

Engineering 4.0

Grundzüge eines Zukunftsmodells

Eine Studie im Rahmen der Begleitforschung zum
Technologieprogramm AUTONOMIK für Industrie 4.0
des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie

Impressum

Herausgeber

Begleitforschung AUTONOMIK für Industrie 4.0
iit-Institut für Innovation und Technik in der
VDI/VDE Innovation + Technik GmbH
Alfons Botthof
Steinplatz 1 | 10623 Berlin
alfons.botthof@vdivde-it.de

www.autonomik40.de

Autoren

Dr. Matthias Künzel
Dr. Jens Schulz
Peter Gabriel

Gestaltung

Loesch*Hund*Liepold
Kommunikation GmbH
Hauptstraße 28 | 10827 Berlin
autonomik@lhk.de

Stand

Juli 2016

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhalt

Management Summary	4
1 Einleitung	5
2 Methodik	7
3 Der Status Quo des Engineering	8
3.1 Das gegenwärtige Verständnis von Engineering	8
3.2 Klassische Phasenmodelle	9
3.3 Neue Gestaltungsansätze des Engineering	10
3.3.1 Smart Engineering	10
3.3.2 Digital Engineering	11
3.3.3 Virtual Engineering	11
3.3.4 Systems Engineering	11
3.4 Einflüsse durch sich wandelnde Wertschöpfungsstrukturen	12
3.4.1 Die stärkere Integration des Kunden in die Produktgestaltung	12
3.4.2 Der Ausbau von produktbezogenen Dienstleistungen	13
3.4.3 Zunehmende Interdisziplinarität des Engineering	13
3.4.4 Additive Fertigungsverfahren	14
4 Herausforderungen und Lösungsansätze aus Sicht der Industrie	15
4.1 Erweiterte Aufgaben für künftige Engineering-Werkzeuge	15
4.1.1 Ausgangslage	15
4.1.2 Einschätzung aus Praxissicht	15
4.1.3 Schlussfolgerungen und Handlungsbedarf	17
4.2 Das Engineering nachhaltiger Produkte	18
4.2.1 Ausgangslage	18
4.2.2 Einschätzung aus Praxissicht	19
4.2.3 Schlussfolgerungen und Handlungsbedarf	20
4.3 Agile Vorgehensmodelle	20
4.3.1 Ausgangslage	20
4.3.2 Einschätzung aus Praxissicht	21
4.3.3 Schlussfolgerungen und Handlungsbedarf	21
4.4 Rechtliche Fragen	23
4.4.1 Ausgangslage	23
4.4.2 Einschätzung aus Praxissicht	23
4.4.3 Schlussfolgerungen und Handlungsbedarf	25
4.5 Neue Kooperations- und Geschäftsmodelle	25
4.5.1 Ausgangslage	25
4.5.2 Einschätzung aus Praxissicht	26
4.5.3 Schlussfolgerungen und Handlungsbedarf	28
5 Engineering 4.0 – Grundzüge eines Zukunftsmodells	29
Literaturverzeichnis	33

Management Summary

„Die sogenannte vierte industrielle Revolution zeichnet sich durch Individualisierung bzw. Hybridisierung der Produkte und die Integration von Kunden und Geschäftspartnern in die Geschäftsprozesse aus.“ (Bendel oJ) Mit Sensoren und Rechnerkapazitäten ausgestattete Werkstücke und Logistikträger erlauben eine sich weitgehend selbst steuernde, ausdifferenzierte Produktion und Logistik bis hin zum kundenindividuellen Produkt; die bekannten Geschäftsmodelle des Verkaufs oder der Vermietung von Produkten werden durch neue Dienstleistungskonzepte ergänzt oder sogar ersetzt.

Während sich diese von Wirtschaft und Politik gemeinsam vorangetriebene Vision mittlerweile sehr konkret in Pilotprojekten, Referenzmodellen, Standards, Normen und Technologien niederschlägt, ist **noch weitgehend unklar, wie das Engineering** von Industrieprodukten und produktnahen Dienstleistungen **zukünftig gestaltet** werden muss.

Ausgehend von einer Literaturanalyse wurde festgestellt, dass **die bisherigen** phasenorientierten **Vorgehensmodelle** und die streng hierarchische Betrachtung der verschiedenen Technikdisziplinen für das Engineering im Rahmen von Industrie 4.0 **nicht hinreichend sind**. Darauf aufbauend wurde in Experteninterviews und einem nachfolgenden Validierungs-Workshop mit Industrievertretern diskutiert, welchen Anforderungen sich das Engineering zukünftig stellen muss und wie **Grundzüge seiner zukünftigen Gestaltung** aussehen.

Das Kernelement des zukünftigen Engineerings wird eine **Feedback-Architektur** sein. In dieser wird systematisch Wissen aus späteren Phasen des Produktlebenszyklus für frühere Phasen bereitgestellt, sei es für die Anpassung und Weiterentwicklung neuer Produkte und ihrer Fertigung oder für das Engineering neuer Produkte.

Die Umsetzung dieser Architektur erfolgt in einem **virtuellen Abbild**, das eine ganzheitliche, **modellbasierte IT-gestützte Betrachtung des Produktlebenszyklus** von

der Bedarfsanalyse über die Konstruktion und die Produktion hin bis zum Betrieb und zum Recycling ermöglicht. Dafür werden **langlebige Informationssysteme** benötigt, die für die Lebensdauer eines Produkts die Speicherung, Nutzung und Bearbeitung seines virtuellen Abbilds erlauben.

In den Konstruktions-, Simulations- und Visualisierungssystemen wird eine **simultane Betrachtung der Ingenieursdisziplinen** erfolgen, u. a. etwa Softwaretechnik, Elektronik und Mechanik. Notwendiger Bestandteil des Engineering wird eine **integrierte umweltökonomische Betrachtung** von Produkt, Services und Dienstleistungen sein. Konstruktion, Produktion und Zertifizierung werden miteinander verzahnt. Soweit ohne Qualitätsverlust machbar, ersetzt die **begleitende virtuelle Zertifizierung** die nachgelagerte Zertifizierung des produzierten Produkts.

Zukünftige Engineering-Methoden und -Werkzeuge ermöglichen **partizipative und agile Kooperationsmodelle**, in die bei Bedarf Kunden, Zulieferer, Entwicklungspartner und technische Dienstleister eingebunden werden können. Zu einem **umfassenden Produktansatz** gehören auch die Definition und der Betrieb sowohl der produktintegrierten Services als auch der produktbegleitenden Dienstleistungen. Das schließt die Betrachtung der entsprechenden Geschäftsmodelle mit ein.

Der Einsatz digitaler Werkzeuge im Engineering wird einfache Konstruktionsarbeiten rationalisieren und letztendlich automatisieren. Das Engineering umfasst jedoch auch zukünftig, in durchaus unterschiedlichem Umfang, **kreative Prozesse** und kann damit nicht von regelbasierten Automaten geleistet werden. Somit bleibt der **Mensch** weiterhin **bestimmender Akteur** dieser Prozesse.

1 Einleitung

In der ersten Phase der Diskussion um Industrie 4.0 standen Aspekte der Produktionsorganisation sowie der Logistik im Mittelpunkt der Betrachtungen.¹ Dazu gehören solche Aspekte wie Losgröße 1, Produkte, die ihre Fertigung selbst organisieren, und neue, datenbasierte Geschäftsmodelle. In der weiteren Evolution des Paradigmas wurde deutlich, dass die Interaktion der Produkte mit der realen Welt weitere Fähigkeiten benötigt und sozio-ökonomische Veränderungen nach sich zieht. Beispielsweise traten solche Themen wie Sensoren, Aktoren, autonome Systeme, aber auch rechtliche Fragen und die Ausgestaltung von Arbeit in der Zukunft hinzu. Mit der engen Verzahnung von Industrie 4.0 mit neuen Produktionsverfahren (Additive Fertigungsverfahren, Einsatz neuer Materialien, modulare und rekonfigurierbare Produktkonzepte etc.) wird eine weitere neue Entwicklungsstufe erreicht und der gesamte Produktlebenszyklus von der Idee bis hin zum Recycling in die Betrachtung einbezogen.

Das Engineering wird damit zum einem wirtschaftlichen und technischen Schlüsselement des Produktlebenszyklus in Industrie 4.0: Untersuchungen belegen, dass 70 bis 80 Prozent der späteren Produktgestehungskosten bereits mit dem Produktdesign festgelegt werden (Sachse et al. 1999). Zudem wächst die Erkenntnis, dass innovative Gestaltungsmöglichkeiten der Automatisierung bzw. der Vernetzbarkeit von Produkten und Dienstleistungen bislang nur unzureichend in die Produktgestaltung einfließen. Gerade diese bilateralen Interdependenzen im Produktlebenszyklus versprechen hohe Innovationspotenziale. Ein weiteres Merkmal künftiger Entwicklungen in der Produktgestaltung wird, wie bereits jetzt deutlich erkennbar ist, die stärkere temporäre Zusammenarbeit in interdisziplinären Teams über Unternehmensgrenzen

hinweg sein. Ebenso gibt es einen wachsenden Bedarf, die Kunden direkt in die Produktgestaltung einzubeziehen.

Die bestehenden konventionellen Vorgehensmodelle sind nicht in hinreichendem Maß geeignet, diese wachsende Komplexität und Interdisziplinarität von Engineering-Prozessen zu beherrschen. Vielmehr bedarf es eines ganzheitlichen Ansatzes, um eine durchgängige Vorwärtsvernetzung und Rückkopplung entlang der Wertschöpfungskette, entlang des Lebenszyklus und über Unternehmensgrenzen hinweg zu realisieren. Die kaum mehr zu überblickende Vielfalt von Veröffentlichungen zum Entwurf unter den Bedingungen der digitalen Industrie 4.0, ist geprägt von unterschiedlichen Visionen einer durchgängig digitalen Welt, die insbesondere im akademischen Umfeld intensiv verfolgt werden. Die Ableitungen konkreter Handlungsempfehlungen für das produzierende Gewerbe, Darlegungen geeigneter Methoden und Instrumente sowie Systematisierungen stehen hingegen noch weitgehend aus.

Ziel dieser Studie ist es, die aktuellen Entwicklungen im Engineering in der Industrie zu dokumentieren, ihre Wechselwirkung mit anderen Querschnittsthemen der digitalen Wirtschaft – wie z. B. den rechtlichen Herausforderungen und der Entwicklung neuer Geschäftsmodelle – zu analysieren und Ansätze und Herausforderungen für die weitere Entwicklung des Engineerings herauszuarbeiten. Dafür wurden zunächst Einzelinterviews mit Industrievertretern geführt, deren Ergebnisse dann zusammengefasst und in einem Review-Workshop mit Vertretern aus Innovationsclustern validiert wurden.

Kapitel 2 beschreibt die Methodik der vorliegenden Studie. Kapitel 3 geht von der heute üblichen Definition des Begriffs Engineering aus und beleuchtet einerseits aktuelle Forschungsansätze und -ergebnisse und andererseits neu aufkommende Trends, die die Ausprägung des Engineering beeinflussen. Kapitel 4 fasst für die fünf thematischen Felder Werkzeuge, Nachhaltigkeit, Agilität, Recht

¹ Die Plattform Industrie 4.0 – ein von der Bundesregierung ins Leben gerufener Zusammenschluss von Politik, Wirtschaft, Verbänden, Wissenschaft und Gewerkschaft – subsumiert unter Industrie 4.0 die „vierte industrielle Revolution“, in der Produktions- und Logistiksysteme durchgehend digitalisiert werden und sich weitgehend selbst steuern, bei Bedarf auch in unternehmensübergreifenden Wertschöpfungsketten (siehe www.plattform-i40.de).

sowie Kooperations- und Geschäftsmodelle die Ergebnisse aus den Expertengesprächen und dem Validierungsworkshop zusammen. Dazu werden jeweils Ausgangslage und Einschätzung aus Praxissicht beleuchtet und darauf aufbauend Schlussfolgerungen gezogen und Handlungsbedarfe abgeleitet. Kapitel 5 fasst die Ergebnisse der Studie zusammen und beschreibt Grundzüge eines zukünftigen Engineering 4.0.

Die Autoren bedanken sich herzlich bei den Experten für die Teilnahme an den Interviews bzw. am Workshop:

- Albert Groz, truPhysics GmbH, Stuttgart
- Dr. Peter Heiligensetzer, MRK Systeme GmbH, Augsburg
- Bernd Kärcher, Festo AG & Co. KG, Esslingen
- Andreas Keil; InnoZentOWL e. V.; Paderborn
- Lucas Kiefer, Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU, Augsburg
- Dr. Jan Kostelnik, Würth Elektronik GmbH & Co. KG, Rot am See
- Dr. Arnd Menschig, Carl Zeiss 3D Automation GmbH, Aalen
- Prof. Dr. Peter Post, Festo AG & Co. KG, Esslingen
- Prof. Dr. Wolfgang Rosenstiel, Eberhard Karls Universität Tübingen, (in seiner Eigenschaft als Vorstandsvorsitzender des edacentrum e. V., Hannover)
- Dr. Andreas Rüdener, Rüdener 3D Technology GmbH, Karlsruhe
- Dr. Christoph Runde, Virtual Dimension Center Fellbach, Kompetenzzentrum für virtuelle Realität und Kooperatives Engineering e. V.
- Nils Woldenga, microTEC Südwest, Freiburg

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Studie liegt ausschließlich bei den Autoren.

Die Studie wurde im Rahmen der Begleitforschung zum Technologieprogramm „AUTONOMIK für Industrie 4.0“ des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie erstellt.

2 Methodik

Für die Erarbeitung der vorliegenden Studie wurde ein mehrstufiger Ansatz aus Literaturrecherche und strukturierter Diskussion mit Industrievertretern als methodisches Vorgehen gewählt (Abbildung 1). Ein besonderer Fokus lag auf der Berücksichtigung der Sichtweise der Wirtschaft.

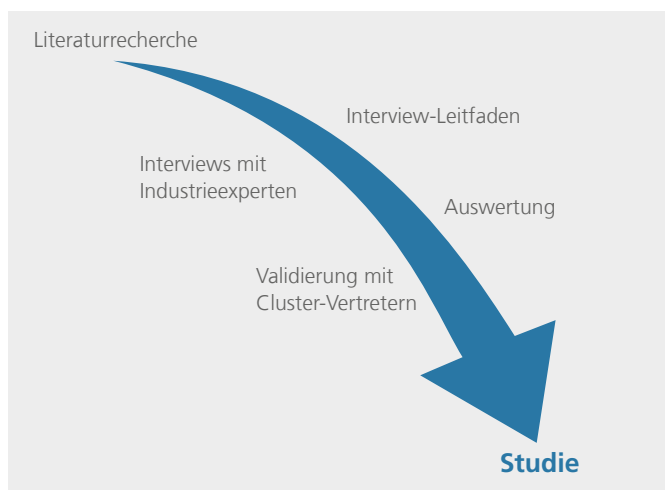


Abbildung 1: Prozessmodell Kurzstudie Engineering 4.0

Auf Basis der aktuellen Fachdiskussion wurde ein Leitfaden für strukturierte Interviews mit Industrievertretern erstellt. Im Leitfaden wurden insbesondere folgende Fragen angerissen:

- Welche neuen technischen Methoden sind in Konstruktion und Planung notwendig, um die Verzahnung aller Stufen des Produktlebenszyklus zu gewährleisten? Was ist davon heute bereits verfügbar? Welche Rolle spielt die Standardisierung in diesem Prozess?
- Wie kann der Anspruch, ein nachhaltiges Engineering zu betreiben, eingelöst werden?
- Wie ändern sich die Wertschöpfungsketten und damit auch die Geschäftsmodelle im Engineering? Wie interagieren neue Geschäftsmodelle und zukünftige Engineeringprozesse? Gibt es Möglichkeiten, Engineeringprozesse effizienter zu gestalten?

- Welche rechtlichen Herausforderungen ergeben sich mit der Erweiterung des Engineering in Industrie 4.0?

Daneben wurden auch offene Fragen nach weiteren Einflussfaktoren und Trends für das Engineering gestellt.

Es wurden Gespräche mit Vertretern von Carl Zeiss 3D Automation, Aalen; Festo, Esslingen; MRK Systeme, Augsburg (alle drei Automatisierungstechnik); truPhysics, Stuttgart (Simulationssoftware); Würth Elektronik (Elektronikhersteller) und Rüdener 3D Technology, Karlsruhe (3D-Visualisierungen) geführt. Die Interviewpartner decken sowohl das Spektrum von KMU bis hin zum Großunternehmen als auch die Wertschöpfungskette von Industrie 4.0 ab.

Innovationscluster leisten heute essentielle Beiträge für die Beschleunigung von Innovationsprozessen im Sinne der Akteure, insbesondere bei KMU und bei der Interaktion zwischen Industrie und Forschung (Lämmer-Gamp et al. 2014; Künzel et al. 2015). Für die Validierung der zusammengefassten Ergebnisse wurde deshalb ein Workshop mit Vertretern von deutschen Innovationsclustern durchgeführt. Die beteiligten Cluster bündeln jeweils mittelständische Unternehmen und anwendungsnahe Forschungseinrichtungen und verfügen damit über eine sehr breite Sicht auf die industrielle Praxis. Am Workshop waren beteiligt: das Edacentrum, Hannover (Cluster mit thematischem Schwerpunkt Entwurfsautomatisierung elektronischer Systeme); InnoZentOWL, Paderborn (branchenübergreifendes Cluster zum Einsatz von IKT-Technologien im Mittelstand); microTEC Südwest, Freiburg (branchenübergreifendes Cluster mit Schwerpunkt Mikrosystemtechnik) und Virtual Dimension Center Fellbach (Kompetenznetzwerk für Virtuelles Engineering). Am Workshop nahm auch ein Vertreter des Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU als Vertreter der anwendungsnahe Forschung teil.

