

1. Das Phänomen Industrie 4.0

Was haben selbstfahrende Autos, das Mautsystem Toll Collect, der Dash Button von Amazon, die Verfolgung des Zustellprozesses einer Bestellung über das Internet und der Einkauf im Real Future Store der Metro Group gemeinsam? Es handelt sich um mehr oder weniger bekannte und fortgeschrittene Anwendungen von Digitalisierungstechnologien, die auch den Kern von Industrie 4.0 bilden. Dabei werden verschiedenartige Objekte über intelligente, echtzeitfähige und über das Internet verknüpfte Anwendungen so miteinander verbunden, dass für alle Beteiligten ein Mehrwert entsteht.

Im Zusammenhang mit der Zukunft der deutschen Industrie und der Wettbewerbsfähigkeit des Standorts Deutschland fällt vielfach der Begriff Industrie 4.0. In diesem einleitenden Kapitel wird gezeigt, wie dieser Begriff entstanden ist und auf welchen Grundlagen er aufbaut. Dazu erfolgt eine erste inhaltliche Konkretisierung des Konzepts Industrie 4.0. Anschließend wird aufgezeigt, über welche Schritte die Entwicklung des Wertschöpfungskonzepts Industrie 4.0 stattgefunden hat und von welchen Einflussfaktoren bzw. Treibern sie abhängt. Daraus ergeben sich die Perspektiven und Fragestellungen, die in den nachfolgenden Kapiteln untersucht werden. Den Abschluss des Kapitels bildet eine Zusammenstellung der wesentlichen Anforderungen, mit denen sich ein Unternehmen bei der aktiven Beteiligung an Industrie 4.0 konfrontiert sieht.

1.1 Was heißt Industrie 4.0?

Seit der **Begriff Industrie 4.0** im Jahr 2011 im Rahmen der Hannover Messe Industrie in die Öffentlichkeit eingeführt wurde (vgl. Kagermann et al. 2011), hat er eine beeindruckende Popularität gewonnen. Es gibt derzeit kaum ein Magazin oder eine Nachrichtensendung zu wirtschaftspolitischen Themen, in denen Industrie 4.0 nicht in irgendeiner Weise thematisiert wird. Obwohl die damit adressierten Sachverhalte im Englischen üblicherweise mit »Industrial Internet of Things« bezeichnet werden, findet der eingängige Begriff Industry 4.0 (oder sogar Industrie 4.0) auch in englischsprachigen Publikationen Verwendung (vgl. z. B. Shafiq et al. 2015, Zezulka et al. 2016, Wang et al. 2017).

Unter Industrie 4.0 versteht man in erster Näherung ein neuartiges Konzept für die industrielle Produktion, bei dem verstärkt **Digitalisierungstechniken** zum Einsatz kommen. Die bereits implementierten Beispiele sind dadurch gekennzeichnet, dass die reale und die virtuelle Welt über Datennetze und IT-Anwendungen eng miteinander

verknüpft werden. Physische Produktionsanlagen und die darauf hergestellten Produkte verbinden sich dynamisch, flexibel und weitgehend in Selbstorganisation mithilfe von fortgeschrittenen Informations- und Kommunikationstechnologien mit datenbasierten virtuellen Objekten oder Räumen und den zugehörigen Anwendungen.

Der Name Industrie 4.0 ist in Anlehnung an Versionsbezeichnungen bei der Software-Entwicklung entstanden, wo eine neue Versionsnummer auf eine stark veränderte Version hinweist. Die Bezeichnung deutet darauf hin, dass es sich um einen **disruptiven Transformationsprozess** in der Wirtschaft handelt, der aufgrund seiner weitreichenden Auswirkungen auch als die vierte industrielle Revolution bezeichnet wird (► Kap. 1.3.1). Eine eingehende Begriffs- und Literaturanalyse findet sich z. B. bei Herrmann et al. (2015). Dort wird auch die folgende, vor allem auf die Digitalisierung als Kernelement abstellende Definition von Industrie 4.0 gegeben:

»Industrie 4.0 ist eine Sammelbezeichnung für Konzepte und Technologien zur Organisation von (unternehmensübergreifenden) Wertschöpfungsaktivitäten. In modular aufgebauten smarten Fabriken werden cyberphysische Systeme eingesetzt, um eine virtuelle Abbildung der realen Welt zu erstellen und dezentrale Entscheidungen zu treffen. Diese kommunizieren und kooperieren untereinander sowie mit menschlichen Akteuren in Echtzeit über das Internet der Dinge. Über das Internet der Dienste werden sowohl interne als auch organisationsübergreifende Dienstleistungen von den an der Wertschöpfungskette Beteiligten angeboten und in Anspruch genommen.«

