich in der beschriebenen Wechselbeziehung aktiv an die Bedingungen anpassen (s. Beispiel-Kasten). In Fortsetzung dieser Entwicklungen ist die

Vision autonom agierender Werkstoffe und Bauteile in einem *Cyber-physikalischen System* denkbar.

Das Gegenstück zum autonom agierenden Werkstoff bzw. Bauteil ist auf der anderen Seite jeweils die »lernende« Fertigungsanlage. Sie speichert die im Austausch mit dem Werkstück/ Bauteil gewonnenen »Erfahrungen« als Daten und stellt diese Daten als externes Feedback anderen Fertigungslinien zur Verfügung. Ist zum Beispiel an einer adaptiven Fertigungsmaschine ein Optimierungsprozess zur Bearbeitung eines bislang neuen Materials bzw. Werkstoffs abgelaufen, stehen diese Daten anderen Maschinen über den Industrial Data Space zur Verfügung, wenn ein solches Material bzw. dieser Werkstoff bei ihnen zur Bearbeitung ansteht.

Die aktive Rolle von sensorierten und ggf. adaptiven Bauteilen reicht über den Gesteigungsprozess hinaus und kann den kompletten Produktlebenszyklus bis zum finalen Recycling abdecken. Durch das Parallelllaufen von Monitoring und internem und externem Feedback kann im Verlauf des Lebenszyklus punktuell, je nach Erfordernis Redundanz hergestellt und beide Prozesse können gegeneinander geprüft werden. Zu berücksichtigen ist dabei der Langfristcharakter, der typischerweise 15 Jahre und mehr umfasst und damit auch als eine Herausforderung für die Datenstabilität zu verstehen ist.

Beispiel Prozesskettensimulation:

Die integrale Simulation der Prozesskette Blechumformung-Crash (Warmwalzen – Kaltwalzen – Glühen – Tiefziehen – Crash) für moderne hochfeste Stähle zeigt eindrücklich den Bedarf an einem viele Akteure der Wertschöpfungskette betreffenden **Materials Data Space**.

Die Bewertung von Blechbauteilen bezüglich Crashverhalten oder Ermüdungsbeständigkeit basiert auf den aus den vorangehenden Fertigungsschritten resultierenden Werkstoffeigenschaften (prozessbestimmte Kennwerte). Aus Sicht der Bauteilfertigung ist wiederum die Kenntnis der Eigenschaften der Vorprodukte notwendig, um optimale Ergebnisse zu erhalten.

Die Eigenschaften des Werkstoffs können schon bei seiner Herstellung aus der Mikrostruktur abgeleitet oder messtechnisch erfasst und ihm durchgängig über den gesamten Lebenszyklus digital zugordnet werden. Alle Schritte der Verarbeitung aber auch des Gebrauchs des Werkstoffs werden erfasst, die daraus resultierenden Veränderungen seiner Eigenschaften prognostiziert und ggf. messtechnisch und/oder mikrostrukturell verifiziert und wiederum im **Materials Data Space** als »Gedächtnis« des Werkstoffs hinterlegt. Damit werden eine lückenlose Rückverfolgbarkeit der Werkstoffeigenschaften und ein

kontinuierlicher Informationsaustausch zwischen Werkstoffherstellung, -verarbeitung und -gebrauch möglich. Genutzt werden diese Informationen zur Vorwärtssteuerung, z. B. für die gezielte Einstellung von Werkstoffeigenschaften in der Fertigung. Für einzelne Fertigungsschritte gelingt dies schon heute, mit dem **Materials Data Space** wird dies aber zukünftig durchgängig entlang ganzer Prozessketten inklusive Recycling möglich sein. Zusätzlich wird mit dem **Materials Data Space** eine stetige Rückkopplung aus der Verarbeitung und dem Gebrauch in die Herstellung ermöglicht, wodurch Werkstoffe kontinuierlich und ggf. sogar selbstregelnd (internes Feedback) optimiert werden können. Die Komplexität und die Herausforderungen ergeben sich aus der erforderlichen Verknüpfung von Materialmodellen und Mess-, Prüf- und Simulationswerkzeugen zu einer einheitlichen und durchgängigen Prozesskettensimulation, die hohen Standards an Genauigkeit und Zuverlässigkeit genügt.

Industriezweige	Halbzeughersteller	Halbzeugverarbeiter	Hersteller Endprodukt	Produktnutzer
Wertschöpfung	Stahlherstellung	Blechumformung	Fahrzeugherstellung	Fahrzeugeinsatz
Relevante Daten im Materials Data Space	Online-Prozessdaten, Herkunft der Ausgangsmaterialien, Mikrostruktur-Eigenschaftsbeziehungen, Werkstoffdaten, etc.	Online-Prozessdaten, Prozessparameter Mikrostruktur-Eigenschaftsbeziehungen, Werkstoffdaten, etc.	Online-Prozessdaten, Bauteileigenschaften, reale Betriebslasten, Produktidentifizierung (inkl. IPR, QC-passed), etc.	Wartungsdaten, Produktlebensdauer, protokollierte Überlasten, Daten für das Re-Use und Recycling, etc.
Funktionen des Materials Data Space	Datenformate, Datensicherheit, Schnittstellen für Datenaustausch, Geschäftsmodelle für das Datenmanagement, wettbewerbskompatible Datenqualitäten (intern/extern)			

Tabelle 1: Wirkungsweise des **Materials Data Space** am Beispiel der Wertschöpfungskette eines Stahlbauteils der Automobilindustrie (s. unten: Use Case 2).

Im Bereich des **Bauteileinsatzes** sind sensorisch und adaptiv ausgestattete Bauteile in der Lage während ihrer Lebensdauer wichtige Einflüsse zu protokollieren und in den **Materials Data Space** zu speisen. Das können z. B. Daten zum aktuellen Belastungszustand, zum Abnutzungs- oder Alterungszustand, zu Extrembelastungen und Überlastungsfällen oder zu externen Schädigungen (z. B. *Impacts*) sein. Hier richtet sich internes Feedback an das Gesamtsystem, in das das Bauteil integriert ist, und gibt dem System die Möglichkeit ggf. Betriebssituationen anzupassen oder zu vermeiden. Adaptive Bauteile können sich darüber hinaus aufgrund der eigenermittelten oder der vom Gesamtsystem signalisierten Belastungssituation anpassen und damit die Stabilität des Gesamtsystems erhöhen. Durch den Zugriff auf die Bauteildaten im **Materials Data Space** kann das Gesamtsystem externes Feedback an das *Cyber-physikalische*

System geben und z. B. externe Dienstleistungen steuern bzw. abrufen, z. B. Wartung, Austausch und Reparaturen zum technisch und ökonomisch sinnvollen Zeitpunkt oder am Ende der Nutzungsdauer über *Re-Use*, strategisches oder finales Recycling entscheiden. Außerdem ist eine durchgängige Produktidentifizierung gegeben, die z. B. gewährleistet, dass das Bauteil sicher ist (Originalbauteil) und regelgerecht verbaut wird, d. h. gesteuert und gesichert z. B. in einer *augmented reality* für den Einbauvorgang.

Der Bereich **Recycling** hat durch die Durchgängigkeit des Material- und Werkstoffdatenflusses bis zum Ende des Lebensdauerzyklus des Bauteils die Chance sich zu einem intelligenten »Recycling 4.0« zu entwickeln. Auf Basis der sicheren Bauteilidentifizierung mit den Daten im **Materials Data Space** kann entschieden werden, ob das Bauteil *Re-Use*-fähig ist (Voraussetzung wäre: *design for recycling*), ob es dem strategischen Recycling in einer *augmented reality* zugeführt werden soll, weil es Rohstoffe mit hoher Kritikalität enthält, bzw. einem konventionellen Recycling oder ob die finale thermische Verwertung die ökonomisch und/oder ökologisch günstigste Lösung darstellt. Die Dissipation von Rohstoffen wird in Zukunft gerade durch die Entwicklung von Faserverbundwerkstoffen, Metallverarbeitung und Funktionswerkstoffen neue Fragestellungen aufwerfen. Der **Materials Data Space**, der Daten entlang der gesamten Wertschöpfungskette bereitstellt, liefert die Basis für ein intelligentes Recycling und die Möglichkeit auf die Dynamik der Rohstoffmärkte bereits im Innovationsvorgang zu reagieren.

Beispiel Recycling:

Ein Ziel des **Materials Data Space** ist die Steigerung der Materialeffizienz durch integrales Rohstoffwissen über den gesamten Lebenszyklus eines Produkts. Sowohl im **Materials Data Space** als auch im Industrial Data Space ist es essentiell, Daten in Echtzeit zu generieren, diese intelligent zu bündeln und den relevanten Nutzerkreisen maßgeschneidert zur Verfügung zu stellen, um hieraus weitere Effizienzen zu erzielen. Eine derartige Datenbank stellt Ressourcen-, Material- und Werkstoff- sowie Prozessdaten Industrie- und Forschungskunden zur Verfügung. Hierbei werden die Material- und Werkstoffströme aus physikalischer, chemischer, ökonomischer und ökologischer Sicht betrachtet. Material- und Werkstoffentwicklungen und Werkstoffeigenschaften aus aktuellen Forschungsschwerpunkten (bspw. Funktionswerkstoffe, Energiematerialien, etc.) werden direkt integriert.

Durch die ganzheitliche Betrachtung aller Wertschöpfungsstufen liefert die Fachdatenbank dem Industrial Data Space ganzheitliche Informationen auch über den unmittelbaren Produktionsprozess hinaus (*predictive maintenance*, *End-of-life*-Szenarien), weiterführende Informationen entlang des gesamten Lebensdauerzyklus sowie auch

Studien über zukünftige Trends, die helfen Material-, Werkstoff- und Bauteilentwicklungen dem dynamischen Rohstoffmarkt anzupassen. Primäre als auch sekundäre Lagerstätten der gewünschten Rohstoffe und Bauteile (z. B. durch *design for recycling*) können somit katalogisiert angeboten werden.

Bereits in der Entwicklungsphase kann auf die Kritikalität bestimmter Elemente und Verbindungen reagiert, können Alternativen in der Fachdatenbank gefunden werden. Im Bereich ökonomischer Entwicklungen werden Anwendungen vorgestellt, die die Rolle des **Materials Data Space** entsprechend erweitern. Auf dieser Basis entwickelte neue Technologien beeinflussen Trends und damit mittel- und unmittelbar wiederum die Verfügbarkeit von Elementen und werden dynamisch in die Fachdatenbank integriert.

Durch die oben beschriebenen Beispiele für Materialentwicklung, -herstellung und -verarbeitung sowie Bauteileinsatz und Recycling wird deutlich, dass die Vision einer **Industrie 4.0** für die Abbildung der Material-, Werkstoff-, und Bauteil-bezogenen Daten einen **Materials Data Space** erfordert, der mit dem Industrial Data Space eng verzahnt und strukturell an ihn angepasst sein muss, der aber mit seiner Spezifik und seinen eigenen inneren Bezügen und Vernetzungsregeln durchgängig digitalisiert den materialeitigen Teil der Produktion, des Produktlebenszyklus und des Recycling abbildet.

