

2 Mit dem Digitalen Zwilling Prozessgrenzen überwinden

T. Bergs, S. Gierlings, T. Augspurger

Gliederung

1	Der Digitale Zwilling – Lernen und Prognose	83
2	Das Höhlengleichnis – Über das Erkennen der Wirklichkeit.....	84
3	Der Digitale Schatten und Zwilling in der Produktionstechnik	86
3.1	Stand der Technik und Definitionen aus der Literatur	86
3.2	Definition Digitaler Schatten und Zwilling für die Fertigungstechnik	87
3.3	Objekte und Systemgrenzen für den Digitalen Schatten und Zwilling	90
3.4	Unsicherheit und Relevanz von Daten und Information	92
3.5	Wissens- und datengetriebene Ansätze zur Modellbildung.....	94
4	Praxisbeispiele – Der Digitale Zwilling im Fertigungsprozess	97
4.1	Betrachtung von Produktlebenszyklen am Beispiel des Werkzeugs	97
4.2	Daten- und modellgestützte Beschreibung der Produktgeometrie	99
4.3	Daten- und modellgestützte Prognose von Randzonenbeanspruchungen.....	103
4.4	Datengestützte Prognose von Gefügeveränderungen	105
5	Turning Data into Value – Der (Mehr-) Wert des Digitalen Zwillings	107
6	Zusammenfassung und Ausblick	110

Kurzfassung

Mit dem Digitalen Zwilling Prozessgrenzen überwinden

Kaum eine Entwicklung hat die Arbeits- und Produktionswelt in den letzten Jahren so geprägt wie die Digitalisierung. Die konsequente und flächendeckende Konnektivität ist wesentlicher Treiber für den technologischen und gesellschaftlichen Wandel. Der Digitale Zwilling ist dabei das zentrale Vehikel, welches die verfügbaren Daten und Informationen über den Lebenszyklus eines realen Objekts hinweg aggregiert, strukturiert und nutzbar macht. Doch wie muss der Digitale Zwilling in der Produktions- und Fertigungswelt aufgebaut sein? Wie müssen Daten gespeichert und zu Informationen aufbereitet werden und in welcher Weise bestimmt sich der Wert oder Mehrwert der Daten im Digitalen Zwilling in der Gesamtbilanz über die unterschiedlichen Phasen des Produktlebenszyklus?

Der vorliegende Beitrag definiert den Digitalen Zwilling für ein produktionstechnisches Umfeld und vertieft das Zusammenwirken von Daten, Digitalem Schatten, Modellen und dem Digitalen Zwilling anhand konkreter fertigungstechnischer Fragestellungen. In diesem Zusammenhang wird auf die Bedeutung von Daten sowie Modellen eingegangen und deren Beitrag im Sinne des Digitalen Schattens und Zwillings kritisch hinterfragt. Der Beitrag schließt mit einer Diskussion über den Wert oder Mehrwert, welcher durch die Nutzung von Daten für Produkt und Produktion entsteht.

Abstract

Overcoming Process Limitations Using the Digital Twin

In the recent years, hardly any other development has had such an impact on the worlds of work and production as digitization, and the consistent and comprehensive connectivity is a key driver of technological and social change. The Digital Twin is the central vehicle, aggregating, structuring and utilizing the available data and information over the life-cycle of a real object. But how does the Digital Twin has to be structured in a production or manufacturing world? How does data have to be stored and processed into information and how can the value or added value of the data in the Digital Twin be determined in the overall balance over different phases of the product-life-cycle?

This article presents a definition for the Digital Twin for a production-technological environment and deepens the interaction of data, Digital Shadow, models and the Digital Twin based on specific use cases. In this context, the significance of data and models is repeatedly addressed and their contribution in terms of the Digital Shadow and Twin is critically questioned. The article concludes with a discussion of the value or added value that arises from the use of data for the product and its production.

1 Der Digitale Zwilling – Lernen und Prognose

Kaum eine Entwicklung hat die Arbeits- und Produktionswelt der letzten zehn Jahre mehr geprägt als die Digitalisierung: Das digitale Zeitalter oder die Ära „Industrie 4.0“ ist einer der großen Megatrends. Megatrends müssen nicht vorausgesagt werden, denn sie sind bereits da und markieren diejenigen Veränderungen in Gesellschaft und Umwelt, die uns jetzt schon prägen und die Zukunft direkt beeinflussen. Zu den großen Megatrends der 2020er Jahre zählen die Globalisierung und Urbanisierung, die Individualisierung, ein zunehmendes Gesundheits- und Sicherheitsstreben, eine sich verändernde Altersstruktur in der Gesellschaft sowie die Neo-Ökologie, mit den Themen einer nachhaltigen ressourcenschonenden Produktion und Mobilität.

Zu den großen digitalen Themen gehören flächendeckende Konnektivität, eine sich rasch verändernde Arbeitswelt und zuletzt der Trend hin zu einer Welt, in der Wissen und Information ständig verfügbar sind bis hin zum transparenten Individuum. Die Konnektivität, getrieben durch digitale Kommunikationsmittel insbesondere das Internet, ist dabei einer der wirkungsmächtigsten Mechanismen gesellschaftlicher Veränderung. Über die Aufhebung von Raum und Zeit in einer modernen, vernetzten Welt hinaus ist die Digitalisierung jedoch ein viel weitreichenderer Treiber für den gesellschaftlichen Wandel. Sie ist selbst nicht als ein Bedarf, sondern vielmehr als ein Mittel zum Zweck zu verstehen und befähigt zur Organisation innerhalb einer komplexen Welt und ist sowohl Archiv als auch Quelle von Information und Wissen zugleich. Der Digitale Zwilling ist dabei das Vehikel, welches die verfügbaren Daten und Informationen zu einem realen Objekt in einer digitalen Umgebung abbildet und aggregiert – er ist Bindeglied zwischen den Objekten der greifbaren Welt und dem, was wir über sie wissen. Er konserviert Informationen, schafft Transparenz und unterstützt das systematische Lernen aus Vergangenheit und Gegenwart.

Durch das verfügbare Wissen und die so vorhandene Transparenz bildet der Digitale Zwilling eine objektive Bewertungsgrundlage für Zusammenhänge, die zuvor nur implizit, ungenau oder als Erfahrungswissen in den Köpfen von Menschen vorhanden waren. Er ist Basis für Entscheidungen sowie die Optimierung von Systemen und verfolgt das Ziel einer präzisen Prognose in die Zukunft, um Prozesse besser vorhersagen oder Ressourcen planen zu können. In den Lebenszyklen von Objekten oder Produkten ist er das zentrale Element, welches die Belastungen und Veränderungen über jeden Zyklusabschnitt dokumentiert, bilanziert und damit optimierte Produkte ermöglicht. Ein optimiertes Produkt ist dabei nachhaltiger und gleichzeitig performanter: Es zeichnet sich durch geringsten Ressourceneinsatz und die höchstmögliche Funktionalität im Betrieb aus. Vereinfacht gesprochen strebt es über seinen gesamten Lebenszyklus einen Zustand geringster Verschwendung an und maximiert die Wertschöpfung. Um aber bei der Herstellung und beim Betrieb „Verschwendung“ bspw. in Form von Sicherheitsreserven einsparen zu können, ist eine genaue Information über auftretende Beanspruchungszustände und die Veränderungen des Objekts als direkte Folge von dessen Herstellung und Einsatz von zentraler Bedeutung. Der Digitale Zwilling soll hier die Ambivalenz zwischen Sicherheit und Performance auflösen, d.h. durch die Quantifizierung von Unsicherheiten Sicherheit schaffen. Nur durch exakte Vorhersagen ist die Einsparung von Reserven ohne einen realen Verlust von Sicherheit möglich. Der vorliegende Artikel soll mit seinen Gedanken, Definitionen und Beispielen einen Beitrag dazu leisten, wie mit Hilfe des Digitalen Zwillings in der Produktionstechnik die Grenzen von Prozessen und Produkten verschoben, optimierte Produkte realisiert, und wie aus Daten reale Werte geschaffen werden können.

2 Das Höhlengleichnis – Über das Erkennen der Wirklichkeit

In Abschnitt 1 wurden die Erwartungen an das Konzept eines Digitalen Zwillings klar formuliert: Er soll als Werkzeug dazu dienen, alle relevanten Informationen eines realen Objektes in einer digitalen Umgebung abzubilden. Damit konserviert er elementare Informationen, ermöglicht die Objektivierung von Erfahrungswissen durch die Schaffung von Transparenz und unterstützt das systematische Lernen aus der Vergangenheit. Wenn es aber um eine Beschreibung der Realität auf Basis erfasster Daten geht, stellt sich eine ganz essentielle Frage: Wieviel „Wirklichkeit“ können wir auf der Grundlage einer limitierten Datenbasis überhaupt erkennen? Und wie sehr benötigen wir ein Idealbild dieser Wirklichkeit als Referenz, mit welcher wir isolierte Datensätze aus Messungen oder Beobachtungen vergleichen können?

Bereits im 5. Jhd. v. Chr. beschäftigte sich Platon mit der Fragestellung nach der Möglichkeit eines Erkennens der Wirklichkeit. Heute gilt er als einer der Urväter der Erkenntnistheorie – einer wesentlichen Grundsatzüberlegung, die bis in die heutige Zeit eine hohe Relevanz in allen Wissenschaften besitzt. Im siebten Buch seines Werkes „Politeia“ lässt er zur Erklärung der „abstrakten Idee des Guten“ in einem Dialog mit Sokrates das sogenannte „Höhlengleichnis“ erzählen:

„In einer Höhle harren Menschen aus, von Geburt an festgekettet und so fixiert, dass sie nichts anderes sehen können, als die gegenüberliegende Felswand. Hinter und über Ihnen, jenseits eines Felsvorsprungs, lodert ein Feuer. Zwischen dem Feuer und den Menschen verläuft eine Mauer. Dahinter laufen Wesen entlang und tragen Gegenstände über ihren Köpfen. Die Menschen erblicken von diesen Gegenständen nur die Schatten, die das Feuer auf die Felswand vor ihnen wirft. Und da sie von Geburt an nichts anderes kennen, denken Sie, dass dieses Schattenspiel die Wirklichkeit ist. Das Echo der Geräusche und Stimmen ordnen sie den Schatten zu und entwickeln aus diesem Spiel eine eigene Welt.

Plötzlich kommt einer der Menschen frei, überwindet die Mauer und nimmt erstmals die Menschen und Wesen wahr und die wirklichen Gegenstände, deren Schatten zuvor sein einziges Weltbild waren. Der Mensch gelangt zum Höhleneingang und an die Erdoberfläche. Nur langsam gewöhnt sich der Gefangene an das grelle Licht und die vielen Eindrücke und vermag Schatten zu erkennen und Spiegelungen in der Wasseroberfläche. Erst als er sich vollständig an die helle Wirklichkeit gewöhnt hat wagt er sich aufzublicken in die Sonne. So läuft er zurück in die Höhle auf den Felsvorsprung an der Mauer um den Zurückgebliebenen davon zu erzählen. Diese aber erkennen nur einen tanzenden Schatten dessen Gerede sie verwirrt.“

In diesem Gleichnis verdeutlicht Plato das Dilemma zwischen dem erkennbaren Teil der Welt und einer objektiven Wirklichkeit, die nur aus einer übergeordneten Position heraus betrachtet werden kann – diese wird durch den entkommenen Gefangenen verbildlicht. In unserer realen Welt, die wir mithilfe der Wissenschaften sowie Modellen zu beschreiben und deuten versuchen, können wir eine solche Position in der Regel nicht erreichen, wie 2000 Jahre nach Plato erst René Descartes und später Emanuel Kant als Antwort auf die Frage „Was kann ich wissen?“ feststellten. Demnach erkennen wir die Dinge nie an sich, sondern nur deren Erscheinung und was sie für uns sind. Unsere subjektiven Erkenntnisse basieren lediglich auf empirischen Beobachtungen von Phänomenen, die wir über Modelle – oftmals vereinfacht – abzubilden versuchen: Etwa die Vorstellung von einer Lichtquelle hinter Gegenständen, die als Folge Schatten auf die Wand der Höhle werfen. Dieses Modell lässt sich wiederum nur anhand von Ausprägungen und Phänomenen empirisch überprüfen, d.h. innerhalb einer endlichen Anzahl von Fallbeispielen deduktiv bestätigen oder falsifizieren.

In der Statistik werden auf diese Weise „Stichproben“ als eine konkrete Teilmenge einer Häufigkeitsverteilung mit theoretischen Kenngrößen eines Modells, wie einem Erwartungswert und einer Standardabweichung, abgeglichen. Jedoch lässt erst die Modellvorstellung einer statistischen Grundgesamtheit zu, dass bereits aus einer vergleichsweise kleinen Datenbasis (Stichprobe) allgemeingültiges Wissen entstehen kann. Man stelle sich vor, in der Höhle gäbe es nun mehrere Lichtquellen und folglich erschienen mehrere, verschiedene Projektionen desselben Objektes auf der Felswand. Damit läge nun eine deutlich umfangreichere empirische Beobachtung (Messung) über das reale Objekt vor. Viele Schatten als zweidimensionale Projektionen eines Objekts würden so in ihrer Gesamtheit mehr Informationen (wenn auch als Schatten reduziert) über die dreidimensionale Gestalt des realen Objektes preisgeben. Mit Blick auf die digitalen „Big-Data“-Ansätze unserer heutigen Welt strapaziert diese Metapher die Überlegung, wo nun die Grenze für den Nutzen weiterer Informationen im Sinne des Erkenntnisgewinns liegt. Und, ob nicht das größere Potenzial zum Erkenntnisgewinn in anderen Quellen zu suchen ist: Dies könnten weitere Daten, etwa Geräusche in der Höhle sein, die mit den Schatten korreliert werden können, aber auch eine verbesserte Modellvorstellung. Zuletzt stellt sich weniger für den Philosophen aber sicher für den Ingenieur die Frage, welcher Nutzen sich durch einen Erkenntnisgewinn an sich ergibt – die aufwendige Annäherung an eine objektive, unerreichbare Wahrheit.

Können diese Gedanken nun in die moderne datengetriebene Welt übertragen werden? Hierzu gibt es zwei grundsätzliche Fragestellungen. Zunächst geht es um die Notwendigkeit eines Digitalen Zwillings neben dem Digitalen Schatten: Ist, und wenn ja in welchem Maße, eine generalistische Beschreibung von Wirkzusammenhängen als Erklärungsmodell erforderlich oder reicht eine rein phänomenologische Beschreibung aus um Werte auf Basis von Daten zu generieren? Weiterhin stellt sich die Frage, wie diese Beschreibungen im jeweiligen Fall erreicht werden: Über realitätsnähere Modellvorstellungen oder eine größere Anzahl empirischer Quellen? Eine New Yorker Zeitung titelte zu diesem Dilemma vor einigen Jahren: „Die Suche nach dem Wissen startete mit großen Theorien, jetzt beginnt sie mit gewaltigen Datenmengen – Willkommen im Peta-Byte-Zeitalter.“ [1] und stellte damit die provokante Frage, ob dies das Ende der Wissenschaften im klassischen Sinne sei. Auch hierin verbirgt sich die Überlegung, ob der Bedarf an einem abstrakten Modell von der Wirklichkeit nicht überholt ist, sobald nur genügend Daten vorliegen, aus welchen ein Abbild der Wirklichkeit korreliert werden kann – ohne „schöne“ Theorien, ohne idealistische Annahmen und Vereinfachungen. Gibt es also diesen Wendepunkt, an welchem die rein über Daten gewonnene Informationslage das idealisierte Modell übertrifft und es damit obsolet macht? Oder birgt eine korrelative Beschreibung ohne die Kenntnis der Wirkzusammenhänge die Gefahr, dass der Homo Sapiens (lat.: „verstehender Mensch“) seine ureigene Stärke aufgibt, die ihn durch die Jahrtausende bis in die heutige Zeit gebracht hat?

Ohne diese Fragen abschließend beantworten zu können, sollen die folgenden Abschnitte den Anstoß für einen eigenen Erkenntnisgewinn des Lesers am Beispiel des Digitalen Schattens und Zwillings in der Produktionstechnik liefern. Zunächst erfolgt eine umfassende Definition der Konzepte. Schließlich zeigen Beispiele auf, in welchem Umfang und Verhältnis derzeit datengetriebene sowie wissensbasierte Ansätze zur Beschreibung der Assets in der Produktionswelt genutzt werden können, welcher Mehrwert sich durch Daten ergibt und wie sich diese datenbasierten Ansätze künftig weiterentwickeln lassen.