(Herrmann et al. 2015, S. 11)

Die Definition der 2013 gegründeten nationalen **Plattform Industrie 4.0** orientiert sich hingegen stärker am Systemcharakter und an den für die Umsetzung von Industrie 4.0 erforderlichen Abläufen:

»Der Begriff Industrie 4.0 steht für die vierte industrielle Revolution, eine neue Stufe der Organisation und Steuerung der gesamten Wertschöpfungskette über den Lebenszyklus von Produkten. Dieser Zyklus orientiert sich an den zunehmend individualisierten Kundenwünschen und erstreckt sich von der Idee, dem Auftrag über die Entwicklung und Fertigung, die Auslieferung eines Produkts an den Endkunden bis hin zum Recycling, einschließlich der damit verbundenen Dienstleistungen.

Basis ist die Verfügbarkeit aller relevanten Informationen in Echtzeit durch Vernetzung aller an der Wertschöpfung beteiligten Instanzen sowie die Fähigkeit, aus den Daten den zu jedem Zeitpunkt optimalen Wertschöpfungsfluss abzuleiten. Durch die Verbindung von Menschen, Objekten und Systemen entstehen dynamische, echtzeitoptimierte und selbstorganisierende, unternehmensübergreifende Wertschöpfungsnetzwerke, die sich nach unterschiedlichen Kriterien wie beispielsweise Kosten, Verfügbarkeit und Ressourcenverbrauch optimieren lassen.«

(zitiert nach PricewaterhouseCoopers 2014, S. 16)

Bei Industrie 4.0 handelt es sich somit um einen fundamentalen **Paradigmenwechsel** für die Durchführung von Wertschöpfungsprozessen, der mit veränderten Prozessabläufen in Produktion und Logistik, einer stärkeren Integration des Endkunden sowie mit neuen Geschäftsmodellen verbunden ist.

Bei den bereits umgesetzten Anwendungen von Industrie 4.0 tritt der Endkunde häufig als **Koproduzent** auf, indem er bestimmte Teile des Wertschöpfungsprozesses übernimmt. Weiter kann er seine spezifischen Anforderungen an das Produkt in den Leistungserstellungsprozess einbringen, so dass der Individualisierungsgrad der Produkte steigt. Dadurch erhöhen sich sowohl der Kundennutzen als auch die Preisbereitschaft. Ein Beispiel für eine solche starke Produktindividualisierung auf der Endkundenebene ist der Müslihersteller *mymuesli.com*, bei dem sich der Kunde online aus über 566 Billionen Variationsmöglichkeiten sein persönliches Bio-Müsli zusammenstellen und sogar die Dose mit einem selbst gewählten Namen für seine Kreation beschriften lassen kann.

Im **Industriekundenbereich** sind die Produkte und damit auch die Wertschöpfungsprozesse deutlich komplexer. Bei Industrie 4.0-Produktionsprozessen steuern sich die Produktionsaufträge über datentechnische Anwendungen entsprechend ihren individuellen Anforderungen selbsttätig durch die Fertigung und kommunizieren über Datennetze direkt mit den von ihnen benötigten Anlagen, Werkzeugen und Transportmitteln. Dadurch wird die Produktionsplanung stärker dezentralisiert und kann schneller auf wechselnde Anforderungen und Umwelteinflüsse reagieren (► Kap. 4.3.2).

Aufgrund der für die Umsetzung einer solchen selbststeuernden Fertigung erforderlichen Kompetenzen ist das Thema Industrie 4.0 auf der **Schnittstelle von Betriebswirtschaftslehre, Ingenieurwissenschaften und Informatik** angesiedelt. Eine der Vorreiterindustrien bei der Einführung von Industrie 4.0 ist – wie auch bei früheren Neuerungen in der Produktionsplanung und -steuerung – die Automobilindustrie, die daher mehrfach als Beispiel herangezogen wird.