4 ROADMAP ZUM MATERIALS DATA SPACE

Der Aufbau und die Nutzung eines **Materials Data Space** kann nur von der industriellen Community gemeinsam mit der Forschung bewerkstelligt werden. Denn erst in der digitalen Durchgängigkeit und Verknüpfung über mehrere Akteure hinweg erreicht er seine volle Leistungsfähigkeit. Schlüssel für die Implementierung eines **Materials Data Space** sind Datenformate, Datensicherheit, Schnittstellen, Datenbanken, Datenerfassung und -aufzeichnung (Messen und Prüfen) sowie Datenaustauschregeln, die parallel zu einer gesamten Wertschöpfungskette zu etablieren sind. Charakteristisch für den **Materials Data Space** ist, dass dieser im Mittelpunkt eines unternehmensübergreifenden Wertschöpfungsnetzwerks steht, an dem die gesamten Produktions- und Lieferketten beteiligt sind.

Im Konzept des **Materials Data Space** können innerhalb eines Unternehmens andere Daten zur Verfügung gestellt werden als über die Unternehmensgrenzen hinaus, um das jeweilige Know-how zu schützen und nur die für den Weiterverarbeiter erforderlichen Daten über sichere Datencontainer zu teilen. Dadurch besteht innerhalb eines Unternehmens ein wesentlicher Mehrwert darin, dass Daten über Fertigungsanlagen hinweg geteilt und in fortschrittlichen Prozessmodellen zur Erhöhung der Wertschöpfung eingesetzt werden können. Die Vielfalt der zu bearbeitenden Fragestellungen erfordert, dass nicht einzelne Akteure, sondern eine Industrie-Community gefragt ist, um die verborgenen Wettbewerbsvorteile zu realisieren.

Um den komplexen Prozess der Entwicklung eines **Materials Data Space** in Gang zu bringen, müssen notwendigerweise systemisch angelegte Pilotprojekte (Demonstratorprojekte) in ausgewählten, im Hinblick auf **Industrie 4.0** möglichst weit entwickelten Bereichen gestartet werden, um als Keimzellen für die erforderlichen neuen Strukturen dienen zu können. Gleichzeitig muss der Gesamtprozess moderiert werden, um die Einzelentwicklungen bereits in frühen Stadien miteinander abzugleichen, damit Standards zu setzen und die Verknüpfung mit dem Industrial Data Space sicherzustellen. Hierbei kann der **Materials Data Space** sehr vorteilhaft als Handlungsrahmen Vorgaben liefern. Seine Struktur transferiert die Struktur des Industrial Data Space in den Material-, Werkstoff- und Bauteilbereich und sichert damit eine vollständige Integration in **Industrie 4.0**. Gleichzeitig liefert der **Materials Data Space** die Basis für die Nutzung von Synergien innerhalb des Bereiches der Material- und Werkstoffentwicklungen und -anwendungen und kann so Leitplanken für die zukünftige Material- und Werkstoffforschung in Hinblick auf **Industrie 4.0** bereitstellen.

Breit angelegte und gut entwickelte Wertschöpfungsketten in Deutschland sind insbesondere zu finden in den Wirtschaftsbereichen Automotive, Aviation, Maschinenbau. Zieht man zusätzlich den Digitalisierungsgrad der Produktion hinzu (s. Abb. 2), zeigt sich, dass nur wenige Industriezweige ein aktuell hoch entwickeltes Niveau aufweisen. Besonders hervor sticht dabei der Automobilbau, der enger als die anderen Branchen mit hohem Digitalisierungsgrad mit dem klassischen Maschinen- und Anlagenbau verbunden ist und daher prädestiniert ist, die Idee

von **Industrie 4.0** beispielhaft umzusetzen. Für den Bereich Automobilbau werden deshalb im Weiteren drei Use Cases aus jeweils anderer fachlicher Perspektive für drei unterschiedliche Material- bzw. Werkstoffgruppen vorgestellt. Sie beschreiben exemplarisch für den jeweiligen Anwendungsbereich, welche Entwicklungen von der Werkstoffherstellung und -verarbeitung in Hinblick auf **Industrie 4.0** erwartet werden. Darüber hinaus leiten sie die zu bearbeitenden Forschungsfragen und -aufgaben ab, welche in unterschiedlichen Zeithorizonten in der Material- und Werkstoffforschung in Deutschland auf dem Weg zu **Industrie 4.0** bearbeitet werden müssen. Damit sollen konkrete Impulse gegeben werden, um den komplexen Prozess der Entwicklung eines Materials Data Space innerhalb des Industrial Data Space rechtzeitig durch Pilotprojekte in Gang zu setzen.

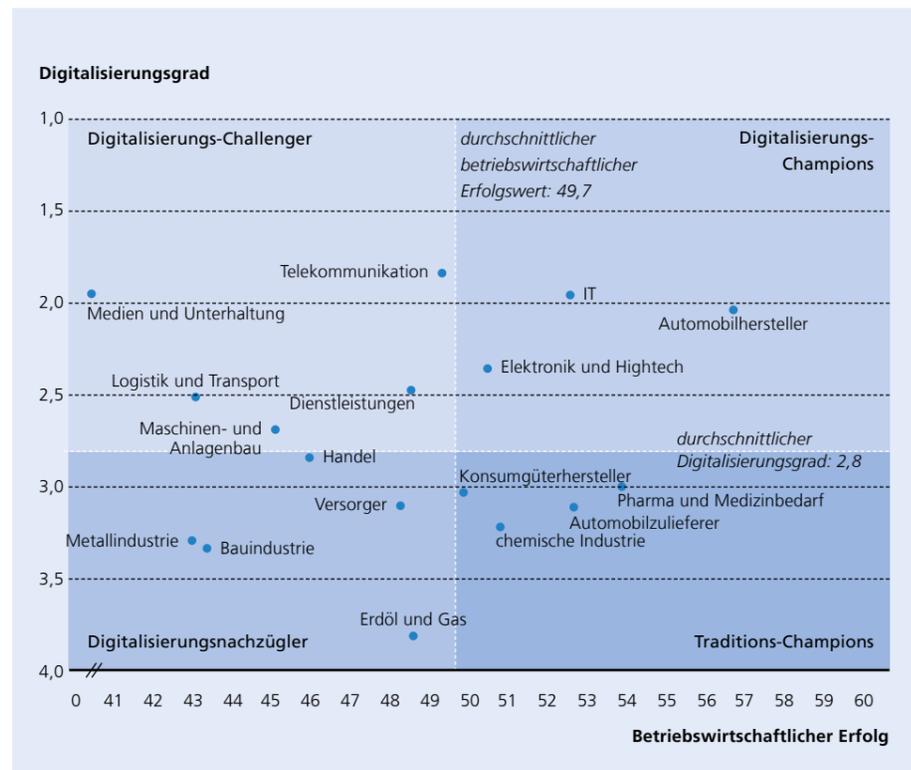


Abb. 2: Betriebswirtschaftlicher Erfolg und Digitalisierungsgrad nach Branchen⁶

⁶ Daniel Buhr: Soziale Innovationspolitik für die Industrie 4.0. Expertise im Auftrag der Friedrich-Ebert-Stiftung, April 2015

Use Case 1: Faserverbundwerkstoffe / Faserverbundbauteile:

Das intelligente, in Großserie hergestellte Faserverbundbauteil im Automobil mit hoher Lebensdauer und individualisierten Funktionen

Use Case 2: Metallverarbeitung / Metallformgebung:

Als Anwendungsszenario wird exemplarisch die Fertigungskette der Blechbauteilfertigung im Automobilbau betrachtet

Use Case 3: Funktionswerkstoffe und intelligentes Recycling:

Die zunehmende Individualisierung der Produkte läuft auf eine Fusion von Struktur- und Funktionsmaterialien hinaus, in denen die Dichte von strategischen Rohstoffen relativ hoch und deshalb besonders geeignet für ein intelligentes Recycling ist.

Der Fraunhofer-Verbund MATERIALS schlägt vor, die Implementierung des **Materials Data Space** in **Industrie 4.0** mit diesen drei ausgewählten Use Cases zu starten, für die Bereiche Metalle, Faserverbundwerkstoffe sowie Funktionsmaterialien und Recycling mit Industriebeteiligung jeweils ein Projekt aufzusetzen und veranschlagt dafür jeweils, zuzüglich der industriellen Beteiligung, eine öffentliche Förderung von jeweils 10 Mio. €.

Ansprechpartner

Prof. Dr. Ralf B. Wehrspohn (für den Fraunhofer-Verbund MATERIALS)
Fraunhofer IMWS, Walter-Hülse-Str. 1, 06120 Halle, 0345 / 5589 100,
ralf.wehrspohn@imws.fraunhofer.de, Stand 13.10.2015

5.1 Use Case 1: Faserverbundwerkstoffe / Faserverbundbauteile

Anwendungsbereich und Systemgrenzen

»Das intelligente, in Großserie hergestellte Faserverbundbauteil im Automobil mit hoher Lebensdauer und individualisierten Funktionen«. Fasern, die in diesem Zusammenhang betrachtet werden sollen, umfassen z. B. Glas-, Kohlenstoff-, Aramid-, Metall- und Naturfasern, die sowohl singular als auch hybridisiert zum Einsatz kommen können.

Herausforderungen, die für Industrie 4.0 zu adressieren sind

Während der Einsatz von hochbelastbaren faserverstärkten Kunststoffen (FVK) u. a. beim Bau von Luftfahrzeugen und Rotorblättern von Windenergieanlagen seit Jahren etabliert ist, stellt ihr Einsatz für tragende Strukturen in wesentlich kostensensibleren Märkten wie z. B. Automobilbau ein relativ neues Anwendungsfeld dar. Mit Naturfasern verstärkte Hybridmaterialien hingegen finden bisher in den beiden vorgenannten Bereichen ein nur geringes Anwendungsspektrum.

Im Automobilbau ist die Forderung nach Energieeffizienz (z. B. Kraftstoffersparnis) ein wesentlicher Treiber für neue Leichtbaukonzepte. Für die Übertragbarkeit der bekannten Lösungen ergeben sich vielfältige neue Herausforderungen an die Werkstoffe und die entsprechenden Fertigungstechnologien insbesondere im Hinblick auf deren Großserientauglichkeit.

- Für tragende Strukturbauteile geeignete endlosfaserverstärkte Kunststoffe werden derzeit im Automobilbau selten eingesetzt. Gründe hierfür sind u. a. der relativ hohe Preis der Ausgangsstoffe (z. B. Kohlenstofffaser) und die bisher noch nicht erreichbaren kurzen Taktzeiten bei der Herstellung von Bauteilen.
- Naturfasern bzw. Hybridwerkstoffe mit nennenswerten Anteilen an nachwachsenden Fasern werden bisher primär für nicht tragende und nicht crashrelevante Bauteile als Werkstoffe eingesetzt (bspw. Türinnenverkleidungen). Aufgrund ihres hohen Potenzials hinsichtlich Gewichtsreduktion und Kostenersparnis wird aber der Einsatz von Naturfasern aktuell stark vorangetrieben.
- Der Einsatz von Naturfasern bzw. Hybridwerkstoffen mit nennenswertem Naturfaseranteil für tragende Strukturen bedarf der Optimierung der mechanischen Eigenschaften und des sicheren Nachweises der geforderten Performance.
- Der vermehrte Einsatz von Faserverbundwerkstoffen (endlosfaserverstärkte Kunststoffe und Naturfaser-Hybridwerkstoffe) für Bauteile mit tragender Funktion erfordert neuartige großserienfähige Fertigungstechnologien. Insbesondere der Einsatz von thermoplastischen Matrixmaterialien weist diesbezüglich enormes Potenzial auf. Aber auch für kurz- und langfaserverstärkte Kunststoffe besteht zusätzliches Einsatzpotenzial.

