



Voruntersuchung zur Biologischen Transformation der industriellen Wertschöpfung BIOTRAIN

**IDENTIFIZIERTE FORSCHUNGS- UND GESTALTUNGSFELDER IM HANDLUNGSFELD
BIOINSPIRIERTE, BIOBASIERTE DATENVERARBEITUNG**

Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e. V.



NOBELSTR. 12,
70569 STUTTGART



NOBELSTR. 12,
70569 STUTTGART



JOSEPH-VON-FRAUNHOFER-STR. 2-
4,
44227 DORTMUND



WÖHERSTR. 11, 79108 FREIBURG



STEINBACHSTR. 17, 52074 AACHEN



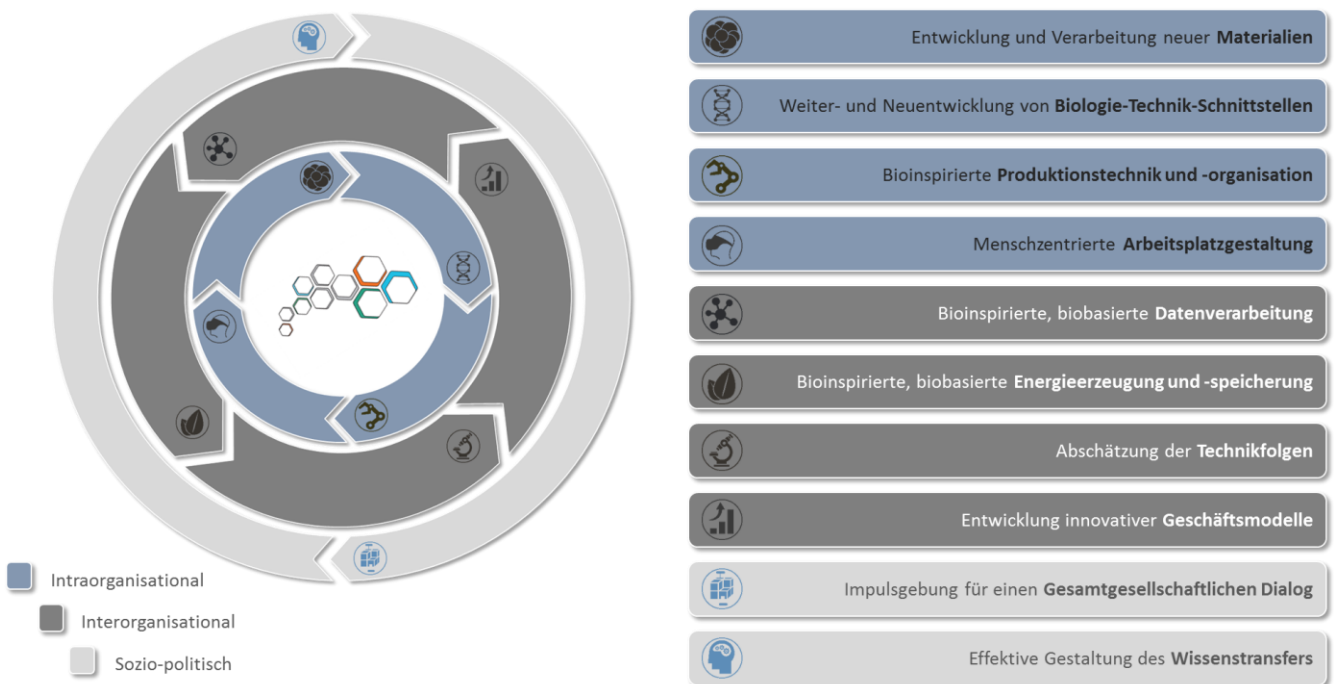
NÖTHNITZER STR. 44, 01187
DRESDEN





Im Rahmen der von der Fraunhofer Gesellschaft durchgeführten und vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Voruntersuchung BIOTRAIN wurden über 100 hochrangige Experten befragt, Workshops mit über 200 Teilnehmern durchgeführt, ein umfängliches Bild über die Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken Deutschlands im internationalen Vergleich gezeichnet, über 250 Technologiebeispiele gesammelt, ausgewählte Use-Cases entwickelt, die nötigen Basis- und Befähigertechnologien identifiziert und bewertet sowie über 200 Forschungs- und über 150 Gestaltungsthemen identifiziert, die die industrielle Wertschöpfung, ausgehend vom Hochtechnologiestandort Deutschland maßgeblich verändern werden.