3 Der Status Quo des Engineering

Zu einer Bestandsaufnahme des Engineering gehört zunächst ein Blick auf das heute übliche Verständnis dieses Begriffs, bei dem häufig noch zu sehr nur an die Konstruktion gedacht und eine systemische Betrachtung von Produkt, Produktion und Nutzung vernachlässigt wird. Ausgehend von den Phasenmodellen für das Engineering, die sich in den letzten 40 Jahren weit verbreitet haben, betrachten wir dann auch neue Gestaltungsansätze aus der Forschung, wie u. a. das Systems Engineering. In einem zweiten Strang werden ausgewählte Einflussfaktoren auf die Praxis des Engineering beleuchtet. Hier reicht die Spanne von der verstärkten Kundeneinbindung in Engineering-Prozesse bis hin zu den additiven Fertigungsverfahren.

Langfristig wird auch die laufende Diskussion um Referenzarchitekturen für Industrie 4.0 einen starken Einfluss auf das Engineering haben. Das betrifft zunächst die Referenzarchitektur für Industrie 4.0 (RAMI 4.0), die in Arbeitsgruppen der Plattform Industrie 4.0 erarbeitet wurde (VDI/VDE-GMA und ZVEI 2015). Im internationalen Kontext gilt es darüber hinaus die Aktivitäten des Industrial Internet Consortium (IIC) zu beachten. Hier wurde weitgehend zeitgleich ein Beschreibungsansatz für eine Industrial Internet Reference Architecture (IIRA, Version 1.7) vorgelegt, der den gesamten Wertschöpfungsprozess unter Einbezug aller relevanten Akteursgruppen umfasst (Industrial Internet Consortium 2015). Gemeinsam sind beiden Ansätzen die zentralen Rollen von Produktlebenszyklus und unternehmensübergreifender Wertschöpfungskette als prägende Gestaltungselemente. Damit geben RAMI und IIRA zumindest erste grobe Richtungen für das Engineering in Industrie 4.0 vor. Zurzeit fokussieren sich die Arbeiten verständlicherweise aber noch auf die Ausarbeitung und Vervollständigung der Architekturmodelle, Vorgaben für das Engineering werden (noch) sehr knapp formuliert.

3.1 Das gegenwärtige Verständnis von Engineering

Nicht erst im Kontext von Industrie 4.0 erweist sich der Begriff Engineering trotz oder gerade wegen seiner

häufigen Verwendung als diffus. In zahlreichen Anwendungskontexten wird die zentrale Rolle des Engineering hervorgehoben, ohne dass eine eindeutige Interpretation oder gar eine Systematisierung des Begriffs erfolgt. In einfacher sprachlicher Übersetzung erfolgt im deutschen Sprachraum häufig eine Gleichsetzung von Engineering mit Ingenieurwissenschaften bzw. technischen Wissenschaften². Das Spektrum der Disziplinen reicht hier von Mechanik und Elektronik über Chemie und neue Materialien bis hin zu Biotechnologie und Verfahrenstechnik. Vor dem Hintergrund der Zielrichtung der vorliegenden Studie auf Engineering für Industrie 4.0 erfolgt eine Einschränkung der naturwissenschaftlich-technischen Betrachtungen auf die für den Maschinen-, Anlagen- oder Automobilbau wichtigen, von Konstruktionsaspekten geprägten Disziplinen (Mechanik, Elektrotechnik und Elektronik).

Aber auch ein umfassender naturwissenschaftlich-technischer Ansatz greift im Allgemeinen zu kurz. In erweiterter Sichtweise zielt Engineering auf die Erfassung und Gestaltung ganzheitlicher Zusammenhänge unter interdisziplinären Gesichtspunkten, die auch gesellschaftliche und ökonomische Implikationen, speziell im Hinblick auf die Veränderung von Wertschöpfungsketten, berücksichtigt³.

Weitergehend ergänzt um eine ökologische Perspektive im Sinne des verantwortungsbewussten Umgangs mit der Umwelt und knappen Ressourcen werden auch die langfristigen Folgen wirtschaftlichen Handelns entlang der Wertschöpfungskette in den Gestaltungsbereich des Engineering einbezogen. Diese Sichtweise umfasst den gesamten Produktlebenszyklus und reicht von der ersten Produktidee über den Produktgestehungsprozess bis hin zum finalen Recycling.

² Vgl. zur Gleichsetzung von Engineering und Ingenieurwissenschaften in der deutschen Fassung von Wikipedia: <https://de.wikipedia.org/wiki/Ingenieurwissenschaften>.

³ Vgl. hierzu die englischsprachige Fassung von Wikipedia: <https://en.wikipedia.org/wiki/Engineering>.

All diese Betrachtungswinkel gehen deutlich über die speziell im deutschen Sprachraum häufig anzutreffende Fokussierung auf Fragen der Produktionsgestaltung (Konstruktion i. e. S.) und Automatisierung hinaus, in der eine Auseinandersetzung mit dem Themenfeld Engineering häufig erst mit der Einsteuerung der Produkte in die Produktion beginnt. Diese Sichtweise klammert eine Auseinandersetzung mit frühen Phasen der Produktgestaltung, welche die Bedarfsanalyse sowie Entwurfs-, Berechnungs-, Konstruktions- und Entwicklungsprozesse beinhalten, weitgehend aus.

Diese eingeschränkte Sicht wird zunehmend kritisch gesehen, da Untersuchungen belegen, dass ein Großteil der späteren Produktgestehungskosten bereits mit dem Produktdesign festgelegt werden. Sie begründet sich ferner in der wachsenden Erkenntnis, dass innovative Gestaltungsmöglichkeiten der Automatisierung bzw. der Vernetzbarkeit von Produkten und Dienstleistungen bislang nur unzureichend in die Produktgestaltung einfließen. Gerade diesen bilateralen Interdependenzen in Innovationsprozessen sollte in der Zukunft ein höherer Stellenwert im Rahmen der Ausgestaltung des Engineering beigemessen werden.

Diese Studie richtet den Engineering-Begriff stark auf die Anforderungen von Industrie 4.0 und deren Vorreiter-Branchen (Maschinenbau, Fahrzeugbau, Elektronik, Informationstechnik) aus, wodurch die Konstruktionstechnik eine herausgehobene Stellung erhält.

3.2 Klassische Phasenmodelle des Engineering

Seit Anfang der 1970er Jahre traten, zunehmend geprägt durch Softwareentwicklungsprojekte sowie Projektmanagement-Instrumente, unterschiedlichste Phasenmodelle hervor, welche auch die Ausgestaltung von IT-Methoden und Tools im Engineering prägten. Zunächst überwogen klassische Top-Down-Ansätze, später traten eher partizipative Bottom-Up-Ansätze hinzu. In der Folge entwickelte sich eine kontroverse Diskussion. Die wesentlichen

Kritikpunkte an zentralistischen Top-Down-Ansätzen sind die unzureichende Berücksichtigung von Umfeldfaktoren im Rahmen der Anforderungsanalyse, die mangelnde Transparenz der Entscheidungsfindung, die frühzeitige Festlegung von Entwicklungszielen sowie die geringe Reaktionsfähigkeit und Flexibilität auf kurzfristige Veränderungen. All diese Argumente erscheinen heute aktueller denn je.

Aus der Kritik heraus entstanden aus unterschiedlichen Bereichen zahlreiche Mischformen, die unter vielfältigen Bezeichnungen in der Praxis anzufinden sind. Aus der Unternehmensplanung abgeleitet finden sich als Gegenstromverfahren bezeichnete Ansätze bzw. Modelle iterativer Rückkopplungsschleifen. Das stark verbreitete V-Modell ist auf IT-Systementwicklungsprojekte der öffentlichen Hand in der Bundesrepublik Deutschland Mitte der 1980er Jahre zurückzuführen. Es wurde seither vor dem Hintergrund veränderter Anforderungen und neuer Softwareentwicklungsansätze vielfach abgewandelt und überarbeitet.

Phasenmodelle fanden auch in zahlreiche Normen Eingang und sind in unterschiedlicher Tiefe, vor allem unter Aspekten der Produkthaftung, rechtlich bindend. Im Anwendungsbereich der Softwareentwicklung wurde die benutzerorientierte Gestaltung interaktiver Systeme im Jahr 2000 in der DIN EN ISO 13407 geregelt. Diese Norm wurde im Jahr 2011 in die DIN EN ISO 9241-210 „Prozess zur Gestaltung gebrauchstauglicher interaktiver Systeme“ überführt, welche Teil einer Normenreihe zur Ergonomie der Mensch-System-Interaktion ist. In der Normenreihe DIN 69901 finden sich Regelungen zum Projektmanagement, die neben allgemeinen Grundlagen auch Beschreibungen von Prozessen, Prozessmodellen und Methoden sowie Regelungen zu Daten und Datenmodellen umfassen. Vor allem in sicherheitskritischen Bereichen dominieren weiterhin phasenorientierte Vorgehensmodelle. So gibt die IEC EN 61508 verbindliche Regelungen vor, die im Rahmen der Produktentwicklung und -herstellung von elektrischen, elektronischen sowie programmierbaren

elektronischen Systemen anzuwenden sind. Erweiternd wird dabei von einem Lebenszyklus-Modell ausgegangen, welches die funktionale Sicherheit von Produkten von ersten Entwürfen über die Markteinführung und die im Vermarktungszeitraum durchgeführten Produktänderungen bis zur Außerbetriebnahme und Entsorgung betrachtet. Dies erfordert Organisationsstrukturen und begleitende Instrumente, welche eine jederzeitige Nachvollziehbarkeit und Rückverfolgbarkeit der Produkte gewährleisten. Aktuell am weitesten gehen die in der Automotive-Industrie seit Ende 2011 verbindlichen Regelungen der ISO 26262 „Road Vehicles - Functional Safety“. Diese schreiben ein Phasenmodell für die Entwicklung vor, das funktionale und sicherheitsgerichtete Aspekte umfassend in sich vereint. Viele Aspekte dieser im Hinblick auf die funktionale Sicherheit von Straßenfahrzeugen entwickelten Norm lassen sich auch auf andere Anwendungsbereiche übertragen.

3.3 Neue Gestaltungsansätze des Engineering

Nicht nur die begrifflichen Auffassungen des Engineering und die inhaltlichen Abgrenzungen von anderen Aufgabenbereichen im Wertschöpfungsprozess sind vielfältig. In der aktuellen Diskussion finden sich darüber hinaus recht unterschiedliche Gestaltungsansätze. Hier können mehrere strategische Stoßrichtungen differenziert werden, welche im Kern verschiedene Paradigmen als treibende Kräfte notwendiger Veränderungsprozesse identifizieren. Diese unterschiedlichen Ansätze stehen aber nicht im Widerspruch zueinander: Digital Engineering und Virtual Engineering legen den Schwerpunkt auf den durchgängigen Einsatz digitaler Methoden und Verfahren bzw. auf die Verknüpfung von realen und virtuellen Artefakten. Das Smart Engineering stellt dagegen die „Intelligenz“ der Produkte und Dienstleistungen in den Vordergrund, während das Systems Engineering sich an der Gestaltung sozio-technischer Systeme ausrichtet (siehe Abbildung 2).

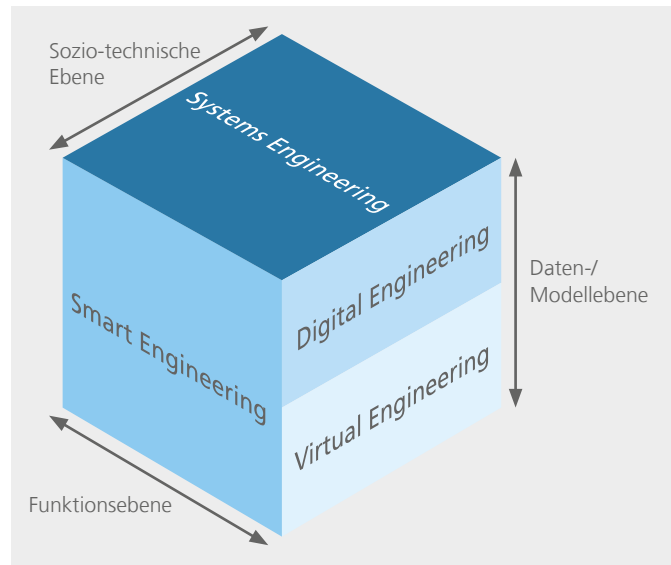


Abbildung 2: Einordnung aktueller Gestaltungsansätze des Engineering (© iit)

3.3.1 Smart Engineering

Bei diesem Ansatz steht die Entwicklung und Umsetzung „smarter“ Produkte und Services im Vordergrund (acatech 2014). Grundgedanke ist, dass solche mit Rechenkapazitäten, Sensorik und Kommunikationsschnittstellen ausgerüsteten Produkte und die sie begleitenden Dienstleistungen Veränderungen im Bereich der Prozessgestaltung sowie der eingesetzten Entwicklungsmethoden und IT-Lösungen hervorrufen. Hieraus wird ein Bedarf für neue Engineering-Methoden und Werkzeuge postuliert. Neben dem Zukunftsprojekt „Industrie 4.0“ werden dabei auch Aspekte des Zukunftsfeldes „Smarte Service Welt“ aufgegriffen (acatech 2014). Zwischen beiden Sichtweisen wird ein enger Abstimmungsbedarf gesehen (acatech 2014, S. 5). Die Mitte 2015 ins Leben gerufene Forschungsvereinigung Smart Engineering (ProSTEP iViP Verein) will sich verstärkt aus diesem Blickwinkel der Entwicklung neuer Konzepte für vernetzte Produkte, Anlagen und Informationssysteme widmen. Hierbei steht eine vertiefende Auseinandersetzung mit inhaltlichen Gestaltungsaspekten einer interdisziplinären Produktentstehung im Vordergrund. Vielfältige Impulse hat der Ansatz des Smart Engineering auch von einem breit angelegten acatech Workshop Anfang 2011 erfahren, auf dem neben interdisziplinären

Produktentwicklungsmethoden auch neue Aus- und Weiterbildungskonzepte diskutiert wurden. (Anderl et al. 2012)

3.3.2 Digital Engineering

Bei diesem Ansatz steht die durchgängige Nutzung digitaler Methoden und Werkzeuge über alle Phasen des Produktentstehungs- und Produktionsprozesses im Vordergrund. In erweiterter Sicht werden auch hier über den Gestehungsprozess hinaus alle Phasen des Produktlebenszyklus in die Betrachtung einbezogen (Schenk 2009). Die grundlegenden Anforderungen richten sich dabei auf die jederzeitige Nachverfolgbarkeit von Produkt- und Produktionsdaten, die Prozessbeherrschung, insbesondere unter Aspekten des Änderungs- bzw. Variantenmanagements sowie des Collaborative Workflow, auch über Unternehmensgrenzen hinweg. Dies erfordert einheitliche Schnittstellen sowie sichere Übermittlungs- und Speicherungsformen (z. B. Cloud-Lösungen). Weitere Impulse zeichnen sich durch Veränderungen in den Wertschöpfungsketten ab, bei denen produktbegleitende Dienstleistungen zunehmende Bedeutung erlangen. Beispiele bieten die zustandsbasierte, nutzungsabhängige Instandhaltung im Bereich von Wartung und Service, deren Daten auch in die Weiterentwicklung und Optimierung von Produkten und Produktionsanlagen einfließen sollen. Aber auch steigende Dokumentationsanforderungen hinsichtlich der Produktsicherheit sind diesem Bereich zuzuordnen. Inhaltliche Schnittmengen werden somit insbesondere zum Themenbereich „Big Data“ gesehen.

3.3.3 Virtual Engineering

Dieser Ansatz zielt überwiegend auf die Vernetzung realer und virtueller Welten. Der Ursprung geht auf die Unterstützung des Produktentwicklungsprozesses mithilfe digitaler (dreidimensionaler) Modelle zurück (Bullinger 2002; Sandler 2009, S. 293–302). Die Basis bilden Augmented Reality (AR) bzw. Virtual Reality (VR)-Tools, welche neben der Visualisierung von Entwürfen ein frühes Feedback sowie iterative und kollaborative Vorgehensweisen im Entwicklungsprozess unter Verzicht auf aufwendige sowie

zeit- und kostenintensive reale Modelle ermöglichen sollen. Hier gehen neue Entwicklungstendenzen weit über die Produktentwicklung hinaus. Neben der Produkt- und Produktionsgestaltung finden sich Ansätze zur Schulung von Mitarbeitern, zur Umsetzung digitaler Prototypen und Anschauungsobjekten unter Einbeziehung von Kunden (Endanwendern), zur virtuellen Inbetriebnahme von Produktionsanlagen sowie zur Simulation und Optimierung von Montage- und Logistikprozessen. Schnittstellen ergeben sich zudem zu Lehr- und Lernprozessen im Bereich der beruflichen und universitären Aus- und Weiterbildung. In der unternehmerischen Praxis befinden sich unterschiedliche Verfahren zur Schulung sowie zur aktiven Nutzerunterstützung in Montage-, Service- und Wartungsprozessen in der Erprobung. An mehreren Forschungseinrichtungen wurden zudem spezielle Labore für virtuelle Technologien eingerichtet⁴.