- In der Regel entstehen Faserverbundwerkstoffe erst im Bauteilherstellungsprozess aus den Grundkomponenten Faser(-halbzeug) und Matrix (Thermoplast/Duroplast). Die späteren Bauteileigenschaften werden also demzufolge entscheidend durch den Fertigungsprozess beeinflusst. Hier sind die gewünschten Eigenschaften in erheblichem Maße von den involvierten Grenzflächen abhängig. Diese werden ihrerseits durch eine Vor- oder Nachbehandlung der Oberflächen separat an das Anforderungsprofil adaptiert.
- Beherrschung und Monitoring sowie Qualitätsüberwachung des Herstellungsprozesses sowie der gefertigten Komponenten und Bauteile sind daher essentiell.
- Zunehmende Funktionsintegrationsdichte aus Gründen der Ressourceneffizienz führt zu einer zunehmenden Diversität der eingesetzten Werkstoffe. Optimale Gesamtsysteme in Leichtbauweise erfordern Multi-Material- und Hybrid-Konzepte, die in Bezug auf ihre Beherrschbarkeit hinsichtlich Verarbeitung und Einsatzverhalten sehr komplex sind.
- Kunden erwarten, und der Gesetzgeber fordert eine hohe Zuverlässigkeit neuartiger Werkstoffe. Diese muss vor allem auch für den Einsatz neuer Faserverbundwerkstoffe in tragenden Strukturen nachgewiesen werden. Dabei spielt die Rückverfolgbarkeit von Materialeigenschaften eine entscheidende Rolle. Prüfbarkeit, Service, Reparatur und Recycling müssen von Beginn an im Material- und Bauteilkonzept berücksichtigt werden. Insbesondere bei Faserverbundwerkstoffen gewinnt die Frage nach sicherem Einsatz und Betrieb zunehmend an Bedeutung. Materialdaten und deren Änderung über die Lebensdauer (z. B. durch Umwelteinflüsse/Alterung, zusätzliche äußere Belastungen) müssen genau bekannt sein, um z. B. die Folgen von Fehlern, Abnutzung und Alterung abschätzen zu können.
- Die Materialmodelle von Kompositen und Materialkombinationen sind hoch komplex und erfordern ein umfassendes Werkstoffverständnis.

Darüber hinaus sieht sich insbesondere die Automobilindustrie mit neuen Trends konfrontiert:

- Das Bedürfnis nach Individualität, technischem Fortschritt und kurzen Erneuerungszyklen ist prinzipiell schwer mit dem Zukunftsziel Nachhaltigkeit zu vereinbaren. Die Begrenzung der weltweiten Ressourcen wird in steigendem Maß die Wiederverwendung von Werkstoffen notwendig machen. So sind z. B. die lasttragenden Fasern der Faserverbundstrukturen aktuell schwer zu recyceln und machen es notwendig Konzepte für ein *Re-Use* oder Recycling bereits beim Design einzuplanen (*Design for Recycling*). Derzeit kommt es vielfach zum »Downcycling«, d. h. Langfaserreste werden z. B. in Kurzfaserkompositen verarbeitet, statt die Kaskadennutzung vorzusehen.
- Die Nachfrage nach Fahrzeugen verschiebt sich potenziell. Die junge städtische Bevölkerung verbindet mit dem eigenen Personenkraftwagen nicht mehr in dem Maß Status, Vergnügen und Unabhängigkeit wie noch vor Jahrzehnten. Stattdessen definiert sie sich z. B. stärker über Mobilität per se, Individualität, Präsenz in digitalen Netzwerken etc. Hierzu zählen auch gesellschaftspolitische Trends, welche sich zum Beispiel in einem hohen Umweltbewusstsein

äußern. Daher sind Recyclingfähigkeit und Einsatz nachwachsender Ressourcen aktuell wichtige branchenübergreifende Themen.

Chancen von Industrie 4.0

- Faserverbundwerkstoffe sind *Bottom-up*-Werkstoffe bzw. -bauteile. Sie eignen sich damit hervorragend für die Sensorierung durch Integration von Chips und Sensoren, die bereits während der Fertigung von Bauteilen und Strukturen sowie im späteren Einsatz Daten über den Zustand des Materials bzw. des Bauteils sammeln und speichern können. Ebenso lassen sich relativ leicht auch aktive Elemente (nicht nur Aktoren) integrieren, die eine zusätzliche Funktionalität (integriertes Heizen und Beleuchten, Lärm- und Schwingungskompensation, Geometriadaption oder Schadenskontrolle) ermöglichen.
- Nicht nur aktive Elemente sind denkbar, es können auch passive Elemente oder Materialien eingebaut werden, die eine Prüfung, eine Wiedererkennung oder das Auslesen einer Lasthistorie möglich machen.
- Sensorierte Werkstoffe erlauben in Zusammenhang mit adaptiven Fertigungstechnologien, die flexibel auf aktuelle Gegebenheiten (z. B. Materialzustände) reagieren können, die weitere Absenkung von Fertigungstoleranzen und damit die Reduktion der Fehlerquote auf ein Minimum. Entsprechende Datenarchitekturen und Rückkopplungsmechanismen müssen durch **Industrie 4.0** bereitgestellt werden. Im Kontext der adaptiven Fertigungstechnologien kommt der Inline-Qualitätskontrolle durch Monitoring der Materialien und Prozessparameter (z. B. Temperatur, Viskosität, Matrixaushärtung, etc.) einerseits und dem Einsatz prozessintegrierter zerstörungsfreier Prüfverfahren (zfP) andererseits eine besondere Bedeutung zu. Diese Prüfverfahren liefern wichtige Daten für ein internes Feedback im Fertigungsprozess und damit für die flexible und individuelle Steuerung der Materialeigenschaften. Strukturelle Fehler wie z. B. Ondulationen oder Falten in tragenden Faserstrukturen können an verschiedenen Stellen des Herstellungsprozesses entstehen und müssen inline spätestens bei der abschließenden Qualitätskontrolle erkannt werden, wenn sie nicht tolerabel sind, muss das Bauteil aus dem Prozess entfernt werden.
- Erst mit den zur Verfügung stehenden Daten lassen sich komplette Prozesskettensimulationen generieren, um möglichst präzise Vorhersagen zum späteren Einsatzverhalten unter Berücksichtigung der Prozesshistorie treffen zu können (Soll-Vorgabe). Andererseits dienen Prozesskettensimulationen auch zur Auslegung und aktiven Regelung von adaptiven Fertigungstechnologien.
- Während der Bauteilnutzungsphase lassen sich durch die Nachverfolgung der Belastungs- und Schadenshistorie wertvolle Parameter für die weiterreichende Prozesskettensimulation (von der BauteilAuslegung bis zur Bauteilnutzung) gewinnen. Daten in bisher ungekannter Detaillierung und Menge stehen zur Verfügung und helfen, die Entwicklungszeiten für tragende Strukturbauteile deutlich zu verkürzen und Bauteile hinsichtlich Funktionalität und Ressourceneffizienz kontinuierlich zu optimieren.

- Durch exakte Kenntnis der Strukturperformance über integrierte Sensorik im Betrieb (*Condition Monitoring*) können Sicherheitsreserven reduziert werden, um zusätzliches Leichtbau-Potenzial zu heben. Damit wäre auch ein Übergang der Entwurfsphilosophie von »*safe life*«- in Richtung »*damage tolerant*«-Konzepten zur weiteren Gewichtsreduktion möglich. Gerade im Hinblick auf den Einsatz und das Potenzial von Naturfasern als Rohstoffe für tragende Strukturen können so wichtige sicherheitsrelevante Informationen gewonnen und der Materialeinsatz optimiert werden. Automatisierte Reparaturen eines Bauteils werden auch nach langer Betriebsdauer möglich, da umfangreiche Daten zu Bauteil, Material und Belastungshistorie sowie zur Beurteilung von Schädigungen zur Verfügung stehen.
- Als langfristiges Ziel bzgl. der Steigerung der Ressourceneffizienz wäre eine Wiederverwendung von alten Strukturbauteilen in neuen Modellen anzustreben, wenn die alten Teile entsprechend modifiziert und angepasst werden können. Dies würde allerdings eine konsequente Standardisierung von Datenformaten, Bauteilschnittstellen, etc. erfordern.
- Daten zu den Bestandteilen eines komplexen Materials (Materialidentifikation) ermöglichen ein umweltgerechtes und dem Materialzustand angepasstes Recycling. Das Konzept der Wiederverwendung des Bauteils sollte vor dem des Materialrecyclings und der thermischen Verwertung stehen. Naturfaserverstärkte Kunststoffe bieten ein immenses Potenzial im Bereich des Recycling, Ziel hierbei sollte es nicht sein, Naturfasern vom Polymer zu trennen, sondern die Werkstoffe entsprechend ihrer diversen Matrices (PVC, PE, PP, PLA, etc.) am Ende der Nutzungsphase zu erkennen, zu sortieren und neuen Anwendungen (*upcycling*, *downcycling*) zuzuführen.

Für den Endanwender ergeben sich für das Beispiel Automobilindustrie folgende Potenziale, die sich jedoch sinngemäß auf andere Branchen übertragen lassen:

- Die Produktion von individuellen sehr unterschiedlichen Komponenten und Bauteilen nach Kundenwunsch wird vereinfacht.
- Intelligente Materialien ermöglichen eine weitreichende Funktionalisierung von Bauteilen und Strukturen, bspw. durch integrierte Kommunikations- und Medienelemente, Energiegewinnung, Komfort, Sicherheitselemente.
- Beherrschung von Unsicherheiten in Auslegung, Produktion und Betrieb im Kontext einer steigenden Variantenvielfalt, dies auch im Kontext unterschiedlicher Zielmärkte, durch gesteuerten aktiven Struktureingriff.
- Identifikation von originalen Bauteilen (auch für Reparaturen) wird gesichert
- Zustandsüberwachung des Status eines Fahrzeuges wird z. B. über eine App abfragbar, wodurch neue Geschäftsmodelle ermöglicht werden (z. B. bedarfsgerechte Wartung, Restwertermittlung aufgrund tatsächlicher Nutzung, Rekonstruktion von Unfallhergängen, ...).