Eine Einbindung aller Stakeholder-Gruppen (Industrie, Staat und Gesellschaft) in dieser frühen Phase der biologischen Transformation war eines der Ziele der Voruntersuchung und diente zur Identifikation der konkreten Bedarfe dieser Entwicklung. Neben einem großen Interesse an der Thematik wurden in den durchgeführten Akteursworkshops die wesentlichen Handlungsfelder der biologischen Transformation der industriellen Wertschöpfung identifiziert. Diese können in insgesamt zehn intraorganisationale, interorganisationale und gesellschaftliche/politische (sozio-politische) Handlungsfelder unterteilt werden:



Innerhalb der zehn wesentlichen Handlungsfelder konnten durch die Voruntersuchung BIOTRAIN die wesentlichen Forschungs- und Gestaltungsmaßnahmen ermittelt werden, mit denen eine biointelligente Wertschöpfung realisiert werden kann.



Inhalt

1	Einleitung.....	4
2	Stand der Technik	5
3	Forschungsthemen.....	6
4	Gestaltungsthemen	9
5	Zusammenfassung und Fazit	10
	Literaturverzeichnis.....	11



1 Einleitung

Datenverarbeitung ist aus technologischer Sicht eines der bedeutendsten Handlungsfelder für die Umsetzung der Biologischen Transformation. Die Digitalisierung wird als die wichtigste Grundvoraussetzung zur Realisierung biointelligenter Systeme gesehen. Aktuell scheint keine andere Technologie vorhersehbar, die eine umfangreiche Vernetzung und Informationsaustausch zwischen den einzelnen Elementen – ob Mensch, Material oder Maschine – in der Welt ermöglichen kann. Dadurch erscheint eine Komplexitätsbewältigung und Schaffung von sich selbst regulierenden biologisch-technischen Systemen möglich zu werden - eine der größten Herausforderungen der Biologischen Transformation.

Zwei Aspekte können im Handlungsfeld Datenverarbeitung dabei unterschieden werden: Die Digitalisierung als Enabler und Werkzeug zur Umsetzung einer biologischen Transformation und insbesondere auf dem Weg dahin und die Biologisierung der Informationsverarbeitung selbst – sowohl was bioinspirierte Algorithmen angeht als auch Hardware auf Basis von biologischen Molekülen und Werkstoffen.



2 Stand der Technik

Bereits heute sind Informationstechnologien die wichtigsten Treiber in der biologischen Forschung und Entwicklung (NCBI 2012, Paul 2018, May 2017). Die komplexe Vielfalt und die enormen Datenmengen sind die Herausforderungen, denen man heute nur mit Werkzeugen aus der IT begegnen kann.

Das Grundgerüst für die Datenverarbeitung ist heute eine durchgehende Digitalisierung von technischen Systemen. Dazu gehören sowohl die Erfassung als auch die Vernetzung von Material-, Produkt- und Prozessinformationen in der Produktion und während der Produktnutzung bzw. über den gesamten Lebenszyklus (PWC 2016). Nach der Vernetzung von Informationen im World Wide Web ist die Digitalisierung und informationstechnische Vernetzung aller Elemente von Prozessen das große Thema in der industriellen Wertschöpfung (Industrie 4.0) (Sendler 2018). Beide schaffen die technischen Voraussetzungen für die Datenverarbeitung und Vernetzung in der Biologischen Transformation und im Handlungsfeld Biologie-Technik-Schnittstelle (Byrne 2018). Es entsteht eine große Menge und Breite an Informationen, die einen tieferen Einblick in die Einflüsse und Wechselwirkungen zwischen Biologie und Technik geben und sich für die Steuerung nutzen lassen.