3.3.4 Systems Engineering

Dieser Ansatz stellt die Interdisziplinarität in den Vordergrund, welche zur Umsetzung zunehmend komplexer und interaktiver Produkte und Dienstleistungen benötigt wird (Plattform Industrie 4.0 2015; Abramovici et al. 2015; Gausemeier 2013, S. 20ff.). Kern bildet die Sichtweise, dass die Entwicklung und Umsetzung (sozio-) technischer Systeme zunehmend fachdisziplinübergreifend erfolgt. Hierbei gilt es die Gesamtheit aller Entwicklungsprozesse durchgängig (horizontal) und ganzheitlich (vertikal) in neuartigen Modellen über den gesamten Produktlebenszyklus abzubilden. Dieser Ansatz folgt nicht mehr primär heuristischen Vorgehensmodellen (z. B. V-Modell) und erfordert die Verfügbarkeit aller relevanten Daten und Prozessinformationen über System- und Unternehmensgrenzen hinweg. Modularisierung und Standardisierung sollen helfen, die zunehmende Komplexität zu beherrschen und eine weitgehende

⁴ Unter anderem bei: Fraunhofer IAO, Competence Center Virtual Environments (CCVE), Stuttgart; Fraunhofer IFF, Virtual Development and Training Center (VDTC), Magdeburg; Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Lifecycle Engineering Solutions Center (LESC), Karlsruhe; Virtual Dimension Center (VDC), Fellbach.

Skalierbarkeit bis hinunter zur Losgröße 1 sicherzustellen. Auch bei diesem Ansatz sollen reale Daten und Erfahrungen aus der laufenden Nutzung von Produkten und Produktionsanlagen in die Weiterentwicklung und Optimierung einfließen. Im Vergleich unterschiedlicher Gestaltungsansätze des Systems Engineering bilden sich das ganzheitliche Systemverständnis und die Betrachtung des gesamten Produktlebenszyklus als zentrale Merkmale heraus. Eine übergreifende oder gar weitgehend einheitliche Entwurfssystematik ist bislang nicht erkennbar. Es existieren vielmehr zahlreiche Einzelösungen, speziell modellbasierte Analyse- und Synthesemethoden, welche eine gute Basis zur Schaffung eines disziplinübergreifenden Systemverständnisses darstellen. Im Rahmen eines Querschnittsprojektes innerhalb des Spitzenclusters „it's OWL“ wird aktuell ein Instrumentarium für die fachdisziplinübergreifende Entwicklung intelligenter Produkte und Produktionssysteme erarbeitet, deren primäres Ziel eine ganzheitliche Methodik sowie die Bereitstellung von Werkzeugen und Erfahrungswissen ist (Fraunhofer IEM).

3.4 Einflüsse durch sich wandelnde Wertschöpfungsstrukturen

Neben den „inneren“ Treibern der Evolution von Engineering-Prozessen beeinflussen auch äußere Trends ihre Ausgestaltung. Dazu gehören insbesondere die stärkere Einbindung der Kunden in das Engineering, die wachsende Bedeutung der produktnahen Dienstleistungen, der Bedarf an einer stärkeren Verzahnung der technischen Disziplinen und der Boom der additiven Fertigungsverfahren.

3.4.1 Die stärkere Integration des Kunden in die Produktgestaltung

Unter Experten besteht eine weitgehende Einigkeit darüber, dass digitale Innovationsprozesse mit grundlegenden Veränderungen im Verhältnis von Hersteller und Kunde einhergehen. Welche Möglichkeiten der Kundeneinbindung in verschiedenen Phasen eines Produktlebenszyklus bestehen, zeigt Abbildung 3 beispielhaft auf.

Offen bleibt hierbei meist die Frage, in welcher Form Kundenbedarf und -verhalten erfasst werden können und welche Auswirkungen auf die Gestaltung künftiger Produkte und Dienstleistungen hieraus abgeleitet werden können. Diese Fragestellung findet sich vor allem in der Diskussion um komplexe Produkte und Dienstleistungen, deren Wertschöpfung sich nicht mehr eindeutig einem Marktsegment im klassischen Sinne zuordnen lässt.

Zunehmend werden diese unter dem Begriff „Smart Products“ subsumiert, denen Dank eingebetteter Intelligenz und erweiterter Speicher- und Kommunikationsfähigkeiten eigene Wertschöpfungsbeiträge zugemessen werden. Sie stellen klassische, an fachlichen Disziplinen ausgerichtete arbeitsteilige Vorgehensweisen in Frage und zeigen Wege in Richtung interdisziplinärer, vernetzter und vor allem zwischen den einzelnen Akteuren entlang der Wertschöpfungskette durchgängiger Prozesse sowie der hierfür benötigten Instrumente auf.

Kritisch für die Zukunft werden monolithische Systeme gesehen, deren Datenmodelle weitgehend starr ausgelegt sind und weiterhin der klassischen Trennung von

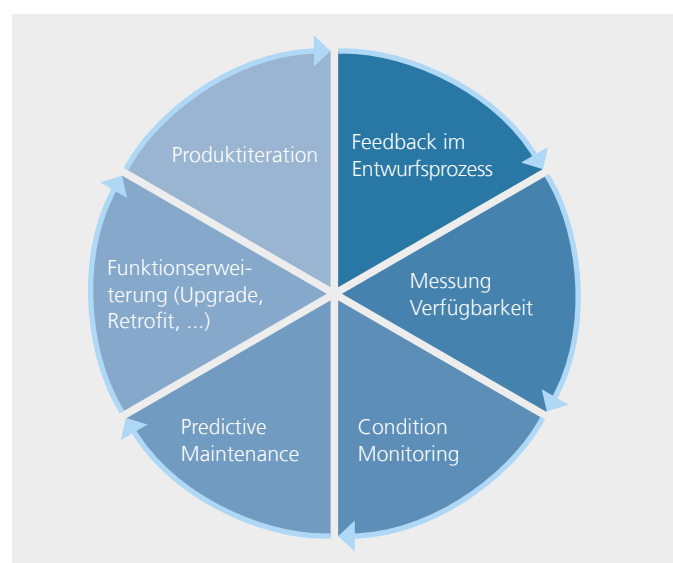


Abbildung 3: Ausgewählte Methoden der Kundenintegration in verschiedenen Phasen des Produkt-Life-Cycle (© iit)

Produktplanung, Produktentwicklung sowie Prozessplanung und -steuerung folgen (Geisberger und Broy 2012). Hier wird eine stärkere Integration von Produkt- und Produktionssystementwicklung gefordert. Fehlende bidirektionale Durchgängigkeiten von Methoden und Instrumenten werden als wesentliche Innovationshemmnisse gesehen. Letztlich ist die systemimmanente Kritik an phasenorientierten Engineering-Ansätzen im Kern auf den Aspekt unzureichender Rückkopplungen zurückzuführen.

3.4.2 Der Ausbau von produktbezogenen Dienstleistungen

Der Lebenszyklus von Produkten wird insgesamt zunehmend durch produktbezogene Dienstleistungen geprägt. An Bedeutung gewinnen vor allem hybride Leistungsbündel, deren Geschäftsmodelle auf flexiblen und kundenspezifischen Kombinationen von Produkt- und Service-Modulen bestehen.

Eine neue Qualität von Kundeneinbindung in der digitalen Wirtschaft kann mit dem durchgängigen Feedback aus Fertigung und Einsatz an das Engineering erreicht werden. Telemetriedatensysteme können umfassende Informationen über die Betriebszustände von Produkten sammeln. Die Analyse von Ausfallmechanismen, Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit aber auch Energieverbrauch schafft die Grundlage für die laufende inkrementale Verbesserung von Produkten.

Für all diese Services benötigt Engineering 4.0 eine vorausschauende Entwurfskultur. Zentrale Herausforderung hierfür ist die durchgängige Produktdokumentation („Digitaler Produktschatten“) einschließlich aller kunden- und unternehmensspezifischen Anpassungen und Änderungen über den Lebenszyklus. Dabei sind die Lebensdauer der Produkte (insbesondere langlebige Investitionsgüter) und die damit verbundenen Anforderungen an die langfristige Verfügbarkeit von Datenformaten in besonderer Weise zu berücksichtigen. Auch sind Konzepte für die Integration von Bestandsgütern zu entwickeln.

Die vorstehenden Betrachtungen beziehen sich auf eine Maschine oder eine Anlage. Eine neue Qualität von Mehrwert kann erreicht werden, wenn Daten mehrerer Maschinen bzw. Anlagen ausgewertet und verknüpft werden können. Dafür notwendige offene Service-Plattformen können im Widerspruch zu den wirtschaftlichen Interessen der einzelnen Maschinenhersteller stehen, die gegenwärtig ihre eigenen proprietären Service-Plattformen am Markt positionieren. Zumindest geeignete Schnittstellen sind aus der Sicht der Endkunden wünschenswert, da diese meist über einen heterogenen, historisch gewachsenen Maschinenpark verfügen.

3.4.3 Zunehmende Interdisziplinarität des Engineering

Die zunehmende Funktionsintegration erfordert eine immer engere Abstimmung des Engineering zwischen den verschiedenen Disziplinen (Mechanik, Elektronik, Fluidik etc.). Die bisher verbreiteten getrennten Engineering-Prozesse der Einzeldisziplinen stoßen damit zunehmend an Grenzen – einerseits verursacht durch wachsende Interdependenzen – andererseits verursacht durch die zeitliche Verkürzung des Engineering-Prozesses. Als Vorreiter für eine Durchgängigkeit von Engineering-Prozessen kann die Halbleiterindustrie gesehen werden. Viele aktuelle Tendenzen der digitalen Wirtschaft wie schnelle Generationenwechsel, neue Fertigungstechnologien oder das Ausreizen neuer technologischer Möglichkeiten für Innovationen sind in dieser Branche bereits heute verbreitet. Der Innovationsdruck ist entsprechend hoch, das gilt insbesondere für proprietäre Elektronik- und Mikrosystemtechnikkomponenten für den Einsatz in stückzahlintensiven Endprodukten wie PKW.

Der Automotive-Sektor stellt hohe Anforderungen an elektronische Komponenten hinsichtlich Lebensdauer, Robustheit, Temperaturregime und Ausfallsicherheit bei gleichzeitig engen Kostenvorgaben. Für zukünftige Elektroautos erreichen diese Anforderungsprofile (Constraints) eine neue Qualität. Bisher übliche Vorgehensweisen in der Automobilelektronik zur Absicherung der geforderten geringen Ausfallraten wie die Beschränkung auf

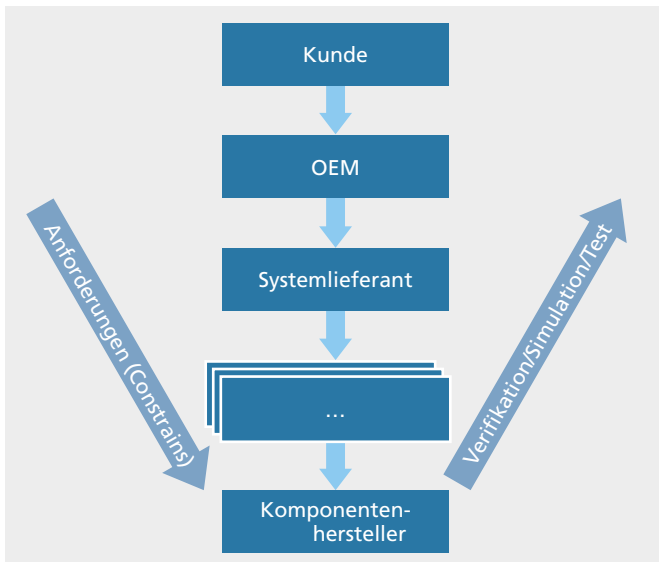


Abbildung 4: Modell des durchgängigen Elektronik- / Mikrosystem-Entwurfs (© iit)

ausgereifte („sichere“) Technologien oder die Einplanung von Sicherheitsmargen stoßen damit an ihre Grenzen. Es ist deshalb von strategischer Bedeutung für diese Branche, dass derartige Anforderungsprofile zuverlässig vom OEM (OEM: Original Equipment Manufacturer, Erstausrüster) über den Systemlieferanten bis hin zum Komponentenhersteller eines integrierten Schaltkreises weitergegeben, berücksichtigt und überprüft werden. Die Umsetzung dieser Durchgängigkeit ist bisher noch nicht Stand der Technik, sondern Gegenstand interdisziplinärer Forschung,⁵ wie (Müller-Pschorr und Treytnar 2011) zeigt.

Der Grundansatz der erfolgreich entwickelten und prototypisch implementierten Methodik wird in Abbildung 4 gezeigt und basiert auf dem V-Modell in der Softwareentwicklung (Der Beauftragte der Bundesregierung für Informationstechnik). Dabei wurden die Herausforderungen und Rahmenbedingungen herausgearbeitet. Die Ergebnisse dieser Projekte sind jedoch nicht mit der Verfügbarkeit entsprechender durchgängiger Entwurfswerkzeuge gleichzusetzen, vielmehr stellen sie einen Proof-of-Principle dar.

⁵ Das BMBF-Projekt „Robuster Entwurf von neuen Elektronikkomponenten für Anwendungen im Bereich Elektromobilität“ (RESCAR 2.0) war ein früher Vorreiter dieser Entwicklung.

3.4.4 Additive Fertigungsverfahren

Die aktuelle Weiterentwicklung der Produktionstechnik wird von einer ganzen Reihe von Teildisziplinen getragen, beispielhaft seien hier Leichtbau, Bionik oder neue Materialien genannt. Zur Realisierung des Industrie-4.0-Paradigmas von der Losgröße 1 im Massenmarkt stellen additive Fertigungsverfahren aktuell den wichtigsten Trend dar. Diese Verfahren haben das Potenzial, die zukünftigen Engineering-Prozesse wesentlich zu beeinflussen:

„Unter ‚additiv‘ werden alle Herstellverfahren zusammengefasst, bei denen der Werkstoff zur Erzeugung eines Bauteils schichtweise hinzugefügt wird. Das steht im Gegensatz zu den klassischen subtraktiven Fertigungsverfahren wie Fräsen, Bohren und Drehen, bei denen Material abgetragen wird, um das endgültige Bauteil zu erzeugen. Das Schichtbauprinzip ermöglicht es, geometrisch komplexe Strukturen herzustellen, die mit konventionellen Fertigungsverfahren nicht oder nur aufwendig realisiert werden können“ (VDI 2014, S. 4).

Hohes ökonomisches Potenzial weisen additive Fertigungsverfahren zunächst im Prototypenbau auf. In der regulären Fertigung kommen sie vor allem bei kleinen Bauteilen, komplexen Geometrien und kleinen Stückzahlen zum Einsatz, da, abgesehen von der universell einsetzbaren, jedoch kostenintensiven Anlage, keine Fixkosten für proprietäre Werkzeuge anfallen und keine Korrelation zwischen Geometriekomplexität und Herstellungskosten besteht. Eine Übersicht zum technologischen Reifegrad der unterschiedlichen Verfahren sowie deren Einsatzgebiete ist in (Richter und Wischmann 2016) enthalten.

Additive Fertigungsverfahren beeinflussen das Engineering damit an zwei Stellen: Sie ermöglichen ein schnelleres Prototyping und damit eine frühere und engere Integration des Kunden in den Prozess, und sie erlauben, wo einsetzbar, einen schnelleren Übergang von der Konstruktion zur Fertigung.

4 Herausforderungen und Lösungsansätze aus Sicht der Industrie

Während sich für den bislang noch eher vagen Begriff „Industrie 4.0“ mit den Referenzarchitekturen RAMI und IIRA in der Fachöffentlichkeit langsam ein breites gemeinsames Verständnis herausbildet, ist die Rolle des Engineering in diesem neuen Paradigma der Produktionstechnik noch weitgehend unklar. In den Einzelinterviews und im Validierungs-Workshop dieser Studie wurden daher mit Industrievertretern die Herausforderungen und erste Lösungsansätze für das Engineering im Kontext von Industrie 4.0 erarbeitet. Die Experten sprachen die gängigen Themen an: neue technische Methoden, rechtliche Fragen, neue Wertschöpfungsketten und Nachhaltigkeit. Einen vorher so nicht erwarteten Schwerpunkt setzten die Experten mit einer breiten Diskussion über agile Entwicklungsmethoden.

4.1 Erweiterte Aufgaben für künftige Engineering-Werkzeuge

4.1.1 Ausgangslage

Der oft postulierte Anspruch der Durchgängigkeit und der freien Rückkopplung benötigt eine Reihe von Fähigkeiten, die mit heutigen Instrumenten des Engineering nicht lösbar sind. Die heutige Toolchain umfasst in der Regel Werkzeuge für CAD, Simulation und Virtual Reality, die in der Regel über einfache Datenschnittstellen ohne weitere semantische Informationen miteinander verbunden sind. Auch liegt der Schwerpunkt in der Konstruktion, vor und nachgelagerte Funktionsbereiche werden in der Regel nicht einbezogen. Im besten Fall geschieht die Integration mit anderen Unternehmensbereichen wie Produktion und Vertrieb über PLM-Systeme (PLM: Produktlebenszyklusmanagement), deren Möglichkeiten zur übergreifenden Modellbildung aber sehr beschränkt sind. Weitergehende Ansätze mit einem höheren Niveau der Integration finden sich bislang nur in Forschungsprojekten, wie etwa dem Projekt RESCAR 2.0 für einen spartenübergreifenden Entwurf von Elektronikprodukten (siehe Kapitel 3.4.3).