1.2 Komponenten von Industrie 4.0

Ausgehend von den beiden in Abschnitt 1.1 zitierten Definitionen von Industrie 4.0 lassen sich die in Abbildung 1.1 dargestellten charakteristischen **Komponenten** dieses neuartigen Wertschöpfungskonzepts identifizieren. Da die zugehörigen Konzepte und ihre Einsatzmöglichkeiten im Rahmen von Industrie 4.0 in den nachfolgenden Kapiteln detailliert dargestellt werden, erfolgt an dieser Stelle zunächst eine kurze Beschreibung, um einen ersten Überblick über die vielfältigen Bestandteile von Industrie 4.0 und ihr Zusammenspiel zu geben.

- Ein wesentliches Element von Industrie 4.0 ist die Weiterentwicklung des Internets der Daten zum Internet der Dinge bzw. **Internet der Dinge und Dienste**, das in Abschnitt 3.2.2 ausführlich behandelt wird. Es entsteht dadurch, dass physische Objekte aus der realen Welt über Datennetze Informationen über ihren aktuellen Zustand austauschen und damit gleichzeitig einen Ansatzpunkt für digitale Services

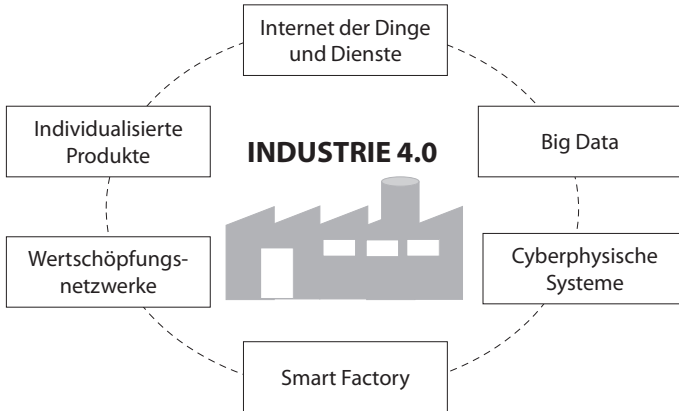


Abb. 1.1: Komponenten von Industrie 4.0

bieten. Ein Beispiel ist die automatische Nachbestellung von Druckerpatronen, wenn ein im Gerät eingebauter Chip erkennt, dass der Füllstand sich dem Ende nähert. In der Vision von Industrie 4.0 sind die Wertschöpfungspartner, ihre Fertigungseinrichtungen und auch die in Bearbeitung befindlichen Produkte auf vielfältige Weise vernetzt und kommunizieren miteinander in Echtzeit über das Internet der Dinge und Dienste.

- Die im Zusammenhang mit Industrie 4.0 anfallenden Datenmengen werden als **Big Data** bezeichnet (► Kap. 3.2.1). Das Adjektiv »groß« bezieht sich nicht nur auf den Umfang der Daten, sondern auch auf andere Eigenschaften wie die Geschwindigkeit der Datengenerierung und des Datentransfers sowie die Bandbreite der Datentypen und Datenquellen. Die für die Fertigung in Industrie 4.0-Prozessen benötigten bzw. dabei anfallenden Daten werden zum großen Teil über Sensoren in den beteiligten Anwendungen erhoben und lokal oder in einer Datencloud gespeichert. Sie können von den Wertschöpfungspartnern bei Bedarf abgerufen und für den nächsten Schritt im Fertigungsprozess genutzt werden. Das ermöglicht nicht nur eine bedarfsgerechte Einlastung von Aufträgen und die echtzeitnahe Steuerung von Fertigungsanlagen, sondern bietet auch die Möglichkeit zur Simulation von alternativen Auftragskonfigurationen und Prozessvarianten. Von großer Bedeutung im Zusammenhang mit Big Data sind die Erfordernisse des Datenschutzes und der Datensicherheit, denn die neuen Möglichkeiten des Datenaustauschs bei Industrie 4.0 eröffnen auch zuvor nicht bekannte Angriffsmöglichkeiten (► Kap. 3.4).
- Ein Kernelement von Industrie 4.0 ist der zunehmende Einsatz **cyberphysischer Systeme** in vielen Bereichen der Wertschöpfung. Unter einem cyberphysischen System versteht man ein um Sensoren, eingebettete Systeme und Aktoren erweitertes physisches System, das teilautonom agieren kann, z. B. Fertigungsroboter, fahrerlose Transportsysteme, die den besten Weg für einen Transportauftrag finden, oder auch ein Kleinteilebehälter, der seinen Füllstand selbstständig ermittelt und bei Bedarf eine Nachbestellung auslöst. Cyberphysische Systeme sind über digitale Netze sowohl unternehmensintern als auch über die Unternehmensgrenzen hinaus mit anderen

Akteuren im Wertschöpfungsprozess verbunden und können z. B. über das Internet der Dinge und Dienste miteinander kommunizieren. Abschnitt 3.2.3 setzt sich eingehend mit cyberphysischen Systemen auseinander.