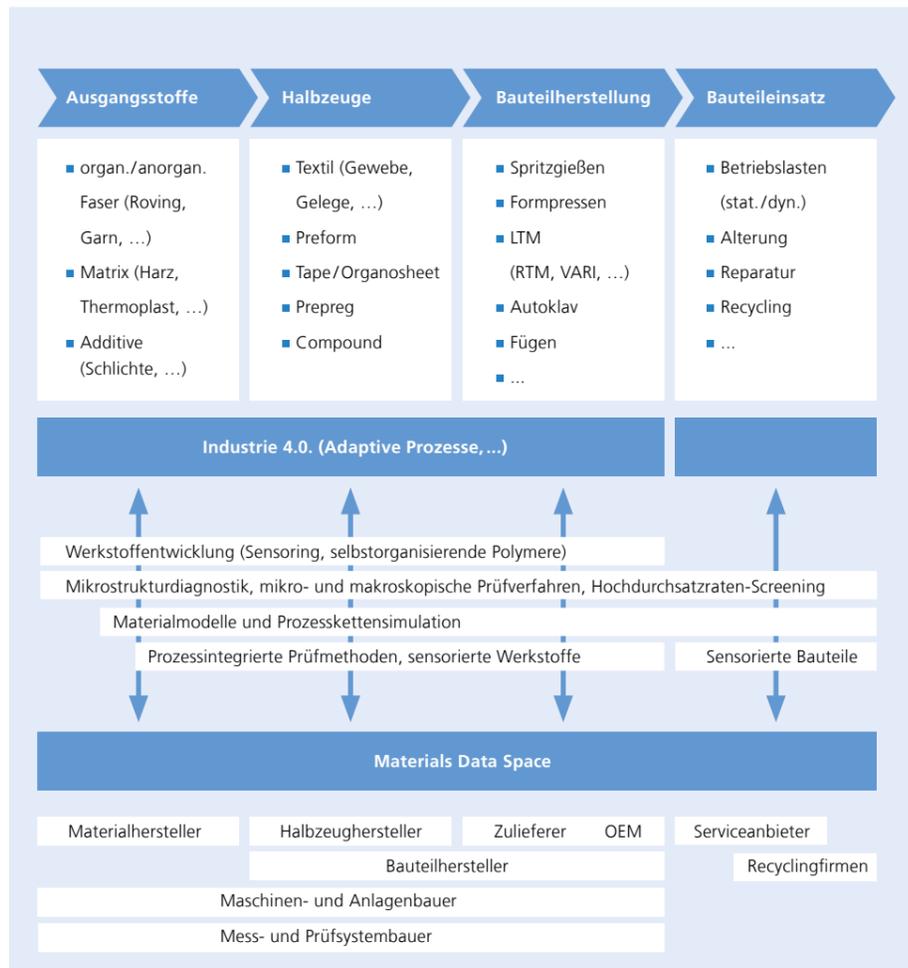


Abb. 3: Schematische Darstellung des »Material-Zyklus« im Use Case Faserverbundwerkstoffe/Faserverbundbauteile mit Entwicklungsschwerpunkten zur Schaffung eines **Materials Data Space** und Angabe relevanter Anwendungsindustrien

Vision

Zielzustand sind intelligente, hochfunktionalisierte Faserverbundmaterialien und -bauteile, die sich in Großserientechnologien maßgeschneidert herstellen lassen. Die »Sensorierung« der Materialien sowie adaptive Fertigungstechnologien (prozessintegrierte zerstörungsfreie Inlinekontrolle) liefert umfassende Informationen in den **Materials Data Space**, die ein selbstregelndes Interagieren zwischen Material/Bauteil und Prozess ermöglichen. Auf diese Weise wird die Qualität der Bauteile und hochbelastbarer Strukturen aus leichten Faserverbundwerkstoffen deutlich verbessert sowie die Material- und Prozesseffizienz signifikant erhöht. Darüber hinaus liefern intelligente Materialien auch in der Betriebsphase des Bauteils wichtige Daten z. B. zu ihrer Zusammensetzung sowie ihrer Prozess- und Belastungshistorie, die eine Beurteilung und Kontrolle von lasttragenden Faserverbundstrukturen im Einsatz (z. B. nach

Schadensereignissen) ermöglichen und somit die Lebensdauer der Strukturen deutlich erhöhen und Lebenszykluskosten reduzieren. Die aktiven Elemente in den Materialien kommunizieren z. B. mit intelligenten Geräten der zerstörungsfreien Prüfung und übertragen Daten, so dass eine an die Geometrie, Mechanik und Anisotropie des Bauteils angepasste Prüfung durchgeführt werden kann, bspw. nach einem Schadensereignis. Bei einem ausreichend abgesicherten **Materials Data Space** inkl. der darin enthaltenen Materialmodelle und Prozesskettensimulationen sowie genauer Protokollierung der Bauteilnutzung kann die Bauteilprüfung auch virtuell erfolgen. Dadurch, dass eine Vielzahl von Bauteilen aktive Elemente enthalten, können Daten über kleine Strecken von Element zu Element übertragen werden. Auf diese Weise können z. B. später im Betrieb *Energy-Harvesting*-Konzepte zur Energieversorgung der aktiven Elemente genutzt werden. Dadurch, dass die gesamte Historie des Materials und des Bauteils bekannt sind, können Teile später nicht nur repariert sondern auch wie Immobilien »renoviert« werden, d. h. unter Erhalt des teuren Skeletts der lasttragenden Faserverbundstruktur kann das Bauteil modifiziert, modernisiert und aufgewertet werden. Auf diese Weise werden Ressourcenschonung und eine lange Lebensdauer der Bauteile möglich. Mit **Industrie 4.0** werden Technologien und Methoden geschaffen, die eine ganzheitliche Betrachtung des Materialzyklus von den Ausgangsstoffen über Material- und Bauteilherstellung, Bauteilnutzungsphase und Recycling ermöglichen. Mit Hilfe der digitalen Prozesskettensimulation (virtuelles Materialdesign, virtuelle Prozesskette, *life cycle assessment*, *Integrated Computational Materials Engineering*, etc.) und deren Bündelung in einem **Materials Data Space** lassen sich Entwicklungszeiten für neuartige Faserverbundstrukturen deutlich verkürzen, die Material- und Ressourceneffizienz sowie die Zuverlässigkeit der Strukturen signifikant erhöhen.

Wichtige Daten im Materials Data Space für den Anwendungsbereich

- Mikrostrukturelle Daten von Nano bis Makro u. a. aus multiskaliger und korrelativer Messtechnik (chemische Daten der Komponenten, Aufbau des Faserverbundwerkstoffs, Faserdurchmesser und -feinstruktur, Schlichte, Daten zur Grenzfläche Faser-Matrix, Partikelgröße, Gewebe, Lagenaufbau, Faserorientierung, Dicke des Faserverbundwerkstoffs etc.)
- Mechanische und andere physikalische Daten aus Prüfverfahren (Steifigkeiten, Festigkeiten, Dichte, zeitabhängiges Verhalten, Defekte, mögliche gravierende Fehlermöglichkeiten wie z. B. Ondulationen, ...) und deren zeitliche Veränderung (Lasthistorie)
- Prozessparameter und -historie (z. B. Temperatur, Viskosität, Aushärtung, Emissionen ...) für die Weiterverarbeitung
- Parameter für zerstörungsfreie Prüfung (verfahrensabhängig)
- Einsatzabhängige Parameter (z. B. tribologische Parameter, Betriebslasten, Belastungsdynamik)
- Reparaturparameter und Daten zur *Augmented-Reality*-unterstützten qualitätssicheren Montage von Komponenten

- Sichere Identifikation, Qualitätspass, Warnungen (Überlast, Verschleiß, Impact ...), Sicherheitsanweisungen (Einbau, Wartung, Reparatur)

Einordnung in die Roadmap zum Materials Data Space

Neben der Entwicklung von großserienfähigen, adaptiven Fertigungstechnologien für die Herstellung von tragenden Strukturen aus Faserverbundwerkstoffen unter den Gesichtspunkten von **Industrie 4.0**, sind zur Schaffung eines **Materials Data Space** folgende Entwicklungsschwerpunkte zu nennen:

Forschungsfragen und Arbeitspakete zur Realisierung des Materials Data Space im skizzierten Anwendungsbereich	
kurzfristig	Konzepte für die Funktionsintegration in Faserverbundwerkstoffe (Sensorik, Aktorik, Elektronik, passive Elemente, ...), ohne die mechanischen Eigenschaften zu beeinträchtigen Intrinsische Nutzung der Faser (Glas- oder Kohlenstofffaser) als Sensor Definition der bauteilbezogenen relevanten Parameter Numerisch gestützte Bewertungsmethoden für die Interpretation von Sensordaten
mittelfristig	Datenspeicherung und -transport in den Faserverbundwerkstoffen bzw. -bauteilen Entwicklung von Materialien und Halbzeugen für die Großserienproduktion von Faserverbundstrukturbauteilen Integration der Mikrostrukturdiagnostik und der Prüfverfahren über alle Strukturebenen in einer einheitlichen prozessübergreifenden Werkstoffcharakterisierung Methodenentwicklung für die komplette Prozesskettensimulation (bis zum Ende des Produktlebenszyklus) Standardisierung von Datenformaten und Simulationsroutinen Integration von zfP-Verfahren in FVK-Fertigungstechnologien Data-Fusion zwischen verschiedenen, skalenübergreifenden Prüfergebnissen Standardisierung von Prüfverfahren Methodenentwicklung zur qualifizierten Interpretation von zfP-Ergebnissen Hochdurchsatzraten-Screening-Methoden für die Werkstoffentwicklung
langfristig	Werkstoffentwicklung im Hinblick auf die Wiederverwendbarkeit von Werkstoffen und Bauteilen nach dem Produktlebenszyklus (<i>design for recycling</i>) Materialentwicklungen mit Selbstheilungseffekt Entwicklung intelligenter Materialien (selbstorganisierende Polymere, Multifunktionalität, ...)

Multi-Physik-Simulation zur Bewertung von hochfunktionalisierten Strukturen (mechanisches Verhalten, Kommunikation, Datenerfassung, etc. von Materialien und Bauteilen)
 Virtuelles Prüfen und Testen (s. Text)
 Entwicklung von adaptiven zfP-Verfahren, die auf Material- bzw. Bauteilzustände reagieren können

Koordination:

IMWS (Ralf Wehrspohn / Peter Michel),
 IZFP (Randolf Hanke / Hans-Georg Herrmann),
 WKI (Bohumil Kasal / Dirk Berthold)

5.2 Use-Case 2: Metallverarbeitung/ Metallformgebung

Anwendungsbereich und Systemgrenzen

Die integrale Betrachtung der Wertschöpfungskette für die Herstellung von metallischen Struktur- und Funktionsbauteilen bestehend aus Material- und Prozessentwicklung (Legierungskonzepte, Fertigungsrouten), Halbzeugherstellung (Stranggießen, Warmwalzen, Kaltwalzen), Halbzeugverarbeitung (umformtechnische Prozesse wie Tiefziehen, Rollbiegen) und Bauteileinsatz (Lebensdauer, Crashverhalten, etc.) ist für die weltweite Wirtschaft von herausragendem wirtschaftlichen Interesse. Ursächlich hierfür sind die vielfältigen Vorteile metallischer Werkstoffe und Bauteile in Bezug auf die Werkstoffeigenschaften, die Fertigungs- und Ressourceneffizienz sowie insbesondere das große Leichtbaupotenzial. Wegen ihres günstigen Preis-Leistungsverhältnisses werden metallische Bauteile gerade im Automobilbau noch lange Zeit eine »tragende Rolle« spielen. Betragen die Mehrkosten pro kg Gewichtsersparung bei CFK immer noch rund 50 Euro, so sind es aktuell bei Aluminium nur etwa 10 Euro und bei Stahl sogar nur 2 Euro. Auch schreitet die Werkstoffentwicklung im metallischen Bereich ebenfalls kontinuierlich fort (z. B. TRIP- und TWIP-Stähle, Intermetalle, ...).