3 Der Digitale Schatten und Zwilling in der Produktionstechnik

Insbesondere in sehr technologischen Bereichen wie etwa der Fertigungstechnik mangelt es derzeit noch an einem umfassenden Verständnis für die Begriffe „Digitaler Zwilling“ (DZ) und „Digitaler Schatten“ (DS). Das fehlende Verständnis führt unter anderem dazu, dass die Umsetzung und Anwendung des Konzepts trotz aller in Aussicht stehender Potentiale noch stark eingeschränkt wird. Der folgende Abschnitt widmet sich daher dem aktuellen Stand der Erkenntnisse zu den Begriffen und deren Verwendung und erarbeitet auf dieser Basis einen generischen Vorschlag für eine Definition des Digitalen Schattens und des Digitalen Zwillings in der Fertigungstechnik.

3.1 Stand der Technik und Definitionen aus der Literatur

Das Konzept des Digitalen Zwillings (DZ) sowie eine der frühesten Definitionen wurde von der University of Michigan bereits 2002 als sogenanntes "Mirrored Spaces Model" vorgeschlagen und bezeichnete ein elementares Werkzeug im Product-Lifecycle-Management. Neben dem realen physischen System wurde hier ein virtuelles System eingeführt, welches alle Informationen über seine physische Spiegelung oder seinen Zwilling enthält [2].

Später griff die NASA diese konzeptionelle Grundlage in ihren Technologie-Roadmaps für Flug- und Raumfahrzeuge auf. Dort wird der DZ als eine Kombination von multiphysikalischen Modellen gesehen, die über Sensordaten mit dem realen individuellen physikalischen Objekt verbunden sind – von deren Herstellung über die Einsatzphase bis hin zu ihrer Wartung [3]. Somit ist der DZ weit mehr als nur ein reiner Datensatz, der mit einem Objekt verbunden ist; vielmehr kann er als virtuelle Repräsentation eines physischen Objekts gesehen werden. Darüber hinaus sollte er im Idealfall alle relevanten Phasen des Lebenszyklus eines Objekts abdecken, von der Planung und Konstruktion über die Produktion, den Betrieb, etwaige Reparaturzyklen und schließlich das Recycling [4]. Aus dieser Perspektive heraus umfasst der DZ Modelle, die einen zeitvariablen Datensatz auf die physische Ebene heben, um eine aktuelle Darstellung eines realen Assets im virtuellen Raum zu ermöglichen.

Erste Definitionen im Umfeld der Fertigungstechnik betrachteten den DZ als das virtuelle Gegenstück zu den Produktionsressourcen und damit nicht nur zum Produkt selbst. Diese Betrachtung löste eine Debatte über die Rolle des DZ in einer angestrebten Industrie 4.0-Umgebung aus [5], [6]: Einige Autoren sehen ihn im Lebenszyklus des Produktionssystems [7] oder des Produkts [8]. Andere wiederum lösen sich vollständig von einer Unterscheidung zwischen Produkt und Produktionssystem und wollen den technischen System-Lebenszyklus als Schwerpunkt betrachten: Das System wird hier sowohl als ein Produkt verstanden (etwa während der Designphase) als auch als ein Bestandteil des Produktionssystems (etwa während des Betriebs) [4], [9]-[10].

Die Internationale Akademie für Produktionstechnik CIRP sieht den DZ als virtuelles Abbild eines realen Geräts, Objekts, einer Maschine, einer Dienstleistung oder eines immateriellen Prozesses, das seine Eigenschaften und sein Verhalten mit Hilfe von Modellen, Daten und Informationen innerhalb seines Lebenszyklus beschreibt [11].

Eine der zentralen Fragestellungen in Bezug auf den DZ beschäftigt sich damit, welche physikalischen Eigenschaften des realen Objekts in seinem virtuellen Pendant zu berücksichtigen sind. Einige Autoren sehen den DZ als diejenige Menge von Informationen an, die ein potentielles oder tatsächliches physikalisches Produkt in ihrer Vollständigkeit beschreibt – von der atomaren Mikro-Ebene bis zur geometrischen Makro-Ebene [10]. Demgegenüber steht die Frage danach, welche Gesamtheit an

Informationen überhaupt eine Relevanz bezüglich einer Life-Cycle-Betrachtung aufweist, um nicht den DZ als "Datenmonster" [4] verstanden zu wissen.

In der Diskussion um die Umsetzung einer vernetzten adaptiven Produktion im Kontext der Industrie 4.0 sowie des Internet der Dinge (IoT) von Produktionssystemen ist neben dem Konzept des Digitalen Zwillings der Digitale Schatten (DS) ein häufig verwendeter Begriff. Nach Kritzinger et. al. ist der DS ein Modell, welches durch einen einseitigen Datenfluss mit dem Zustand eines existierenden physischen Objekts gespeist wird. Dies bedeutet, dass eine Zustandsänderung des physischen Objekts zu einer Änderung des digitalen Objekts führt, jedoch nicht umgekehrt. Im Gegensatz dazu werden bei einem DZ die Datenflüsse zwischen dem physischen und dem digitalen Objekt in beide Richtungen vollständig integriert [12].

Eine weitere Definition des DS in Bezug auf die Produktionstechnik wurde von der Deutschen Gesellschaft für Produktionstechnik (WGP) eingeführt [13]: Hier wird der DS als ein hinreichend genaues Abbild der Prozesse in der Produktion, der Entwicklung und angrenzender Bereiche gesehen, um eine echtzeitfähige Auswertungsbasis aller relevanten Daten zu schaffen. Der DS überträgt zunächst den realen Produktionsprozess in die virtuelle Welt. Basierend auf einem Prozessmodell und einer Simulation kann der DZ dann ein möglichst vollständiges Abbild der Realität liefern. Diese Definition greift auch die Relevanz des erforderlichen Datensatzes im Kontext des Zwecks auf. Die Definition der WGP ermöglicht ferner die Darstellung des Produktionsprozesses im virtuellen Raum, obwohl ein Prozess kein physisches Objekt als solches darstellt.

Dieser kurze Überblick über den Stand der Forschung für das Konzept des DZ und DS zeigt die Dichotomie und einen deutlichen Mangel an einem umfassenden Verständnis der relevanten Begriffe, insbesondere innerhalb der Anwendung auf dem Gebiet der Fertigungstechnik [14]. Ein gemeinsames, transparentes Verständnis des Konzepts und seiner Anforderungen steht jedoch der flächendeckenden Umsetzung und Anwendung dieser leistungsfähigen Werkzeuge im Wege. In diesem Sinne versucht die folgende Definition die Begriffe „Digitaler Zwilling“ und „Digitaler Schatten“ für den Bereich der Fertigungstechnik zu klären und zeigt weiter deren konkrete Anwendung anhand unterschiedlicher Beispiele auf.

3.2 Definition Digitaler Schatten und Zwilling für die Fertigungstechnik

Im folgenden Kapitel sollen die Konzepte des Digitalen Schattens (DS) und des Digitalen Zwillings (DZ) sowie ihre Wechselbeziehung im Kontext von Produktionssystemen und -prozessen kritisch reflektiert werden, um ein allgemeines Verständnis und damit eine Basis für deren Anwendung zu schaffen. Hierzu werden die folgenden Fragen beantwortet:

- Wie sollen die Begriffe Digitaler Zwilling und Schatten verstanden werden und wie genau sind diese zu unterscheiden?
- Für welche Bereiche der Fertigung gilt das Konzept des Digitalen Zwillings und Schattens?
- Was ist die Rolle des Fertigungsprozesses und welchen Beitrag leisten der Digitale Zwilling und Schatten im Rahmen einer Prozesskettenbetrachtung?
- Welcher Mehrwert entsteht in der Fertigungstechnik durch die Verwendung eines Digitalen Zwillings und Schattens?

Zunächst stellen sich die Fragen nach der Definition sowie der Unterscheidung der beiden Begriffe Digitaler Zwilling und Schatten. Wie in Bild 1 dargestellt, kann der Digitale

geschaffen, wenn der Datensatz der lokalen Aktivkraft über ein geeignetes Modell eine temporäre oder dauerhafte physikalische Eigenschaft des Bauteils oder Werkzeugs beschreibt. Diese könnte für das Werkstück beispielsweise dessen lokale Abdrängung sein, die sich z.B. über ein Durchbiegen als linear-elastische Verformung im Sinne der mechanischen Balkentheorie beschreiben lässt. Entsprechendes gilt analog für das Werkzeug.

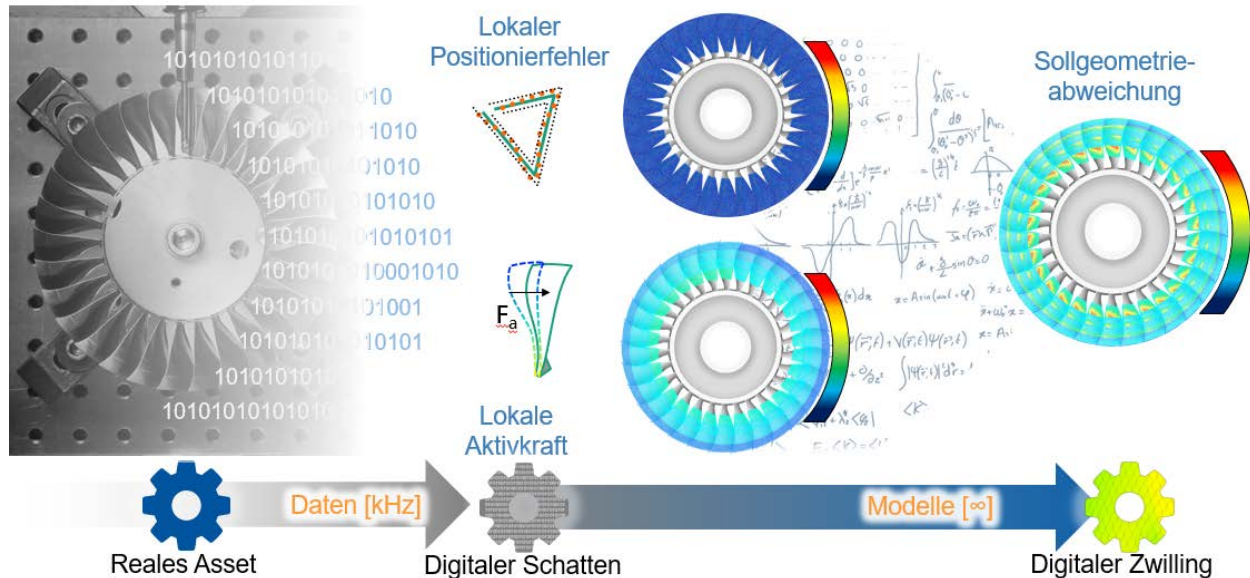


Bild 2: Ableitung des Digitalen Zwillings über den digitalen Schatten beim Fräsen eines integralen Verdichterrisors im Turbomaschinenbau.

Alternativ könnte die thermo-mechanische Beanspruchung der Werkstückrandzone und das resultierende Eigenspannungsprofil oder etwaige Gefügeveränderungen als bereits sehr detaillierte Information über den Bauteilzustand mithilfe geeigneter Modelle ausgehend von der lokalen Aktivkraft beschrieben werden. Aus einer reinen Messgröße wird somit über Modellwissen und gestützt durch Daten eine Information über eine physikalische Eigenschaft erzeugt. Erst auf der physikalischen Ebene können Eigenschaften der Objekte miteinander in Beziehung gebracht und deren kausale Wechselwirkungen verstanden werden.

Bei den beschriebenen Modellen kann es sich dabei sowohl

- um statistische oder datengetriebene Modelle handeln, die einen gemessenen Wert allein durch eine mathematische Beschreibung mit einer physikalischen Eigenschaft verbinden,
- oder um ein physikalisches Modell, welches bekannte Ursache-Wirkungs-Beziehungen involviert.

Obwohl mathematische Modelle nicht zwangsläufig auf physikalischen Zusammenhängen basieren, können sie dennoch einem wissenschaftlichen Zweck dienen, indem sie über Korrelationen essentielle Hinweise auf mögliche Kausalitäten geben, die noch nicht als solche identifiziert und beschrieben sind. Andererseits kann der DS zur Beschreibung von statistischen Effekten in der horizontalen Prozesskette dienen und so zur Charakterisierung von Streuungen unterschiedlicher Bauteile innerhalb einer Serie oder auch unterschiedlicher Merkmale eines Bauteils entlang einzelner Prozessschritte auf dem Weg zum fertigen Produkt verwendet werden. Während also der

DS die Grundlage für die statistische Analyse bildet und keine Erwartung an den Gewinn von wissenschaftlichen Erkenntnissen hat, besitzt der DZ unbedingt diesen Anspruch auf ein Verständnis von Wirkungsmechanismen (Kausalität) und deren Beschreibung in Form von Modellen.

Entsprechend der direkten Abhängigkeit des DS von Daten ist sein zeitliches und örtliches Auflösungsvermögen, mit welchem die einzelnen Zustände wiedergegeben werden können, an die Abtastrate des Datenstroms sowie die physikalischen Möglichkeiten der Datenquelle gebunden. Die zeitliche und örtliche Auflösung kann auf der Basis von Modellen im DZ beliebig erhöht werden, vgl. Bild 2, unten.

3.3 Objekte und Systemgrenzen für den Digitalen Schatten und Zwilling

Ein wesentliches Kernattribut des Konzepts „Digitaler Schatten und Zwilling“ ist sicherlich die Möglichkeit einer zeitlich referenzierten Darstellung von physikalischen Zuständen realer Objekte in einer virtuellen Umgebung über den Lebenszyklus eines Objektes oder Assets. Der DS und der DZ beziehen sich also auf Objekte in der realen Welt, welche beschreibbare und üblicherweise auch veränderliche Eigenschaften entlang ihres Lebenszyklus haben. Ganz praktisch könnte dies aus der Sicht des Herstellers im Kontext der Produktionstechnik z.B. das zu fertigende Werkstück, ein Schneidwerkzeug oder die Werkzeugmaschine sein. Der genaue Betrachtungsrahmen definiert dabei die Stellen, an denen eine Abgrenzung unterschiedlicher Objekte in einem System erfolgen muss.

Für eine eher globale Betrachtung mag es daher ausreichen, ein gesamtes Produktionssystem, eine Maschinenhalle oder Produktionslinie zu betrachten. Speziell für die Fertigungstechnik ist aber eine deutlich feinere Granularität auf der Ebene Bauteil, Werkzeug und Maschine essentiell, vgl. Bild 3. In diesem Beispiel müsste aus Sicht des Bauteils eine Abgrenzung zwischen Maschine und Werkzeug nicht notwendigerweise erfolgen und das Fräswerkzeug könnte ebenso als Teil der Maschine definiert werden. Aus der Sicht eines Fertigungsingenieurs ist jedoch eine getrennte Betrachtung sinnvoll, da das Werkzeug im Vergleich zur Maschine einer deutlich höheren Verschleißrate unterliegt und somit der Einfluss auf das Bauteil über den Produktionszyklus eines einzigen Bauteils nicht vernachlässigbar ist.

Die Wahl der Systemgrenzen hängt daher sehr stark davon ab, in welcher Weise und mit welcher zeitlichen und örtlichen Auflösung ein Lebenszyklus oder -zyklusabschnitt erfasst und betrachtet werden soll. Diese Problematik ist eng mit der Frage nach der Relevanz von Information und dem Wert von Daten verknüpft, der im weiteren Verlauf dieses Beitrags noch detaillierter diskutiert wird (vgl. Abschnitt 3.4).

Ein DS oder DZ lässt sich also für alle realen Objekte oder Systeme ableiten, welche prozessbedingte Zustandsänderungen erfahren. Der Fertigungsprozess selbst hat jedoch keinen Lebenszyklus und kann nicht als Objekt betrachtet werden. Folglich ist eine Beschreibung von Prozessen mit Hilfe eines DS oder DZ nicht möglich. Prozesse müssen vielmehr als die Übertragungsfunktion verstanden werden, welche eine Zustandsänderung interagierender Objekte herbeiführt, d.h. es existiert sehr wohl ein Prozessmodell, welches die Beziehung zwischen den DS und DZ in ihren unterschiedlichen Zuständen herstellt.