Damit können Elemente oder Systeme in ihrem Zusammenhang analysiert werden und analog zu einem Subjekt, das Einflüssen in der Umwelt ausgesetzt ist und darauf reagiert, gesehen werden. Erst dadurch sind die technischen Voraussetzungen geschaffen, Systeme zu designen, die Eigenschaften haben oder entwickeln, die typischerweise mit lebenden Systemen aus der Biologie verbunden werden: Wachstum, Entwicklung, Reizbarkeit, Austausch mit der Umgebung usw. Solche Systeme sind in der Lage durch Selbstanpassung Merkmale zu entwickeln, um „fitter“, also robuster und stabiler zu sein. Dafür müssen sie sowohl die Fähigkeit besitzen, Informationen zu speichern, als auch auf Erfahrungen zurückgreifen können, die sich aus dem Austesten eines möglichst großen Parameterraums ergeben. Das Internet of Things (Internet der Dinge, IoT) – bereits jetzt zum Internet of Everything (Internet von Allem, IoE)(Evans 2012) erweitert –, stellt heute bereits ein technologisches Ökosystem dar, in dem biologisch inspirierte Algorithmen und Prinzipien funktionieren können.



3 Forschungsthemen

Im Themenfeld bioinspirierte und/oder biobasierte Datenverarbeitung wurden sowohl neue Algorithmen und Kommunikationsmechanismen mit Vorbild in der Biologie („Software“) (Dalchau 2018, Kar 2016, Navlakha 2011) als auch visionäre Ansätze einer Datenspeicherung und -verarbeitung mittels biologischer Strukturen („Hardware“) (Bonnet 2013, Lv 2018) gesehen. Gleichzeitig wurde bereits festgestellt, dass die Natur im Bereich Informationsverarbeitung und -weiterleitung keineswegs nur überlegene Konzepte bereithält, sondern eine mathematisch begründete Abstraktion für eine erfolgreiche oder gar überlegene Implementierung in der Technik erforderlich ist (Biotrain 2018).

Erst durch eine durchgehende digitale Repräsentation und Vernetzung aller Teile eines Systems werden die technischen Voraussetzungen geschaffen, Elemente oder Systeme in einem Zusammenhang betrachten und behandeln zu können. Dafür muss die Modellierung und Simulation von biologischen Prozessen und Systemen angesichts der unübersehbaren Komplexität parallel zur klassischen biologischen und Ökosystemforschung vorangetrieben werden. Obwohl große Fortschritte in der Molekularbiologie ein tiefgreifendes Verständnis geliefert haben, wie Informationen aus dem Genom durch chemische Reaktionen umgesetzt werden, bleibt ein umfassendes Verständnis biologischer Phänomene auf der nächsthöheren Ebene noch weitgehend offen. Dies beginnt schon auf dem Niveau einzelner Zellen und Zellverbände – wie entsteht die beobachtete räumliche und zeitliche Ordnung und Struktur, wie funktioniert die Kommunikation und „Gedächtnis“ usw.? Offensichtlich spielen hier Informationsprozesse die entscheidende Rolle, für die die einzelnen chemischen Prozesse charakterisiert sind, geeignete theoretische Modelle für die Beschreibung des Informationsflusses und -managements jedoch fehlen (Nurse 2008). Dies wird und kann bisher nicht ausreichend durch einzelne Disziplinen bearbeitet werden – eine echte multidisziplinäre Zusammenarbeit von Wissenschaftlern aus der Informationstheorie, Mathematik, Physik, Chemie, Computervissenschaften und Biologie ist dafür gefordert. Inwieweit die biologische Organisation und der Informationsfluss auf der Ebene von Gruppen von Individuen oder in Ökosystemen Gemeinsamkeiten mit den Prozessen auf niedrigerer, zellulärer Ebene teilen, ist ebenfalls nicht verstanden. Die Forschung wird zwangsläufig ergeben, dass Leben nicht durchweg intelligent designt und sich oft redundant und übermäßig komplex entwickelt hat. Dies macht es schwerer, die grundlegenden Prinzipien zu abstrahieren. Eine Umsetzung in der Technik muss diese Unterschiede berücksichtigen.