Als Anwendungsszenario sei exemplarisch die Fertigungskette der Blechbauteilfertigung betrachtet: Die Bewertung von Blechbauteilen bezüglich Crashverhalten oder Ermüdungsbeständigkeit basiert auf den aus den vorangehenden Fertigungsschritten resultierenden Werkstoffeigenschaften. Voraussetzung hierfür sind detaillierte Kenntnisse über die Wechselwirkung zwischen dem Ausgangswerkstoff, der betriebsfesten Bauteilauslegung, dem prognostiziertem Einsatzszenario, dem Fertigungsprozess und den resultierenden Werkstoff- und Bauteileigenschaften, die letztlich gemeinsam die bauteil- und produktrelevante Betriebsfestigkeit, Lebensdauer und das Crashverhalten bestimmen.

Die Auswirkungen der prozesstechnisch bedingten Änderungen der Mikrostruktur des Werkstoffs sowie von eingebrachten Eigenspannungen z. B. auf die Bauteillebensdauer können nur mit Hilfe umfangreicher experimenteller Untersuchungen (Mikrostrukturdiagnostik, zerstörungsfreie Prüfungen, Ermüdungsversuche, ...) ermittelt werden.

Bei Kenntnis dieser Wechselwirkungen lassen sich jedoch sowohl die Eigenschaften des Ausgangswerkstoffs als auch die jeweiligen Prozessparameter digital in Prozesskettensimulationen beschreiben und praktisch gezielt anpassen, um eine gewünschte Lebensdauer und benötigtes Crashverhalten einzustellen.

Herausforderungen, die für Industrie 4.0 zu adressieren sind

In der metallverarbeitenden Industrie allgemein, speziell aber im automobilen Leichtbau, steigt die Diversität der eingesetzten Werkstoffe und der daraus hergestellten Bauteile stetig an. Als Werkstoffe werden zunehmend höchstfeste Stähle, wie PHS (Press-hardened Steel), DP- (Dualphasen), QP- (*Quenching and Partitioning*) und TWIP-Stähle (*Twinning Induced Plasticity*) sowie Leichtmetalle (Al, Mg, Ti) eingesetzt, deren Eigenschaften durch komplexe Herstellungs- und Verarbeitungsprozesse individuell an die bauteilspezifischen Anforderungen bzw. individuellen Kundenspezifikationen (*tailored blanks*) angepasst werden. Auch gibt es in der metallverarbeitenden Industrie die Notwendigkeit, aufgrund von Stoffverboten und rechtlichen Rahmenbedingungen in verschiedenen Märkten neue Werkstoffe zu designen und zeitnah einzusetzen. Die Entwicklung eines neuen Werkstoffs, dessen industrielle Herstellung und großserientaugliche Verarbeitung, sowie dessen Reparatur und Recycling sind heutzutage noch wenig vernetzte Teilprozesse. Daher werden oftmals zu hochwertige und kostenintensive Werkstoffe eingesetzt, um »auf der sicheren Seite« bezogen auf die Anforderungen zu sein, obwohl bei ganzheitlicher Betrachtung von Prozessketten auch wirtschaftlichere und ressourceneffizientere Lösungen möglich wären (z. B. Einsatz von Sekundäraluminium oder Verwendung kostengünstiger, hochverfügbarer Legierungselemente). Jeder dieser Teilprozesse erfordert einen erheblichen Entwicklungsaufwand, was der schnellen Einführung neuer Werkstoffe in Produkten entgegenwirkt.

- Die gezielte Einstellung von Werkstoffeigenschaften in der Fertigung gelingt heute bereits für einzelne Fertigungsschritte gut. Es ist absehbar, dass dies zukünftig durchgängig entlang ganzer Prozessketten möglich wird und somit große Effizienzsteigerungen für einzelne Fertigungsschritte erzielt werden können, z. B. durch die Einbeziehung der Chargenschwankung des umzuformenden Halbzeugs beim Tiefziehen.
- Die ganzheitliche Beherrschung der Unsicherheiten entlang der geschlossenen Prozesskette von Auslegung, Entstehung- und Betrieb durch erweiterte Kenntnisse und gezielte Eigenschaftsbeeinflussung entlang dieser Kette wird damit eine kontinuierlich zunehmende Bedeutung für Realisierung und Einsatz wettbewerbsfähiger metallischer Leichtbauprodukte bekommen.

- Die Komplexität und die Besonderheit liegen in der Verknüpfung von realer Mikrostruktur mit detaillierten Materialmodellen, umfassender Beanspruchungsermittlung, Bemessungskonzepten und numerischen und experimentellen Simulationswerkzeugen zu einer einheitlichen und durchgängigen Prozesskettensimulation, die hohen Standards an Genauigkeit und Zuverlässigkeit genügt.
- Werkstoffe, Halbzeuge- und Bauteile mit einem sensorisch abrufbaren semantischen Gedächtnis können helfen oben genannte Teilprozesse (Entwicklung, Herstellung Verarbeitung, Reparatur, Recycling) zusammenzuführen und, korrespondierend mit einer umfassenden Prozesskettensimulation, ihre Effizienz zu steigern.
- Über reduzierte Modellansätze können die Daten aus der Prozesskettensimulation direkt in die Prozessregelung eingebunden werden. Zusammen mit entsprechenden Sensoren ist so beispielsweise die Eigenschaftsverteilung in einem Blech regel- und optimierbar und kann dem nachfolgenden Bearbeiter, der daraus wiederum Blechplatinen für Karosseriebauteile herstellt, digital übermittelt werden.
- Aus Sicht der Bauteilfertigung ist immer auch die Kenntnis der Eigenschaften der Vorprodukte notwendig, um optimale Ergebnisse zu erhalten.
- Deshalb wird für die Datenverarbeitung und den Datenaustausch innerhalb und außerhalb von Unternehmen eine Plattform als zentrales Element benötigt, der **Materials Data Space**. Dadurch wird die digitale Absicherung der Herstellung, Verarbeitung und Nutzung von der Material- und Halbzeugentwicklung bis hin zum Bauteileinsatz über den gesamten Produktlebenszyklus gewährleistet.

Chancen von Industrie 4.0

- Erfassung von produktionsbedingten Inhomogenitäten im Werkstoff/Halbzeug/Bauteil durch weiterentwickelte Sensorik und Prozessmodelle
- Informationen über unvermeidbare Inhomogenitäten können an nachfolgende Be- und Verarbeiter weitergereicht werden, um diese in den nachfolgenden Prozessschritten bis zum Bauteil zu berücksichtigen und tolerabel zu halten.
- Durch die autonome Interaktion zwischen Werkstück und der Prozesssteuerung können die jeweiligen Prozesse optimiert werden.
- Durch kontinuierliche Weiterentwicklung der Prozesskettensimulation in Kombination mit reduzierten Prozessmodellen und kosteneffizienter Beschreibung der resultierenden Bauteileigenschaften wird es möglich sein, Mikrostrukturen mit maßgeschneiderten Eigenschaften für die jeweiligen Endprodukte zu designen und deren Herstellbarkeit vorab abzusichern.
- Die Beherrschbarkeit der Verarbeitungsschritte wird sicherer und somit der Ausschuss im Fertigungsprozess signifikant reduziert, da durch Modellvorhersagen adaptive Fertigungsprozesse in einer ganz anderen Qualität möglich sind. Dies führt dazu, dass nachgelagerte Produktionsschritte mit situationsgerechten Prozessparametern ausgeführt werden.

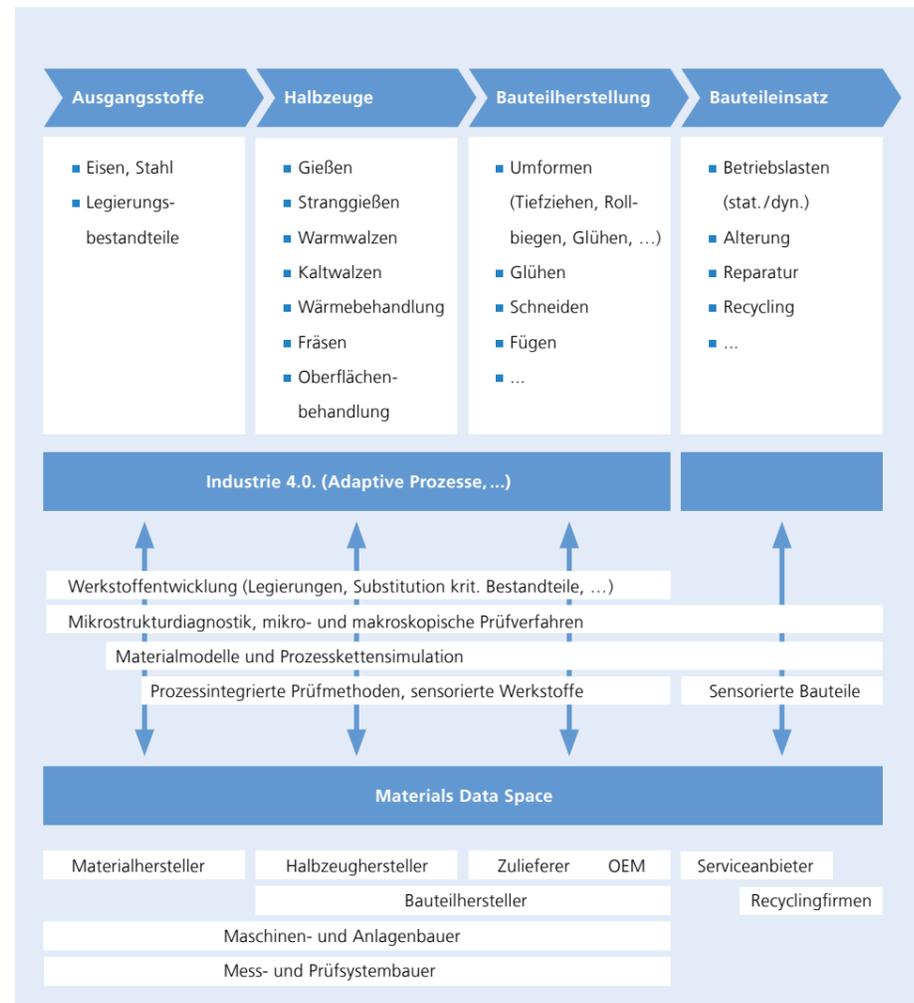


Abb. 4: Schematische Darstellung des »Material-Zyklus« im Use Case Metallverarbeitung/Metallformgebung mit Entwicklungsschwerpunkten zur Schaffung eines **Materials Data Space** und Angabe relevanter Anwendungsindustrien

und der Ableitung relevanter Auswirkungen auf Material- und Bauteileigenschaften als auch die deutlich umfassendere Kenntnis realer Betriebsbeanspruchungen aus einer erweiterten Anzahl von preiswerten, sensorisch selbstüberwachten Bauteilen und Produkten (vgl. neue Geschäftsmodelle und Rückwirkungen auf die Material- und Bauteilbeanspruchungen wie beim Carsharing) werden die effiziente und sichere Auslegung, Umsetzung und Nutzung materialbasierter Produkte nachhaltig positiv beeinflussen. Auf Seite der Beanspruchung wird sich dies in Richtung von sensorierten Bauteilen mit integrierter Schädigungs- und Lebensdauerabschätzung entwickeln. Dies wird zu einer weiteren Anpassung von Sicherheitsfaktoren und einer veränderten Bauteilauslegung mit Rückflüssen auf die Materialentwicklung führen und letztlich zur Steigerung der Effizienz beitragen.