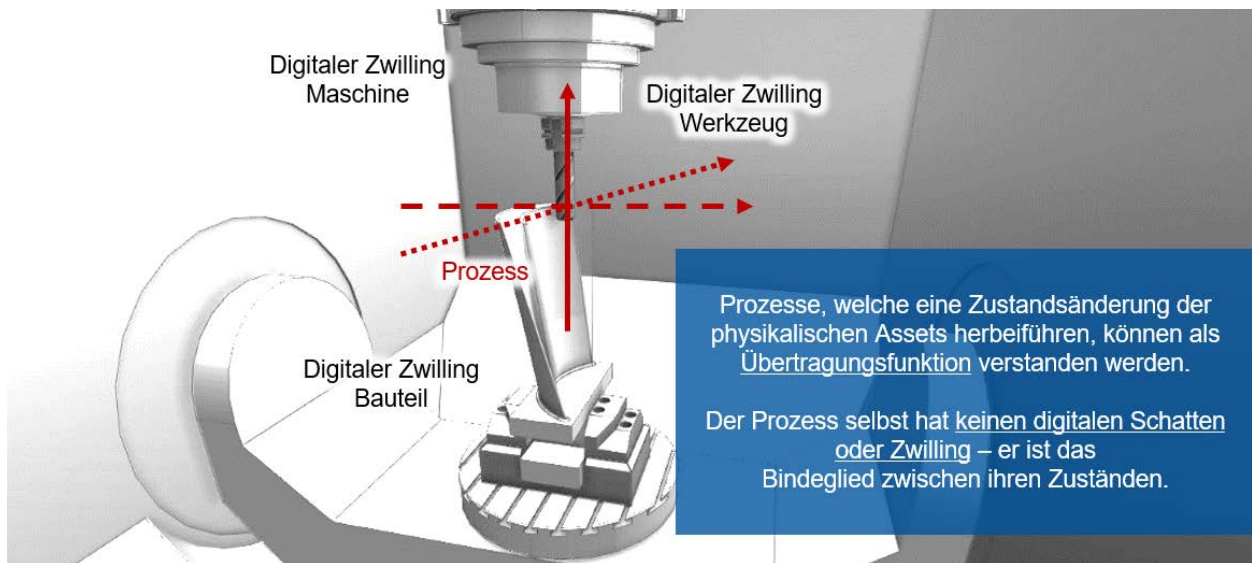


Bild 3: Unterschiedliche Objekte eines Fertigungsprozesses und deren Interaktion in Form des Fertigungsprozesses.

Im Falle des beispielhaft eingeführten Fräsprozesses umfasst diese Interaktion das Werkzeug, die Werkzeugmaschine und das Bauteil. In diesem Zusammenhang definiert die Granularität des Prozessmodells die zeitliche und örtliche Auflösung der Zustandsänderung der beteiligten DS und DZ. Während eines Fertigungsprozesses durchläuft ein Bauteil etwa differentielle Zustandsänderungen, die schließlich in einen vereinfacht gesagt statischen Zustand nach Prozessende resultieren. Eine der wesentlichsten Zustandsänderungen ist im Falle des Fräsprozesses die geometrische Veränderung des Werkstücks vom Rohteil bis hin zu einer definierten Sollgeometrie durch die kontinuierliche Spanabnahme als primäre Intention des Fertigungsprozesses selbst. Daneben ergeben sich aber auch sekundäre Zustandsänderungen der Bauteilrandzone infolge der thermo-mechanischen Beanspruchungen etwa in Form von Gefügeveränderungen oder eingebrachten Eigenspannungen. Auch können inhärente Eigenspannungen im Bauteil durch die Materialabnahme frei werden, die ihren Ursprung in einem vorgelagerten Fertigungsschritt z.B. dem Gießen, Schmieden oder einer Wärmebehandlung der Halbzeuge haben. Eine umfangreiche Kenntnis des bauteilindividuellen Eigenspannungsprofils in Form eines virtuellen Abbildes wäre an dieser Stelle von zentraler Bedeutung für die weitere Prozessgestaltung und verdeutlichen den Wert eines DS und DZ für die Fertigungstechnik. Neben dem Bauteil unterliegt aber auch das Fräswerkzeug einer mitunter sehr kurzfristigen Zustandsänderung in Form von fortschreitendem Verschleiß. Dieser führt zu einer veränderten Werkzeuggeometrie und zu erhöhten Zerspankraftkomponenten, die beide sowohl direkt als auch indirekt z.B. über eine verstärkte Werkzeugabdrängung den Prozess im Hinblick auf die erreichbare Bearbeitungsgenauigkeit beeinflussen.

Hier wird deutlich, in welcher komplexen Art und Weise die Interaktion der unterschiedlichen Objekte Werkzeug und Bauteil stattfinden und wie hoch der Bedarf an virtuellen Abbildern zur Beherrschung der Stabilität von Fertigungsprozessen ist. Idealerweise können hier der DS und der DZ bereits bei Losgröße 1 einen Beitrag leisten, die Ziele einer stabilen, ökonomischen und ökologischen Herstellung möglichst optimal miteinander zu vereinen.

Im Gegensatz zum Idealbild, dass alle erfassbaren Daten im DS zeitlich referenziert abgelegt und dass über Modelle im DZ alle physikalischen Eigenschaften des Objekts abgebildet werden können, besteht in der Realität oft die Frage nach der

Wirtschaftlichkeit der Datenhaltung sowie der Relevanz der repräsentierten Objekteigenschaften: Folglich müssen die Daten, die den zugehörigen DS bilden, durch objektspezifische Anforderungen festgelegt werden und der DZ diejenigen Eigenschaften repräsentieren, die im Sinne der weiteren Nutzung von Interesse sind. Struktur und Auflösung der zeitlichen Zustände im DZ sind also anwendungsorientiert zu betrachten und müssen nicht allgemein gültig sein. Die Relevanz einer Eigenschaft kann nur aus ingenieur- und naturwissenschaftlicher Sicht bewertet werden.

3.4 Unsicherheit und Relevanz von Daten und Information

Das Attribut alle realen Objekteigenschaften möglichst gut in einer virtuellen Umgebung widerzuspiegeln impliziert bereits, dass der DZ eine einzige Wahrheitsquelle beinhalten sollte: Es gibt demnach nur einen und keinen zweiten DZ eines realen Objekts, der alle für seine Zwecke relevanten Eigenschaften entlang des Lebenszyklus eines spezifischen Objekts enthält und kombiniert, vgl. Bild 4. Nur die Integration von physikalischen Eigenschaften in einer einzigen Domäne ermöglicht die Betrachtung ihrer gegenseitigen Wechselwirkungen.

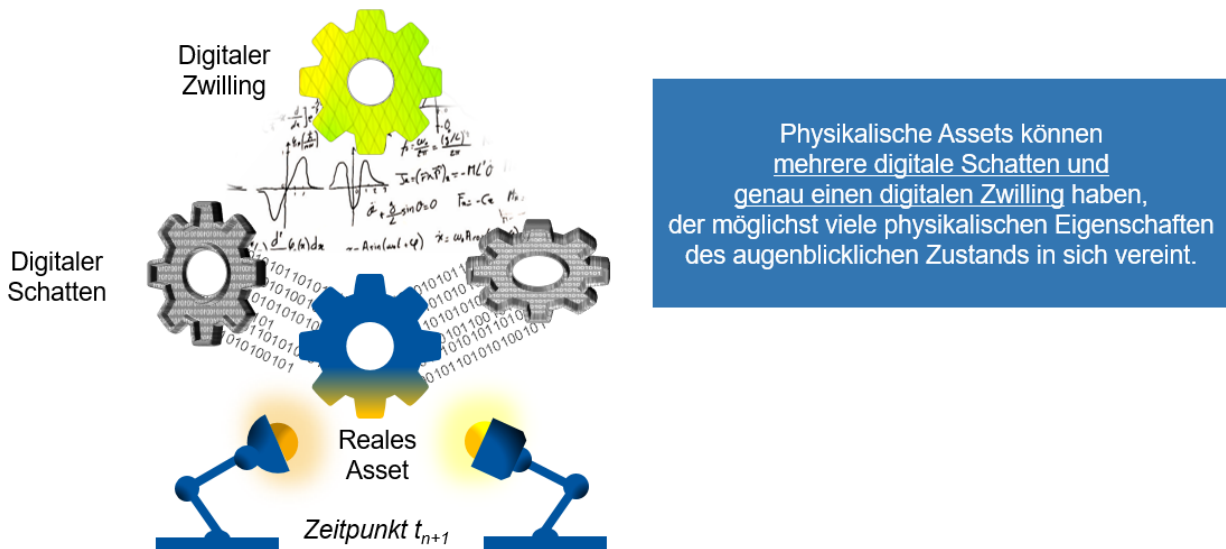


Bild 4: Der individuelle digitale Zwilling beschreibt den Zustand eines eindeutigen physischen Objekts und kann durch Digitale Schatten unterschiedlicher Quellen gestützt werden.

Anders verhält sich dies bei den DS, welche verschiedenen Datenquellen entspringen können. Wie bereits in Abschnitt 3.2 angeführt geht es beim DS zunächst um eine reine Allokation von Daten sowie dem zugehörigen Metadatenstamm zu einem Objekt. Diese Zuordnung lässt eine Signifikanz in der Korrelation oder gar Kausalität in der Beziehung zwischen unterschiedlichen Ausprägungen noch völlig offen. Die einzelnen DS können weiter unterschiedliche, aber auch redundante Informationen über reale Objekteigenschaften enthalten, die entweder zu einer verbesserten Informationslage insgesamt oder einer höheren Konfidenz einer speziellen Information im DZ führen.

Die Frage nach der Unsicherheit oder Unschärfe von Daten und Informationen ist eine eigene Dimension des DS und DZ und daher getrennt von der Information an sich zu behandeln. Auf dem Weg vom DS zum DZ werden aus Daten mit Hilfe von Modellen sukzessive höherwertige Informationen erzeugt, die eine Aussage über die Objekteigenschaften eines Assets enthalten. Dabei können mit aufwändigen Modellen, die eine Vielzahl an Parametern und Annahmen beinhalten, oftmals Eigenschaften oder

Zustände präzisiert werden, die einer direkten Messung am realen Objekt nicht ohne weiteres zugänglich wären. Trotz des hochwertigen Informationsgehalts ist die Frage nach der Validität der auf diese Weise generierten Aussagen immer noch ungeklärt. Diese kann nur durch eine durchgängige Quantifizierung aller Unsicherheiten erfolgen, vgl. Bild 5.

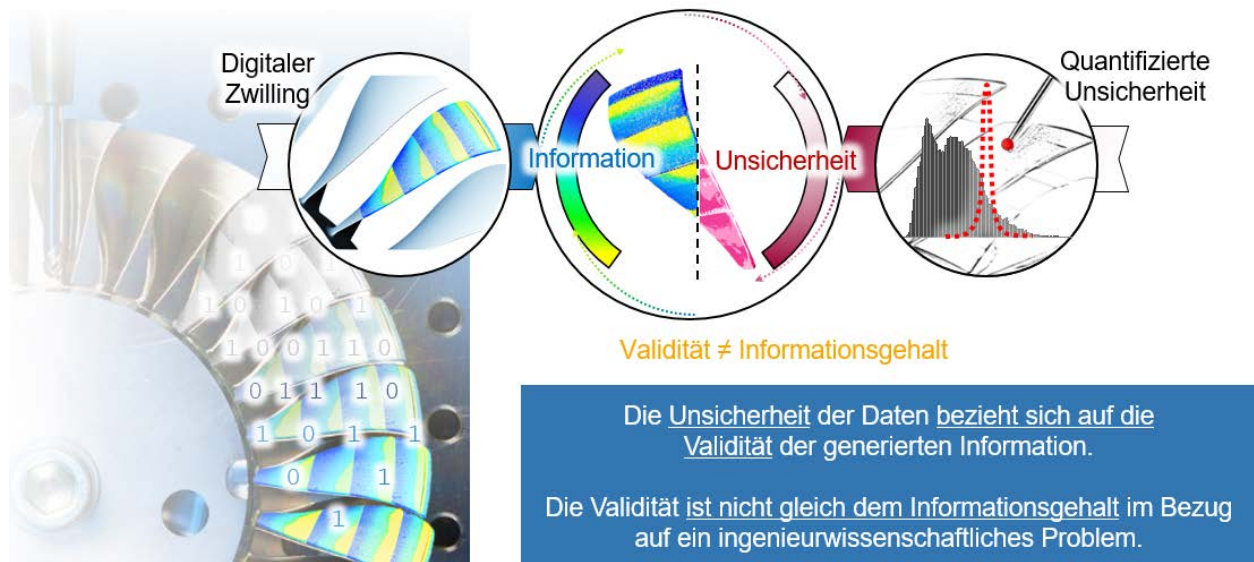


Bild 5: Neben der Relevanz der Information im Digitalen Zwilling ist die Quantifizierung von deren Unsicherheit für den weiteren Nutzen gleichermaßen von Bedeutung.

Bei der Unsicherheitsquantifizierung müssen dabei alle in Bezug auf die Aussage stehenden Teilunsicherheiten berücksichtigt werden. Dies sind

- die Unsicherheiten bei der Datenerfassung, bspw. wie valide sind die einzelnen DS der unterschiedlichen Quellen ähnlich der Bewertung der Unsicherheit bei einer Messung (analog zur Prüfmittelfähigkeit in Qualitätssicherungsprozessen),
- die Unsicherheiten in den Modellen, die zur „Veredelung“ der Daten im DS verwendet werden, bspw. wie valide ist die Gültigkeit des Modells im relevanten Bereich (etwa wie genau kann ein analytisches Modell die reale Physik wiedergeben oder wie ist die statistische Basis bei Verwendung eines datengetriebenen Modells zu bewerten),
- und zuletzt die Unsicherheiten der Modelle, welche zur Prognose von Eigenschaften verwendet werden, bspw. bei Modellen, die zur Prädiktion von Objekteigenschaften, Zuständen und Erwartungswerten oder bei der probabilistischen Berechnung von Lebensdauerprognosen eines Bauteils eingesetzt werden.

Nachdem die Daten, Modelle, der resultierende Informationsgehalt sowie die Validität oder – reziprok – die Unsicherheit der Information diskutiert wurde, stellt sich abschließend die Frage nach ihrer Relevanz. Bereits in Abschnitt 3.1 wurde Boschert [4] angeführt, der den Digitalen Zwilling nicht als „Datenmonster“ verstanden wissen wollte, welches alle möglichen Informationen zu einem Objekt verbindet. Statt einer Vollständigkeit, sollte der DZ jede Information vor dem Hintergrund ihres Nutzens für das System betrachten und bewerten.

Die Relevanz der im DS oder DZ abgebildeten Zustände und Informationen sollten sich daher stark nach den Anforderungen an das betrachtete Objekt richten. Die Relevanz der Information unterliegt damit ihrer Bewertung vor dem Hintergrund eines „Lastenhefts“, d.h. der Gesamtheit der Anforderungen, die an das Objekt gestellt werden. In einem ingenieurwissenschaftlichen Sinne können dies etwa Grenzwerte oder Toleranzen sein, die eine Aussage darüber ermöglichen, inwieweit ein Produkt von seinem Nominal oder Idealzustand abweichen darf, sodass es immer noch ein Mindestmaß im Sinne seiner Spezifikation erfüllt.

Eine essentielle Eigenschaft des DS oder DZ ist hier, dass mit Hilfe einer digitalen Infrastruktur eine handhabbare Betrachtung eines Sets von individuellen Eigenschaften eines Assets möglich ist und diese nicht in Form von statistischen Häufigkeitsverteilungen über eine Serie mehrerer Produkte angenommen werden muss. Es kann daher das „Individuum“ aus der Masse herausgelöst und im Weiteren als solches betrachtet werden. Dies gibt den „scharfen“ Blick auf die Performance von speziellen Eigenschaften im Verlauf von Prozessen frei, die andernfalls nur „verschwommen“ über Grundgesamtheiten und Stichproben möglich wäre.