Durch eine zunehmende Sensorisierung von Produktionsabläufen, aber auch von Produkten entstehen technologische „Ökosysteme“, deren Entwicklung und Stabilität kontrolliert werden will. Ein biointelligentes Systemdesign nutzt die fundamentalen systemischen Prinzipien der Natur für die Gestaltung und Steuerung solcher Gleichgewichte (Kitano 2004). Im Produktionskontext kann das in kognitiven Maschinen und Prozessen realisiert werden, die miteinander kommunizieren und sich selbst optimieren bzw. an Veränderungen anpassen (Ueda 1997).

Durch neue Mensch-Maschine-Schnittstellen wird auch der Mensch in digitale, technische Ökosysteme einbezogen. Es wird deutlich, dass für die Forschung in diesem Bereich starke Interdisziplinarität erforderlich ist – eine Aufgabe und Herausforderung, der sich die klassischen, in abgetrennten Domänen agierenden Wissenschaften stellen müssen. Durch die Digitalisierung von Technik und Gesellschaft entstehen gigantische Datenströme und -mengen, deren Komplexität durch die heutige Technik und Methoden der Informatik kaum mehr bewältigt oder effektiv genutzt werden können. Dynamische Problemstellungen, wechselnde Randbedingungen, fehlerhafte oder unvollständige Datensätze und ungenügende Rechnerleistungen sind neue



Herausforderungen in der Entwicklung datengetriebener Lösungen und im Aufbau und der Kontrolle großer Netzwerke. Intelligente bio-inspirierte Algorithmen können Lösungen für effektive und dezentrale Kommunikations- und Steuerungsmechanismen in solchen technischen Ökosystemen liefern. Dieses Forschungsfeld wird heute dominiert von der Entwicklung künstlicher Intelligenz. Die Forschung konzentriert sich bisher auf wenige Algorithmen, deren Ursprünge bis in die 1970er bis 90er Jahre zurückreichen. Dazu gehören zum Beispiel Neuronale Netze, Genetische Algorithmen, Partikel-Schwarm- und Ameisen-Kolonie-Optimierung. Paradigmen biologischer Netzwerke wurden erfolgreich für die Modellierung und Steuerung von technologischen Netzwerken angewendet und bieten das Potential mit komplexen und sehr großen Netzwerken umzugehen (Dressler 2010). Neueste Algorithmen, die gegebenenfalls überlegenere Lösungen liefern, finden dagegen noch wenig Eingang in den Anwendungsgebieten (Kar 2016). Die Natur dient als Ideengeber und eine Abstraktion in mathematische Modelle und Algorithmen ermöglicht dann den Transfer in Anwendungen. Ein sehr enges Zusammenwirken der Mathematik und den anderen Natur- und Ingenieurwissenschaften ist daher notwendig, um im Bereich Informations- und Datenverarbeitung und -übermittlung die Erkenntnisse aus der Biologie in technischen Umgebungen rasch umzusetzen (ESMTB 2018).

Für eine umfassende mathematische Beschreibung der biologischen Vorbilder und ein ausreichendes Verständnis und damit eine technologische Umsetzung und Nutzung der Prinzipien der Informationsverarbeitung im Gehirn oder die Anwendung von Optimierungsprinzipien der Evolution müssen noch große Forschungsanstrengungen unternommen werden. Eine Stärkung der Verfahren und Techniken, die die besonderen kognitiven Fähigkeiten des Menschen nachahmen sollen, gilt als vielversprechend, z. B. Maschinelles Lernen, insbesondere Deep Learning. Diese Lernverfahren oder unüberwachtes sowie bestärkendes Lernen müssen entsprechend weiterentwickelt werden. Die Entwicklung und Anwendung bioinspirierter Algorithmen ist dabei kein rein von der Informatik getriebenes Forschungsfeld, sondern stark interdisziplinär. Das Einbringen von Domänenwissen ist für intelligente Algorithmen und das Systemdesign essentiell. Die Datenverarbeitung muss daher in allen Wissenschaftsbereichen ein integraler Bestandteil werden, um zwischen den Domänen eine systemische Vernetzung zu ermöglichen. Das ist sowohl durch entsprechende Ausbildungsinhalte als auch durch Schwerpunktsetzungen in der Forschungsagenda zu realisieren.