4.1.2 Einschätzung aus Praxissicht

Die Experten nennen eine ganze Reihe von fachlichen

Herausforderungen für zukünftige Engineering-Werkzeuge und konkretisieren damit die Anforderungen der Plattform Industrie 4.0. Sie fordern die Integration von Mechanik und Elektronik, die Rückkopplung von Informationen aus späteren Phasen des Lebenszyklus zurück in das Engineering, Simulation und Virtuelle Realität sowie die Konzeption neuer Dienste und Geschäftsmodelle.

Funktionale Integration von Mechanik und Elektronik

Ein Kernelement des zukünftigen Engineering 4.0 wird nach Einschätzung der Experten die Überwindung der funktionalen Trennung zwischen mechanischer und elektronischer Entwicklung sein. Bedarfsweise sind darüber hinaus weitere Felder wie Pneumatik, Hydraulik, elektromagnetische Verträglichkeit oder thermische Belastungen in die Betrachtung einzubeziehen. Wechselwirkungen zwischen mechanischer und elektronischer Ebene, wie z. B. Wärmeeffekte und elektromagnetische Störungen, werden heute nicht determiniert berücksichtigt, sondern in der Regel durch heuristisch bestimmte, unnötig große Sicherheitsmargen ausgeglichen. Entsprechende Tools sind weder am Markt verfügbar, noch zeichnen sich diese in absehbarer Zeit am Horizont ab.

Eine notwendige Voraussetzung für die Gestaltung eines durchgängigen Engineering-Prozesses ist die Standardisierung von Software-Schnittstellen, Beschreibungsmodellen und Standardbibliotheken, z. B. für neue Materialien. Bestehende PLM-Systeme unterstützen diese Integration bislang noch nicht. Auch sind die am Markt verfügbaren PLM-Systeme weitgehend proprietär. Der FuE-Bedarf (FuE: Forschung und Entwicklung) für herstellerunabhängige PLM-Plattformen wird von den Experten übereinstimmend als sehr hoch eingestuft. Dabei darf die Integration nicht auf die syntaktische Ebene der Datenformate beschränkt bleiben. Notwendig ist vielmehr eine semantische Integration über ein gemeinsames Informationsmodell, weil sonst implizite Annahmen unterschiedlich interpretiert werden können.

Die Experten verweisen zudem auf die Herausforderung, die die unterschiedlichen Entwicklungszyklen und Lebensdauern von Mechanik-, Elektronik- und Software-Komponenten mit sich bringen. Das gelte insbesondere für die technische Dokumentation, z. T. aber auch für die entsprechenden Engineering-Systeme: Datenformate und Informationssysteme können technisch veralten und damit nur noch schwer oder überhaupt nicht mehr nutzbar sein. Hinzu kommt der große Bestand an Investitionsgütern ohne oder ohne hinreichende digitale Dokumentation. Hierfür müssen geeignete Sicherungs- und Migrationsmethoden entwickelt werden.

Generell wird darauf hingewiesen, dass die mechanische Entwicklung beim Engineering mechatronischer Systeme zunehmend vernachlässigt wird. Auch wenn eine Produktdifferenzierung heute häufig über die Elektronik erfolgt, sind innovative mechanische Lösungen für Aktoren oder andere bewegliche Komponenten weiterhin unabdingbar. Diese Lücke gilt es zu schließen.

Simulation und Virtuelle Realität

Neue Methoden der Simulation und der virtuellen Realität (VR) werden als Engineering-Instrumente unverzichtbar. Sie werden von den Experten als ein Kerninstrument des Engineering im Rahmen von Industrie 4.0 gesehen; trotzdem steht nach deren Einschätzung diese Entwicklung bezogen auf die notwendige Durchgängigkeit erst am Anfang. Einzelne Aufgabenbereiche wie die Inbetriebnahme einzelner Maschinen nutzen Simulation und virtuelle Realität bereits in größerem Umfang, da hier eine hohe wirtschaftliche Motivation besteht.

Als insgesamt erst am Anfang stehend wird von den Experten die Situation beim Entwurf und der Simulation über etablierte Grenzen hinweg eingeschätzt. Das gilt:

- für die Integration eines realitätsnahen Modells des Menschen in die Simulation von Produktionsabläufen,
- für die Simulation einer über Unternehmensgrenzen hinweg verteilten Produktion,

- für die Simulation im verteilten Engineering („virtuelles Engineering“) und
- für die „integrierte Simulation“ von Mechanik und Elektronik.

Technische Planung und Konzeption für zusätzliche Services

Die Experten verweisen darauf, dass bei der Konstruktion bereits die technischen Voraussetzungen für die Services zu Produktverfügbarkeit, Diagnose und vorausschauenden Instandhaltung vorgesehen bzw. berücksichtigt werden müssen. Das betreffe auch das Anlegen „innerer Reserven“ bei den Rechen- und Speicherkapazitäten und bei den Kommunikationsschnittstellen für spätere Funktionserweiterungen oder die Ergänzung neuer Dienste (diese dafür notwendige „Agilität“ bei Entwicklung und Weiterentwicklung haben die Experten ausdrücklich angesprochen, siehe Kapitel 4.3.) Eine besonders hohe Unsicherheit gibt es bei der Planung und Umsetzung der Kommunikationsschnittstellen. Die Anforderungen an die Informationssicherheit sowie die Robustheit und Verfügbarkeit (Resilienz) der Netzwerke, insbesondere der mobilen Netzwerke, seien hoch. Die technische Entwicklung bei den Industrienetzwerken ist aber noch sehr dynamisch, und die Informationssicherheit muss sich ohnehin ständig an den Stand der Technik anpassen, um bislang unentdeckte Sicherheitslücken und neu entwickelte Angriffsmethoden zu berücksichtigen. Eine vorausschauende Planung des Ressourcenbedarfs zukünftiger Dienste sei schwierig, aber notwendig. Hier gäbe es Bedarf für neue Simulationsmethoden, die ein Maß ermitteln, was bei gegebenen Rechen-, Speicher- und Kommunikationsressourcen an Dienstkomplexität und -qualität umsetzbar sei.

Im Engineering müssten nach Einschätzung der Experten aber nicht nur die Voraussetzungen für die neuen Services geschaffen werden. Zur Konstruktion gehöre auch die Konzeption der Dienste selbst: Welche zusätzliche Leistung bietet einen Kundennutzen, welche Daten werden dafür benötigt, wie sieht das Preismodell aus? Je nach Einzelfall müsse im Engineering auch schon konzipiert

werden, ob und wie die anfallenden Betriebs- und Nutzungsdaten in neuen Geschäftsmodellen verwertet werden könnten. Auch wenn weiterhin die Maschine oder die Anlage den Kern des Produktangebots bilden werden, lassen sich über zusätzliche Dienste und Geschäftsmodelle neue Umsatzquellen erschließen und der Anbieter könne zumindest ein Stück weit dem ausschließlichen Preiswettbewerb ausweichen (das Eigentum an den Betriebs- und Nutzungsdaten wird in Kapitel 4.3 betrachtet). Letztlich gilt es auch, nicht nur die Machbarkeit neuer Services zu erörtern. In die Betrachtung einbezogen werden sollte an erster Stelle der Wunsch des Kunden nach entsprechenden Services unter Berücksichtigung seiner Zahlungsbereitschaft. Das verlangt eine enge Kooperation mit der kaufmännischen Planung des jeweiligen Produkts.

Noch offen ist für die Experten, wie dem Kunden diese neuen Services und Geschäftsmodelle angeboten werden sollen. Der heutige Ansatz, dass jeder Hersteller eine eigene Plattform für seine Services betreibe, sei aus Sicht der Geschäftskunden ineffizient. Wünschenswert wäre eher eine „Plattform-Kultur“, so dass Services herstellerübergreifend einheitlich genutzt und gegebenenfalls sogar kombiniert werden könnten. Unklar ist den Experten aber noch, wie offen solche übergreifenden Plattformen gestaltet werden können: OEMs würden vermutlich eher darauf bestehen, auch weiterhin eigene Service-Plattformen anzubieten, während Komponentenhersteller sich wahrscheinlich eher öffnen würden. Unter Umständen könnte die Schaffung einheitlicher Service-Plattformen auch zur Aufgabe der Systemintegratoren werden.

Rückkopplung in das Engineering

Viele produktbegleitende Services haben nach Einschätzung der Experten ein hohes Potenzial, Informationen für das Engineering bereitzustellen, die bei der Weiter- und Neuentwicklung des Produkts oder begleitender Services genutzt werden können. Dazu gehören z. B. Daten zur Betriebslast, zum Energieverbrauch oder zum Verschleiß und Ausfall von Komponenten. Für die systematische Integration solcher Daten aus den produktbegleitenden

Diensten in die Engineering Prozesse würden noch die methodischen Grundlagen fehlen, von einer konkreten Unterstützung in den Werkzeugen ganz zu schweigen. Auch hier müsse eine semantische, modellbasierte Integration stattfinden.

Eine noch weitergehende Vorstellung sei die Schaffung einer Schnittstelle zwischen Produktionsplanungs- und -steuerungssystemen (PPS) bzw. Enterprise Resource Planning-Systemen (ERP) einerseits und Engineering-Werkzeugen andererseits, um – zumindest bei Kleinserien – schon während der Konstruktion Prognosen abgeben zu können, ob, wann und zu welchen Kosten gefertigt werden könne.

4.1.3 Schlussfolgerungen und Handlungsbedarf

Die Anforderungen der Experten zur durchgängigen Integration und Vernetzung der Engineering-Systeme, über Ingenieursdisziplinen und Phasen des Produktlebenszyklus und der Wertschöpfungskette hinweg, lassen insgesamt einen hohen FuE-Bedarf erkennen:

- ▶ (Weiter-)Entwicklung von Methoden des interdisziplinären Entwurfs (Mechanik + Elektronik + X); Entwicklung von Methoden zur Beschreibung von modellbasierten Schnittstellenstandards zwischen den einzelnen Disziplinen
- ▶ Entwicklung von Methoden zur Bestimmung von Ressourcen und Schnittstellen für spätere Funktionserweiterungen und Dienste (hard- und softwareseitig)

Weiterhin sind geeignete Infrastrukturen zu schaffen:

- ▶ Breitbandverfügbarkeit und garantierte Latenzzeiten (nicht nur in Ballungszentren) sind gerade am Standort Deutschland mit seiner eher dezentralen Industriestruktur, aber auch zur Erfüllung des Leitsatzes über die „Einheitlichkeit der Lebensverhältnisse im Bundesgebiet“ wichtige Anforderungen an die Internet-Infrastruktur.
- ▶ Untersuchung von praxisgerechten Methoden der sicheren Kommunikation; Berücksichtigung solcher Methoden in regulatorischen und rechtlichen Verfahren.

Bei der durchgängigen Vernetzung über die Lebensdauer hinweg tritt noch eine weitere Herausforderung hinzu. Mechanik, Elektronik und Software weisen völlig unterschiedliche Innovationszyklen und Lebensdauern auf. Die in der Informationstechnik üblichen Abkündigungsfristen sind in vielen Branchen undenkbar und würden zur Vernichtung großer volkswirtschaftlicher Werte führen. Mechanische Baugruppen von Werkzeugmaschinen oder von Flugzeugen weisen durchaus Lebensdauern von 30 bis 40 Jahren auf. Eine durchgängige Ausrüstung des produzierenden Gewerbes mit vernetzten Neumaschinen ist unrealistisch.

Vielmehr gilt es, einen wirtschaftlichen Migrationspfad zu beschreiben, der das (Re-)Engineering solcher Investitionsgüter einschließt. Dieser Migrationspfad muss sowohl die Integration von Bestandsmaschinen (oder deren Hauptbaugruppen) in digitale Modelle als auch deren Retrofit umfassen. Gleichzeitig müssen die informationstechnischen Modelle bis hin zu technischen Dokumentationen für einen permanenten Aktualisierungsprozess (Datenformate etc.) befähigt werden. Dafür müssen Sicherheits-, Übergangs- und Migrationsmethoden entwickelt werden. Diese können auf die Methoden der „Langzeitarchivierung digital vorliegender Informationen“ (digital preservation) aufsetzen. Neben technischen Lösungen bedarf es dabei vor allem der „Entwicklung von Strategien, die den beständigen, vom Informationsmarkt verursachten Wandel bewältigen können“ (Liegmann und Neuroth 2010, S. 21). Die Herausforderung gegenüber der eher statisch orientierten digital preservation besteht vor allem in der Handhabung der sich verändernden Daten.

- Notwendig ist die Entwicklung von Methoden der Datenmigration für bestehende Investitionsgüter und der dynamischen Langzeitdatenhaltung („mehr als Archivierung“).

4.2 Das Engineering nachhaltiger Produkte

Die ökologische Nachhaltigkeit von Industrieprodukten und ihrer Fertigung ist seit langem eine gesellschaftliche und politische Forderung und schlägt sich in zahlreichen Gesetzen, Normen, Standards und Selbstverpflichtungen nieder (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit 2015). Auch die Plattform Industrie 4.0 hat in ihren Thesen dieses Thema bereits adressiert (Wissenschaftlicher Beirat Industrie 4.0 und acatech, These 8). Das Engineering nachhaltiger Produkte war daher sowohl in den Interviews als auch im Workshop ein wichtiger Diskussionspunkt.

4.2.1 Ausgangslage

Bereits in den 1940er Jahren traten unter dem Begriff Value Engineering Ansätze hervor, welche die Entwicklung und fortlaufende Verbesserung von Produkten und Dienstleistungen unter dem Aspekt eines möglichst geringen Ressourceneinsatzes zum Gegenstand hatten. Kennzeichen dieser Optimierungsansätze waren strukturierte Vorgehensweisen, welche die Funktionalität von Produkten sowie weitere logische Kausalzusammenhänge im Rahmen des Produktgestehungsprozesses in den Vordergrund stellten. Als zentrales Instrument zur summarischen Bewertung qualitativer und quantitativer Faktoren bildeten sich hierbei Nutzwertanalyseverfahren heraus. Nicht in die Betrachtung einbezogen wurde jedoch die spätere Nutzungsphase der Produkte. Mit steigenden Betriebs- und Wartungskosten wurden ab Mitte der 1990er Jahre erweiterte Ansätze entwickelt, die den Ressourcenverbrauch über den gesamten Produktlebenszyklus als zentrales Merkmal in den Vordergrund stellen. In solch wertorientierten Ansätzen werden Berechnungsverfahren eingesetzt, welche die total cost of ownership (TCO), also die Gesamtbetriebskosten, über den gesamten Produktlebenszyklus als zentrales Entscheidungskriterium herausstellen. Auswirkungen auf die Produktgestaltung werden ferner auch von Innovationen im Bereich automatisierter Demontage- und Recycling-Technologien ausgehen. Hieraus ergaben sich auch neue Herausforderungen für das Engineering.

Allgemein anerkannte umweltökonomische Modelle, die die Besonderheiten der digitalen Wirtschaft berücksichtigen, sind kaum verfügbar. Für Umweltaspekte gängige Zertifizierungsschemata wie die ISO 50 001 oder das Eco-Management and Audit Scheme (EMAS) sind für kleinere Unternehmen kaum handhabbar. Entsprechende vereinfachte Konzepte sind zwar erprobt worden (Goldsworthy und Tomkinson 2015), aber noch nicht weit verbreitet. In Bearbeitung befindlich ist eine KMU-orientierte Richtlinie zur Ressourceneffizienz (VDI 4802) als Teil der Richtlinienfamilie 4800 (VDI Richtlinie 4801 Blatt 1).

4.2.2 Einschätzung aus Praxissicht

Nach Experteneinschätzung nehmen die Unternehmen das Thema Nachhaltigkeit überwiegend noch nicht intrinsisch an, sondern reagieren auf externe Anforderungen. Der Kostendruck, allgemeine politische Vorgaben, explizite rechtliche Vorgaben und nicht zuletzt Imageüberlegungen werden als Motivation benannt.

Wenn in den Unternehmen vor allem die Kostenreduktion als Anstoß zur Nachhaltigkeit gesehen werde, könne es sogar zu gegenteiligen Effekten kommen. Die Energiewende wirkt nach dem Urteil der Experten teilweise gegen Effizienzüberlegungen: Ein aktives Lastenmanagement, gelegentlich vorkommende negative Strompreise, und die Absicht, die Grenze zur Befreiung von der EEG-Umlage für Großverbraucher zu überschreiten, könnten erhöhte Verbräuche zeitweise sinnvoll machen. Auch der zurzeit niedrige Erdölpreis verringere den Druck zur Energieeffizienz: Häufig hätten dessen Kosten kaum noch Einfluss auf die Gestehungs- und Betriebskosten.