3.5 Wissens- und datengetriebene Ansätze zur Modellbildung

Nachdem in Abschnitt 3.4 die Frage nach der Relevanz von Informationen und deren Unsicherheit diskutiert wurde, soll im Folgenden auf die unterschiedlichen Arten der Modellbildung eingegangen werden. Wie beschrieben, sind Modelle essentielle Bausteine des DZ, die auf Grundlage einer Datenbasis zusätzliche Informationen generieren können, die nicht selbst Bestandteil der Datenbasis sind. So können durch Modelle Inter- oder Extrapolationen erfolgen, d.h. solche Daten generiert werden, die in der Realität nicht erfasst wurden oder nicht zugänglich sind, da sie etwa nicht direkt gemessen werden können oder in der Zukunft liegen. Hier wird bereits deutlich, in welchem Maße die Struktur und Güte des Modells mit dem generierten Informationsgehalt oder der Aussage über das System zusammenhängen und welche Bedeutung damit der Modellbildung zukommt.

Die Unterscheidung von Modellierungsansätzen kann dabei auf unterschiedliche Weise erfolgen: Grundlegend ist dabei zunächst die Einteilung in zwei Kategorien, bei welchen Modellverhalten entweder bekannt oder nicht bekannt sind. Nach systemtheoretischen Gesichtspunkten können hier sogenannte White-Box- oder Black-Box-Modelle unterschieden werden. Zusätzlich werden Modelle, die durch die Kombination der beiden Ansätze entstehen, als Grey-Box-Modelle bezeichnet.

- White-Box-Modelle werden als solche verstanden, bei welchen die Kenntnis über ihr Verhalten, Struktur und Funktionsweise grundsätzlich vorliegt, da die mathematischen Zusammenhänge und deren Verhalten zwischen den Ein- und Ausgangsgrößen bekannt und greifbar sind. Oft werden Modelle mit bekannten physikalischen Wirkzusammenhängen und analytischer Struktur, also in Form einer mathematischen Funktion, als Beispiele für diese Kategorie angeführt.
- Bei Black-Box-Modellen hingegen wird keine Kenntnis über die inneren Zusammenhänge und ein Verständnis deren Verhaltens vorausgesetzt, d.h. das Modellverhalten kann nur mittelbar über die Beziehung zwischen den Ein- und Ausgangsgrößen betrachtet werden. Die Reaktion zwischen diesen kann wiederum mit einer mathematischen Beschreibung etwa einer Systemübertragungsfunktion erfolgen und wäre nach diesem Schritt bekannt. Bei komplexen Systemen, in welchen der Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgangsgröße einer Veränderung unterliegt, muss die Übertragungsfunktion

jedoch ständig neu ermittelt werden, da die Wechselwirkung zwischen den Systemparametern und der Änderung des Systemverhaltens nicht offen liegt. Vereinfacht gesprochen liegt keine Transparenz über kausale Zusammenhänge vor.

- Grey-Box-Modelle sind eine Mischform der beiden oberen Kategorien, welche sowohl Teile mit bekannter als auch nicht bekanntem Modellverhalten enthalten können.

Eine klare Abgrenzung der unterschiedlichen Kategorien gestaltet sich jedoch schwierig und wird in unterschiedlichen Literaturquellen teilweise anders definiert [15], [16], [17]. Grundsätzlich wird die Kategorie der Black-Box-Modelle häufig im Zusammenhang mit den Methoden des maschinellen Lernens (ML) genutzt, da hier – z.B. bei Verwendung von Künstlichen Neuronalen Netzen (KNN) – zwar Struktur und Funktionsweise des Modells, nicht jedoch zu jedem Zeitpunkt das Verhalten bekannt sind. Vor allem aber die Begriffe „Verhalten“, „Struktur“ und „Funktionsweise“ werden in den dokumentierten Beispielen nicht immer gleich verwendet und verstanden.

Oft wird auch missverständlich angenommen, dass White-Box-Modelle grundsätzlich physikalischer Natur sein müssen und keinen datengetriebenen Ursprung haben können. White-Box-Ansätze können kausale Zusammenhänge analytisch abbilden, können aber auch auf empirisch ermittelten Daten basieren. Die klassischen Modelle in der Physik enthalten vielfach Annahmen oder Vereinfachungen der Realität. In diesem Fall sichert die kausale Struktur zwar das grundlegende Modellverhalten zwischen den Ein- und Ausgangsgrößen, die getroffenen Vereinfachungen grenzen aber möglicherweise den Gültigkeitsbereich ein. Hier können empirisch ermittelte Daten gezielt eingesetzt werden, um Annahmen zu spezifizieren und so den Gültigkeitsbereich des Modells mit vergleichsweise einfachen Mitteln deutlich zu erhöhen.

Als Beispiel sei hier das in der zerspanenden Fertigungstechnik oft verwendete Schnittkraftmodell nach Kienzle angeführt [18]. In diesem Modell wird die Schnittkraft in Abhängigkeit von der Schneidenbreite b , der Spannungsdicke h , sowie einem empirisch ermittelten spezifischen Schnittkraftkoeffizienten $k_{c1.1}$ und Exponenten m_c beschrieben, vgl. Gleichung 1.

Schneidenbreite und Spannungsdicke sind geometrische Größen, die vom eingesetzten Werkzeug sowie von kinematischen Einstellgrößen abhängen und können daher auf einfache Weise ermittelt werden. Der Koeffizienten $k_{c1.1}$ sowie der Exponent m_c hingegen müssen aus Versuchsdaten ermittelt werden und beschreiben auf eine implizite Art und Weise alle diejenigen Parameter, die neben den geometrischen Größen einen Einfluss auf die Schnittkraft besitzen. Der Exponent m_c korrigiert dabei den Umstand, dass der Anteil der benötigten Trennarbeit im Verhältnis zur Umformarbeit bei größer werdenden Spannungsdicken günstiger ausfällt.

$$F_c = k_{c1.1}bh^{1-m_c}$$

Gleichung 1

Der spezifische Schnittkraftkoeffizient wird oftmals fälschlicherweise als „Werkstoffparameter“ bezeichnet, denn neben den Materialeigenschaften wie etwa der Festigkeit, Temperaturbeständigkeit etc. beinhaltet er weiter die Charakteristik des Werkzeugs, Schneidstoffs, Verschleißzustands sowie auch die des interagierenden Systems „Schneidwerkzeug im Materialeingriff“, etwa den tribologischen Bedingungen etc. Hier wird deutlich, dass der Aufwand für die korrekte physikalische Beschreibung

aller Wirkzusammenhänge sowie die Ermittlung der realen Modellparameter in keinem Verhältnis zum Versuch stehen.

Die Werte für $k_{c1.1}$ und m_c werden mittels Regression empirisch bestimmt und besitzen i.d.R. eine Gültigkeit im Bereich einer Größenordnung. In diesem Fall liegt ein White-Box-Ansatz vor, in welchem die Beziehung zwischen Ein- und Ausgangsgrößen bekannt und analytisch beschrieben ist, auch wenn die zugrundeliegenden physikalischen Beziehungen nur in begrenztem Umfang genutzt und maßgebliche Zusammenhänge datengetrieben ermittelt wurden. Zur Bestimmung der Modellunsicherheit kann hier weiter eine statistische Beschreibung der Datenbasis, aus welcher die Parameter errechnet wurden, einbezogen werden – im einfachsten Fall einer Normalverteilung über den Erwartungswert μ und die Standardabweichung σ .

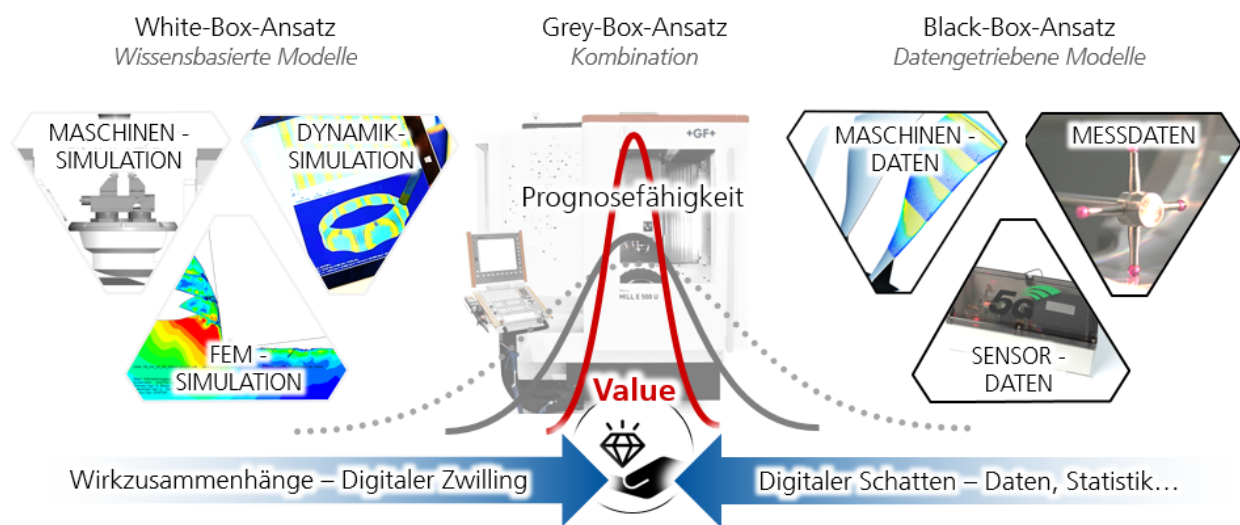


Bild 6: Die Prognosefähigkeit und damit der Wert der Daten steigt, je mehr Wissen in die Modelle integriert werden kann; Grey-Box-Ansätze kombinieren physikalisches Wissen mit neuen Zusammenhängen aus datengetriebenen Modellen.

Wie in Bild 6 dargestellt ist es gerade im ingenieurwissenschaftlichen Bereich von großer Bedeutung das verfügbare Wissen über die bekannten physikalischen Zusammenhänge eines Systems zu nutzen, gleichzeitig aber aus den erfassten Daten neues Wissen zu erzeugen.

Im Beispiel des Schnittkraftmodells nach Kienzle könnte dies etwa eine Datenbasis mit Werten für $k_{c1.1}$ und m_c sein, welche sich über weite Bereiche unterschiedlicher Werkstoffe, Schnittbedingungen etc. erstreckt. Auf diese Weise würde ein zusätzlicher Mehrwert entstehen, da die Defizite in der physikalischen Beschreibung und damit Allgemeingültigkeit im Modellverhalten empirisch kompensiert und statistisch abgesichert werden könnten.

Die Nachvollziehbarkeit des Modellverhaltens bei datengetriebenen Ansätzen ist laut vieler Experten ein ganz wesentliches Ziel und Grundvoraussetzung für die Akzeptanz des Modells für den Einsatz in kritischen Bereichen [19]. Einige Quellen unterscheiden bei der Nachvollziehbarkeit weiter zwischen Erklärbarkeit und Transparenz. Bei technischen Systemen sind hier als wichtigste Kriterien sicherlich die zugrundeliegenden Wirkmechanismen (Kausalität) sowie die statistische Signifikanz (Korrelation) zu nennen. Wie am Beispiel des Schnittkraftmodells aufgezeigt wurde, spielt Letztere eine

wesentliche Rolle, wenn eine vollständige physikalische Beschreibung nur mit Annahmen und Vereinfachungen möglich ist.

Vor allem bei der modellhaften Beschreibung komplexer Systeme, in welche viele unterschiedliche Teilmodelle integriert sind, ist die Bewertung der Unsicherheit von zentraler Bedeutung. Nur so kann die Verlässlichkeit der generierten Aussage und damit der Nutzen, der durch den Einsatz des Modells entsteht, überhaupt beurteilt werden.

4 Praxisbeispiele – Der Digitale Zwilling im Fertigungsprozess

Nachdem in Abschnitt 3 auf die Begriffe Digitaler Schatten und Digitaler Zwilling sowie die wissens- und datengetriebenen Ansätze zur Modellbildung eingegangen wurde, findet in Abschnitt 4 eine Vertiefung anhand konkreter Beispiele statt. Hierzu wird zunächst auf die Betrachtung von Produktlebenszyklen am Beispiel des Schneidwerkzeugs eingegangen. Weiterhin werden das Konzept und die Erstellung eines Digitalen Schattens und Zwillings beispielhaft vorgestellt und gezeigt, wie basierend auf Daten und mit Hilfe von Modellen Bauteileigenschaften wie Geometrie, das prozessbedingte Beanspruchungskollektiv und die Gefügeeigenschaften dargestellt werden können.

4.1 Betrachtung von Produktlebenszyklen am Beispiel des Werkzeugs

Innerhalb der Fertigungskette von Vollhartmetallwerkzeugen verursacht das Werkzeugschleifen bis zu 60 % der Herstellungskosten. Das Werkzeugschleifen dient der Herstellung der Schneidkeil- und Spannutegeometrie am Zerspanwerkzeug und setzt sich aus der Nut-, der Umfangs- und der Stirnschleifbearbeitung des Werkzeugrohlings zusammen. Die Stabilität, das dynamische Verhalten und die Leistungsfähigkeit des Zerspanwerkzeugs in der späteren Nutzungsphase werden maßgeblich durch die Eigenschaften des Randzonengefüges beeinflusst. So sind Mikrorisse und Ausbrüche an der Schneidkante innerhalb der Nutzungsphase oftmals auf thermisch und mechanisch induzierte Eigenspannungen durch die thermo-mechanische Beanspruchung des Hartmetalls bei der schleiftechnischen Bearbeitung zurückzuführen. Wegen der hohen Härte der Wolframkarbide kommen fast ausschließlich Diamantschleifscheiben zum Einsatz, die eine hohe Wärmeleitfähigkeit besitzen und somit die Temperaturen an der Zerspanstelle reduzieren. Neben der Spezifikation des Schleifwerkzeugs, der Kühlstrategie und der Prozessführung ist die thermo-mechanische Beanspruchung des Bauteils vom Verschleißzustand der Schleifscheibentopographie abhängig. Der instationäre Zustand der Schleifscheibentopographie hat aufgrund der veränderten thermo-mechanischen Beanspruchung in der Kontaktzone ein bauteilindividuelles Eigenspannungsprofil in der Werkstückrandzone zur Folge. Hinzu kommt, dass sowohl die pulvermetallurgische Herstellung der Hartmetallrohlinge als auch die Herstellung der Schleifwerkzeuge Schwankungen unterliegen. Dementsprechend sind die Gefügeeigenschaften des Hartmetallrohlings sowie das Verschleißverhalten des Schleifwerkzeugs mit Unsicherheiten behaftet. Durch den Digitalen Zwilling werden die physikalischen Eigenschaften aus den einzelnen Lebenszyklusabschnitten dokumentiert, sodass das Einsatzverhalten der Werkzeuge in der Nutzungsphase bauteilindividuell prognostiziert werden kann (vgl. Bild 7).

Für die Erstellung des Digitalen Zwillings, ist somit die Kenntnis der thermo-mechanischen Beanspruchung in der Kontaktzone in Abhängigkeit vom Schleifscheibenverschleiß erforderlich. Der aktuelle Zustand des Schleifprozesses kann durch die messtechnische Erfassung von Prozesszustandsgrößen überwacht und so ein Digitaler Schatten aufgebaut werden. Hierzu eignet sich im besonderen Maße die Schleifkraft die entweder direkt durch Einsatz von Kraftmesssystemen, wie z. B.

Dehnmessstreifen (DMS) oder piezoelektrische Kraftaufnehmer, oder indirekt über die Leistungsaufnahme und die Regelsignale der Achs- und Spindelantriebe der Schleifmaschine ermittelt werden kann. Aufgrund des variierenden Kraftangriffspunktes zwischen Schleifscheibe und Werkstück beim Werkzeugschleifen sowie der begrenzten Temperatur- und Driftstabilität der Messsysteme sind direkte Kraftmessungen in der industriellen Fertigung nur eingeschränkt möglich. Hinzu kommen die vergleichsweise hohen Kosten für direkte Kraftmesssysteme sowie für die erforderlichen Komponenten der Messkette, wie z. B. Ladungsverstärker, Wandler und Telemetriesysteme, die einem flächendeckenden industriellen Einsatz im Wege stehen.