Verarbeitungsschritte, wie z. B. das Umformen können individuell an die lokal vorliegenden, aktuellen Eigenschaften des Werkstoffs sowie gewünschte Bauteileigenschaften adaptiert werden. Der sensorierte bzw. adaptive Werkstoff »steuert« den Verarbeitungsprozess selbst, in dem die für ihn optimalen Stellgrößen (z. B. Presskraft, Haltezeit) automatisch gewählt und die Fertigungsprozessschritte selbst optimal adaptiert werden (*feedforward control*). Ist das Prozessmodell nicht aus dem **Materials Data Space** abrufbar, so können die Zusammenhänge zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen schnell und automatisiert analysiert werden, wenn die durch den Verarbeitungsprozess veränderten Eigenschaften wiederum kontinuierlich sensorisch erfasst werden (»lernende« Fertigung). Für die weitere Nutzung werden diese Daten im **Materials Data Space** abgelegt. Dadurch können in nachfolgenden Prozessen Ausschuss, Prozessstörungen und Ausfallzeiten reduziert werden. Verarbeitungsprozesse können flexibel (verschiedene Werkstoffe) und dennoch robust und zuverlässig konfiguriert werden. Das erlaubt, Sicherheitszuschläge zu reduzieren und Vormaterialien mit größeren Toleranzen zu verwenden, wodurch Kosten eingespart und Ressourcen effizienter genutzt werden können. Simulationstechniken für die Beschreibung von Fertigungsschritten und Prozessketten ermöglichen eine immer bessere Detailbeschreibung der Eigenschaftsentwicklung von Werkstoffen in der Verarbeitung sowie deren Auswirkung auf elementare Prozessgrößen wie z. B. der Walzkraft in der Blechhalbzeugherstellung als auch auf die resultierenden Bauteileigenschaften. Durch Modellreduktionen sind solche Simulationsmodelle derart abstrahierbar, dass schnelle und regelungstechnisch umsetzbare Prozessmodelle für einzelne Fertigungsschritte und ganze Fertigungsketten erstellt werden können.

Werkstoffe, Halbzeuge und Bauteile mit einem semantischen Gedächtnis, das jederzeit im Produktlebenszyklus abrufbar ist, ermöglichen in der vertikalen Vernetzung eine enge Verzahnung zwischen Werkstoffentwicklung, Werkstoffverarbeitung Bauteildesign, Prozessentwicklung, Logistik, Reparatur und Recycling. In jedem Teilprozess kann der Einfluss der anderen Teilprozesse berücksichtigt werden. So können schon bei der Entwicklung neuer Werkstoffe aus dem **Materials Data Space** Informationen zu ähnlichen Werkstoffen bzgl. Eigenschaften

Vision

Eigenschaften und Zustand (z. B. Fehlerfreiheit) der Halbzeuge und der daraus gefertigten Bauteile werden an verschiedenen Punkten der Herstellungs- und Verarbeitungskette erfasst (Inline-Monitoring der Fertigungsqualität mit entsprechender Mess- und Prüftechnik) und auf Basis der Werkstoff-/Bauteilhistorie mit Hilfe von durchgängigen Prozesskettensimulationen prognostiziert. Die dazugehörigen Daten werden im **Materials Data Space** abgelegt, so dass sie zu jedem Zeitpunkt des Produktlebenszyklus und darüber hinaus für oder aus dem individuellen Werkstoff/Halbzeug/Bauteil abrufbar und rückverfolgbar sind.

Die wachsende Kenntnis über die Interaktion von Material, Auslegung, Fertigung und Betriebs-einsatz, d. h. die wachsende Erfassung und Berücksichtigung sowohl der Fertigungsbedingungen

und Verhalten bei Herstellung, Verarbeitung und Gebrauch abgegriffen werden, um den neuen Werkstoff entsprechend zu optimieren. Sinnvolle Festlegungen zum wettbewerbskompatiblen Umgang mit In- und Output-Parametern, Datenformaten und Schnittstellen regeln den Umgang mit individuellen Daten aus dem **Materials Data Space** im Rahmen von Kundenbeziehungen, damit insgesamt höchste Wertschöpfung generiert werden kann.

Wichtige Daten im Materials Data Space für den Anwendungsbereich

Zu unterscheiden ist der **Materials Data Space** innerhalb eines Unternehmens und über die Unternehmensgrenzen hinaus. Die Daten der Fertigungsprozesse zählen zu den wichtigsten Kompetenzen der Unternehmen und sind daher nur unternehmensintern in einem **Materials Data Space**-Speicher nutzbar. Beispielsweise ist die Verkettung vom Erschmelzen, Legieren über das Stranggießen, Warmwalzen, Kaltwalzen, Wärmebehandeln, Dressierwalzen zum fertigen Halbzeug im **Industrie 4.0**-Konzept immens wichtig und es werden durch die integrierte Betrachtung von Prozesssimulation, Prozessmodell und **Materials Data Space** signifikante Effizienzsteigerungen erwartet.

An der Schnittstelle zwischen Unternehmen können und müssen ausgewählte Informationen im **Materials Data Space** an nachfolgende Ver- und Bearbeiter bzw. Kunden weitergereicht werden. Hierdurch wird ein Produkt wie beispielsweise ein Stahlband signifikant aufgewertet, wenn es zu der jeweiligen Charge Informationen zum Werkstoffzustand und den Werkstoffeigenschaften bis hin zu kalibrierten Modellen gibt, um nachfolgende Verarbeitungsschritte berechenbar und auslegbar zu machen. An dieser Schnittstelle werden zahlreiche neue Geschäftsmodelle entstehen.

Im Bereich der metallischen Werkstoffe/Halbzeuge/Bauteile sind wesentliche Daten, die im **Materials Data Space** verfügbar sein müssen, die

- Mikrostrukturinformationen: Legierungszusammensetzung, Elementverteilung, Kristallinität, Versetzungsdichten, Phasenbestand, Korngrenzen, Korngrößenverteilungen, kristallographische und morphologische Texturen, ...
- Mechanische und weitere physikalische Eigenschaften: Werkstoffkennwerte (z. B. aus Zugversuch, Biegetest, r -Werte (Anisotropie)), Eigenspannungen, Oberflächenrauigkeit, Beschichtung, Verfestigungszustand, Poren und Lunker, ...
- Verarbeitungsinformationen: Härtebarkeit, Beschichtungseigenschaften, tribologische Eigenschaften, ...
- Anwendungsinformationen: Produktionsinformationen, schwingungstechnische Beanspruchbarkeit, Korrosionsfestigkeit, Umwelteigenschaften, Alterungsverhalten, allgemeine Informationen, ...

Einordnung in die Roadmap zum Materials Data Space

Forschungsfragen und Arbeitspakete zur Realisierung des Materials Data Space im skizzierten Anwendungsbereich	
kurzfristig	Wie sehen Datenformate, Schnittstellen und Parameter aus, mit denen in abgegrenzten Modellnetzwerken bzw. Demonstratorprojekten der Materials Data Space »praktiziert« werden kann? Wie können die Informationen abrufbar für den Werkstoff, das Bauteil im Materials Data Space gespeichert und abrufbar zugeordnet werden?
mittelfristig	Mit welchen sensorischen Verfahren bzw. Simulationen kann man in welchem Zeitpunkt des Produktlebenszyklus die relevanten Eigenschaften bestimmen bzw. prognostizieren? Integration der Mikrostrukturdiagnostik und der Prüfverfahren über alle Strukturebenen in einer einheitlichen prozessübergreifenden Werkstoffcharakterisierung Welche Simulationsmodelle sind geeignet, um parallel zu messbaren Zuständen berechnete Werkstoffzustände (z. B. Mikrostrukturentwicklung) verfügbar zu machen und die resultierenden Bauteileigenschaften zu bestimmen? Wie können die Informationen abrufbar im/am Werkstoff gespeichert werden?
langfristig	Welche neuen Geschäftsmodelle sind im Bereich des Bauteileinsatzes denkbar und welche Rückwirkungen sind auf Werkstoff und Bauteilbeanspruchungen zu erwarten?
Koordination: IWM (Peter Gumbsch / Dirk Helm / Thomas Götz), IZFP (Randolf Hanke / Bernd Wolter / Klaus Szielasko), LBF (Tobias Melz / Thilo Bein)	

5.3 Use-Case 3: Funktionswerkstoffe und intelligentes Recycling

Anwendungsbereich und Systemgrenzen

Es ist absehbar, dass mit der durchgängigen Digitalisierung in **Industrie 4.0** und der damit verbundenen zunehmenden Individualisierung der Produkte mehr und mehr materialbasierte Funktionen von Sensorik und Aktorik und auch Elektronik in Strukturwerkstoffe integriert werden müssen (sensorierte und adaptive Werkstoffe). Dies läuft auf eine Fusion von Struktur- und Funktionswerkstoffen hinaus, wobei die Strukturwerkstoffe Festigkeit und Steifigkeit usw. mitbringen, die Funktionswerkstoffe sensorische und/oder aktorische Eigenschaften liefern, registrierende elektronische Speicherfunktionen haben und damit z. B. auch eindeutige Identifikationsmerkmale für Logistik- und Recyclingzwecke und zum Schutz vor Produktpiraterie zur Verfügung stellen können. Im Bereich der Polymermaterialien stehen bereits jetzt sowohl Struktur- als auch Funktionswerkstoffe zur Verfügung, wodurch sich eine Integration

von Funktionalitäten in Strukturwerkstoffe und -bauteile in diesem Rahmen einfacher gestaltet. Durch die zunehmende Funktionalisierung von Werkstoffen wächst die Dissipation von Rohstoffen. Für den Ausbau von Zukunftstechnologien ist die Gewährleistung der Versorgungssicherheit der – teilweise kritischen – Rohstoffe essenziell. Ressourcen-, Material- und Werkstoffdaten aus dem **Materials Data Space**, die den gesamten Lebenszyklus und das Recycling abdecken, haben dafür eine nutzbringende und nachhaltige Rolle.