Trotzdem gibt es aus Sicht der Experten zumindest stellenweise einen Kulturwandel in den Unternehmen, z. B. mit der Erhöhung des Anteils an Recycling-Materialien, um eine bessere Umweltbilanz zu erreichen. Selbst da, wo sich Unternehmen schon mit dem sustainable engineering beschäftigen, wird jedoch nach Einschätzung der Experten überwiegend noch eine zu enge Perspektive der total cost of ownership eingenommen, auch wenn dabei

zumindest schon das Recycling einbezogen wird. Eine ökologische Gesamtbetrachtung im Sinne eines life cycle footprint, d. h. einer Berücksichtigung der internen und externen Umweltlasten von Produktion und Produkt, oder vergleichbare Betrachtungen fehlen überwiegend. Dieses resultiert auch aus dem Fehlen eines methodischen Gerüsts zu deren Berücksichtigung: Entsprechende Standards für den life cycle footprint sind nicht verfügbar und können folglich nicht in Engineering-Werkzeugen angeboten werden. Dabei wäre es aus Sicht der Experten sinnvoll und notwendig, Daten zum realen Verschleiß im Verlauf der Betriebszeit sowie zum Ressourcen- und Energieverbrauch aus Fertigung und Nutzung (reale Betriebskosten wie Strom, Druckluft) in das PLM zu integrieren, um diese als Feedback in das Engineering zurückzuspielen. Die Herausforderung sei dabei vor allem der Datenaustausch mit Kunden und Betreibern von Maschinen und Anlagen: Informationen zum Energie- und Ressourcenverbrauch im gesamten Lebenszyklus über Unternehmensgrenzen hinweg sind heute normalerweise nicht verfügbar (vgl. Projekt „Optimierte Ressourceneffizienz in der Produktion durch energieautarke Sensorik und Interaktion mit mobilen Anwendern“ (ESIMA)⁶ (Festo)).

Als Einzelmeinung wird auch auf die Technikfolgenabschätzung als geeignetes Instrument für ein nachhaltiges Engineering verwiesen.

Die Experten weisen ausdrücklich darauf hin, dass bei langlebigen Produkten einzelne Annahmen der life cycle footprint-Berechnungen über die Lebensdauer hinfällig werden können. Beispielsweise können sich häufig als weitgehend stabil angenommene Wirkzusammenhänge, etwa die Kohlendioxidemissionen bei der Stromerzeugung, über die Zeit deutlich ändern. Informationen zum Energie- und Ressourcenverbrauch über Unternehmensgrenzen in der Wertschöpfungskette seien heute zudem so gut wie nicht verfügbar.

⁶ Das betreffende Verbundvorhaben wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter den Förderkennzeichen 16SV6036 bis 16SV6043 gefördert.

4.2.3 Schlussfolgerungen und Handlungsbedarf

Im Hinblick auf ein sustainable engineering tritt der Umweltaspekt zu den primär monetären Betrachtungsweisen hinzu. Hierzu zählen neben Emissionen aller Art auch objektive und subjektive Einflussfaktoren auf Lebensqualität und Sicherheit. Künftig werden Innovationsprozesse nur dann erfolgreich sein, wenn es gelingt, technische Fortschritte mit gesellschaftlichen Zielen in Einklang zu bringen. Eine human- und sozialverträgliche sowie ökonomische und ökologische Technikgestaltung wird bei der Entwicklung intelligenter Produkte und Produktionssysteme eine zentrale Rolle einnehmen. Neben der damit einhergehenden quantitativen Zunahme von Zielvektoren (und damit auch Zielkonflikten) stellen Nachhaltigkeitsaspekte qualitativ andere Anforderungen an ihre Quantifizierung.

Methoden und Instrumente zur Ermittlung von Technologieakzeptanz sowie zur Technikfolgenabschätzung sind ohnehin schwer zu quantifizieren und dazu mit erheblichen Unsicherheiten behaftet. Eine anerkannte theoretische Grundlage der Technikfolgenabschätzung liegt bisher nicht vor (Grunwald 2010). Die Gestaltung von Mensch-Maschine-Schnittstellen, Veränderungen von Wertschöpfungsprozessen, speziell im Hinblick auf Arbeitsumgebungen, Organisationsmodelle und Prozessabläufe, aber auch der vom Kunden geforderte Grad der Reparierbarkeit eines Gerätes (vgl. ifixit.org) bilden exemplarische Beispiele.

Grundsätzlich sind auch beim sustainable engineering in erster Linie regelkreisorientierte Ansätze zu erwarten, wobei diese entsprechenden Stabilitätskriterien genügen müssen. Umfassende reale Nutzer- und Einsatzerfahrungsdaten sind Voraussetzung für solche Regelkreismodelle. Hinzu treten absehbar sich verändernde, jedoch schlecht prognostizierbare Eingangsparameter (z. B. CO₂-Emission je MWh benötigter Energie in der Fertigung). Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass Energiekosten deutlich stärker in der Wahrnehmung stehen als dieses eigentlich gerechtfertigt ist. Tatsächlich stellen Materialkosten trotz aktuell gefallener Rohstoffpreise im produzierenden

Gewerbe mit 43,4 % den weitaus größten Kostenblock dar. Im Vergleich dazu stehen knapp 18 Prozent Personalkostenanteil und 2,1 Prozent Energiekostenanteil. (Daten für 2013 aus: Statistisches Bundesamt 2015, S. 280).

- Erforderlich wäre die Entwicklung umweltökonomischer Modelle für die digitale Wirtschaft unter besonderer Berücksichtigung der verteilten Produktion, der Produktlebenszyklusbetrachtung und sich über die Lebensdauer des Produktes verändernden Rahmenbedingungen. Zumindest in einer vereinfachten Fassung müssen diese auch für kleinere Unternehmen handhabbar bleiben.

4.3 Agile Vorgehensmodelle

Die agilen Vorgangsmodelle waren im Interviewleitfaden nicht ausdrücklich angesprochen worden, stellten sich aber dennoch in den Gesprächen als ein interessantes, häufiger angesprochenes Thema heraus. Im Workshop wurde dieses besondere Prozessmodell daher ausdrücklich zur Diskussion gestellt.

4.3.1 Ausgangslage

In der Softwareentwicklung haben sich seit der Jahrtausendwende sogenannte agile Methoden etabliert. Agile Softwareentwicklung versucht mit, im Vergleich zu einem traditionellen Lastenheft, wenigen Regeln und einem meist iterativen Vorgehen auszukommen. Damit steht diese Vorgehensweise im Widerspruch zu klassischen Methoden bis hin zu den modellbasierten Entwurfsverfahren für sichere Software.

Im Februar 2001 haben 17 Erstunterzeichner die Grundprinzipien als sogenanntes Agiles Manifest (englisch Manifesto for Agile Software Development oder kurz Agile Manifesto) formuliert (Beck et al. 2001). Ein wichtiges Kennzeichen agiler Methoden ist die stetige Anpassung des Entwicklungsfortschritts an den Bedarf des Kunden, was seine enge Mitwirkung impliziert. Die agilen Methoden eignen sich daher besonders gut, um auf geänderte

Anforderungen zu reagieren, da die einzelnen Entwicklungszyklen in der Regel von vornherein nicht lang angelegt sind. Die reine Entwurfsphase soll dabei auf ein Mindestmaß reduziert werden, der Kunde erhält frühestmöglich ausführbare Software. Das ermöglicht ein enges Kundenfeedback und gleichzeitig eine erste Nutzung des Produktes (minimum viable product).

Auch im industriellen Umfeld wird ein „Patchen“ von Maschinen durchgeführt, übersteigt aber üblicherweise nicht ein begrenztes Maß an Erweiterung oder Änderung. Zu diesem sogenannten „Retrofit“ gehören z. B. der Ersatz von Teilkomponenten durch höherwertige Austauschteile oder die Rekonfiguration einer Anlage. Auch der Einsatz neuer Werkzeuge an den bestehenden standardisierten Schnittstellen ist üblich. Ebenso ist die Aktualisierung von Steuerungs-Software bis hin zur Firmware-Ebene der Maschine mit Implementierung neuer Funktionen ein gängiges Vorgehen. In der Regel finden dabei aber vor allem Fehlerkorrekturen und eher geringfügige Anpassungen von Funktionen und Services statt. Die Anzahl der Retrofits von Maschinen, inklusive der Aktualisierung der Software, ist üblicherweise deutlich geringer als bei den „reinen“ Softwaresystemen auf Unternehmens-, Betriebs- und Prozessebene.

4.3.2 Einschätzung aus Praxissicht

Wenig überraschend bestätigen die Experten den bekannten Trend, dass Produkte in einer stärkeren Kooperation mit den Kunden entwickelt werden. Der Software, die vergleichsweise einfach und schnell aktualisiert werden kann, komme dabei eine besondere Bedeutung zu. Einige Experten sahen in der Übernahme agiler Entwicklungsmodelle aus der Softwaretechnik ein geeignetes Instrument, um zu einer neuen Qualität der Zusammenarbeit mit den Kunden zu kommen und gleichzeitig die Entwicklungszyklen zu verringern.

Trotzdem sehen die meisten Experten die Möglichkeiten einer Übertragung des Konzeptes „agiler Entwurf“ auf das produzierende Gewerbe, insbesondere bei den

Investitionsgütern, als eher eingeschränkt. Zum einen würde damit das Lastenheft aufgegeben, das bisher im Geschäftskundengeschäft die verbindliche Basis der Kooperation herstelle. Ein agiler Prozess liefere dem Kunden kein planbares Ergebnis. In Märkten mit starker Kundenmacht könne sich aber auch der Druck auf die Zulieferer weiter erhöhen, weil es der agile Prozess erlaube, die Anforderungen stetig anwachsen zu lassen. Zum anderen bleibe unklar, wie in diesem Prozessmodell mit den generell hohen Anforderungen an die Haftung und eine etwaige Zertifizierung von physikalischen Gütern umgegangen werden könne. Bei Software oder bei Online-Diensten könne es wegen der häufig geringeren, allgemein akzeptierten Standards bei der Gewährleistung einen schlechenden Übergang von minimum viable product zum marktreifen Produkt geben. Bei hardware sei dagegen ein fest definierter Zeitpunkt notwendig, zu dem bestimmte Vorgaben erfüllt sein müssten und der strenge Haftungs- und Gewährleistungspflichten übernehmen müsse.

Trotz aller Einwände wurde dennoch diskutiert, ob das etablierte Lastenheftkonzept nicht doch agiler gemacht werden könne. Das könne eine größere Flexibilität bei der Erfüllung der Vorgaben beinhalten, aber auch eine Aufteilung in einzelne Komponenten, die dann schrittweise in agilen Prozessen von Kunden und Herstellern umgesetzt würden. Beispielhaft wurde in den Expertengesprächen der US-Hersteller von Elektroautos Tesla genannt, der mit Software-Updates auch nach dem Verkauf neue Fahrassistenzfunktionen in Kundenautos integriert.

Gerade Simulationen und VR-Konzepte würden sich gut in ein solches Modell der gemeinsamen Entwicklung im Rahmen eines agilen Lastenhefts einpassen lassen, bei denen der Kunde schon sehr früh ein Feedback geben könne. Das würde tendenziell auch zu kürzeren Entwicklungszeiten führen.

4.3.3 Schlussfolgerungen und Handlungsbedarf

Solange der Engineering-Prozess im Virtuellen verbleibt, bis hin zu einer virtuellen Zertifizierung, sind die

Unterschiede zwischen Engineering und Softwareentwicklung eher gering und die meisten Prinzipien agilen Arbeitens sind anwendbar.

Signifikante Unterschiede treten mit dem Beginn der physischen Realisierung des Entwurfs ein. Agile Methoden setzen auf die frühe und kontinuierliche Auslieferung von notfalls auch noch unfertiger Software. Für physische Produkte, insbesondere für Investitionsgüter und langlebige Konsumgüter, kann dieses frühe Angebot eines „Minimum viable product“ nicht unverändert übernommen werden. Dagegen sprechen die wiederholten Fertigungskosten, die fehlende Kostendegression der (Groß-) Serienfertigung sowie der „Verlust“ des vorhergehenden Bauteils (incl. Recycling bzw. Entsorgungskosten). Auch wenn additive Fertigungsverfahren zukünftig die Kostendegressionsproblematik entspannen dürften, müssen die Anforderungen beim Inverkehrbringen eines physischen Produktes (Zertifizierung/Zulassung, Haftungsregeln, Sicherheitsrichtlinien) unverändert erfüllt werden. Damit sind sie auch zukünftig beim Engineering zwingend zu berücksichtigen. Ein physisches „Minimum viable product“ muss unter diesen Umständen eine Art Basiskonfiguration (einer Maschine etc.) sein. Diese Rahmenbedingungen führen zu spezifischen Anforderungen an das Engineering dieser Basiskonfiguration:

- Vorbereitung von Update-/Upgrade-Möglichkeiten des Software-Anteils,
- Berücksichtigung besonderer Anforderungen an das Engineering von Schnittstellen (mechanisch, elektronisch, Kommunikation, etc.) hinsichtlich Zusicherung von Fähigkeiten, Kompatibilität und Investitions-/Zukunftssicherheit,
- Vorbereitung von Änderungs-/Update-Rekonfigurationsmöglichkeiten im Engineeringprozess durch modulare Aufbauten von Mechanik, Elektronik und den weiteren physischen Komponenten.

Für die Software-Anteile eines physischen Produkts wäre eine agile Entwicklung prinzipiell ohne weiteres möglich. Besondere Anforderungen entstehen allerdings bei

zulassungspflichtigen oder sicherheitskritischen Produkten – das gilt für die Software eines Flugzeuges genauso wie für sicherheitskritische physische Bauteile. Hier ist die geschlossene Beweisführung der Erfüllung der Funktion durch das Gesamtsystem aus Hardware und Software essentiell, nicht zuletzt vor dem Hintergrund der Haftung.

- ▶ Für die Übertragung des Konzepts der agilen Entwicklung von Software auf physische Produkte muss noch eine fundierte Methodik erarbeitet werden.
- ▶ Dabei ist insbesondere zu untersuchen, inwieweit neue Fertigungsverfahren und die Fertigung durch den Kunden selbst (incl. urban manufacturing) bzw. in Kundennähe die Anwendung agiler Prinzipien auf physische Produkte unterstützen können. Dabei sind auch umweltökonomische Aspekte zu berücksichtigen.
- ▶ Die Übertragbarkeit der Prinzipien der agilen Entwicklung von Software auf physische Produkte unter den dargestellten Rahmenbedingungen kann durch entsprechende, neu zu entwickelnde Zertifizierungsmethodiken vereinfacht werden. Das Ziel ist eine Verkürzung der Prüf- und Abnahmeverfahren, ohne an Prüfqualität zu verlieren.

Eine weitere Herausforderung bei der Anwendung agiler Methoden entsteht bei der Übertragung der Ansätze auf das Retrofit oder die Umnutzung bestehender langlebiger Investitionsgüter, etwa Werkzeugmaschinen oder Betriebsmittel in den Energienetzen. Software, Verschleißteile und Kernkomponenten haben dort besonders unterschiedliche Lebensdauern, so dass gerade bei Kernkomponenten nutzbare digitale Abbilder und Lebensläufe noch längere Zeit nicht vorausgesetzt werden können. Der Simulation und der Visualisierung sind damit enge Grenzen gesetzt.

- ▶ Notwendig wäre auch die Entwicklung und praktische Untersuchung der Übertragbarkeit von Methoden der agilen Entwicklung auf Retrofitprozesse bei vorhandenen (langlebigen) Investitionsgütern ohne bestehendes digitales Abbild.

4.4 Rechtliche Fragen

Schon die Gründung einer eigenen Arbeitsgruppe „Rechtliche Rahmenbedingungen“ in der Plattform Industrie 4.0 zeigt die hohe Bedeutung juristischer Fragestellungen bei der Konzeption, der Umsetzung und dem Betrieb hochgradig vernetzter und z. T. auch autonomer Produktionsanlagen. Sowohl in den Interviews als auch im Workshop waren rechtliche Fragen ein zentrales Thema.

4.4.1 Ausgangslage

In der Fachdiskussion werden als juristische Herausforderungen von Industrie 4.0 regelmäßig die Haftung, der Datenschutz und das geistige Eigentum angesprochen, ohne dass es zum jetzigen Zeitpunkt eine vollständige juristische Bewertung oder eine umfassende Handreichung für die Praxisanwender gibt (Hilgendorf und Seidel 2016; Plattform Industrie 4.0 2016a, 2016b; Bitkom).

Die Grundlagen für die drei Bereiche sind durchaus unterschiedlich. In der Produkthaftung werden bereits klare Rahmenbedingungen für das Inverkehrbringen von Waren und Dienstleistungen gesetzt. Die Anforderungen im B2B- und im B2C-Geschäft unterscheiden sich dabei: Im B2C-Geschäft unterliegt die allgemeine Produktsicherheit für das Inverkehrbringen von Produkten der Richtlinie 92/59/EWG (Rat der europäischen Gemeinschaften 11.08.1992), geändert durch die Richtlinie 2001/95/EG (Das Europäische Parlament und der Rat der Europäischen Union 2001). Demnach müssen in den Verkehr gebrachte Produkte sicher sein. Sicher sind Produkte, wenn sie die europarechtlichen Bestimmungen oder in deren Ermangelung die nationalen Rechtsvorschriften erfüllen. Die Haftung im B2B-Geschäft ist deutlich komplexer als in B2C-Szenarien geregelt; gegenwärtig entscheiden letztendlich die Versicherungsbedingungen.