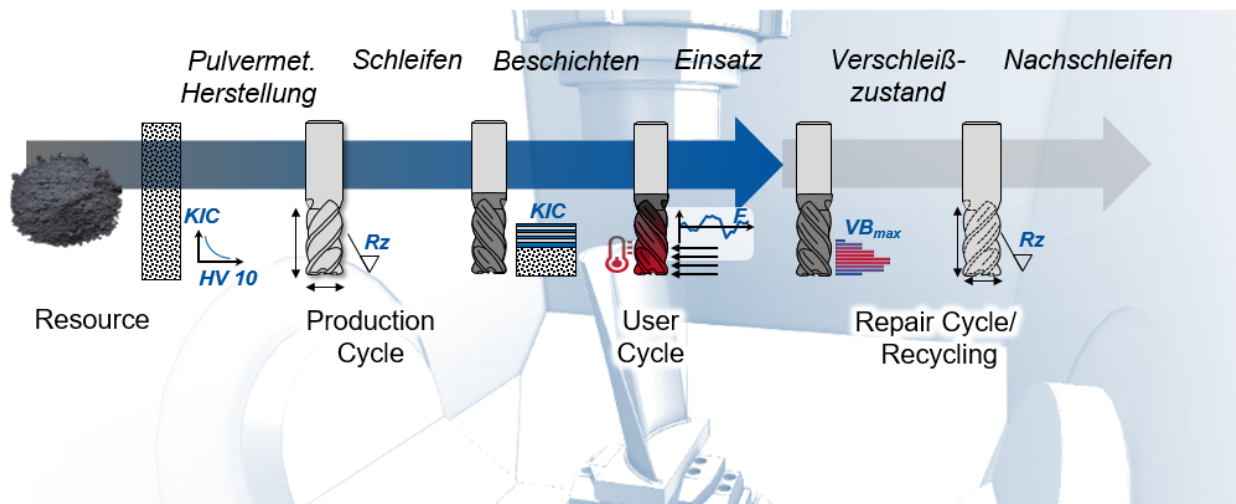


Bild 7: Die Informationen aus den einzelnen Lebenszyklusabschnitten werden über den Digitalen Zwilling dokumentiert.

Daher stellt die Erfassung der Leistungsaufnahme sowie der Datenströme zur Regelung der Achs- und Spindelantriebe aktuell die vielversprechendste Datenquelle für die industrielle Analyse und Dokumentation des Schleifprozesses in einem Digitalen Schatten dar. Eine direkte Vorhersage der thermo-mechanischen Beanspruchung der Bauteilrandzone auf Grundlage der Leistungsaufnahme der Achs- und Spindelantriebe ist jedoch nicht möglich, da ein Großteil der über die mechanischen Antriebe eingebrachten Energie in Form von Verlustwärmeströmen mit dem Kühlschmierstoff, dem Schleifwerkzeug und den Spänen aus der Kontaktzone abgeführt werden und folglich nicht als thermo-mechanische Beanspruchung der Bauteilrandzone wirken. Dementsprechend sind Prozessmodelle erforderlich, um ausgehend von der Leistungsaufnahme der Achs- und Spindelantriebe auf die thermo-mechanische Beanspruchung der Bauteilrandzone zu schließen und diese näherungsweise für die Erstellung des Digitalen Zwillings ausgehend vom Digitalen Schatten vorherzusagen.

Bei der thermo-mechanischen Modellierung von Schleifprozessen können wiederum analytische, numerische, empirische, auf maschinellem Lernen basierende oder hybride Ansätze genutzt werden. Die Kenntnis der thermo-mechanischen Randzonenbeanspruchung ermöglicht schließlich mit Hilfe von Werkstoff- und Schädigungsmodellen die bauteilindividuelle Simulation von Gefügeumwandlungen und Rissbildungen in der Domäne des digitalen Werkzeug-Zwillings.

Diese Informationen können später im Lebenszyklus beim Einsatz des Werkzeugs im Fräsprozess genutzt werden – etwa um das Prozessverhalten des Zerspanwerkzeugs während seiner Nutzungsphase in Abhängigkeit von den während der Herstellung eingebrachten Eigenspannungen bestmöglich abschätzen zu können. Im Umkehrschluss

können mit dem Digitalen Zwilling ebenfalls geeignete Prozessparameter für die Fertigung bestimmt werden, um an die spätere Funktion des Produktes angepasste Bauteileigenschaften gezielt einzustellen [20].

4.2 Daten- und modellgestützte Beschreibung der Produktgeometrie

Im Folgenden soll das Beispiel der frästechnischen Bearbeitung eines integralen Verdichterrisors aus Abschnitt 3.2. weiter vertieft werden, um das Zusammenwirken von Digitalem Schatten und Zwilling näher zu erläutern. Verdichterrisoren oder Blisks (Blade Integrated Disk) zählen zu den besonders sicherheitsrelevanten Bauteilen eines Flugtriebwerks. Im Betrieb sind diese extremen mechanischen und thermischen Belastungen ausgesetzt. Gleichzeitig müssen die Sicherheitsaufschläge auf die Komponenten so gering wie möglich gehalten werden, um die Bauteilmassen in einem Bereich zu halten, der höchste Leistungen und einen effizienten Betrieb erlauben. Ein hohes Maß an Sicherheit kann daher nur durch eine detaillierte Auslegung von Bauteil und Herstellprozesskette erfolgen sowie der anschließenden Überwachung aller sicherheitsrelevanten Prozessschritte in der Herstellung selbst.

Durch die hohen Anforderungen an die Qualifizierung, Validierung und Dokumentation aller Fertigungsschritte der gesamten Herstellprozesskette sind die Triebwerkshersteller bereits seit Jahrzehnten Vorreiter bei der industriellen Verwendung von Daten, Modellen und Simulationen zur Verbesserung ihrer Vorhersagefähigkeiten der Bauteileigenschaften über unterschiedliche Abschnitte des Produktlebenszyklus. Nur durch eine möglichst präzise Information über die tatsächlichen individuellen Komponenteneigenschaften können Bauteile nächster Generationen mit noch anspruchsvolleren Produktspezifikationen unter den geforderten Randbedingungen hinsichtlich Sicherheit und Wirtschaftlichkeit realisiert werden. Konkret bedeutet dies, dass Daten, die relevante Produkteigenschaften repräsentieren, nicht nur durch gelegentliche Messungen und selektive Qualitätssicherungszyklen gewonnen werden; vielmehr sollen diese ständig eine kontinuierliche Aussage über den aktuellen Produktzustand gewährleisten.

Das Beispiel der frästechnischen Bearbeitung der Verdichterbeschaukelung einer Blisk zeigt, wie eine prozessbegleitende Aussage über den geometrischen Bauteilzustand erfolgen kann. Nach aktuellem Stand der Technik liegt die Bearbeitungsdauer für Schaufelfräsprozesse für moderne Bauteildesigns im Bereich mehrerer zehn Stunden. Während dieser Sequenz liegt heute üblicherweise keine Information über den Bauteilzustand vor, da eine direkte Messung in der Maschine nicht möglich ist. Dennoch werden von der Werkzeugmaschine während der Bearbeitung ständig Daten erzeugt, die zur Regelung der Maschinenachsen verwendet und gleich danach wieder verworfen werden.

In einem ersten Schritt werden genau diese Positionsdaten der Maschinenachsen mit einer Abtastrate im Bereich einiger 100 Hz erfasst und mit ihrem zeitlichen Bezug zur Bearbeitungssequenz gespeichert. Nach dieser reinen Zuordnung der Daten zum bearbeiteten Objekt im Digitalen Schatten wird eine Transformation vom Koordinatensystem der Werkzeugmaschine in das des Werkstücks vorgenommen. Dieser Schritt ist eine erste Aufbereitung von Daten in Richtung des betrachteten Objekts „Bauteil“ durch eine einfache analytische Matrixoperation. Eine Aussagefähigkeit über die Eigenschaften des Produkts ist zu diesem Zeitpunkt jedoch kaum vorhanden. Es liegt lediglich eine Punktwolke vor, welche die Bahn des Werkzeugmittelpunktes (engl. Tool Center Point, TCP) repräsentiert, an welcher der Fräser während der Bearbeitung entlanggeführt wurde. Diese Bahn kann in einem nächsten Schritt um den Radius des Werkzeugs in der jeweiligen Orientierung korrigiert werden. Hierzu werden die Geometrie

sowie der aktuelle Orientierungsvektor des Werkzeugs als zusätzliche Information eingeführt. Damit liegt nun die Bahn des theoretischen Werkzeugkontaktpunktes (engl. Tool Contact Point) theoretisch vor, da zunächst ideale Bedingungen für die Werkzeuggeometrie sowie die Steifigkeit von Maschine, Werkzeug und Bauteil angenommen wurden.

Anders als in der vorgelagerten Prozessplanung können zu diesem Zeitpunkt trotz idealer Annahmen auf Basis der real erfassten Daten bereits diejenigen Effekte auf die Bauteilgeometrie quantifiziert werden, die bspw. aus einer Positioniergenauigkeit der Maschine resultieren. Im Gegensatz zur idealisierten Umgebung in der Prozessplanung, würden sich auf diese Weise bereits trotz gleicher Eingangsparameter unterschiedliche individuelle Zustände zwischen verschiedenen Maschinen oder verschiedenen Zeitpunkten abzeichnen. Im Sinne der Definition in Abschnitt 3 wird also über eine reine Datenzuordnung zu einem Objekt hinaus schon eine Information erzeugt, die grundlegende Aspekte der Produkteigenschaften widerspiegelt.

Bild 8 gibt darüber hinaus eine Übersicht über weitere Effekte, die neben den zuvor angenommenen Idealbedingungen einen signifikanten Einfluss auf die Bahn haben, die den Verlauf der Kontaktpunkte zwischen Werkzeug und Werkstück abbildet. Im Falle des Schlichtprozesses, durch welchen die finale Oberfläche an den Verdichterschaufeln erzeugt wird, dürfen trotz verhältnismäßig moderater Schnittkräfte die Effekte der Abdrängung an Werkzeug und Werkstück sowie Verschleißeffekte am Werkzeug nicht vernachlässigt werden.

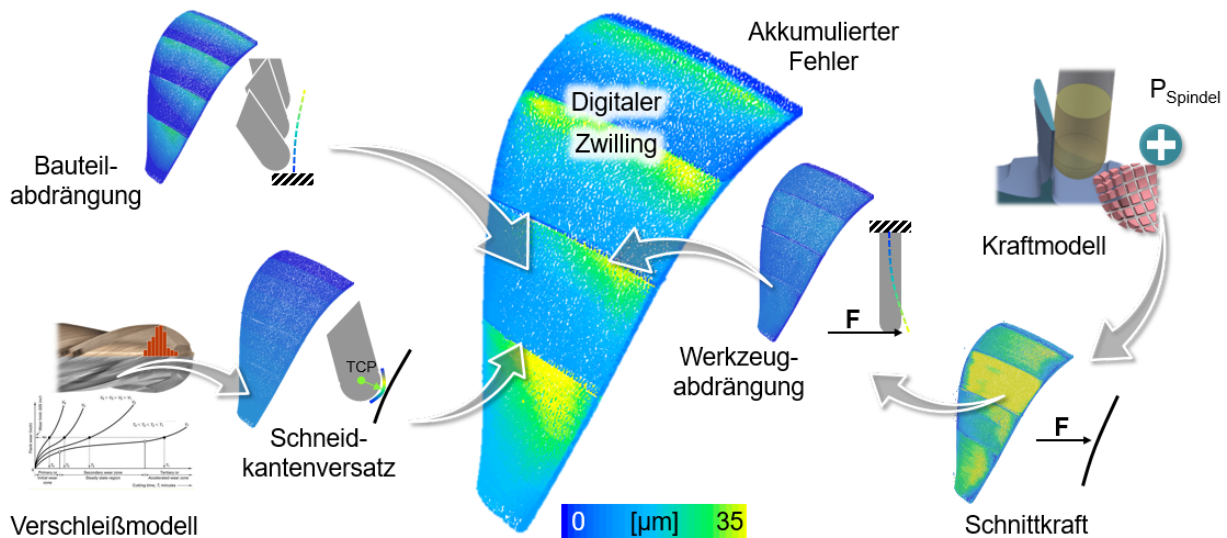


Bild 8: Die Effekte Werkzeugverschleiß sowie Werkzeug- und Bauteilabdrängung auf den Kontaktpunkt am Werkstück und akkumulierter Fehler als Superposition der Effekte.

Zur Modellierung der Verschleißeffekte wird über die Einsatzdauer des Werkzeugs eine Bestimmung der theoretischen geometrischen Eingriffsbedingungen durchgeführt und in Form einer Häufigkeitsverteilung über die Werkzeuggeometrie aufgetragen. Damit ist bekannt, welcher Bereich des Werkzeugs sich im Prozess wie lange im Eingriff befunden hat. Diese Information wird mit einem Verschleißmodell gekoppelt, welches den volumetrischen Abtrag am Werkzeug als Funktion seines im Materialeingriff zurückgelegten Wegs beschreibt. Die sogenannten Verschleißkurven im Modell sind wiederum abhängig von vielen Parametern, etwa dem Schneidstoff, der Makro- und Mikrogeometrie des Werkzeugs, dem bearbeiteten Werkstoff, den verwendeten

Schnittparametern etc. und liegen entweder aus vorherigen Untersuchungen vor oder müssen geschätzt werden. Zunächst sind diese Daten grundsätzlich dem Digitalen Zwilling des Werkzeugs zuzuordnen. Aus Sicht des Bauteils ist vielmehr die resultierende Veränderung der Werkzeuggeometrie (speziell der Versatz der Schneidkante) von Interesse, da diese zu maßgeblichen Abweichungen auf der Schaufeloberfläche am Produkt führt.

Über die Eingriffsbedingungen des Werkzeugs im Bauteil kann durch die Kopplung mit einem Schnittkraftmodell weiter die resultierende Kraft berechnet werden, die im Kontakt zwischen Werkzeug und Werkstück herrscht. In der Literatur finden sich unterschiedliche Modellansätze zur Berechnung der Schnittkraft. Exemplarisch wurden der Aufbau und die Struktur des empirisch-analytischen Schnittkraftmodells nach Kienzle in Abschnitt 3.5 ausführlich behandelt. Aus den Daten, die maschinenintern zur Verfügung stehen, etwa der Spindelleistung, können hier zusätzliche kraftproportionale Informationen gewonnen werden, welche über ein entsprechendes Maschinenmodell in eine Kraftinformation überführt werden müssen. Bei Schlichtprozessen, in welchen nur geringe Spannungsdicken abgenommen werden, steht der prozessbedingte Signalanteil zur Gesamtleistungsaufnahme der Spindel jedoch oftmals in einem so geringen Verhältnis, dass diese Information mit Hilfe einer direkten Messung nicht sicher extrahiert werden kann.

Mit dem Kraftvektor als Eingangsgröße kann in einem nächsten Schritt die Abdrängung von Werkzeug und Verdichterschaukel berechnet werden. Für den Fall des Fräswerkzeugs kann dies in vielen Fällen über ein einfaches mechanisches Ersatzmodell, etwa einen Biegebalken, erfolgen. Kompliziertere Geometrien mit veränderlichen Durchmessern oder Hinterschnitten erfordern teilweise aufwändigere Ansätze zur Modellierung. Die Bestimmung der Schaufelabdrängung erfordert ebenfalls ein Modell, welches eine größere Vielfalt an Einflüssen berücksichtigt, da sich Parameter wie Kraftangriffspunkt oder die augenblickliche Materialabtragssituation auf der geometrisch anspruchsvollen Schaufeloberfläche nur schwierig mit einfachen Ersatzmodellen hinreichend genau bestimmen lassen.

Bild 8 zeigt exemplarisch die Einflüsse von Verschleiß, Werkzeug- und Bauteilabdrängung auf die Schaufelgeometrie sowie mittig die Superposition der genannten Effekte als Ergebnis. Die Differenz zwischen der prognostizierten Geometrie in Relation zum Nominal ist als Falschfarbenbild auf der Bauteiloberfläche dargestellt. Die lokalen Abweichungen bewegen sich je nach Schaufelposition in einer Spanne von etwa +5 μm und +35 μm , die mit Hilfe von Messungen einer Koordinatenmessmaschine in dieser Größenordnung (d.h. $\pm 10 \mu\text{m}$) bestätigt werden konnten.

Zu diesem Zeitpunkt liegt bereits eine sehr detaillierte und hochwertige Information über das Produkt vor, die sowohl auf wissens- als auch auf datengetriebenen Modellierungsansätzen aufbaut. Somit liegt die Produktinformation vollständig in der Domäne des Digitalen Zwillings: Kausale Zusammenhänge werden auf Basis von aufbereiteten Prozessdaten quantifiziert. Die geometrischen Eigenschaften der Schaufel sind im Digitalen Zwilling durch Modelle beschrieben und gestützt durch Leistungs- sowie Positionsdaten (vgl. Definition DZ, Bild 1, Abschnitt 3.2).

