

1

Einleitung

1.1 Lebenswissenschaften – eine Definition

1.1.1 Eine kurze Definition des Begriffs „Leben“

Die Begriffe „Lebenswissenschaften“ bzw. „Lifesciences“ sind ubiquitär in unseren Alltag integriert und mittlerweile zu Standardausdrücken geworden. Um die Inhalte, Herausforderungen und Tendenzen der Lebenswissenschaften zu verstehen, ist es notwendig, den Begriff „Leben“ zu definieren. Es gibt heute mehr als 50 verschiedene Definitionen, die sich in Abhängigkeit vom wissenschaftlichen Bereich und der strategischen Ausrichtung unterscheiden. Im Allgemeinen kann das Leben als eine charakteristische Eigenschaft definiert werden, die lebende Materie von anorganischer Materie unterscheidet. Zu den Hauptmerkmalen des Lebens im biologischen Kontext gehören der Austausch von Materie und Energie sowie Reproduktion und Wachstum.

Auch die Definition des Begriffs „Leben“ in der Philosophie folgt diesen Kriterien [1]. Aristoteles differenzierte drei Ebenen des Lebens in einer hierarchischen Ordnung. Die unterste Ebene umfasste Pflanzen, deren Leben nur durch Ernährung und Fortpflanzung gekennzeichnet ist. Die nächsthöhere Stufe beinhaltete Tiere, die die zusätzlichen Merkmale der Sinneswahrnehmung und Bewegung aufweisen. Der Mensch ist die höchste Stufe der Aristoteles-Hierarchie und zeichnet sich neben den grundlegenden Funktionen vor allem durch seine Denkprozesse aus. In der westlichen Philosophie der Neuzeit entwickelten sich mit dem Mechanismus [2] und dem Vitalismus [3] zwei gegensätzliche allgemeine Meinungen. Verfechter des Mechanismus erklären Lebensprozesse aus den physikalischen Gesetzen der Bewegung; der lebende Organismus wird als eine Maschine betrachtet. Hauptunterstützer dieser Idee waren William Harvey (1578–1657), René Descartes (1596–1650) und Wilhelm Roux (1850–1924). Im Gegensatz zu dieser Idee beinhaltete die Theorie des Vitalismus einen signifikanten Unterschied zwischen organischer und anorganischer Materie, wobei das Leben mit organischen Verbindungen verbunden ist. Eine gezielte „lebendige Kraft“ (lat. *vis vitalis*) charakterisiert alle Lebewesen. Hauptanhänger des Vitalismus waren Jan Baptist van Helmont (1577–1644), Georg Ernst Stahl (1660–1734), Albrecht von Haller (1708–1777) und Johann Friedrich Blumenbach (1752–1840). Seit der Synthese von Harnstoff durch Friedrich Wöhler (1800–1882) war dieser Ansatz veraltet, da gezeigt werden konnte, dass für die Synthese organischer

Verbindungen keine besondere „lebende Kraft“ benötigt wird. Eine Kombination aus Mechanismus und Vitalismus ist der Organismus [4]. Dieser Ansatz aus dem späten 19. Jahrhundert erklärt Lebensprozesse anhand wissenschaftlicher Prinzipien aus Physik und Chemie. Lebende Organismen haben danach auch Eigenschaften, die in anorganischer Materie nicht gefunden werden können. Befürworter dieser Idee führten die Hypothese ein, dass biologische Fragen nur unter Berücksichtigung des gesamten Organismus beantwortet werden können. Hauptförderer des Organismus waren u. a. William Emerson Ritter (1856–1944) [5], Karl Friederichs (1831–1871) [6–8] und August Thienemann (1882–1960) [9].

In den heutigen Naturwissenschaften beschreibt der Begriff „Leben“ charakteristische Eigenschaften, durch die lebende Organismen definiert werden. Dazu gehören der Austausch von Energie, Materie und Information, das Wachstum, die Reproduktion sowie Reaktionen auf sich ändernde Umweltbedingungen. RNA und DNA werden heute als die Hauptbausteine des Lebens definiert. Diese allgemeine Definition des Lebens wurde bereits von Naturwissenschaftlern früherer Jahrhunderte eingeführt. Carl-Friedrich Kielmeyer (1765–1844) definierte Sensibilität, Reizbarkeit, Fortpflanzungskraft, Sekretionskraft und Antriebskraft als wichtige Kriterien des Lebens [10]. Als früher Evolutionswissenschaftler beschrieb er lange vor Charles Darwin (1809–1882) eigene Vorstellungen von der Evolution lebender Organismen [11]. Wahrnehmung, Fortpflanzung, Bewegung, Ernährung und Wachstum waren auch nach Ansicht des deutschen Zoologen und Philosophen Ernst Haeckel (1834–1919) die Hauptmerkmale des Lebens [12]. Francis Crick (1916–2004), der 1962 gemeinsam mit James Watson (geb. 1928) den Nobelpreis für die Entdeckung der DNA erhielt, definierte Selbsterhaltung, Genetik, Evolution und Metabolismus als Hauptmerkmale des Lebens. Der als Vater der Quantenphysik geltende bekannte Physiker und Wissenschaftsphilosoph Erwin Schrödinger (1887–1961) führte 1944 in seiner Arbeit „What is Life?“ den Begriff „Negentropie“ ein, der erheblichen Einfluss auf die Weiterentwicklung der Molekularbiologie in den kommenden Jahrzehnten hatte [13]. Befürworter der Negentropie versuchten biologische Themen mit physikalischen Wissenschaften zu erklären und begannen, sich auf den zu dieser Zeit noch unbekannten Mechanismus der Vererbung zu konzentrieren. John Maynard Smith (1920–2004) führte das „Konzept der evolutionären stabilen Strategie“ ein und identifizierte alle „Populationen von Einheiten, die zu Vermehrung, Vererbung und Variation fähig sind“ als Leben [14]. Die heute allgemein akzeptierte Definition des Lebens basiert auf den acht Säulen genetisches Programm, Reproduktion, Anpassung, Kompartimentierung, Metabolismus, Katalyse, Regulation und Wachstum.

1.1.2 Was sind Lebenswissenschaften?

Der Begriff Lebenswissenschaften stammt aus den 1990er-Jahren und wurde ursprünglich als Marketinginstrument der pharmazeutischen und chemischen Industrie etabliert. Mit der Definition des Begriffs sollte die Aufmerksamkeit auf die hohe Anzahl von pharmazeutischen Produkten und Pestiziden gerichtet werden, die für eine ausreichende Ernährung und die Erhaltung der Gesundheit der

Weltbevölkerung benötigt werden. Inzwischen hat der Begriff seine Unabhängigkeit erlangt und eine weitaus umfassendere Bedeutung. Alle Prozesse, Produkte und Bedingungen, die mit dem „Leben“ selbst zusammenhängen, sind in dem Begriff „Lifesciences“ zusammengefasst. Heute bezeichnen Lebenswissenschaften nicht nur die biologischen Wissenschaften, sondern auch Teile der Medizin. Die Entwicklung neuer Medikamente (z. B. unter Verwendung biokatalytischer Verfahren) oder die umweltfreundliche Optimierung von Prozessen sind dabei ebenso eingeschlossen wie die Sequenzierung des Genoms von Pflanzen, Tieren und Menschen oder die Entwicklung neuer therapeutischer Formen für verschiedene Krankheiten.

Die Lebenswissenschaften im Allgemeinen umfassen alle Forschungsbereiche, die sich mit Prozessen und Strukturen lebender Organismen befassen. Dazu gehören neben der klassischen Biologie auch verwandte Bereiche wie Medizin, Biomedizin, Biochemie, Molekularbiologie, Biophysik, Bioinformatik, Humanbiologie, aber auch Agrartechnologie, Lebensmittel- und Ernährungswissenschaften bis hin zur Nutzung biogener Naturressourcen und Biodiversitätsforschung. Das Methodenspektrum umfasst das gesamte Gerät- und Analyseinventar und erreicht auch die Bereiche der Geistes- und Sozialwissenschaften. Die methodische Arbeit und der theoretische Hintergrund sind hochgradig interdisziplinär, haben aber immer einen klaren Bezug zu lebenden Organismen und insbesondere zu Menschen. Damit sind die Lebenswissenschaften eine ähnliche große wissenschaftliche Gruppe wie die Geisteswissenschaften.

Gemäß der allgemein anerkannten Klassifizierung der Biotechnologie wird heute zwischen „grünen“ (Landwirtschaft, Pflanzen), „roten“ (Medizin, Pharmazie), „blauen“ (Produkte aus dem Meer), „weißen“ (Industrieprodukte), „grauen“ (Umwelt) und „gelben“ (Produktion von Lebensmitteln) Lebenswissenschaften unterschieden.

Aufgrund der immer noch hohen Zahl von Krankheiten ohne geeignete medikamentöse Behandlungsmöglichkeiten (z. B. Viruserkrankungen), des Auftretens neuer Krankheiten (z. B. Schweres Akutes Respiratorisches Syndrom (SARS) oder Vogelgrippe), des Wissens über Nebenwirkungen von kommerziell erhältlichen Medikamenten [15–17] oder der zunehmenden Resistenz gegen Mikroorganismen (z. B. gegen Antibiotika [18, 19]), besteht auch heute eine hohe Nachfrage nach der Entwicklung neuer Medikamente. Darüber hinaus erfordert der Ablauf zahlreicher Patente – und die damit mögliche Synthese kosteneffizienter Generika – die Entwicklung neuer Blockbuster für die Pharmaindustrie. Zahlreiche neue potenzielle Medikamente müssen daher synthetisiert und getestet werden; bekannte Medikamente und Arzneimittelkandidaten mit Nebenwirkungen müssen modifiziert werden, oder es müssen völlig neue Verbindungen (z. B. aus Naturprodukten) identifiziert und isoliert werden. Die roten Lebenswissenschaften widmen sich der Entwicklung neuer Medikamente und therapeutischer Methoden, einschließlich moderner Entwicklungen auf den Gebieten der Genomik und Stammzellenforschung.

Typische Themen der grünen Lebenswissenschaften sind Pflanzenforschung (Heilpflanzen, Nahrungspflanzen, Pflanzen als Rohstoffe, Pflanzen als Energielieferant etc.), Anbaumethoden sowie Resistenz gegen Ungeziefer. Darüber hinaus können Pflanzenzellen für die Herstellung von industriellen Verbindungen

oder von Arzneimitteln verwendet werden [20]. Ihre Verwendung für die Sanierung von Böden (Phytoremediation) oder als Umweltsensoren wurde ebenfalls dokumentiert.

Die blauen Lebenswissenschaften beschäftigen sich mit dem enormen Potenzial noch unentdeckter natürlicher Wirkstoffe aus Meeresorganismen. Extraktion, Isolierung, Testung und Identifizierung neuer Verbindungen sowie die Entwicklung geeigneter Synthesekonzepte für die industrielle Produktion dieser Verbindungen stehen im Mittelpunkt der aktuellen Forschung. Besonders die unter extremen Bedingungen lebenden Bakterien werden als potenzielle Quelle für biologische Substanzen angesehen, die für technische Prozesse nutzbar sind. Während klassische Enzyme bei höheren Temperaturen denaturieren, sind Biokatalysatoren von Tiefseebakterien auch in extrem heißen Umgebungen aktiv.