Auch für den Schutz persönlicher Daten gibt es mit dem Bundesdatenschutzgesetz und dem Arbeitnehmerdatenschutzgesetz in Deutschland eindeutige Regelungen, denen auf europäischer Ebene die EU-Datenschutzrichtlinie,

bzw. in Zukunft die gerade diskutierte EU-Datenschutz-Grundverordnung, gegenübersteht.

Die Herausforderungen, das geistige Eigentum gemeinsamer Entwicklungsarbeiten eindeutig zu definieren, sind seit langem bekannt und mit Urheber-, Patent-, Marken- und Designrecht stehen auch entsprechende Regelwerke zur Verfügung. Das Eigentum an Nutzungs- und Betriebsdaten ist dagegen gegenwärtig weder rechtlich geregelt, noch gibt es eine geübte Praxis („Kultur“) oder einfach ableitbare Vorbilder.

4.4.2 Einschätzung aus Praxissicht Haftung

In den Interviews werden, wegen der Industrienähe der Experten wenig überraschend, Haftungsfragen als juristisches Schlüsselproblem auch für das Engineering in Industrie 4.0 benannt. Die Experten gehen allerdings davon aus, dass sich das bewährte System von Produkt- und Produzentenhaftung prinzipiell nicht ändern wird.

Das setzt nach Einschätzung der Experten zunächst enge Rahmenbedingungen für die Übertragung von agilen Methoden der Softwareentwicklung auf den B2B-Sektor (siehe auch die Diskussion agiler Methoden in Abschnitt 4.3).

Die Haftung in kooperativen Entwicklungsmodellen wird von den Experten als weniger dringliches Problem gesehen. Letztendlich greife wie bisher die Durchgriffshaftung auf den Zulieferer der jeweiligen Komponente. Problematisch könnte aber die Haftung bei kooperierenden autonomen Maschinen sein: Wer haftet denn, fragen die Experten, wenn das fahrerlose Transportsystem mit dem Roboterarm ohne Sicherheitsraum kollidiert?

Die eigentliche Herausforderung für das Engineering aus rechtlicher Perspektive sehen die Experten in der mit Industrie 4.0 weiter zunehmenden Individualisierung der Produkte und der kooperativen Entwicklung. Das bereits bekannte Haftungsproblem für modulare und rekonfigurierbare Maschinen verschärft sich nach Ansicht der

Experten mit der Losgröße-1-Produktion. Die Frage nach dem Baumuster, das zertifiziert werden könne, stünde weiterhin ungelöst im Raum.

Zudem trete unter Umständen der Kunde selbst in die bestehende Rechtskonstellation der Haftung mit ein, wenn er etwaige Möglichkeiten zur Konfiguration einer Anlage oder Maschine nutze und dabei eine technisch unsinnige Wahl treffe. Hier gebe es aber Erfahrungen des klassischen Maschinenbetriebs, auf denen aufgebaut werden könne. Beispielsweise verfügen Werkzeugmaschinensteuerungen seit vielen Jahren über abgestufte Zugriffsrechnerverwaltungen, die unterschiedliche Kompetenzlevel der Akteure (Werker – Meister – Einrichter – Hersteller) berücksichtigt und abgestuft „gefährliche“ Einstellungen unterbindet bzw. auf entsprechend geschulte Personen begrenzt.

Ein wichtiger Lösungsansatz für das Haftungsproblem individueller Maschinen – Losgröße 1, Variantenbaukästen, modulare und rekonfigurierbare Maschinen – ist nach Einschätzung der Experten die virtuelle Zertifizierung, d. h. die Abnahme eines Produkts inklusive aller Varianten und Konfigurationen anhand eines virtuellen Modells. Hier werden erhebliche Potenziale zur Verkürzung der Entwicklungszeiten gesehen, erste Ansätze werden in einigen Branchen wie Automobilbau und Luftfahrtindustrie auch schon vorangetrieben. Eine Herausforderung könnte aber sein, dass unter Umständen dann auch die Zulieferer in die virtuelle Zertifizierung eingebunden werden müssten. Vor allem für kleinere Unternehmen zeichnen sich in diesem Bereich erhebliche Schwierigkeiten ab.

Geistiges Eigentum

Ausgiebig wurden auch Fragen des geistigen Eigentums diskutiert. Gemeinsam entwickelte intellectual property rights, seien es Patente, Gebrauchsmuster oder Designs, sahen die Experten durchaus als Herausforderung, für die es aber zumindest etablierte und bewährte Regularien gäbe. Anspruchsvoller sei das Eigentum an Nutzungs- und Betriebsdaten. Während eine bilaterale Situation

zweifelsohne einzelvertraglich gut lösbar sei, z. B. über Wartungsverträge, stünden Modelle für gemeinsam erzeugte Datenbestände noch aus, etwa wenn es um die Verknüpfung von Daten unterschiedlicher Maschinen unterschiedlicher Hersteller bei unterschiedlichen Betreibern gehe. In der Folge bleibt etwa offen, wer über diese Daten verfügen und sie gegebenenfalls an Dritte weitergeben darf, etwa Plattformbetreiber oder Serviceanbieter. Die Vertraulichkeit von Nutzungs- und Betriebsdaten sei eine wichtige Anforderung, etwa wenn aus ihrer Analyse und Aggregation auf Betriebsgeheimnisse – z. B. Auslastungen und Fehlerraten – geschlossen werden könne.

Bei geleasteten Maschinen tritt neben dem Eigentümer außerdem auch noch der Betreiber („Halter“) in den Kreis der Akteure ein. Die Frage nach dem Eigentum an Nutzungs- und Betriebsdaten tritt hier in eine neue Dimension, wenn die Daten zur Generierung neuer wertschöpfender Dienstleistungen und Services genutzt werden. Wie sollen dann z. B. die Einnahmen geteilt werden? Wer übernimmt die Haftung bei fehlerhaften Informationen?

Trotz der zahlreich aufgeworfenen rechtlichen Fragestellungen wurde mehrfach die Ansicht geäußert, dass die Herausforderungen des Dateneigentums und der Vertraulichkeit nicht ausschließlich auf juristischem Wege gelöst werden könne. Es sei auch der Aufbau einer Vertrauenskultur zwischen den jeweiligen Unternehmenspartnern notwendig.

Datenschutz

Beim Datenschutz verweisen die Experten vor allem darauf, dass in Industrie-4.0-Konzepten in großem Maße Betriebs- und Nutzungsdaten erfasst würden und damit in der Regel auch Informationen zum Verhalten von Arbeitnehmern entstehen. Bei Assistenzsystemen stünden die Daten zum Verhalten von Personen sogar direkt im Mittelpunkt des Konzepts. Zielkonflikte mit der Gesetzgebung zum Arbeitnehmerdatenschutz seien daher deutlich absehbar, hier fehlt es noch an praxistauglichen Lösungsansätzen. Als technische Maßnahme wurden die

Anonymisierung personenbezogener Daten sowie die Einführung ausdifferenzierter Zugangskontrollsysteme vorgeschlagen.

4.4.3 Schlussfolgerungen und Handlungsbedarf

Der Problemdruck und die Unsicherheit bei den rechtlichen Fragen zu Engineering 4.0 sind teilweise erheblich, die erst zeitlich versetzt erfolgende verbindliche Interpretation oder gegebenenfalls auch Anpassung bestehender Gesetze stellt die handelnden Akteure vor besondere Herausforderungen. Von den Experten wurde eine Reihe von Fragestellungen aufgeworfen, die in absehbarer Zeit gelöst werden sollten. Besonders dringlich sind die Fragen der Haftung beim Engineering individualisierbarer Produkte, die Haftung beim Einsatz kollaborierender autonomer Maschinen, das Eigentum an Nutzungs- und Betriebsdaten, die im Verbund entstehen, sowie der Abgleich von Datenschutz und dem grundlegenden Ansatz in Industrie 4.0, umfangreiche Datenbestände zu Nutzung und Betrieb von Produkten, Maschinen und Anlagen zu erheben und miteinander zu verknüpfen:

- ▶ Die Methoden zur virtuellen Zertifizierung müssen weiterentwickelt und ausgebaut werden. Die bisherigen Erfahrungen aus Automobilbau und Luftfahrtindustrie müssen auf andere Branchen übertragen und dort nutzbar gemacht werden. Dabei muss darauf geachtet werden, dass auch kleinere Unternehmen in den Lieferketten befähigt werden, sich an der virtuellen Zertifizierung zu beteiligen.
- ▶ Die Zertifizierung von Herstellungsprozessen (Wertschöpfungsketten) analog zur ISO 9000 sollte untersucht werden. Dabei müssten unterschiedliche Produktionsabläufe zugelassen werden, wie sie durch die selbstorganisierte Produktion möglich werden (Regelwerk der Selbstorganisation).
- ▶ Für den Abgleich von Datenschutz sowie Datensammlung und -verarbeitung von Nutzungs- und Betriebsdaten in Industrie 4.0 müssen organisatorische und technische Verfahren entwickelt und erprobt werden.
- ▶ Für die Haftung bei der Kollaboration autonomer Maschinen sollte geprüft werden, inwiefern sich

bestehende Gesetze zur Produkthaftung überhaupt noch sinnvoll auf diesen Sonderfall übertragen lassen oder ob eine Anpassung notwendig ist.

4.5 Neue Kooperations- und Geschäftsmodelle

Ein konstituierendes Element von Industrie 4.0 ist die Entwicklung neuer Formen der Kooperation zwischen Unternehmen und entsprechend die Herausbildung neuer Geschäftsmodelle. Es gibt bereits eine Reihe von Publikationen zu neuen Geschäftsmodellen in der digitalen Wirtschaft (Müller et al. 2016; Rieger et al. 2015; Emmrich et al.; Expertenkommission Forschung und Innovation 2016; Harbor Research Inc. 2014). Das Engineering wird dort aber bislang entweder überhaupt nicht oder bestenfalls nur am Rande betrachtet.

4.5.1 Ausgangslage

Auch wenn es noch kaum Studien zum Engineering in Industrie 4.0 gibt, ist dennoch klar, dass sich die ökonomischen Rahmenbedingungen für das Engineering zukünftig deutlich verändern werden. Der Begriff der wissensbasierten Ökonomie – von der OECD für den Entwicklungsstand der wirtschaftlich führenden Staaten der Erde verwandt – verweist bereits auf eine sich wandelnde Relation zwischen dem Aufbau von Wissen und der Produktion physischer Güter in der Wertschöpfung. Der Umgang mit geistigem Eigentum ist ein Schlüsselement einer modernen Unternehmensstrategie.

„In Zeiten steigenden Wettbewerbsdrucks durch höheren Innovationsdruck bei gleichzeitig sinkenden Forschung und Entwicklung (FuE)-Budgets sind Unternehmen gezwungen, ihren Innovationsprozess zu öffnen, um durch Einbeziehung der Außenwelt gezielt ihr Innovationspotenzial zu erhöhen. Diese strategische Einbeziehung wird als Open-Innovation-Ansatz bezeichnet“ (Gassmann und Enkel 2006).

Dabei gibt es drei mögliche Vorgehensweisen (Künzel et al. 2015):

- die Integration externen Wissens oder entsprechender Wissensträger, z. B. die Vergabe von Entwicklungsaufträgen oder die Anstellung von Mitarbeitern mit neuen Kompetenzen,
- das Investment in neue Geschäftsfelder außerhalb des bestehenden Unternehmens bzw. der Kauf von Unternehmen mit Schlüsselkompetenzen und
- die Kooperation mit komplementären Partnern, inklusive Wettbewerbern und Netzwerken.

Open Innovation ist nicht zuletzt eine Organisationsinnovation: Unternehmen und andere Akteure öffnen sich für einen kontinuierlichen Wissensaustausch ihren Zulieferern, ihren Forschungseinrichtungen, ihren Wettbewerbern und letztendlich auch ihren Privat- oder Geschäftskunden.

Open Innovation versteht sich in diesem Sinne primär als Kooperationskultur. Das bedeutet aber nicht, innovative Ideen mit beliebigen Akteuren im Außenfeld zu teilen. Vielmehr teilt man seine Ideen mit denjenigen Partnern, die im Rahmen einer Win-Win-Situation deren Realisierungschancen verbessern. (Künzel et al. 2015)

Veränderungen im Engineering gehen auch mit der Etablierung neuer Geschäftsmodelle einher. Diese lassen sich aus den veränderten Prozessen des Engineering, insbesondere der verteilten, jedoch koordinierten Leistungserbringung ableiten:

- Marktplatzmodelle bieten ein hohes Flexibilitätspotenzial zur Besetzung interdisziplinärer Engineering-Teams, benötigen aber allgemein akzeptierte Austauschformate.
- Sharing-Ansätze ermöglichen die effiziente Nutzung hochpreisiger und nicht ständig genutzter Investitionsgüter durch mehrere Akteure. In eine vergleichbare Richtung weisen neue Bezahlmodelle wie pay per use.
- Entwurfsleistungen werden separat als Kosten ausgewiesen und nicht auf Produkte umgelegt.

- Betreibermodelle bieten neue Ansätze der Wertschöpfung und eröffnen dem Anlagenhersteller umfassende Informationen über Nutzeranforderungen und Nutzerbedarfe.

4.5.2 Einschätzung aus Praxisicht

Die Experten teilen, wenig überraschend, die aus volkswirtschaftlichen Studien (u. a. Schiersch und Gehrke 2016; OECD 2015) ableitbare Feststellung, dass der Anteil der Engineering-Leistungen an der Wertschöpfung zunimmt und gleichzeitig auch in den FuE-Prozessen die Wertschöpfungstiefe in den Unternehmen tendenziell sinkt.

Neue Kooperationsmodelle für das Engineering

Dies werde auch im Engineering tatsächlich zu einer Verstärkung der arbeitsteiligen und temporären Zusammenarbeit führen. Sie könne sowohl als interdisziplinäre Zusammenarbeit unterschiedlicher Fachexperten organisiert sein, als auch in Form einer Kooperation von Hersteller, Systemlieferant und Zulieferer. Gegebenenfalls könne auch der Unternehmenskunde eingebunden werden, um selbst seine für ihn spezifische Produktfinalisierung zu leisten. Hier fehle es jedoch vielfach noch an geeigneten Organisationsformen und Geschäftsmodellen, die die gemeinsame Erarbeitung und den Austausch von geistigem Eigentum angemessen abbilden.

Bei der Frage, ob sich tatsächlich, wie oft propagiert, offene Kooperationsmodelle durchsetzen würden oder ob es doch bei der bekannten Auftraggeber-Auftragnehmer-Beziehung bleibe, gab es keine einhellige Meinung. Auch das Modell eines Marktplatzes für Engineering-Leistung wurde skeptisch betrachtet. Hier könne nicht verlässlich zugesichert werden, dass das notwendige Fach-Know-how bei den Anbietern tatsächlich vorhanden sei. Vor allem im Hinblick auf die spätere Produkthaftung bestehen hier erhebliche Bedenken.

Auslagerung von Engineering-Leistungen

Die Experten erwarten auch eine Auseinanderentwicklung

zwischen einfachen Engineering-Aufgaben einerseits und kreativen, anspruchsvollen Aufgaben andererseits. Bei Umstellungen von Produktionsanlagen werden z. B. zunehmend Ingenieure durch Monteure ersetzt. Bestimmte Aufgaben, insbesondere bei der inkrementellen Weiterentwicklung von Produkten und stark regelbasierten Entwurfsprozessen, z. B. der Neukonfiguration einer Werkhalle, könnten sogar mittelfristig ganz automatisiert werden.

Wegen der wachsenden Bedeutung der Entwurfsleistung für die Wertschöpfung erwarten die Experten zunächst Änderungen in der Kostenrechnung und dem folgend der Preisbildung. Das bisherige Umlageverfahren für die Konstruktionskosten werde zumindest teilweise von einem separaten Ausweis der Engineering-Kosten in den Preisen abgelöst. Im Extremfall der Losgröße 1 sei dies ohnehin schon der Fall.

Mit der Kostentransparenz steige dann auch die Bereitschaft, Engineering-Leistungen nach außen zu vergeben bzw. von einem Partner erarbeiten zu lassen, weiter an. Eine generelle, branchenübergreifende Aussage oder Prognose, in welchem Umfang zukünftig Engineering-Leistungen ausgelagert werden und welcher Akteur am Ende die OEM-Rolle einnimmt, erscheint aus der Sicht der Experten aber nicht sinnvoll. Die Gegebenheiten und Kulturen der Branchen seien zu unterschiedlich. Je nach Branche könne ein sehr unterschiedliches Agieren beobachtet werden:

- In der Automobilindustrie lagern die OEM z. B. in zunehmendem Maße Entwicklungsleistungen an Tier-1-Zulieferer und spezielle Engineering-Dienstleister aus. Sie sehen ihre Kernkompetenz in der Fahrzeugvermarktung, der Konstruktion einiger Kernkomponenten, etwa Motor und Fahrwerk, sowie der Produktionstechnik. Die Rolle des OEM als solchem ist aber unbestritten.
- In der Elektronikfertigung gibt es dagegen neben Unternehmen, die sowohl den Entwurf als auch die Fertigung beherrschen, eine zunehmende Anzahl

sogenannter fabless-Unternehmen, die sich auf Entwurf und Vertrieb unter eigener Marke konzentrieren, die Fertigungsleistung aber weitgehend oder gänzlich zukaufen. Stark standardisierte Fertigungsprozesse wie bei CMOS-Schaltkreisen unterstützen ein solches Modell.