- Durch den flächendeckenden Einsatz von cyberphysischen Systemen wird ein Industriebetrieb zur **Smart Factory**. Die Wertschöpfung wird bei Industrie 4.0 dezentral organisiert und findet räumlich verteilt auf smarten Produktionsanlagen statt, indem die Fertigungsaufträge mit den Maschinen kommunizieren, weitgehend autonom Material, Werkzeuge und Kapazitäten für die als nächstes anstehenden Fertigungsschritte reservieren und so ihren Weg durch die Fertigung selbst steuern. Die Zusammenarbeit von intelligenten Maschinen und Mitarbeitern findet z. B. mithilfe von Augmented Reality-Anwendungen in virtuellen Räumen statt. Durch den Einsatz additiver Fertigungsverfahren lassen sich komplexe Werkstückgeometrien direkt aus Konstruktionsdaten und CAD-Programmen heraus erzeugen, so dass kleine Losgrößen bis hin zur Einzelfertigung schnell und kostengünstig realisiert werden können. Die Abläufe in einer Smart Factory sind Gegenstand von Abschnitt 4.3.
- Die an den Industrie 4.0-Wertschöpfungsprozessen beteiligten Unternehmen sind auf vielfältige Weise in **Wertschöpfungsnetzwerke** eingebunden. Dabei tragen die Wertschöpfungspartner mit ihren unterschiedlichen Kernkompetenzen arbeitsteilig zur Fertigstellung von Kundenaufträgen bei, indem sie sich jeweils auf den von ihnen beherrschten Teil des Gesamtprozesses konzentrieren. Der für diesen intensiven Austausch von Material, Zwischenprodukten und Dienstleistungen erforderliche Informationsaustausch wird unter anderem durch schnelle Datenleitungen und Cloud Computing unterstützt. Abschnitt 5.1 befasst sich mit der Weiterentwicklung von herkömmlichen Supply Chains zu Industrie 4.0-Netzwerken.
- Industrie 4.0 eröffnet die Möglichkeit, **individualisierte Produkte** nach Kundenspezifikation herzustellen und mit kurzen Lieferzeiten zu versenden (► Kap. 6.1). Dies erfordert Produktions- und Logistikprozesse, die gleichzeitig eine große Flexibilität und eine hohe Produktivität aufweisen und zeitlich perfekt aufeinander abgestimmt sind. Damit wird die Fertigung der Losgröße Eins für viele Produkte realistisch. Vielfach ist der Kunde in den Wertschöpfungsprozess integriert, indem er seine Präferenzen einbringt oder sogar Teile des Produktionsprozesses übernimmt. Im Maschinenbau, aber auch in der endkundenorientierten Automobilindustrie werden Produktkonfiguratoren eingesetzt, die den Kunden bei der Spezifikation seiner Anforderungen an das Produkt unterstützen.

Keine dieser Komponenten von Industrie 4.0 ist vollständig neu, sondern die zugehörigen Konzepte und Methoden werden zum größten Teil bereits seit etlichen Jahren in den Unternehmen eingesetzt und dabei – getrieben durch die Möglichkeiten, die die zunehmende Digitalisierung eröffnet – sukzessiv immer weiter entwickelt. Bei der gemeinsamen Nutzung bzw. Umsetzung dieser Komponenten im Rahmen von Industrie 4.0 treten allerdings zusätzliche Synergieeffekte auf, die sich positiv auf die Effizienz und Effektivität der Wertschöpfungsprozesse auswirken. Dadurch lassen sich zum Teil erhebliche Verbesserungen in Bezug auf die strategischen Ziele Qualität, Zeit und Kosten erreichen.