Gegenstand der grauen Lebenswissenschaften (auch Umweltbiologie genannt) sind Prozesse zur Erhaltung und Regeneration der Umwelt. Dazu zählen Methoden zur Trinkwasseraufbereitung, Abwasserreinigung, Abfallbehandlung sowie zur Sanierung kontaminiert Böden und Luft [21]. Methoden der grauen Lebenswissenschaften im Umweltschutz werden hauptsächlich am Ende der Prozesskette (Abwasserreinigung, Biofilter, Biowäscher etc.) eingesetzt. Innovative Ansätze beinhalten nicht nur die Entsorgung von auftretenden Umweltverschmutzungen, sondern auch die Vermeidung von Schadstoffen während des Produktionsprozesses. Genetisch veränderte Enzyme können den Energie- und Rohstoffverbrauch bei der Herstellung von Textilien, Lebensmitteln, Wasch- und Reinigungsmitteln verringern und das Auftreten unerwünschter Nebenprodukte reduzieren.

Die weißen Lebenswissenschaften (auch engl. industrial life sciences genannt) beziehen sich auf den Einsatz von biologischen Methoden in industriellen Fertigungsprozessen. Industrielle Lebenswissenschaften transferieren biologisches und biochemisches Wissen und Prozesse in technische Anwendungen. Bei diesen Verfahren werden Bakterien wie z. B. *Escherichia coli* und *Corynebacterium glutamicum*, Hefen und Enzyme verwendet. Der Begriff industrielle Lebenswissenschaften ist ziemlich jung, obwohl einige Methoden seit über 1000 Jahren von der Menschheit verwendet werden. Viele Kulturen verwendeten z. B. die alkoholische Fermentation unter Verwendung von Hefen, die malolaktische Gärung unter Verwendung von *Lactobacillus*-Stämmen oder die Essigsäureherstellung unter Verwendung von *Acetobacter*-Spezies. Aufgrund der Fortschritte in der Entwicklung biowissenschaftlicher Methoden und Anwendungen hat der Bereich der industriellen Lebenswissenschaften in den letzten Jahren an Bedeutung gewonnen. Weitere Potenziale werden zukünftig in der Optimierung von Produktionsprozessen (z. B. Basis- und Feinchemikalien), der Reduzierung der Rohstoffabhängigkeit (z. B. durch den Einsatz nachwachsender Rohstoffe), der Reduzierung von Energie- und Entsorgungskosten (z. B. Substitution chemischer Prozesse) und der Entwicklung neuer Produkte und Systemlösungen (z. B. Nutzung biologischer Stoffwechselwege mittels genetischer Methoden) gesehen [22].

Die gelben Lebenswissenschaften (Lebensmittelwissenschaften) werden in der Lebensmittelindustrie verwendet, z. B. zur Herstellung von Bier unter Verwendung von Hefen oder Joghurt und Sauerkraut unter Verwendung von Milchsäurebakterien.

Life Science Engineering ist ein wissenschaftliches Gebiet an der Schnittstelle zwischen Ingenieur- und Lebenswissenschaften. Es befasst sich mit der technischen Nutzung und Umsetzung von Wissen aus den Lebenswissenschaften. Das Verständnis der Funktionsmechanismen lebender Organismen ist von großer Bedeutung, um den Einsatz dieses Wissens in der modernen Technologie zu gewährleisten. Auf der anderen Seite wird Ingenieurwissen benötigt, um biologische Systeme in technische Prozesse zu integrieren. Ein typisches Beispiel ist die Herstellung von pharmazeutischen Verbindungen in ausreichender Menge und Qualität. Lifesciences-Ingenieure sind somit Ingenieure, die wissenschaftliche Aspekte und Zusammenhänge in den Lebenswissenschaften verstehen und dieses Wissen in technische Lösungen integrieren können. Aspekte der Nachhaltigkeit sowie der Einsatz geeigneter Software (Bioinformatik, Simulation) sind ebenfalls notwendige Teilbereiche.

1.2 Automatisierung – eine Definition

Automatisierung ist die Übertragung von Aufgaben auf automatische Maschinen und kann üblicherweise aufgrund des technologischen Fortschritts realisiert werden. Die Automatisierungstechnik ist ein multidisziplinäres Technologiefeld und eine Ingenieurwissenschaft, die alle Methoden zur Automatisierung von Maschinen und Anlagen enthält, um eine vom Menschen unabhängige Prozessierung zu erreichen.

Der Begriff „Automatisierung“ kann bis in die Antike zurückverfolgt werden. Im antiken Griechenland verehrten die Menschen die Göttin $\alphaυτοματια$ [automatia] – „die Dinge nach eigenem Willen verwaltet“ – und widmeten ihr Kapellen [23]. Aristoteles formulierte in seiner Arbeit „Politics“, dass selbstarbeitende Maschinen, die die richtigen Aufgaben erfüllen, zu einer Situation führen würden, in der weder ein Assistent für den Vorgesetzten noch ein Sklave für den Meister erforderlich wäre [24–27].

Die Definition von Automatisierung hat sich im Laufe der Zeit je nach dem Stand der Technik geändert. Eine sehr frühe Definition des Wortes „Automat“ findet sich in Meyers Neuem Konversationslexikon aus dem Jahr 1862. Nach dieser Definition ist ein Automat „jede sich selbst bewegende mechanische Vorrichtung, die eine Zeit lang ohne Einwirkung von außen, durch im Innern verborgene Kräfte in Bewegung gesetzt wird; im engeren Sinne ein mechanisches Kunstwerk, welches vermittelst eines inneren Mechanismus die Tätigkeit lebender Wesen, der Menschen oder Tiere, nachahmt und auch in Gestalt diesen nachgebildet ist“ [28]. Etwa 100 Jahre später definierten Kienitz und Kaiser die Automation als „eine hohe Stufe des maschinellen Ersatzes menschlicher Tätigkeit ..., die Kontroll-, Entscheidungs- und Anpassungsfunktionen einschließt“ [29]. Die aktuelle Industrienorm DIN IEC 60050-351 enthält im Gegensatz zu früheren Versionen keine direkte Definition der Automatisierung, sondern beschränkt sich auf die Begriffe „Automatik“ und „Automat“ [30]. Eine aktuelle Definition von Automatisierung formulierte Lothar Litz im Jahre 2013, wobei von ihm bewusst eine allgemeine Form verwendet wurde, um die Gültigkeit der Definition auch in der Zukunft zu gewährleisten: „Durch Automatisierung werden dynamische Prozes-

se in ihrem Verlauf erfasst und derart gezielt beeinflusst, dass sie vorgegebene Aufgaben und Funktionen selbsttätig erfüllen“ [28].

Nach DIN IEC 60050-351 ist ein Prozess definiert als die „Gesamtheit von aufeinander einwirkenden Vorgängen in einem System, durch die Materie, Energie oder Information umgeformt, transportiert oder gespeichert wird“ [30]. Bezogen auf technische Prozesse wird die Automatisierung in diesem Bereich als Prozessautomatisierung bezeichnet [31].

1.3 Geschichte der Automatisierungstechnik

1.3.1 Automatisierung von den Anfängen bis zum 19. Jahrhundert

Die Geschichte der Automaten beginnt bereits im antiken Griechenland. Neben zahlreichen Mythen und Legenden finden sich hier die ersten historischen Belege für die Existenz von Automaten. Ziel der Entwickler solcher Automaten war es, die Physik zu erforschen und mit technischen Hilfsmitteln eine Kopie der Natur zu ermöglichen. Eine Reihe künstlicher Vögel, bewegliche und sprechende Statuen sowie künstliche Diener und Begleiter werden in der griechischen Mythologie beschrieben. Hauptpriorität war dabei nicht der Aspekt der Nützlichkeit; die ersten nützlichen automatischen Maschinen wurden für Wasserwerke und militärische Anwendungen beschrieben. In seiner „Ilias“ beschrieb Homer die Entwicklung von selbstfahrenden Fahrzeugen und künstlichen Dienerinnen durch Hephaistos, den Gott des Handwerks. Aus dem antiken Griechenland und dem alten Rom sind viele Berichte von Historikern mit detaillierten Erläuterungen über selbstfahrende Mechanismen und Androiden bekannt. Ähnliche Berichte existieren auch aus anderen frühen Kulturen, insbesondere aus China. Eine Unterscheidung zwischen Mythos und Realität für die überlieferten Berichte ist heute leider kaum möglich.

Die ersten echten Automaten sind aus dem Bereich der Alexandrinischen Schule bekannt [32]. Ausgezeichnete Naturphilosophen wie Heron von Alexandria (gestorben nach 62), Pythagoras (570–495 v. Chr.), Euklid (ca. drittes Jahrhundert v. Chr.) und Archimedes (287–212 v. Chr.) forschten und lehrten in Alexandria. Die Kombination einfacher Werkzeuge wie Schrauben, Keile und Hebel wurde zur Ausführung komplizierter Bewegungen genutzt. Wasser, Vakuum oder Luftdruck waren die Antriebskräfte für die entworfenen Maschinen. In seiner Arbeit „Automata“ beschrieb Heron von Alexandria sich selbst öffnende Tempeltüren. Er entwickelte auch Musikmaschinen und automatisierte Theatert mit bemerkenswerten Effekten. Verschiedene Forscher entwarfen künstliche Vögel, die ihre Flügel bewegen und zwitschern konnten, oder automatisierte Maschinen, die abwechselnd Wein und Wasser lieferten. So ist u. a. ein Automat beschrieben, der nach Eingabe einer bestimmten Geldmenge eine definierte Menge Weihwasser zur Verfügung stellte. Die Forscher der Alexandrinischen Schule entwickelten viele „programmierte“ Simulatoren und Automaten sowie (die) Vorrichtungen mit Rückkopplung, die heute noch in Gebrauch sind. Das wohl bekannteste Beispiel hierfür ist die Wasserspülung in Toiletten [33].

Mit dem Zusammenbruch des Römischen Reiches ging in Mitteleuropa eine große Menge antiker Literatur verloren, allerdings konnten zahlreiche historische Belege in der arabischen Welt erhalten werden [33]. Im neunten Jahrhundert erfolgte durch die Söhne des Astrologen des Khalifa von Bagdad, Abdallah-al-Manun, eine systematische Durchsicht wissenschaftlicher Literatur. Sie übersetzten und überarbeiteten u. a. die Arbeiten von Heron. Das „Buch der kunstvollen Werkzeuge“ von Kitab-al-Haiyal wurde in dieser Zeit ein Standardbuch und wird mit der Alexandrinischen Schule verbunden. Der Aspekt der praktischen Anwendung war für die Autoren sehr wichtig. Die Mehrzahl dieser historischen Geräte wurde 1258 beim Angriff der Mongolen auf das arabische Gebiet zerstört.