Die Forschungs- und Entwicklungsbedarfe in den Themenfeldern Datenspeicherung, Datenstrukturen und Datensicherheit sind nicht ursprünglich in der Biologischen Transformation begründet, aber aufgrund der großen Datenmengen und komplexen Verknüpfungen in Systemen sind sie von großer praktischer Bedeutung für ihre Umsetzung (SAP 2017). Die Themen Datensicherheit, insbesondere auch Distributed Ledger Technologien (auch unter Blockchain bekannt) sind hochrelevant für Systeme, die sich biologische Systeme nutzbar machen oder Schnittstellen zum Menschen aufweisen (Prinz 2017). Von sehr praktischer Bedeutung ist die Entwicklung von Datenstrukturen auf Basis von Ontologien, die eine nachhaltige Datennutzung und Verarbeitung über Domänengrenzen hinweg ermöglichen. Erst durch eine dauerhafte Nachnutzung kann der immense Aufwand für eine langfristige Datenspeicherung gerechtfertigt werden.

Bioelektronik oder Biocomputing wurden im Zusammenhang mit dem Thema Datenverarbeitung ebenfalls genannt. Bioinspirierte oder biobasierte Hardware sind auf Molekülen basierende Systeme, deren Entwicklung sich derzeit noch in der Anfangsphase befindet (Bonnet 2013, Lv 2018). Sie sind theoretisch zu extrem hohen Rechenleistungen und Speicherkapazitäten in der Lage (Church 2012, Daniel 2013). Neuronale Chips, DNA-Computing, programmierbare Zellennetzwerke etc. haben intensiven Forschungs- und Entwicklungsbedarf an den Schnittstellen, z. B. beim



Auslesen von Informationen. Es ist jedoch ein Forschungsfeld, das disruptive Innovationen hervorbringen kann.





4 Gestaltungsthemen

Für Politik und Industrie ergibt sich eine Vielzahl von Gestaltungsthemen im Themenfeld Datenverarbeitung, die zwar für die Biologische Transformation von Bedeutung sind, aber größtenteils heute bereits durch andere Bereiche getrieben werden. Die informationstechnische Vernetzung ist das große Thema in der Digitalisierung der industriellen Wertschöpfung (Industrie 4.0) (Sendler 2018) und im Handlungsfeld Biologie-Technik-Schnittstelle (Byrne 2018). Beide schaffen die technischen Voraussetzungen für die Datenverarbeitung und Vernetzung in der Biologischen Transformation und sind mit entsprechendem Nachdruck voranzutreiben (Hintermann 2017, BMVI 2018, BR 2018b).

Der weitere Ausbau der informationstechnischen Infrastruktur ist Voraussetzung für eine weitreichende informationstechnische Vernetzung in der Industrie und die Priorisierung muss aufrechterhalten werden (BR 2018b, BMVI 2017). Datenschutz, Datentransparenz und Standards in der Datenverarbeitung sind regulatorische Aufgaben, die allerdings schneller und besser im Takt mit den fortschreitenden Entwicklungen erledigt werden müssen. Dies bezieht sich auf integrierte personenbezogene Daten und Daten von übergeordnetem Interesse, z. B. bei veränderten Organismen. Dies gilt gleichermaßen auch für Daten, die mit Künstlicher Intelligenz erzeugt werden. Ethische Fragestellungen müssen beantwortet werden, beispielsweise wie algorithmenbasierte Entscheidungen getroffen werden und welche Verantwortlichkeiten daraus resultieren (Lacroix 2018). Das bezieht sich auch auf moralische Fragen zur Einsetzbarkeit von Künstlicher Intelligenz. Die bisher vorgestellten Aktivitäten zielen auf Herausforderungen, die bereits in Gesellschaft und Industrie angekommen sind (BR 2018a). Notwendig ist eine vorausschauende Wahrnehmung und Arbeit an relevanten Fragestellungen, um bereits die technologischen Entwicklungen mit rechtlichen und ethischen Leitlinien begleiten zu können. Dazu müssen neben der Biologie und Informatik auch die Gesellschaftswissenschaften zusammenarbeiten – eine besondere Herausforderung insbesondere für die bisher oft disparat agierenden einzelnen Wissenschaften. Die Digitalisierung bietet eine gemeinsame Schnittstelle.