1.3 Entwicklung von Industrie 4.0

In diesem Abschnitt wird untersucht, wie sich die Entwicklung von Industrie 4.0 aus industriegeschichtlicher Perspektive beschreiben lässt. Nach einer Einordnung von Industrie 4.0 in den Kontext der bisherigen industriellen Revolutionen wird ein Zusammenhang mit dem Konzept der Kondratjew-Zyklen hergestellt. Anschließend wird an einem gut nachvollziehbaren Beispiel aufgezeigt, wie sich ein Produktionsprozess über Jahrhunderte immer wieder verändert hat, wobei der Übergang zu den für Industrie 4.0 charakteristischen Strukturen die vorerst letzte Stufe bildet. Schließlich werden die wesentlichen Einflussfaktoren herausgearbeitet, die die Entwicklung von Industrie 4.0 ausgelöst haben und kontinuierlich vorantreiben.

1.3.1 Industrielle Revolutionen

Die *Industrie* fungiert in Deutschland nach wie vor als Motor für die Stabilität und das Wachstum der Volkswirtschaft. Wie bereits in Abschnitt 1.1 angesprochen wurde, steht der Begriff Industrie 4.0 für die vierte industrielle Revolution. Von einer **industriellen Revolution** spricht man, wenn die bisherigen Produktionsmethoden durch eine neue Technologie tiefgreifend und dauerhaft verändert werden (vgl. Bauer et al. 2014, S. 12). Dies bringt in der Regel beachtliche Produktivitätssteigerungen mit sich, erfordert von den Unternehmen aber auch erhebliche Anpassungsmaßnahmen in Bezug auf die Fertigungsprozesse und die Organisation der Produktion. Eine Steigerung der Produktivität liegt dann vor, wenn sich die je Arbeitsstunde hergestellte Produktionsmenge bzw. die geleistete Wertschöpfung erhöht.

Nicht nur die Produktionsverfahren, sondern auch die Anforderungen an die Qualifikationen der Mitarbeiter haben sich bei jeder dieser Revolutionen grundlegend verändert. Aus gesamtwirtschaftlicher Perspektive führt ein **Produktivitätsfortschritt** tendenziell zu einer Freisetzung von Arbeitskräften in den jeweils betroffenen Industriezweigen. Wenn es gelingt, diese an anderer Stelle im volkswirtschaftlichen Wertschöpfungsprozess einzusetzen, kommt es zu einer weiteren Steigerung der gesamtwirtschaftlichen Wohlfahrt. Abbildung 1.2 gibt einen Überblick über den zeitlichen Ablauf und die wesentlichen Elemente der bisherigen Stufen der industriellen Revolution (vgl. z. B. Hofmann 2017, S. 3 f.).

Erste industrielle Revolution

Die erste industrielle Revolution begann in der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts. Ihr wesentliches Kennzeichen ist der Übergang von der handwerklichen Fertigung in Manufakturen zur industriellen Produktion in Fabriken (vgl. Hansmann 2006, S. 12 ff.). Das wesentliche Kennzeichen dieser industriellen Revolution ist die **Mechanisierung**, d. h. der Einsatz von Maschinen und technischen Hilfsmitteln. Ihr Auslöser war die Erfindung der (Dampf-)Maschine, die zuvor von Menschen verrichtete Tätigkeiten besser, schneller und kostengünstiger ausführen konnte. Die Dampfmaschine wandelt Wärmeenergie in mechanische Energie um, die sich zum Antreiben von Fertigungsmaschinen verwenden lässt.