In Mitteleuropa begannen Gelehrte in Klöstern am Ende des Mittelalters mit der Erforschung der alten antiken Literatur und der arabischen Revisionen und Fortschritte. Eine Legende berichtet, dass Albertus Magnus (1193–1280) eine sprechende Statue entwarf, die von seinem Schüler Thomas von Aquin (1225–1274) zerstört wurde [33, 34]. Nach der Arbeit „De anima“ von Aristoteles (384–322 v. Chr.) [35] wurde die Existenz einer Seele als die wesentliche Voraussetzung für Selbstbewegung angesehen. Daher musste einer Statue zunächst eine Seele gegeben werden, um ihre Bewegung zu ermöglichen. Für Thomas von Aquin war das nur mit schwarzer Magie (Nekromantik) möglich [36].

In diesen Zeitraum fällt auch die Entwicklung der ersten rein mechanischen Uhren (komplexe Uhren wurden bisher mit Wasser angetrieben). Handwerker begannen Anfang des 14. Jahrhunderts, die Messung der Zeit mit beweglichen Figuren und Schlagmechanismen zu kombinieren. Ein Beispiel hierfür ist die Uhr des Straßburger Münster mit einem mechanischen Hahn (um 1350), der die Flügel bewegen und krähen konnte. Der Tradition der Alexandrinischen Schule folgend, wurden komplette Szenen mit religiösem und säkularem Hintergrund entworfen, die von mechanischen Uhrwerken angetrieben wurden. Neben den beschriebenen, überwiegend humanoiden Automaten wurden Musikautomaten in Form von selbstspielenden Instrumenten entwickelt. Die ältesten noch erhaltenen mechanischen Instrumente sind die Glockenspiele in monumentalen Uhren aus dem späten Mittelalter.

Die Renaissance war ein extrem wichtiger Zeitabschnitt für die Technikgeschichte; vielfach spricht man heute von der „technologischen Revolution der Renaissance“ [33]. Im Unterschied zur Alexandrinischen Schule, die hauptsächlich Modelle entwickelte, ermöglichte der technologische Fortschritt während der Renaissance den Bau von lebensgroßen automatischen Geräten. Ingenieure wie Leonardo da Vinci (1452–1519) studierten Bücher über Mechanik und entwarfen viele neue Maschinen. Um 1550 begannen sie, technische Literatur zu schreiben. In den 50er-Jahren des 20. Jahrhunderts wurde ein Entwurf eines Roboters von Leonardo da Vinci gefunden [37, 38]. Dieser Roboter konnte seine Arme bewegen, aufstehen und den Kopf bewegen. Der französische Ingenieur Salomon de Caus (1576–1626) war der Autor eines umfassenden Werkes „Les Raisons des forces mouvantes, avec diverses machines tant utiles que plaisantes“ (Gründe für die Bewegung von Kräften, mit verschiedenen nützlichen und angenehmen Maschinen). Er beschrieb und überarbeitete viele Automaten von Heron. De Caus errichtete u. a. den Hortus Palatinus (Pfälzischer Garten) in Heidelberg sowie später eine Reihe bewegter Figuren im Schloss des Herzogs von

Burgund in Saint-Germain bei Paris, die von Wassermühlen und Nockenwalzen angetrieben wurden. Ähnliche Bauten wurden 1613 im Schloss Hellbrunn errichtet; zwischen 1748 und 1752 wurde die Anlage um mindestens 256 Figuren erweitert [39]. Eine hydraulische Orgel wurde zur Beseitigung der Geräusche des Antriebsmechanismus eingesetzt. De Caus kann als Pionier im Bau von lebensgroßen Automaten bezeichnet werden. An vielen Höfen wurden Ingenieure eingesetzt, um Androiden und andere funktionierende Automaten zu entwickeln. Eine weitere Entwicklung war der Bau von automatisiertem Spielzeug. Einer der Begründer dieses Technologiefeldes war Juanelo Turriana (1500–1585), der als Ingenieur für Karl V. arbeitete und die Wasserversorgung von Toledo revolutionierte. Seine Reputation war so groß, dass berichtet wurde, ein von ihm entworfener Android übernahm seine Einkäufe [33].

Während des 17. und 18. Jahrhunderts wandten sich die Naturwissenschaften verstärkt dem Ingenieurwesen zu, welches nunmehr als angewandte Naturwissenschaft verstanden wurde. In Frankreich kam es zu dieser Zeit zur Gründung verschiedener Ingenieurschulen wie der École Polytechnique.

In Deutschland waren einige Goldschmiede und Feinmechaniker aus Nürnberg und Augsburg führend im Automatenbau. Hans Schlottheim (1545–1625) baute um 1585 ein Schiff für Karl V., welches Räder hatte und sich auf einer sich windenden Strecke bewegte. Darauf spielten eine Orgel und verschiedene andere Instrumente; Kanonen wurden periodisch aktiviert. Darüber hinaus führten „Menschen“ verschiedene Aufgaben an Bord des Schiffes durch, z. B. das Setzen der Segel und die Durchführung einer Inspektionsrunde. Der Kaiser selbst bewegte auf einem Baldachintron sitzend seinen Kopf [40]. Die Untersuchung der Kontrollmechanismen dieser Zeit zeigt, dass hoch entwickelte Technologien zum Einsatz kamen, die „seither viele Male unabhängig voneinander wiedererfunden worden sind“ [33].

Automatische Geräte waren im 17. Jahrhundert weithin bekannt und stießen unter den Philosophen der aufkeimenden Aufklärung auf großes Interesse. Der Kartesianismus war durch die großen Fortschritte des wissenschaftlichen und rationalen Umgangs mit der Wirklichkeit gekennzeichnet [41]. Der Mechanismus postulierte Parallelen zwischen den Gesetzen von Mechanik und Maschinen sowie natürlichen Körpern. René Descartes (1596–1650) [42] erklärte in seiner Arbeit „Discours de la method“ (1637) den Unterschied zwischen Menschen und Tieren [43]. Beide sind gottgegeben, aber lediglich der Mensch hat eine unsterbliche Seele. Tiere können als sehr komplizierte Maschinen (franz. la bête machine), als Automaten gesehen werden. Descartes war überzeugt, dass Menschen in der Zukunft Maschinen in Tiergestalt konstruieren könnten, die sich auch wie ein Tier verhielten. Er verglich das Herz mit einer Hydraulikpumpe und beschrieb andere Organe wie Sehnen und Muskeln analog zu automatisierten Werkzeugen, die in dieser Zeit zur Verfügung standen. Der deutsche Jesuit Athanasius Kircher (1602–1680) realisierte die Ideen von Descartes und konstruierte einen sprechenden Kopf, singende Vögel und Instrumente spielende Figuren. Er folgte der Tradition von Salomon de Caus (1576–1626) in der Entwicklung automatisierter Theater für Gärten [33].

Das öffentliche Interesse an Automaten war im 18. Jahrhundert sehr groß, insbesondere als verschiedene Betrugsfälle aufgedeckt wurden. Im 17. und 18. Jahr-

hundert wurden viele Berichte über autonom fahrende Fahrzeuge und andere Automaten veröffentlicht; die Mehrheit von ihnen wurde allerdings als Fälschung entlarvt. Die Entwicklungswünsche waren zu dieser Zeit der technologischen Realität weit voraus.

Einen Höhepunkt erreichte die Entwicklung echter Automaten mit den Konstruktionen von Jaques de Vaucanson (1709–1782). Er studierte Anatomie, um dreidimensionale anatomische Modelle entwerfen zu können (franz. *anatomie mouvante*, bewegte Anatomie). Dies hätte eine Umsetzung der philosophischen Grundlagen von René Descartes ermöglicht. Vaucanson entwarf u. a. einen lebensgroßen, Flöte spielenden Hirten. Auch wenn es sich dabei nicht um ein realistisches anatomisches Modell, sondern um einen mit Uhrwerk und Blasebalg angetriebenen Automaten handelte, fand dieses hohe Anerkennung. Vaucanson folgte der Idee einer „bewegten Anatomie“ mit der Entwicklung einer mechanischen Ente, die nicht nur watscheln, sondern auch essen, verdauen und ausscheiden konnte [44]. Als hoch geschätztes Mitglied der Académie des Sciences beendete Vaucanson später den Bau automatischer Geräte und wurde 1741 zum Direktor der staatlichen Seidenfabrik ernannt. Mit seinen weiteren Erfindungen und Konstruktionen lieferte er viele Anregungen für die Mechanisierung und Automatisierung und leitete damit den Wechsel von der reinen Erfindung aufgrund des wissenschaftlich-technologischen Interesses zur Einführung von Automatisierungsgeräten in die Industrie ein. „Der Bau von Automaten war für einige tausend Jahre ein mehr amüsanter als nutzbringender Zeitvertreib gewesen. Dank der Beiträge Vaucansons war es möglich, über diese Stufe hinauszugehen und einige Formen der Automaten in der Industrie anzuwenden. Erst jetzt reiften die Früchte der Alexandrinischen Schule so weit, dass ein automatisch überwachtes System Wirklichkeit werden konnte“ [33]. Vaucanson entwickelte nach dem Prinzip seines Flötenspielers einen mechanischen Webstuhl für gemusterte Stoffe, der allerdings nicht verwendet wurde. 1756 baute er eine Seidenmühle in der Nähe von Lyon und entwarf jedes Detail des Gebäudes und des Antriebs. In einem modernen Sinne kann dies als die erste industrielle Fabrik angesehen werden. Er erkannte, dass die Herstellung in einer Einrichtung erfolgen muss, in der die Geräte von einer zentralen Kraft angetrieben werden. Obwohl seine Erfindungen im Gegensatz zu den einfachen Konstruktionen von Baumwollspinnmaschinen der Engländer stehen, konnten Vaucansons Erfindungen wie viele andere Ideen Mitte des 18. Jahrhunderts keinen Zugang zum Markt in Frankreich finden [45].

Die Industrialisierung begann dann aufgrund der völlig anderen soziologischen Bedingungen in England. Die Verwendung von Baumwolle anstelle von Seide ermöglichte hier einen Massenabsatz der produzierten Stoffe. Darauf hinaus waren die Förderer der Industrialisierung in England vor allem soziale Aufsteiger anstatt der im übrigen Europa üblichen Aristokraten oder etablierten Bürger. Sie errichteten ihre Fabriken in relativ jungen Städten, die nicht an alte Zunftvor-schriften gebunden waren [45].

Nach Vaucanson wurde über viele, manchmal sehr komplexe Androiden berichtet, die eine Vielzahl von Aufgaben ausführten. Die Automaten von Vater und Sohn Jaquet-Droz (1721–1790) sind hier als die bekanntesten zu nennen. Zusammen mit dem Maschinenbauingenieur Jean-Frederic Leschot (1746–1824)

entwickelten sie um 1770 drei Automaten, die heute im Museum in Neuchâtel (Schweiz) zu sehen sind. Der „Schriftsteller“ ist ein kleiner, menschenähnlicher Automat mit sich bewegendem Kopf und Augen, der einen Text mit bis zu 40 Buchstaben schreiben kann. Der Text ist auf einem Rad codiert, und die Buchstaben werden nacheinander geschrieben. Der Schreiber kann in verschiedene Zeilen schreiben und berücksichtigt dabei auch Leerzeichen. Diese Maschine kann als Vorläufer eines Computers angesehen werden, da sie über ein Programm und einen Speicher verfügt und mit verschiedenen Texten programmiert werden kann.