Auf die Industrie kommt mit der Biologischen Transformation die Herausforderung zu, Prozesse und Systeme durch entsprechende Auslegungen biointelligent und nachhaltig zu gestalten, z. B. durch eine Vernetzung und Steuerung der betrieblichen Abläufe mit entsprechenden Algorithmen. Dies hat jedoch eine umfassende Vernetzung und Digitalisierung zur Voraussetzung - dazu müssen sich die Unternehmen einem Kulturwandel stellen, der bereits ohne komplexe Anleihen aus der Natur eine Herausforderung darstellt (PWC 2016). Die informationstechnische Vernetzung von Prozessen und Maschinen, die durch die Transformation im Zug von Industrie 4.0 bereits gestartet ist, muss daher umfänglich weitergetrieben werden. Die nächsten Schritte sind die Integration von biologischen Modellen und biostatistischen Verfahren mit klassischen betriebswirtschaftlichen und mechanistischen bzw. prädiktiven Modellen (hybrider Ansatz), die z. B. eine verständliche algorithmenbasierte Entscheidungsunterstützung, Prozesssteuerung oder Lebensdaueranalyse ermöglichen. Das ergibt neue Indikatoren für industrielle und organisatorische Prozesse, die sich heute einer einfachen betriebswirtschaftlichen Rechnung noch entziehen, aber die Chance bieten, auch systemische Aspekte, wie Nachhaltigkeitsaspekte, Umweltauswirkungen usw. einzubinden.



5 Zusammenfassung und Fazit

Datenverarbeitung – das umfasst sowohl Hardware als auch Software- und System-Aspekte – ist ein zentraler Aspekt in der Biologischen Transformation. Dennoch ist das Thema nicht originär in der Biologischen Transformation verankert, sondern wird bereits in anderen Feldern vorangetrieben. Die Relevanz für die Biologische Transformation unterstreicht die Bedeutung der Anstrengungen in Politik, Gesellschaft und Wirtschaft, die Digitalisierung aktiv zu gestalten (BMVI 2017, BR 2018a, BR 2018b, BR 2018c, PWC 2016).

Ein zentraler Punkt ist die umfassende Digitalisierung und Vernetzung von Dingen, Prozessen und Systemen. Erst dadurch werden die Möglichkeiten geschaffen, eine Umgebung zu schaffen, in der neue biologisch-technische Ökosysteme entstehen können. Wichtige Schritte sind dabei ein Ausbau der digitalen Infrastruktur und die Schaffung von Rahmenbedingungen, die sowohl eine solche Vernetzung ermöglichen aber auch absichern:

- Ausbau der informationstechnischen Infrastruktur
- Entwicklung von Regeln für Datenschutz und -transparenz
- Förderung der Entwicklung von Standards im Management und Verarbeitung von Daten
- Einbeziehung der Gesellschaftswissenschaften zur Begleitung der durchgehenden Vernetzung und zunehmender Einbeziehung von Mensch und Gesellschaft in technische Ökosysteme
- Digitalisierung nicht nur systemisch sondern auch objektbezogen denken: Etablierung von digitalen Zwillingen usw.