Generell seien der Auslagerung von Engineering-Arbeiten aber Grenzen gesetzt, weil häufig bereits die Konstruktion in entscheidender Form die spätere Alleinstellung des Produkts definiere. Zudem sei aber branchenübergreifend auch ein Gegenteil erkennbar: Immer wieder gelänge es Ingenieurdienstleistern, im Nachgang alleine oder in Kooperation mit anderen Unternehmen eigene Produkte auf den Markt bringen, um Skaleneffekte nutzen zu können und damit eine höhere Rentabilität zu erreichen.

Neue Betreibermodelle und neue Akteure für Engineering-Dienste

Neben der klassischen Auslagerung der Konstruktion an Partner oder Lieferanten sehen die Experten auch in anderen Bereichen Ansätze zu einer weiteren Ausdifferenzierung der Engineering-Leistungen: Die Zunahme der Komplexität der Entwurfswerkzeuge werde zu einer Zunahme von Betreibermodellen für diese Softwaresysteme führen. Das in anderen Bereichen schon etablierte Modell der Software as a Service (SaaS) werde auch für den Entwurf an Bedeutung gewinnen, z. B. für sehr hochpreisige VR-, CAD- und FEM-Systeme. Hier würde das bekannte Preismodell des pay per use, das sich an Umfang und Komplexität der Nutzung ausrichte, noch wichtiger werden. Für die Industrie sei das ohnehin kein neues Preismodell, ihre eigenen Produkte würden häufig auch schon über ein pay per use bezahlt.

Im SaaS-Markt könnten jedoch auch gänzlich neue Wettbewerber auftreten, insbesondere Betreiber von großen Rechenzentren aus der IKT-Branche oder dem E-Commerce, die zunächst lediglich überschüssige Rechenkapazitäten im Cloud-Modell auf den Markt bringen. Solche Cloud-Betreiber, die zwar nicht über

Engineering-Know-how im engeren Sinne verfügen, aber sehr viel Erfahrungen mit rechenintensiven Algorithmen und deren Anwendung auf große Datenmengen haben, könnten dann mittelfristig auch einfache Engineering-Leistungen als automatisierte Services anbieten. Allerdings müssten auch diese Akteure am Ende die gängigen Qualitätsstandards einhalten. Inwieweit das von den neuen Akteuren geleistet werden kann, dürfte vom Grad der Komplexität und von der Vielfalt der übernommenen Engineering-Arbeiten abhängen.

Auch für komplexere Dienstleistungen, wie etwa die vorausschauende Wartung, gibt es laut den Experten zunehmend Dritt-Dienstleister. Dem stehe aber gegenüber, dass es auch immer ein gewisses Maß an Kompetenzsicherung beim OEM geben muss.

4.5.3 Schlussfolgerungen und Handlungsbedarfe

Die Diskussion zeigt, dass eine universale neue Wertschöpfungsstruktur des Engineering eher nicht zu erwarten ist, wohl aber die Erprobung offener Kooperationsmodelle und der Eintritt bisher branchenfremder Akteure aus der IKT-Branche und dem E-Commerce mit teilweise erheblicher Marktmacht.

Wesentliche Tendenzen sind eine stärkere Modularisierung des Wertschöpfungsprozesses, geänderte Ertragsmodelle und interdisziplinäre Kooperationen mit wechselnden Teams. Wesentliche Voraussetzung für neue Geschäftsmodelle beim Engineering 4.0 sind neue Gestaltungsansätze in Bezug auf die Integration unterschiedlicher Fachdisziplinen, Lifetime-Betrachtungen sowie die Flexibilität und Vernetzbarkeit der Produkte. Die Kooperation verschiedener Teildisziplinen wird zweifellos zum Anwachsen interdisziplinärer Entwurfsteams führen, ob das im Einzelfall inhouse oder gemeinsam mit verschiedenen Dienstleistern erfolgt, wird vom jeweiligen Einzelfall abhängen. Jedoch ist eine Tendenz zur weiteren Spezialisierung verschiedener Engineering-Dienstleistungen zu erwarten.

Im „einfachen“ Engineering-Bereich ist mittelfristig mit einer zunehmenden Automatisierung des Entwurfsprozesses zu rechnen, wie dieses in der Vergangenheit etwa beim Übergang vom manuellen Leiterplattenentwurf zur Routing-Software erfolgte. Am anderen Ende der Skala ist davon auszugehen, dass neue leistungsfähige Werkzeuge anspruchsvolle Engineeringaufgaben stärker unterstützen können. Der High-End-Bereich des Engineering wird zukünftig nicht nur den Einsatz neuer Materialien oder Fertigungstechnologien berücksichtigen müssen, sondern den gesamten Produktlebenszyklus und die Grundlagen für weitergehende Dienstleistungen (sowohl eigener als auch Dritter) in die Überlegungen einbeziehen und stellt hohe Anforderungen an die Kreativität des Engineering-Teams.

- ▶ Insbesondere für die Industrieverbände wäre es eine sinnvolle Aufgabe, für ihre Mitglieder Leitfäden und Handreichungen für die konkrete Umsetzung von Open-Innovation-Kooperationen zwischen Unternehmen zu entwickeln.

5 Engineering 4.0 – Grundzüge eines Zukunftsmodells

Der Wandel hin zu den digitalen und vernetzten Produktionssystemen in Industrie 4.0 schließt eine Veränderung des Engineering mit ein. Die Expertenaussagen dieser Studie zeigen, dass die für das Engineering 4.0 erforderlichen technischen, methodischen und juristischen Entwicklungen erst am Anfang stehen:

Eine wesentliche Herausforderung stellt die Überwindung der tradierten Grenzen zwischen Mechanik und Elektronik sowie weiteren Engineering-Gebieten dar. Die postulierte Durchgängigkeit benötigt **disziplinenübergreifend integrierte Engineering-Werkzeuge**, die heute in dieser Form nicht verfügbar oder unmittelbar absehbar sind. Dieses setzt geeignete Standards zum modellbasierten Datenaustausch auf allen Gestaltungsebenen voraus. Ebenso notwendig sind modellbasierte **Datenstandards für das Produktlebenszyklusmanagement**, um auch unternehmensübergreifende Wertschöpfungsketten angemessen abbilden zu können. Das Engineering 4.0 kommt zudem, zumindest größtenteils, ohne physische Funktionsmuster bzw. Prototypen aus, ist also idealerweise weitgehend softwarebasiert. **Simulation und virtuelle Realität** werden damit unverzichtbar. Zum Engineering gehört es auch, bereits die technischen **Voraussetzungen für Services** für Diagnose, Wartung, etc. zu schaffen, die unter Umständen erst später im Laufe einer iterativen Entwicklung definiert werden. Als neue Aufgabe für den Konstrukteur kommt die parallele Entwicklung geeigneter **Geschäftsmodelle** für die Services dazu. Hier ist eine enge Zusammenarbeit mit den kaufmännischen Funktionen im Unternehmen notwendig. Vielfach liefern solche neuen Services auch wertvolle Informationen für das Engineering selbst, sei es für die Weiter- und die Neuentwicklung des Produkts, aber auch für neue Dienstleistungen und Services. Bestandteil dieser **Rückkopplung** sind etwa Informationen zu Betriebsverhalten, zum Energieverbrauch oder zum Verschleiß. Aus Sicht der Maschinenbetreiber wäre es zudem sinnvoll, wenn sie alle Services für ihren in der Regel heterogenen Maschinenpark in einer **offenen Service-Plattform** bündeln könnten (oder wenn ihnen zumindest offene Schnittstellen für proprietäre Plattformen zur Verfügung gestellt würden).

Mechanik, Elektronik und Software weisen **völlig unterschiedliche Innovationszyklen und Lebensdauern** auf. Die im Bereich der Informationstechnik üblichen Abkündigungsfristen sind in vielen Branchen undenkbar und würden zur Vernichtung großer volkswirtschaftlicher Werte führen. Deshalb gilt es, einen wirtschaftlichen Migrationspfad zu beschreiten, der das (Re-)Engineering solcher Investitionsgüter einschließt. Dieser Migrationspfad muss sowohl die Integration von Bestandsmaschinen in digitale Modelle als auch deren Retrofit umfassen. Gleichzeitig müssen die informationstechnischen Modelle bis hin zu technischen Dokumentationen für einen permanenten Aktualisierungsprozess befähigt werden. **Dafür müssen Sicherungs-, Übergangs- und Migrationsmethoden entwickelt werden.**

Das Thema **Nachhaltigkeit** wird auch für das Engineering 4.0 **von zunehmender Bedeutung** für den Wirtschaftsstandort Deutschland sein. In wertorientierten Ansätzen werden hierbei heute Berechnungsverfahren eingesetzt, welche die total cost of ownership, d.h. die Gesamtbetriebskosten über den gesamten Produktlebenszyklus als zentrales Entscheidungskriterium herausstellen. Künftig werden Innovationsprozesse nur dann erfolgreich sein, wenn es gelingt, technische Fortschritte mit gesellschaftlichen Zielen in Einklang zu bringen. Eine human- und sozialverträgliche sowie ökonomische und ökologische Technikgestaltung wird bei der Entwicklung intelligenter Produkte und Produktionssysteme eine zentrale Rolle einnehmen. **Allgemein anerkannte umweltökonomische Modelle, die die Besonderheiten der digitalen Wirtschaft berücksichtigen, sind kaum verfügbar**; gängige Zertifizierungsschemata für kleinere Unternehmen bereits heute kaum handhabbar.

Die Übertragung **agiler Entwicklungsmethoden** für Software auf physikalische Produkte ist reizvoll, weil sie eine kürzere time-to-market-Zeitspanne und mehr Kundenorientierung verspricht. Der direkten Umsetzung steht aber entgegen, dass die Hardware-Anteile realer Maschinen sich anders als Software nicht einfach aktualisieren

lassen und dass das Regime von Haftung, vertraglich vereinbarten Produktleistungen, Zertifizierung und Zulassung bei physikalischen Produkten viel stärker ausgeprägt ist als bei Software. Ansätze für eine agile Hardware sind aber dennoch denkbar: Lastenhefte können iterativ entwickelt werden, Embedded Software lässt sich prinzipiell aktualisieren, neue additive Fertigungsverfahren versprechen zumindest theoretisch eine sehr viel schnellere und kostengünstigere Bereitstellung von physikalischen Updates. Diese Vorstellungen müssen jetzt zu einer **praxisgerechten Methodik für die agile Entwicklung von Maschinen** ausgearbeitet werden.

Das Engineering 4.0 hält nicht nur Anforderungen auf technischer Ebene bereit. Ebenso stellen sich drängende **juristische Fragen**, insbesondere bei der Haftung. Hier gibt es teilweise schon erste Ansätze, die weiter verfolgt werden müssen. Das ist zum einen die **virtuelle Zertifizierung** modularer und konfigurierbarer Maschinen, um die Variantenvielfalt in den Griff zu bekommen. Zum anderen ist bei **selbstorganisierenden Produktionsabläufen eine Prozesszertifizierung** analog zur ISO 9000 sinnvoll. Noch völlig offen ist die Haftung bei der Kollaboration **autonomer Maschinen**. Auch muss noch ein praxisgerechter Interessenausgleich zwischen dem **Arbeitnehmerdatenschutz** und der Sammlung und **Auswertung von Nutzungs- und Betriebsdaten**, die häufig personenbeziehbar sind, gefunden werden.

Aber nicht nur die Inhalte des Engineering werden sich verändern, auch seine Arbeitsorganisation und seine betriebswirtschaftliche Fundierung passen sich an. Grundsätzliche Treiber sind eine stärkere Ausdifferenzierung des Wertschöpfungsprozesses mit einer tendenziell zunehmenden Auslagerung von spezialisierten Arbeiten und einer Automatisierung einfacher Tätigkeiten. Das resultiert in geänderten Ertragsmodellen und einer stärkeren, temporären Zusammenarbeit in interdisziplinären Teams über Unternehmensgrenzen hinweg (Open Innovation). Ein universales neues Wertschöpfungsmodell ist aber nicht

zu erwarten, dafür sind die Branchen in ihren Anforderungen zu unterschiedlich. Trotzdem werden **Marktplatzmodelle und Sharing-Ansätze für Engineering-Leistungen sowie Betreibermodelle für Engineering-Werkzeuge** an Bedeutung zunehmen.

Der Einsatz digitaler Werkzeuge im Engineering wird, wie schon in der Vergangenheit, einfache Konstruktionsarbeiten rationalisieren und letztendlich automatisieren. Das Engineering umfasst (in durchaus unterschiedlichem Umfang) **kreative Prozesse** und kann damit nicht von regelbasierten Automaten geleistet werden. Das gilt insbesondere für Engineering jenseits von KVP-Prozessen und inkrementeller Innovation. Das Spektrum dieser Aufgaben umfasst u. a. die Konzeption und Implementierung von Services, die Zusammenführung bzw. die Übernahme von Technologien aus unterschiedlichen Anwendungsfeldern, die Definition und Realisierung spezieller Entwicklungsaufgaben, aber auch die Entwicklung von neuen Geschäftsmodellen. Somit bleibt der Mensch auch zukünftig bestimmender Akteur dieser Prozesse.

Insgesamt ist festzustellen, dass weder Schichtenmodelle noch phasenorientierte Vorgehensmodelle allein zur Lösung der systemimmanenten Probleme wachsender Komplexität und Interdisziplinarität von Engineering-Prozessen beitragen können. Ein zukünftiger Engineering-Ansatz für Industrie 4.0 muss folgenden Prinzipien genügen:

- **Ganzheitliche Betrachtung des Produktlebenszyklus.** Es werden ganzheitlich in einem erweiterten Produktlebenszyklus die Phasen Bedarfsanalyse, Konstruktion, Fertigung, Betrieb und Recycling betrachtet. Betriebs- und Nutzungsinformationen aus Fertigung, Betrieb und Recycling werden in einem modellbasierten „virtuellen Abbild“ mit den Bedarfs- und Konstruktionsdaten verknüpft, bei Bedarf auch unternehmensübergreifend.
- **Feedback-Architektur.** Zentraler Bestandteil des Engineering ist die technische und methodische Rückkoppelung von Wissen: Informationen aus späteren Phasen des Produktlebenszyklus (z. B. Fertigung,

Betrieb, Recycling) werden im virtuellen Abbild mit Informationen aus früheren Phasen (z. B. Bedarfsanalyse, Konstruktion) verknüpft. Auf dieser Basis wird ein systematischer Feedbackprozess aufgebaut, mit dem insbesondere auch bei neuen Produkten auf bestehendes Wissen aus Konstruktion, Fertigung, Betrieb und Recycling zugegriffen werden kann.

- **Umfassender Produktansatz.** Gegenstand des Engineering ist sowohl das Produkt als auch die in das Produkt integrierten Services und Dienstleistungen. Die Gestaltung eines Services schließt auch den Entwurf seines Geschäftsmodells mit ein.
- **Integrierte umweltökonomische Betrachtung.** Zum Engineering gehört auch eine integrierte umweltökonomische Betrachtung von Produkt, Services und Dienstleistungen.
- **Simultane Betrachtung der Ingenieursdisziplinen.** In den Konstruktions-, Simulations- und Visualisierungssystemen werden die betroffenen Disziplinen, wie z. B. Softwaretechnik, Elektronik und Mechanik, simultan betrachtet.
- **Offenheit für partizipative und agile Ansätze.** Alle Partner in der Wertschöpfungskette: Kunden, Zulieferer, Entwicklungspartner und technische Dienstleister sind partizipativ in das Engineering des Gesamtsystems integriert und damit auch in den Produktlebenszyklus. Die eingesetzten Werkzeuge und Methoden müssen für kollaboratives Arbeiten (im Sinne von Open Innovation) und agile Prozessmodelle offen sein. Dafür müssen neben technischen auch rechtliche und infrastrukturelle Voraussetzungen geschaffen werden. Zu dieser Infrastruktur gehört insbesondere auch eine flächendeckende Breitbandversorgung
- **Langlebige Informationssysteme.** Für die Datenhaltung des virtuellen Abbilds gibt es eine Archivierungsstrategie, die für die Lebensdauer des Produkts eine angemessene Speicherung, Nutzung und Bearbeitung der Daten gewährleistet.
- **Begleitende Zertifizierung.** Konstruktion, Fertigung und Zertifizierung werden miteinander verzahnt. Die Zertifizierung wird von einer nachgelagerten zu einer

begleitenden Aktivität und wird, soweit ohne Qualitätsverluste machbar, möglichst weitgehend nicht mehr physisch, sondern virtuell durchgeführt.

Das Engineering wird damit zu einem den Produktlebenszyklus durchgängig begleitenden Feedback-Prozess, der unternehmensübergreifend alle Akteure der Wertschöpfungskette einbezieht, eine ganzheitliche Sicht auf das Produkt, die integrierten Services und die Dienstleistungen abbildet und technische, ökonomische und ökologische Aspekte gleichermaßen berücksichtigt (siehe Abbildung 5, Seite 32).