Am Ende des 18. bis Anfang des 19. Jahrhunderts wurden viele Automaten entwickelt. Zu den damaligen Meisterkonstrukteuren kann Johann Nepomuk Mälzel (1772–1838) gezählt werden. Er konstruierte zahlreiche Musikautomaten, darunter den viel beachteten Trompeter in Wien [46, 47]. Berühmte Komponisten wie Jan Ladislav Dusík und Ignaz Pleyel komponierten Konzertstücke für diesen Trompeter. Die Orgeluhr, für die Haydn, Mozart und Beethoven Originalwerke komponierten, wurde im 18. Jahrhundert erfunden. Die Einführung der Pneumatik ermöglichte die Entwicklung selbstspielender Klaviere mit einer befriedigenden dynamischen Abstufung.

Johann Gottfried Kaufmann (1751–1818) und sein Sohn Johann Friedrich Kaufmann (1785–1866) verbesserten mit der Entwicklung eines Trompeters in Leipzig die Mälzel-Entwicklung. In Paris entwickelte der Orgelentwickler Beaudon 1810 einen aus 4800 Teilen bestehenden mechanischen Elefanten, der essen und trinken konnte [48].

Die Bewahrung des Geistes der Antike sowie der Wissenstransfer aus dem arabischen Raum, insbesondere in der Mathematik, ermöglichen neue akademische Fortschritte in der Physik während der Renaissance. Der englische Schmied Edmund Lee entwickelte 1745 ein frühes Automatisierungsgerät für eine selbstständige Bewegung von Windmühlen [49]. Laut Aufzeichnungen aus der Antike gab es in dieser Zeit bereits Maschinen, die eine Windmühle antreiben konnten und somit Arbeiten ausführten, die zuvor von Menschen oder Tieren erledigt wurden. Im Mittelalter wurden Windmühlen mit einer vertikalen Achse gebaut. Diese wurden in die Richtung des Windes bewegt, um ein kontinuierliches Arbeiten zu ermöglichen. Mit dem Einbau eines zusätzlichen Windrades mit einem Getriebe durch Lee konnte die Maschine autonom auf Veränderungen ihrer Umgebung zu reagieren und so ihre Aufgaben optimal erfüllen.

Mit den Fortschritten auf dem Gebiet der Mechanik und den neuen Antriebstechnologien wie der Dampfmaschine begann das Zeitalter der Industrialisierung, wodurch eine Massenfertigung in Fabriken möglich wurde. Tierische und menschliche Muskelkraft konnten durch Motoren ersetzt werden. 1785 patentierte Edmund Cartwright (1743–1823) eine mechanische Webmaschine, die noch immer von Hand betrieben wurde. Nur ein Jahr später, im Jahr 1786, stellte er eine überarbeitete Version der Maschine vor, die einen neuen mechanischen Antrieb für die beweglichen Teile der Webmaschine verwendete [50].

Dies waren die ersten automatisierten Maschinen für die industrielle Produktion. Obwohl Cartwright mit seiner Weberei nicht erfolgreich war, fanden seine Erfindungen Akzeptanz und hatten weitreichende soziale Auswirkungen. Die Einführung der automatisierten Webmaschinen führte zu einer Vernichtung

zahlreicher Arbeitsplätze. Im Jahr 1811 begannen die Weber in England gegen die Maschinen zu revoltieren. Die Maschinenstürmer zerstörten die Maschinen und griffen die Befürworter der neuen Technologie an. Die Aufstände wurden mithilfe des Militärs beendet; zahlreiche Teilnehmer wurden hingerichtet oder verbannt. Ähnlich motivierte Aufstände ereigneten sich auch in der Schweiz, während die in Deutschland als Weberaufstand bekannten Revolten vornehmlich gegen ausländische Arbeiter und Lieferanten gerichtet waren.

Der Beginn der industriellen Revolution ist eng mit der Erfindung der Dampfmaschine verbunden. Auch wenn James Watt (1736–1819) nicht der Erfinder der Dampfmaschine ist, brachte er 1788 zahlreiche technologische Fortschritte ein, so z. B. die Verwendung eines Fliehkraftreglers zur Gewährleistung einer konstanten Anzahl von Umdrehungen [51]. Mit dem Betrieb der Dampfwebmaschinen begann die industrielle Revolution. Aufgaben und Funktionen, die zuvor von Menschen ausgeführt worden waren, konnten nun mit Maschinen realisiert werden. Ähnliche Prozesse konnten somit standardisiert und die Produktivität signifikant gesteigert werden. Das allgemeine Bemühen, starre und sich wiederholende Verfahren durch Maschinen auszuführen, wurde auf viele andere technische Gebiete übertragen.

Eine große Anzahl von Entwicklern in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts waren Zauberkünstler oder von Illusionen inspirierte Ingenieure. Jean Eugène Robert-Houdin (1805–1871), der Vater der modernen Magie, baute zahlreiche echte Automaten, die er in einem speziellen Theater vorführte. Darüber hinaus entwickelte er Trickautomaten, die über Seilzüge oder Pedalsysteme vom Menschen gesteuert wurden [52]. Der französische Magier Stevènard war der talentierteste Präzisionsingenieur dieser Zeit; er entwickelte sehr kleine, aber komplexe Automaten, die 1850 in Paris der Öffentlichkeit vorgestellt wurden. Die beschriebenen Automaten waren Einzelgeräte und damit recht teuer. Eine kleine Automaten produzierende Industrie entwickelte sich im 19. Jahrhundert in Paris. Familien wie Vichy, Lambert, Decamps und Roullet produzierten die Automaten in limitierter Auflage [40]. Diese Entwicklung stoppte zu Beginn des Ersten Weltkriegs. In Deutschland wurden viele kleine Automaten hergestellt, wie z. B. Singvögel, welche bis in die 1970er-Jahre im Schwarzwald produziert wurden.

1.3.2 Automatisierungstechnik seit dem 19. Jahrhundert

Die Entdeckung der Elektrizität und die Entwicklung der Elektrotechnik im 19. Jahrhundert waren wesentliche Grundlagen zur Dezentralisierung der Produktion. Es wurde nunmehr möglich, Energie über große Entfernungen zu übertragen. Erste Versuche zur Nutzung von Elektrizität für Aufgaben wie Messen, Regeln und Steuern sind aus dieser Zeit bekannt.

Samuel Morse (1791–1872) konstruierte 1833 den ersten funktionsfähigen elektromagnetischen Telegrafen, bei dem die Signale codiert und seriell übertragen wurden. Dies führte zur Entwicklung der Telex-Maschine sowie standardisierten seriellen Schnittstellen und war somit die Grundlage für unsere heutigen Bussysteme [53]. Die Entwicklung des Relais durch Joseph Henry (1797–1878) im Jahr 1835 war ein weiterer Meilenstein in der Entwicklung der modernen Automatisierungstechnik [54, 55].

Hermann Schmidt (1894–1968) gründete 1939 in Berlin die Sektion zur Regelungstechnik innerhalb der Gesellschaft Deutscher Ingenieure (VDI). Er definierte den Begriff „allgemeine Steuerungstechnik“, welcher technische und biologische Systeme umfasst und damit der Definition „Kybernetik“ von Norbert Wiener (1894–1964) entspricht [56].

Mit der Computertechnologie begann eine technologische Entwicklung, die zu einer Erhöhung des Automatisierungsgrads in der Produktion mit Industrierobotern, kompletten automatisierten Fertigungslinien und Technologien wie der Mustererkennung in der künstlichen Intelligenz führte. Der von Konrad Zuse (1910–1995) im Jahre 1941 vorgestellte Z3 war der erste funktionsfähige digitale Rechner, der mit binären Fließkommazahlen arbeitete [57]. Nach unserem heutigen Sprachgebrauch kann der Z3 als der erste Computer bezeichnet werden. Das Jahrhundert der digitalen Revolution begann.

William B. Shockley (1910–1989) führte 1948 den Begriff „Transistor“ für bereits entwickelte Halbleiterbauelemente ein [58]. Die Entwicklung des Mikroprozessors erfolgte 1970/1971. Innovationen auf dem Gebiet der Elektronik, insbesondere die Entwicklung von Transistoren, führten zu einer radikalen Verringerung der Größe von elektrischen Schaltungen. Mit den verringerten Dimensionen wurde auch der Aufwand für Anwendungen von Schaltalgebra reduziert. Die Entwicklung von integrierten Schaltkreisen ermöglichte die Ausrüstung von Geräten mit Logikschaltungen ohne großen Aufwand. Die Digitaltechnik wurde zum Hauptantrieb der Automatisierung. Innovative Feldgeräte wie Sensoren und Aktoren kommunizieren mit der Steuerung und garantieren eine konstante Qualität der Produkte auch bei Prozessschwankungen.

John W. Backus (1924–2007) schlug 1953 die fortgeschrittene Programmiersprache Fortran (abgeleitet von engl. formula translation, Formelübersetzung) vor [59]. Die Herstellung der ersten numerischen Steuerung mit Röhren kann bis ins Jahr 1954 zurückdatiert werden. Im Jahre 1958 erfolgte die Markteinführung der ersten elektronischen Steuerung SIMATIC. Die Erfindung des ersten auf Halbleitern basierenden sequenziellen Logikrechners durch Richard E. Morley im Jahr 1969 war die Grundlage für die Weiterentwicklung unserer heutigen speicherprogrammierbaren Steuerungen (SPS). Odo J. Struger (1931–1998) trug maßgeblich zur Formulierung der notwendigen Institutsstandards in den USA bei. Die SPS ersetzte pneumatische und relaisbasierte Steuerungssysteme. Ein weiterer wichtiger Schritt in der Automatisierung industrieller Prozesse war 1970 die Einführung des Universal Product Code (UPC) und die Einführung des Barcodes in den USA. Der europäische European Article Number (EAN) Code folgte 1977. Diese Identifikationsmethoden bilden die Basis für eine automatisierte Logistik. Heute wird die Barcodetechnologie, welche die Barcodes mit Optoelektronik liest, zunehmend durch RFID-Technologien (engl. radio frequency identification, RFID) ersetzt.

Im Jahr 1981 stellte IBM die ersten Personalcomputer (PC) für den Einsatz in Büros und Schulen vor. Vor dieser Zeit waren mehrere MS-DOS-basierte Computer auf dem Markt. Wenn kleinere Computer leistungsfähiger werden, können sie miteinander verbunden oder vernetzt werden, um Speicherplatz, Software und Informationen gemeinsam zu nutzen und miteinander zu kommunizieren. Das erste satellitengestützte Global Positioning System (GPS) wurde 1995 in Be-

trieb genommen. Neben der Entwicklung von Navigationssystemen ermöglichte dies auch die automatische Steuerung landwirtschaftlicher Maschinen.