Literaturverzeichnis

- Biotrain 2018
Hinweise in mehreren Expertenbefragungen, 2018. *Interviews durch den Autor*. Freiburg, 04-05/2018.
- Bonnet 2013
BONNET, Jerome, und andere, 2013. Amplifying genetic Logic Gates. In: *Science* [online]. **340**, S. 599-603 [Zugriff am 20.08.2018]. Verfügbar unter: <http://science.sciencemag.org/content/340/6132/599>
- BMVI 2017
BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR, 2017. *Zukunftsoffensive Gigabit-Deutschland* [online]. Berlin: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur [Zugriff am 03.02.2019]. Verfügbar unter: <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/DG/netzallianz-digitales-deutschland.html>
- BMWi 2017
BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE (BMWi), 2017. *Fortschrittsbericht Industrie 4.0 gestalten* [online]. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) [Zugriff am 21.08.2018]. Verfügbar unter: <https://www.plattform-i40.de/i40/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/i40-gestalten.pdf?blob=publicationFile&v=6>
- BR 2018a
Bundesregierung, 2018: *Koalitionsvertrag. Abschnitte IV. Offensive für Bildung, Forschung und Digitalisierung* [online]. Berlin: Presse- und Informationsamt der Bundesregierung [Zugriff am 21.08.2018]. Verfügbar unter: <https://www.bundesregierung.de/Content/DE/StatischeSeiten/Breg/koalitionsvertrag-inhaltsverzeichnis.html>
- BR 2018b
Bundesregierung, 2018: *Digitalisierung gestalten. Umsetzungsstrategie der Bundesregierung* [online]. Berlin: Presse- und Informationsamt der Bundesregierung [Zugriff am 03.02.2019]. Verfügbar unter: <https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Downloads/Digitalisierung/2018-11-15-Digitalisierung-gestalten.html>
- BR 2018c
Bundesregierung, 2018: *Strategie Künstliche Intelligenz der Bundesregierung* [online]. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie [Zugriff am 04.02.2019]. Verfügbar unter: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Technologie/kuenstliche-intelligenz.html>
- Byrne 2018
BYRNE, Gerald und andere, 2018. Biologicalisation: Biological transformation in manufacturing. In: *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* [online]. **21**, S. 1-32 [Zugriff am 14.08.2018]. Online verfügbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2018.03.003>
- Church 2012
CHURCH, George M, Yuan GAO und Sriram KOSURI, 2012. Next-Generation Digital Information Storage in DNA. In: *Science* [online]. 16.08.2012 [Zugriff am 20.08.2018]. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1126science.1226355>
- Dalchau 2018
DALCHAU, Neil und andere, 2018. Computing with biological switches and clocks. In: *Natural Computing* [online]. [Zugriff am 15.08.2018].



Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1007/s11047-018-9686-x>

- Daniel 2013 DANIEL, Ramiz und andere, 2013. Synthetic analog computation in living cells. In: *Nature* [online]. **497**, S. 619-624 [Zugriff am 15.08.2018]. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1038/nature12148>
-
- Dressler 2010 DRESSLER, Falko und Ozgur B. AKAN, 2010. A survey on bio-inspired networking. In: *Computer Networks* [online]. **54**, S. 881-900 [Zugriff am 27.08.2018]. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2009.10.024>
-
- ESMTB 2018 European Society for Mathematical and Theoretical Biology, 2018: *Beispiel Mathematik – Biologische Wissenschaften* [online]. Dresden: Technische Universität Dresden [Zugriff am 20.08.2018]. Verfügbar unter: <https://www.esmtb.org/news/141-year-of-mathematical-biology-2018>
-
- Evans 2012 EVANS, Dave, 2012. *The Internet of Everything* [online]. San Jose: Cisco Systems, Inc. [Zugriff am 19.08.2018]. Verfügbar unter: https://www.cisco.com/c/dam/global/en_my/assets/ciscoinnovate/pdfs/loE.pdf
-
- Hintermann 2018 HINTERMANN, Ralph und Jens CLAUSEN, 2018. *Bedeutung digitaler Infrastrukturen in Deutschland. Chancen und Herausforderungen für Rechenzentren im internationalen Wettbewerb* [online]. Berlin: Borderstep Institut [Zugriff am 03.02.2019]. Verfügbar unter: https://www.eco.de/wp-content/uploads/dlm_uploads/2018/06/DI_Studie.pdf
-
- Kar 2016 KAR, Arpan Kumar, 2016. Bio inspired computing – A review of algorithms and scope of applications. In: *Expert Systems With Applications* [online]. **59**, S. 20-32 [Zugriff am: 14.08.2018]. Verfügbar unter: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2016.04.018>
-
- Kitano 2004 KITANO, Hiroaki, 2004. Biological Robustness. In: *Nature* [online]. **5**, 826-837 [Zugriff am 14.08.2018]. Verfügbar unter: <http://dx.doi.org/10.1038/nrg1471>
-
- Lacroix 2018 LACROIX, Alexandre, 2018. *Können Maschinen moralisch handeln?* [online]. 20.05.2018 [Zugriff am 27.08.2018]. Verfügbar unter: <https://www.zeit.de/kultur/2018-05/kuenstliche-intelligenz-moral-menschen-maschinen-werte/komplettansicht>
-
- Lv 2018 LV, Ziyu, und andere, 2018. From biomaterial-based data storage to bio-inspired artificial synapse. In: *Materials Today* [online]. **21**, S. 537-552 [Zugriff am 14.08.2018]. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2017.12.001>
-
- May 2017 MAY, Mike, 2017. Companies in the cloud: Digitizing lab operations. In: *Science* [online]. **355**, S. 532-534 [Zugriff am: 21.08.2018]. Verfügbar unter: <http://dx.doi.org/10.1126/science.opms.p1700112>
-
- Navlakha 2011 NAVLAKHA, Saket und Ziv BAR-JOSEPH, 2011. Algorithms in nature: the convergence of systems biology and computational thinking. In: *Molecular Systems Biology* [online]. **7**, S. 546 [Zugriff am 14.08.2018]. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1038/msb.2011.78>