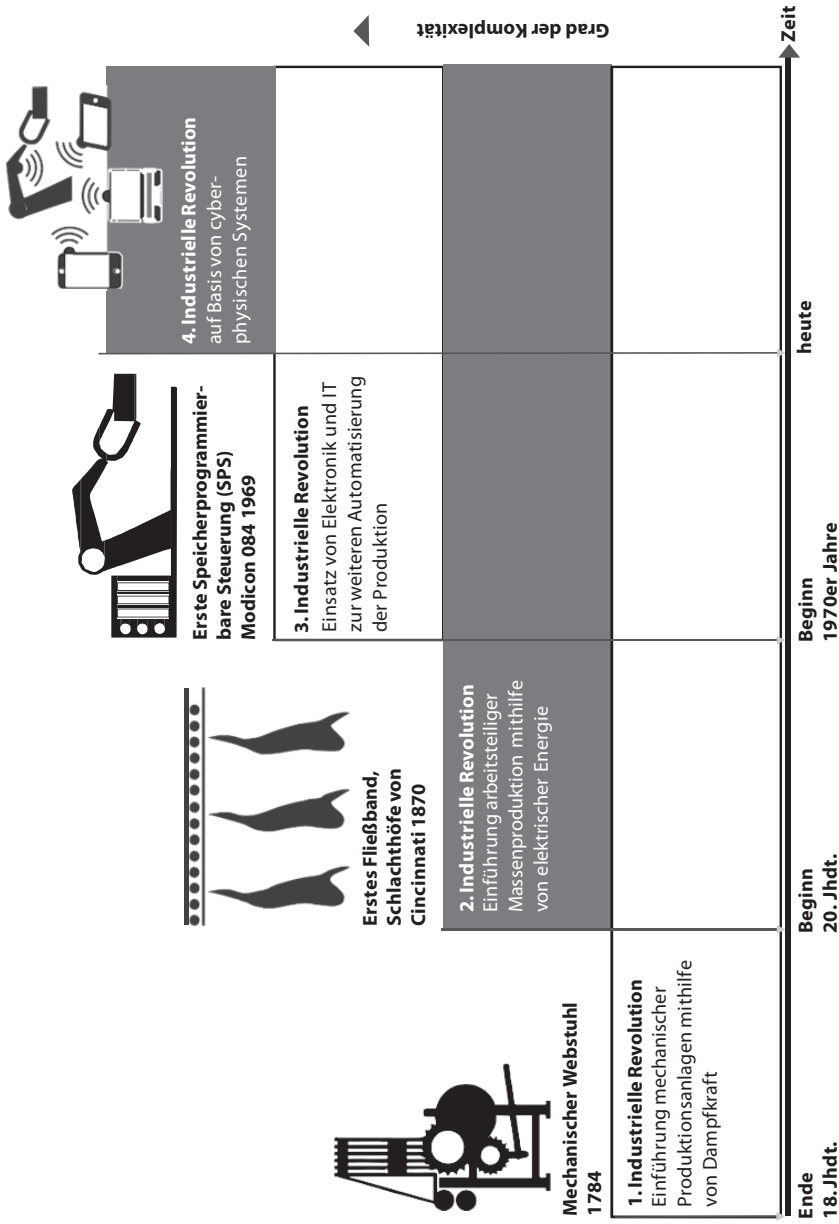


Abb. 1.2: Stufen der industriellen Revolution (Quelle: acatech 2013, S. 17)

Der Ausgangspunkt dieser industriellen Revolution lag in der englischen **Textilindustrie**, von dort aus hat sie sich schnell auf andere Industriezweige und Regionen verbreitet. 1765 erfand James Hargreaves die erste Spinnmaschine, durch die die Arbeitsproduktivität gegenüber dem Spinnen von Hand um den Faktor 24 gesteigert wurde, wobei sich gleichzeitig die Qualität des erzeugten Garns verbesserte. 1787 konstruierte Edmund Cartwright für die dem Spinnen nachgelagerte Produktionsstufe des Webens einen mechanischen Webstuhl, der gegenüber dem Handwebstuhl mit der 20-fachen Produktivität arbeitete (vgl. Steven 2007, S. 7).

Die industrielle Produktion erfordert eine räumliche Zusammenfassung der vorher dezentral zu Hause arbeitenden Spinner und Weber in **Fabriken**. Diese Organisationsform erlaubt eine zentrale Energieversorgung, die Ausnutzung von Rationalisierungseffekten aus der Arbeitsteilung und eine Verkürzung der Transportzeiten zwischen den Fertigungsschritten. Durch die damit einhergehenden Kostensenkungen können die hergestellten Produkte zu einem geringeren Preis angeboten werden, wodurch neue Käuferschichten erschlossen und zusätzliche Umsätze generiert werden.

Zweite industrielle Revolution

Zu Anfang des 20. Jahrhunderts kam es zu einer erneuten grundlegenden Veränderung der Produktionsweise in der Industrie. Auslöser der zweiten industriellen Revolution war die Umstellung der Produktionsanlagen von Dampfkraft auf Elektrizität als Antriebsenergie für die Maschinen. Dies erlaubte eine Mechanisierung weiterer Fertigungsschritte sowie die Entwicklung von automatisch angetriebenen Fördereinrichtungen. Das Fließband wurde zuerst um 1870 in den Schlachthöfen von Cincinnati eingesetzt, um die Tierkadaver schnell und in großer Stückzahl von einem Arbeitsschritt zum nächsten zu befördern. Die **Fließfertigung** ermöglicht eine stark arbeitsteilige Massenproduktion zu geringen Stückkosten.