Eine der wichtigsten Persönlichkeiten, die die moderne industrielle Automatisierung beeinflussten, war Henry Ford (1863–1947). Sein Konzept einer modernen Fahrzeugherrstellung revolutionierte nicht nur die industrielle Produktion (Basis für Linienproduktion), sondern hatte auch maßgeblichen Einfluss auf die moderne Kunst (Fordismus) [60].

Die heutige Automatisierungstechnik basiert auf einer Vielzahl von Erkenntnissen. Realisierungen sind sowohl in der Industrie als auch in unserem Alltag angekommen und selbstverständlich. Design, Implementierung und Inbetriebnahme sind heute vor allem methodisch orientiert und auf spezifische Prozesse ausgerichtet. Automatisierung ist ein fester Bestandteil unserer Gesellschaft. Die Kommunikationstechnologie sowie die zugrunde liegende Vernetzung werden von allen genutzt. Für die Vernetzung werden Feldbusssysteme wie Profibus, Interbus, Echtzeit-Ethernet und drahtlose Kommunikationssysteme eingesetzt. Maschinenorientierte Vernetzung ist meist Teil der geschlossenen Funktionskette und muss somit Echtzeitanforderungen erfüllen. Das Internet der Dinge, bei dem Maschinen miteinander und mit ihren Werkstücken kommunizieren, ist ein gegenwärtiges Highlight der Automatisierung.

1.3.3 Geschichte der Laborautomation

Die Laborautomation beschäftigt sich mit der Automatisierung von Laborprozessen in den Bereichen Chemie, Biologie, Pharmazie, Lebensmitteltechnologie sowie Medizin und bildet damit ein Spezialgebiet innerhalb der Automatisierungstechnik. Es handelt sich um eine Disziplin, welche das Wissen der Laborwissenschaft mit der Verfahrenstechnik vereint. Berichte über automatisierte Geräte für wissenschaftliche Untersuchungen liegen bereits seit 1875 vor. Bei diesen ersten automatisierten Geräten handelte es sich um Speziallösungen, die von Wissenschaftlern für spezifische Anwendungen in ihren Laboren entwickelt wurden [61]. Gegenstand der ersten Erwähnung von Automatisierung in der chemischen Literatur in den USA war ein unbeaufsichtigtes Gerät zum Waschen von Filtraten [62]. Edward Robinson Squibb (1819–1900) entwickelte in Jahr 1894 eine automatische Bürette [63]. Greiner stellte ebenfalls eine automatisierte Pipette vor, die im Babcock-Milchtest eingesetzt wurde [61, 64]. In den 1920er-Jahren wurden verschiedene Geräte für die Lösungsmittelextraktion für die botanische Forschung entwickelt. Palkin et al. stellten die ersten kontinuierlichen Flüssig-Flüssig-Extraktoren mit internen Diffusoren vor [61, 65].

Neben chemischen und biologischen Laboren entwickelte sich die Automatisierung zunehmend in der Kohle- und Stromerzeugungsindustrie. Das erste speziell als Laborautomat gefertigte Gerät war eine Mühle zur Vorbereitung von Kohleproben [61]. Zu Beginn des 20. Jahrhunderts wurden verschiedene Systeme zur Messung von Kohlendioxid in Rauchgasen eingesetzt, um die Steuerung der Verbrennung zu optimieren. Ab 1912 wurde der Autolysator, ein kontinuierlich arbeitendes System von Stache, Johoda und Genzen kommerziell vertrieben [61, 66]. Das erste System zur Messung von Kohlenmonoxid, welches auf einem automatischen volumetrischen Ansatz basierte, wurde von Guy B. Tay-

lor und Hugh S. Taylor vorgestellt [67]. Edelmann entwickelt im Jahre 1921 ein auf Leitfähigkeit basierendes Messsystem [61]. Mit zunehmender Entwicklung der Elektronik begann seit den 1920er-Jahren eine neue Ära in der Laborautomatisierung. Die Notwendigkeit einer schnellen Gasanalyse während des Ersten Weltkriegs führte zur Entwicklung neuer Prinzipien wie z. B. der Wärmeleitfähigkeit [68]. Der nächste Schritt bei der Entwicklung von Laborgeräten war die Einführung von pH-Elektroden. Die Zuckerherstellung zählte damals zu den Industriezweigen, welche die Forschungen vorantrieben. Frühe Wolfram-Kalomel-Elektroden zeigten nur eine unzureichende Zuverlässigkeit, und es dauerte einige Zeit, bis automatisierte pH-Regelungen in diesem industriellen Bereich einsatzbereit waren [69].

Im Jahre 1929 stellten Partridge und Muller von der Fakultät für Chemie der New York University (New York) ihren ersten automatisierten Titrator vor. Zur Erfassung der Farbänderung im Titrationsprozess wurde eine Fotozelle verwendet; die Signalverstärkung erfolgte mithilfe von Elektronenröhren [61]. Ein anspruchsvollerer Titrator wurde bei Eastman Kodak in Rochester für säurebasierte Titrationen gebaut. Dieser enthielt eine Reihe an Ventilen, welche das Entleeren der vorherigen Probe aus dem Titrationsgefäß ermöglichten [70].

Bassett Ferguson führte 1942 eine halbautomatische Destillationsanlage für die Erdölanalyse ein. Diese Entwicklung ist ein typisches Beispiel für die Einsparung von Arbeitskräften durch Automatisierung [71]. Der Mercaptan-Titrator ist ein Beispiel für Geräte, welche aufgrund des Fachkräftemangels entwickelt wurden. Das potentiometrische Titrationsverfahren wurde 1941 von der Shell Oil Company entwickelt [72] und 1943 automatisiert [73].

Verschiedene Unternehmen begannen nach dem Zweiten Weltkrieg mit der Bereitstellung automatisierter Geräte, da der Einsatz automatischer Steuerungen in Chemielaboren bereits zur Routine geworden war.

Ein 1948 entwickelter, neuer Titratortyp verwendete anstelle einer Tropfbürette eine motorgesteuerte Spritze für die Zugabe des Titriermittels. Die Aufzeichnung der Titrationskurve erfolgte mit einem Potenziometer [74]. Im Jahre 1952 erfolgte die Automatisierung der Karl-Fischer-Titration. Dazu wurde ein Polarisationsendpunkt verwendet, bei dem eine Stromzunahme zwischen zwei Platinalektroden einer Depolarisation der Elektroden zum Endpunkt der Titration entsprach [75]. Ein weiterer wichtiger Schritt war die Einführung der coulometrischen Karl-Fischer-Titration in Kombination mit einer Regeneration des Karl-Fischer-Reagens aus dem in der Lösung des erschöpften Reagens vorliegendem Jod [76]. Aufgrund des zunehmenden Einsatzes von Automatisierungstechnologien wurde 1952 eine neue Zeitschrift „Instrument Engineer“ für Automatisierung und Instrumentierung ins Leben gerufen.

Der erste Computer, welcher im Bereich der Laborautomatisierung verwendet wurde, war ein analoger Rechner. Dieser ermöglichte es Chemikern zum ersten Mal, elektronische Simulationen ihrer Prozesse zu erstellen [61]. Der erste Einsatz eines Digitalrechners wurde 1952 dokumentiert, als die Atlantic Refining Company ein Massenspektrometer und einen Digitalrechner zur Bestimmung von Kohlenwasserstoffgemischen einführte [77]. Die Entwicklung des Transistors revolutionierte auch die Laborautomatisierung durch die damit verbundene Möglichkeit der Sammlung von Tausenden Datenpunkten.

Medizinische Anwendungen hatten einen großen Einfluss auf die Entwicklung der Laborautomatisierung. Die ersten wirklich automatisierten Systeme kamen Mitte der 1950er-Jahre in medizinischen Laboren auf den Markt. Im Jahr 1956 wurde ein Blutanalysator (AutoAnalyzer, hergestellt von Technicon) zur Bestimmung von Harnstoff, Zucker und Kalzium eingeführt [78]. Spätere Konstruktionen boten die Möglichkeit der gleichzeitigen Bestimmung von über 20 Analyten mit 150 Proben pro Stunde. Es wurden viele andere Chargenanalysatoren entwickelt, die im kontinuierlichen Modus bis zu 100 Proben testen konnten. Die Einführung des Fotodiodenarrays für Spektrometer mit Gittermonochromatoren in den frühen 1980er-Jahren ermöglichte die gleichzeitige Detektion mehrerer Analyten mit unterschiedlichen Wellenlängen [79]. Ein anderer Ansatz zur klinischen Automatisierung erschien 1959 mit der Produktion des Roboterchemikers „Robot Chemist“ (Research Specialty Company) [80]. Der Robot Chemist automatisierte alle manuellen Schritte, welche von Labortechnikern mit herkömmlichen Küvetten ausgeführt wurden. Das automatisierte Pipettieren und Mischen war jedoch zu komplex, um praktische Anwendung zu finden [81]. Die Einführung von Robotik und Informatik in die klinische Laborautomatisierung in den 1970er-Jahren führte zur Entwicklung der vollständigen Laborautomatisierung (engl. total laboratory automation, TLA) [82]. In den frühen 1980er-Jahren eröffnete Masahide Sasaki das erste vollautomatisierte Labor [83–85]. Angetrieben von der Forderung, die Labordienstleistungen ohne Kostenerhöhung zu erweitern, fügten er und sein Team robotische Manipulatoren, Fördersysteme und ein Softwaresystem zu einem kompletten Automatisierungssystem zusammen, das 1982 erstmals installiert wurde [86]. Viele andere Forscher ließen sich von der Arbeit Masahide Sasaki inspirieren und entwickelten Laborautomatisierungssysteme für verschiedene Anwendungen. Diese Automatisierungssysteme bestanden normalerweise aus mehreren automatisierten Stationen sowie einem Transportsystem auf der Grundlage eines Förderbandes. In den folgenden Jahren haben über 800 Laboratorien enorme Geldsummen in die Laborautomatisierung investiert, um Kosten zu senken, die Prozessabläufe zu beschleunigen und ein qualitativ hochwertiges Probenhandling in klinischen Laboren zu entwickeln [87].

Rod Markin entwickelte 1993 das weltweit erste automatisierte klinische Laborverwaltungssystem am Medical Center der University of Nebraska. Mitte der 1990er-Jahre war er Vorsitzender des Clinical Testing Automation Steering Committee der American Association for Clinical Chemistry [88], welches später zum Clinical and Laboratory Standards Institute wurde. Im Jahr 2004 haben das National Institute of Health (NIH) sowie mehr als 300 führende Partner aus Wissenschaft, Industrie, Regierung und Öffentlichkeit den NIH-Fahrplan zur Verbesserung der medizinischen Forschung zur Erhöhung der Gesundheit fertiggestellt. Trotz des Erfolgs von Sasaki's vollautomatisiertem Labor kam es aufgrund der hohen Kosten zu keiner Verbreitung dieser Technologie [89]. Ein weiterer limitierender Faktor waren die proprietären Schnittstellen und Protokolle verschiedener Hersteller, die keine Kommunikation von Geräten verschiedener Hersteller zuließen. Die jüngste Entwicklung von Skriptsprachen wie AutoIt ermöglicht heute die Integration von Geräten verschiedener Hersteller [90].