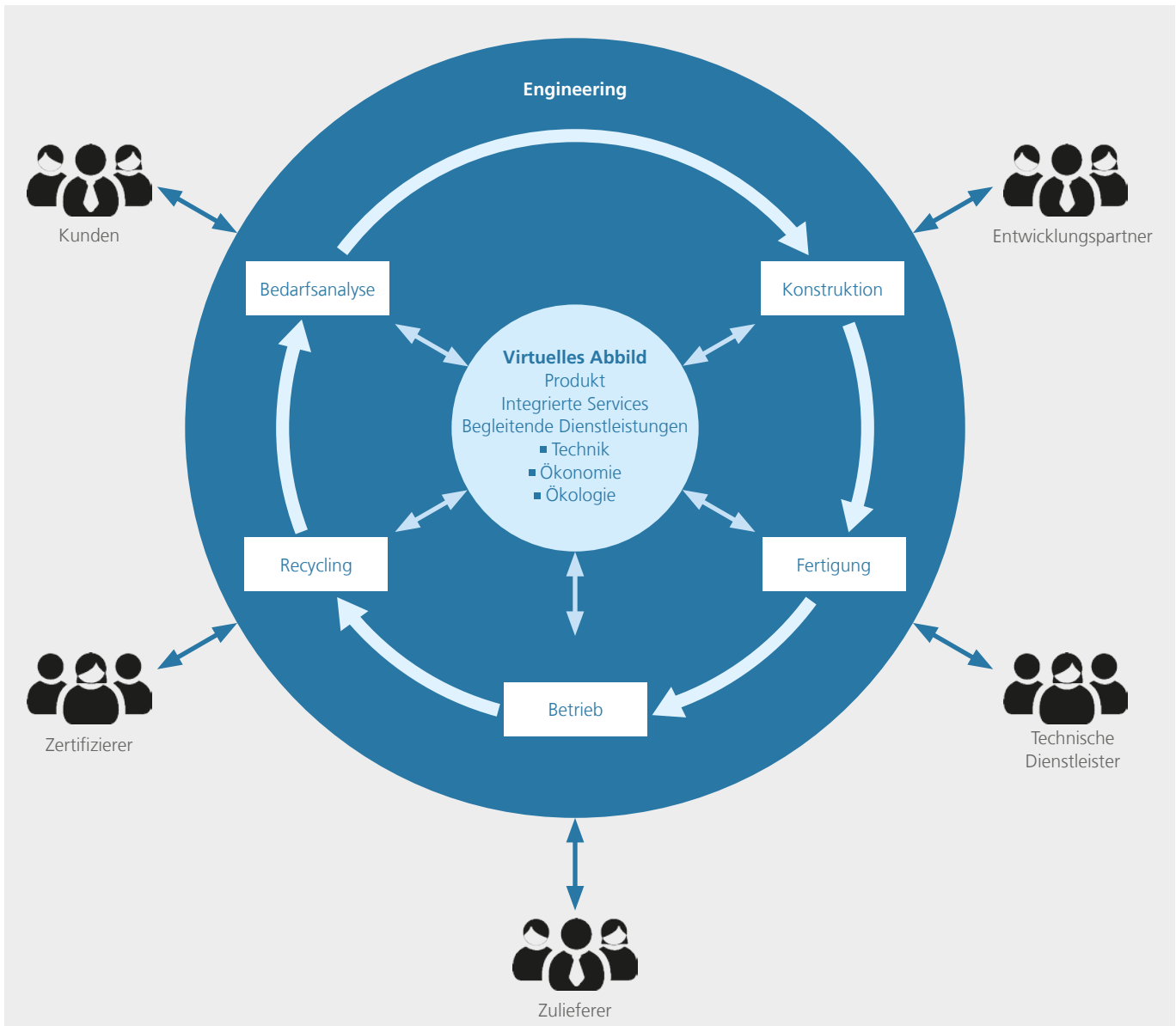


Abbildung 5: Die Feedback-Architektur des Engineering 4.0 (© iit)

Literaturverzeichnis

Abramovici, Michael; Göbel, Jens Christian; Neges, Matthias (2015): Smart Engineering as Enabler for the 4th Industrial Revolution. In: Madjid Fathi (Hg.): Integrated systems: innovations and applications. Cham: Springer, S. 163–170.

acatech (Hg.) (2014): SMART SERVICE WELT. Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Internetbasierte Dienste für die Wirtschaft. Arbeitskreis Smart Service Welt. Online verfügbar unter http://www.acatech.de/fileadmin/user_upload/Baumstruktur_nach_Website/Acatech/root/de/Projekte/Laufende_Projekte/Smart_Service_Welt/BerichtSmartService_mitUmschlag_barrierefrei_HW76_DNK2.pdf, zuletzt geprüft am 16.03.2016.

Anderl, Reiner; Eigner, Martin; Sandler, Ulrich; Stark, Rainer (2012): Smart Engineering. Interdisziplinäre Produktentstehung. Berlin, Heidelberg: Springer (acatech DISKUSSION, April 2012). Online verfügbar unter <http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10605472>.

Beck, Kent; Beedle, Mike; van Bennekum, Arie; Cockburn, Alistair; Cunningham, Ward; Fowler, Martin et al. (2001): Manifesto for Agile Software Development. Online verfügbar unter <http://agilemanifesto.org/>, zuletzt geprüft am 30.03.2016.

Bendel, Oliver (oJ): Industrie 4.0. In: Springer Gabler (Hg.): Gabler Wirtschaftslexikon. Online verfügbar unter <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/-2080945382/industrie-4-0-v2.html>

Bitkom (Hg.): Rechtliche Aspekte von Industrie 4.0. Vorabfassung; Stand: 1. April 2016. Online verfügbar unter <https://www.bitkom.org/Publikationen/2016/Leitfaden/Rechtliche-Aspekte-von-Industrie-4-0/Bitkom-Leitfaden-Rechtliche-Aspekte-von-Industrie-4-0.pdf>, zuletzt geprüft am 20.06.2016.

Bullinger, Jörg (2002): Technologiemanagement. Forschungen und Arbeiten in einer vernetzten Welt. Berlin, Heidelberg: Springer. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-56347-8>.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (Hg.) (2015): Deutsches Ressourceneffizienzprogramm (ProgRes). Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen. 2. Aufl. Online verfügbar unter http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/progress_broschuere_de_bf.pdf, zuletzt geprüft am 11.04.2016.

Das Europäische Parlament und der Rat der Europäischen Union (2001): Richtlinie 2001/95/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 3. Dezember 2001 über die allgemeine Produktsicherheit, 2001/95/EG, vom 03.12.2001. In: Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften. Online verfügbar unter <http://data.europa.eu/eli/dir/2001/95/oj>.

Die Beauftragte der Bundesregierung für Informationstechnik (Hg.): V-Modell XT. Online verfügbar unter http://www.cio.bund.de/Web/DE/Architekturen-und-Standards/V-Modell-XT/vmodell_xt_node.html, zuletzt geprüft am 20.5.2016.

Emmrich, Volkhard; Döbele, Mathias; Bauernhansl, Thomas; Paulus-Rohmer, Dominik; Schatz, Anja; Weskamp, Markus: Geschäftsmodell-Innovation durch Industrie 4.0. Chancen und Risiken für den Maschinen- und Anlagenbau. Hg. v. Dr. Wieselhuber & Partner GmbH und FhG-IPA. München, zuletzt geprüft am 27.04.2016.

Expertenkommission Forschung und Innovation (Hg.) (2016): Gutachten 2016. Gutachten zu Forschung, Innovation und technologischer Leistungsfähigkeit Deutschlands. Berlin.

Festo AG & Co. KG (Hg.): Optimierte Ressourceneffizienz in der Produktion durch energieautarke Sensorik und Interaktion mit mobilen Anwendern. Online verfügbar unter www.esima-projekt.de, zuletzt geprüft am 20.05.2016.

Fraunhofer IEM (Hg.): Intelligente Produkte - intelligente Entwicklung. Querschnittsprojekt: Systems Engineering. 01. Juli 2012 - 30. Juni 2017. Unter Mitarbeit von Roman Dumitrascu. Online verfügbar unter <http://www.its-owl.de/projekte/querschnittsprojekte/details/systems-engineering/>, zuletzt geprüft am 16.03.2016.

Gassmann, Oliver; Enkel, Ellen (2006): Open Innovation. Externe Hebeleffekte in der Innovation erzielen. In: Zeitschrift Führung + Organisation 75 (3), S. 132ff.

Gausemeier, Jürgen (Hg.) (2013): Entwurf mechatronischer Systeme. Grundlagen, Methoden und Werkzeuge, Adaption, Selbstoptimierung und Verlässlichkeit, Integration Mechanik und Elektronik, Miniaturisierung ; 9. Paderborner Workshop Entwurf Mechatronischer Systeme, 18 und 19. April 2013, Heinz Nixdorf MuseumsForum ; [unter dem Dach der Veranstaltung Wissenschaftsforum 2013 - Intelligente Technische Systeme]. Paderborner Workshop Entwurf Mechatronischer Systeme; Wissenschaftsforum Intelligente Technische Systeme. Paderborn: Univ. Heinz Nixdorf Inst (HNI-Verlagsschriftenreihe, 310).

Geisberger, Eva; Broy, Manfred (2012): agendaCPS. Integrierte Forschungsagenda Cyber-Physical Systems. Berlin, Heidelberg: Springer (acatech STUDIE, März 2012, 1). Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-29099-2>.

Goldsworthy, Michael; Tomkinson, Jeremy (2015): Delivering Energy Efficient Low Carbon Sustainable Industry (DEELOCSI). Final Project Evaluation. Hg. v. The North-East of England Process Industry Cluster. NNFCC. Heslington (York).

Grunwald, Armin (2010): Technikfolgenabschätzung. Eine Einführung. 2., grundlegend überarb. und wesentlich erw. Aufl. Berlin: Ed. Sigma (Gesellschaft, Technik, Umwelt, N.F., 1).

Harbor Research Inc. (Hg.) (2014): Smart Systems and Services Growth Opportunities. business model innovation for connected products.

Hilgendorf, Eric; Seidel, Uwe (2016): Juristische Herausforderungen für digitale Wertschöpfung – strukturierte Lösungswege für KMU. Hg. v. iit-Institut für Innovation und Technik in der VDI/VDE Innovation + Technik GmbH.

Industrial Internet Consortium (Hg.) (2015): Industrial Internet Reference Architecture. Version 1.7. Online verfügbar unter <http://www.iiconsortium.org/IIRA-1-7-ajs.pdf>, zuletzt geprüft am 16.03.2016.

Künzel, Matthias; Meier zu Köcker, Gerd; Köhler, Thomas (2015): Cluster und Innovationen. Cluster-Initiativen als Innovationstreiber. ClusterAgentur Baden-Württemberg. Stuttgart.

Lämmer-Gamp, Thomas; Meier zu Köcker, Gerd; Nerger, Michael (2014): Cluster Collaboration and Business Support Tools to Facilitate Entrepreneurship, Crosssectoral Collaboration and Growth. Report of the European Cluster Observatory. Hg. v. The European Commission. Berlin, Brüssel. Online verfügbar unter https://www.google.de/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKewj3q9mTxqHMAhXKKcAKHX_KDSIQFggkMAA&url=http%3A%2F%2Fec.europa.eu%2FdocsRoom%2Fdocuments%2F9972%2Fattachments%2F1%2Ftranslations%2Fen%2Frenditions%2Fnative&usq=AFQjCNHRQGCMpHpzSv0qiZfqpzCMgzJ2mw&cad=rja, zuletzt geprüft am 22.04.2016.

- Liegmann, Hans; Neuroth, Heike (2010): Einführung. In: Neuroth, Heike; Oßwald, Achim; Scheffel, Regine; Strathmann, Stefan; Huth, Karsten (Hg.): nestor-Handbuch. Eine kleine Enzyklopädie der digitalen Langzeitarchivierung. Niedersächsische Staats- und Universitätsbibliothek. Göttingen. Online verfügbar unter <http://www.nestor.sub.uni-goettingen.de/handbuch/index.php>.
- Müller, Simon C.; Böhm, Markus; Schröer, Marina; Bakhirov, Alexander (2016): Geschäftsmodelle in der digitalen Wirtschaft. Vollstudie. Hg. v. Expertenkommission Forschung und Innovation. München (Studien zum deutschen Innovationssystem, 13-2016).
- Müller-Pschorr, Ulrich; Treytnar, Dieter (Hg.) (2011): Robuster Entwurf von neuen Elektronikkomponenten für Anwendungen im Bereich Elektromobilität. RESCAR 2.0. Infineon Technologies AG. Online verfügbar unter https://www.edacentrum.de/rescar/system/files/ct_presentation/rescar_dt_03.pdf, zuletzt geprüft am 17.03.2016.
- OECD (2015): OECD Science, Technology and Industry Scoreboard 2015. Paris: OECD Publishing.
- Plattform Industrie 4.0 (Hg.) (2015): Whitepaper FuE-Themen. Online verfügbar unter <http://www.zvei.org/Downloads/Automation/Whitepaper-I40-FuE-Themen-2015-04.pdf>, zuletzt geprüft am 16.03.2016.
- Plattform Industrie 4.0 (2016a): Digitalisierte Industrie – Analoges Recht? Ein Überblick der Handlungsfelder. Hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Berlin, zuletzt geprüft am 27.04.2016.
- Plattform Industrie 4.0 (2016b): Fokusthema: Daten im Kontext von Industrie 4.0. Hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Berlin, zuletzt geprüft am 27.04.2016.
- ProSTEP iViP Verein (Hg.): Forschungsvereinigung Smart Engineering. Online verfügbar unter www.prostep.org/de/projekte/forschungsvereinigung.html, zuletzt geprüft am 16.03.2016.
- Rat der europäischen Gemeinschaften (11.08.1992): Richtlinie 92/59/EWG des Rates vom 29. Juni 1992 über die allgemeine Produktsicherheit, 92/59/EWG, vom 29.06.1992. In: Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften. Online verfügbar unter <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:31992L0059&from=DE>, zuletzt geprüft am 29.03.2016.
- VDI Richtlinie 4801 Blatt 1, Februar 2016: Ressourceneffizienz - Methodische Grundlagen, Prinzipien und Strategien.
- Richter, Stephan; Wischmann, Steffen (2016): Additive Fertigungsmethoden – Entwicklungsstand, Marktperspektiven für den industriellen Einsatz und IKT-spezifische Herausforderungen bei Forschung und Entwicklung. Hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie.
- Rieger, Volker; Bodenbenner, Philipp; Wagner, Tobias; Tilly, Roman; Schoder, Detlef; Seltitz, André (2015): Geschäftsmodellinnovation. Neue Wege für nachhaltigen Erfolg. Studie. Hg. v. Detecon International GmbH. Köln, zuletzt geprüft am 27.04.2016.
- Sachse, Pierre; Specker, Adrian; Lauche, Kristina (Hg.) (1999): Design thinking. Analyse und Unterstützung konstruktiver Entwurfstätigkeiten. Zürich: vdf Hochschulverl. an der ETH Zürich (Mensch, Technik, Organisation, 22).
- Schenk, Michael (Hg.) (2009): Digital Engineering - Herausforderung für die Arbeits- und Betriebsorganisation. Berlin: GITO-Verl. (Schriftenreihe der Hochschulgruppe für Arbeits- und Betriebsorganisation e.V. [HAB]).

Schiersch, Alexander; Gehrke, Birgit (2016): FuE-intensive Industrien und wissensintensive Dienstleistungen im internationalen Vergleich. Studien zum deutschen Innovationssystem Nr. 6-2016. Hg. v. Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung und Niedersächsisches Institut für Wirtschaftsforschung e.V. Berlin, Hannover, zuletzt geprüft am 20.05.2016.

Sendler, U. (2009): Das PLM-Kompodium: Referenzbuch des Produkt-Lebenszyklus-Managements: Springer Berlin Heidelberg. Online verfügbar unter <https://books.google.de/books?id=bcwfBAAAQBAJ>.

Statistisches Bundesamt (Hg.) (2015): Produzierendes Gewerbe. Kostenstruktur der Unternehmen des Verarbeitenden Gewerbes sowie des Bergbaus und der Gewinnung von Steinen und Erden. 2013 (Fachserie 4 Reihe 4.3). Online verfügbar unter https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/IndustrieVerarbeitendesGewerbe/Strukturdaten/Kostenstruktur2040430137004.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 29.03.2016.

VDI (2014): Statusreport Additive Fertigungsverfahren. Hg. v. Erik Marquardt. Online verfügbar unter https://www.vdi.de/fileadmin/vdi_de/redakteur_dateien/gpl_dateien/VDI_Statusreport_AM_2014_WEB.pdf, zuletzt geprüft am 17.03.2016.

VDI/VDE-GMA; ZVEI (Hg.) (2015): Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI4.0). Statusreport. April 2015. Online verfügbar unter <http://www.zvei.org/Downloads/Automation/Statusreport-Referenzmodelle-2015-v10.pdf>.

Wissenschaftlicher Beirat Industrie 4.0; acatech (Hg.): Neue Chancen für unsere Produktion. 17 Thesen des wissenschaftlichen Beirates der Plattform Industrie 4.0. Online verfügbar unter http://www.acatech.de/fileadmin/user_upload/Baumstruktur_nach_Website/Acatech/root/de/Aktuelles___Presse/Presseinfos___News/ab_2014/Industrie_4.0_Broschuere.pdf, zuletzt geprüft am 25.04.2016.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

www.autonomik40.de