Schon bald wurde diese innovative Idee der Fertigungsorganisation zunächst von der Automobilindustrie und später auch von anderen Industriezweigen übernommen. Henry Ford setzte ab 1918 Fließbänder in seinen Werken ein, um den Materialfluss zu vereinfachen und zu beschleunigen. Weiter orientierte er sich an den von Frederic Winslow Taylor entwickelten Methoden des Scientific Management (vgl. Taylor 1919) und verbesserte dadurch die Arbeitsabläufe systematisch. Die zweite industrielle Revolution weist folgende Kennzeichen auf (vgl. Steven 2007, S. 8 f.):

- **Rationalisierung:** Die Arbeitsproduktivität lässt sich erheblich steigern, indem die Produktion stärker arbeitsteilig organisiert wird. Dazu wird ein wiederholt durchzuführender, komplexer Fertigungsprozess in aufeinander folgende Einzelschritte zerlegt, die jeweils von spezialisierten Arbeitskräften möglichst effizient und in einem vorgegebenen Arbeitstakt durchgeführt werden.
- **Automatisierung:** Auch der vermehrte Einsatz von Maschinen zur Durchführung der verschiedenen Fertigungsaufgaben trägt zu einer weiteren Erhöhung der Produktivität bei. Dies gilt insbesondere bei einer automatisierten Verkettung der Arbeitsschritte in der Fließfertigung.

- **Standardisierung:** Die Herstellung von einheitlichen Massengütern für anonyme Märkte erlaubt die Ausnutzung von Kostendegressionseffekten und macht die Nutzung der kapitalintensiven Produktionsanlagen noch wirtschaftlicher. So wurde das unter dem Namen »Tin Lizzy« bekannte Erfolgsmodell T von Ford zunächst nur in einer standardisierten Ausstattung und ausschließlich in der Farbe schwarz angeboten.

Dritte industrielle Revolution

Die nächste bahnbrechende Veränderung in der Fertigungstechnologie, die der dritten industriellen Revolution entspricht, fand in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts statt. Sie wurde durch die Fortschritte in der **Informationstechnologie** ausgelöst und wird daher auch als »digitale Revolution« bezeichnet (Hermann et al. 2015, S. 5). Computer, Programme und Mikroprozessoren wurden zum Bestandteil von immer mehr Industrieanlagen und übernahmen immer weitere Teile der Produktionssteuerung. 1969 wurde die Modicon 084 als erste speicherprogrammierbare Steuerung in eine Fertigungsanlage eingebaut. Damit folgen die Maschinen nicht mehr festen Bearbeitungsabläufen, sondern können in Abhängigkeit von den Anforderungen eines Auftrags in kurzer Zeit umprogrammiert werden. Die Voraussetzungen für diese Entwicklung waren eine immer weitergehende Miniaturisierung von elektronischen Bauteilen sowie die Steigerung ihrer Leistungsfähigkeit.

NC-Maschinen und **Industrieroboter** können immer mehr Aufgaben übernehmen, die vorher von Mitarbeitern durchgeführt wurden, und führen dadurch zu einer weiteren Produktivitätssteigerung bei gleichzeitig hoher Flexibilität der Fertigungsabläufe. Durch die Möglichkeit zum automatisierten Werkzeugwechsel an den Maschinen reduzieren sich die Rüstzeiten, so dass auch kleinere Losgrößen kostengünstig hergestellt werden können. Über einen (begrenzt) wahlfreien, automatischen Materialfluss zwischen den einzelnen Bearbeitungsstufen entstehen flexible Fertigungssysteme, die in der Lage sind, die inzwischen von den Kunden gewünschten vielfältigen Produktvarianten zu geringen Fertigungskosten herzustellen. Die Integration der auf der technischen Seite entwickelten CA-Techniken (CAE = Computer Aided Engineering, CAD = Computer Aided Design, CAM = Computer Aided Manufacturing, CAQ = Computer Aided Quality Control und CAP = Computer Aided Planning) mit betriebswirtschaftlichen Planungsinstrumenten in Produktionsplanungs- und -steuerungssystemen (PPS-Systemen) wird als Computer Integrated Manufacturing (CIM) bezeichnet (vgl. z. B. Scheer 1987).