Die Automatisierung im Bereich der Lebenswissenschaften hat sich in den letzten 20–30 Jahren rasant entwickelt. Neben medizinischen Anwendungen haben besonders das Bioscreening und die Entwicklung von Hochdurchsatz-screeningtechnologien (engl. high-throughput screening, HTS), welche den Anforderungen der pharmazeutischen Industrie entsprechen, zu Weiterentwicklungen geführt. Unter HTS wird der Einsatz hoch entwickelter und vollständig automatisierter Labore verstanden, die einen 24/7-Betrieb ermöglichen. Darüber hinaus bedeutet HTS auch die interdisziplinäre Zusammenarbeit von Lebenswissenschaften, Naturwissenschaften und Ingenieurwissenschaften [91], wobei Robotik, Elektronik, Informationstechnik, analytische Chemie, chemische Synthese, Optik, bildgebende Verfahren, Zell- und Molekularbiologie sowie Biochemie eine wichtige Rolle spielen [92]. Das Hauptziel des biotechnologischen HTS ist die effiziente Nutzung neuer Wirkstoffe. Dabei werden hohe Probenzahlen mit dem Fokus auf Zeit- und Kostenreduzierung sowie Informationsgewinnung getestet [91]. Pereira und Williams beschrieben am Beispiel des Pharmaunternehmens Pfizer Global Research and Development die Entstehung und Entwicklung von HTS [93]. Das frühe Entwicklungsstadium ist auf die Jahre 1984–1995 zurückzuführen. Zwischen 1995 und 2000 wurden konzeptionelle Anwendungen zur Untersuchung des Arzneimittelmetabolismus und der Toxizität durchgeführt. Dies erfolgt in drei aufeinanderfolgenden Phasen, welche allgemein für die Entwicklung von HTS-Prozessen gelten. Die erste Phase ist die Konzeptentwicklung und Planung, gefolgt von der Umsetzung. Die zweite Phase umfasst die technische Entwicklung und praktische Umsetzung. Die dritte und letzte Phase beinhaltet die logische Erweiterung durch Integration weiterer Fachdisziplinen [93]. Die Zielverbindungen (Targets) haben sich im Laufe der Zeit weiterentwickelt. Um 1984 waren vor allem Naturstoffe für Screenings von Interesse und bis 1990 Zielmoleküle für therapeutische Anwendungen. Die heutigen Ziele umfassen die Bestimmung von Absorption, Verteilung, Metabolismus, Ausscheidung und Toxikologie – zusammengefasst unter dem Begriff ADMET-Targets (engl. absorption, distribution, metabolism, excretion, toxicology) – und stehen seitdem im Mittelpunkt des Interesses [93]. Auch in anderen Bereichen besteht eine steigende Nachfrage nach geeigneten Hochdurchsatz-Automatisierungslösungen. Dazu gehören Labore in den Bereichen Landwirtschaft und Umwelt, Qualitätskontrolle sowie im akademischen Sektor [93–95].

Die Entwicklungen in der Automatisierung von Lifesciences-Prozessen sind hauptsächlich von den Anforderungen der pharmazeutischen Industrie bestimmt. Innerhalb der letzten 25 Jahre hat die Anzahl der zu untersuchenden Proben deutlich zugenommen. Bis zum Ende der 1980er-Jahre wurden ungefähr 10 000 Verbindungen pro Jahr und Ziel getestet. In den frühen 1990er-Jahren erhöhte sich der Probendurchsatz auf bis zu 10 000 Proben pro Monat und Target. Nur fünf Jahre später kam es zum Anstieg auf 10 000 Proben pro Woche [96]. Hochdurchsatzscreening wird heute als Verfahren zur Untersuchung von mehreren Tausend Proben pro Tag definiert. Eine Steigerung ist das Ultra-hochdurchsatzscreening, welches die Bearbeitung von mehr als 100 000 Proben pro Tag ermöglicht [92, 97–100]. Mithilfe derart hoher Durchsätze können innerhalb kürzester Zeit große Substanzbibliotheken aufgebaut werden. Großen Pharmafirmen nutzen heute Substanzbibliotheken mit synthetischen Verbin-

dungen im Bereich der Wirkstoffforschung. Die Entwicklung des HTS kann am Beispiel der kontinuierlichen Erweiterung der Bayer-HTS-Bibliothek gezeigt werden [101]. Im Jahre 1996 beschloss Bayer, die Entwicklung niedermolekularer Wirkstoffe durch eine wesentliche Erweiterung der proprietären Substanzbibliothek zu intensivieren. Heute werden mehr als 1,5 Millionen Einzelverbindungen routinemäßig in Screeningprogrammen getestet.

Eine weitere Erhöhung der Expansionsrate von Unternehmensbibliotheken ist jedoch begrenzt. Gründe dafür sind der logistische Aufwand für die Zuordnung der Verbindungen auf Mikrotiterplatten, die erforderliche Lagerung sowie die Lokalisierung der Proben in großen Lagern für nachfolgende medizinische Studien [101].

1.4 Auswirkungen der Automatisierung

1.4.1 Vorteile und Nachteile der Automatisierung

Die Automatisierungstechnik ist eine Teildisziplin der Ingenieurwissenschaften, welche alle Methoden zur Automatisierung von Maschinen und Anlagen umfasst. Während der ursprüngliche Ansatz darin bestand, die Automatisierung für die Massenproduktion zu nutzen, geht es heute vornehmlich darum, Menschen von gefährlichen, anstrengenden und Routineaufgaben zu befreien. Automatisierung hat viele Vorteile, u. a. erhöhte Durchsätze oder gesteigerte Produktivität, verbesserte Qualität oder verbesserte Vorhersagbarkeit der Qualität, eine verbesserte Robustheit oder Konsistenz von Prozessen oder Produkten sowie eine Reduzierung der direkten Arbeitskosten und Ausgaben. Die Verbesserung von Produktivität, Qualität oder Robustheit kann mit verschiedenen Methoden erreicht werden. Ein Schwerpunkt ist die Automatisierung von Prozessen zur Reduzierung der Zykluszeit oder von Bereichen, in denen ein hohes Maß an Genauigkeit erforderlich ist. Eine weitere Triebkraft ist die Substitution von menschlichem Personal bei Aufgaben, die monotone oder harte körperliche Arbeit erfordern oder in gefährlichen Umgebungen durchgeführt werden müssen (z. B. Feuer, Unterwasser, Vulkane, Nuklearanlagen oder chemische Einrichtungen) [102]. Darüber hinaus können Aufgaben, die über die menschlichen Fähigkeiten in Bezug auf Größe, Gewicht, Geschwindigkeit, Ausdauer usw. hinausgehen, von Automatisierungssystemen ausgeführt werden. Die Automatisierung kann die erforderlichen Prozesszeiten und den Arbeitsaufwand erheblich reduzieren.

Heute produzieren die meisten Fabriken in den Industrieländern ihre Produkte mithilfe von Maschinen. Prinzipiell ist es auch möglich, die Produktion von Kleinserien bis hin zu Einzelgeräten zu automatisieren. Ein höherer Automatisierungsgrad in der Industrie und anderen Wirtschaftsbereichen führt zu erhöhter Produktivität, Vereinfachung und Veränderung von Arbeitsprozessen. Rationalisierung ist also immer ein Ergebnis der Automatisierung. Aufgrund der höheren Produktivität in der Fertigungswirtschaft mussten auch andere Industriebereiche dem Automatisierungstrend folgen. Dies führte zu einem deutlichen Anstieg der Wirtschaftsleistung dieser Industriebereiche und Unternehmen, was u. a. in

Deutschland oder Japan beobachtet werden kann, wo die Einkommen durch Automatisierung im 20. Jahrhundert deutlich erhöht werden konnten.

Über lange Zeit wurde die Automatisierung in der Industrie nur eingesetzt, um monotone Arbeiten für den Menschen zu reduzieren. In den letzten Jahren hat die Automatisierung auch in andere Bereiche Eingang gefunden, wie z. B. in die Dienstleistungsbranche. So sind automatisierte Stromabrechnungen und Onlinebanking heute Standard. Darüber hinaus wurden viele andere Dinge durch Automatisierung möglich, wie z. B. Sicherheitstechnologien in der Automobilindustrie, einschließlich elektronischer Stabilitätskontrolle (ESP) und Airbags. In diesem Zusammenhang spielt auch die Frage der Sicherheit eine wichtige Rolle. Die Einhaltung von Vorschriften ist Grundvoraussetzung für die Entwicklung effizienter und zuverlässiger Arbeitsmaschinen und -anlagen. Die Automatisierung trägt hier wesentlich zu dieser Entwicklung bei.

Neben den positiven Effekten der Automatisierung industrieller Prozesse existieren auch einige Nachteile. Dazu zählen Sicherheitsbedrohungen aufgrund der begrenzten Intelligenz automatisierter Systeme. Da sie normalerweise nicht in der Lage sind, die Regeln einfacher Logik auf allgemeine Probleme anzuwenden, sind sie anfälliger für Fehler. Ein zweiter großer Nachteil sind die hohen Anschaffungskosten, da die Automatisierung einer neuen Produktlinie oder einer Anlage in der Regel große Anfangsinvestitionen erfordert. Dies gilt auch für unvorhersehbare und überhöhte Entwicklungskosten. Die Forschungs- und Entwicklungskosten insbesondere für komplexe Prozesse können durchaus die Kosten übersteigen, die durch die Automatisierung selbst eingespart werden können.

1.4.2 Soziale Auswirkungen von Automation

Eine soziale Auswirkung der Automatisierung ist oft die Einsparung und damit der Verlust von Arbeitsplätzen. Der Taylorismus hat sehr erfolgreich versucht, eine rationelle und effiziente Produktionsweise (Fließbandproduktion) zu etablieren und damit das Arbeitsumfeld und die Rolle der Arbeit verändert. Die Effizienz der Arbeit nimmt ständig zu, ist aber immer wieder mit physischen und psychischen Belastungen für die Mitarbeiter verbunden. Wiederholungsarbeit führt zur Erschöpfung und Entfremdung der Mitarbeiter von ihrer Arbeit. Dies kann auch zu Konflikten zwischen Arbeitnehmern und Arbeitgebern führen, wenn der Anstieg der Produktivität nicht mit den Löhnen korreliert. In den 1980er-Jahren war die Automatisierung mit dem Verlust von Arbeitsplätzen verbunden. Viele einfache, aber auch gefährliche, monotone oder sehr präzise und schnelle Aufgaben können durch Automatisierungstechnik mit Maschinen realisiert werden. Dies kann im Vergleich zu manuellen Vorgängen viel produktiver sein. Die Automatisierung gibt Mitarbeitern die Möglichkeit, andere Rollen zu übernehmen, und bietet höherwertige Aufgaben in der Entwicklung, Bereitstellung, Wartung und Ausführung der automatisierten Prozesse. Die Rolle des Menschen im Produktionsprozess verändert sich von der Produktion hin zu Aufgaben in der Verwaltung, Planung, Kontrolle, Wartung und im Service. Zu erwähnen ist auch, dass der hohe Automatisierungsgrad dazu beigetragen hat, dass in Deutschland ein hoher Anteil industrieller Fertigung existiert; ein gutes Beispiel dafür ist die Automobilindustrie.