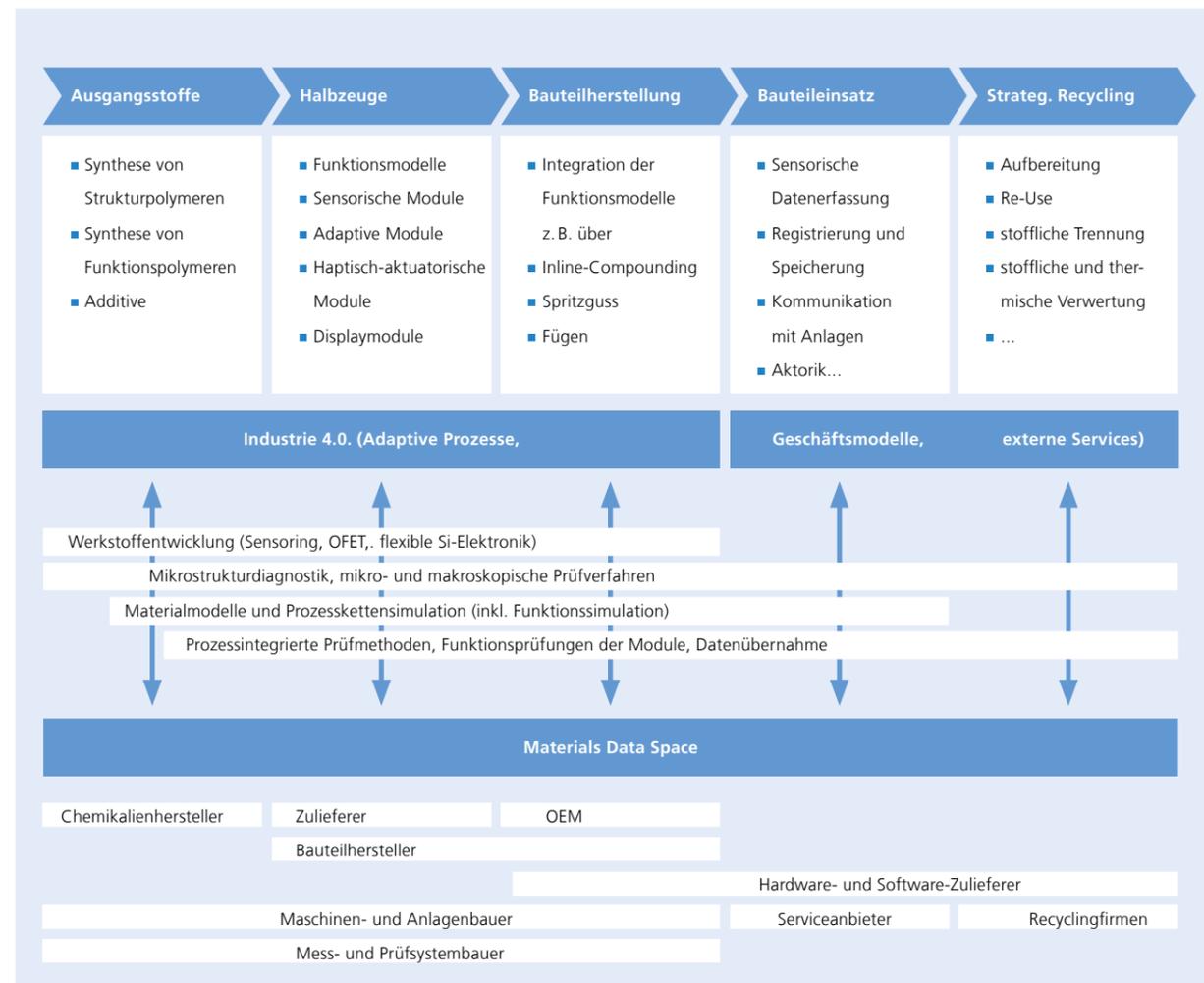
Herausforderungen, die für Industrie 4.0 zu adressieren sind

Die Produktionsprozesse im Rahmen von **Industrie 4.0** fordern in den Technologiefeldern *Embedded Systems*, *Smart Factory* und *IT-Security* eindeutig identifizierbare Werkstücke, die für hochentwickelte Produkte/Produktionslinien auch mit sensorischen oder anderen Funktionalitäten ausgestattet sein müssen. Solche Werkstücke können bereits während der Herstellung in der Prozesskette eine aktive Rolle übernehmen und ihrerseits Einfluss auf den Verarbeitungsprozess nehmen («autonomes» Werkstück). Bei der Sensorik geht es je nach Anwendungsfall um intelligent vernetzte und sicher auslesbare Sensorik vorrangig für Temperatur, Druck, Beschleunigung, Vibrationszustand, Feuchte, etc. Hier wird auch die flexible Elektronik (z. B. gedruckte OFET-Schaltungen oder flexible Si-Elektronik) eine wichtige Rolle spielen. In jedem Fall wird die Entwicklung entsprechender Funktionswerkstoffe mit für den jeweiligen Produktionsprozess maßgeschneiderten Eigenschaften erforderlich sein. Bei Funktionswerkstoffen, insbesondere bei Elektronikanwendungen, ist die Dichte an Wertstoffen, z. B. seltenen Erden und anderen kritischen Rohstoffen, besonders hoch. Deshalb spielt hier *design for recycling* eine sehr wirksame Rolle. Der Ausbau von Zukunftstechnologien hängt auch davon ab, ob ausreichende Mengen der begehrten Rohstoffe vorhanden sind. Deutschland als Vorreiter in der **Industrie 4.0** muss bereits jetzt mögliche Ressourcenknappheit berücksichtigen, um seine Stellung für die Zukunft zu sichern. Aufgrund der Vielzahl der in der Material- und Werkstoffherstellung verwendeten chemischen Elemente und Verbindungen ist es schwierig und aufwändig die Chancen und Risiken der Verfügbarkeit aller verwendeten chemischen Elemente im Auge zu behalten. Aber gerade mit der Digitalisierung, Durchgängigkeit, Vernetzung und den Interaktionen von Produkten sowie Material- und Werkstoffdaten, die **Industrie 4.0** bietet, kann ein nachhaltiger Umgang mit knappen Ressourcen entscheidend gesichert werden. Im **Materials Data Space** entsprechende Daten zu integrieren, liefert deshalb die Chance, hier zukunftssicher zu agieren.

Zukunftstechnologien stellen mit ihrer zunehmenden Funktionalisierung auch über den eigentlichen Produktionsprozess weit hinaus gehende Möglichkeiten zur Steigerung des Kundennutzens und zur Kontrolle und Optimierung des Produktlebenszyklus bereit. Die Herausforderungen betreffen dabei neben den herzustellenden Produkten auch die hochgradig vernetzten Produktionseinrichtungen selbst (z. B. Sensorik für Produktionsmaschinen) sowie ebenfalls angrenzende

Bereiche von **Industrie 4.0**, in denen auf Basis neuer Geschäftsmodelle zusätzliche Services während der Produktlebensdauer abrufbar werden.

- Die Gesamtheit der vom Kunden/Nutzer und von der **Industrie 4.0** geforderten neuen Funktionalitäten erzeugt die Notwendigkeit, die wachsende Zahl von oft sehr unterschiedlichen, z. T. miteinander interagierenden Funktionalitäten effizient, zuverlässig und eindeutig adressierbar in Werkstücken und Produkten zu integrieren.
- Für die Integration von Funktionalitäten in die formgebenden Strukturwerkstoffe der Werkstücke müssen spezifische **Industrie 4.0**-Prozesse entwickelt werden, die material- bzw. werkstoffseitig und datenseitig die Anforderungsprofile erfüllen.
- Für den Zusatznutzen, den integrierte Funktionalitäten in der Nutzungsphase des Produkts dem Kunden bringen sollen, werden sich ständig neue Geschäftsmodelle und damit Anforderungen entwickeln, die eine Flexibilität der integrierten Funktionalitäten erforderlich machen werden.
- Für die Vielzahl der in der Material- und Werkstoffherstellung verwendeten chemischen Elemente und Verbindungen müssen die Stoff- und Energieströme von der »Wiege bis zur Bahre« für ein umfassendes *life cycle assessment* ermittelt werden.
- Um Chancen und Risiken der Verfügbarkeit aller verwendeten chemischen Elemente einzuschätzen, müssen allgemeine und unternehmensspezifische Kritikalitätsanalysen bereitgestellt werden.
- Material-, Werkstoffentwicklung und Substitution müssen in Hinblick auf Kritikalitäten und unter strategischen Aspekten miteinander verknüpft werden.
- Es ist ein »intelligentes« Re-Use für die strategischen Stoffe zu entwickeln.
- Mit Hilfe von Modellierung und Simulation systemoptimierter Prozessabläufe müssen neue Verfahren der Fertigungstechnik in Hinblick auf Re-Use entwickelt werden.



Chancen von Industrie 4.0

- Die Kombination von Leichtbaustrukturen mit flexibler Elektronik ermöglicht in allen Branchen integrierte Bauteile mit umfangreichen Funktionalitäten, welche klassische Bauweisen ablösen werden.
- Flexible Elektronik z. B. in Form von Hardwaresicherheits- und Identifikationsmerkmalen wird auch zu neuen Produkten und Geschäftsmodellen im Bereich der Sicherheitstechnologien, im Transportgewerbe und in der Logistik führen.
- Individualisierbare Bedienungspanels für Maschinen, Fahrzeuge, Anlagen und Konsumprodukte im Sinne von *Human-Machine-Interfaces* (HMI) setzen die strukturkonforme Integration von sensorischen und aktorischen Komponenten in die Bedienoberfläche voraus,

Abb. 5: Schematische Darstellung des »Material-Zyklus« im Use Case Funktionswerkstoffe und intelligentes Recycling mit Entwicklungsschwerpunkten zur Schaffung eines Materials Data Space und Angabe relevanter Anwendungsindustrien

- um Bedienvorgänge individueller, sicherer und bedienungsfreundlicher zu machen. Hierzu sind z. B. integrierte elektrische und optische Sensorik mit haptischer Aktorik zu koppeln.
- Durch *Augmented Reality* (AR) unterstützte qualitätssichernde Montage von Einzelkomponenten zu hoch integrierten Gesamtsystemen (*cyber physical systems*).
- Individualisierte Vorfertigung von Bauteilmodulen (in Kleinmengen) durch selbstlernende betriebliche Abläufe (informatisierte Fertigungstechnik).
- Der Einsatz in der personalisierten Diagnostik in der Medizin führt direkt zu personalisierbaren *Health-Care*-Produkten, die einer alternden Gesellschaft Individualität, Autonomie und angemessene medizinische Versorgung ermöglichen. Dafür entwickelt sich ein Modell für die Verknüpfung von Material- und Werkstoffdaten und personalisierten Daten, das beispielhaft für andere Branchen zur Verfügung steht.
- Durch ein ganzheitliches Know-How zum Thema Ressourcen kann der **Materials Data Space** maßgeschneiderte Beiträge und Leistungen für Unternehmen in der **Industrie 4.0** bereitstellen.
- Bessere Material- und Ressourceneffizienz durch integrales Rohstoffwissen über die gesamten Wertschöpfungsketten und Stoffkreisläufe.