- NCBI 2012
NCBI RESOURCE COORDINATORS, 2013. Resources of the National Center for Biotechnology Information. In: *Nucleic Acids Research* [online]. **41**, S. D8 [Zugriff am 21.08.2018]. Verfügbar unter <https://doi.org/10.1093/nar/gks1189>
- Nurse 2008
NURSE, Paul, 2008. Life, Logic and information. In: *Nature* [online]. **454**, S. 424-426 [Zugriff am 15.08.2018]. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1038/454424a>
- Paul 2018
PAUL, Deborah, Greg RICCARDI and Gil NELSON, 2018. *Insights from Advancing the Digitization of Biodiversity Collections (ADBC)* [online]. [Zugriff am 21.08.2018]. Verfügbar unter https://www.helsinki.fi/sites/default/files/atoms/files/4_deborah_paul_icedig_opening_conference_2018_03_06.pdf
- Prinz 2017
PRINZ, Wolfgang und Axel T. SCHULTE, 2017. *Blockchain und Smart Contracts* [online]. o. O.: Fraunhofer-Gesellschaft [Zugriff am 21.08.2018]. Verfügbar unter: https://www.aisec.fraunhofer.de/content/dam/aisec/Dokumente/Publikationen/Studien_TechReports/deutsch/Fraunhofer-Positionspapier_Blockchain-und-Smart-Contracts.pdf
- PWC 2016
PwC, 2016: *Manufacturing's next big act: Building an industrial digital ecosystem* [online]. New York: PwC [Zugriff am 14.08.2018]. Verfügbar unter: <https://www.pwc.com/us/en/industrial-products/assets/pwc-industrial-digital-ecosystem.pdf>
- SAP 2017
SAP, 2017. *The Path to Digital Innovation* [online]. West Chester Pike: SAP America, Inc. [Zugriff am 13.08.2018]. Verfügbar unter: <https://www.sap.com/documents/2017/12/c20baf6a-e67c-0010-82c7-eda71af511fa.html>
- Sendler 2018
SENDER, Ulrich, 2018. Die Chancen von Industrie 4.0. Berlin: Heinrich-Böll-Stiftung e. V. [Zugriff am 21.08.2018]. Verfügbar unter: https://www.boell.de/sites/default/files/web_161010_e-paper_bb_grordnpol_2_industrie_4_0_v100.pdf
- Ueda 1997
UEDA, Kanji, Jari VAARIO und Kazuhiro OHKURA, 1997. Modelling of Biological Manufacturing Systems for Dynamic Reconfiguration. In: *Annals of the CIRP*. **46**, S. 343-346.