Eine Gruppe von Wissenschaftlern berechnete im Jahr 2013, dass Computer in nächster Zukunft jeden zweiten Job übernehmen könnten [103]. Frank Rieger (Chaos Computer Club e. V.) warnt davor, dass die zunehmende Automatisierung zu einem erheblichen Verlust an klassischen Arbeitsplätzen führen wird (z. B. Lkw-Fahrer aufgrund selbstfahrender Fahrzeuge). Rieger plädiert für eine „Sozialisierung der Automationsdividende“, also für eine Besteuerung nicht menschlicher Arbeit, sodass das Wirtschaftswachstum auch den allgemeinen Wohlstand und seine gerechte Verteilung beeinflusst [104].

1.4.3 Grenzen der Automatisierung

Automatisierung hat viele Vorteile, aber auch Einschränkungen. Die derzeit verfügbaren Technologien können nicht alle gewünschten Aufgaben realisieren.

Ein begrenzender Hauptfaktor für die praktische Realisierung ist die wirtschaftliche Effizienz. Die Automatisierung komplexer Prozesse ist sehr teuer; daher ist es oft nur wirtschaftlich vertretbar, teure Roboter für einfache, häufig wiederkehrende Schritte im Produktionsprozess einzusetzen. Grundsätzlich ist der Einsatz von Robotern für alle komplexen Prozesse möglich. Der Betrieb und die Programmierung dieser Roboter sind jedoch sehr kostenintensiv. Nur solche Unternehmen, die hohe Stückzahlen produzieren, können sich entsprechende Automatisierungsanlagen leisten. Für viele kleine Unternehmen sind der Einsatz menschlicher Arbeit oder eine Teilautomatisierung in Kombination mit menschlicher Arbeit profitabler. Eine weitere Einschränkung ist die Montage von fragilen, sehr filigranen und komplexen Produkten. Um diese Produktions schritte zu automatisieren, sind hochkomplexe Maschinen erforderlich. Dies ist oft mit höheren Kosten im Vergleich zu den wirtschaftlichen Einsparungen aufgrund von Personalreduktion verbunden.

Darüber hinaus besitzen Maschinen heute noch keine Kreativität oder die Möglichkeit zur Flexibilität, da sie nur vorprogrammierte Prozessschritte ausführen können. Wenn ein Produkt diese Kreativität z. B. bei Einzelstücken erfordert, stößt die Maschine an ihre Grenzen. Viele automatisierte Prozesse binden große Mengen an investiertem Kapital und produzieren hohe Produktmengen. Dies macht Fehlfunktionen extrem teuer und potenziell gefährlich. Aus diesem Grund muss geschultes Personal sicherstellen, dass das gesamte System ordnungsgemäß funktioniert und Sicherheit sowie Produktqualität erhalten bleiben.

Manchmal sind die Vorteile, die sich aus der Automatisierung ergeben können, begrenzt. Dies kann der Fall sein, wenn manuelle Verrichtungen im Vergleich zur komplexen Automatisierungslösung wirtschaftlicher sind oder wenn menschliche Kreativität Priorität hat. Tätigkeiten, bei denen Menschen gegenüber Maschinen noch Vorteile haben, umfassen im Allgemeinen eine höhere Qualifikation als automatisierte Aufgaben. Gleichzeitig muss der Mensch diese Qualifikation mithilfe von Simulatoren erhalten, da Produktionslinien und Einrichtungen nicht unterbrochen werden sollten bzw. Lernen durch Handeln nicht möglich oder mit hohen Risiken verbunden ist (z. B. Flugsimulatoren).

Literatur

- 1 Edwards, P. (1967). *Life, Meaning and Value of Art*, 345–359. New York: Macmillan.
- 2 Herbermann, C.G., Pace, E. und Pallen, C.B. (1913). *The Catholic Encyclopedia. An International Work of Reference on the Constitution, Doctrine, Discipline, and History of the Catholic Church*, Bd. 1–15, Bd. 16 Index, Bd. 17 Supplement. New York: The Universal Knowledge Foundation.
- 3 Bechtel, W., Richardson, R.C. (1998). *Vitalism*. London: Routledge.
- 4 Mayr, E. (1997). *What is the Meaning of Life?* Cambridge: Belknap Press of Harvard University Press.
- 5 Ritter, W.E. (1919). *The Unity of the Organism; or, The Organismal Conception of Life, by William Emerson Ritter*, Bd. 1. Boston: R.G. Badger.
- 6 Friederichs, K. (1927). Grundsätzliches über die Lebenseinheiten höherer Ordnung und den ökologischen Einheitsfaktor – 1. *Die Naturwissenschaften* 15 (7): 153–157.
- 7 Friederichs, K. (1927). Grundsätzliches über die Lebenseinheiten höherer Ordnung und den ökologischen Einheitsfaktor – 2. *Die Naturwissenschaften* 15 (8): 182–186.
- 8 Friederichs, K. (1934). Vom Wesen der Ökologie. *Sudhoffs Archiv für Geschichte der Medizin und der Naturwissenschaften* 27 (3/4): 277–285.
- 9 Thienemann, A. (1941). Vom Wesen der Ökologie. *Biologia Generalis* 15: 312–331.
- 10 Schumacher, I. (1979). Karl Friedrich Kielmeyer, ein Wegbereiter neuer Ideen: Der Einfluss seiner Methode des Vergleichens auf die Biologie der Zeit. *Medizinhistorisches Journal* 14 (1/2): 81–99.
- 11 Bach, T. (2001). *Biologie und Philosophie bei C.F. Kielmeyer und F.J. Schelling*. Stuttgart-Bad Cannstatt: Frommann-Holzboog.
- 12 Haeckel, E. (1899). *Die Welträtsel: Gemeinverständliche Studien über monistische Philosophie*. Bonn: Strauß.
- 13 Schrödinger, E. (1951). *Was ist Leben? Die lebende Zelle mit den Augen des Physikers betrachtet*. München: Lehnen.
- 14 Smith, J.M. (1998). *Evolutionary Genetics*, Oxford: Oxford University Press.
- 15 Mutschler, E., Geisslinger, G., Kroemer, H.K., Ruth, P. und Schäfer-Korting, M. (2013). *Arzneimittelwirkungen. Lehrbuch der Pharmakologie, der Klinischen Pharmakologie und Toxikologie*. Stuttgart: WVG Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft.
- 16 Lüllmann, H., Mohr, K., Hein, L. und Wehling, M. (2016). *Pharmakologie und Toxikologie. Arzneimittelwirkungen verstehen – Medikamente gezielt einsetzen: ein Lehrbuch für Studierende der Medizin, der Pharmazie und der Biowissenschaften, eine Informationsquelle für Ärzte, Apotheker und Gesundheitspolitiker*. Stuttgart: Georg Thieme Verlag.
- 17 Langbein, K., Martin, H.-P. und Weiss, H. (2014). *Bittere Pillen. Nutzen und Risiken der Arzneimittel: ein kritischer Ratgeber*. Köln: Kiepenheuer & Witsch.
- 18 White, D.G., Alekshun, M.N. und McDermott, P.F. (2005). *Frontiers in Antimicrobial Resistance: A Tribute to Stuart B. Levy*. Washington: ASM Press.

- 19 Mahajan, R.C. und Therwath, A. (2000). *Multi-Drug Resistance in Emerging and Re-Emerging Diseases*. New Delhi: Indian National Science Academy.
- 20 Ma, J.C., Barros, E., Bock, R., Christou, P., Dale, P.J., Dix, P.J. et al. (2005). Molecular farming for new drugs and vaccines. Current perspectives on the production of pharmaceuticals in transgenic plants. *EMBO Reports* 6 (7): 593–599.
- 21 Reineke, W. und Schrömann, M. (2015). *Umweltmikrobiologie* Berlin: Springer.
- 22 Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (2007). *Weisse Biotechnologie – Chancen für neue Produkte und umweltschonende Prozesse* Berlin: Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF).
- 23 Nilsson, M.P. (1950). *Geschichte der griechischen Religion: 2. Band. Die hellenistische und römische Zeit*. München: Beck.
- 24 Schütrumpf, E., Grumach, E. und Flashar, H. (1991). *Aristoteles. Buch I: Über die Hausverwaltung und die Herrschaft des Herrn über Sklaven*, Berlin: Akad.-Verl.
- 25 Grumach, E. und Flashar, H. (1991). *Aristoteles. Buch II: Über Verfassungen, die in einigen Staaten in Kraft sind, und andere Verfassungen, die von gewissen Männern entworfen wurden und als vorbildlich gelten*. Berlin: Akad.-Verl.
- 26 Schütrumpf, E., Gehrke, H.-J., Grumach, E. und Flashar, H. (1996). *Aristoteles. Buch IV – VI*. Berlin: Akad.-Verl.
- 27 Schütrumpf, E., Grumach, E. und Flashar, H. (2005). *Aristoteles. Buch VII – VIII. Über die beste Verfassung*. Berlin: Akad.-Verl.
- 28 Litz, L. (2012). *Grundlagen der Automatisierungstechnik: Regelungssysteme – Steuerungssysteme – Hybride Systeme*. München: Oldenbourg.
- 29 Kienitz, H. und Kaiser, R. (1966). Automation und Analytik in der chemischen Industrie. *Fresenius' Zeitschrift für analytische Chemie* 222 (2): 119–127.
- 30 Deutsches Institut für Normung e. V. (2014). Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch – Teil 351: Leittechnik. DIN IEC 60050-351.
- 31 Lauber, R. und Göhner, P. (1999). *Prozessautomatisierung 1: Automatisierungssysteme und -strukturen, Computer- und Bussysteme für die Anlagen- und Produktautomatisierung, Echtzeitprogrammierung und Echtzeitbetriebssysteme, Zuverlässigkeit- und Sicherheitstechnik*. Berlin: Springer.
- 32 Watts, E.J. (2006). *City and School in Late Antique Athens and Alexandria*. Berkeley: University of California Press.
- 33 Strandh, S. (1992). *Die Maschine: Geschichte, Elemente, Funktion. Ein enzyklopädisches Sachbuch*. Augsburg: Weltbild-Verlag.
- 34 Scheeben, H.C. (1932). *Albertus Magnus*. Verlag der Buchgemeinde.
- 35 Shields, C.J. (2016). *Aristoteles: De anima*. Oxford: Clarendon Press.
- 36 Aquin, T.v., Schönberger, R. und Spaemann, R. (2001). *Über sittliches Handeln. Summa theologiae I-II q. 18–21*. Stuttgart: Reclam, Lateinisch/Deutsch.
- 37 Müntz, E. (1898). *Leonardo Da Vinci: Artist, Thinker and Man of Science*, Bd. 1. Heinemann.
- 38 Müntz, E. (1898). *Leonardo Da Vinci: Artist, Thinker and Man of Science*, Bd. 2. Heinemann.
- 39 Museum für Europäische Gartenkunst, Stiftung Schloss und Park Benrath (2008). *Wunder und Wissenschaft: Salomon de Caus und die Automatenkunst in Gärten um 1600. Katalogbuch zur Ausstellung im Museum für Europäische*

Gartenkunst der Stiftung Schloss und Park Benrath 17. August bis 5. Oktober 2008. Düsseldorf: Grupello Verlag.