Vision

Die Vision ist eine Fusion von Struktur- und Funktionswerkstoffen, wobei die Strukturwerkstoffe Festigkeit und Steifigkeit usw. mitbringen, die Funktionswerkstoffe sensorische und/oder aktorische Eigenschaften liefern, registrierende elektronische Speicherfunktionen haben und damit z. B. auch eindeutige Identifikationsmerkmale für Logistik- und Recyclingzwecke und zum Schutz vor Produktpiraterie zur Verfügung stellen können. Neben der Integration von Funktionswerkstoffen in die Strukturwerkstoffe ist dafür die durchgängige Vernetzung der gewonnenen Daten im **Materials Data Space** Voraussetzung. Der **Materials Data Space** stellt die erforderliche Plattform für den Austausch der materialbezogenen Daten dar. Durch seine Verknüpfung mit dem Industrial Data Space stehen diese Daten nicht nur im *cyber physical production system* zur Verfügung sondern im gesamten *cyber physical system*. Auf dieser Basis können sich für den gesamten Produktlebenszyklus (von der Bauteilfertigstellung bis zum Recycling) neue Geschäftsmodelle entwickeln, die diese Daten nutzbringend einsetzen. Die Vielfalt dieser Geschäftsmodelle ist derzeit nicht abzusehen und die Erfordernisse an die Funktionalitäten, die dafür von den Bauteilen/Produkten bereitgestellt werden müssen, werden sich später entwickeln. Gerade dafür würde die Integration von flexibel gestaltbaren Funktionalitäten in Strukturwerkstoffe ein hohes Potenzial in der weitergehenden Ausgestaltung von **Industrie 4.0** über den Produktionsbereich hinaus bieten. Die Rohstoff-, Material- und Werkstoffdaten im **Materials Data Space** liefern die Basis für Material- und Werkstoffentwicklungen und Substitutionen, für Re-Use-Entwicklungen und ein »intelligentes« strategisches Recycling unter Berücksichtigung der Kritikalität von Ausgangsstoffen, der ganzheitlichen Bewertung von Stoff- und Energieströmen und des Recyclingpotenzials.

Wichtige Daten im Materials Data Space für den Anwendungsbereich

- Mikrostrukturinformationen: Molekulargewicht, Reinheit, Phasenbestand, Kettenlängenverteilungen, Kristallinität, morphologische Texturen, ...
- Mechanische und weitere physikalische Eigenschaften: Werkstoffkennwerte (z. B. aus Zugversuch, Schlag- und Biege-Test), Oberflächenrauigkeit, Beschichtung, Poren, ...
- Verarbeitungsinformationen: Viskosität, rheologische Eigenschaften, Beschichtungseigenschaften, tribologische Eigenschaften, ...
- Daten zur Funktionalität: Kennwerte für die Funktionsfähigkeit, Funktionskennlinien, Störfestigkeiten, Wartungsdaten, Daten zur Programmierfähigkeit, Speicherkapazität, ...
- Anwendungsinformationen: Produkt- und Produktionsinformationen, Schwingungsfestigkeit, Korrosionsbeständigkeit, Alterungsverhalten, Umwelteigenschaften, ...
- Daten zum Recyclingpotenzial, zur Kritikalität, zum *life cycle assessment* und für *End-of-life*-Szenarien.

Einordnung in die Roadmap zum Materials Data Space

Bei den vielfältigen Wechselwirkungen zwischen den Kerntechnologiefeldern von **Industrie 4.0** und den Funktionswerkstoffe sowie den Recyclinganforderungen ergibt sich eine Reihe von Aufgabenstellungen, denen sich der MATERIALS Fraunhofer-Verbund in enger Kooperation mit seinen Industriepartnern stellen wird. Die folgende Auflistung ist dabei sicher nicht vollständig.

Forschungsfragen und Arbeitspakete zur Realisierung des Materials Data Space im skizzierten Anwendungsbereich

kurzfristig	<p>Existierende Lösungen für Funktionswerkstoffe (z. B. für Sensorik, Identifikation, Elektronikkomponenten) adressieren zumeist sehr spezifische Anwendungsbedingungen, wodurch oft Anpassungen an die zumeist härteren Bedingungen in Produktionsprozessen erforderlich werden.</p> <p>Die kostengünstige Integration von Funktionalitäten mit Strukturwerkstoffen in (autonomen) Werkstücken und Endprodukten erfordert die Entwicklung neuer, sicherer Fertigungstechnologien z. B. generative Werkstofftechnologien.</p> <p>Rohstoff-, Material- und Werkstoffdatenbanken entwickeln für die kritischen Rohstoffe und ihr Recyclingpotenzial unter Berücksichtigung von geologischer Verfügbarkeit, geopolitischer Situation, Anwendungspotenzial, ökonomischen Entwicklungen, Umweltaspekten und des Recyclingpotenzials</p>
mittelfristig	<p>Aufgrund der Komplexität der Anforderungen und Prozesse ist der zu betrachtende Datenraum im Materials Data Space besonders ausgedehnt: Es sind z. B. abhängig von der Verarbeitungsgeschichte sowohl umfangreiche Materialparametersätze für den jeweiligen Strukturwerkstoff als auch für alle involvierten Funktionswerkstoffe zu erheben und zusätzlich Daten zur Funktionalität zu integrieren.</p> <p>Mikrostrukturdiagnostik und Prüfverfahren über alle Struktur- und Funktionsebenen müssen entwickelt werden.</p> <p>Leitlinien für die Entwicklung Re-Use-fähiger Bauteile und Werkstoffe erarbeiten</p> <p>Forschungen zu Trends und Entwicklungen, die die Kritikalität von Ausgangsroh- und Energiestoffen beeinflussen.</p> <p>Wie bestimmt man effizient die relevanten Daten und wie können Informationen zu den Bauteilen/Werkstoffen nach dem Produktlebensende gewonnen werden?</p>
langfristig	<p>Konzepte und Erprobungen im Werkstoffdesign für die völlig neuen Herausforderungen, die sich für die Zuverlässigkeit, Lebensdauer und beim Recycling der teilweise sehr komplex aufgebauten Multifunktionsprodukte ergeben, müssen erarbeitet werden.</p> <p>Konzepte und Erprobungen für ein Industrie- 4.0-fähiges Re-Use von Werkstoffen mit autonomen und automatisch arbeitenden Anlagen zur Sortierung, Zerkleinerung und Wiederaufbereitung entwickeln.</p> <p>Welche neuen Geschäftsmodelle werden durch neue Funktionalitäten denkbar und welche Anforderungsprofile können sich daraus für eine Integration flexibler Funktionen ergeben?</p>

Koordination:

IAP (Alexander Böker / Dieter Hofmann),
 ISC (Gerhard Sextl / Dieter Sporn),
 IBP (Klaus Sedlbauer / Klaus Breuer)

Werkstoff	Ein Werkstoff ist ein Material, aus dem technisch relevante Bauteile hergestellt werden.
Material	Ein Material ist eine feste Substanz, die das Potenzial für den Einsatz als Werkstoff hat.
Werkstück	Als Werkstück wird ein abgegrenzter Teil eines Werkstoffs bezeichnet, das in irgendeiner Form bearbeitet wird.
Halbzeug	Halbzeuge sind vorgefertigte Gegenstände und entstehen als Zwischenschritt im Herstellungsprozess eines Produktes.
Bauteil	Ein Bauteil ist ein einzelnes Teil, ein Element oder eine Komponente, aus denen ein technisches System oder auch ein Bauwerk zusammengesetzt wird.
Prozess	Nach DIN IEC 60050-351 wird ein Prozess definiert als »Gesamtheit von aufeinander einwirkenden Vorgängen in einem System, durch die Materie, Energie oder Information umgeformt, transportiert oder gespeichert wird«.
System	Der Ausdruck System wird seit der Antike für ein aus Einzelteilen zusammengefügtes, gegliedertes und geordnetes Ganzes verwendet. Er wird in unterschiedlichen systematischen Zusammenhängen mit verschiedenen Bedeutungsnuancen benutzt. Für technische Systeme erklärt beispielsweise die DIN IEC 60050-351 ein System als Gesamtheit miteinander in Beziehung stehender Elemente, die in einem bestimmten Zusammenhang als Ganzes gesehen und als von ihrer Umgebung abgegrenzt betrachtet werden. Ein System wird im Allgemeinen hinsichtlich seiner Zielsetzung, zum Beispiel Ausführung einer bestimmten Funktion, definiert. Objekte eines Systems können natürliche oder künstliche Gegenstände oder auch Denkweisen und deren Ergebnisse sein. Das System wird als von seiner Umgebung und anderen äußeren Systemen durch eine gedachte Hüllfläche abgegrenzt betrachtet, welche die Verbindungen zwischen außen und dem betrachteten System durchschneidet.

Materialwissenschaft	Die Materialwissenschaft beschäftigt sich mit der Herstellung von Materialien und der Charakterisierung von deren Struktur und Eigenschaften. In der Materialwissenschaft bauen die Forschungsthemen auf Erkenntnissen zu naturwissenschaftlichen Phänomenen auf und setzen die darin vorgeschlagene grundlagenwissenschaftliche Forschung in einen Kontext möglicher Anwendungen. So geht sie signifikant über einen Erkenntnisgewinn zu grundlegenden physikalischen oder chemischen Phänomenen hinaus.
Werkstofftechnik	Werkstofftechnik beinhaltet die ingenieurwissenschaftlich orientierte Werkstoffentwicklung sowie die entsprechenden Verarbeitungsverfahren und das Betriebsverhalten von Bauteilen im Einsatz. Typische Themen der Werkstofftechnik grenzen sich von verfahrens- oder fertigungstechnischen Aspekten ab, indem sie deutlich auf die eigentliche Entwicklung von verbesserten oder neuartigen Werkstoffen fokussiert sind.

Impressum

Redaktion

Prof. Dr. Ralf B. Wehrspohn
Prof. Dr. Manfred Fütting
Clemens Homann

Use Case 1:

IMWS (Ralf Wehrspohn /
Peter Michel),
IZFP (Randolf Hanke /
Hans-Georg Herrmann),
WKI (Bohumil Kasal / Dirk
Berthold)

Use Case 2:

IWM (Peter Gumbsch /
Dirk Helm / Thomas Götz),
IZFP (Randolf Hanke / Bernd
Wolter / Klaus Szielasko),
LBF (Tobias Melz / Thilo Bein)

Use Case 3:

IAP (Alexander Böker /
Dieter Hofmann),
ISC (Gerhard Sextl /
Dieter Sporn),
IBP (Klaus Sedlbauer /
Klaus Breuer)

Gestaltung

Daniel Mudra

Titelcollage

Die Werft, Leipzig

Produktion

Fritsch Druck GmbH,
Leipzig

Anschrift der Redaktion

Fraunhofer-Institut für
Mikrostruktur von Werkstoffen
und Systemen IMWS
Öffentlichkeitsarbeit
Walter-Hülse-Str. 1
06120 Halle (Saale)
Tel: +49 345 5589-213
Fax: +49 345 5589-101

info@imws.fraunhofer.de
www.imws.fraunhofer.de

Alle Rechte vorbehalten.
Bei Abdruck ist die Einwilligung
der Redaktion erforderlich.

Redaktionsschluss

13.04.2016