In den 1990er Jahren verbreitet sich die in der japanischen Automobilindustrie entwickelte Strategie der **Lean Production**, die auch als zweite Revolution in der Automobilindustrie bezeichnet wird (vgl. Womack/Jones/Roos 1992). Das Ziel von Lean Production bzw. Lean Management ist eine radikale Senkung der Produktionskosten durch die weitgehende Vermeidung von Verschwendung in den Fertigungsabläufen. Dies führt zu einer Verschlankeung der Produktion, die in verschiedenen Bereichen (Lagerbestände, Personalbedarf, Flächenbedarf, Investitionsvolumen, Lieferzeiten, Produktentwicklungszeiten) eine Halbierung der bei der Massenfertigung benötigten Ressourcen anstrebt (vgl. z. B. Steven 2014, S. 210 f.). Durch die immer weitere Verkürzung von Rüstzeiten wird als Ideal eine Losgröße von Eins angestrebt, so dass

individuelle Kundenwünsche immer besser erfüllt werden können. Die zuvor zentrale Steuerung der Produktionsabläufe wird durch dezentrale, selbststeuernde Einheiten abgelöst, deren Aktivitäten in Echtzeit überwacht und aufeinander abgestimmt werden müssen. Gleichzeitig verlagern die Unternehmen immer mehr Fertigungsschritte, die nicht zu ihren Kernkompetenzen zählen, im Rahmen des Outsourcings auf Zulieferer, mit denen sie in Supply Chains bzw. Wertschöpfungsnetzwerken zusammenarbeiten.

Vierte industrielle Revolution

Die Entwicklungen im Bereich der Informationstechnologie gehen Anfang des 21. Jahrhunderts fließend über in die als Industrie 4.0 bezeichnete vierte industrielle Revolution. Im Gegensatz zu den bisherigen industriellen Revolutionen ist diese die erste, die bereits als solche bezeichnet wird, bevor sie vollständig umgesetzt ist (vgl. Drath 2014, S. 2). Ein wesentliches Kennzeichen von Industrie 4.0 ist die Nutzung der aus der **Digitalisierung**, die auch in anderen Bereichen von Wirtschaft und Gesellschaft immer weiter voranschreitet, resultierenden Möglichkeiten. Es erfolgt eine weitgehende Digitalisierung von Produktions- und Logistikprozessen mithilfe von cyberphysischen Systemen, die sowohl innerhalb des einzelnen Unternehmens als auch über die Unternehmensgrenzen hinaus eingesetzt werden. Ein weiteres Merkmal, das über die Automatisierung bei der dritten industriellen Revolution hinausreicht, ist die umfassende *Vernetzung* von realen und virtuellen Objekten im Internet der Dinge, die mithilfe von intelligenten Anwendungen erfolgt (vgl. Bousonville 2017, S. 4). Dies führt insbesondere zu den folgenden Veränderungen bei den Abläufen in Produktion und Logistik:

- Produktionsanlagen, Werkzeuge, Einsatzmaterial, Produkte bzw. Aufträge und Transportmittel werden je nach Bedarf mit **RFID-Chips, Sensoren und Aktoren** versehen und können darüber vernetzt werden. Das digitale Produktgedächtnis speichert die für die Produktion relevanten Produkteigenschaften und protokolliert wichtige Daten aus dem laufenden Betrieb.
- Über **virtuelle Netzwerke** werden die verschiedenen Objekte vielfältig miteinander verknüpft, auch in verschiedenen Unternehmen durchgeführte Prozesse werden aufeinander abgestimmt und können online überwacht werden.
- Fertigungsaufträge werden **autonom** durch die Produktion gesteuert und sind z. B. in der Lage, die für den jeweils nächsten Fertigungsschritt benötigten Ressourcen in Echtzeit anzufordern.
- Materialbestände werden laufend überprüft und bei Bedarf durch **automatisierte Bestellungen** bei den Lieferanten aufgefüllt.
- Produktionsanlagen wandeln sich zu intelligenten **cyberphysischen Systemen**, die über ein virtuelles Abbild der relevanten Objekte der realen Welt verfügen und selbstständig mit diesen interagieren können.
- Kunden können die von ihnen gewünschten Produktvarianten online konfigurieren, wobei das physische Produkt durch Anreicherung mit digitalen Komponenten und Dienstleistungen immer mehr zum **Leistungsbündel** wird.