- 40 Soriano, A., Battaïni, A. und Bordeau, A. (1985). *Mechanische Spielfiguren aus vergangenen Zeiten*. Genf: Monaco, Sauret, Weber.
- 41 Schmaltz, T.M. (2005). *Receptions of Descartes: Cartesianism and Anti-Cartesianism in Early Modern Europe*. London: Routledge.
- 42 Descartes, R. und Gaukroger, S. (1998). *The World and Other Writings*, Cambridge: Cambridge University Press.
- 43 Descartes, R. (1637). *Discours de la méthode*. Leyde: Maire.
- 44 Priebe, C. (2008). *Eine Reise durch die Aufklärung: Maschinen, Manufakturen und Mätressen. Die Abenteuer von Vaucanson's Ente oder Die Suche nach künstlichem Leben*. Norderstedt: Books on Demand.
- 45 Giedion, S., von Moos, S. und Ritter, H. (1987). *Die Herrschaft der Mechanisierung. Ein Beitrag zur anonymen Geschichte*. Frankfurt am Main: Athenäum-Verlag.
- 46 Wilson, J.G. (1968). *Appletons' Cyclopaedia of American Biography*. Detroit: Gale Research.
- 47 W.B. (1809). *Augsburgische Ordinari Postzeitung*, Nro. 299 (Freytag, den 15. Dezember), 1.
- 48 o.V. (1810). *Augsburgische Ordinari Postzeitung*, Nro. 151 (Montag, den 25. Juni), 1.
- 49 Bennett, S. (1979). *A history of control engineering, 1800–1930*. London: Peter Peregrinus Ltd.
- 50 Strickland, M. (1843). *A Memoir of the Life, Writings and Mechanical Inventions of Edmund Cartwright. Inventor of the Power Loom, etc., etc.* London: Saunders and Otley.
- 51 Dickinson, H.W. und Vowles, H.P. (1949). *James Watt and the Industrial Revolution*. London: Longmans, Green.
- 52 Steinmeyer, J. (2003). *Hiding the Elephant: How Magicians Invented the Impossible and Learned to Disappear*. New York: Carroll & Graf Publishers.
- 53 Jerome, H. (1934). *Mechanization in Industry*. New York: National Bureau of Economic Research.
- 54 Henry, J. (1886). *Scientific Writings*, Bd. 1. Washington: Smithsonian Inst.
- 55 Henry, J. (1886). *Scientific Writings*, Bd. 2. Washington: Smithsonian Inst.
- 56 Wiener, N. (2007). *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Cambridge: MIT Press.
- 57 Rojas, R., Bauer, F.L. und Zuse, K. (1998). *Die Rechenmaschinen von Konrad Zuse*. Berlin Springer.
- 58 Constable, G. und Somerville, B. (2003). *A Century of Innovation: Twenty Engineering Achievements that Transformed Our Lives*. Washington: Joseph Henry Press.
- 59 Allen, F.E. (1981). The History of Language Processor Technology in IBM. *IBM Journal of Research and Development* 25 (5): 535–548.
- 60 Batchelor, R. (1994). *Henry Ford, Mass Production, Modernism, and Design*. Manchester: Manchester Univ. Press.

61 Olsen, K. (2012). The first 110 years of laboratory automation: Technologies, applications, and the creative scientist. *Journal of Laboratory Automation* 17 (6): 469–480.

62 Stevens, T.M. (1875). Rapid and Automatic Filtration. *American Chemist* 6 (3): 102.

63 Squibb, E.R. (1894). Automatic zero burette. *Journal of the American Chemical Society* 16 (3): 145–148.

64 Greiner, E.A. (1894). New Automatic Pipette. *Journal of the American Chemical Society* 16 (9): 643–644.

65 Palkin, S., Murray, A.G. und Watkins, H.R. (1925). Automatic devices for extracting alkaloidal solutions. *Industrial and Engineering Chemistry* 17 (6): 612–614.

66 Dennis, L.M. (1913). *Gas Analysis*. New York: Macmillan.

67 Taylor, G.B. und Taylor, H.S. (1922). Automatic Volumetric Analysis Carbon Monoxide Recorder. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 14 (11): 1008–1009.

68 Shakespear, G. und Weaver, E. (1920). Notes and Correspondence: Automatic Methods of Gas Analysis Depending Upon Thermal Conductivity. *Journal of Industrial & Engineering Chemistry* 12 (10): 1027–1028.

69 Holven, A.L. (1929). Experimental application of automatic pH recorders to sugar-refinery alkalinity control. *Industrial & Engineering Chemistry* 21 (10): 965–970.

70 Hickman, K. und Sanford, C.R. (1933). Automatic titrating devices. *Industrial & Engineering Chemistry Analytical Edition* 5 (1): 65–68.

71 Ferguson Jr., B. (1942). Semiautomatic fractionation. A rapid analytical method. *Industrial & Engineering Chemistry Analytical Edition* 14 (6): 493–496.

72 Tamele, M.W., Ryland, L.B. und Irvine, V.C. (1941). Potentiometric determination of mercaptans in aqueous alkaline solutions. *Industrial and Engineering Chemistry* 13 (9): 618–622.

73 Olsen, K.K. (1997). Rosie the robot, laboratory automation and the Second World War, 1941 to 1945. *Laboratory Robotics and Automation* 9 (3): 105–112.

74 Lingane, J.J. (1948). Automatic potentiometric titrations. *Analytical Chemistry* 20 (4): 285–292.

75 Frediani, H.A. (1952). Automatic Karl Fischer titration: Apparatus using dead-stop principle. *Analytical Chemistry* 24 (7): 1126–1128.

76 Kelley, M.T. (1959). Automatic coulometric titrator for the karl fischer determination of water application of the leeds & northrup alternating current-operated pH indicator to the control of titrations. *Analytical Chemistry* 31 (2): 220–221.

77 Olsen, K. (1952). C&EN reports: Pittsburgh conference on analytical chemistry and applied spectroscopy. *Chemical & Engineering News Archive* 30 (11): 1092–1094.

78 Plumb, R.K. (1956). Science in review: Clinical chemists report on new methods and devices in the field of medicine. *New York Times*, 16.11.1956, E13.

79 Durner, J. (2010). Clinical chemistry: Challenges for analytical chemistry and the nanosciences from medicine. *Angewandte Chemie – International Edition* 49 (6): 1026–1051.

80 Rosenfeld, L. (2000). A golden age of clinical chemistry: 1948–1960. *Clinical Chemistry* 46 (10): 1705–1714.

81 Armbruster, D.A., Overcash, D.R. und Reyes, J. (2014). Clinical chemistry laboratory automation in the 21st century – Amat Victoria curam (Victory loves careful preparation). *The Clinical Biochemist Reviews* 35 (3): 143–153.

82 Streitberg, G.S., Angel, L., Sikaris, K.A. und Bwititi, P.T. (2012). Automation in clinical biochemistry: Core, peripheral, STAT, and specialist laboratories in Australia. *Journal of Laboratory Automation* 17 (5): 387–394.

83 Sasaki, M., Kageoka, T., Ogura, K., Kataoka, H., Ueta, T. und Sugihara, S. (1998). Total laboratory automation in Japan: Past, present and the future. *Clinica Chimica Acta* 278 (2): 217–227.

84 Felder, R.A. (2006). The Clinical Chemist: Masahide Sasaki, MD, Ph.D. (August 27, 1933 –September 23, 2005). *Clinical Chemistry* 52 (4): 791–792.

85 Boyd, J. (2002). Robotic Laboratory Automation. *Science* 295 (5554): 517–518.

86 Sasaki, M. (1987). The robotic system of the clinical laboratories. *Rinsho byori – The Japanese Journal of Clinical Pathology* 35 (10): 1072–1078.

87 Felder, R.A. (2007). The lab automation survey demystified. *CAP TODAY*, (online archived at <http://www.captodayonline.com/Archives/surveys/0307LASSurvey.html> (01.12.2016)).

88 Hawker, C.D. und Schlank, M.R. (2000). Development of standards for laboratory automation. *Clinical Chemistry* 46 (5): 746–750.

89 Felder, R.A. (1998). Modular workcells: Modern methods for laboratory automation. *Clinica Chimica Acta* 278 (2): 257–267.

90 Carvalho, M.C. (2013). Integration of analytical instruments with computer scripting. *Journal of Laboratory Automation* 18 (4): 328–333.

91 Burbau, J.J. (1998). Miniaturization technologies in HTS: How fast, how small, how soon? *Drug Discovery Today* 3 (7): 313 –322.

92 Fox, S., Farr-Jones, S. und Yund, M.A. (1999). High throughput screening for drug discovery: Continually transitioning into new technology. *Journal of Biomolecular Screening* 4 (4): 183–186.

93 Pereira, D.A., Williams, J.A. (2007). Review: Historical perspectives in pharmacology. Origin and evolution of high throughput screening. *British Journal of Pharmacology* 152 (1): 53–61.

94 Smith, A. (2002). Screening for drug discovery: The leading question. *Nature* 418 (6896): 453–459.

95 Chapman, T. (2003). Lab automation and robotics: Automation on the move. *Nature* 421 (6923): 661, 663, 665–666.

96 Major, J. (1998). Challenges and opportunities in high throughput screening: Implications for new technologies. *Journal of Biomolecular Screening* 3 (1): 13–17.

97 Mayr, L.M. und Fuerst, P. (2008). The future of high-throughput screening. *Journal of Biomolecular Screening* 13 (6): 443–448.

98 Hertzberg, R.P. und Pope, A.J. (2000). High-throughput screening: new technology for the 21st century. *Current Opinion in Chemical Biology* 4 (4): 445–451.

99 Sundberg, S.A. (2000). High-throughput and ultra-high-throughput screening: Solution- and cell-based approaches. *Current Opinion in Biotechnology* 11 (1): 47 –53.

100 HighTech Business Decisions (2002). *High-Throughput Screening 2002: New Strategies and Technologies – Report; Market Study*. Moraga: HighTech Business Decisions.

101 Hüser, J. (2006). *High-Throughput Screening in Drug Discovery*. Weinheim: Wiley-VCH.

102 Lamb, F. (2013). *Industrial Automation Hands-On. A Practical Guide to Industrial Automation Concepts, Terminology, and Applications*. New York: McGraw-Hill Education.

103 Frey, C.B. und Osborne, M.A. (2013). The Future of Employment: How Susceptible are Jobs to Computerisation? Oxford Martin School, University of Oxford.

104 Rieger, F. (2012). Roboter müssen unsere Rente sichern. *Frankfurter Allgemeine*, (18.05.2012).