In Abschnitt 3.4 wurde auf den Aspekt der Unsicherheitsbestimmung eingegangen. Im vorliegenden Beispiel der Verdichterschaukel wurden zur Modellvalidierung zusätzliche Messungen herangezogen, die mithilfe eines Koordinatenmessgeräts erfasst wurden. Dies ermöglicht eine Bewertung der modellierten Ergebnisse, lässt aber keine detaillierten Schlüsse über die Modell- und Parameterunsicherheiten oder ein Verständnis der Modellsensitivität auf Schwankungen zu. Diese Informationen sind aber

essentiell, wenn es um modellgestützte Entscheidungen in der Prozessführung oder Qualitätssicherung geht.

Im Folgenden wird exemplarisch darauf eingegangen, wie eine Betrachtung der Unsicherheiten erfolgen kann. Hierzu wird das recht einfache mechanische Ersatzmodell herangezogen, welches bereits zuvor zur Berechnung der Fräserabdrängung verwendet wurde.

In Bild 9 zeigt sich die analytische Funktion für die Biegelinie, mit welcher die Auslenkung w am Kraftangriffspunkt L in Abhängigkeit von der Kraft F , der Länge L sowie dem Elastizitätsmodul E und dem Flächenträgheitsmoment I_y bestimmt werden kann. Das Ersatzmodell „Biegebalken“ ist in der Mechanik seit mehreren hundert Jahren etabliert und wird in den Ingenieurwissenschaften als elementares Werkzeug für die Auslegung von technischen Systemen verwendet. In diesem Fall besteht also kein Zweifel an der Kausalität der Wirkzusammenhänge und damit der Modellunsicherheit in Bezug auf das Problem an sich – lediglich muss überprüft werden, inwiefern die vereinfachte Annahme von konstanten Parametern das Modellergebnis beeinflusst.

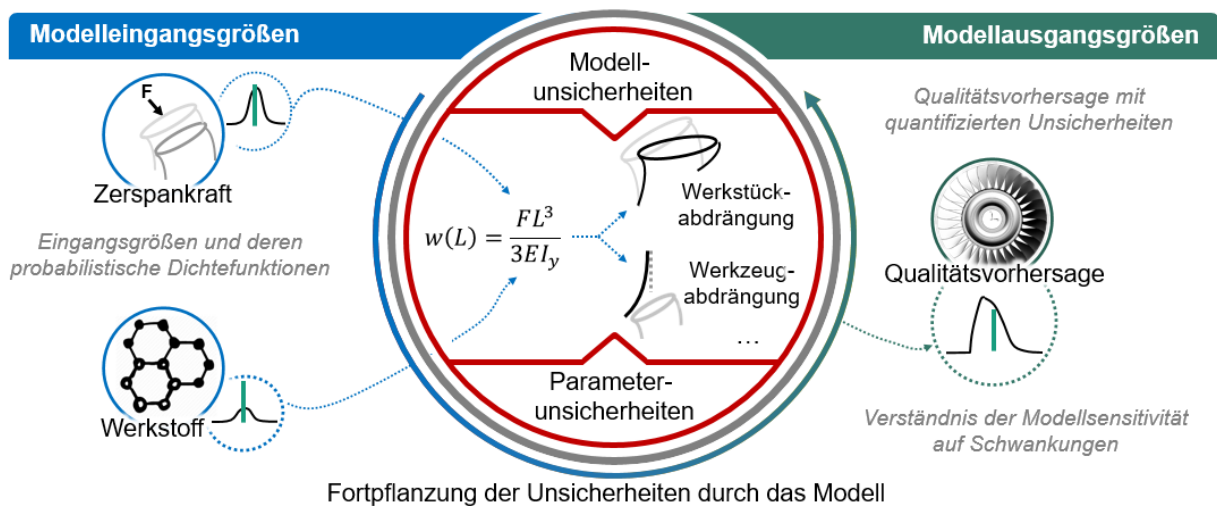


Bild 9: Beispiel für die Bestimmung der Unsicherheit zwischen Ein- und Ausgangsgrößen aus Modell- und Parameterunsicherheiten am Beispiel der mechanischen Abdrängung.

Dazu wird zunächst die Dichtefunktion der geschätzten oder gemessenen Zerspankraft für die jeweiligen Zustände identifiziert. Im Weiteren werden die Schwankungen der Werkstoffparameter sowie die Streuung der geometrischen Fräserdimensionen ermittelt. Mit dieser Verteilung für die Modelleingangsgrößen kann durch eine probabilistische Simulation, im einfachsten Fall einer Monte-Carlo-Simulation, die Verteilungsfunktion der Modellausgangsgröße bestimmt werden. Erst durch eine solche Betrachtung ist eine Quantifizierung der Modellunsicherheit möglich. Entsprechend sind Entscheidungen, die auf Basis des Modells herbeigeführt wurden, nur im Rahmen des so ermittelten „sicheren“ Intervalls möglich. Liegen Werte oder Aussagen außerhalb dieses Vertrauensintervalls, bedeutet dies nicht zwangsläufig ein negatives Ergebnis, sondern lediglich, dass für eine Entscheidung weitere Informationen benötigt werden.

4.3 Daten- und modellgestützte Prognose von Randzonenbeanspruchungen

Über die geometrischen Eigenschaften, die in Abschnitt 4.2 detailliert ausgeführt wurden, sind vor allem die oberflächennahen Randzonen bei sicherheitsrelevanten Bauteilen von zentraler Bedeutung für den sicheren Betrieb. Die Randzoneneigenschaften werden häufig unter dem Begriff der Oberflächenintegrität (engl.: Surface Integrity, SI) zusammengefasst [21], [22]. Wesentliche Kernaspekte der Surface Integrity sind der Eigenspannungszustand in der Randzone sowie etwaige Veränderungen der Werkstoffmikrostruktur, z.B. in Form von Phasenumwandlungen oder dem Ausbilden sogenannter „Weißer Schichten“ (engl.: White-Etching-Layer), welche nach dem Ätzen der Mikrostruktur weiß erscheinen. Die Veränderungen der Werkstückrandzone treten in der Regel infolge der thermo-mechanischen Beanspruchungen auf, welche durch das Fertigungsverfahren im Werkstück induziert werden. Die entstehenden Veränderungen oder gar nachweisliche Schädigungen können im Falle sicherheitskritischer Bauteile zum Versagen führen und somit einen hohen wirtschaftlichen Schaden oder aber sogar den Verlust von Menschenleben verursachen. Ein Beispiel hierfür ist ein schwerwiegender Zwischenfall bei einem Flug der Delta-Air-Line im Juli 1996, bei dem ein Triebwerksrotor barst, zu einem „Uncontained Failure“ und damit zum Tode zweier Passagiere führte. Nach intensiver Untersuchung konnte der Zwischenfall auf eine thermische Schädigung während eines Bohrprozesses in einer Turbinenscheibe zurückgeführt werden [23].

Eine Charakterisierung des Zustands der Bauteilrandzone ist jedoch in der Regel nur über zerstörende Prüfverfahren möglich. Aus diesem Grund ist der Bedarf an Methoden zur deterministischen Vorhersage der Werkstückeigenschaften auf Basis von Daten und Informationen von höchstem Interesse, um Aussagen, die über statistische Methoden und anschließend eine probabilistische Abschätzung erzielt werden, weiter abzusichern. Hierzu können analytische oder numerische Modellansätze verwendet werden. Während letztere in der Regel einen hohen zeitlichen Aufwand erfordern, nutzen analytische Modellansätze im Prozess erfasste Daten wie z.B. die Zerspankraft aus dem Digitalen Schatten, um daraus relevante Prozesszustandsgrößen wie etwa Temperatur- oder Spannungsfelder abzuleiten, welche die physikalischen Eigenschaften des Bauteils direkt beeinflussen und im Digitalen Zwilling abgebildet werden können.

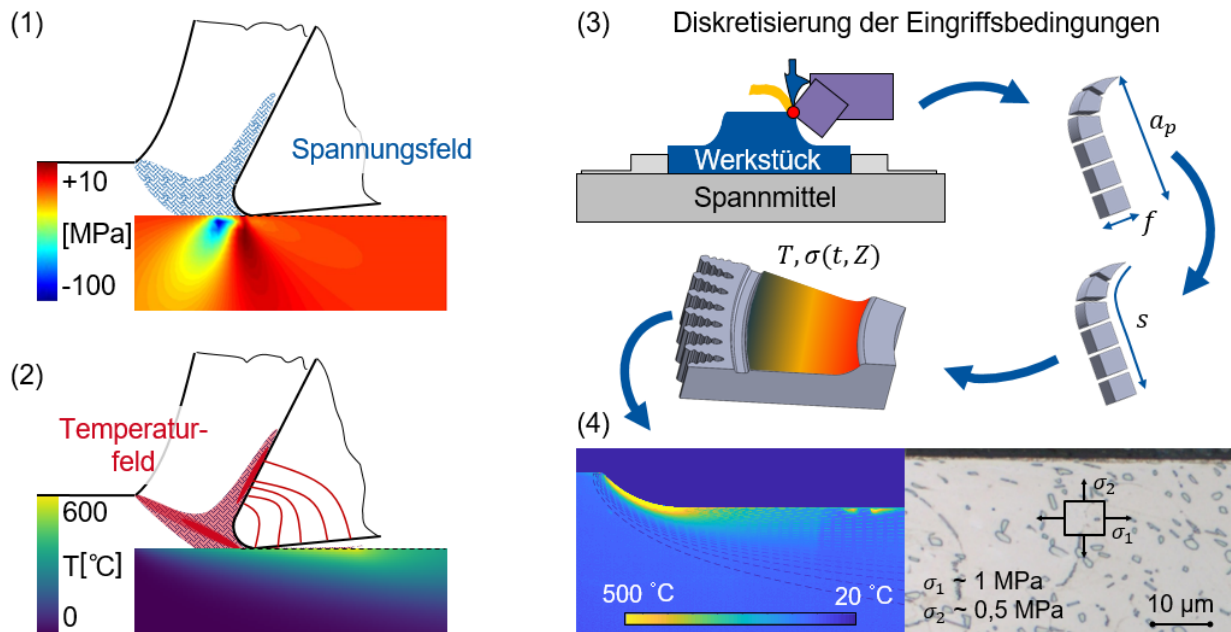


Bild 10: Modellbasierte Vorhersage der Randzoneneigenschaften – Vom thermo-mechanischen Beanspruchungskollektiv im Digitalen Schatten zur Bauteileigenschaft im Digitalen Zwilling.

Zwei Beispiele hierfür sind in Bild 10, für den orthogonalen Schnitt dargestellt, welcher die geometrisch einfachste Form eines Zerspanprozesses bildet und somit eine grundlegende Betrachtung ansonsten komplexerer Prozesse ermöglicht. In der Literatur können für diesen vereinfachten Fall unterschiedliche Messmethoden zur Erfassung von Prozessdaten gefunden werden. Neben Kraftmessungen beinhalten diese insbesondere eine Messung der Temperatur mittels Thermographie oder Pyrometrie. Dabei ist sämtlichen Messverfahren gemein, dass sie entweder integrale Messgrößen erfassen (bspw. die Zerspankraftkomponenten), lediglich punktuelle Kennwerte liefern (bspw. mittels Pyrometrie) oder aber eine Messung nur mit sehr geringer entweder örtlicher oder zeitlicher Auflösung möglich ist (bspw. mittels Thermographie). Aus diesem Grund eignen sich diese Messmethoden allein nur bedingt zur Beurteilung des thermo-mechanischen Beanspruchungskollektivs. Unter Zuhilfenahme analytischer Prozessmodelle können die integralen Messgrößen des erfassten Digitalen Schattens jedoch verfeinert und deren Auflösung und Güte somit erheblich erhöht werden.

Bild 10 zeigt exemplarisch ein mittels analytischer Modellierung berechnetes Spannungsfeld nach der Methode von Lazoglu et al. [24], welches sich in der Werkstückrandzone eines zerspannten Gefüges ausbildet. Das dazugehörige Temperaturfeld basiert auf der Annahme einer Wärmequelle, die sich auf der Werkstückoberfläche bewegt [25]. Als Grundlage dieser Berechnungen dienen die kinematischen Prozessgrößen und die gemessene, zeitveränderliche Zerspankraft, welche am Werkzeug angreift und prozessbegleitend messbar ist. Hierdurch wird eine Berechnung des thermo-mechanischen Beanspruchungskollektivs in-situ mit hoher Auflösung bei gleichzeitig kurzer Rechendauer möglich. Die auf diesem Wege berechneten Prozesszustandsgrößenfelder stellen in ihrer Gesamtheit somit Aspekte im Digitalen Zwilling dar, welche auf der Basis von Digitalen Schatten (z.B. hier Prozesskräfte) beruhen.

Die Nutzung dieser Modelle im realen Anwendungsfall sicherheitskritischer Bauteile, hier exemplarisch für das Drehen einer Turbinenscheibe, ist in Bild 10 dargestellt. Für eine

Übertragung der Ergebnisse aus dem Orthogonalschnitt auf komplexere Spangeometrien wird in einem ersten Schritt mit Hilfe einer geometrischen Eingriffssimulation analog zu Abschnitt 4.2 die tatsächliche Spangeometrie bestimmt, die im Prozess vorliegt. Anschließend kann diese in infinitesimale Elemente (hier: Scheiben) zerlegt werden, welche wiederum jeweils einem orthogonalen Schnitt definierter Breite und Spannungsdicke entsprechen. Weiterhin werden die generisch berechneten Lastkollektive über die gesamte Bauteiloberfläche integriert und so die prozessbedingten lokalen Randzonenbeanspruchungen im Werkstück ermittelt, vgl. Bild 10.

Diese Information kann in einem nächsten Schritt genutzt werden, um die Modifikation der Werkstückrandzone vorherzusagen. Hierfür sind unter anderem die Modelle von Umbrello et al. [26] und Buchkremer [27] zu nennen, die eine Vorhersage der Ausbildung Weißer bzw. Schwarzer Schichten in der Randzone ermöglichen. Diese für die numerische Analyse entwickelten Modelle können erst durch das Vorhandensein des dargestellten Digitalen Zwillings auch in analytischer Form umgesetzt werden.

Eine weitere Aufbereitung des Digitalen Zwillings für die Werkstückrandzone muss künftig unter Berücksichtigung der vollständigen Fertigungsprozesskette im Sinne einer integrativen Werkstoff- und Prozesssimulation (engl. Integrated Computational Materials and Manufacturing Engineering, kurz ICM²E) erfolgen [28]. Das ICM²E verbindet hierbei die Prozesstechnologie, Werkstofftechnik und Bauteilkonstruktion in einem ganzheitlichen Ansatz. Erst die Kenntnis der simulativ bestimmten exakten Gefügestruktur und -eigenschaften des Halbzeugs im Nachgang des urformenden Prozesses und die durchgängige Verknüpfung der darauffolgenden Prozessmodelle im Zuge einer probabilistischen Analyse stellt die Ableitung eines Digitalen Zwillings dar, der neben den relevanten Eigenschaften auch eine Unsicherheitsbewertung beinhaltet.

4.4 Datengestützte Prognose von Gefügeveränderungen

Wie in Abschnitt 4.3 beschrieben ist vor allem die Vorhersage der Gefügeeigenschaften als Resultat der thermischen Prozesseinflüsse essentieller Bestandteil des Digitalen Zwillings. Die Basis für die Informationen im Digitalen Zwilling wird auch hier durch einen Digitalen Schatten gebildet, der Messgrößen oder Daten integriert und zu einem spezifischen Bauteil referenziert. Diese Daten werden schließlich über geeignete Modelle auf eine produktbezogene physikalische Ebene gehoben, um schließlich eine inhärente Bauteileigenschaft wie die Bauteilrandzone abzuleiten. Ein Zwischenschritt können auch hier wieder sogenannte Prozesszustandsgrößen sein (vgl. Abschnitt 4.3), welche prozessbegleitend ermittelt werden können. Beispiele sind hier Spannungszustände im Werkstoff durch auf die Oberfläche wirkende Kräfte, oder Temperaturfelder infolge von Einwirkungen durch Wärmequellen [29].

Für die Funkenerosion handelt es sich hierbei um die Lokalisierung der thermischen Beanspruchung (Entladungen), die sich aus der angelegten Spannung und dem fließenden Strom ergeben, sowie das resultierende Temperaturfeld in der Randzone. Zum Digitalen Schatten zählen jedoch nicht nur Daten aus dem Prozess wie die Intensität lokaler Einzelentladungen, sondern auch Informationen über den Eingangszustand des Werkstoffgefüges. Solche Daten müssen im Vorfeld erfasst werden: Dies können zum Beispiel reale Gefügaufnahmen aus metallografischen Schliften, EBSD-Aufnahmen (Electron Back-Scatter Diffraction) oder einfach nur die chemische Zusammensetzung sein [30].

Ausgehend von den erfassten Prozessdaten zusammen mit den Werkstoffeigenschaften wird ein Modell erstellt, welches die Temperaturverteilung während des Prozesses

beschreibt. Schließlich kann über eine Simulation und ein entsprechendes Materialmodell eine Gefügeumwandlung als resultierende Modifikation prognostiziert werden, [31].

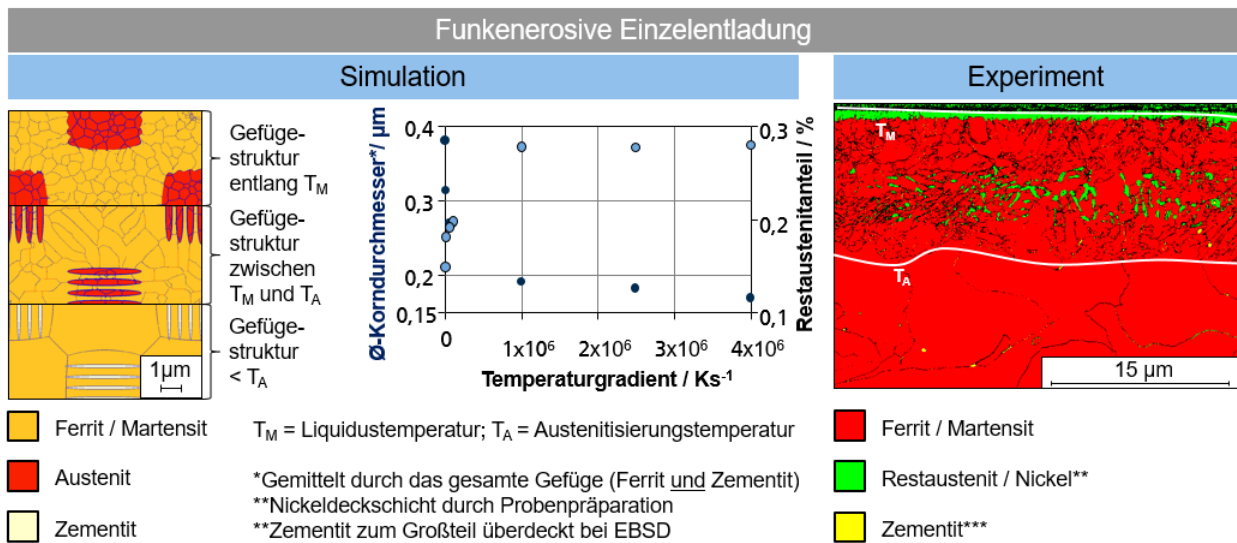


Bild 11: Die Veränderung der Gefügeeigenschaften in der oberflächennahen Randzone ist eine essentielle Eigenschaft des Bauteils, die im digitalen Zwilling beschrieben werden kann.

In Bild 11 ist der Aufbau eines solchen Mikrostrukturmodells schematisch dargestellt und die erhaltenen Ergebnisse für einen konkreten Parametersatz abgebildet. Zum Vergleich ist das Ergebnis einer EBSD-Messung nach der Bearbeitung abgebildet. Bei dem gezeigten Ergebnis handelt es sich um die Simulation der finalen Gefügestruktur in der wärmebeeinflussten Zone nach einer Einzelentladung.

Durch Verwendung des Mikrostrukturmodells liegt schließlich mit dem resultierenden Gefüge eine konkrete Bauteileigenschaft vor, die dem Digitalen Zwilling des Produkts zugeordnet werden kann. Der erhaltene DZ erlaubt eine bauteilindividuelle Aussage über die Korngrößenverteilung, die vorliegenden Phasenanteile und die Verteilung der Legierungselemente im Werkstoff. Somit ist es möglich, für variierende lokale Prozessparameter oder Prozessbedingungen (Entladedauer, Entladestrom, etc.) mit dem erstellten Modell lokal die individuellen Randzoneneigenschaften für ein Bauteil aufzulösen. So können schließlich Aussagen über die funktionellen Eigenschaften des realen Bauteils bereits im Vorfeld getroffen werden und ggf. erwünschte oder unerwünschte Mikrostruktureigenschaften durch die Prozessführung und die resultierende thermische Beanspruchung gezielt eingestellt oder vermieden werden.

Analog zum Beispiel des Verdichterrisors in Abschnitt 4.2 ist auch in diesem Fall die Modellunsicherheit ein essentieller Aspekt des Digitalen Zwillings. Vor allem im Bereich der Gefügemikrostruktur ist hier der vorliegende Werkstoff eine zentrale Einflussgröße, die in der Regel nicht zerstörungsfrei ermittelt werden kann. Selbst unter Annahme einer genauen deterministischen Kenntnis über das thermo-mechanische Beanspruchungskollektiv könnte in einem produktiven Umfeld, in dem eine zerstörende Prüfung nicht möglich ist, die Werkstoffseite lediglich über eine statistische Beschreibung abgebildet werden. Folglich ist die Unsicherheit für die modellbasiert ermittelten Gefügeeigenschaften mindestens so groß wie die statistischen Schwankungen der Eigenschaften des lokalen Grundgefüges als Eingangsgröße. Vereinfacht gesagt: Würden Bauteileigenschaften des Rohteils wie etwa die Korngrößenverteilung oder die chemische Zusammensetzung signifikant variieren und sich diese Schwankung

entsprechend auf das Endergebnis auswirken, hängt die Güte des Digitalen Zwillings und damit dessen Aussagefähigkeit entscheidend von dieser Information ab und nicht allein von den direkt im Prozess gemessenen Größen.

Dies macht deutlich, dass prinzipiell auf einfachere Art und Weise ein Digitaler Schatten eines Objekts erzeugt, daraus aber nicht unbedingt ebenso leicht ein Digitaler Zwilling im Kontext der Problemstellung abgeleitet werden kann. Eine undifferenzierte Datenaufzeichnung ohne technologisches Domänenverständnis ist häufig ohne großen Wert, da notwendige Informationen fehlen, die für die weitere Aufbereitung im Digitalen Zwilling elementar sind.

5 Turning Data into Value – Der (Mehr-) Wert des Digitalen Zwillings

Im letzten Abschnitt soll auf den Wert von Daten eingegangen werden, die als die elementare Grundlage für die Gewinnung von Informationen und Wissen dienen. Im Zuge der Diskussionen in den Medien um das Thema „Digitalisierung“ wird immer wieder die Frage nach dem Wert oder auch Mehrwert gestellt, der durch die Nutzung von Daten entsteht. In der Evolution der Phasen der Industrialisierung bis hin zum Zeitalter der Industrie 4.0 wurde bisher der Wert im Wesentlichen als Kosteneinsparung verstanden, die durch eine Effizienzsteigerung in den produktiven Systemen ermöglicht wird. Die häufigsten dokumentierten Erfolge, welche durch digitalisierte Produktionssysteme erzielt werden konnten, sind dabei logistischer Natur: Analog zu den Beispielen der großen Onlinehändler und Plattformen kann auch in der produktiven Industrie durch eine digital gestützte Infrastruktur die gesamte Logistikkette innerhalb des Unternehmens oder in einem Netzwerk aus Kunden und Lieferanten optimiert werden. In solchen Fällen entsteht ein monetärer Wert durch Einsparungen und Effizienzgewinne und kann recht einfach gegen die Kosten für die Implementierung und den Betrieb der digitalen Infrastruktur bilanziert werden.

Die in Abschnitt 4 vorgestellten Beispiele für den Digitalen Zwilling als virtuelle Repräsentation eines realen Objekts in der Produktions- oder Fertigungstechnik setzten jedoch in einer Ebene an, die in vielen Aspekten über die Logistik von Assets hinausgeht. Hier ist eine Bewertung des Datenwerts deutlich schwieriger. Zunächst ist die Implementierung eines Systems zur Erfassung relevanter Daten sowie ihrer zielgerichteten Aufbereitung, Unsicherheitsbestimmung etc. auf der Ebene des Objekts spezifischer und aufwändiger. Einfach gesprochen blicken diese Methoden deutlich tiefer in das Produkt mit seinen herstellungsbedingten Eigenschaften hinein. Doch was genau kennzeichnet den auf diese Weise entstehenden Mehrwert, der über den Wert des Produktes nach einem klassischen Verständnis hinausgeht?

Der Begriff Mehrwert ist in der Betriebswirtschaft im Sinne der sogenannten Mehrwertstrategie eindeutig definiert: Hier wird unterschieden zwischen dem produkt- und dem vertriebsorientierten Mehrwert. Im ersteren Fall wird der Mehrwert als eine „zum eigentlichen Produkt beigefügte Service- oder Zusatzleistung“ beschrieben. Hier geht es also nicht um einen reinen monetären Benefit in der Gesamtbilanz, sondern um eine zusätzliche Leistung, welche das Produkt im Vergleich attraktiver oder vorteilhafter erscheinen lässt. In einem ersten Schritt kann der Nutzen also

- entweder eine zusätzliche nutzbringende Information über das Produkt sein,
- oder eine benötigte Information über das Produkt, die bereits prozessbegleitend und damit frühzeitiger vorliegt und andernfalls in einem separaten Schritt mit

erneutem Ressourcenaufwand später im Lebenszyklus gewonnen werden müsste.

Ein Beispiel wurde in Abschnitt 4.2 vorgestellt, bei dem an einem Verdichterrotor bereits während des Fertigungsprozesses in der Maschine mithilfe von Daten eine Geometrieinformation gewonnen werden konnte, welche Einsparungen in der klassischen Qualitätssicherung ermöglicht. Die weiteren in Abschnitt 4 vorgestellten Beispiele zeigen, wie für sicherheitsrelevante Bauteile, die in Luftfahrtsystemen eingesetzt werden, ergänzende Informationen gewonnen werden, die als neue Bewertungskriterien für die Produktqualität herangezogen werden können. Vor allem bei den sicherheitsrelevanten Bauteilen entsteht ein signifikanter Mehrwert genau dann, wenn bereits mit der Herstellung des Produktes Daten erfasst werden, die in aufbereiteter Form den bisher existierenden Qualitätssicherungsprozess durch nutzbringende Zusatzinformationen ergänzen und damit eine höhere Bauteilqualität, -funktionalität oder geringere Folgekosten ermöglichen.

Derzeit werden Fertigungsprozessketten für sicherheitsrelevante Bauteile typischerweise nach einem Ansatz qualifiziert, der nach einer initialen Erprobung anhand eines Erstmusters (engl.: First Article Inspection, FAI) die Prozesseinstellgrößen „einfriert“. Dieser Ansatz, die sogenannte bauteilspezifische Prozessvalidierung (engl.: Part Specific Process Validation, PSPV) beschreibt ein historisch gewachsenes Vorgehen, welches aber nur in mittelbarem Zusammenhang mit der Bauteillebensdauer als zentralem Bewertungskriterium steht. Ein verbesserter Ansatz würde folglich einen Schritt weiter bei den spezifischen Eigenschaften eines individuellen Bauteils ansetzen, welche sich als Resultat von dessen Herstellungsprozess ergeben. Durch Kenntnis über das prozessbedingt eingebrachte thermo-mechanische Beanspruchungskollektiv wäre ein mittelbarer Schluss auf die Veränderung des Werkstoffs in der Randzone möglich (vgl. Abschnitt 4). Die Abschätzung der Bauteillebensdauer, dessen Nutzungsphase sowie Wartung könnte präziser und ökonomischer erfolgen. Eine zustandsgrößenbasierte Prozessvalidierung, die auch als generische Validierung (engl.: Generic Manufacturing Process Validation, GMPV) bezeichnet wird, bietet dem Hersteller zudem deutlich mehr Flexibilität in der Herstellung von Komponenten und wäre damit unmittelbarer Treiber für Kosteneinsparungen entlang des Herstellungszyklus: Durch die vorliegende Transparenz, wie sich die Einflüsse von Eingangsparametern auf das Prozessergebnis auswirken, können Freiräume für Anpassungen und Optimierungen geschaffen werden, die nach dem PSPV-Ansatz nur unter der Auflage zeit- und kostenintensiver Revalidierung möglich sind.

Der Mehrwert einer digital gestützten indirekten Bauteilvalidierung und -qualifizierung im Vergleich zum klassischen Ansatz liegt also nicht nur in der sehr effizienten Dokumentation von Prozesseinstellgrößen, sondern ermöglicht deutlich tiefere Einblicke in die für das Bauteil oder System relevanten Zielgrößen. Es ermöglicht sowohl eine konkrete Bewertung der Prozessstabilität innerhalb des produzierenden Umfelds, als auch über den Digitalen Zwilling den Übertrag auf die Produkteigenschaften als Kernaspekt für die spätere Funktionalität und den Betriebszyklus eines Assets.

Nur durch diese Transparenz und die Befähigung zu einem konsequenten „Verstehen, Lernen und Optimieren“ auf Basis relevanter Prozessinformationen, sind deutlich anspruchsvollere Produkte unter wirtschaftlichen Randbedingungen überhaupt realisierbar. Noch effizientere und ressourcenschonendere Luftfahrtantriebe der Zukunft benötigen extrem leichte und gleichzeitig performante Komponenten. Aus Bauteilsicht führen diese Anforderungen dazu, dass die spezifische Belastung im Werkstoff im Sinne seiner höheren Ausnutzung weiter steigen muss. Unsicherheiten und Streubreiten infolge

einer mangelnden Informationslage müssen daher in der Design- und Herstellungsphase des Bauteils unbedingt vermieden werden. War es in den 1990er Jahren plötzlich möglich mithilfe der rechnergestützten Simulation verbesserte Prognosen über Produkte und deren Herstellung zu treffen, so liefert die Digitalisierung durch die Aufnahme der Ist-Situation die nötige Information über die Realität und koppelt diese zurück. Der Wert der Daten besteht somit in dem Potential, künftig den Regelkreis zwischen der simulationsbasierten Prognose und der Information über den Ist-Zustand aus dem Produktionssystem schließen zu können und im Falle einer Abweichung vom Erwartungswert eine Reaktion einzuleiten.

Zuletzt bietet die Digitalisierung die Möglichkeit Prozessketten auch auf Basis neuer Zielgrößen betrachten zu können, die neben den Produkteigenschaften oder monetären Werten von Interesse sind. Ein Beispiel hierzu ist der Einsatz von Ressourcen entlang der Wertschöpfungskette: Der Digitale Schatten und Zwilling müssen als „Enabler“ für eine objektive Nachhaltigkeitsbewertung unterschiedlicher, technisch machbarer Fertigungsszenarien für ein Produkt verstanden werden und bilden eine der wichtigsten Grundlagen für eine sowohl ressourcenschonende, nachhaltige als auch effiziente Produktion. Dabei können sie insbesondere dazu beitragen Produktionen hochflexibel, auch für verschiedene Produkte mit geringen Stückzahlen, mit einer effizienten sowie schnellen Prozessauslegung zu machen. Nur so können Produktionsressourcen optimal und damit nachhaltig ausgenutzt werden.

Ein Beispiel für diese sogenannte „Ökonomie“ Bewertung (engl.: Ecologic Harmonization) als gleichwertige Abwägung zwischen den ökonomischen und ökologischen Zielen gibt Bild 12: Mit der vorliegenden Information über alle Schritte des Lebenszyklus vom Rohstoff bis zum fertigen Produkt ist nicht nur eine detaillierte Bewertung der Fertigungskosten für jedes gefertigte Merkmal möglich – vielmehr erlaubt die Einbeziehung der Informationen über die Verbräuche im produzierenden System weiter eine Aussage über den tatsächlichen Energieeinsatz und die CO₂-Emissionen, die durch die Bearbeitung freigesetzt werden.

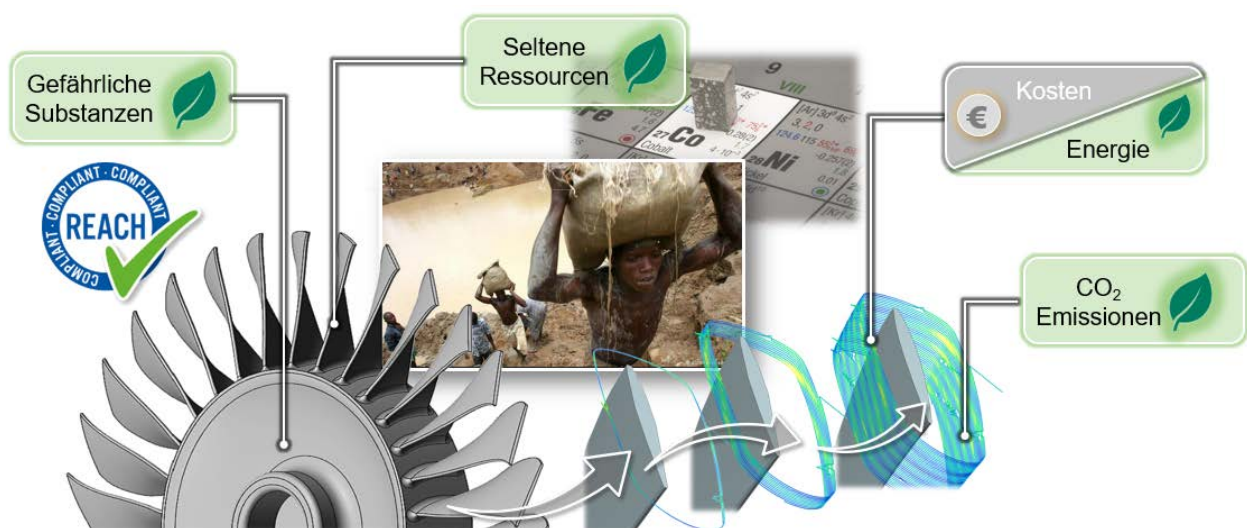


Bild 12: Neben einer Analyse der Prozesseinflussgrößen kann die durch den Digitalen Zwilling gewonnene Transparenz für eine umfassende Ressourcenbetrachtung genutzt werden.

Neben dem sogenannten „Global-Warming-Potential“ ist vor allem in der produzierenden Industrie eine ganzheitliche Bilanzierung der Stoffflüsse als Ein- und Ausgangsparameter eines Fertigungsschritts von enormer Bedeutung. Hier geht es z.B. um den Einsatz oder

Verbrauch gefährlicher Stoffe (engl.: Registration, Evaluation, Authorization and Restriction of Chemicals, REACH) oder etwa die Verschmutzung oder Degradation von Trinkwasser durch einen Prozessschritt. Darüber hinaus können über komplexe Fertigungsketten hinweg, die oft eine Vielzahl sekundärer Prozesse einbeziehen, Verbräuche seltener Ressourcen quantifiziert werden. Die auf diese Weise mögliche Analyse des Lebenszyklus (engl.: Life Cycle Assessment, LCA) bildet eine essentielle Grundlage für die Bewertung von Prozessalternativen vor dem Hintergrund eines völlig neuen Werts – der Nachhaltigkeit von Produkt und Produktion [32].

6 Zusammenfassung und Ausblick

Im vorliegenden Beitrag wurden die Konzepte des Digitalen Schattens und des Digitalen Zwillings im Kontext der Produktionstechnik diskutiert. Nach einigen einleitenden philosophischen Fragestellungen bzgl. der Grenzen sowie dem Nutzen eines Erkenntnisgewinns mit Hilfe von Modellen und Daten wurde der Stand der Technik zum Thema beleuchtet. Schließlich wurde eine spezifische Definition der wesentlichen Begriffe im Kontext der Fertigungstechnik erarbeitet.

Demnach wird der Digitale Schatten als eine reine Zuordnung von Daten zu einem bestimmten Objekt zu einem bestimmten Zeitpunkt verstanden. Der Digitale Zwilling eines Objekts ist dagegen eine virtuelle Darstellung seines physikalischen Zustands: Zustandsänderungen werden durch Prozessmodelle beschrieben und weiter durch Daten gestützt. Der Datensatz in Form des Digitalen Schattens wird auf die physikalische Ebene in Form des Digitalen Zwillings durch Modelle oder Simulationen vertikal weiterentwickelt. Dabei kann es sich um verschiedene Arten von Modellen, wie z.B. datengetriebene, statistische Modelle, maschinelles Lernen, aber auch deterministische physikalische Modelle handeln. In diesem Kontext wurde schließlich der Unterschied zwischen der Validität und Unsicherheit von Daten sowie deren Relevanz für ein (ingenieur-)wissenschaftliches Problem herausgearbeitet. Der Digitale Zwilling kann nach dem aktuellen Verständnis für reale physikalische Objekte mit einem Lebenszyklus als deren virtuelles Abbild mit wählbaren Systemgrenzen geschaffen werden. Es existiert grundsätzlich nur ein Digitaler Zwilling für ein Objekt.

Schließlich folgte eine Anwendung der erarbeiteten Konzepte auf konkrete Anwendungsfälle in der Fertigungstechnik. Am Beispiel der Fräsbearbeitung eines integralen Verdichtertorsors wurde die Ableitung eines Digitalen Zwillings des Bauteils auf Basis von Fertigungsdaten aus der Werkzeugmaschine, konkret die Position und die Spindelleistungsaufnahme, vorgestellt. Mit Hilfe weiterführender deterministischer oder statistischer Modelle ist es schließlich möglich, lokale Geometrieabweichungen am Bauteil zu ermitteln und so gezielte Bauteilqualitätsbestimmungen zu ermöglichen.

Die beiden Fallbeispiele zerspanende und funkenerosive Bearbeitung von sicherheitsrelevanten Merkmalen in Turbinenscheiben erweitern schließlich die Betrachtungsebene bis in die Randzone des Bauteils hinein. Hierzu wurden ausgehend von Daten aus dem jeweiligen Fertigungsprozess ein Digitaler Schatten und modellbasiert thermo-mechanische Beanspruchungskollektive ermittelt, die auf die Bauteilrandzone einwirken. Aus diesen äußeren Beanspruchungen lassen sich wiederum modellbasiert Gefügeveränderungen und damit ein Digitaler Zwilling mit spezifischen lokalen Oberflächeneigenschaften ableiten.

Ein weiteres Fallbeispiel, die schleifende Bearbeitung von Vollhartmetallwerkzeugen, bezieht sich in gleicher Weise auf lokale Randzonen- und Geometrieigenschaften

ändert die Perspektive jedoch auf den Digitalen Schatten und Zwilling eines Werkzeugs in der Herstellungsphase.

Der letzte Abschnitt des Beitrags zeigt letztlich den Mehrwert des Digitalen Zwillings aus ingenieurwissenschaftlicher, ökonomischer und ökologischer Sicht auf. Entsprechend sollte in Zukunft das Konzept zunehmend und systematisch im Bereich der Fertigungstechnik eingesetzt werden, um Prozessgrenzen zu überwinden, Ressourcen zu schonen und einen Mehrwert zu schaffen.

Danksagung

Die Autoren möchten sich ganz herzlich bei Dr. Kristian Arntz, Dr. Andreas Klink, Philipp Ganser, Tim Grunwald und Daniel Schraknepper für die wertvollen Diskussionen und Anregungen in der Konzeptionsphase zur Definition des Digitalen Zwillings im Kontext Produktion und Fertigung bedanken. Für die Unterstützung bei der Ausgestaltung der Fallbeispiele geht ein besonderer Dank an Kilian Fricke, Raphael Heß, Markus Meurer, Tommy Venek und Christian Wrobel.

Literatur

- [1] Lindgren, M.: 21st Century Management: Leadership and Innovation in the Thought Economy. (Reihe: Palgrave Studies in European Union Politics). London: Palgrave Macmillan, 2012.
- [2] Grieves, M.; Vickers, J.: Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. In: Kahlen, F.-J.; Flumerfelt, S.; Alves, A. (Hrsg.): Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems. New Findings and Approaches. Cham: Springer, 2017, S. 85-113.
- [3] Glaessgen, E.; Stargel, D.: The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles: Structures, Structural Dynamics, and Materials and Co-located Conferences. In: 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. Honolulu, 23.-26. April 2012. Red Hook, NY: Curran, 2012. DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2012-1818>.
- [4] Boschert, S.; Rosen, R.: Digital Twin—The Simulation Aspect. In: Hehenberger, P.; Bradley, D. (Hrsg.): Mechatronic Futures. Challenges and Solutions for Mechatronic Systems and their Designers. Cham: Springer, 2016, S. 59-74.
- [5] Garetti, M.; Rosa, P.; Terzi, S.: Life Cycle Simulation for the design of Product–Service Systems. In: Computers in Industry 63. Jg., 2012, Nr. 4, S. 361–369.
- [6] Lee, J.; Lapira, E.; Bagheri, B.; Kao, H.-a.: Recent advances and trends in predictive manufacturing systems in big data environment. In: Manufacturing Letters 1. Jg., 2013, Nr. 1, S. 38–41.
- [7] Rosen, R.; Wichert, G. von; Lo, G.; Bettenhausen, K. D.: About The Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing. In: IFAC-PapersOnLine 48. Jg., 2015, Nr. 3, S. 567–572.

- [8] Schroeder, G. N.; Steinmetz, C.; Pereira, C. E.; Espindola, D. B.: Digital Twin Data Modeling with AutomationML and a Communication Methodology for Data Exchange. In: IFAC-PapersOnLine 49. Jg., 2016, Nr. 30, S. 12–17.
- [9] Canedo, A.: Industrial IoT lifecycle via digital twins. In: Proceedings of the Eleventh IEEEACMIFIP International Conference on HardwareSoftware Codesign and System Synthesis. Pittsburgh, PA, USA, 2.-7 Oktober 2016. New York, NY: ACM 2016. DOI: <https://doi.org/10.1145/2968456.2974007>.
- [10] Negri, E.; Fumagalli, L.; Macchi, M.: A Review of the Roles of Digital Twin in CPS-based Production Systems. In: Procedia Manufacturing 11. Jg., 2017, S. 939–948.
- [11] Stark, R.; Damerau, T.: Digital Twin. In: Chatti, S.; Tolio, T. (Hrsg.): CIRP encyclopedia of production engineering. 2nd ed. Berlin: Springer, 2019.
- [12] Kritzinger, W.; Karner, M.; Traar, G.; Henjes, J.; Sihn, W.: Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. In: IFAC-PapersOnLine 51. Jg., 2018, Nr. 11, S. 1016–1022.
- [13] Abele, E. (Hrsg.): WGP-Standpunkt Industrie 4.0. URL: http://publica.fraunhofer.de/eprints/urn_nbn_de_0011-n-4024512.pdf [Stand: 27.04.2020].
- [14] Schleich, B.; Dittrich, M.-A.; Clausmeyer, T.; Damgrave, R.; Erkoyuncu, J.; Haefner, B.; de Lange, J.; Plakhotnik, D.; Scheidel, W.; Wuest, T.: Shifting value stream patterns along the product lifecycle with digital twins. In: Procedia CIRP 86, 2019, S. 3-11
- [15] Bunge, M.: A General Black Box Theory. In: Philosophy of Science 30. Jg., 1963, Nr. 4, S. 346–358.
- [16] Sohlberg, B.; Jacobsen, E. W.: Grey Box Modelling – Branches and Experiences. In: IFAC Proceedings Volumes 41. Jg., 2008, Nr. 2, S. 11415–11420.
- [17] Solomatine, D.; See, L. M.; Abrahart, R. J.: Data-Driven Modelling: Concepts, Approaches and Experiences. In: Singh, V. P.; Abrahart, R. J.; Anderson, M.; Bengtsson, L.; Cruise, J. F.; Kothyari, U. C.; See, L. M.; Serrano, S. E.; Solomatine, D. P.; Stephenson, D.; Strupczewski, W. G. (Hrsg.): Practical Hydroinformatics. Computational Intelligence and Technological Developments in Water Applications. Berlin: Springer, 2008, S. 17-30.
- [18] Klocke, F.: Fertigungsverfahren 1. Zerspanung mit geometrisch bestimmter Schneide. 9. Aufl. Berlin: Springer, 2018.
- [19] Döbel, I.; Leis, M.; Molina Vogelsang, M.; Welz, J.; Neustroev, D.; Petzka, H.; Riemer, A.; Püping, S.; Voss, A.; Wegele, M.: Maschinelles Lernen. Eine Analyse zu Kompetenzen, Forschung und Anwendung. URL: https://www.bigdata.fraunhofer.de/content/dam/bigdata/de/documents/Publicationen/Fraunhofer_Studie_ML_201809.pdf [Stand: 27.04.2020].

- [20] Arrazola, P. J.; Özel, T.; Umbrello, D.; Davies, M.; Jawahir, I. S.: Recent advances in modelling of metal machining processes. In: CIRP Annals 62. Jg., 2013, Nr. 2, S. 695–718.
- [21] Jawahir, I. S.; Brinksmeier, E.; M'Saoubi, R.; Aspinwall, D. K.; Outeiro, J. C.; Meyer, D.; Umbrello, D.; Jayal, A. D.: Surface integrity in material removal processes: Recent advances. In: CIRP Annals 60. Jg., 2011, Nr. 2, S. 603–626.
- [22] Javidi, A.; Rieger, U.; Eichsleder, W.: The effect of machining on the surface integrity and fatigue life. In: International Journal of Fatigue 30. Jg., 2008, Nr. 10-11, S. 2050–2055.
- [23] Pensacola 1996, Abschlussbericht, National Transportation Safety Board Aviation Accident Final Report, DCA96MA068.
- [24] Lazoglu, I.; Ulutan, D.; Alaca, B. E.; Engin, S.; Kaftanoglu, B.: An enhanced analytical model for residual stress prediction in machining. In: CIRP Annals 57. Jg., 2008, Nr. 1, S. 81–84.
- [25] Augspurger, T.; Bergs, T.; Döbbeler, B.: Measurement and Modeling of Heat Partitions and Temperature Fields in the Workpiece for Cutting Inconel 718, AISI 1045, Ti6Al4V, and AlMgSi0.5. In: Journal of Manufacturing Science and Engineering 141 Jg., 2019, Nr. 6. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4043311>.
- [26] Umbrello, D.; Filice, L.: Improving surface integrity in orthogonal machining of hardened AISI 52100 steel by modeling white and dark layers formation. In: CIRP Annals 58. Jg., 2009, Nr. 1, S. 73–76.
- [27] Buchkremer, S.: Irreversible Thermodynamics of Nano-Structural Surface Modifications in Metal Cutting. Diss. RWTH Aachen, 2017.
- [28] Klocke, F.; Münstermann, S.; Schröder, K.-U.; Apel, M.; Binder, M.; Butz, A.; Döbbeler, B.; Fischersworing-Bunk, A.; Prahl, U.; Ruess, M.: Integrative Werkstoff- und Prozesssimulation. In: Brecher, C.; Klocke, F.; Schmitt, R.; Schuh, G. (Hrsg.): AWK Aachener Werkzeugmaschinen Kolloquium 2017. Internet of Production für agile Unternehmen. Aachen, 18.-19. Mai 2017. Aachen: Apprimus, 2017.
- [29] Gierlings, S.: Model-based temperature monitoring for broaching safety-critical aero engine components. Diss. RWTH Aachen, 2015.
- [30] Brinksmeier, E.; Reese, S.; Klink, A.; Langenhorst, L.; Lübben, T.; Meinke, M.; Meyer, D.; Riemer, O.; Sölter, J.: Underlying Mechanisms for Developing Process Signatures in Manufacturing. In: Nanomanufacturing and Metrology 1. Jg., 2018, Nr. 4, S. 193–208.
- [31] Klocke, F.; Mohammadnejad, M.; Hess, R.; Harst, S.; Klink, A.: Phase Field Modeling of the Microstructure Evolution in a Steel Workpiece under High Temperature Gradients. In: Procedia CIRP 71, 2018, S. 99-104
- [32] Hauschild, M. Z.: Introduction to LCA Methodology. In: Hauschild, M. Z.; Rosenbaum, R. K.; Olsen, S. I. (Hrsg.): Life Cycle Assessment. Theory and Practice. Cham: Springer, 2018, S. 59-66.